

Ein digitales Geländemodell und einige Anwendungsmöglichkeiten
im Bereich der Flurbereinigung

Von der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Wilhelm Stanger
geboren in Stuttgart

München 1982

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION

Marstallplatz 8, D-8000 München 22

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. F. Ackermann

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Eilfort

Tag der Einreichung: 26. Januar 1981

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 1981

© 1982 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Druck: Gebr. Brunner, 8151 Wangau

ISBN 3 7696 9325 6

ISSN 0065-5325

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	5
<u>Erster Teil</u>	
ERSTELLUNG EINES DIGITALEN GELÄNDEMDELLS	11
2. Datenerfassung	12
2.1 Punktanordnungen bei der Datenerfassung	13
2.2 Verschiedene Verfahren der Datenerfassung	16
2.2.1 Tachymetrische Datenerfassung	16
2.2.2 Photogrammetrische Datenerfassung	17
2.2.3 Digitalisierung von Karten	22
2.3 Punktmengen, Punktdichte	23
3. Interpolation eines digitalen Höhenmodells	24
3.1 Interpolationsaufgabe	24
3.2 Interpolationsmethoden	25
3.2.1 Einfache Interpolationsmethoden	25
3.2.2 Gleitende Flächen	27
3.2.3 Lokale Polynomflächen	28
3.2.4 Stückweise Polynome	32
3.2.5 Analytische Funktionen	33
3.2.6 Finite Elemente	34
3.2.7 Lineare Prädiktion	38
3.2.8 Multiquadratische Methode	44
3.2.9 Vergleich verschiedener Interpolationsmethoden	46
<u>Zweiter Teil</u>	
EINSATZ DES DIGITALEN HÖHENMODELLS ZUR BERECHNUNG ABGELEITETER GRÖS- SEN UND EMPIRISCHE UNTERSUCHUNGEN AM BEISPIEL DER GELÄNDENEIGUNG	49
4. Ein digitales Höhenmodell als Ausgangsinformation zur Berechnung abgeleiteter Größen	49
4.1 Ein digitales Neigungsmodell	50
4.1.1 Definition	50
4.1.2 Ansätze zur rechnerischen Ableitung eines digitalen Neigungsmodells	52
4.1.3 Abspeichern des digitalen Neigungsmodells	58
4.1.4 Berücksichtigung von Bruchkanten im digitalen Neigungsmodell	59
4.1.5 Ableitung von Isolinien aus dem digitalen Neigungsmodell	61
4.1.6 Berücksichtigung von Bruchkanten bei der Ableitung von Isolinien aus dem digitalen Neigungsmodell	63
4.1.7 Anwendungsmöglichkeiten von Gefällstufen- und Expositionskarten	64
4.1.8 Ableitung von Falllinien	64
4.1.9 Ableitung von Neigungsprofilen	66
4.2 Ableitung einer Schummerungsvorlage	67
4.3 Ableitung von Krümmungswerten	70
4.4 Ableitung von Profilen	71
4.5 Berechnung von Massen	71
4.6 Digitale Oberflächenmodellierung	76
5. Empirische Untersuchungen zur Ableitung eines digitalen Neigungsmodells	81
5.1 Bildmaterial und Vergleichsauswertungen	81
5.2 Datenerfassung	82
5.3 Datenaufbereitung	85
5.3.1 Absolute Orientierung der Modelle	85
5.3.2 Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers	86

5.4	Berechnung des digitalen Höhenmodells	90
5.4.1	Behandlung des Überlappungsbereichs zweier Modelle	90
5.4.2	Wahl des Rasterintervalls und der Größe der Recheneinheit	94
5.4.3	Filterparameter und Filterbeträge	94
5.4.4	Überprüfen der Rasterhöhen entlang der Randlinien von Recheneinheiten	96
5.5	Meß- und Rechenaufwand zur Erstellung des digitalen Höhenmodells	96
5.6	Ableitung von Höhenlinien	99
5.7	Ableitung des digitalen Neigungsmodells und von Gefällstufen- und Expositionskarten	105
5.8	Herstellung der zum Vergleich herangezogenen konventionellen Gefällstufenauswertungen	112
5.8.1	Feldaufnahme mit dem Freihandgefällmesser	112
5.8.2	Direkte photogrammetrische Gefällstufenauswertung	117
5.8.3	Ableitung einer Gefällstufenkarte aus Höhenlinien	118
5.9	Vergleich der nach verschiedenen Verfahren hergestellten Gefällstufenkarten	119
5.9.1	Genauigkeitsvergleich	119
5.9.2	Vergleich der Herstellungskosten der Gefällstufenkarte	126
5.10	Ableitung von Profilen	129
5.11	Zusammenfassung	129
	<u>Dritter Teil</u>	
	EINSATZMÖGLICHKEITEN EINES DIGITALEN GELÄNDEMDELLS IM FLURBEREINIGUNGSVERFAHREN UND ZUSAMMENHANG MIT WEITEREN AUTOMATISIERUNGSTENDENZEN	131
6.	Gegenwärtiger Stand der Automation im technischen Verfahren der Flurbereinigung	135
6.1	Beschaffung von Planungsunterlagen	140
6.2	Planung und Ausführung ingenieurbautechnischer Maßnahmen	142
6.3	Berechnung von Massen	143
6.4	Aufmessen des neuen Wege- und Gewässernetzes einschließlich Auswertung	144
6.5	Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke	145
6.6	Ermittlung und Berücksichtigung der Geländeneigung	148
6.7	Zuteilungsentwurf	150
6.8	Zielvorstellung	152
7.	Einsatzmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells im Verfahrensablauf der Flurbereinigung	155
7.1	Beschaffung von Planungsunterlagen	156
7.2	Planung und Ausführung ingenieurbautechnischer Maßnahmen	163
7.3	Berechnung von Massen	173
7.4	Aufmessung des neuen Wege- und Gewässernetzes	174
7.5	Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke	174
7.6	Ermittlung und Berücksichtigung der Geländeneigung	180
7.7	Zuteilungsentwurf und Vorschläge zur Erstellung weiterer digitaler Modelle	191
7.8	Erstellung digitaler Modelle auf der Grundlage von Bewertungen	193
8.	Zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten für die Automation in der Flurbereinigung	194
8.1	Ausweitung des automatischen Datenflusses	195
8.2	Bereitstellung digitaler Planungs- und Bewertungsmodelle	198
8.3	Zusammenfassung	202
	LITERATURVERZEICHNIS	204
	LEBENS LAUF	217

1. Einleitung

Als Folge der stürmischen Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) in den vergangenen drei Jahrzehnten und der dadurch eröffneten neuen Möglichkeiten für exaktere und aufwendigere Rechenverfahren und automatische Verarbeitungsprozesse hat die Digitaltechnik für den gesamten Bereich des Vermessungswesens eine wachsende Bedeutung gewonnen. Mit gewissen zeitlichen Verzögerungen wurden mehr oder weniger sämtliche Teilgebiete des Vermessungswesens wie z.B. die Ingenieurvermessung, die Photogrammetrie, die Landesvermessung, die Kartographie, die Flurbereinigung und die Katastervermessung von ihr beeinflusst. Ein Ende dieser Entwicklung ist im Augenblick noch nicht abzusehen.

1.1 Das digitale Geländemodell (DGM) steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Digitaltechnik insgesamt und der elektronischen Datenverarbeitung im besonderen. Es ist der zentrale Begriff für eine digitale Darstellung des Geländes oder allgemein eines räumlichen Objektes, deren Schwerpunkt auf der Wiedergabe der Geometrie der Geländeoberfläche liegt. Durch diese digitale Darstellung des Geländes wird die automatische Weiterverarbeitung dieser Information mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung ermöglicht.

Vom Begriff her war das digitale Geländemodell in der Vergangenheit nur unklar umrissen, so daß es in verschiedenem Sinn verwendet wurde. Eine Erklärung dafür dürfte darin zu sehen sein, daß der Begriff historisch mit einer ganz bestimmten Anwendung, nämlich der Verkehrswegeplanung, aufkam und zunächst auch auf diesen Anwendungsbereich beschränkt blieb.

Im Jahre 1958 stellten MILLER und LAFLAMME vom Massachusetts Institute of Technology, Cambridge/USA, erstmals ein digitales Geländemodell vor. In ihrer Veröffentlichung darüber prägten sie den Begriff "Digital Terrain Model" (DTM) (MILLER und LAFLAMME |149|). Der Zweck ihres digitalen Geländemodells war es, die neuen Möglichkeiten eines integrierten Systems aus Photogrammetrie und elektronischer Datenverarbeitung für Ingenieuraufgaben im Bereich des Straßenbaus zu erschließen. Neben der Automatisierung lag dabei der Schwerpunkt auf der Objektivierung der Entwurfsgestaltung, wobei auch nicht geometrische Gesichtspunkte einer mathematischen Behandlung zugänglich gemacht werden sollten.

Bei der bis dahin üblichen Entwurfsbearbeitung für ein Straßenprojekt wurde zunächst die Lage der Trasse aufgrund von Voruntersuchungen großräumig nach raumordnerischen, technischen und wirtschaftlichen Kriterien festgelegt. Zur genauen Festlegung der endgültigen Lage der Trasse wurden danach innerhalb eines begrenzten Korridors längs dieser Trasse, der je nach Projekt eine Breite von mehreren hundert Metern haben konnte, verschiedene Trassenvarianten im Detail untersucht und durchgeplant.

Für die Beurteilung der einzelnen Trassenvarianten spielten die Baukosten eine wichtige Rolle, für welche der Umfang der erforderlichen Massenbewegungen stets von großer Bedeutung war. In der Regel wurden die Massen mit Hilfe von Quer-

profilen ermittelt, welche in regelmäßigen Abständen senkrecht zur Trassenachse angeordnet wurden. Dies bedeutete für die Optimierung einer Trassenvariante, daß bei jeder Verschiebung der Trassenachse streng genommen neue Querprofile benötigt wurden.

Der Gedanke von MILLER und LAFLAMME bei der Konzeption ihres digitalen Geländemodells war es nun, die Geländeoberfläche im gesamten Korridor nach einer einmaligen Höhenaufnahme durch eine größere Anzahl ausgewählter Einzelpunkte wiederzugeben, deren x, y, z-Koordinaten in digitaler Form abgespeichert werden. Die Interpolation weiterer Geländehöhen, die z.B. auf die Lage einer vorgegebenen Trassenvariante bezogen sind, wird nicht mehr graphisch im Höhenlinienplan, wie bisher üblich, sondern nach einem vorgegebenen Interpolationsalgorithmus mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung automatisch durchgeführt. Zur Abwägung der Vor- und Nachteile der verschiedenen Trassenvarianten sollten auch noch andere als nur geometrische Informationen, z.B. die Grunderwerbskosten, in das digitale Geländemodell mit einbezogen werden.

In den 60er Jahren wurden verschiedene digitale Geländemodelle konzipiert und programmtechnisch realisiert. Einen Überblick darüber gibt LINKWITZ [130]. Praktisch eingesetzt wurde das digitale Geländemodell zunächst jedoch nur an wenigen Stellen. Ein Grund dafür dürfte gewesen sein, daß der Aufwand für die Entwicklung von Rechenprogrammen, die auf den routinemäßigen Einsatz eines digitalen Geländemodells in der Praxis zugeschnitten sind, anfangs wohl unterschätzt wurde. Zudem machten die damals verfügbaren Rechenanlagen der 1. und 2. Generation Einschränkungen notwendig, da sie mit der begrenzten Kapazität ihrer Kernspeicher und ihrer Rechengeschwindigkeit den großen Punktmengen, die bei der Erstellung und Verarbeitung digitaler Geländemodelle auftraten, und dem Aufwand rechenintensiver Interpolationsmethoden noch nicht gewachsen waren. Auch bei der Datenerfassung gab es Engpässe, da zu diesem Zeitpunkt in der Praxis kaum Datenträger hoher Speichergeschwindigkeit und großer Kapazität verfügbar waren. Die Entwicklung von Geländemodellen konzentrierte sich deshalb nach LINKWITZ [130] zunächst darauf, nach geeigneten mathematischen Funktionen zu suchen, mit denen Ausschnitte aus der Geländeoberfläche rationell beschrieben werden konnten.

Nachdem diese Einschränkungen Ende der 60er Jahre mit der Einführung der Rechenanlagen der 3. Generation und leistungsfähiger Datenregistriergeräte weitgehend aufgehoben waren, erfuhren Theorie, Realisierung und praktische Anwendung des digitalen Geländemodells eine spürbare Belebung.

Inzwischen hat sich der Begriff des digitalen Geländemodells immer mehr von seiner ursprünglichen Anwendung im Verkehrswegebau gelöst und verselbständigt. Seine hauptsächlichlichen Anwendungsbereiche liegen heute neben den nichttopographischen Anwendungen im Verkehrswegebau, im Bereich des Erdbaus für große, flächenhafte Projekte allgemein, der Landschaftsplanung und -gestaltung, der Topographie und der Kartographie. Durch seine digitale Darstellung der Geometrie bzw. anderer Eigenschaften der Geländeoberfläche bildet das digitale Geländemodell eine günstige Grundlage für vielfältige rechnerische Anwendungen auf diesem Gebiet.

1.2 Einige der genannten Anwendungsmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells decken sich mit wichtigen Arbeitsabschnitten im technischen Verfahren der Flurbereinigung. So stellt z.B. im topographischen Bereich die Bereitstellung aktueller, vollständiger und ausreichend genauer Kartenunterlagen eine wesentliche Voraussetzung für die Planungsarbeiten in der Flurbereinigung dar (HEILAND |81|). Großflächige Erdbewegungen sind im vergangenen Jahrzehnt zu einem außerordentlich aufwendigen und stark diskutierten Arbeitsabschnitt in der Rebflurbereinigung geworden. Da das digitale Geländemodell die derzeitigen allgemeinen Automatisierungstendenzen in der Flurbereinigungsverwaltung auf der Grundlage der elektronischen Datenverarbeitung aufnimmt, wird dies seinen praktischen Einsatz in dieser Verwaltung sicherlich erleichtern.

Die Einführung der Automation mittels Lochkartenmaschinen durch die Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg im Jahre 1956 war richtungsweisend für die Flurbereinigungs- und Vermessungsverwaltungen nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland (SCHREYER |182|, STEGMANN |200|, |201|). Sie ermöglichte es, die Flurbereinigungsregister automatisch zu erstellen und die im Verfahren üblicherweise anfallenden vermessungstechnischen Berechnungen automatisch durchzuführen. Diese beiden Aufgabenbereiche waren in den vergangenen Jahren die Haupteinsatzgebiete für die Automation in der Flurbereinigung (LANG |122|, WAHL |217|, |218|).

Neue Impulse für die vermessungstechnischen Arbeiten brachte der Einsatz selbstregistrierender elektronischer Tachymeter und leistungsfähiger Koordinatenregistriergeräte für die photogrammetrische Auswertung. Nachdem darüber hinaus Ende der 60er Jahre die wesentlich leistungsfähigeren Rechenanlagen der 3. Generation zur Verfügung standen, waren die Voraussetzungen geschaffen, um für die vermessungstechnischen Aufgaben Rechenprogramme zu entwickeln, die im Vergleich zu den bisher verwendeten Programmen verfeinerte Ansätze erlaubten und erst mit Hilfe sehr schneller Rechenanlagen vom Umfang her überhaupt bewältigt werden konnten. Dazu gehören sowohl die verschiedenen Block- und Bündelprogramme zur Auswertung photogrammetrischer Messungen als auch die von ACKERMANN |3| vorgeschlagene Übertragung des Prinzips der unabhängigen Modelle auf die tachymetrische Polaraufnahme und die Anwendung von Netzausgleichsprogrammen. Die Einsatzmöglichkeiten derartiger Programmsysteme zur Auswertung großflächiger Polaraufnahmen (GRUNDIG |71|, KRAUS und KRACK |119|) werden in der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg derzeit noch überprüft (KLEIN |98|, SCHREYER |182|).

Einen zweiten Schwerpunkt für die rechnerische Automation in der Flurbereinigung bilden die Zuteilungsberechnungen. Wegen der vielfältigen Faktoren, die nach den Vorschriften des Flurbereinigungsgesetzes bei der Zuteilung der neuen Grundstücke zu berücksichtigen sind, beschränken sich bisherige Untersuchungen für einen automatisierten Zuteilungsentwurf meist auf vereinfachte Verhältnisse (HUPFELD |92|, KROPFF |121|, PELZER |161|, SCHRADER |181|). Ob bzw. wann derartige Programmsysteme praktisch einsetzbar sein werden, läßt sich im Augenblick noch nicht überschauen.

Die Bemühungen der vergangenen Jahre konzentrierten sich deshalb darauf, wenigstens einige Teilabschnitte der Zuteilungsarbeiten automatisch zu bearbeiten. Insbesondere die rechnerische Ermittlung von Flächen aus vorgegebenen Werten (KERSTING |97|) und von Werten aus vorgegebenen Flächen (KLEMPERT |99|) ist heute in der Praxis eingeführt und stellt auch für den manuellen Zuteilungsentwurf ein wesentliches Hilfsmittel dar.

Diese Entwicklungen auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung haben entscheidend dazu beigetragen, daß die umfangreichen Aufgaben einer integralen Flurneuordnung, wie sie sich aus dem Flurbereinigungsgesetz (FlurbG) |55| aus dem Jahre 1953 ergeben, überhaupt erfolgreich bewältigt werden können. Das Gesetz zur Änderung des Flurbereinigungsgesetzes |56| aus dem Jahre 1976 faßt in seinem novellierten § 1 die quantitative Aufgabenausweitung zusammen, die sich bereits unter dem Flurbereinigungsgesetz aus dem Jahre 1953 entwickelte und die heute für eine integrale Flurneuordnung charakteristisch ist. Neben der Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft stellen die Förderung der allgemeinen Landeskultur und die Förderung der Landentwicklung eigenständige Ziele zur Anordnung einer Flurbereinigung dar (DONIÉ |37|, QUADFLIEG |165|, STRÖSSNER |208|).

Gleichzeitig werden heute aber auch höhere qualitative Ansprüche an die Planungen in der Flurbereinigung gestellt. Diese Planungen müssen einer zunehmend kritischer werdenden Einstellung der Teilnehmer selbst, aber auch der zu beteiligenden Behörden und Organisationen und einem verstärkten Umweltbewußtsein insgesamt standhalten. Dazu kommt, daß die zur Bearbeitung anstehenden Flurbereinigungsverfahren in ihrer technischen Durchführung immer schwieriger werden. Dies gilt sowohl für die klassischen Normalverfahren, die weitgehend in topographisch einfach strukturierten und landwirtschaftlich bevorzugten Gebieten begannen und nun zunehmend in schwieriger strukturierte Gebiete vordringen, als auch für die große Anzahl an Verfahren zur Bereitstellung von Land in großem Umfang für Unternehmen nach § 87 FlurbG, in denen die Koordinierung der verschiedenartigen Ansprüche an Grund und Boden meist besonders viel Zeit beansprucht. Nicht zuletzt gilt es aber für die Rebflurbereinigungen, wo den Wünschen der Winzer nach einer mechanischen Bearbeitbarkeit der Weinberge in zunehmend steileren Lagen sehr hohe Baukosten und eine kritischer werdende Haltung des Natur- und Landschaftschutzes wegen der verschiedentlich durchgeführten erheblichen Eingriffe in die Geländeoberfläche und das Landschaftsbild gegenüber stehen.

Im administrativen Bereich führen immer weitergehende gesetzliche Regelungen und Vorschriften ebenso wie eine fortschreitende Arbeitszeitverkürzung zu weiteren Erschwernissen und Verzögerungen im Verfahrensablauf. Gleichzeitig wird von politischer Seite die Forderung erhoben, die Flurbereinigungsverfahren zu beschleunigen und die Flächenleistung zu steigern. Nachdem es im Augenblick zumindest in Baden-Württemberg nicht realistisch erscheint, auf eine angemessene Aufstockung des Personals zu hoffen, verbleibt für die Flurbereinigungsverwaltung nur der Weg, wie bisher sämtliche Möglichkeiten der Rationalisierung und der Automation auszuschöpfen. Vielleicht gelingt es dadurch, wenigstens einen Teil der angeführten Verzögerungen wieder auszugleichen.

Langfristiges Ziel für das technische Verfahren in der Flurbereinigung muß es sein, eine geschlossene Automationskette zu schaffen, die sämtliche wichtigen Abschnitte über das gesamte Verfahren hinweg abdeckt. Mehrere wichtige Glieder dieser Automationskette wurden in den vergangenen zweieinhalb Jahrzehnten erstellt. Die bestehenden Lücken gilt es nun Zug um Zug zu schließen.

Eine dieser Lücken besteht derzeit noch bei der automatischen Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der geometrischen Informationen über die Geländeoberfläche. Dazu gehören neben der Geländehöhe auch aus der Höhe abgeleitete Größen, wie z.B. die Geländeneigung oder Erdmassen. Eine weitere interessante Anwendungsmöglichkeit der Höheninformation eröffnet sich durch die digitale Oberflächenmodellierung für die Rebflurbereinigung.

Zentrales Verbindungselement und Ausgangspunkt dieser verschiedenen rechnerischen Anwendungsmöglichkeiten der Höheninformation ist das digitale Geländemodell. Auf seine Information greifen die verschiedenen Anwenderprogramme zurück, was insbesondere bei mehrfachen Wiederholungsläufen für Variantenberechnungen oder die Optimierung eines Projektes von großer Bedeutung ist.

1.3 Vor diesem Hintergrund ergibt sich als Aufgabenstellung für die vorliegende Arbeit, die Anwendungs- und Einsatzmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells im technischen Verfahren der Flurbereinigung zu untersuchen und Vorschläge für seinen praktischen Einsatz zu erarbeiten. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf den Anwendungsmöglichkeiten der Höheninformation eines digitalen Geländemodells und daraus abgeleiteter Größen.

Empirische Untersuchungen zum praktischen Einsatz der Höheninformation eines digitalen Geländemodells im Flurbereinigungsverfahren werden am Beispiel der Geländeneigung durchgeführt. Diese hat in den vergangenen Jahren durch die zunehmende Mechanisierung in der Landwirtschaft für das Flurbereinigungsverfahren an Bedeutung gewonnen. Sie wird deshalb bei der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg in bewegtem Gelände meist routinemäßig mit dem Freihandgefällmesser bestimmt.

Nachdem das digitale Geländemodell in der Flurbereinigungsverwaltung bisher kaum eingesetzt wird, erscheint es sinnvoll zu sein, vorweg allgemein auf die Erzeugung eines digitalen Geländemodells einzugehen. Im ersten Teil dieser Arbeit werden deshalb die Grundlagen für die Erstellung eines digitalen Geländemodells behandelt. Dazu werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten der Datenerfassung zur Erzeugung eines digitalen Geländemodells beschrieben. Auf welche Art und Weise aus den ursprünglich erfaßten Geländepunkten weitere Geländehöhen rechnerisch abgeleitet werden können, wird durch einen Vergleich der verschiedenen, bisher zur Höheninterpolation verwendeten Interpolationsmethoden dargestellt.

Im zweiten Teil wird untersucht, welche weiteren Informationen über die Geometrie der Geländeoberfläche aus den Höhenwerten des digitalen Geländemodells rechnerisch abgeleitet werden können. Im Hinblick auf einen Einsatz im Flurbereinigungsverfahren liegt dabei der Schwerpunkt auf der Ableitung der Gelände-

neigung, der Berechnung von Erdmassen und der digitalen Oberflächenmodellierung. Auf der Grundlage des Höhenlinienprogramms SCOP, an dessen Erstellung der Autor beteiligt war (STANGER |196|, |198|, |199|), wird ein Rechenprogramm zur automatischen Ableitung der Geländeneigung entwickelt. Die damit abgeleiteten Gefällstufen- und Expositionskarten werden anhand praktischer Beispiele aus der Flurbereinigungsverwaltung hinsichtlich Genauigkeit, Vollständigkeit und Herstellungsaufwand mit den bisher üblichen, konventionellen Herstellungsverfahren verglichen und kritisch gewürdigt.

Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells im Flurbereinigungsverfahren werden im dritten Teil behandelt. Dabei wird der hier vorgeschlagenen rechnerischen Bearbeitungsweise die bisher übliche Bearbeitungsweise des jeweiligen Verfahrensabschnittes gegenüber gestellt. Neben den verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der Höheninformation z.B. zur Ableitung der Geländeneigung, zur Massenberechnung und zur digitalen Oberflächenmodellierung wird die rechnerische Verarbeitung weiterer Informationen untersucht, die zum digitalen Geländemodell zu rechnen und gleichzeitig für das Flurbereinigungsverfahren von Bedeutung sind. Dazu zählen z.B. die Ergebnisse der Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke, die Bodenarten und die tatsächliche bzw. planerisch vorgesehene Bodennutzung,

Zukünftige Perspektiven für die Automation in der Flurbereinigung schließen die Arbeit ab. Auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells zeichnen sich Möglichkeiten ab, digitale Planungs- und Bewertungsmodelle zu entwickeln, die zu qualifizierteren Aussagen bei der Bewertung verschiedener Planungsvarianten führen. Als Entscheidungshilfen für eine immer komplizierter werdende Entscheidungsfindung bei wichtigen, großräumigen Planungen werden digitale Planungs- und Bewertungsmodelle zunehmend an Bedeutung gewinnen. Wenn auch demjenigen, der eine Entscheidung letztlich zu treffen hat, diese nicht abgenommen werden kann, so besteht doch die Hoffnung, daß komplexe Entscheidungen durch derartige Entscheidungshilfen auf einer vergleichsweise objektiveren Grundlage getroffen werden können.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. F. Ackermann für seine freundliche Unterstützung dieser Arbeit und seine wertvollen Hinweise herzlich danken. Mein Dank gilt auch dem Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg für die freundliche Überlassung von Unterlagen zur Untersuchung von Gefällstufenkarten und seinem Präsidenten, Herrn Professor Dr.-Ing. H. Eilfort, für seine zahlreichen Anregungen und Hinweise.

Erster Teil

ERSTELLUNG EINES DIGITALEN GELÄNDEMDELLS

Wenn auch der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem praktischen Einsatz des digitalen Geländemodells im Flurbereinigungsverfahren liegt, erscheint es aus zwei Gründen sinnvoll zu sein, vorweg einige grundlegende Fragen zu erörtern, die im Zusammenhang mit der Erstellung eines digitalen Geländemodells stehen: Erstens wird das digitale Geländemodell in den Flurbereinigungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland bisher noch nicht routinemäßig eingesetzt. Erste Überlegungen in dieser Richtung, verbunden mit Untersuchungen, werden bei der bayerischen Flurbereinigungsverwaltung derzeit angestellt (EBNER und REISS [42], ZIPPELIUS [236]). Zweitens wird auch bei den Veröffentlichungen, die über einen praktischen Einsatz des digitalen Geländemodells z.B. im Bereich des Straßenbaus oder der topographischen Höhenauswertung berichten, meist nur schwerpunktmäßig auf einige Teilaspekte eingegangen, die im Zusammenhang mit der speziellen Anwendung oder dem angewandten Interpolationsverfahren stehen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird deshalb ein allgemeiner Überblick über die Erstellung eines digitalen Geländemodells am Beispiel eines digitalen Höhenmodells gegeben. Die wichtigsten Arbeitsabschnitte enthält das Blockdiagramm der Abbildung 1-1.

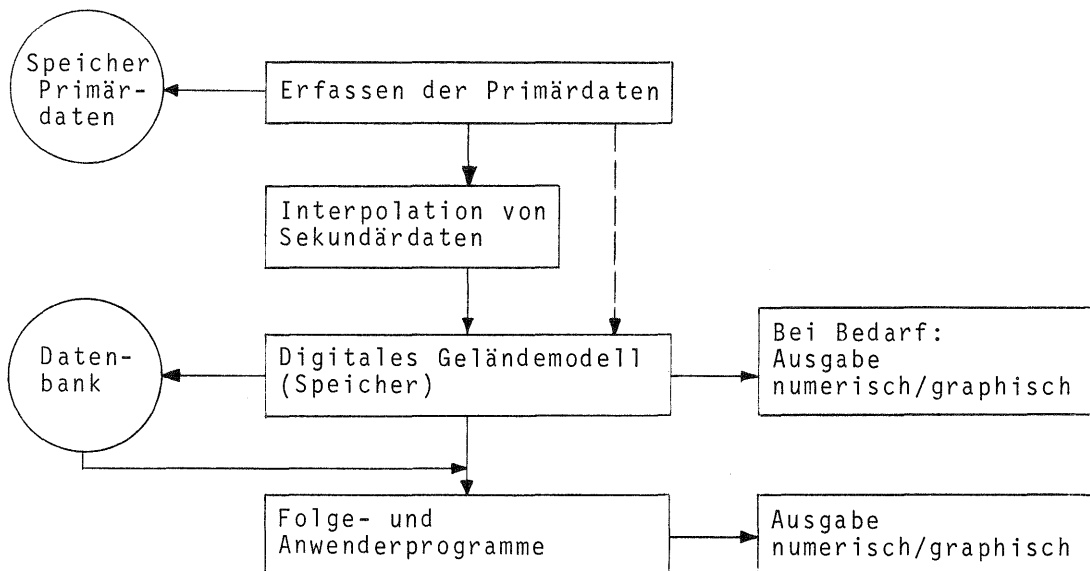


Abb. 1-1 Erstellung und Anwendung eines digitalen Geländemodells

Die Datenerfassung, die im 2. Kapitel behandelt wird, geht zunächst auf die verschiedenen Punktanordnungen der Primärdaten zur Beschreibung einer Fläche ein. Die praktische Durchführung der Datenerfassung wird am Beispiel der photogrammetrischen und tachymetrischen Datenerfassung sowie der Digitalisierung von Karten erläutert. Die Punktmengen, die bei der Datenerfassung normalerweise anfallen, werden für einige Methoden abgeschätzt.

Im 3. Kapitel wird auf die wichtigsten Interpolationsmethoden eingegangen, die bisher für die Berechnung digitaler Geländemodelle verwendet werden. Dabei wird versucht, die verschiedenen Ansätze zu klassifizieren, ihre Vor- und Nachteile aufzuzeigen und auf ihre Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit kurz einzugehen.

Wie bereits erwähnt, wurde der Begriff des digitalen Geländemodells bisher nicht einheitlich verwendet. Ebenso wenig sind die anderen Begriffe, die im Zusammenhang mit einem digitalen Geländemodell verwendet werden, bisher eindeutig definiert. In dieser Arbeit werden die verschiedenen Begriffe entsprechend der Empfehlung des Arbeitskreises "Numerische Photogrammetrie" der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie (STEPHANI |202|) wie folgt verwendet:

- Als "digitales Höhenmodell" (DHM) bezeichnet man die Menge der digital gespeicherten Höhenwerte, die als Funktion der Lage der Punkte die Höhenstruktur des Objektes hinreichend repräsentieren...
- Das "digitale Situationsmodell" (DSM) umfaßt die digitale Speicherung der gemeinhin als Grundriß (= Situation) bezeichneten Information. Hier ist jedem Grundrißelement (z.B. x, y-Rasterelement) eine ganz bestimmte Grundrißinformation zugeordnet...
- Das "digitale Geländemodell" (DGM) umfaßt inhaltlich sowohl das digitale Höhenmodell (DHM) als auch das digitale Situationsmodell (DSM). Mit digitalem Geländemodell bezeichnet man die digitale Speicherung sämtlicher Informationen über die Geländeoberfläche, wobei sowohl Elemente des Grundrisses als auch die Oberflächenform (Topographie) Berücksichtigung finden.

2. Datenerfassung

In den vergangenen zwei Jahrzehnten entstanden verschiedene Rechenprogramme zur Interpolation digitaler Höhenmodelle. Einige waren für einen ganz bestimmten Anwendungsbereich konzipiert. Diese speziellen Anwendungen, wie z.B. die Massenberechnung im Straßenbau, die Orthophotoherstellung oder die Ableitung kartographisch hochwertiger Höhenschichtlinien, legten meist eine bestimmte Art der Datenerfassung nahe. Die Datenerfassung wird in diesem 2. Kapitel nur insoweit behandelt, als verschiedene Interpolationsprogramme danach klassifiziert werden können, ob sie an die Datenerfassung bestimmte Anforderungen stellen. Daß von der Güte der Datenerfassung auch die Genauigkeit eines digitalen Höhenmodells entscheidend abhängt (ACKERMANN |4|, RÜDENAUER |172|), soll somit nicht im Vordergrund der Überlegungen stehen.

Aus den bisher angewandten Arten der Datenerfassung in Form der Tachymetrie, der Photogrammetrie oder der Digitalisierung graphischer Vorlagen kristallisieren sich zwei verschiedene Strategien zur Gewinnung der Primärdaten heraus: Entweder werden

- möglichst wenige, dafür um so qualifiziertere Punkte oder
- möglichst viele, aber weniger qualifiziertere Punkte

erfaßt. Die erste Art der Datenerfassung gilt weitgehend für die tachymetrische Geländeaufnahme, die zweite mehr für die automationsfreundlichen Verfahren der

Photogrammetrie. Neben der Qualifikation des einzelnen Punktes ist somit auch die Datenmenge der Primärdaten angesprochen.

Eine detaillierte Untersuchung der beiden Strategien liegt bisher nicht vor. Von allgemein einsetzbaren Rechenprogrammen muß deshalb erwartet werden, daß sie verschiedenartig erfaßte Daten verarbeiten können.

Die technologischen Voraussetzungen für die digitale Datenerfassung, aber auch für die Erstellung eines digitalen Höhenmodells insgesamt sind heute erfüllt. Als Hardware-Komponenten sind leistungsfähige Datenerfassungsgeräte, Rechner unterschiedlicher Kapazität und genaue Zeichenautomaten oder schnelle Plotter verfügbar und vielfach auch schon im praktischen Einsatz (Abb. 2-1). Auf der Seite der Software existieren zur Erzeugung digitaler Höhenmodelle verschiedene Programmsysteme, die für einen routinemäßigen Einsatz in der Praxis durchaus geeignet sind. In verschiedenen Fällen ist auch bereits Software für eine rechnergestützte photogrammetrische Datenerfassung (z.B. "composite sampling", MACAROVIC [135]) oder die Digitalisierung kartographischer Vorlagen (z.B. WEBER [222]) konzipiert worden bzw. vorhanden.

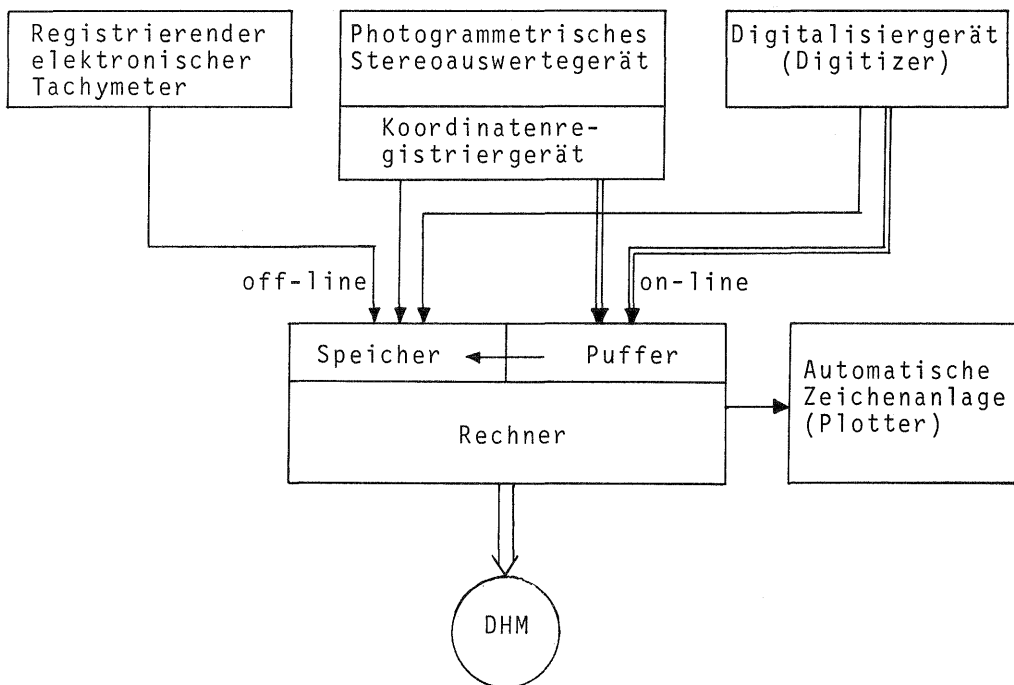
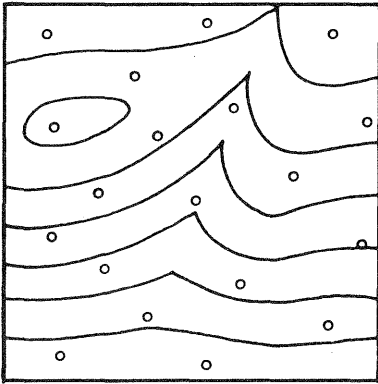


Abb. 2-1 Hardware-Komponenten zur Erzeugung eines digitalen Höhenmodells

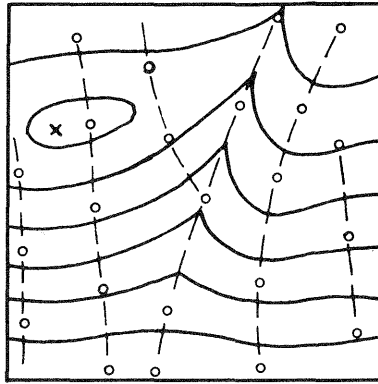
2.1 Punktanordnungen bei der Datenerfassung

Die digital zu erfassenden Geländepunkte lassen sich in zwei Gruppen einteilen: In Einzelpunkte, die Flächen beschreiben und in linienweise angeordnete Daten, die geomorphologisch bedeutsame Geländestrukturen wiedergeben. Die beiden Gruppen lassen sich wie folgt unterteilen (Abb. 2-2):

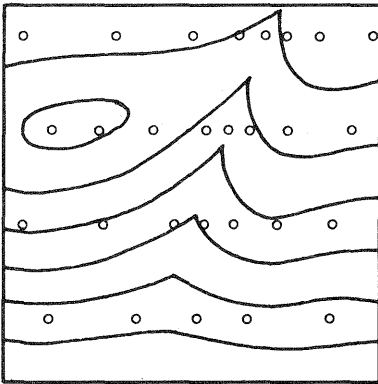
Datenerfassung durch ...



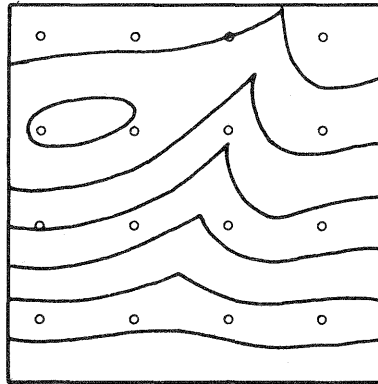
Unregelmäßig verteilte
Einzelpunkte



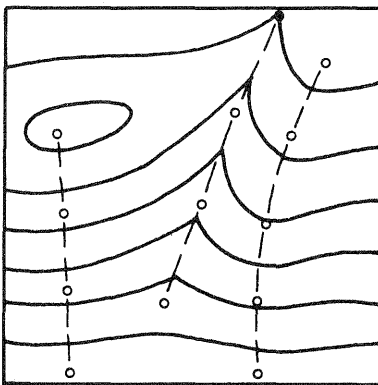
Beliebige Profile und
ausgezeichnete Höhen-
punkte



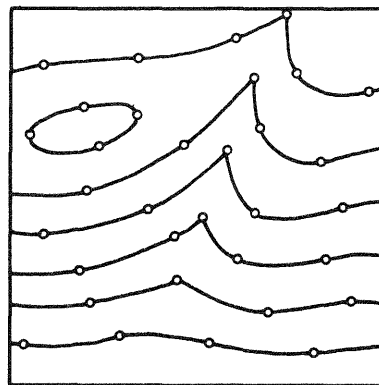
Parallele Profile
(Registrierung nach kon-
stantem Zeitintervall)



Regelmäßiges Raster
(Registrierung nach kon-
stantem Wegintervall)



Bruchkanten und
Strukturlinien



Höhenschichtlinien

Abb. 2-2 Punktanordnungen bei der Datenerfassung

Einzelpunkte

- unregelmäßig verteilt,
- profilweise angeordnet (beliebige oder parallele Profile),
- rasterförmig angeordnet,
- ausgezeichnete (singuläre bzw. markante¹⁾) Höhenpunkte:
Kuppen-, Mulden- oder Sattelpunkte.

Linienweise erfaßte Daten

- Geländebruchkanten,
- Struktur- oder Geripplinien: Rücken- oder Muldenlinien, Falllinien,
- Isolinien: Formlinien bzw. Höhengichtlinien.

Bei der profilweisen und linienweisen Datenerfassung kann nach konstantem Wegintervall und/oder Zeitintervall und/oder Höhenintervall registriert werden. Wie die Einzelpunkte angeordnet werden, damit eine Geländeoberfläche hinreichend beschrieben wird, hängt in erster Linie von der Art der Datenerfassung und den zur Verfügung stehenden Datenerfassungsgeräten ab. So wird z.B. bei der Tachymeteraufnahme die Geländeoberfläche in der Regel durch unregelmäßig verteilte Einzelpunkte, durch Profile in Fallrichtung, durch Kuppen- und Muldenpunkte und durch Geländebruchkanten erfaßt. Bei der Datenerfassung am photogrammetrischen Stereoauswertegerät werden eher Punkte entlang paralleler Profile oder entlang von Isolinien digitalisiert. Zur Betonung charakteristischer Geländestrukturen werden darüber hinaus ausgezeichnete Höhenpunkte, Geländebruchkanten und Strukturlinien entlang von Geländerrücken und -mulden erfaßt.

Ausgehend von der photogrammetrischen Datenerfassung können wir unterscheiden zwischen einer

- statischen Datenerfassung (Messung von Einzelpunkten, wobei der Meßpunkt zunächst lagemäßig angefahren und anschließend die Meßmarke nur noch in z-Richtung bewegt wird) und einer
- dynamischen Datenerfassung (Messung von Profilpunkten, wobei sich die Meßmarke in der x,z-Ebene oder der y,z-Ebene bewegt, bzw. von Schichtlinienpunkten, wobei sich die Meßmarke in der x,y-Ebene bewegt).

Die Bezeichnungen "dynamisch" und "statisch" beziehen sich somit nicht auf die Messung der z-Koordinate selbst, sondern darauf, ob sich die Lagekoordinaten der Meßmarke während der Höhenmessung verändern oder nicht.

Die Registrierung in parallelen Profilen, in einem Raster oder entlang von geomorphologisch wichtigen Linien kann sowohl statisch als auch dynamisch erfolgen. Einen Kompromiß zwischen der statischen und der dynamischen Datenerfassung stellt die "diskontinuierliche Betriebsart" (SCHWEBEL |189|) dar, bei der die Fahrgeschwindigkeit vor dem Meßpunkt reduziert wird. Unregelmäßig verteilte Einzelpunkte und ausgezeichnete Höhenpunkte werden bisher ausschließlich statisch, Höhengichtlinien oder Formlinien jedoch dynamisch erfaßt.

¹⁾ Nachdem der Begriff "markanter Höhenpunkt" bereits eingeführt wurde (z.B. STANGER |198|), wird er in dieser Arbeit beibehalten, auch wenn der Ausdruck als nicht ganz glücklich gewählt erscheint.

Die kontinuierliche dynamische Datenerfassung ist in der Regel schneller als die statische Messung, jedoch meist auch von geringerer Genauigkeit. Ferner besitzt die dynamische Datenerfassung nicht dieselbe Flexibilität bei der Auswahl der Meßpunkte und ihrer Anpassung an die topographischen Gegebenheiten wie die Messung unregelmäßig verteilter Geländepunkte. Bei der dynamischen Datenerfassung führt dies in der Regel dazu, daß der Umfang der Daten durch unqualifiziertere Punkte, die weniger Aussagekraft besitzen, mehr oder weniger stark vergrößert wird. Auf der anderen Seite sind die Verfahren der dynamischen Datenerfassung und der Messung regelmäßig verteilter Einzelpunkte meist automationsfreundlicher als die Erfassung qualifizierter Einzelpunkte. Abweichend davon verbindet z.B. der Gestalt-Photo-Mapper von HOBROUGH (HOBROUGH |89|) eine sehr schnelle vollautomatische Datenerfassung mit einer statischen Erfassung sehr großer Datenmengen innerhalb des jeweiligen "patch" (siehe Tabelle 2-3).

2.2 Verschiedene Verfahren der Datenerfassung

In der Praxis werden heute hauptsächlich drei Verfahren zur Datenerfassung für die Erstellung eines digitalen Höhenmodells angewandt: Die Tachymetrie, die Photogrammetrie und in geringerem Umfang die Digitalisierung graphischer Vorlagen. Welche Möglichkeiten diese Verfahren bieten, soll im folgenden zusammengefaßt werden.

2.2.1 Tachymetrische Datenerfassung

Der Einsatz registrierender elektronischer Tachymeter brachte für die tachymetrische Geländeaufnahme einen spürbaren Aufschwung. Der Grund dafür ist sowohl in einer erhöhten Wirtschaftlichkeit als auch in der Möglichkeit zu sehen, daß die digital gespeicherte Geländeaufnahme eine rechnerische Weiterverarbeitung der Höheninformation erlaubt (KRAUS |114|).

Den Nachteil, daß jeder Meßpunkt im Gelände angelaufen werden muß, versucht die tachymetrische Geländeaufnahme dadurch auszugleichen, daß sie sich auf die Aufnahme möglichst weniger, dafür aber um so qualifizierterer Punkte beschränkt. Dazu wird die Geländeoberfläche gedanklich in Polyeder zerlegt, deren Kanten durch Stützpunkte statisch erfaßt werden. Ebene Flächen innerhalb der Kanten werden nur durch einige wenige Punkte beschrieben, die z.B. entlang von Profilen in Fallrichtung angeordnet sein können. Zwischen welchen Punkten bei der Auswertung interpoliert werden darf, ist bei der Aufnahme festzuhalten.

Bevorzugt wird somit meist eine linienweise Datenerfassung unter Vernachlässigung der flächenhaften Geländebeschreibung. In Abhängigkeit von der Bewegtheit der Geländeoberfläche führt dies in der Regel zu einer recht unterschiedlichen Punktdichte. Daß die richtige Auswahl weniger charakteristischer Linien im Vergleich zu einer flächenhaften Punktverteilung vom Aufnahmeleiter wesentlich mehr Können und Erfahrung verlangt, sei am Rande angemerkt.

Dank der hohen Genauigkeit der heute verfügbaren elektronischen Tachymeter wird die Genauigkeit der Erfassung eines Geländepunktes in erster Linie durch die Geländerauhigkeit begrenzt, die ungefähr mit ± 1 dm (GRUNDEY und HAKE |72|, SILAR

|193|) angesetzt werden kann. Wie genau jedoch die Geländeoberfläche letztlich durch die Einzelpunkte wiedergegeben wird, hängt bei der tachymetrischen Geländeaufnahme in erster Linie davon ab, wie gut die Polyeder, die durch die beschränkte Anzahl an Stützpunkten gebildet werden, die Geländeoberfläche annähern bzw. wie gut der Stützpunktabstand an die Schwierigkeiten des Geländes angepaßt ist.

Durch ihre gesteigerte Wirtschaftlichkeit wurde die elektronische Tachymetrie in den vergangenen Jahren zu einer Alternative zur photogrammetrischen Höhenauswertung für großmaßstäbige Pläne und Karten.

2.2.2 Photogrammetrische Datenerfassung

Verglichen mit der Tachymetrie erlaubt die Photogrammetrie eine größere Flexibilität bei der Datenerfassung. Sie bietet sowohl die Möglichkeit der statischen als auch der dynamischen Datenerfassung. Bei der statischen Datenerfassung werden Einzelpunkte eingestellt und digital registriert. Die direkt abgefahrene Höhengichtlinie ermöglicht eine dynamische Datenerfassung, wenn Einzelpunkte der Höhengichtlinie während des Schichtlinienabfahrens automatisch registriert werden. Eine weitere Möglichkeit zur dynamischen Datenerfassung eröffnete sich mit der Einführung der Orthophototechnik, Während des Profilierens werden dabei Profilpunkte nach vorgegebenen Intervallen automatisch registriert.

BRANDSTATTER |25| bezeichnet die am photogrammetrischen Analogauswertegerät abgefahrene Höhengichtlinie als "exakte" Schichtlinie. Selbst wenn wir unterstellen, daß dabei weniger die absolute Genauigkeit als vielmehr die relative Genauigkeit (Formtreue) der Schichtlinie im Vordergrund steht, so ist dieser Anspruch kaum aufrecht zu erhalten. Insbesondere in flachem Gelände wird die direkt abgefahrene Höhenlinie zunehmend unsicher. In diesen Fällen wird die linienweise Messung durch eine punktweise Messung ersetzt (BRINDÖPKE |27|, |28|).

Es kann somit nicht von einer "exakten", sondern nur von einer "direkt abgefahrenen" Schichtlinie geredet werden. Im Gegensatz zur direkt abgefahrenen Schichtlinie können wir bei Höhenlinien, die aus punktweisen Messungen interpoliert sind, von "abgeleiteten" Höhenlinien reden.

In Anlehnung an BRANDSTATTER |25| hält es FINSTERWALDER |50| nicht für sinnvoll, diejenige Größe, die "exakt" bestimmt werden kann, durch ein Näherungsverfahren zu gewinnen. Er schlägt deshalb vor, aus der photogrammetrisch "exakt" bestimm- baren Höhenlinie die Steuerungsdaten für die Differentialentzerrung in Form von Profilen rechnerisch abzuleiten (FINSTERWALDER |49|, |51|). Entgegen der Ableitung von Höhenlinien aus Einzelpunkten, wo aus punktweisen Informationen linienhafte Elemente abgeleitet werden, werden hier punktweise Informationen aus "exakten" linienhaften Elementen abgeleitet. Dieser Weg scheint FINSTERWALDER |52| auch geeignet, ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust ein rasterförmiges digitales Höhenmodell aus Höhenlinien abzuleiten.

OBERMEIER stellt in |157| fest: "Formverfälschungen und Formverluste lassen sich bei abgeleiteten Höhenlinien nicht umgehen und müssen als verfahrensbedingte

Fehler hingenommen werden." Dabei stützt er sich auf eine Untersuchung FINSTERWALDERS [51], die jedoch nicht berücksichtigt, daß es sich bei den zum Vergleich herangezogenen abgeleiteten Höhenlinien um einen ersten Versuch mit Mängeln bei der Datenerfassung und einem nur teilweise fertiggestellten Rechenprogramm handelt (STEWARDSON et al. [205]).

Nachdem inzwischen mehrere leistungsfähige Programmsysteme zur rechnerischen Ableitung von Höhenschichtlinien entwickelt und vielfältig erprobt sind, hat sich die Fragestellung für die Praxis grundlegend gewandelt. Die entscheidende Frage ist es heute, in welcher Art und Weise die Datenerfassung für ein bestimmtes Gelände erfolgen muß, damit das daraus berechnete digitale Höhenmodell oder aus diesem abgeleitete Höhenlinien bestimmte vorgegebene Genauigkeitsanforderungen erfüllen (ACKERMANN [4]). Die Datenerfassung entscheidet also bereits im wesentlichen darüber, welche Genauigkeit im digitalen Höhenmodell erreichbar ist. Die Formtreue abgeleiteter Höhenlinien hängt somit in erster Linie vom Aufwand bei der Datenerfassung ab.

Eine halbautomatische Art der Datenerfassung, die durch den Einsatz von Bildkorrelatoren auch vollautomatisch ablaufen kann, schlägt MAKAROVIC [132] mit der Methode des "progressive sampling" vor. Progressive sampling wurde mit dem Ziel konzipiert, eine bestmögliche punktweise Wiedergabe einer Geländeoberfläche mit einem Minimum an Stützpunkten, d.h. einem Minimum an Überbestimmung und einem minimalen Meßaufwand zu erreichen. Gleichzeitig sollen aber diese Primärdaten derart qualifiziert sein, daß sie ohne weitere Verdichtung ein digitales Höhenmodell bilden, aus dem mit einer einfachen linearen Interpolation weitere Geländehöhen mit ausreichender Genauigkeit abgeleitet werden können.

Für dieses Verfahren ist die Kombination eines analog oder digital arbeitenden photogrammetrischen Auswertegeräts mit einem on-line verbundenen Mini-Digitalrechner und einem Steuergerät erforderlich. Aus Gründen der Automationsfreundlichkeit wird beim progressive sampling von Stützpunkten ausgegangen, die in einem quadratischen Raster gemessen werden. In Abhängigkeit von der Genauigkeit der so erfaßten Stützwerte und der gewünschten Genauigkeit der Oberflächendarstellung wird ein Schwellenwert für die Oberflächenkrümmung zwischen benachbarten Stützpunkten festgelegt. Überschreitet die Krümmung diesen Schwellenwert, wird das Rasterintervall an dieser Stelle durch eine Halbierung besser an die Bewegtheit der Geländeoberfläche angepaßt. Dieser Prozeß kann mehrmals wiederholt werden, bis der Schwellenwert unterschritten wird.

Die halb- oder vollautomatisch gemessenen Rasterpunkte werden in bewegtem Gelände durch manuell erfaßte Geländebruchkanten ("selective sampling") ergänzt. Um Linieninformationen und Rasterwerte zusammen verarbeiten zu können, schlägt MAKAROVIC [133] vor, geomorphologisch wichtige Linien vorweg zu erfassen, sie in Rasterwerte umzurechnen und in die kleinsten Rasterelemente des sampling-Prozesses einzuspeichern. Dadurch besteht die Möglichkeit, diese Information bereits bei der Krümmungsanalyse heranzuziehen (MAKAROVIC [134]).

Verschiedene Strategien zu einer kombinierten Datenerfassung ("composite sampling"), bei der sich Rasterdaten und Bruchkanteninformationen ergänzen, ent-

wickelt MACAROVIČ in [135]. Sein Ziel ist es, die Intelligenz des Menschen und die Möglichkeiten der Technik bestmöglich miteinander zu verbinden. Der Auswerter beschränkt sich auf die Interpretation und Kontrolle in schwierigen Fällen. Daneben werden die Möglichkeiten eines Digitalrechners, große Datenmengen mit hoher Geschwindigkeit zu verarbeiten und in weniger schwierigen Situationen die Kontrolle über den Datenerfassungsprozeß auszuüben, voll ausgeschöpft.

Entscheidend für den Erfolg dieser Methode wird es sein, wie gut sich die beiden widersprechenden Forderungen in Einklang bringen lassen, nämlich einerseits möglichst wenige, dafür aber qualifizierte Rasterhöhen und Bruchkantenpunkte zu erfassen und andererseits in diesem möglichst weitmaschigen Stützpunktnetz mit einem einfachen (linearen) Interpolationsansatz weitere Höhenwerte mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen.

Ein Verfahren zur Datenerfassung, das auf dem "progressive sampling" beruht, beschreibt RÜDENAUER [171].

Die Genauigkeit der photogrammetrischen Datenerfassung zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells hängt in erster Linie vom angewandten Meßverfahren ab. Folgende Auswerteverfahren werden heute praktisch eingesetzt oder versprechen zukünftig Aussicht auf Erfolg:

- Einzelpunktmessung,
- Höhenschichtlinien, direkt abgefahren,
- Halbbautomatische Profilabtastung
(Höhennachführung manuell),
- Vollautomatische Profilabtastung
(Höhennachführung mit Bildkorrelatoren),
- Ansteuern von Punktrastern
(halbautomatisch mit manueller Höhenmessung
oder vollautomatisch mit Bildkorrelatoren),
- Vollautomatische, engmaschige Flächenraster
(Bildkorrelatoren des Gestalt-Photo-Mappers),
- Digitale Bildabtastung (Mikrodensitometer)
und digitale Bildkorrelation.

Die mittlere Höhengenaugigkeit m_H , die bei einigen dieser Verfahren mit Weitwinkelaufnahmen erreicht werden kann, ist in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Im Vergleich zur photogrammetrischen Einzelpunktmessung bzw. zu direkt abgefahrenen Höhenlinien weisen die automationsfreundlichen Techniken des profilweisen Abtastens und der automatischen Bildkorrelation ungefähr eine um den Faktor 4 bis 12 bzw. 2 bis 6 schlechtere Höhengenaugigkeit auf. Da sich die Verfahren, die mit digitaler Korrelation arbeiten, noch in der Entwicklung befinden, kann in Zukunft z.B. durch den Einsatz von Parallelprozessoren (KONECNY [105]) der Rechenaufwand und damit vielleicht auch noch die Höhengenaugigkeit gesteigert werden.

Während die Höhengenaugigkeit der angeführten Meßverfahren für die Steuerung von Orthoprojektoren in allen Fällen ausreicht, sind die Anforderungen an die Daten-

Meß- bzw. Auswerteverfahren	Autor	m_H [%o der Flughöhe hg]
- Einzelpunktmessung	KONECNY 104	0,1
- Höhenlinien, direkt abgefahren	SCHWIDEFSKY und ACKERMANN 190 KONECNY 104 BLACHUT, v. WIJK 22	0,2 0,2 0,1-0,4
- Profile, manuell ¹⁾ abgetastet	HOBBIE 87 KONECNY 104 BLACHUT, v. WIJK 22 MARCKWARDT 141	0,3-0,4 0,4 0,2-0,6 0,3
- Profile, automatisch abgetastet	HARDY 76 (mit ITEK- Bildkorrelator EC-5) LINDIG 129 (mit ITEK- Bildkorrelator EC-5) MARCKWARDT 140 (mit OROMAT-Bildkorrelator) ³⁾	0,2-0,4 0,3-1,6 0,9-1,3
- Digitale Bildkorrelation ²⁾	KREILING 120	0,3

Tabelle 2-1 Mittlere Höhengenaugigkeit m_H einiger photogrammetrischer Auswerteverfahren

1) Wie von SCHNEIDER |179| festgestellt wurde, hängt der Abtastfehler beim profilweisen Modellabtasten hauptsächlich von der Geländeneigung, aber auch von der Abfahrgeschwindigkeit, Geländebewuchs, in geringem Umfang von der Geländegestalt und dem Bildmaßstab ab. Die angegebenen Werte stellen deshalb Mittelwerte dar.

2) Durch direkten Vergleich zwischen automatisch ermittelten x-Parallaxen und den Werten einer manuellen Messung im Stereokomparator, die als fehlerfrei angenommen wurde.

3) Durch Vergleich der automatisch mit dem Korrelator abgefahrenen Profile mit manuell abgefahrenen Profilen. Zu beachten ist, daß die manuell abgefahrenen Profile nicht als fehlerfrei betrachtet werden können.

erfassung zur Ableitung qualitativ hochwertiger topographischer Höhenlinien wesentlich höher. Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, die Höheninformation entsprechend der unterschiedlichen Anforderungen an die Höhengenaugigkeit getrennt zu erfassen.

Die Wirtschaftlichkeit der photogrammetrischen Datenerfassung hängt hauptsächlich vom erforderlichen Zeitaufwand und von den Kosten für die jeweiligen Auswertegeräte ab. Über den Zeitaufwand für die Datenerfassung, der zur Ableitung einer großmaßstäbigen Höhenlinienkarte erforderlich ist, liegen für die Kartenmaßstäbe 1:2500 bis 1:10000 verschiedene praktische Untersuchungen vor. Vergleichen wir den Zeitaufwand, der für eine manuelle profilweise Modellabtastung

(ohne die Registrierung geomorphologisch wichtiger Linien) erforderlich ist, mit demjenigen für eine direkte Höhenschichtlinienkartierung (ohne anschließende kartographische Überarbeitung), so ergibt sich im Mittel ein Verhältnis von 1 : 2.5 (Tabelle 2-2).

Autor	Karten- maßstab	Verhältnis des Zeitaufwands, profilweise Modellabtastung/ direkte Höhenlinienkartierung
BLACHUT, v. WIJK 22	1: 2500	1 : 2.5
SCHILCHER 177	1: 2500	1 : 2.5
FINSTERWALDER 50	1: 5000	1 : 2
JACOBSEN 93	1: 5000	1 : 2
PAPE 160	1: 5000	1 : 3.5
BERNHARD 19	1:10000	1 : 2
HOBBIE 87		1 : 3

Tabelle 2-2 Einige Angaben zum Zeitaufwand für die manuelle profilweise Modellabtastung und für die direkte Höhenlinienkartierung

Dieser deutliche Vorteil der profilweisen Modellabtastung wird allerdings dadurch wieder mehr oder weniger aufgehoben, daß es zur rechnerischen Ableitung topographisch und kartographisch qualifizierter Höhenlinien zwingend erforderlich ist, in bewegtem Gelände neben den Geländeprofilen noch die geomorphologisch wichtigen Bruch- und Strukturlinien zu erfassen. Der dafür erforderliche Zeitaufwand ist bei einem großen Kartenmaßstab in der Regel ebenso hoch oder gar höher als der, welcher zur profilweisen Datenerfassung benötigt wird (SCHILCHER |177|). Insgesamt entspricht somit der Gesamtaufwand zur profilweisen Digitalisierung eines Modells genähert demjenigen für eine direkte Höhenschichtlinienkartierung.

Die Vollständigkeit der Datenerfassung läßt sich beim Profilieren durch eine Kontrollkartierung der Profile und der registrierten Bruchkanten und Strukturlinien leicht überprüfen. Grundsätzlich gilt dies auch für die kartierten Schichtlinien einer direkten Höhenlinienauswertung, wobei hier jedoch einzelne Höhenlinien z.B. an Kuppen oder in Mulden fehlen können. Eine unmittelbare Kontrolle der erreichten Höhengenauigkeit ist nur bei der direkten Höhenlinienkartierung möglich. Die profilweise Datenerfassung erlaubt eine Beurteilung der Höhengengenauigkeit erst nach der rechnerischen Höhenauswertung, sofern keine Doppelmessungen vorliegen.

Eine weitere Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zum manuellen profilweisen Modellabtasten läßt sich durch den Einsatz analogelektrischer Bildkorrelatoren erzielen. HARDY |76| gibt für den Zeitaufwand des manuellen Profilierens im Verhältnis zum automatischen Profilabtasten mit Hilfe eines Bildkorrelators einen Wert von 2 : 1 bis 3 : 1 an, BLACHUT und van WIJK |22| ein Verhältnis von 3 : 1. Durch die Verbindung eines digitalen analytischen Auswertegerätes mit einem analogen Korrelator kann nach KONECNY |105| sogar der Faktor 10 : 1 erreicht werden. Bedingt durch ihre hohen Entwicklungs- und Be-

triebskosten konnten die zuletzt genannten Geräte bisher nur eingesetzt werden, wenn die Produktionsleistung außergewöhnlich hoch ist.

Bei den Verfahren, die mit digitaler Bildkorrelation arbeiten, scheint zukünftig eine weitere wesentliche Verringerung des Zeitaufwandes für die Datenerfassung möglich zu sein. HELAVA [84] gibt an, daß mit dem Gerät AS-11B-X die Datenerfassung für ein photogrammetrisches Modell in ca. 10 Minuten abgeschlossen sein kann. Verglichen mit dem Zeitaufwand beim manuellen Profilieren bedeutet dies ein Verhältnis von ca. 18 : 1.

Für den praktischen Einsatz der Verfahren mit automatischer Bildkorrelation ist, neben den Anschaffungskosten und der erreichbaren Höhengenaugigkeit, der Umfang des Ausfalls der automatischen Korrelation mit entscheidend. Dieser hängt wesentlich von der Bildqualität ab und steigt bei Winkeln < 17 gon zwischen Geländeoberfläche und Projektionsstrahl in strukturarmen Flächen oder bei Bäumen und Gebäuden mit starkem Schlagschatten an. LINDIG [129] ermittelte den Korrelationsausfall für großmaßstäbige Auswertungen mit dem ITEK-Bildkorrelator EC-5 im Bereich zwischen 0 und 9 % der Bildfläche, MARCKWARDT [140] für Maßstäbe von 1:25000 bis 1:50000 mit dem OROMAT-Bildkorrelator zu maximal 5 % der Bildfläche in einem sehr schwierigen Modell mit Hochgebirgscharakter. Daneben ist das Problem der Trennung von Geländeoberfläche und Bewuchs bzw. Kunstbauwerken bei der automatischen Korrelation zu sehen. Inwieweit zukünftige Technologien diese Probleme lösen können, läßt sich im Augenblick noch nicht übersehen.

2.2.3 Digitalisierung von Karten

Vergleichbar der Digitalisierung von Schichtlinien im relativ oder absolut orientierten photogrammetrischen Modell können als Ausgangsdaten zur Erstellung eines digitalen Geländemodells auch Höhenlinien vorhandener Karten digitalisiert werden. Im Vergleich zur tachymetrischen Datenerfassung wird dabei noch viel stärker die Information in einer Richtung betont. Wird bei der Tachymetrie meist die Falllinie bevorzugt, so ist es hier die Höhenlinie selbst. Entsprechend geringer ist, je nach Geländeneigung und Äquidistanz, die Informationsdichte senkrecht dazu in Fallrichtung.

Schwierigkeiten ergeben sich meist bei der Erfassung von Geländebruchkanten, da diese, je nach Äquidistanz und Kartenmaßstab, nur zum Teil aus dem Verlauf der Höhenlinien abgeleitet werden können. Schwierig ist die Informationsgewinnung insbesondere im flachen Gelände, da hier für die Fläche zwischen zwei Höhenlinien im Grunde nur eine relative Angabe über das Intervall vorgegeben ist, in welchem sich die Geländehöhen bewegen, jedoch keine absolute Aussage über die eigentliche Oberflächenform.

Praktisch durchgeführt wurde die Digitalisierung bisher dadurch, daß Höhenlinien mit Digitalisiergeräten (Digitizern) manuell nachgefahren wurden, wobei laufend Punktkoordinaten abgegriffen und gespeichert wurden. Neuere, rechnergestützte Geräteentwicklungen bieten hier interessante Möglichkeiten. Beim automatischen Digitalisiersystem KartoScan (HOFMANN [91]) wird eine graphische Vorlage durch einen Rasterscanner in Rasterpunkte der Größe 0,1 mm x 0,1 mm zer-

legt. Die Helligkeit jedes Punktes wird gemessen und digital abgespeichert, wobei bei 256 Graustufen unterschieden werden. Das Zusammenfügen der einzelnen Rasterpunkte zu Linienzügen erfolgt rechnerisch, wobei bei der Digitalisierung von Höhenlinien teilweise der Eingriff des Operateurs über einen interaktiven Bildschirm erforderlich ist.

Die reine Abtastdauer für ein Kartenblatt der Größe 45 cm x 50 cm beträgt nach HOFMANN ca. 10 Minuten. Verglichen mit dem Zeitaufwand, der bisher für die manuelle Digitalisierung der Höhenlinien eines Blattes der topographischen Karte 1:50000 mit einem herkömmlichen Digitalisiergerät erforderlich ist, bedeutet dies eine Verringerung ungefähr um den Faktor 1000 bis 2000. Allerdings wird dabei ein Teil der Arbeit, die beim manuellen Digitalisieren auf der Seite der Hardware anfiel, durch zusätzliche Datenverarbeitung in den Bereich der Software verlagert.

2.3 Punktmengen, Punktdichte

Charakteristisch für die tachymetrische Geländeaufnahme ist es, daß die Geländeoberfläche mit möglichst wenigen qualifizierten Punkten beschrieben wird. Mit gewissen Einschränkungen wurde dieser Grundsatz auch auf die photogrammetrische Einzelpunktmessung zur Höhenauswertung übertragen. So wurden z.B. die Höhenlinien für die Deutsche Grundkarte 1:5000 in flachem Gelände bisher weitgehend manuell aus den photogrammetrisch gemessenen Einzelpunkten interpoliert. Eine Überarbeitung dieser Linien durch den Topographen im Gelände schloß sich an.

Als Folge des immer stärkeren Trends zur automatischen Auswertung durch den Einsatz von Elektronik und digitalen Prozessoren änderte sich die Strategie. Nachdem automatische Systeme bis heute nicht in der Lage sind, Information ähnlich qualifiziert auszuwählen wie der Mensch, wurde versucht, die qualifizierte Messung durch eine Vergrößerung der Anzahl der Messungen zu ersetzen. Elektronik und Digitaltechnik hatten die Voraussetzungen dafür geschaffen.

Diese Entwicklung hat dazu geführt, daß sich die Punktmengen, die bei der tachymetrischen Höhenaufnahme anfallen, zu den Datenmengen einer digitalen Bildabtastung in einem Verhältnis von bis zu 1:100 000 bewegen (Tabelle 2-3). Absolut gesehen hat die Datenmenge bei der digitalen Bildabtastung mit einem Mikrodensitometer mit ca. 25 Mio. Punktmessungen pro photogrammetrisches Modell oder ca. 600 Mio. Punktmessungen pro Topographische Karte 1:50 000 einen derartigen Umfang erreicht, daß sie mit den heute verfügbaren leistungsfähigen Großrechnern sicherlich nur mit Mühe und wohl kaum wirtschaftlich verarbeitet werden kann.

Der mittlere Punktabstand der Messungen konnte auf ca. 0.03 - 0.05 mm verringert werden. Er liegt somit weit unter der Zeichengenauigkeit und läßt sich graphisch nicht mehr ausnützen.

Art der Datenerfassung	Bezugseinheit	Punkt-(Daten-)menge	Mittlerer Punkt-abstand mm	Quelle
tachymetrisch / photogrammetrisch	Deutsche Grund- karte 1:5000	2 000 - 5 000	6 - 9	
photogrammetrisch	Top. Karte 1:25 000	10 000 - 20 000	3 - 5	
Gestalt-Korrelator (Gestalt Photo Mapper II - GPM II)	Photogrammetr. Modell Top. Karte 1:50 000	0,75 - 1,0 Mio. 19 - 25 Mio.	0,1 - 0,2	HOBROUGH 89 , ALLAM und WONG 6
Digitale Bildabtastung (Mikrodensitometer)	Photogrammetr. Modell Top. Karte 1:50 000	13 - 35 Mio. 320 - 880 Mio.	0,03 - 0,05	KREILING 120

Tabelle 2-3 Punktmengen und Punktabstände bei verschiedenen Arten der Datenerfassung

Ziel der Datenerfassung soll es sein, aus den Primärdaten ein engmaschiges, rasterförmiges digitales Höhenmodell abzuleiten. Erfolgt die Datenerfassung durch relativ weitabständige Punkte, so wird die Interpolation der Rasterhöhen in der Regel eine mehr oder weniger starke Verdichtung der Höheninformation der Primärdaten erforderlich machen. Liegen dagegen extrem engmaschige Messungen einer (teil-)automatischen Datenerfassung vor, so verlangt die Bestimmung der Rasterhöhen des digitalen Höhenmodells eine qualifizierte Reduktion der Primärdaten.

3. Interpolation eines digitalen Höhenmodells

In der Praxis der digitalen photogrammetrischen Datenerfassung überwiegen bisher konventionelle manuelle Messungen. Automatische Verfahren stellen noch die Ausnahme dar. In der Regel müssen wir somit von einem mehr oder weniger weitmaschigen Netz von Geländepunkten (Primärdaten) ausgehen, welche die Stützpunkte für die Interpolation weiterer Höhenwerte bilden.

3.1 Interpolationsaufgabe

Im Hinblick auf die Erzeugung eines digitalen Höhenmodells läßt sich die Interpolationsaufgabe wie folgt formulieren:

- Berechnung weiterer Höhenwerte, z.B. eines engmaschigen Höhenrasters mit oder ohne
- Filterung der gemessenen Höhenwerte in den Stützpunkten.

Dabei sind die Meinungen durchaus geteilt, ob Primärdaten überhaupt gefiltert werden sollen. Im Gegensatz zu einer Glättung ist es die Aufgabe einer Filterung, die zufälligen Meßfehler der Primärdaten einschließlich der Geländerauhig-

keit qualifiziert zu beseitigen. In Abhängigkeit vom Maßstab, in dem die digitale Datenerfassung erfolgt, hat der Begriff des Meßfehlers eine unterschiedliche Bedeutung. Bei der tachymetrischen Geländeaufnahme mit einem elektronischen Tachymeter ist der verfahrensbedingte Meßfehler heute klein im Vergleich zur Geländerauhigkeit, die im Bereich von ± 1 dm liegt. Dagegen wächst der Meßfehler bei der photogrammetrischen Datenerfassung mit kleiner werdendem Bildmaßstab und übersteigt z.B. bei einer Weitwinkelbefliegung ungefähr ab 1000 m Flughöhe die Geländerauhigkeit.

3.2 Interpolationsmethoden

SCHUT gibt in [188] einen umfassenden Überblick über die bis zum Jahr 1976 veröffentlichten Interpolationsmethoden bzw. Rechenprogramme zur Erzeugung eines digitalen Höhenmodells und zur Höheninterpolation in einem digitalen Höhenmodell. Je nachdem, welche Voraussetzungen die verschiedenen Interpolationsmethoden bzw. die damit arbeitenden Rechenprogramme an die Datenerfassung stellen (z.B. beliebig verteilte Stützpunkte, regelmäßiges Raster, linienweise Datenerfassung entlang von Geländebruchkanten, Höhenlinien, Falllinien, parallelen Profilen), teilt er diese Ansätze in sechs Gruppen ein.

In der vorliegenden Arbeit werden die verschiedenen Interpolationsmethoden nach dem Interpolationsansatz selbst gegliedert. Ausgehend von relativ einfachen Methoden (z.B. lineare Interpolation) werden verschiedene Interpolationsmethoden behandelt, die mit Flächenelementen (z.B. Polynomflächen, gleitende Schrägebene, finite Elemente) arbeiten. Das recht flexible, aber auch rechenaufwendige Verfahren der linearen Prädiktion und die multiquadratische Methode schließen die Zusammenstellung ab.

In erster Näherung entspricht diese Reihenfolge auch der zeitlichen Entstehung der verschiedenen Methoden, wobei deren praktischer Einsatz ganz entscheidend von den verfügbaren Rechenhilfsmitteln abhing. Welche speziellen Anforderungen die einzelnen Interpolationsmethoden bzw. einzelne damit arbeitende Rechenprogramme an die Datenerfassung stellen, wird von Fall zu Fall erläutert.

3.2.1 Einfache Interpolationsmethoden

Die Verfahren zur rechnerischen Höheninterpolation waren anfangs noch weitgehend an das Vorgehen bei der manuellen Interpolation zwischen benachbarten Geländepunkten angelehnt. Als Folge der vergleichsweise geringen Kapazität der in den 60er Jahren verfügbaren Rechner wurden einfache Interpolationsmethoden angewandt, wie z.B. die lineare Interpolation entlang von Dreiecksseiten, Geländebruchkanten oder Geländeprofilen in Fallrichtung oder ein gewogenes arithmetisches Mittel benachbarter Geländehöhen.

Durch eine geeignete Verbindung benachbarter Geländepunkte (Stützpunkte) läßt sich die Geländeoberfläche mit einem Netz von Dreiecken überziehen, dessen Eckpunkte die Stützpunkte bilden und dessen Dreiecke an ihren Kanten stetig anschließen und sich nicht überschneiden. Zur Durchführung der Höheninterpolation müssen hier vorweg diese Dreiecksnetze aus den vorliegenden Stützpunkten gebildet werden.

Bei dem von BRUNKEN [30] entwickelten Programm hängt der Aufbau des Dreiecksnetzes und damit auch das Ergebnis der Höheninterpolation mit davon ab, an welcher Stelle das Aufsuchen der Interpolationsdreiecke begonnen wurde. Die Bestimmung der Schnittpunkte von Höhenschichtlinien mit den einzelnen Dreiecksseiten erfolgt durch eine lineare Interpolation. DÜPPE und GOTTSCHALK [38] entwickeln einen Algorithmus, der zu eindeutigen Dreiecksnetzen führt. BEYER [20] berechnet aus den unregelmäßig verteilten Stützpunkten zunächst die Höhen der Eckpunkte eines gleichseitigen Dreiecksnetzes durch lineare Interpolation. Weitere Höhenpunkte werden in diesen gleichseitigen Dreiecken linear interpoliert.

Das von der Firma Nordisk ADB (Markdata AB) entwickelte Rechenprogramm geht davon aus, daß das Gelände durch mehr oder weniger charakteristische Linienzüge (z.B. Geländebruchkanten, Strukturlinien) erfaßt wird (TORLEGÅRD [214]). Zur Höheninterpolation im Punkt H wird zunächst diejenige Gerade durch H bestimmt, die den kürzesten Abstand $\overline{H_1H_2}$ zwischen den beiden benachbarten Geländelinien aufweist (Abb. 3-1). Die Höhen der beiden Schnittpunkte H_1 und H_2 werden linear in die gemessenen Geländelinien eingerechnet. Die gesuchte Höhe H ergibt sich durch eine weitere lineare Interpolation zwischen H_1 und H_2 .

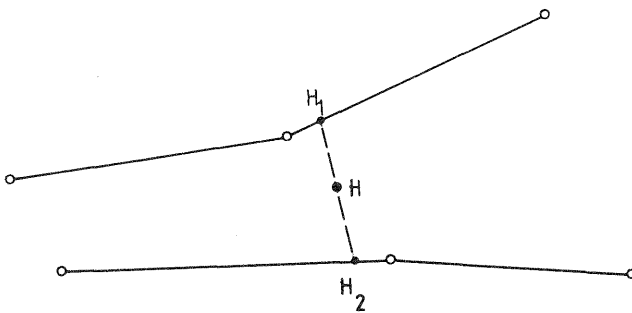


Abb. 3-1 Interpolation in einem linienförmigen digitalen Höhenmodell

SCHULT [185] geht ebenfalls von linienförmig erfaßten Primärdaten aus, wenn er die Höhen eines regelmäßigen Rasters aus digitalisierten Höhenschichtlinien interpoliert. Dabei werden die Höhenlinien mit den vorgegebenen Rasterlinien zum Schnitt gebracht. Die Höhe $H(I,K)$ im Rasterpunkt (I,K) ergibt sich als gewogenes arithmetisches Mittel der Höhen H_i der vier nächstliegenden Schnittpunkte mit den Gewichten $1/s_i$ (Abb. 3-2):

$$H(I,K) = \frac{H_1/s_1 + H_2/s_2 + H_3/s_3 + H_4/s_4}{1/s_1 + 1/s_2 + 1/s_3 + 1/s_4} \quad (3.1)$$

FINSTERWALDER [52] verwendet ebenfalls den von SCHULT vorgeschlagenen Interpolationsansatz. Er weist darauf hin, daß bei dieser Art der Höhenberechnung Schwierigkeiten im Bereich von Kuppen, Mulden oder Sattelpunkten auftreten können.

Als gewogenes arithmetisches Mittel der Höhe ausgewählter benachbarten Stützpunkte werden im General Purpose Contouring Program GPCP von Calcomp Höhenwerte bestimmt. Dieses Verfahren läßt sich auch als Interpolation mit Hilfe einer gleitenden Horizontalebene interpretieren.

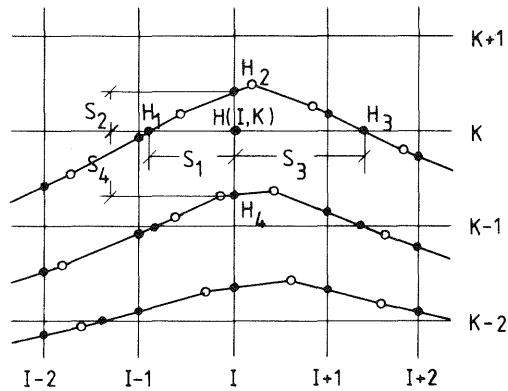


Abb. 3-2 Interpolation von Rasterhöhen aus digitalisierten Höhenschichtlinien

3.2.2 Gleitende Flächen

Kennzeichnend für die Interpolationsmethoden der gleitenden Fläche ist es, daß für jeden gesuchten Höhenwert eine neue Fläche berechnet wird. Schreitet die Fläche von einem Interpolationspunkt zum nächsten fort, so wird diese Fläche in der Regel ihre Orientierung und möglicherweise auch ihre Form ändern.

Die gesuchte Geländehöhe in einem vorgegebenen Punkt ergibt sich als die augenblickliche Höhe der gleitenden Fläche in diesem Punkt. Als Fläche selbst wird entweder eine Horizontalebene, eine Schrägebene oder ein biquadratisches Polynom verwendet. Die Flächengleichung setzt sich somit aus einem oder mehreren Gliedern der folgenden Gleichung zusammen:

$$h = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2. \quad (3.2)$$

Zur Interpolation der Höhe in einem gegebenen Punkt wird Gleichung (3.2) als Verbesserungsgleichung für die umliegenden Stützpunkte verwendet. Jede Stützpunkthöhe erhält dabei ein Gewicht, das mit zunehmender Entfernung vom gesuchten Punkt mehr oder weniger schnell abnimmt. Die Flächenkoeffizienten selbst ergeben sich aus einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, bei der die gewichtete Quadratsumme der Abstände der Stützwerte von der Fläche zu einem Minimum gemacht wird. Legen wir den Ursprung des jeweiligen Koordinatensystems in den Neupunkt, so ist es ausreichend, den Koeffizienten a_{00} zu berechnen.

Die einfachste Fläche ist eine Horizontalebene. Ihre Bestimmung als gewogenes arithmetisches Mittel der Höhen der umliegenden Stützpunkte wurde bereits im vorausgehenden Abschnitt beschrieben. Verwendet wird sie z.B. von GRUNDEY und KRUSE [73] und HAENDEL et al. [74] bzw. im Programm TASH des Lehrstuhls für Topographie und Kartographie der Universität Hannover (Adv [8]). Eine Oberfläche, die nach dieser Methode bestimmt wird, ist weder stetig (in dem Sinne, daß die zur Interpolation verwendeten benachbarten Flächenelemente an ihrem Übergang identische Schnittkurven mit einer Vertikalebene durch ihre Randlinie aufweisen) noch besitzt sie stetige erste Ableitungen, d.h. sie ist nicht glatt,

Eine bessere Flächenbeschreibung läßt sich mit einer gleitenden Schrägebene erreichen. Sie wird z.B. von GRUNDEY und KRUSE [73], HAENDEL et al. [74], KOCH [100], [101], [102], RAPIOR und BOPP [167] und SIMA [194] bzw. im Programm TASH (Adv [8]) angewandt.

Das vollständige 6-gliedrige biquadratische Polynom der Gleichung (3.2) kann sich noch besser an die Form des Geländes anpassen. Allerdings werden dafür mehr Stützpunkte benötigt. Liegen zu wenig oder ungünstig verteilte Stützpunkte vor, so kann dieses Polynom jedoch auch stärker ausschlagen. Eingesetzt wird diese Polynomfläche z.B. von GRUNDEY und KRUSE [73], HAENDEL et al. [74], KOCH [101], RAPIOR und BOPP [167] und SIMA [194] bzw. im Programm TASH (Adv [8]).

In denjenigen Interpolationsprogrammen, in welchen verschiedene Flächen für die Höheninterpolation zur Wahl stehen, erfolgt die Entscheidung meist in Abhängigkeit von der Anzahl der Stützpunkte, die in einem vorgegebenen Bereich um einen Neupunkt herum vorliegen. Allerdings sollte die Art der gleitenden Fläche innerhalb eines Interpolationsgebietes nicht gewechselt werden, da sonst keine gleichartige Oberflächenbeschreibung gewährleistet ist.

Neben der Art der gleitenden Fläche unterscheiden sich die genannten Interpolationsmethoden noch durch ihre Gewichtsfunktion. In der Regel wird eine Gewichtsfunktion verwendet, die in Abhängigkeit von der Entfernung des Stützpunktes zum Neupunkt mehr oder weniger schnell vom Funktionswert 1 (Neupunkt identisch mit einem Stützpunkt) asymptotisch gegen den Funktionswert null abfällt. Vorschläge für eine geeignete Gewichtsfunktion macht SCHUT [187], [188].

3.2.3 Lokale Polynomflächen

Bei dieser Interpolationsmethode wird das Gelände in seinem kleinsten Flächenelement (z.B. Rasterelement bei rasterförmig verteilten Stützpunkten oder Dreiecksmasche bei unregelmäßig verteilten Stützpunkten) durch eine eigene lokale Polynomfläche angenähert. Die Geländehöhe im Interpolationspunkt P ergibt sich als Höhe des Polynoms in P. Zur Beschreibung der einzelnen lokalen Polynomflächen werden Polynome ersten, zweiten oder dritten Grades verwendet. Polynome höheren als dritten Grades erzeugen neben erhöhtem Rechenaufwand in der Regel nur noch stärkere Änderungen in ihrem Krümmungsverhalten, was insbesondere bei einer ungünstigen Stützpunktverteilung zu einem mehr oder weniger starken, unerwünschten Ausschlagen führen kann.

Bei den meisten Interpolationsverfahren, die mit lokalen Polynomflächen arbeiten, wird sowohl eine ausreichende Anzahl an Stützpunkten als auch ihre mehr oder weniger regelmäßige Verteilung vorausgesetzt. Diese Verfahren verwenden mehrere oder sämtliche Koeffizienten des folgenden bikubischen Polynoms:

$$\begin{aligned}
 h &= \underline{x}^T \underline{A} y & (3.3) \\
 &= [1 \ x \ x^2 \ x^3] \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \\ y^3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

oder ausgeschrieben

$$\begin{aligned}
 h = & a_{00} \\
 & + a_{10}x + a_{01}y \\
 & + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 \\
 & + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3 \\
 & + a_{31}x^3y + a_{22}x^2y^2 + a_{13}xy^3 \\
 & + a_{32}x^3y^2 + a_{23}x^2y^3 \\
 & + a_{33}x^3y^3.
 \end{aligned}$$

Die Parameter der einzelnen lokalen Polynome werden über die Höhenwerte gegebener Stützpunkte bzw. weitere Informationen, wie z.B. die Oberflächenneigung entlang der Randlinien der Polynome, bestimmt. Liegen die Höhen rasterförmig verteilter Stützpunkte vor, was bei den Interpolationsansätzen dieser Gruppe in der Regel vorausgesetzt wird, so können die Koeffizienten a_{ij} der Matrix \underline{A} vorweg als Funktion der Elemente der Matrix \underline{H} bestimmt werden, welche die einzelnen Rasterhöhen und gegebenenfalls andere Angaben, wie z.B. die Geländeneigung, enthält.

Die am weitesten entwickelten Interpolationsansätze dieser Gruppe verwenden das vollständige 16-gliedrige bikubische Polynom, wie z.B. BOSMAN et al. [24]. Diese leiten die Polynomparameter a_{ij} über den Höhenwert h , die beiden ersten Ableitungen h_x und h_y und die zweite Ableitung h_{xy} in den vier Rastereckpunkten ab. Die beiden ersten Ableitungen h_x und h_y geben dabei die Neigung der Oberfläche in x- bzw. y-Richtung wieder. Wenn wir die Höhe im Rasterpunkt (I,K) mit $h(I,K)$, die ersten Ableitungen des Polynoms in x-Richtung mit $h_x(I,K)$, in y-Richtung mit $h_y(I,K)$ und die gemischte zweite Ableitung nach x und y mit $h_{xy}(I,K)$ bezeichnen, so lassen sich die Polynomkoeffizienten a_{nm} wie folgt darstellen:

$$\underline{A} = \underline{x}^{-1} \underline{H} (\underline{y}^{-1})^T \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3/RR^2 & -2/RR & 3/RR^2 & -1/RR \\ -2/RR^3 & 1/RR^2 & -2/RR^3 & 1/RR^2 \end{bmatrix} .$$

$$\begin{bmatrix} h(I,K) & h_y(I,K) & h(I,K+1) & h_y(I,K+1) \\ h_x(I,K) & h_{xy}(I,K) & h_x(I,K+1) & h_{xy}(I,K+1) \\ h(I+1,K) & h_y(I+1,K) & h(I+1,K+1) & h_y(I+1,K+1) \\ h_x(I+1,K) & h_{xy}(I+1,K) & h_x(I+1,K+1) & h_{xy}(I+1,K+1) \end{bmatrix} .$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -3/RH^2 & -2/RH^3 \\ 0 & 1 & -2/RH & 1/RH^2 \\ 0 & 0 & 3/RH^2 & -2/RH^3 \\ 0 & 0 & -1/RH & 1/RH^2 \end{bmatrix} \quad (3.4a)$$

mit RR ... Rasterintervall Rechts,
RH ... Rasterintervall Hoch,

Zwei aneinander grenzende lokale Polynomflächen besitzen als Vertikalschnitt entlang ihrer gemeinsamen Grenzlinie $x = \text{konst.}$ bzw. $y = \text{konst.}$ jeweils ein Polynom dritten Grades als Schnittkurve. Dieses ist durch die beiden Rasterhöhen der gemeinsamen Rasterlinie und die Neigung der Oberfläche in Richtung dieser Rasterlinie in beiden Rasterpunkten festgelegt. Folglich sind beide Schnittkurven identisch. Dies bedeutet, daß die gesamte durch die lokalen Polynome gebildete Oberfläche stetig ist.

Gleichzeitig besitzen zwei aneinandergrenzende Polynomflächen entlang einer Grenzlinie $x = \text{konst.}$ dieselbe Neigung der Oberfläche in x -Richtung, was analog auch für eine Grenzlinie $y = \text{konst.}$ gilt. Dies bedeutet, daß die durch die einzelnen Polynome gebildete Oberfläche stetig differenzierbar und damit glatt ist.

ZUMOFEN und LEONI [237] verwenden mehr oder weniger denselben Interpolationsansatz wie BOSMAN et al. [24], wenn rasterförmig verteilte Stützpunkte vorliegen.

De MASSON d'AUTUME [144] verwendet ebenfalls das vollständige 16-gliedrige bikubische Polynom. Er schlägt vor, die Polynomkoeffizienten der lokalen Polynome nur mit Hilfe der benachbarten $4 \cdot 4$ Rasterhöhen zu bestimmen. Die durch diese lokalen Polynome gebildete Oberfläche ist wohl stetig, aber nicht glatt.

Setzen wir in Gleichung (3.3) die Glieder

$$a_{22} = a_{23} = a_{32} = a_{33} = 0,$$

so erhalten wir als nächste Stufe ein 12-gliedriges bikubisches Polynom. Zur Festlegung einer lokalen Polynomfläche reichen die vier Rasterhöhen und die Neigung der Oberfläche in x - bzw. y -Richtung in den vier Rasterpunkten aus. Die so beschriebene Oberfläche ist wohl stetig, aber entlang der Grenzlinien der einzelnen Polynome nicht glatt, sondern nur in den Rasterpunkten selbst.

Wenn wir die Glieder mit x^3 und mit y^3 in Gleichung (3.3) weglassen und zusätzlich den Koeffizienten $a_{22} = 0$ setzen, so erhalten wir als weiter vereinfachte Interpolationsformel ein 8-gliedriges biquadratisches Polynom:

$$h = [1 \ x \ x^2] \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Zur Berechnung der acht Polynomkoeffizienten werden die vier Rasterhöhen und die Höhen in der Mitte der vier Rasterseiten herangezogen. Der Höhenwert in der Mitte einer Rasterseite wird mit Hilfe eines quadratischen Polynoms oder einer spline-Funktion durch die beiden Endpunkte der Rasterlinie und die beiden nächstliegenden Rasterpunkte entlang der Rasterlinie bestimmt. Eine derart bestimmte Oberfläche ist stetig, aber entlang der Grenzen der lokalen Polynome nicht glatt.

Als weitere Stufe der Vereinfachung folgt das 4-gliedrige bilineare Polynom:

$$h = [1 \ x] \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Diese Polynomfläche bildet eine hyperbolische Paraboloidfläche, die auf die vier Höhenwerte in den Rastereckpunkten eingepaßt wird. Diesen Interpolationsansatz, der entlang der Rasterlinien und entlang von Parallelen dazu linear interpoliert, verwendet SCHULT [185], [186].

Während die bisher beschriebenen Polynomansätze dieses Abschnitts von rasterförmig verteilten Stützpunkten ausgehen, erlauben andere Polynomansätze beliebig verteilte Stützpunkte. ETHROG [46] überzieht zunächst die Oberfläche mit einem Netz von Dreiecken, deren Eckpunkte die Stützpunkte bilden. Um zu gewährleisten, daß sich die Ebenen der einzelnen Dreiecke bestmöglich an die Geländeoberfläche anpassen, müssen Stützpunkte, die für eine Dreiecksbildung in Frage kommen, gewisse Nachbarschaftsbedingungen erfüllen. Darüber hinaus sollen sich die Dreiecksseiten, hier als "skeleton lines" bezeichnet, bestmöglich an Kuppen- oder Muldenlinien oder an die Fallrichtung des Geländes anpassen. Dazu werden bei der Dreiecksbildung die Neigungen der verschiedenen Verbindungslinien zwischen den Stützpunkten überprüft und berücksichtigt.

Als lokale Interpolationsfläche in den einzelnen Dreiecken verwendet ETHROG ein 10-gliedriges bikubisches Polynom:

$$h = [1 \ x^2 \ x^3] \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} & a_{03} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{20} & a_{21} & 0 & 0 \\ a_{30} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \\ y^3 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Zur Bestimmung der Polynomkoeffizienten wird in jedem Stützpunkt die Tangentialebene an die Geländeoberfläche ermittelt. Dies erfolgt durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate, wobei die gewichtete Quadratsumme der Abstände benachbarter Stützwerte von der Tangentialebene minimiert wird. Geländebruchkanten werden bei der Ermittlung der Tangentialebene besonders berücksichtigt. Damit sind in jedem Eckpunkt eines Dreiecks die Höhe und zwei Neigungen bekannt. Als zehntes Bestimmungselement wird die Höhe des Dreiecksschwerpunktes vorgegeben. Diese ergibt sich, indem über den Dreiecksseiten kubische Parabeln aufgespannt werden, von denen aus die Schwerpunktshöhe dreimal unabhängig berechnet wird. Der Mittelwert ergibt die endgültige Höhe des Dreiecksschwerpunktes.

Anhand der kubischen Parabeln über den Dreiecksseiten überprüft ETHROG, ob der Verlauf der berechneten Polynomfläche als "vernünftig" bezeichnet werden kann. Dazu fordert er, daß die erste Ableitung der Funktion zwischen den beiden Dreieckspunkten ungleich Null ist. Ferner sollte der Abstand zwischen der Parabel und der Sehne immer kleiner oder gleich groß wie der Abstand zwischen Sehne und den Tangenten in den beiden Eckpunkten sein. Die erste Bedingung soll ein unkontrolliertes Ausschwingen der Polynomfläche verhindern, die zweite den Abstand zwischen Sehne und Polynomfläche entlang der Dreiecksseiten begrenzen. Wird eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt, so werden die Neigungen der Tangentialflächen in den beiden Stützpunkten verändert. Dies führt allerdings dazu, daß die in der Regel stetige und glatte Oberfläche entlang dieser Dreieckskanten nicht mehr glatt ist.

ETHROG geht davon aus, daß sich das von ihm vorgestellte Interpolationsverfahren, das er als "Skeleton-Methode" bezeichnet, besonders zur Wiedergabe charakteristischer topographischer Formen bzw. Kleinformen eignet, wobei durch die Nebenbedingungen ein unkontrolliertes Ausschwingen der Polynomfläche vermieden wird.

3.2.4 Stückweise Polynome

Im Unterschied zu den Interpolationsmethoden, die mit lokalen Polynomflächen arbeiten (siehe Abschnitt 3.2.3), werden bei den Methoden, die mit stückweisen ("piecewise" oder "patchwise") Polynomen arbeiten, die Polynome sämtlicher Teilgebiete in einem Zug berechnet. Dazu wird zunächst das gesamte zu bearbeitende Gebiet mit Hilfe eines regelmäßigen Rasters in kleinere rechteckige oder quadratische Teilgebiete unterteilt. Die Geländeoberfläche eines jeden Teilgebietes wird nun durch ein Polynom niederen Grades so dargestellt, daß die gesamte Oberfläche stetig ist und nach Möglichkeit auch stetige erste Ableitungen besitzt. Dies bedeutet, daß die einzelnen Polynomflächen an ihren Nahtstellen höhenmäßig übereinstimmen und nach Möglichkeit auch dieselbe Neigung aufweisen.

BOSMAN et al. [24] bestimmen die lokalen Polynome so, daß die gewichtete Quadratsumme der Höhendifferenzen in den beliebig verteilten Stützpunkten und eine gewichtete Summe, welche ein Maß für die Bewegtheit der Oberfläche darstellt, zu einem Minimum werden. Die zweite Bedingung hat dabei die Aufgabe, in stützpunktarmer Gebieten ein Ausschwingen der Polynomfläche zu verhindern. Die Gewichte für die beiden Bedingungen und die Größe des Rasters zur Bildung der Teilflächen können so variiert werden, daß die Höhendifferenzen in den Stützpunkten zwischen Stützwert und Polynomfläche in derselben Größenordnung wie die Meßfehler oder die Geländerauhigkeit liegen.

Als lokale Polynomflächen verwenden BOSMAN et al. im Programm Delft entweder ein 16-gliedriges bikubisches oder ein 3-gliedriges bilineares Polynom. Im Falle des bikubischen Polynoms wird gefordert, daß die gesamte Geländeoberfläche stetig differenzierbar ist. Dies wird dadurch erreicht, daß für die o.a. Summe, welche ein Maß für die Bewegtheit der Oberfläche darstellt, die Quadratsumme der ersten Ableitungen der Oberfläche in x- und y-Richtung in sämtlichen Rastereckpunkten eingeführt wird. Als Unbekannte des Normalgleichungssystems werden die Höhenwerte h , die beiden ersten Ableitungen h_x und h_y und die gemischte zweite Ableitung h_{xy} in jedem Rasterpunkt berechnet. Die 16 Polynomkoeffizienten der einzelnen lokalen Polynomflächen lassen sich dann mit Hilfe der jeweiligen 4 Werte in den vier Rastereckpunkten des Teilgebietes bestimmen (siehe Gleichung (3.4)). Dieser Ansatz gewährleistet, daß die gesamte Geländeoberfläche stetig und glatt, d.h. stetig differenzierbar, ist.

De MASSON d'AUTUME [144] schlägt eine Interpolationsmethode vor, die auf der Annäherung der Funktion einer Variablen durch eine Spline-Funktion beruht. Diese Funktion setzt sich aus einer Reihe von Polynomen dritten Grades zusammen, die sich jeweils zwischen benachbarten Stützpunkten erstrecken. An ihren Nahtstellen besitzen benachbarte Polynome dieselbe erste und zweite Ableitung. Ferner hat die Funktion die Eigenschaft, daß die Quadratsumme ihrer zweiten Ableitungen über den Bereich der Variablen ein Minimum ist. Sind die Höhen eines regel-

mäßigen Rasters zu interpolieren, so wird die Geländeoberfläche in jedem Raster-element durch ein bikubisches Polynom angenähert. Diese lokalen Polynome stimmen an ihren gemeinsamen Grenzen in der Höhe und Neigung überein.

Von diesem Interpolationsansatz von De MASSON d'AUTUME besteht eine direkte Verbindung zur Interpolation mit finiten Elementen, die im Abschnitt 3.2.6 beschrieben wird. Sein Vorschlag zur Oberflächenbeschreibung mit Hilfe eines elastischen Rasters (De MASSON d'AUTUME [145]) wird dort erläutert.

3.2.5 Analytische Funktionen

Ein durch analytische Funktionen gebildetes linienförmiges digitales Höhenmodell entwirft NAKAMURA (siehe LINKWITZ [130] und LINKWITZ et al. [131]). Er geht von digitalisierten Höhenschichtlinien aus und spaltet diese in ihre x- und y-Anteile auf. Die x- und y-Anteile werden getrennt durch Parametergleichungen wiedergegeben, wozu er Fourierreihen verwendet.

BAUHUBER et al. [15] gehen von unregelmäßig verteilten Stützpunkten aus. Diese bilden die Eckpunkte eines eindeutigen Dreiecksnetzes, das nach vorgegebenen Kriterien der Nachbarschaftsbeziehung die Stützpunkte verbindet. Dieser Prozeß wird mit Dreiecksvermaschung bezeichnet. In den einzelnen Dreiecken wird nun eine analytische Funktion bestimmt, die durch die Stützpunkte geht und bis auf Bruchkanten stetig differenzierbar ist.

Zunächst wird in sämtlichen Stützpunkten die Tangentialebene an die Geländeoberfläche bestimmt. Dazu wird die gewichtete Quadratsumme der Abstände zwischen denjenigen Stützpunkten und der Tangentialebene zu einem Minimum gemacht, die zu dem jeweiligen Stützpunkt unmittelbar benachbart sind. Zur Höheninterpolation werden entlang der Dreiecksseiten sogenannte Streifen gebildet, die entstehen, wenn die Tangentialebene von einem Stützpunkt entlang einer kubischen Parabel zu dem zweiten Stützpunkt gleitet. Die einzelnen Streifen gehen in den Stützpunkten stetig ineinander über. In jedem Dreieck ist nun eine Fläche zu bestimmen, die in die drei Streifen entlang der Dreiecksseiten stetig übergeht. Nach BAUHUBER et al. eignen sich Polynomflächen dazu nicht. Statt dessen ziehen sie durch den Punkt im Inneren des Dreieckes, dessen Höhe gesucht ist, Parallelen zu den drei Dreiecksseiten. Entlang dieser Parallelen ermitteln sie wiederum Streifen, ausgehend von den Schnitten mit den Streifen über den Dreiecksseiten. Aus den drei Höhenwerten wird ein gewogenes Mittel gebildet. Die zur Höheninterpolation verwendete analytische Funktion ist stetig differenzierbar und geht an den Dreiecksseiten glatt in die jeweiligen Streifen über.

ZUMOFEN und LEONI [237] greifen für den Fall, daß die Stützpunkte eine stark unterschiedliche Dichte aufweisen, auf das Verfahren von BAUHUBER et al. [15] zurück. Da es ihnen jedoch weniger um die Bestimmung weiterer Höhenwerte, sondern vielmehr um die Ableitung von Höhenschichtlinien geht, schlagen sie vor, das rechenaufwendige Verfahren zur Bestimmung von Punkthöhen im Inneren der Dreiecke zu vereinfachen bzw. in einfach strukturiertem Gelände lediglich die Schnittpunkte der Höhenlinien mit den kubischen Parabeln entlang der Dreiecksseiten zu berechnen.

Nachdrücklich weisen ZUMOFEN und LEONI darauf hin, daß ihrer Ansicht nach die Anwendung der Richtungskorrelation für ein gutes Interpolationsergebnis von großer Bedeutung ist. Bei der beschriebenen Dreiecksmethode wird sie dadurch gewährleistet, daß die Höhe zwischen zwei Stützpunkten allein durch die Höhen dieser Punkte und ihre Tangentialebenen festgelegt wird. Die Anwendung der Richtungskorrelation erübrige sogar in vielen Fällen die Einführung von Bruchkanten und mache teilweise Stützpunkte auf Geländekanten und in Talsohlen überflüssig.

3.2.6 Finite Elemente

In den letzten Jahren wurden mehrere Verfahren entwickelt, welche die Methode der finiten Elemente, die bis dahin im Bereich der numerischen Mathematik, der Statik und der Physik bereits erfolgreich eingesetzt wurde, für die Höheninterpolation anwenden (z.B. BRIGGS [21], EBNER und REISS [41], De MASSON d'AUTUME [145], ZUMOFEN und LEONI [237]). EBNER und REISS [41] bauen bei ihrem Vorschlag auf einem Gauß-Markov-Prozeß 2. Ordnung auf. Bevor die von ihnen angewandte Methode der Höheninterpolation beschrieben wird, soll in Anlehnung an EBNER [39] und EBNER und REISS [41] kurz auf die Grundlagen der Interpolation auf der Basis von Gauß-Markov-Prozessen 2. Ordnung eingegangen werden.

Der Gauß-Markov-Prozeß 2. Ordnung ist ein asymptotisch stationärer stochastischer Prozeß. Dabei setzt sich der Wert der Zufallsvariablen x_i direkt aus den beiden vorangegangenen Werten x_{i-1} und x_{i-2} und einem unabhängigen zufälligen Anteil r_i zusammen:

$$x_i = -j^2 x_{i-2} + 2j x_{i-1} + r_i ; \quad i = 3, \dots, n . \quad (3.8)$$

Die Größen r_i sind unkorrelierte, normalverteilte und gleich genaue Zufallsvariable mit dem Erwartungswert Null. j ist eine Prozeßkonstante mit $0 \leq j \leq 1$.

Interpretieren wir die Zufallsvariable r_i als eine fiktive Beobachtung mit dem Betrag Null mit einer zugehörigen Verbesserung v_i , so erhalten wir aus Gleichung (3.8) folgende Verbesserungsgleichungen für die Unbekannte x_i , welche die stochastischen Eigenschaften des Prozesses definieren:

$$\left. \begin{array}{l} v_i = j^2 x_{i-2} - 2j x_{i-1} + x_i - 0 \\ \text{Gewicht } p_i = 1 \end{array} \right\} \quad i = 3, \dots, n \quad (3.9)$$

Die Einbeziehung der Stützwerte $s_1 \dots s_m$ erfolgt durch m weitere Verbesserungsgleichungen. Fällt z.B. der erste Stützpunkt mit dem gesuchten Punkt 2 zusammen, so lautet die Verbesserungsgleichung (Abb. 3-3):

$$v_{n+1} = x_2 - s_1 , \quad \text{Gewicht } p_{n+1} \quad (3.10)$$

Für den letzten Stützpunkt, der zwischen zwei Interpolationspunkten liegt, erhalten wir folgende Verbesserungsgleichung:

$$v_{n+m} = (1-d_{n-1})x_{n-1} + d_{n-1}x_n - s_m, \quad \text{Gewicht } p_{n+m} \quad (3.11)$$

Aus den $n+m$ Beobachtungen lassen sich die n Unbekannten x_i durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen bestimmen.

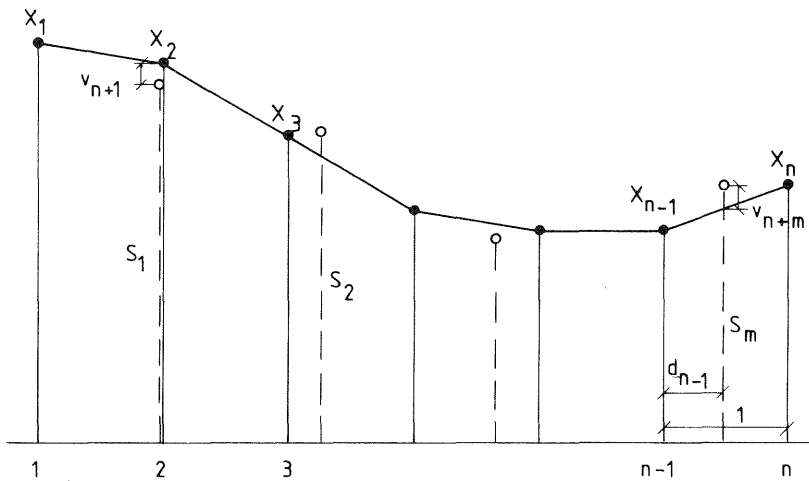


Abb. 3-3 Interpolation der Werte $x_1 \dots x_n$ aus den Stützwerten $s_1 \dots s_m$

Die Kovarianzfunktion eines Gauß-Markov-Prozesses 2. Ordnung besitzt eine horizontale Tangente im Ursprung. Wie EBNER [39] nachgewiesen hat, führt die beschriebene eindimensionale Interpolation zu demselben Ergebnis wie die Methode der linearen Prädiktionsfilterung (siehe Abschnitt 3.2.7), sofern bei beiden Methoden dieselbe Kovarianzfunktion verwendet wird. Im Vergleich zur linearen Prädiktion ist die Annahme der Homogenität und der Isotropie im Stützpunktfeld bei der hier vorgeschlagenen Interpolationsmethode dann nicht erforderlich, wenn ihr ein Extremfall des Gauß-Markov-Prozesses 2. Ordnung zugrunde gelegt wird, der durch unendliche Korrelationsweite (d.h. $j = 1$) gekennzeichnet ist. Der Prozeß verliert in diesem Fall seine asymptotische Stationarität. Gleichzeitig vereinfachen sich aber die Verbesserungsgleichungen (3.9) wie folgt:

$$\left. \begin{aligned} v_{i-1} &= x_{i-2} - 2x_{i-1} + x_i - 0 \\ \text{Gewicht } p_{i-1} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad i = 3 \dots n \quad (3.12)$$

In Gleichung (3.12) wurde die Indizierung der Verbesserungen und Gewichte im Vergleich zu Gleichung (3.9) geändert, was jedoch erlaubt ist. Die Verbesserungen v nähern jetzt die 2. Ableitung der Unbekannten x an, d.h. die Krümmung der Interpolationskurve in den Interpolationspunkten. Entsprechend bewirkt die Ausgleichung, daß die Summe der Quadrate der Krümmungen zu einem Minimum wird. Die frei wählbaren Gewichte p erlauben gleichzeitig eine Steuerung der Krümmungsbeträge.

Lokale Inhomogenitäten in Form eines unregelmäßigen Krümmungsverhaltens der Geländeoberfläche können dadurch berücksichtigt werden, daß sich die Krümmungseigenschaften in jedem Interpolationspunkt durch die Gewichte der Gleichung (3.12) neu definieren lassen.

Auch Geländeunstetigkeiten können auf einfache Weise berücksichtigt werden. Liegt im Interpolationspunkt x_{i-1} ein Knick vor, so wird in Gleichung (3.12) $p_{i-1} = 0$ gesetzt. Damit ist die Verbindung von x_{i-2} über x_{i-1} nach x_i gelöst und die Verbesserung v_{i-1} kann einen beliebigen Wert annehmen. Liegt ein Knick zwischen zwei Interpolationspunkten, so sind die Krümmungsgleichungen beider benachbarter Punkte zu lösen.

In diesem Interpolationsansatz sind einander benachbarte Werte x_j durch stückweise lineare Funktionen miteinander verbunden. Interpretiert man die aus jeweils drei benachbarten Interpolationspunkten aufgebauten linearen Polygonstücke als lineare finite Elemente, so läßt sich dieses Interpolationsverfahren in das allgemeine System der "Methode der finiten Elemente" eingliedern und als "Interpolation mit linearen finiten Elementen" bezeichnen.

Die beschriebene Interpolationsmethode läßt sich auch ohne Schwierigkeiten auf den zweidimensionalen Fall übertragen. In der Regel ist von beliebig verteilten Stützpunkten auszugehen, mit deren Hilfe die Höhen eines regelmäßigen Rasters zu bestimmen sind. Die Kanten des Rasters bilden hier eine große Anzahl linearer finiter Elemente. Sie sind in den Rasterpunkten miteinander verbunden und besitzen stetige, aber nicht stetig differenzierbare Grenzen.

Um durch die gegebenen Stützpunkte eine Oberfläche mit minimaler Krümmung zu legen, ist es erforderlich, in jedem Rasterpunkt Krümmungsgleichungen in mehreren Richtungen aufzustellen. Vier Richtungen scheinen auszureichen: Die beiden Koordinatenrichtungen und die beiden Diagonalen (Abb. 3-4). Für einen Stützpunkt der mit einem Rasterpunkt zusammenfällt, gilt Gleichung (3.10). Liegt ein Stützpunkt innerhalb eines Rasterelementes, so enthält die entsprechende Verbesserungsgleichung die vier angrenzenden unbekanntenen Rasterhöhen in der Art, daß der Stützpunkt, von einer Filterung abgesehen, auf der Oberfläche liegt.

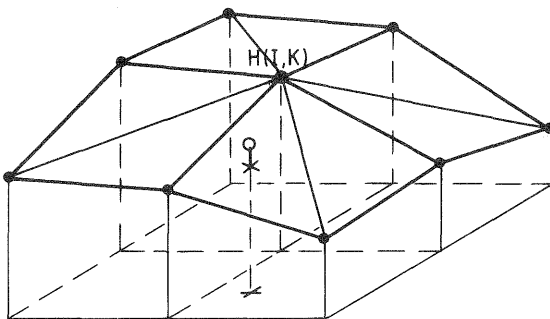


Abb. 3-4 Kanten, für welche im Rasterpunkt (I, K) die Krümmungsgleichungen aufgestellt werden

Durch eine Veränderung des Gewichtes für die Verbesserungsgleichungen der Stützpunkte läßt sich der Umfang der Filterung steuern. Um lokale Inhomogenitäten oder Anisotropie zu berücksichtigen, können die Gewichte für die Krümmungsgleichungen von Rasterpunkt zu Rasterpunkt oder aber auch bei den verschiedenen Richtungen eines Rasterpunktes verändert werden. Geländeunstetigkeiten werden dadurch berücksichtigt, daß die Krümmungsgleichungen für diejenigen Rasterlinien oder Rasterdiagonalen gelöst werden, welche von Bruchkanten geschnitten werden.

Neben der Höheninterpolation mit bilinearen finiten Elementen schlagen EBNER et al. [40] den Einsatz bikubischer finiter Elemente vor. Dabei wird für jede Rastermasche ein bikubisches Polynom definiert und Stetigkeit der Funktionswerte, der ersten und zweiten Ableitungen entlang der Elementgrenzen vorausgesetzt. Im Vergleich zum bilinearen Fall sind die Verbesserungsgleichungen deutlich komplizierter. In der Ausgleichung werden nicht mehr die gesuchten Rasterhöhen, son-

dem Flächenparameter als Unbekannte angesetzt. Nachdem die Berücksichtigung von Geländebruchkanten bei bikubischen finiten Elementen wesentlich komplizierter als bei bilinearen finiten Elementen ist, setzen EBNER et al. die bikubische Variante nur in Gelände ohne Bruchkanten ein.

Im Vergleich zur Methode der linearen Prädiktion läßt die Interpolation mit linearen finiten Elementen eine einfachere Berücksichtigung von Unregelmäßigkeiten im Oberflächenverlauf und von Geländebruchkanten zu. Eine Trendfläche wird nicht benötigt. Was die rechentechnische Seite betrifft, so sind bei einem Raster mit n Rasterhöhen und m Stützpunkten $n+m$ Beobachtungsgleichungen vorhanden. Das Normalgleichungssystem der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen enthält n Unbekannte. Nachdem die unbekannt Rasterhöhen über die Krümmungsgleichungen nur mit ihren unmittelbar benachbarten Rasterhöhen verknüpft sind, besitzt die Normalgleichungsmatrix eine gleichbleibende geringe Bandbreite. Dies verringert den Rechenaufwand zur Lösung des Gleichungssystems. Im Falle einer direkten Lösung hängt die Rechenzeit nur linear von der Anzahl der Rasterpunkte und nicht, wie bei der linearen Prädiktion, von der Anzahl der Stützpunkte ab.

Ein Verfahren zur Oberflächenbeschreibung mit Hilfe eines elastischen Rasters stellt de MASSON d'AUTUME [145] vor. Dabei überlagert er beliebig verteilten Stützpunkten eine elastische Oberfläche und zwingt diese durch die Stützpunkte hindurch. Als funktionales Modell verwendet er ein regelmäßiges Raster in Verbindung mit einem bilinearen oder einem bikubischen Polynom als Interpolationsansatz und mehreren Bedingungen, die eine möglichst krümmungsarme und ebene Oberfläche herbeiführen sollen.

Diese Bedingungen bewirken eine geringe Neigung und Krümmung in beiden Rasterrichtungen. Sowohl die Höhenwerte der Stützpunkte als auch die genannten Zwangsbedingungen werden als Beobachtungsgleichungen mit geeigneten Gewichten eingeführt, wobei die Funktionswerte in den Rasterpunkten die Unbekannten sind. Die Lösung des Normalgleichungssystems erfolgt iterativ z.B. mit Hilfe des Verfahrens der konjugierten Gradienten, wobei das elastische Raster mit jeder Iteration besser an die Stützwerte angepaßt wird. Zur Einschränkung des Rechenaufwandes wird mit einem weitabständigen Raster begonnen, das von Iteration zu Iteration verdichtet werden kann.

Werden am Ende einer Iteration die Krümmungen der Oberfläche in Rasterrichtung überprüft und mit einer Schranke verglichen, so lassen sich daraus Rückschlüsse auf Geländebruchkanten ziehen. Bei einer vermuteten Bruchkante kann dann in der folgenden Iteration die Bedingung für eine möglichst geringe Krümmung in diesem Rasterpunkt aufgehoben werden.

Ob auf diese Art und Weise Geländebruchkanten automatisch im Feld der Stützpunkte identifiziert und entsprechend verarbeitet werden können, wie dies de MASSON d'AUTUME hofft, erscheint jedoch im Hinblick auf unterschiedliche Geländetypen und das verwendete variable Rasterintervall als fraglich.

ZUMOFEN und LEONI [237] schlagen vor, die Methode der finiten Elemente dann zur Höheninterpolation einzusetzen, wenn die Stützpunktdichte nur schwach variiert und zunächst die Höhen eines regelmäßigen Rasters berechnet werden sollen. Zur Lösung des u.U. sehr großen Normalgleichungssystems empfehlen sie die Relaxationsmethode.

BRIGGS [21] geht von geophysikalischen Daten aus und überträgt die günstigen Krümmungseigenschaften der eindimensionalen Spline-Funktion auf den zweidimensionalen Fall. Dazu löst er die Differentialgleichungen, die einer Spline-Funktion 3. Grades entsprechen. Um die Oberflächenkrümmung insgesamt zu minimieren, stellt er "finite Differenzen-Gleichungen" auf. Zur Lösung des Gleichungssystems stellt er ein iteratives Verfahren vor.

Abschließend wird nochmals auf die Verbindung von der Methode der finiten Elemente zur Interpolation mit stückweisen Polynomen (Abschnitt 3.2.4) hingewiesen. Trotz unterschiedlichem Ansatz bei beiden Interpolationsmethoden ergeben sich gewisse Ähnlichkeiten bei ihrer praktischen Durchführung.

3.2.7 Lineare Prädiktion

Das auf statistischer Grundlage ruhende Interpolationsverfahren der linearen Prädiktion gehört in das Gebiet der Korrelationstheorie stationärer stochastischer Prozesse. Bei diesem Verfahren wird der zu prädizierende Wert h aus einer Linearkombination eines unbekanntes Koeffizientenvektors \underline{a} mit dem Stützpunktvektor \underline{l} aufgebaut. Der Stützpunktvektor \underline{l} stellt dabei eine Zufallsstichprobe aus einer unendlichen Grundgesamtheit dar:

$$\begin{aligned} h &= \underline{a}^T \underline{l} \\ &= a_1 l_1 + a_2 l_2 + \dots + a_n l_n . \end{aligned} \quad (3.13)$$

Die Interpolation nach kleinsten Quadraten läßt sich aus dem Verfahren der linearen Prädiktion ableiten, wenn aus der Vielzahl von möglichen Wertesystemen für den Koeffizientenvektor \underline{a} diese Koeffizienten so bestimmt werden, daß das Quadrat des Schätzfehlers des zu prädizierenden Wertes h ein Minimum wird (KRAUS [113]). Liegen n beliebig verteilte Stützpunkte P_i mit den Stützwerten l_i vor, so errechnet sich der Interpolationswert h für einen beliebigen Punkt P wie folgt:

$$\begin{aligned} h &= \underline{c}^T \underline{C}^{-1} \underline{l} \\ &= (C(\overline{PP_1}) \dots C(\overline{PP_n})) \cdot \begin{pmatrix} V & C(\overline{P_1P_2}) & \dots & C(\overline{P_1P_n}) \\ C(\overline{P_1P_2}) & V & \dots & C(\overline{P_2P_n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C(\overline{P_1P_n}) & C(\overline{P_2P_n}) & \dots & V \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Der Vektor \underline{c} enthält die Kovarianzen $C(\overline{PP_i})$ zwischen dem Interpolationspunkt P und den n Stützpunkten P_i , die \underline{C} -Matrix alle Kovarianzen $C(\overline{P_iP_k})$ zwischen den Stützpunkten und entlang der Hauptdiagonalen die Varianz V . Die Kovarianzen in \underline{c} und \underline{C} können mit Hilfe der Punktentfernungen $\overline{P_iP_k}$ berechnet werden, mit denen in die zugehörige Kovarianzfunktion (Abb. 3-5) eingegangen wird. Im Spaltenvektor \underline{l} stehen die Stützwerte l_i .

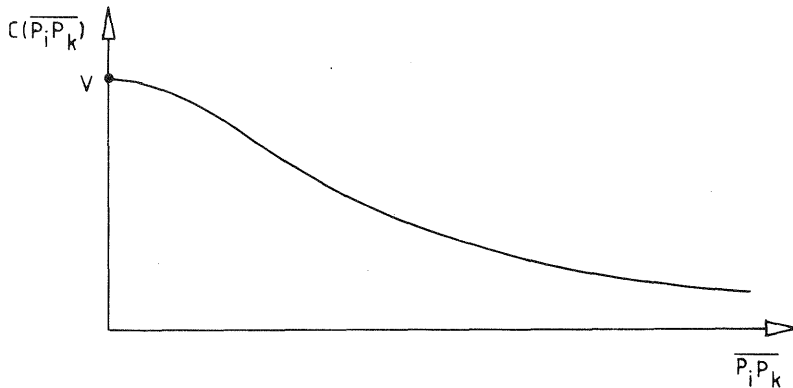


Abb. 3-5 Kovarianzfunktion

Das statistische Verfahren der linearen Prädiktion ist als ein Teil der als Kollokation bekannten allgemeinen Methode der kleinsten Quadrate zu sehen (MORITZ |152|, |153|, WOLF |230|). Die Kollokation läßt sich als eine Verallgemeinerung der Ausgleichsrechnung ansehen. Im allgemeinsten Fall gilt das folgende Modell (WOLF |230|):

$$\underline{l} = \underline{A}x + \underline{B}s + \underline{n} \quad (3.15)$$

Hierin bedeuten:

- \underline{l} den Vektor der Beobachtungen auf den N Stützpunkten,
- \underline{x} den ausgeglichenen (oder "geschätzten") Vektor der n Parameter des deterministischen Anteils (oder "Trends"),
- \underline{s} den Vektor der Signale auf den N Stützpunkten,
- \underline{n} den Vektor der noise-Werte (Rauschen bzw. zufällige Meßfehler),
- \underline{A} und \underline{B} sind Koeffizientenmatrizen.

Gesucht sind auf den M Neupunkten P die entsprechenden Interpolationswerte l_p :

$$l_p = \underline{A}_p x + \underline{B}_p s^P, \quad (3.16)$$

wobei der Vektor s^P die Signalwerte auf den M Neupunkten P enthält und \underline{A}_p und \underline{B}_p die entsprechenden Koeffizientenmatrizen sind.

Verglichen mit den Beobachtungsgleichungen für die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen enthält die Grundgleichung für die Kollokation (3.15) neben den noise-Werten \underline{n} als zweite zufällige Veränderliche mit dem Erwartungswert Null das Signal \underline{s} . Die Werte \underline{n} und \underline{s} werden dabei als voneinander unabhängige stochastische Größen angenommen. Sie unterscheiden sich in ihrem statistischen Verhalten dahingehend, daß das Signal \underline{s} autokorreliert ist, bei den noise-Werten \underline{n} jedoch ein sehr schnelles Absinken der Korrelation vermutet werden kann, so daß sie als voneinander unabhängig angenommen werden können.

Betrachten wir die Bestimmung der Parameter \underline{x} als Ausgleichung, die Ermittlung des Signals \underline{s} in den Neupunkten als Prädiktion und die bestmögliche Beseitigung der noise-Werte \underline{n} als Filterung, so kann man die Kollokation als Verbindung von Ausgleichung, Prädiktion und Filterung betrachten. Umgekehrt ergeben sich Prädiktion und Filterung als Sonderfälle der Kollokation. Die "reine" Prädiktion

(MORITZ |152|, WOLF |230|) liegt vor, wenn in Gleichung (3.15) $\underline{A} = \underline{0}$, $\underline{n} = \underline{0}$ und $\underline{B} = \underline{E}$ (\underline{E} = Einheitsmatrix) wird, d.h. wenn die Stützwerte keine zufälligen Meßfehler (noise) besitzen. Liegen noise-Werte vor und interpolieren wir das Signal s in Punkten, die nicht identisch mit den Stützpunkten sind ($\underline{A} = \underline{0}$, $\underline{B} = \underline{E}$), so reden LAUER und WROBEL |126| von "Prädiktionsfilterung".

Zur praktischen Durchführung der Höheninterpolation werden die in der Kollokation vereinigte Ausgleichung und die Prädiktion meist in zwei Schritten nacheinander durchgeführt. Im ersten Rechenschritt wird der deterministische Anteil durch eine Trendfunktion erfaßt. Dazu wird ein Polynom niederen Grades mit einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen durch die Stützpunkte P_i gelegt. Werden die Stützwerte l_i um den Trend reduziert, so erhalten wir die "zentrierten" Stützwerte h_i (Abb. 3-6). Während der Trend die Großformen des Geländes darstellt, enthalten die zentrierten Stützwerte h_i geomorphologisch gesehen die Kleinformen (Signal s_i) und die zufälligen Meßfehler (noise n_i). Die Prädiktion selbst erfolgt mit Hilfe der zentrierten Stützwerte h_i in einem zweiten Schritt.

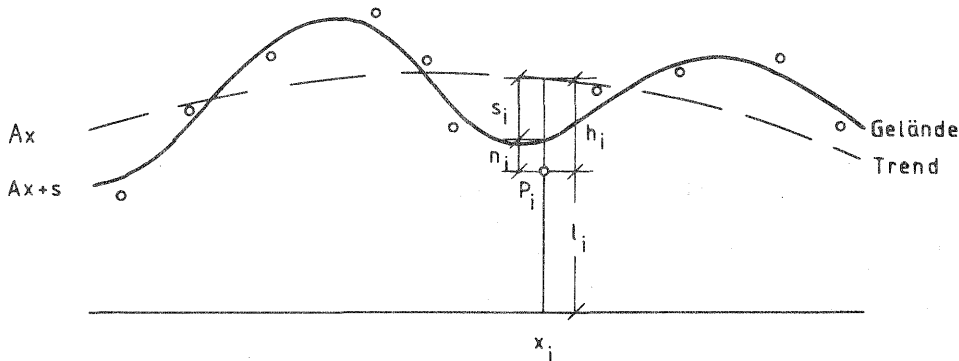


Abb. 3-6 Abspaltung des deterministischen Anteils durch eine Trendfunktion

Die zentrierten Stützwerte besitzen den Mittelwert Null. Im Zusammenhang mit einer empirischen Bestimmung des Verlaufs der Korrelationsfunktion aus den zentrierten Stützwerten wird dies vorausgesetzt, da sonst die Korrelationsfunktion bei zunehmender Punktentfernung nicht gegen Null strebt (ASSMUS und KRAUS |12|).

Dieses zweistufige Vorgehen trägt der Erfahrung Rechnung, daß eine direkte Anwendung der linearen Prädiktion auf die ursprünglichen Stützwerte im allgemeinen zu schlechten Ergebnissen, d.h. auf sehr große mittlere Fehler des prädierten Signals führt. Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß die lineare Prädiktion auf einer verallgemeinerten Taylor-Reihe beruht, die aber nach dem linearen Glied abgebrochen wird (GRAFAREND |68|). Ausgehend von dieser Erkenntnis entwickelt GRAFAREND für den Allgemeinfall einer nichtlinearen verallgemeinerten Taylor-Reihe eine nichtlineare Prädiktion.

Allgemein kann für alle statistischen Prädiktionsverfahren die Korrelationsfunktion (sie ist die im Ursprung auf die Varianz $V = 1$ normierte Kovarianzfunktion; oft werden die Begriffe Korrelationsfunktion und Kovarianzfunktion in ein und demselben Sinn verwendet) zwischen Signalen an verschiedenen Orten als entschei-

dende Kennzahl bezeichnet werden. Tritt bei der linearen Prädiktion nur die Zweipunktkorrelationsfunktion auf, so treten bei der ersten nichtlinearen Erweiterung der linearen Prädiktion zusätzlich die Drei- und Vierpunktkorrelationsfunktion auf. Sind bei der Zweipunktkorrelationsfunktion Signale zwischen jeweils zwei Stützpunkten korreliert, so sind z.B. bei der Dreipunktkorrelation Signale zwischen jeweils drei Stützpunkten korreliert.

Der Vorteil der nichtlinearen gegenüber der linearen Prädiktion ist darin zu sehen, daß sie es ermöglicht, u.U. auf die Abspaltung des Trends in den Stützwerten zu verzichten, da diese Prädiktionsverfahren, als verallgemeinerte Taylor-Reihe betrachtet, erst bei Gliedern höherer Ordnung abgebrochen werden. Darüber hinaus wird der mittlere Prädiktionsfehler um so kleiner, je mehr Prädiktionskoeffizienten berücksichtigt werden. Als Nachteil der nichtlinearen gegenüber der linearen Prädiktion fällt jedoch der stark erhöhte Rechenaufwand so entscheidend ins Gewicht, daß diese Methode im Augenblick noch nicht wirtschaftlich einsetzbar erscheint.

Unabhängig davon könnten jedoch Mehrpunktkorrelationen berechnet werden, um die Voraussetzungen zur Anwendung der linearen Prädiktion zu überprüfen. In den Fällen, in welchen die Voraussetzungen zur Anwendung der linearen Prädiktion erfüllt sind, müßten Korrelationen von Signalen zwischen mehr als zwei Stützpunkten verschwinden (GRAFAREND |68| S. 248).

Der Einsatz der linearen Prädiktion für die Interpolation von Geländehöhen wurden von WOLF |229| im Jahr 1969 vorgeschlagen. Verschiedene Realisierungen dieser Interpolationsmethode wurden u.a. von KOCH |100|, |101|, |102|, KRAUS |112|, |115| und LAUER |124|, |125| veröffentlicht. Auf einige Unterschiede dieser drei Ansätze wird im folgenden kurz eingegangen.

Sollen aus beliebig verteilten Stützpunkten rechnerisch Höhenschichtlinien abgeleitet werden, so ist vorweg grundsätzlich zu klären, ob nur das Endprodukt des Höhenlinienplanes von Interesse ist oder ob dem Zwischenprodukt interpolierter, regelmäßig verteilter Höhen, die eine Verdichtung der Stützpunkte darstellen und zur Ableitung der Höhenlinien dienen können, eine eigenständige Bedeutung zuzumessen ist. Interessiert in erster Linie die Höhenlinienkarte, so kann die Höheninterpolation und die Konstruktion der Höhenlinien in dem Dreiecksnetz erfolgen, das durch die Stützpunkte gebildet wird (LAUER). Dieses Verfahren bietet Vorteile bei der Berücksichtigung von Geländebruchkanten, da bei der Bildung des Dreiecksnetzes sichergestellt werden kann, daß alle Bruchkanten gleichzeitig Dreiecksanten sind.

Für verschiedene Anwendungen z.B. im Bereich der Ingenieurvermessung, der topographischen Kartographie oder der Flurbereinigung empfiehlt es sich jedoch, die interpolierten Höhenwerte z.B. in Form eines rasterförmigen digitalen Höhenmodells bereitzustellen (KOCH, KRAUS). Diese Höhen werden nur einmal berechnet und können z.B. zur Ableitung von Profilen, zur Massenberechnung, zur Ableitung von Höhenschichtlinien unterschiedlicher Äquidistanz und in verschiedenen Maßstäben und zur Bestimmung des Neigungsverhaltens der Geländeoberfläche dienen. KOCH und KRAUS interpolieren deshalb zunächst die Höhen eines regelmäßigen

Rasters, während LAUER direkt in den durch die Stützpunkte gebildeten Dreiecksmaschen Höhenlinienpunkte interpoliert. Die Ausgabe von Rasterhöhen ist bei LAUER [125] jedoch bei Bedarf zusätzlich möglich.

Als Verarbeitungseinheit für die Höheninterpolation verwendet KOCH eine variable Recheneinheit, die maximal 20 Stützpunkte in der unmittelbaren Nachbarschaft des zu interpolierenden Punktes umfaßt. KRAUS arbeitet mit rechteckigen Recheneinheiten fester Größe, die im Mittel ca. 50 - 70 und maximal 200 Stützpunkte umfassen¹⁾. Bei LAUER besteht die Recheneinheit aus einer Dreiecksmasche und ca. 5 - 9 weiteren unmittelbar benachbarten Stützpunkten.

Während KOCH den Trend in der jeweiligen Recheneinheit mit Hilfe einer gleitenden Schrägebene abspaltet, verwenden KRAUS und LAUER eine ausgleichende Schrägebene als Trendfläche. Im Vergleich zur ausgleichenden Schrägebene geht die gleitende Schrägebene mit Hilfe eines entsprechenden Gewichtsansatzes durch einen Stützpunkt hindurch, wenn die Lage des zu interpolierenden Punktes identisch mit derjenigen eines Stützpunktes ist. Neben der Schrägebene haben KOCH und KRAUS noch eine Horizontalebene und ein Polynom 2. Grades als Trendfläche vorgesehen.

Maßgebend für die Güte der Prädiktion ist die Wahl und Bestimmung der Kovarianzfunktion für die zufällige Veränderliche des Signals s . Alle drei Autoren verwenden eine Abklingfunktion, die nur vom Abstand zwischen den Stützpunkten abhängt und für jede Recheneinheit jeweils neu bestimmt wird. Dies bedeutet, daß innerhalb der jeweiligen Recheneinheit Homogenität (Ortsunabhängigkeit) und Isotropie (Richtungsunabhängigkeit) vorausgesetzt wird. Im Vergleich zu KOCH und LAUER setzt KRAUS mit seinen größeren Recheneinheiten homogene und isotrope Verhältnisse in einem etwas größeren Bereich voraus. Er verwendet eine Gauß'sche Glockenkurve der Form

$$C(\overline{P_i P_k}) = C(0) \cdot \exp(-K^2 (\overline{P_i P_k})^2) , \quad (3.17)$$

wobei $C(\overline{P_i P_k})$ die Kovarianz für die Entfernung $\overline{P_i P_k}$, $C(0)$ die Kovarianz für die Entfernung Null und K einen konstanten Faktor bedeuten. Den Verlauf der Glockenkurve bestimmt KRAUS empirisch über die Stützwerte in der Recheneinheit. Dazu werden die einzelnen Kovarianzen entsprechend dem jeweiligen Stützpunktabstand in verschiedene Entfernungsklassen eingeordnet und gemittelt. Die Glockenkurve selbst wird vermittelnd durch die Kovarianzen der verschiedenen Entfernungsklassen gelegt (Abb. 3-7). Ist die Kovarianz $C(0)$ kleiner als die Varianz V , so bedeutet dies, daß die Stützwerte mit einem bestimmten zufälligen Meßfehler (noise) behaftet sind.

1) Inzwischen arbeitet das Höhenlinienprogramm SCOP mit Recheneinheiten variabler Größe, die sich an die jeweilige Stützpunktverteilung anpassen. Die konstante Größe der rechteckigen Nettorecheneinheiten wird so bestimmt, daß die Nettorecheneinheiten im Mittel 10 Stützpunkte enthalten. In Abhängigkeit von der jeweiligen Stützpunktverteilung wird der Überlappungsbereich einer Nettorecheneinheit variabel gehalten und nur so weit ausgedehnt, daß ein stetiger und glatter Übergang der interpolierten Flächen an den Rändern der Nettorecheneinheiten sichergestellt ist. Die Bruttorecheneinheiten (Nettorecheneinheit einschließlich Überlappungsbereich) enthalten dadurch im Mittel nur noch ca. 30 Stützpunkte.

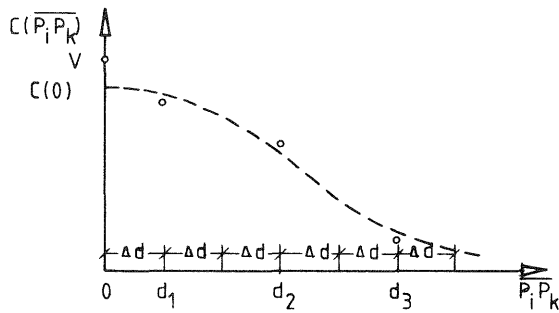


Abb. 3-7 Empirische Bestimmung der Kovarianzfunktion

KOCH [103] und LAUER verwenden das von HIRVONEN vorgeschlagene Modell für die Kovarianzfunktion:

$$C(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{K}\right)^2} \quad (3.18)$$

Die Kovarianz C hängt hier von der Entfernung s der Stützpunkte und der Halbwertsbreite K der Kovarianzfunktion ab. Unter der Annahme, daß sich der Meßpunktabstand nach der Beschaffenheit des Geländes richtet, arbeitet KOCH mit der Halbwertsbreite K

$$K = 0.58 r \quad (3.19)$$

wobei r die Summe der Abstände des zu interpolierenden Punktes von den beiden nächstliegenden Stützpunkten bedeutet. LAUER berechnet die Halbwertsbreite K zu

$$K = 0.23 r \quad (3.20)$$

mit r als Umfang der Dreiecksmasche im Inneren seiner Verarbeitungseinheit.

Bedingt durch die verschiedenartigen Recheneinheiten unterscheiden sich die drei Ansätze auch vom Rechenaufwand her. Nach Gleichung (3.14) ist für jede Recheneinheit die Matrix \underline{C} zu invertieren und mit dem Vektor $\underline{1}$ der Stützwerte zu multiplizieren. Wenn wir beachten, daß sich die Matrixinversion durch eine Gleichungslösung ersetzen läßt, wobei wir als Vektor der Unbekannten das Produkt aus $C^{-1} \underline{1}$ erhalten, so reduziert sich der Rechenaufwand wesentlich, LAUER hat für jede Dreiecksmasche ein Gleichungssystem mit maximal 12 Unbekannten, KOCH für jeden zu interpolierenden Punkt ein Gleichungssystem mit maximal 20 Unbekannten und KRAUS für jede Recheneinheit ein Gleichungssystem mit ca. 50 - 100 Unbekannten zu lösen. Da die Matrix C wohl symmetrisch, aber voll besetzt ist, steigt mit zunehmender Stützpunktzahl der erforderliche Kernspeicherplatz und insbesondere die Rechenzeit, da der Rechenaufwand zur Lösung dieser Gleichungssysteme mit der 3. Potenz der Anzahl der Unbekannten steigt.

Wenn sich z.B. die Verfahren nach KOCH und KRAUS trotzdem in der Rechenzeit bei praktischen Fällen nicht wesentlich unterscheiden, so liegt dies u.a. darin begründet, daß KOCH für jeden Rasterpunkt eine Gleichung mit maximal 20 Unbekannten lösen muß, während KRAUS mit seinen größeren Recheneinheiten wesentlich weniger, aber größere Gleichungssysteme zu lösen hat und für jede Rasterhöhe innerhalb der Recheneinheit nur noch eine Multiplikation zweier Vektoren benötigt.

Die theoretische Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten haben u.a. KRAUS [117] und LAUER und WROBEL [126] hergeleitet. Simulierte Beispiele sind in ASSMUS und KRAUS [12] dargestellt. Aufgrund ihres Ansatzes kann davon ausgegangen werden, daß die Interpolation nach kleinsten Quadraten theoretisch insoweit zu optimalen Ergebnissen führt, als sie die genauesten Ergebnisse aufgrund der gegebenen Stützwerte liefert.

Beim praktischen Einsatz der Methode zeigt sich, daß sich dies nur dann erreichen läßt, wenn die theoretischen Voraussetzungen erfüllt sind, d.h. Homogenität und Isotropie ausreichend gewährleistet und die Verteilung der Stützpunkte, die Größe der Stützwerte, die Form der Kovarianzfunktion und ihr Scheitel aufeinander abgestimmt sind. Eine brauchbare Möglichkeit dazu stellt die empirische Bestimmung der Kovarianzfunktion aus den Stützwerten selbst dar.

Die Bestimmung des mittleren Schätzfehlers in sämtlichen Interpolationspunkten liefert neben der Aussage, ob die Interpolationswerte eine bestimmte vorgegebene Genauigkeit unterschreiten, noch die Möglichkeit, die Datenerfassung gezielt zu ergänzen, falls die vorgegebene Genauigkeit überschritten wird. Dazu bestimmen wir in jedem Rasterpunkt den mittleren Schätzfehler. Speichern wir die mittleren Schätzfehler analog den Höhenwerten in einem digitalen Modell ab, so können daraus mit Hilfe eines Isolinenprogramms Linien gleicher mittlerer Schätzfehler abgeleitet werden. Im Bereich unzulässig großer Schätzfehler kann jetzt die Datenerfassung durch weitere Stützpunkte gezielt ergänzt werden.

Ebenso wie die lineare Prädiktion beruht die von CHILES und DELFINER [35] als "krigeage" und von OLEA [158] als "universal kriging" bezeichnete Interpolationsmethode auf der statistisch begründeten Theorie stationärer stochastischer Prozesse. Der Ansatz beruht auf der Theorie der "variables régionalisées", die MATHERON [146] entwickelt hat. Nach CHILES und DELFINER [35] versteht man unter dem Begriff "krigeage" die optimale Schätzung einer Unbekannten h ausgehend von beliebig verteilten Stützwerten. Dieser optimale Schätzwert muß zwei Bedingungen erfüllen: Der Erwartungswert des Schätzfehlers muß Null sein und die Varianz des Schätzfehlers muß ein Minimum werden. Bei der Bestimmung der Kovarianzfunktion, hier als "demi-variogramme" bezeichnet, gehen sie nicht von isotropen Verhältnissen aus. Sie stellen entlang von vier Diagonalen je ein "demi-variogramme" auf und verwenden für die eigentliche Interpolation nur denjenigen Bereich, in welchem eine ausreichende Übereinstimmung in den verschiedenen Richtungen und damit isotrope Verhältnisse vorliegen.

3.2.8 Multiquadratische Methode

Im Gegensatz zur linearen Prädiktion, die auf einer statistischen Grundlage ruht, geht HARDY [77], [78] bei seiner als "multiquadratic analysis" bezeichneten Interpolationsmethode ausschließlich von geometrischen bzw. physikalischen Überlegungen aus. Die grundlegende Hypothese dieser Methode ist, daß jede glatte, mathematisch definierte Oberfläche ebenso wie jede beliebige glatte Oberfläche, die mathematisch nicht definiert werden kann, durch ein Aufsummieren eines breiten Spektrums regelmäßiger, mathematisch definierter Oberflächen mit beliebiger Genauigkeit angenähert werden kann (HARDY [79] S. 480). Als besonders geeignet

erwiesen sich für diesen Zweck Funktionen 2. Grades, die um eine vertikale Achse rotieren.

Eine von HARDY [78] als multiquadratisch bezeichnete Oberfläche kann wie folgt beschrieben werden:

$$h = \sum_{i=1}^n c_i [f(x_i, y_i, x, y)] \quad (3.21)$$

Die Geländehöhe h ergibt sich dabei in Abhängigkeit von den Lagekoordinaten x und y als Ergebnis eines Aufsummierens ein und derselben Klasse von Flächen 2. Ordnung f . Diese entstehen jeweils durch Rotation einer quadratischen Funktion (Kernfunktion) um eine vertikale Symmetrieachse durch den betreffenden Stützpunkt mit den Koordinaten x_i, y_i . Der Koeffizient c_i bestimmt dabei das Vorzeichen und die Steilheit einer bestimmten Funktion. Mit der Funktion

$$f(x_i, y_i, x, y) = [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + C]^{1/2} \quad (3.22)$$

ergeben sich z.B. Hyperboloide mit der Symmetrieachse im Stützpunkt (x_i, y_i) . Die Konstante C bezeichnet dabei einen Glättungsfaktor (GÖPFERT [63]). Aber auch andere Flächen 2. Ordnung, wie z.B. Paraboloid, Ellipsoide, Zylinder oder Kegel lassen sich verwenden.

Liegen n beliebig verteilte Stützpunkte P_i mit den Koordinaten x_i, y_i und den Stützwerten l_i vor, so ergibt sich die gesuchte Höhe h im Interpolationspunkt P mit den Koordinaten x, y nach HARDY [79] S. 481 zu

$$h = \underline{q}^T \underline{Q}^{-1} \underline{l} \quad (3.23)$$

$$= (Q_{P1} \quad Q_{P2} \quad \dots \quad Q_{Pn}) \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \dots & Q_{nn} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{pmatrix}$$

Die Elemente Q_{ik} der Kernfunktionsmatrix Q bestimmt HARDY mit der jeweils gewählten quadratischen Kernfunktion entsprechend Gleichung (3.22) zu

$$Q_{ik} = [(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2]^{1/2} \quad (3.24)$$

$$= s_{ik}$$

Die Elemente $Q_{11}, Q_{22}, \dots, Q_{nn}$ auf der Hauptdiagonalen der Matrix Q nehmen dabei den Wert Null an.

Die Interpolationsfläche geht exakt durch sämtliche Stützpunkte hindurch. Zwischen den Stützpunkten wird eine "plausible Interpolation" (GÖPFERT [63] S. 458, HARDY [77] S. 1906) durchgeführt.

Zur praktischen Durchführung der Interpolation mit der multiquadratischen Methode empfiehlt es sich, wie bei der Interpolation nach kleinsten Quadraten vorweg den deterministischen Anteil der Stützwerte durch eine Trendfunktion abzuspalten (GÖPFERT [63], WOLF [231]).

Die Genauigkeit der multiquadratisch interpolierten Werte leitet WOLF in [231] her. Dabei setzt er voraus, daß die Stützwerte vorab um den Trend reduziert werden.

3.2.9 Vergleich verschiedener Interpolationsmethoden

Zur Abklärung des Gültigkeitsbereichs und der Anwendungsmöglichkeiten der verschiedenen Interpolationsmethoden wurden in den vergangenen Jahren nur wenige Untersuchungen durchgeführt.

In den Arbeiten, welche die Theorien der verschiedenen Methoden miteinander vergleichen, gehört die Spektralanalyse einiger Interpolationsmethoden von KRATKY [110]. Er zeigt, daß die Spektralanalyse hilft, die Funktionsweise von Interpolationsmethoden zu verstehen und ihr Leistungsvermögen abzuschätzen. Besonders geht er auf die Kleinste-Quadrate-Interpolation ein, von der er zeigt, daß sie eine gute Annäherung an eine Interpolation mit Tiefpaßfilter-Effekt darstellt. Verschiedene Aspekte der Genauigkeit und der Stabilität der Interpolation nach kleinsten Quadraten lassen sich mit Hilfe der Spektralanalyse leichter verstehen und interpretieren.

EBNER stellt in [39] den Zusammenhang zwischen dem Gauß-Markov-Prozeß 1. bzw. 2. Ordnung und der linearen Prädiktionsfilterung her. Dabei zeigt er, daß beide Verfahren zu streng demselben Interpolationsergebnis führen, wenn beide Methoden dieselbe Kovarianzfunktion verwenden. Als grundsätzlichen Unterschied beider Verfahren hebt EBNER hervor, daß beim Gauß-Markov-Prozeß zuerst der Prozeß definiert wird, für den sich dann eine bestimmte Kovarianzfunktion ergibt, während die lineare Prädiktionsfilterung von einer frei gewählten Kovarianzfunktion ausgeht und die Frage nach dem zugehörigen stochastischen Prozeß im Hintergrund steht. Ein weiterer Unterschied ist darin zu sehen, daß bei der Interpolation mit finiten Elementen keine Trendfläche benötigt wird und damit auch die Tendenz der interpolierten Fläche entfällt, immer wieder zur Trendfläche zurückzukehren. Im Vergleich zur linearen Prädiktion ist der Rechenaufwand bei der Interpolation mit linearen finiten Elementen nach Meinung von EBNER wesentlich geringer, da hier die unbekanntes Rasterhöhen über die Krümmungsgleichungen nur mit ihren unmittelbar benachbarten Rasterhöhen verknüpft sind. Dadurch besitzt die Normalgleichungsmatrix eine gleichbleibend geringe Bandbreite. Die Rechenzeit hängt somit nur linear von der Anzahl der Rasterpunkte und nicht, wie bei der linearen Prädiktion, von der Anzahl der Stützpunkte ab.

Einen Vergleich der multiquadratischen Interpolationsmethode mit der linearen Prädiktion führen HARDY [79] und WOLF [231] durch. Nach WOLF [231] S. 92 zeigt die formale Übereinstimmung der Gleichungen (3.23) und (3.14), daß man die multiquadratische Methode von ihrem funktionalen Modell her als eine Kollokation auffassen könnte. Der Unterschied liegt indessen im stochastischen Modell, d.h. in der Bildungsweise der Elemente der Matrizen \underline{Q} und \underline{C} bzw. der Vektoren \underline{q} und \underline{c} . Die Varianzen, die den Elementen entlang der Hauptdiagonalen der Matrix \underline{Q} entsprechen, sind alle Null, so daß nur die den Kovarianzen entsprechenden Elemente Q_{jk} auftreten. Nach WOLF besitzt die multiquadratische Methode ein sehr vereinfachtes stochastisches Modell: Außer dem noise existieren keine Signale, eine stochastische Begründung von Gleichung (3.23) besteht nicht und die von den Strecken s_{jk} abhängigen Elemente Q_{jk} haben nicht die Eigenschaft von Kovarianzfunktionen. Die multiquadratische Methode ist gleichsam frei von der Bindung an die Voraussetzung stochastischer Signale.

Nach HARDY [79] führen die multiquadratische Methode und die lineare Prädiktion zu demselben Interpolationsergebnis, wenn die Kovarianzfunktion der Prädiktion identisch mit einer quadratischen Interpolationsfunktion ist. Kovarianzfunktionen erweisen sich jedoch bei der multiquadratischen Methode nur als eine Möglichkeit unter vielen anderen. Eine multiquadratische Funktion ist eine andere Form, die insbesondere bei nicht stationären Prozessen Vorteile aufweist. Ein wichtiger Unterschied zwischen der multiquadratischen Interpolation und der linearen Prädiktion besteht nach Meinung von HARDY darin, daß die multiquadratische Interpolation die Probleme mit der empirischen Bestimmung oder der Vorgabe einer Kovarianzfunktion bei der linearen Prädiktion nicht kennt.

Grundsätzlich können wir festhalten, daß HARDY mit seiner geometrischen bzw. physikalischen Betrachtungsweise eine geometrische Interpretation der linearen Prädiktion geliefert hat. Gleichung (3.13) läßt sich danach als ein Aufsummieren von ebenso vielen Oberflächen deuten, wie Stützpunkte vorhanden sind. Jede Fläche ist eine Rotationsfläche, deren vertikale Achse durch den Stützpunkt hindurch geht.

Sicherlich läßt sich grundsätzlich feststellen, daß z.B. die Interpolation nach kleinsten Quadraten aufgrund ihres theoretischen Ansatzes genauer und flexibler ist als z.B. die lineare Interpolation oder eine Polynominterpolation. In welchem Umfang dieses potentielle Leistungsvermögen einer Interpolationsmethode tatsächlich ausgeschöpft werden kann, hängt u.a. vom praktischen Einbau einer Methode in ein Rechenprogramm und vom Einzelfall ab, auf den die Methode angewandt wird. Im Augenblick kann nicht davon ausgegangen werden, daß die heute bekannten Interpolationsmethoden in ihren Anwendungsbereichen endgültig abgeklärt sind. Einige lassen sich aber unter bestimmten Bedingungen ineinander überführen (WILD [224], [225]).

Die Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten, der Interpolation nach ARTHUR, der multiquadratischen Interpolation und der punktweisen Interpolation mit gleitender Schrägebene untersucht SCHUT [187] empirisch anhand einer vorgegebenen dreidimensionalen analytischen Fläche mit Wellenstruktur. Dabei kommt er zu dem Ergebnis, daß die lineare Prädiktion auch bei systematischem Charakter der Stützwerte dann sehr gute Ergebnisse liefert, wenn die Stützwerte vorweg um ihren deterministischen Anteil (Trend) reduziert werden. Auch bei der multiquadratischen Interpolation lassen sich mit geeignet gewählten Interpolationsparametern gute Ergebnisse erzielen. Die Methode der gleitenden Schrägebene erreicht nicht dieselbe Genauigkeit wie die vorgenannten Methoden, ist dafür aber einfacher anzuwenden.

CLERICI und KUBIK [36] untersuchen die theoretische Genauigkeit der punktweisen Interpolation topographischer Oberflächen am Beispiel der linearen Interpolation und der linearen Prädiktion. Dabei zeigt sich, daß der Abstand der Stützpunkte und die Bewegtheit der Geländeoberfläche diejenigen Faktoren sind, welche die Genauigkeit der interpolierten Werte in erster Linie beeinflussen. Die verwendete Interpolationsmethode ist im Vergleich dazu von geringerer Bedeutung und wirkt sich erst in zweiter Linie auf die Genauigkeit aus. Zu demselben Ergebnis kommt ACKERMANN [4], wenn er feststellt, daß die Genauigkeit interpolierter

Höhenwerte primär durch die Datenerfassung und nicht durch die Interpolationsmethode bestimmt wird. RÜDENAUER [172] gibt die zu erwartende Genauigkeit digitaler Höhenmodelle aufgrund empirischer Untersuchungen als Funktion der Geländekrümmung, des Stützpunktabstandes, eines empirisch bestimmten Proportionalitätsfaktors und des Meßfehlers an. Nach Ansicht von MARCKWARDT [139] ist der mathematische Apparat des Interpolators für die Genauigkeit der Berechnung im digitalen Geländemodell von untergeordneter Bedeutung im Vergleich zum Stützpunktabstand. HEIN und LENZE [82] untersuchen die Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit der linearen Interpolation, des gewichteten arithmetischen Mittels (hier als Korrelationsverfahren bezeichnet), der Polynomapproximation 1. und 2. Grades, der stückweisen Polynome (zweidimensionale Spline-Interpolation), der linearen Prädiktion mit gebietsweiser und punktwiser Ermittlung der Kovarianzfunktion und der multiquadratischen Interpolation am Beispiel einer Deutschen Grundkarte 1:5000. Als Bezugsauswertung verwenden sie 841 interpolierte Rasterhöhen der multiquadratischen Interpolation und vergleichen diese mit den Ergebnissen der anderen Interpolationsmethoden. Es handelt sich somit um relative Genauigkeitsvergleiche. Die beste Übereinstimmung der interpolierten Rasterhöhen ergibt sich zwischen der multiquadratischen Interpolation und der linearen Prädiktion mit gebietsweiser Bestimmung der Kovarianzfunktion.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der untersuchten Interpolationsmethoden kommen HEIN und LENZE [82] zu dem Ergebnis, daß die multiquadratische Methode das absolut schnellste der betrachteten Verfahren und dazu einfach und kurz zu programmieren ist. Wird die relative Rechenzeit für die multiquadratische Interpolation mit 1.0 angesetzt, so benötigt danach die Polynomapproximation 1. Grades die 3.6-fache und die lineare Prädiktion mit gebietsweiser Bestimmung der Kovarianzfunktion die 4.6-fache Rechenzeit. Dabei gehen HEIN und LENZE davon aus, daß bei der linearen Prädiktion eine Matrixinversion (siehe Gleichung (3.14)) notwendig ist. Nachdem diese Matrixinversion aber ebenso wie bei der multiquadratischen Methode durch eine Gleichungslösung ersetzt werden kann, dürfte dies zu einer Verkürzung der Rechenzeit ungefähr um den Faktor 3 führen, so daß die Rechenzeit für die lineare Prädiktion nicht mehr wesentlich über derjenigen für die multiquadratische Methode liegt.

Diese Untersuchung zeigt somit auch die Gefahrenquellen auf, wenn Rechenmethoden, die in umfangreiche Programmsysteme integriert sind, für Vergleichszwecke mehr oder weniger stark vereinfacht nachprogrammiert und aus den Ergebnissen zu weitgehende Schlußfolgerungen gezogen werden.

Einen praktischen Vergleich verschiedener Programmsysteme zur Ableitung von Höhenlinien für topographische Zwecke führt die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) in [8] durch. Diesem Vergleich wird charakteristisches Datenmaterial der einzelnen Landesvermessungsämter zugrunde gelegt. Beurteilt werden die Programmsysteme nach ihrer Leistungsfähigkeit und nach den Ergebnissen der Testberechnungen. Über einen Vergleich verschiedener Programmsysteme zur Erzeugung und Anwendung digitaler Höhenmodelle im Bereich des Straßenwesens berichtet WOLF [228]. Auch hier erfolgt die Bewertung der einzelnen Programmsysteme sowohl aufgrund eines umfangreichen Bewertungskatalogs als auch nach den Ergebnissen mehrerer Testberechnungen.

Zweiter Teil

EINSATZ DES DIGITALEN HÖHENMODELLS ZUR BERECHNUNG ABGELEITETER GRÖSSEN
UND EMPIRISCHE UNTERSUCHUNGEN AM BEISPIEL DER GELÄNDENEIGUNG

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird untersucht, welche zusätzlichen Informationen aus den Höhenwerten des digitalen Höhenmodells rechnerisch abgeleitet werden können und auf welche Art und Weise dies erfolgen kann.

Bei diesen abgeleiteten Größen handelt es sich um Informationen, die nicht nur für Anwendungen im Ingenieurbau, sondern auch speziell für die Flurbereinigungsverwaltung von Interesse sind. Den Schwerpunkt des 4. Kapitels bildet die rechnerische Ableitung der Geländeneigung aus dem digitalen Höhenmodell. Entsprechend der Geländehöhe wird die Geländeneigung in einem digitalen Neigungsmodell abgespeichert. Sie steht damit zur rechnerischen Ableitung von Gefällstufen- und Expositionskarten, von Falllinien, Neigungsprofilen und von Schummerungsvorlagen für kartographische Zwecke zur Verfügung.

Als derzeit noch wichtigstes Hilfsmittel bei der Erdmassenbestimmung wird auf die Ableitung von Profilen, aber auch auf die direkte Massenberechnung mit Hilfe des digitalen Höhenmodells eingegangen. Welche Möglichkeiten die auf einem digitalen Höhenmodell aufbauende digitale Oberflächenmodellierung bietet, wird am Beispiel der Fragen dargestellt, die sich bei der Planung großer Massenbewegungen in Rebflurbereinigungen ergeben.

Die Geländeneigung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke hat in den vergangenen Jahren durch die immer stärker zunehmende Mechanisierung an Bedeutung gewonnen. In Flurbereinigungsgebieten mit bewegter Geländeoberfläche wird deshalb die Geländeneigung immer häufiger durch Messungen mit dem Freihandgefällmesser im Gelände routinemäßig ermittelt oder aus vorhandenen oder photogrammetrisch hergestellten Höhenlinienplänen abgeleitet. Diese konventionellen Aufnahmen werden im 5. Kapitel für vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Geländeneigung herangezogen. Die Leistungsfähigkeit der rechnerischen Ableitung der Geländeneigung und die Genauigkeit einer automatisch abgeleiteten Gefällstufenkarte werden durch einen Vergleich mit Gefällstufenkarten untersucht, die im Zuge von Flurbereinigungsverfahren nach verschiedenen konventionellen Verfahren hergestellt wurden. Eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Verfahren schließt das 5. Kapitel ab.

4. Ein digitales Höhenmodell als Ausgangsinformation zur Berechnung abgeleiteter Größen

Bereits in ihrer grundlegenden Veröffentlichung über das digitale Geländemodell aus dem Jahre 1958 wiesen MILLER und LAFLAMME [149] auf verschiedene Möglichkeiten hin, aus den Höhenwerten weitere Größen rechnerisch abzuleiten. Angesprochen wurden z.B. die Massenberechnung im Verkehrswegebau und die Ableitung der Geländeneigung.

Ziel der ersten Programmentwicklungen zur digitalen Höhenverarbeitung Anfang der 70er Jahre war hauptsächlich die topographisch hochwertige Höhengichtlinienkartierung. Ein digitales Höhenmodell stellte dabei lediglich eine Zwischenstufe dar. Aufgrund ihrer hohen Informationsdichte und vielseitigen Anwendbarkeit gewann diese jedoch rasch einen eigenständigen Wert. Überlegungen zur bestmöglichen Verwertung dieser Höheninformationen einerseits sowie praktische Erfahrungen des Autors in der routinemäßigen Bestimmung der Geländeneigung mit dem Freihandgefällmesser im Flurbereinigungsverfahren einschließlich der damit verbundenen Unsicherheitsfaktoren andererseits führten zu den vorliegenden Untersuchungen. Sie sollen klären, ob die Geländeneigung nicht einfacher und genauer auf rechnerischem Wege aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet werden kann. Im Mittelpunkt des 4. Kapitels steht deshalb die rechnerische Ableitung der Geländeneigung samt Vorschlägen für weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Einen zweiten Schwerpunkt für die Anwendung des digitalen Höhenmodells bildet die digitale Oberflächenmodellierung. Die Bedeutung dieses Hilfsmittels für den planenden Ingenieur speziell in der Rebflurbereinigung ergibt sich aus dem Trend zu immer umfangreicheren Erdbewegungen, die stärkere Eingriffe in Naturhaushalt und Landschaftsbild unvermeidlich machen, verbunden mit steigenden Kosten für die erforderlichen Baumaßnahmen. Die digitale Oberflächenmodellierung kann bei den meist gegensätzlichen Ausgangsforderungen nach einer bestmöglichen Bearbeitbarkeit der Weinberge und einem weitgehenden Natur- und Landschaftsschutz zur Erarbeitung optimaler Kompromisse beitragen.

4.1 Ein digitales Neigungsmodell

4.1.1 Definition

Ein digitales Neigungsmodell (DNM) enthält Angaben über das Neigungsverhalten einer Fläche in digitaler Form. Es ist ein Teil des übergeordneten digitalen Geländemodells, unabhängig davon, ob die Neigung im Gelände direkt gemessen oder rechnerisch aus Höhenwerten abgeleitet worden ist.

In Analogie zum digitalen Höhenmodell wird das Neigungsverhalten einer Fläche in dieser Arbeit durch die Neigung der Fläche in einer Vielzahl diskreter Rasterpunkte angegeben. Die Neigung einer Fläche in einem Rasterpunkt (I,K) wird durch den Neigungsvektor der Tangentialebene an die Fläche im Punkt (I,K) definiert.

Die Neigung der Tangentialebene im Punkt (I,K) kann festgelegt werden durch die

- Angabe des Neigungswinkels in zwei Strahlen durch den Punkt (I,K) , deren Richtungen bekannt sind.

Fallen diese beiden Richtungen mit den positiven Achsrichtungen eines rechtwinkligen Koordinatensystems zusammen, so ist in diesem Sonderfall die Angabe des Neigungswinkels in den beiden vorgegebenen Richtungen ausreichend. Ferner kann sie festgelegt werden durch die

- Angabe des maximalen Neigungswinkels gegen die Horizontalebene (Fallwinkel oder Gefälle) und die Richtung des Neigungsvektors mit maximalem Neigungswinkel (Fallrichtung).

Dieser Art der Festlegung ist im Bereich der Geologie die Festlegung der Neigung von Trennebenen unterschiedlicher geologischer Formationen durch Streichen und Fallen direkt vergleichbar. Als Bestimmungsstücke werden dabei Fallwinkel und Streichrichtung (Richtung der Schnittgeraden der Trennebene mit einer Horizontalebene) verwendet. Auch die Festlegung der Tangentialebene durch ihren Normalenvektor entspricht diesem Vorschlag.

Beide Vorschläge sind gleichwertig. Die Angaben lassen sich ineinander überführen. Sollen aus dem digitalen Neigungsmodell überwiegend Informationen über das Gefälle einer Fläche entnommen werden, so ist es sinnvoll, im digitalen Neigungsmodell bereits das Gefälle und die Fallrichtung abzuspeichern, so daß sich bei wiederholten Anwendungen die Umrechnung der Neigungen in den beiden Koordinatenrichtungen in Fallwinkel und Fallrichtung erübrigt.

Da das Neigungsmodell im Zusammenhang mit verschiedenen Planungsschritten in einem Flurbereinigungsverfahren Auskunft über den Betrag des Geländegefälles und seine Richtung geben soll, werden im digitalen Neigungsmodell, wie es hier vorgestellt wird, Fallwinkel und Fallrichtung abgespeichert. Wenn für diese besondere Art des digitalen Neigungsmodells auch schon die Bezeichnung digitales Gefällemodell vorgeschlagen wurde (STANGER |197|), so sollte im Hinblick auf eine einheitliche Bezeichnung auf diesen Begriff besser verzichtet werden und der allgemeinere Begriff des digitalen Neigungsmodells verwendet werden.

Wie beim digitalen Höhenmodell sagt der Begriff digitales Neigungsmodell alleine noch nichts über die Entstehungsart der Neigungswerte, über ihre lagemäßige Verteilung oder über die Art der Bestimmung der Neigung aus. Es ist also möglich, daß die Neigungswerte z.B.

- direkt gemessen wurden (terrestrisch oder photogrammetrisch) oder
 - aus Höhenwerten abgeleitet sind
- und daß die Punkte selbst
- beliebig oder
 - rasterförmig verteilt sind.

Bei Bedarf können deshalb auch beim digitalen Neigungsmodell weitere Adjektive Auskunft über bestimmte Eigenschaften geben. Die Neigungsangaben, die im folgenden aus den Rasterhöhen eines digitalen Höhenmodells abgeleitet werden, bilden z.B. ein rasterförmiges digitales Neigungsmodell.

Während das hier beschriebene Verfahren zur rechnerischen Ableitung der Geländeneigung auf der Vektordatenverarbeitung beruht, die nach den Methoden der analytischen Geometrie arbeitet, beschreibt WEBER |221| eine Methode zur Berechnung der Geländeneigung aus äquidistanten Höhenlinien. Das dabei angewandte Verfahren der Rasterdatenverarbeitung stützt sich auf eine automatische Abstandsmessung benachbarter Höhenlinien durch deren sukzessive Verbreiterung um jeweils ein Pixel.

STRAUSS |206| verwendet im Wiesbadener topographischen Zeichenprogramm zur Höheninterpolation und zur rechnerischen Ableitung der Geländeneigung lokale Polynome. Er verzichtet auf die Interpolation eines regelmäßigen Rasters und bestimmt statt dessen in jedem gemessenen Stützpunkt ein 6-gliedriges quadratisches Polynom mit

Hilfe der unmittelbar benachbarten Stützpunkte. Die Differenzierung der Polynomgleichung ergibt in jedem Stützpunkt die Geländeneigung.

EBNER und REISS [42] leiten die Geländeneigung aus den Höhenwerten eines rasterförmigen digitalen Höhenmodells ab. Die maximale Geländeneigung in den Rasterpunkten bestimmen sie mit Hilfe der Höhendifferenzen zu den umliegenden vier Rasterpunkten.

4.1.2 Ansätze zur rechnerischen Ableitung eines digitalen Neigungsmodells

Die folgenden Überlegungen gehen davon aus, daß ein engmaschiges, quadratisches oder rechteckiges digitales Höhenmodell als Ausgangsinformation vorliegt, wie es von verschiedenen Rechenprogrammen, z.B. vom Höhenlinienprogramm SCOP erzeugt wird. Gesucht werden Ansätze zur Bestimmung des Neigungsvektors der Tangentialebene an die Oberfläche in den Rasterpunkten. Zur Berechnung von Betrag und Richtung des Neigungsvektors in Form von Fallwinkel und Fallrichtung stehen die Höhenwerte des digitalen Höhenmodells zur Verfügung.

Im ersten und einfachsten Ansatz wird die Fläche, die durch die vier Höhenwerte H der Eckpunkte eines Rasterquadrates aufgespannt wird, als Polyeder interpretiert und in ebene Dreiecksflächen zerlegt. Von den vier möglichen gleichschenkeligen Dreiecksflächen eines Rasterquadrates wird zur Bestimmung des Neigungsvektors der Tangentialebene im Rasterpunkt (I,K) nur diejenige herangezogen, deren Spitze im Rasterpunkt (I,K) liegt. Da sich im Rasterpunkt (I,K) vier benachbarte Rasterquadrate berühren, wird die Oberfläche im Rasterpunkt (I,K) bei diesem Ansatz durch die vier Dreiecksflächen angenähert, deren Spitzen im Punkt (I,K) liegen (Abb. 5-1).

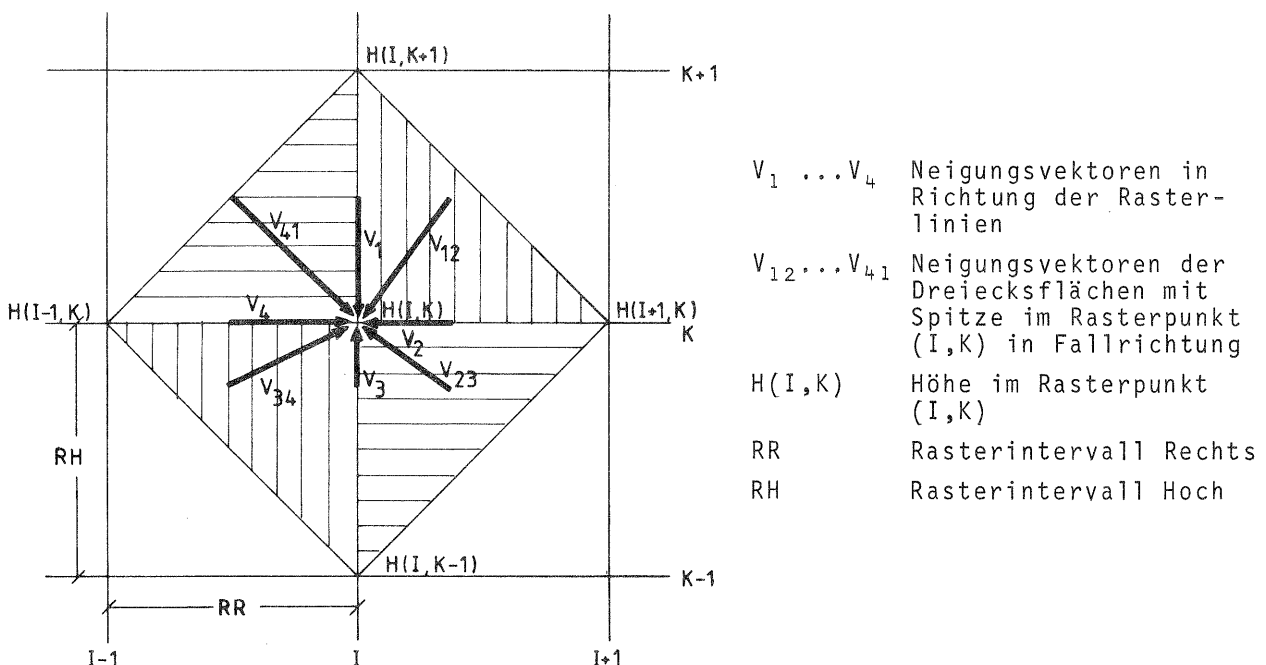


Abb. 4-1 Bestimmung des Neigungsvektors der Tangentialebene an die Oberfläche im Rasterpunkt (I,K)

Zur Beschreibung der räumlichen Lage dieser vier Ebenen werden neben der Höhe $H(I,K)$ im Rasterpunkt (I,K) selbst noch die Höhen $H(I-1,K)$, $H(I+1,K)$, $H(I,K-1)$ und $H(I,K+1)$ der vier nächstliegenden Rasterpunkte benötigt. Wird unterstellt, daß diese Rasterhöhen insgesamt eine stetige, glatte Fläche ohne Knicke beschreiben, so kann der Neigungsvektor der Tangentialebene im Rasterpunkt (I,K) als Mittelwert der Neigungsvektoren der vier angrenzenden Ebenen bestimmt werden.

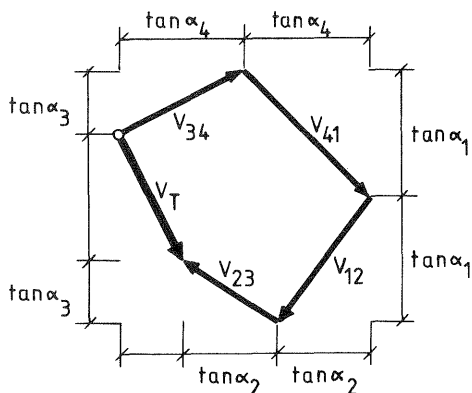
Sind die beiden Neigungsvektoren V_1 und V_2 einer Ebene in den beiden Rasterrichtungen mit ihren Neigungswinkeln α_1 und α_2 gegeben, so ergibt sich der Fallwinkel G_{12} des Neigungsvektors V_{12} dieser Ebene über eine vektorielle Addition der beiden Neigungsvektoren V_1 mit dem Betrag $\tan\alpha_1$ und V_2 mit dem Betrag $\tan\alpha_2$ zu

$$G_{12} = \text{atan} \left(\sqrt{\tan^2\alpha_1 + \tan^2\alpha_2} \right) \quad (4.1)$$

und das Azimut RW_{12} der Fallrichtung der Ebene zu

$$RW_{12} = \text{atan} \left(\frac{\tan\alpha_2}{\tan\alpha_1} \right) . \quad (4.2)$$

Zur Bestimmung des gemittelten Neigungsvektors der Tangentialebene im Rasterpunkt (I,K) sind im Fall der Abbildung 4-1 die Neigungsvektoren der vier angrenzenden Dreiecksflächen vektoriell zu addieren (Abb. 4-2).



- $V_{12} \dots V_{14}$ Neigungsvektoren der vier Dreiecksflächen in Fallrichtung
- V_T Neigungsvektor der Tangentialebene im Rasterpunkt (I,K) in Fallrichtung
- $\alpha_1 \dots \alpha_4$ Neigungswinkel der vier Dreiecksflächen in Richtung der Rasterlinien

Abb. 4-2 Addition der Neigungsvektoren der vier im Rasterpunkt (I,K) angrenzenden Ebenen

Der Betrag G des Fallwinkels der Tangentialebene im Rasterpunkt (I,K) ergibt sich aus den Neigungswinkeln $\alpha_1 \dots \alpha_4$ der vier angrenzenden Ebenen in Richtung der Rasterlinien zu

$$G(I,K) = \text{atan} \left(\frac{1}{4} \sqrt{(2(\tan\alpha_2 + \tan\alpha_4))^2 + (2(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_3))^2} \right) . \quad (4.3)$$

Setzen wir die einzelnen Neigungen in Richtung der Rasterlinien

$$\tan\alpha_1 = (H(I,K) - H(I,K+1))/RH$$

$$\tan\alpha_2 = (H(I,K) - H(I+1,K))/RR$$

$$\tan\alpha_3 = (H(I,K-1) - H(I,K))/RH$$

$$\tan\alpha_4 = (H(I-1,K) - H(I,K))/RR$$

in Gleichung (4.3) ein, so folgt für den Betrag G des Fallwinkels

$$G(I,K) = \text{atan} \left(\frac{1}{2} \sqrt{((H(I-1,K)-H(I+1,K))/RR)^2 + ((H(I,K-1)-H(I,K+1))/RH)^2} \right). \quad (4.4)$$

Das Azimut RW der Fallrichtung der Tangentialebene im Rasterpunkt (I,K) berechnet sich nach Abbildung 4-2 zu

$$RW(I,K) = \text{atan} \left(\frac{2(\tan\alpha_2 + \tan\alpha_4)}{2(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_3)} \right) \text{ oder} \quad (4.5)$$

$$RW(I,K) = \text{atan} \left(\frac{(H(I-1,K)-H(I+1,K))/RR}{(H(I,K-1)-H(I,K+1))/RH} \right). \quad (4.6)$$

Als zweiter Ansatz wird die Geländeoberfläche im Rasterpunkt (I,K) durch ein lokales Polynom niederen Grades dargestellt, das durch die unmittelbar benachbarten Rasterpunkte gelegt wird. Der Neigungsvektor der Oberfläche im Rasterpunkt (I,K) in Fallrichtung ist dann identisch mit demjenigen der Tangentialebene im Punkt (I,K) an die Polynomfläche.

Die Parameter der lokalen Polynome werden über die Rasterhöhen bzw. über weitere Angaben, wie z.B. Neigungsangaben der Polynomflächen an ihren Rändern, bestimmt. Legen wir den Koordinatenursprung der einzelnen Polynome immer in den Rasterpunkt (I,K) , so bleiben die Koeffizienten zur Bestimmung von Fallwinkel und Fallrichtung der Tangentialebene im Punkt (I,K) an das Polynom gleich und können direkt als Funktion der Polynomparameter angegeben werden.

Für die Wahl des Grades der lokalen Polynome gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei der Höheninterpolation im Raster. Bei Genauigkeitsuntersuchungen zur Höheninterpolation im quadratischen Raster kommt LEBERL [127] zu dem Ergebnis, daß sich eine interpolierte Höhe nicht mehr verbessert, wenn mehr als 4·4 benachbarte Rasterpunkte als Stützpunkte herangezogen werden, Polynome höheren als 3. Grades erzeugen neben erhöhtem Rechenaufwand nur noch stärkere Änderungen im Krümmungsverhalten der durch die Polynome dargestellten Oberfläche. Aus diesem Grund werden nur das 9-gliedrige biquadratische Polynom und das 16-gliedrige bikubische Polynom zur Darstellung der lokalen Polynomflächen verwendet.

Das 9-gliedrige biquadratische Polynom hat die Gleichung

$$Z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{22}x^2y^2 \quad (4.7)$$

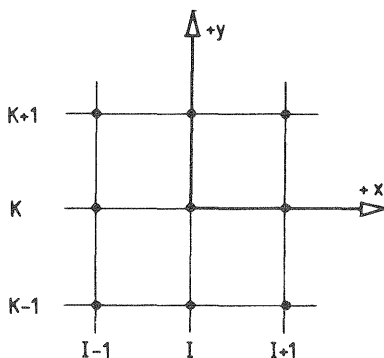


Abb. 4-3

In die Bestimmung eines 9-gliedrigen biquadratischen Polynoms einbezogene Rasterpunkte

Die Gleichung der Tangentialebene an eine Fläche im Punkt x,y,H lautet nach BRONSTEIN und SEMENDJAJEW [29] Seite 220 allgemein:

$$Z-H = \frac{\partial Z}{\partial x} (X-x) + \frac{\partial Z}{\partial y} (Y-y) \quad (4.8)$$

x,y,H Koordinaten des Berührungspunktes der Tangentialebene

X,Y,Z laufende Koordinaten eines Punktes der Tangentialebene.

Fällt der Koordinatenursprung mit dem Rasterpunkt (I,K) als Berührungspunkt der Tangentialebene zusammen (Abb. 4-3), so erhalten wir als Gleichung der Tangentialebene

$$Z = H(I,K) + a_{10} \cdot X + a_{01} \cdot Y. \quad (4.9)$$

Daraus läßt sich der Fallwinkel G der Tangentialebene berechnen zu

$$G(I,K) = \text{atan} \left(\sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2} \right) \quad (4.10)$$

und die Fallrichtung RW zu

$$RW(I,K) = \text{atan} \left(\frac{-a_{10}}{-a_{01}} \right). \quad (4.11)$$

Liegt ein quadratisches Raster mit der Seitenlänge 1 vor, so gilt

$$a_{10} = -\frac{1}{2} (H(I-1,K) - H(I+1,K)) \quad (4.12)$$

$$a_{01} = -\frac{1}{2} (H(I,K-1) - H(I,K+1)). \quad (4.13)$$

Die Gleichungen (4.12) und (4.13) in die Gleichung (4.10) und (4.11) eingesetzt ergeben

$$G(I,K) = \text{atan} \left(\frac{1}{2} \sqrt{(H(I-1,K) - H(I+1,K))^2 + (H(I,K-1) - H(I,K+1))^2} \right) \quad (4.14)$$

$$RW(I,K) = \text{atan} \left(\frac{H(I-1,K) - H(I+1,K)}{H(I,K-1) - H(I,K+1)} \right). \quad (4.15)$$

Beim 16-gliedrigen bikubischen Polynom ist die Tangentialebene der Funktion

$$\begin{aligned} Z = & a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 \\ & + a_{30}x^3 + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{03}y^3 \\ & + a_{31}x^3y + a_{22}x^2y^2 + a_{13}xy^3 + a_{32}x^3y^2 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3 \end{aligned} \quad (4.16)$$

zu bestimmen.

Die Asymmetrie der in die Polynombestimmung einbezogenen Rasterpunkte zum Koordinatenursprung (I,K) ergibt sich dadurch, daß einerseits 16 Rasterpunkte zur Bestimmung der Polynomkoeffizienten erforderlich sind, andererseits aber eine Einbeziehung von mehr als 4·4 Rasterpunkten wie bereits erwähnt nicht sinnvoll ist.

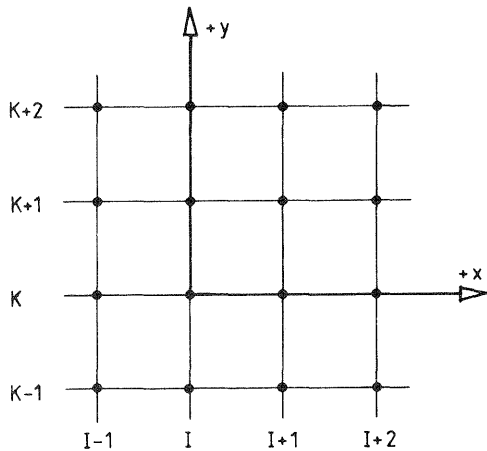


Abb. 4-4

In die Bestimmung eines 16-gliedrigen bikubischen Polynoms einbezogene Rasterpunkte

Lassen wir bei diesem Polynom den Koordinatenursprung mit dem Berührungspunkt der Tangentialebene im Rasterpunkt (I, K) zusammenfallen (Abb. 4-4), so gilt für die Tangentialebene im Berührungspunkt mit $x=0$ und $y=0$ die Gleichung (4.9). Entsprechend gelten auch für Fallwinkel und Fallrichtung der Tangentialebene die Gleichungen (4.10) und (4.11).

Liegt ein quadratisches Raster mit der Seitenlänge 1 vor, so erhalten wir für die Polynomkoeffizienten a_{10} und a_{01} folgende Werte:

$$a_{10} = -\frac{1}{3} H(I-1, K) - \frac{1}{2} H(I, K) + H(I+1, K) - \frac{1}{6} H(I+2, K) \quad (4.17)$$

$$a_{01} = -\frac{1}{3} H(I, K-1) - \frac{1}{2} H(I, K) + H(I, K+1) - \frac{1}{6} H(I, K+2) \quad (4.18)$$

Sowohl für das bikubische wie für das biquadratische Polynom gilt, daß der Übergang aneinander angrenzender Polynomflächen stetig ist, da die Schnittkurven der Polynomflächen mit den vertikalen Randbegrenzungsebenen in den angrenzenden Polynomflächen identisch sind. Da aber die ersten Ableitungen senkrecht zu diesen Schnittlinien nicht übereinstimmen müssen, ist der Übergang dieser lokalen Polynome nicht glatt, sondern es können Knicke auftreten.

Um zu erreichen, daß die durch die lokalen Polynome gebildete Oberfläche glatt ist, führen BOSMAN et al. [24] im Programm Delft zur Bestimmung der 16 Glieder des bikubischen Polynoms neben den 4 Rasterhöhen h eines Rasterelements noch die ersten Ableitungen nach x bzw. y und die gemischte zweite Ableitung nach x und y in diesen 4 Rasterpunkten ein. Als lokale Polynomfunktion $h(x, y)$ wird das bikubische Polynom der Gleichung (4.16) bzw. (3.3) verwendet. Die Polynomkoeffizienten a_{nm} ergeben sich aus Gleichung (3.4a).

Für die beiden gesuchten Polynomkoeffizienten a_{10} und a_{01} folgt unmittelbar:

$$\begin{aligned} a_{10} &= h_x(I, K) \\ a_{01} &= h_y(I, K) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Da die ersten Ableitungen h_x bzw. h_y die Steigung der Tangentialebene an das Polynom im Punkt (I, K) in x - bzw. y -Richtung darstellen, können sie näherungsweise durch die Steigung der Sehnen zwischen den beiden benachbarten Rasterpunkten in x - bzw. y -Richtung ersetzt werden:

$$a_{10} = (H(I+1,K) - H(I-1,K))/2RR \quad (4.20)$$

$$a_{01} = (H(I,K+1) - H(I,K-1))/2RH \quad (4.21)$$

Mit den Gleichungen (4.20) und (4.21) erhalten wir aus Gleichung (4.10) für den Fallwinkel G und aus Gleichung (4.11) für die Fallrichtung RW :

$$G(I,K) = \text{atan} \left(\frac{1}{2} \sqrt{((H(I-1,K)-H(I+1,K))/RR)^2 + ((H(I,K-1)-H(I,K+1))/RH)^2} \right) \quad (4.22)$$

$$RW(I,K) = \text{atan} \left(\frac{(H(I-1,K)-H(I+1,K))/RR}{(H(I,K-1)-H(I,K+1))/RH} \right) \quad (4.23)$$

Gleichung (4.22) ist identisch mit Gleichung (4.4) und Gleichung (4.23) mit (4.6). Ferner stimmen die Gleichungen (4.22) und (4.23) im Falle eines quadratischen Rasters mit der Seitenlänge 1 mit den Gleichungen (4.14) und (4.15) überein.

Da der Ansatz des Programms Delft so gewählt wurde, daß die Oberfläche, die durch die stückweisen Polynome gebildet wird, stetig und glatt ist, wird auch durch deren Tangentialebene eine stetige und glatte Fläche angenähert. Der Begriff glatt besagt dabei, daß die ersten Ableitungen der Fläche stetig sind und Knicke nicht auftreten können. Nachdem nun die Festlegung der Tangentialebene an die Fläche im Rasterpunkt (I,K) bei den beschriebenen drei Ansätzen mit Hilfe

- der 4 angrenzenden Dreiecksflächen und den 4 nächstliegenden Rasterhöhen (Abb. 4-1),
- eines 9-gliedrigen biquadratischen Polynoms und den 8 nächstliegenden Rasterhöhen (Abb. 4-3),
- eines 16-gliedrigen bikubischen Polynoms mit zusätzlichen Bedingungen und 15 benachbarten Rasterhöhen (Abb. 4-4)

zu demselben Ergebnis geführt hat, bedeutet dies, daß auch die Tangentialflächen eine stetige und glatte Fläche annähern. Nicht glatt muß dagegen die Oberfläche sein, die durch das 16-gliedrige bikubische Polynom ohne Nebenbedingungen (und 15 benachbarte Rasterhöhen) beschrieben wird.

Neben der Forderung, daß die Oberfläche glatt sein muß, werden als Kriterium zur Beurteilung der Rechenformeln die Änderungen des Fallwinkels und der Fallrichtung zwischen benachbarten Rasterpunkten herangezogen. Dabei wird das Verfahren bevorzugt, das die geringeren Änderungen des Neigungsvektors der Tangentialebene aufweist. Im Prinzip müßte dies mit einer glatten Oberfläche durch die gegebenen Rasterpunkte erreicht werden. Polynomansätze, die nicht zu glatten Oberflächen führen, müßten dagegen größere Neigungsänderungen aufweisen.

Empirisch wird dies anhand des Beispiels Feldstetten überprüft, für das nach beiden Ansätzen aus dem digitalen Höhenmodell ein digitales Neigungsmodell abgeleitet wird. Eine Beschreibung des Testbeispiels Feldstetten enthält das 5. Kapitel. Zur Bestimmung der Änderung des Neigungsvektors der Tangentialebene an die Geländeoberfläche werden dessen Fallwinkel $G(I,K)$ und Fallrichtung $RW(I,K)$ im Rasterpunkt (I,K) in die beiden Komponenten $G_x(I,K)$ als Neigungswinkel der Tangentialebene in x -Richtung und $G_y(I,K)$ als Neigungswinkel in y -Richtung nach den Gleichungen (4.27) umgerechnet.

Bei einem Rasterintervall des digitalen Neigungsmodells von 5 m werden in 27 000 Rasterpunkten die Differenzen des Neigungswinkels in x- und in y-Richtung gegenüber den Werten der entsprechenden Neigungswinkel in den benachbarten Rasterpunkten gebildet. Der quadratische Mittelwert für die Änderung des Neigungswinkels ergibt sich

- entsprechend dem Ansatz über ein 16-gliedriges bikubisches Polynom mit Nebenbedingungen (Gleichungen (4.20) und (4.21)) bzw. für die beiden vergleichbaren Ansätze

- in x-Richtung zu 0.84 gon,
 - in y-Richtung zu 0.98 gon und

- entsprechend dem Ansatz über ein 16-gliedriges bikubisches Polynom ohne Nebenbedingungen (Gleichungen (4.17) und (4.18))

- in x-Richtung zu 1.05 gon und
 - in y-Richtung zu 1.25 gon.

Der zuletzt angeführte Ansatz ohne Nebenbedingungen, der nicht zu einer glatten Oberfläche führen muß, weist somit die größeren Änderungen in den Neigungswinkeln auf. Entsprechend der Änderung der Neigungswinkel in x- und y-Richtung gilt diese Feststellung auch für die Änderung von Fallwinkel bzw. Fallrichtung der Tangentialebene in benachbarten Rasterpunkten. Die Neigungsvektoren des nach diesem Ansatz abgeleiteten digitalen Neigungsmodells bzw. die durch die Neigungsvektoren festgelegten Tangentialebenen beschreiben somit eine unruhigere und stärker gekrümmte Oberfläche im Vergleich zu derjenigen, die sich nach dem erstgenannten Ansatz mit Nebenbedingungen ergibt.

Zur rechnerischen Ableitung digitaler Neigungsmodelle für einige Testbeispiele werden deshalb im 5. Kapitel die Gleichungen (4.22) bzw. (4.4) und (4.23) bzw. (4.6) zur Bestimmung des Neigungsvektors der Tangentialebene an die Geländeoberfläche verwendet. Die dadurch angenäherte Oberfläche ist stetig und glatt und besitzt gleichzeitig die geringeren Änderungen in den Neigungswerten.

4.1.3 Abspeichern des digitalen Neigungsmodells

Zur vollständigen Neigungsbeschreibung einer Fläche sind für jeden Rasterpunkt des digitalen Neigungsmodells die Neigungen in x- und y-Richtung bzw. Betrag und Richtung des Gefällvektors anzugeben. Da im Rahmen eines Flurbereinigungsverfahrens das Geländegefälle von besonderem Interesse ist, werden im hier beschriebenen digitalen Neigungsmodell Fallwinkel und Fallrichtung abgespeichert. Beide Werte sollten so abgespeichert werden, daß sie einander möglichst einfach zugeordnet werden können. Entscheidend für die Möglichkeiten der Abspeicherung der Werte ist, mit welcher Genauigkeit sie bestimmt werden können bzw. welche Genauigkeit sinnvoll ist.

Bei den Gefällwerten der Geländeoberfläche läßt die vorhandene Geländerauhigkeit von ca. ± 1 dm (GRUNDEY und HAKE [72], SILAR [193]) im großmaßstäbigen Bereich bei Punktabständen von ca. 20 m eine Angabe des Fallwinkels auf höchstens 0.1 gon als sinnvoll erscheinen. Dasselbe gilt für kleinmaßstäbigere photogrammetrische Auswertungen, wo die Meßgenauigkeit die Geländerauhigkeit überlagert.

Die Genauigkeit der Fallrichtung nimmt mit einem kleiner werdenden Fallwinkel ab. Strebt der Fallwinkel gegen Null (horizontale Fläche), so ist die Fallrichtung unbestimmt. Abgesehen von diesem Sonderfall ist auch für die Fallrichtung eine Angabe auf höchstens 0.1 gon sinnvoll.

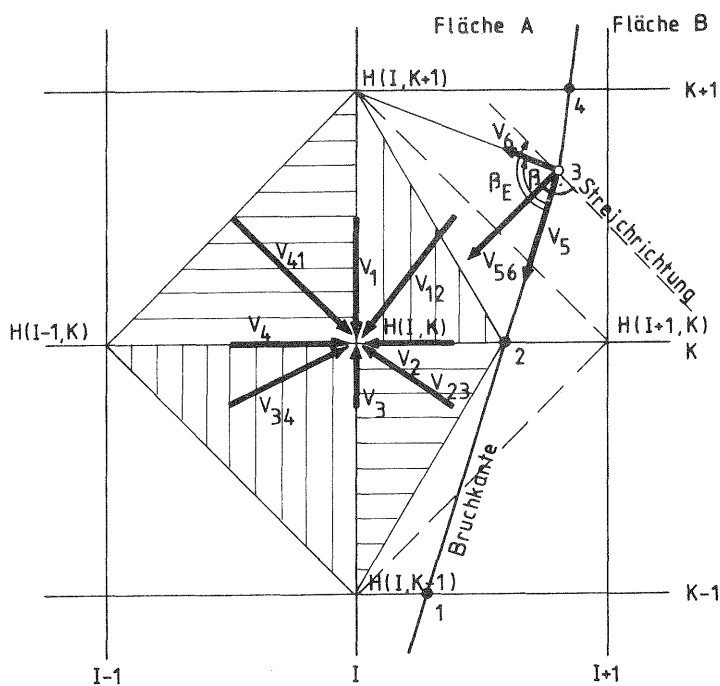
Wenn wir Fallwinkel und Fallrichtung als Winkel im Bogenmaß darstellen, so ist bei einer Angabe von 4 gültigen Ziffern mit einem Rundungsfehler von maximal 0.03 gon zu rechnen. Diese Genauigkeit erscheint im Hinblick auf die Genauigkeit der Bestimmbarkeit des Geländegefälles als ausreichend. Zur Abspeicherung von Fallwinkel und Fallrichtung benötigen wir somit 2·4 Ziffern. Da in einem 60-bit-Wort in Integer-Darstellung bis zu 15 gültige Ziffern und in einem 32-bit-Wort bis zu 9 gültige Ziffern dargestellt werden können, wandeln wir beide Werte in ganzzahlige Größen um und speichern sie in einem einzigen Wort.

4.1.4 Berücksichtigung von Bruchkanten im digitalen Neigungsmodell

Bei den Vorschlägen zur Ableitung eines digitalen Neigungsmodells aus einem rasterförmigen digitalen Höhenmodell in Abschnitt 4.1.2 wird davon ausgegangen, daß die Rasterhöhen eine glatte Oberfläche ohne Bruchkanten beschreiben.

Sind im digitalen Höhenmodell neben den Rasterhöhen auch Bruchkanten abgespeichert, so kann die Aussagekraft des Neigungsmodells durch eine Berücksichtigung dieser zusätzlichen Information erhöht werden. Liegen die Höhenwerte der Bruchkantenpunkte als Folge von Schnitten mit den Rasterlinien vor, so werden sie, wie im folgenden erläutert wird, bei der Berechnung der Oberflächenneigung in den unmittelbar benachbarten Rasterpunkten berücksichtigt. Entsprechend den Höhenwerten im digitalen Höhenmodell empfiehlt es sich, zusätzlich zur Neigungsinformation in den Rasterpunkten noch die Oberflächenneigung in den Schnittpunkten der Bruchkanten mit den Rasterlinien zu berechnen. Im Prinzip kann diese Zusatzinformation wie beim digitalen Höhenmodell abgespeichert werden. Es ist jedoch zu beachten, daß Punkte entlang von Bruchkanten für jede der beiden angrenzenden Flächen unterschiedliche Neigungswerte besitzen. Beide Werte müssen so abgespeichert werden, daß sie eindeutig den beiden angrenzenden Flächen und damit den benachbarten Rasterpunkten zugeordnet werden können.

Erfolgt die Neigungsbestimmung der Fläche im Rasterpunkt (I,K) über die vier angrenzenden Dreiecksflächen (siehe Abschnitt 4.1.2), so werden beim Vorliegen von Bruchkantenschnitten mit den Rasterlinien die benachbarten Rasterpunkte durch die entsprechenden Bruchkantenschnitte bei der Dreiecksbildung ersetzt. Zur Berechnung der Neigung der Fläche A (Abb. 4-5) im Rasterpunkt (I,K) z.B. wird der Rasterpunkt (I+1,K) der beiden Dreiecksflächen (I,K), (I+1,K), (I,K-1) bzw. (I,K), (I,K+1), (I+1,K) durch den Bruchkantenschnittpunkt 2 ersetzt. Dessen Höhe H_2 wird zur Bestimmung des Neigungswinkels α_2 des Neigungsvektors V_2 in den beiden genannten Dreiecken verwendet. Die Berechnung des Fallwinkels im Rasterpunkt (I,K) kann über Gleichung (4.3) erfolgen, die der Fallrichtung über Gleichung (4.5). Wird als Alternative für den Punkt (I+1,K) über die Punkte (I,K) und 2 eine fiktive Höhe $\bar{H}(I+1,K)$ linear extrapoliert, so kann mit diesem Wert in die Gleichungen (4.4) und (4.6) eingegangen werden.



- 1,2,4 Bruchkantenschnittpunkte mit Rasterlinien
3 ursprünglicher Bruchkantenschnittpunkt

Abb. 4-5

Berücksichtigung von Bruchkanten bei der Neigungsbestimmung

Die Neigungswerte der Oberfläche in den Punkten entlang der Bruchkante selbst werden als Mittelwert der Neigungen der beiden auf derselben Seite angrenzenden Dreiecksflächen berechnet. So ergibt sich z.B. der Neigungsvektor im Bruchkantenschnittpunkt 2 für die Fläche A über die vektorielle Addition der Neigungsvektoren der Dreiecke 2,1,(I,K) und 2,(I,K),3. Der Neigungsvektor für den ursprünglichen Bruchkantenschnittpunkt 3 kann auf zwei Wegen bestimmt werden: Entweder über die Neigungsvektoren der beiden Dreiecke 3,2,(I,K) und 3,(I,K),4 oder der Dreiecke 3,2,(I,K+1) und 3,(I,K+1),4. Vorteilhaft erscheint es, den Neigungsvektor über diejenigen beiden Dreiecke zu bestimmen, welche die größere Fläche besitzen.

Der Neigungsvektor der zuletzt genannten schiefwinkligen Dreiecke wird dabei nach den von KRAUS in [111] angegebenen Formeln bestimmt. Für das Dreieck (I,K+1),3,2 z.B. werden über die gegebene Lage und Höhen der Punkte (I,K+1),3 und 2 die

Neigungsvektoren V_5 und V_6 mit ihren Neigungswinkeln α_5 und α_6 berechnet.

Schließen beide Neigungsvektoren den Horizontalwinkel β ein, so gilt für die zur Fallrichtung senkrechten Streichrichtung β_E

$$\cot \beta_E = \cot \beta - \frac{\tan \alpha_5}{\tan \alpha_6 \cdot \sin \beta} \quad (4.24)$$

und für den Fallwinkel G_{56} der durch die beiden Neigungsvektoren V_5 und V_6 aufgespannten Ebene

$$G_{56} = \text{atan} \left(\frac{\tan \alpha_5}{\sin \beta_E} \right) = \text{atan} \left(\frac{\tan \alpha_6}{\sin(\beta_E - \beta)} \right). \quad (4.25)$$

Wird der Richtungswinkel RW_5 des Neigungsvektors V_5 aus Koordinaten bestimmt, so erhalten wir das Azimut RW_{56} der Fallrichtung der durch die Punkte $(I,K+1)$, 3 und 2 festgelegten Ebene aus

$$RW_{56} = RW_5 + \beta_E - 100 . \quad (4.26)$$

Der Neigungsvektor im Bruchkantenschnittpunkt 3 für die Fläche B wird entsprechend bestimmt.

Bei der Verwendung lokaler Polynome ist zu beachten, daß sie Bruchkanten nicht überschreiten dürfen. Rasterhöhen jenseits einer Bruchkante sind deshalb durch die entsprechenden Höhen der Rasterschnitte mit den Bruchkanten zu ersetzen. Die Polynomkoeffizienten a_{10} und a_{01} der Gleichung (4.9) der Tangentialebene an das Polynom im Rasterpunkt (I,K) müssen wegen der Abweichung von einer rasterförmigen Punktverteilung hier durch Matrizeninversionen jeweils neu berechnet werden. Beim 16-gliedrigen bikubischen Polynom des Programms Delft sind die Bruchkantenschnitte bei der Berechnung der ersten Ableitungen zu berücksichtigen.

Die Neigungswerte der Tangentialebene an die Oberfläche in den ursprünglichen Bruchkantenschnittpunkten selbst können jeweils über die lokale Polynomfläche für den unmittelbar benachbarten Rasterpunkt derselben Fläche mit abgeleitet werden.

Das Abspeichern der Neigungsinformation in den Rasterpunkten entspricht im Prinzip dem Abspeichern der Rasterhöhen des digitalen Höhenmodells. Da aber Punkte entlang von Geländekanten im Gegensatz zum digitalen Höhenmodell zwei Informationen enthalten, nämlich je eine für die beiden angrenzenden Flächen, ist sicherzustellen, daß die beiden Werte jeweils der richtigen Fläche eindeutig zugeordnet werden können.

Eine Möglichkeit dazu besteht darin, zusätzlich zu jeder Rasterinformation die Adressen der nachfolgenden Information in x- und y-Richtung mit abzuspeichern. Diese beiden abgespeicherten Adressen können zum nächsten Rasterpunkt oder zu einem dazwischen liegenden Bruchkantenschnittpunkt führen. Der Bruchkantenschnittpunkt besitzt nur eine der beiden Folgeadressen, je nachdem, ob er auf einer Rasterlinie $x=\text{konst.}$ oder $y=\text{konst.}$ liegt. Die ursprünglichen Bruchkantenschnittpunkte können gemeinsam mit den Bruchkantenschnitten abgespeichert werden.

4.1.5 Ableitung von Isolinien aus dem digitalen Neigungsmodell

In Abschnitt 4.1.1 wurde erläutert, daß im hier vorgestellten digitalen Neigungsmodell Fallwinkel und Fallrichtung abgespeichert werden, weil diese beiden Informationen für planerische Arbeiten im Flurbereinigungsverfahren benötigt werden. Für die graphische Darstellung von Fallwinkel und Fallrichtung bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Vektorbilder mit Neigungsvektoren in den Rasterpunkten oder
- Isolinienbilder, getrennt für Fallwinkel und Fallrichtung.

In bewegtem Gelände erscheint eine Darstellung von Fallwinkel und Fallrichtung durch Isolinien zunächst als recht abstrakt. Beide Informationen, insbesondere aber die Fallrichtung lassen sich hier mit Vektorbildern anschaulicher darstel-

len. Dennoch wird hier die Isoliniendarstellung bevorzugt, da in der Flurbereinigungsverwaltung Fallwinkel und Fallrichtung in bestimmten Stufen Berücksichtigung finden.

Die rechnerische Ableitung von Isolinien aus dem digitalen Neigungsmodell erfolgt im Prinzip wie die Ableitung von Höhenlinien aus dem digitalen Höhenmodell. Graphisch dargestellt werden die Werte des Fallwinkels einer Oberfläche in der Gefällstufenkarte, die der Fallrichtung in der Expositionskarte.

In der Gefällstufenkarte wird der Betrag des Fallwinkels bzw. das Gefälle einer Oberfläche durch Isolinien graphisch dargestellt. Die Fläche, die in dieser Karte von zwei benachbarten Isolinien unterschiedlichen Gefälles oder einer geschlossenen Isolinie begrenzt wird, wird als Gefällstufe bezeichnet. Sämtliche Oberflächenpunkte innerhalb dieser Fläche besitzen einen Fallwinkel, dessen Betrag zwischen den Werten der beiden Isolinien liegt. Wird eine Fläche von einer geschlossenen Isolinie begrenzt, so liegt der Betrag des Fallwinkels in sämtlichen Punkten der eingeschlossenen Oberfläche entweder über oder unter dem Wert der Isolinie.

Die Exposition einer geneigten Geländeoberfläche gibt Auskunft über ihre Lage in bezug auf die Einfallrichtung der Sonnenstrahlen. Das hier beschriebene digitale Neigungsmodell enthält die Exposition der Geländeoberfläche in Form des Azimuts der Fallrichtung der Oberfläche in den einzelnen Rasterpunkten. Dabei wird das Azimut der Fallrichtung gegenüber der Rasterrichtung des digitalen Neigungsmodells angegeben. Da dieses Raster meist parallel zum übergeordneten geodätischen Koordinatensystem orientiert ist, bezieht sich das Azimut der Fallrichtung normalerweise auf Gitternord des Landessystems. Die graphische Darstellung der Fallrichtung einer Oberfläche durch Isolinien erfolgt in der Expositionskarte.

Das Azimut sämtlicher Oberflächenpunkte zwischen zwei benachbarten Isolinien unterschiedlicher Fallrichtung bewegt sich zwischen den Werten dieser Linien. Werden Flächen von einer geschlossenen Isolinie begrenzt, so liegt das Azimut sämtlicher Oberflächenpunkte innerhalb dieser Linie entweder über oder unter dem Wert dieser Isolinie.

Wie bei der Gefällstufenkarte handelt es sich auch bei der Expositionskarte um eine Darstellung in Stufen. Diese Art der graphischen Darstellung der Fallrichtung in Form von Isolinien ist dann sinnvoll, wenn eine begrenzte Anzahl von Richtungsstufen vorgegeben ist, wie z.B. im Rahmen für die Wertermittlung einer Rebflurbereinigung, wo ausgehend von der Südrichtung mit der stärksten Besonnung normalerweise 8 Bereiche der Fallrichtung unterschieden werden.

Die Anschaulichkeit einer Gefällstufenkarte läßt sich noch dadurch steigern, daß die einzelnen Gefällstufen eine entsprechende Flächenfärbung (z.B. Raster, Schraffur, Farbe) erhalten. Ein Beispiel für ein Flächenraster zeigt Abbildung 5-27. Bei der Expositionskarte wird eine Kombination von Isoliniendarstellung mit Neigungsvektoren die Interpretation sicherlich erleichtern, was im Prinzip auch für die Gefällstufenkarte gilt.

Zur praktischen Durchführung der Ableitung von Isolinen aus dem digitalen Neigungsmodell wurde das Isolinenprogramm des Höhenlinienprogramms SCOP in einigen Punkten modifiziert. Über einen Eingabeparameter wird gesteuert, welcher Teil der zweiteiligen Rasterinformation des digitalen Neigungsmodells verarbeitet werden soll. Fallwinkel und Fallrichtung sind im Neigungsmodell im Bogenmaß abgespeichert. Zur graphischen Darstellung wird

- der Fallwinkel in die Einheit "Prozent"
- die Fallrichtung in die Einheit "Gon"

umgewandelt. Da bei diesen thematischen Karten meist nur bestimmte Werte interpoliert werden sollen, wird kein konstantes Isolinenintervall vorausgesetzt. Statt dessen werden die zu interpolierenden Werte selbst eingegeben.

Bei der Ableitung einer Expositionskarte sind zwei Besonderheiten zu beachten. Erstens besitzen die Richtungswerte bei 2π einen Sprung, da dieser Wert identisch mit Null ist. Zweitens können Isolinen auftreten, die im Kartenblatt frei beginnen und frei enden. Beginn und Ende dieser Isolinen fallen dabei im digitalen Höhenmodell mit Kuppen oder Senken mit horizontaler Tangentialebene zusammen. Da die Isolineninterpolation entlang der Rasterseiten erfolgt, beginnen und enden diese Isolinen auf den Seiten des den Kuppen- oder Muldenpunkt unmittelbar umschließenden Rasterelements. Die Lücke zwischen den Isolinenteilstücken hängt somit vom Rasterintervall ab.

Zur besseren Lesbarkeit des Isolinenbildes wird versucht, möglichst alle Isolinen zu beschriften. Verstärkt ausgezeichnet werden jedoch nur die Zählisolinen, die gesondert eingegeben sind. Wie bei der Höhenliniendarstellung werden geschlossene Isolinen in ihrem Inneren mit einem Pfeil versehen, wenn die Rasterwerte innerhalb kleiner sind als der Wert der Isolinie. Fehlt ein Pfeil, so bedeutet dies, daß die Werte innerhalb größer sind als der Wert der geschlossenen Isolinie.

4.1.6 Berücksichtigung von Bruchkanten bei der Ableitung von Isolinen aus dem digitalen Neigungsmodell

Sind im digitalen Neigungsmodell zusätzlich zu den Rasterwerten Neigungsinformationen für Punkte entlang von Bruchkanten mit abgespeichert, so können diese zur Ableitung von Isolinen herangezogen werden. Entsprechend der Berücksichtigung von Geländekanten bei der Interpolation von Höhenlinien im digitalen Höhenmodell wird die Interpolation zwischen den Neigungsinformationen zweier benachbarter Rasterpunkte, zwischen denen eine Bruchkante verläuft, in zwei linearen Interpolationen aufgeteilt. Dabei ist zu beachten, daß jeder Bruchkantenpunkt für die beiden angrenzenden Flächen je einen Neigungswert besitzt und diese beiden Werte den benachbarten Rasterwerten bei der linearen Interpolation richtig zugeordnet werden müssen.

4.1.7 Anwendungsmöglichkeiten von Gefällstufen- und Expositionskarten

Hauptanwendungsgebiet für Neigungsinformationen über die Geländeoberfläche ist neben der Kartographie in erster Linie das Planungswesen.

Im Verkehrswegebau können Gefällstufen- und Expositionskarte im frühen Planungsstadium die Auswahl wirtschaftlicher Trassenkorridore erleichtern. Zur Trassenoptimierung im Interessenbereich könnte dann ein spezielles digitales Gradientenflächenmodell verwendet werden, wie es BOPP [23] vorschlägt.

In der Bauleitplanung können diese Karten zur Abgrenzung der verschiedenartig genutzten oder nutzbaren Flächen herangezogen werden.

Im Bereich der landwirtschaftlichen Planung stellen Neigungsinformationen über die Geländeoberfläche eine wichtige Entscheidungshilfe dar. In unerschlossenen oder nur wenig erschlossenen Gebieten können sie zur großräumigen Festlegung landwirtschaftlich nutzbarer Flächen entweder in Form von Karten (CAZABAT [34]) oder in numerischer Form (SPEIGHT [195]) eingesetzt werden. In stark industrialisierten Gebieten besteht dagegen die Aufgabe, im Rahmen von agrarstrukturellen Rahmenplänen (SEELE [192]) Flächen auszuweisen, die für die landwirtschaftliche Nutzung aus agrarpolitischen oder landschaftspflegerischen Gründen erhalten werden müssen. Zu diesem Zweck wurde in Baden-Württemberg in den letzten Jahren eine landesweite Flurbilanz erstellt und kartographisch dargestellt (Stuttgarter Zeitung [210], [211]). Dazu mußte auch die Geländeneigung erfaßt werden. Im Rahmen der agrarstrukturellen Detailplanung wird die Neigungsinformation vor dem Hintergrund der zunehmenden Mechanisierung in der Landbearbeitung zur Ausscheidung von Grenzertragsböden herangezogen.

Im Flurbereinigungsverfahren liegen die Hauptanwendungsbereiche für die Geländeneigung in den Arbeitsabschnitten der Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke und bei der Zuteilung der neuen Grundstücke. Erhöhte Bedeutung besitzt die Neigungsinformation für die Rebflurbereinigung. Während die Bearbeitbarkeit eines Weinberges bzw. die planerischen Vorgaben für seine Umgestaltung z.B. für Direktzug oder Seilzug entscheidend vom Betrag des Geländegefälles abhängen, wird die Qualität des Ertrags der Reben zusätzlich von der Richtung des Gefälles beeinflusst.

Im Rahmen der Landschaftspflege können Gefällstufenkarten z.B. dazu dienen, Veränderungen der Geländeoberfläche soweit wie möglich an die natürlichen Formen anzugleichen (GERMAN und EICHHORST [62]). Bei der Bestimmung der Stabilität von Hängen und ihrer kartographischen Darstellung spielen deren Fallwinkel und Fallrichtung eine wichtige Rolle (AMADESI und VIANELLO [7]).

4.1.8 Ableitung von Falllinien

Im Zusammenhang mit ingenieurbautechnischen Maßnahmen im Verkehrswegebau oder bei größeren Erdbewegungen wie in einer Rebflurbereinigung ergibt sich verschiedentlich die Aufgabe, Entwässerungsgräben so anzulegen, daß sie bestmöglich der Fallrichtung des Geländes folgen. Liegt von diesem Gelände ein digitales Neigungsmodell vor, so kann aus diesem der Verlauf der Falllinie rechne-

risch abgeleitet und zeichnerisch dargestellt werden. Dabei wird sinnvollerweise ein Anfangspunkt A auf der Falllinie mit seinen Koordinaten x_A , y_A und das Ende der Falllinie durch einen koordinatenmäßig festgelegten Polygonzug (z.B. Begrenzungslinie eines Regenrückhaltebeckens) vorgegeben.

Zur Bestimmung der Fallrichtung im Anfangspunkt A werden zunächst die vier umliegenden Rasterpunkte ermittelt. Über die Fallrichtung $RW(I,K)$ im Rasterpunkt (I,K) wird der Fallwinkel $G(I,K)$ in die beiden Komponenten $G_x(I,K)$ in x-Richtung und $G_y(I,K)$ in y-Richtung aufgespalten (Abb. 4-6):

$$\begin{aligned} G_x(I,K) &= \sin(RW(I,K)) \cdot G(I,K) \\ G_y(I,K) &= \cos(RW(I,K)) \cdot G(I,K) . \end{aligned} \quad (4.27)$$

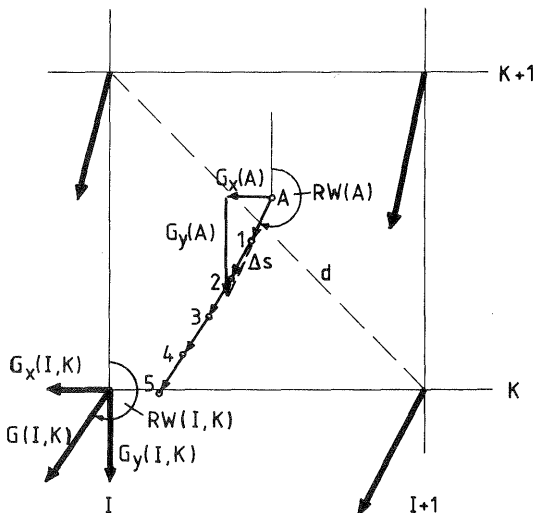


Abb. 4-6

Ableitung einer Falllinie aus dem digitalen Neigungsmodell

In einer ersten Interpolation wird aus den Komponenten G_x der vier Rasterpunkte die Komponente $G_x(A)$ des Fallwinkels im Punkt A in x-Richtung berechnet und in einer zweiten aus den vier Komponenten G_y die Komponente $G_y(A)$ des Fallwinkels in y-Richtung. Zu dieser Interpolation ist es ausreichend, durch die vier Rasterwerte eine hyperbolische Paraboloidfläche zu legen (SCHULT [185]).

Die Fallrichtung $RW(A)$ im Punkt A ergibt sich aus den beiden Komponenten des Fallwinkels im Punkt A in x- bzw. y-Richtung zu

$$RW(A) = \text{atan} \left(\frac{G_x(A)}{G_y(A)} \right) . \quad (4.28)$$

In dieser Fallrichtung $RW(A)$ erfolgt ein Fortschreiten um das Wegintervall Δs zu Punkt 1. Dieses Wegintervall Δs wird sinnvollerweise in Beziehung zur Rasterdiagonalen d gesetzt und z.B. mit $d/10$ vorgegeben. In Punkt 1 wird erneut die Fallrichtung $RW(1)$ aus den Werten der vier benachbarten Rasterpunkte interpoliert und in dieser neuen Richtung um das Intervall Δs fortgeschritten. Die Punkte A, 1, 2, 3 ... bilden normalerweise innerhalb eines Rasterelements eine gekrümmte Linie, deren Darstellung durch das kleine Wegintervall Δs erst ermöglicht wird. Diese gekrümmte Linie stellt die Falllinie dar. Die vom Wegintervall Δs abhängige Fehlerfortpflanzung wird dabei zunächst in Kauf genommen.

Überschreitet die Falllinie eine Rasterlinie, wie in Abbildung 4-6 zwischen den Punkten 4 und 5, so werden zur Interpolation der Fallrichtung in Punkt 5 statt der Werte in den Rasterpunkten $(I,K+1)$ und $(I+1,K+1)$ diejenigen in den Rasterpunkten $(I,K-1)$ und $(I+1,K-1)$ herangezogen. Dadurch können geringfügige Unstetigkeiten im Linienverlauf auftreten, die jedoch bei einem üblicherweise angewandten engen Rasterintervall vernachlässigbar sein dürften und keine aufwendigere Interpolation zur Bestimmung der Fallrichtung rechtfertigen.

Enthält das digitale Neigungsmodell neben den Rasterwerten auch Informationen entlang von Bruchkanten, so sind bei der Interpolation der Fallrichtung gegebenenfalls Rasterwerte durch die Werte im Schnittpunkt einer Bruchkante mit der Rasterlinie zu ersetzen.

Die interpolierten Punkte entlang der Fallrichtung werden an einem Zeichenautomaten oder Bildschirm als Linienzug ausgezeichnet. Von der Aufgabenstellung her ist hier der Einsatz eines interaktiven Bildschirms sicher zweckmäßig.

4.1.9 Ableitung von Neigungsprofilen

Ist eine Trassenachse oder ein Querprofil im Grundriß festgelegt, so bietet sich die Möglichkeit an, das Neigungsverhalten des Geländes entlang dieser Achse in Form von Steigen und Fallen aus dem digitalen Neigungsmodell abzuleiten und graphisch gegen die Entfernung S aufzutragen.

Anhand des vorgegebenen Grundrisses der Trassierungselemente werden dazu entlang der gesamten Trasse Punkte z.B. in konstantem Abstand Δs eingerechnet. In jedem Punkt wird zusätzlich der Richtungswinkel der Tangente an die Trasse bestimmt. Wird das Wegintervall ausreichend klein im Vergleich zur Rasterdiagonalen und den Trassierungselementen gewählt, so kann die Tangente im Trassenpunkt auch durch die Sehne zum nächsten eingerechneten Punkt ersetzt werden.

Entsprechend der in Abschnitt 4.1.8 beschriebenen Ableitung von Falllinien wird zunächst die Fallrichtung $RW(A)$ im Anfangspunkt A bestimmt (Abb. 4-7). Der hier zusätzlich benötigte Fallwinkel $G(A)$ im Anfangspunkt A ergibt sich aus den Komponenten des Fallwinkels $G_x(A)$ in x -Richtung und $G_y(A)$ in y -Richtung (siehe Abschnitt 4.1.8) zu

$$G(A) = \sqrt{G_x(A)^2 + G_y(A)^2}. \quad (4.29)$$

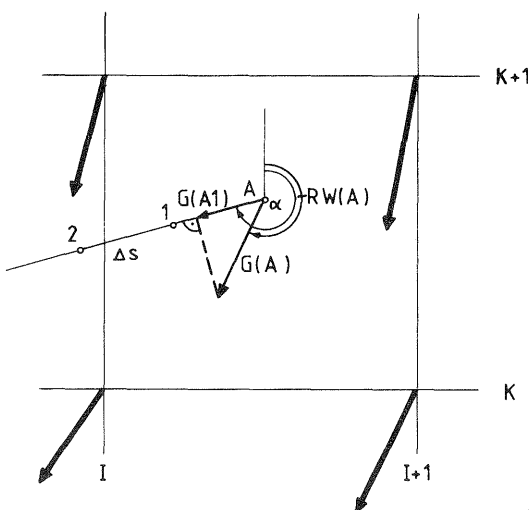


Abb. 4-7

Bestimmung des Fallwinkels entlang eines Profils

Über den vorgegebenen Richtungswinkel α des ersten Trassenteilstücks Δs kann der Fallwinkel $G(A_1)$ für die Strecke A_1 als Komponente des Fallwinkels $G(A)$ in Richtung der Strecke A_1 angegeben werden nach

$$G(A_1) = \cos(\alpha - RW(A)) \cdot G(A) . \quad (4.30)$$

Die einzelnen Fallwinkel $G(P_i P_k)$ werden vorzeichenrichtig als Ordinate gegen die Entfernung S entlang des Profils aufgetragen.

Unabhängig von einem digitalen Neigungsmodell läßt sich das Neigungsverhalten des Geländes entlang einer Trasse auch über die Höhenwerte der Achspunkte $A, 1, 2, \dots, N$ berechnen. Dazu werden die Höhen der einzelnen Trassenpunkte bestimmt, indem z.B. durch die vier benachbarten Rasterhöhen des digitalen Höhenmodells ein hyperbolisches Paraboloid gelegt wird und die Höhe im koordinatenmäßig gegebenen Achspunkt eingerechnet wird. Aus dem Höhenunterschied zweier benachbarter Trassenpunkte und ihrer Entfernung kann das Neigungsverhalten abgeleitet werden.

Die Bestimmung der Geländeneigung entlang einer Trassenachse unmittelbar über die Höhe der Achspunkte erfordert etwas weniger Rechenaufwand als die Ableitung aus dem digitalen Neigungsmodell. Auch die etwas geringere Genauigkeit dieses Verfahrens dürfte in der Regel ausreichend sein.

4.2 Ableitung einer Schummerungsvorlage

Das plastische Herausarbeiten der dritten Dimension in topographischen Kartenwerken erfolgt heute neben der Darstellung von Höhenlinien überwiegend mittels Schummerung. Zur Herstellung einer Schummerung setzt der Kartograph das vorhandene Höhenlinienbild mit Pinsel oder Spritzpistole in Hell-Dunkel-Töne um. Dieser manuelle Vorgang des Schummerns erfordert einen qualifizierten Kartographen mit künstlerischem Verständnis. Je nach Wahl der Beleuchtungsrichtung und dem Grad ihrer Veränderung zur Betonung oder Abschwächung geomorphologisch wichtiger Kleinformen führt dies meist zu einem mehr oder weniger subjektiven Ergebnis (SCHENK |176|).

In Mitteleuropa liegen Schummerungen für die gängigen topographischen Karten meist vor. In anderen Regionen, wo Kartierungen in großem Umfang erst begonnen werden, wie z.B. in Kanada (ZARZYCKI |232|), und wo die elektronische Datenverarbeitung eingesetzt wird, besteht die Möglichkeit, Schummerungsvorlagen automatisch und nach objektiven Kriterien abzuleiten und in eine Hell-Dunkel-Vorlage umzusetzen.

Nach BECK |17| Seite 407 kann die Helligkeit HE in einem Oberflächenpunkt wie folgt berechnet werden (Abb. 4-8):

$$HE = \cos e = \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b \cdot \cos \sigma . \quad (4.31)$$

charakteristische Geländekleinformen durch eine begrenzte individuelle Änderung des Neigungswinkels und des Azimuts der Lichtquelle besonders herausarbeiten. Diese Betonung von Geländekleinformen fordert den Kartographen insbesondere von seiner künstlerischen Seite her und verleiht der manuellen Schummerung eine mehr oder weniger ausgeprägte künstlerisch-subjektive Note.

Im Vergleich zur manuellen Schummerung liegt die Stärke der automatischen Schummerung ausgesprochen in der objektiven Wiedergabe der Neignungsverhältnisse im Großen. Zu den großen Formen sind auch die Bruchkanten des Geländes zu rechnen. Für ihre rechnerische Berücksichtigung unterbreitet BRASSEL [26] Vorschläge. Darüber hinaus untersucht er auch, wie charakteristische Geländekleinformen mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells durch ein begrenztes Variieren des Neigungswinkels α und des Azimuts RWL der Lichtquelle stärker in der Schummerung betont werden können.

Die hohen qualitativen Anforderungen, die aufgrund des sehr hohen Standards der topographischen Karten in Mitteleuropa an eine automatische Schummerung gestellt werden, dürfen jedoch nicht den Blick dafür verstellen, daß die Situation in den kartographisch unzureichend erfaßten Regionen der Erde vollkommen anders gelagert ist. Hier stellt sich nicht in erster Linie die Frage nach der höchstmöglichen Qualität einer Höhendarstellung oder einer Schummerung, sondern ob diese bei vorgegebener Genauigkeit mit vertretbaren Mitteln in einem überschaubaren Zeitraum überhaupt erstellt werden kann. Wie im Falle Kanadas wäre es eine wichtige Bereicherung der topographischen Karten, wenn parallel zur geplanten Herstellung der Bildkarten durch Orthoprojektion eine Schummerung digital erzeugt werden könnte. Da hier vorgesehen ist, den Gestalt-Photomapper GPM-2, der ein sehr engmaschiges digitales Höhenmodell erzeugt, für die Herstellung der Orthoprojektion einzusetzen, kann dieses Höhenmodell nach einer Ausdünnung zur Berechnung eines digitalen Neigungsmodells und einer automatischen Schummerung wirtschaftlich verwendet werden,

Weitere Vorschläge zur praktischen Ableitung der Helligkeit aus einem digitalen Höhenmodell und zur Umwandlung der digitalen Helligkeitswerte in eine graphische Hell-Dunkel-Vorlage machen BRASSEL [26] und GOTTSCHALK [67],

Zur praktischen Herstellung einer analogen Hell-Dunkel-Vorlage für die Schummerung sei hier noch der Einsatz eines Lichtzeichenkopfes angeregt. Dabei wird ein Film durch den Lichtzeichenkopf eines schnellen Zeichenautomaten profilweise belichtet, wobei die digital vorliegenden Helligkeitswerte entlang eines Profils z.B. durch einen drehbaren Graukeil im Lichtzeichenkopf in eine analoge Schwärzung umgesetzt werden,

Ebenso wie zur Ableitung einer Hell-Dunkel-Vorlage bildet das digitale Neigungsmodell eine ideale Grundlage für die automatische Herstellung einer zweifarbigen Licht-Schatten-Schummerung. In beiden Fällen ist nur noch ein einziger reproduktionstechnischer Arbeitsgang anschließend erforderlich, um die analoge Vorlage aufzurastern.

4.3 Ableitung von Krümmungswerten

Neben der rechnerischen Ableitung der Geländeneigung bietet das digitale Höhenmodell auch die Möglichkeit, das Krümmungsverhalten der beschriebenen Oberfläche rechnerisch zu bestimmen.

Die Krümmung einer Fläche kann nach BRONSTEIN und SEMENDJAJEW [29] Seite 224 entweder als mittlere Krümmung KM in einem Oberflächenpunkt M mit den beiden Hauptkrümmungsradien R_1 und R_2 berechnet werden zu

$$KM = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.32)$$

oder als

Gaußsche Krümmung oder Totalkrümmung KG nach

$$KG = \frac{1}{R_1 R_2} \quad (4.33)$$

Für die praktische Berechnung der Oberflächenkrümmung sind zwei Wege möglich: Zum einen über die Informationen des digitalen Höhen- und Neigungsmodells, zum anderen über die Flächengleichungen lokaler Polynomflächen.

Im digitalen Neigungsmodell ist die Tangentialebene an die Oberfläche in jedem Rasterpunkt durch Fallwinkel und Fallrichtung festgelegt. Werden daraus die beiden Komponenten des Fallwinkels $G_x(I,K)$ in +x-Richtung und $G_y(I,K)$ in +y-Richtung abgeleitet, so kann eine stetige ebene Kurve durch die

Rasterhöhen $H(I-1,K)$ mit der Steigung $G_x(I-1,K)$,
 $H(I,K)$ " " " $G_x(I,K)$ und
 $H(I+1,K)$ " " " $G_x(I+1,K)$

gelegt werden. Der Krümmungsradius ρ_x dieser Kurve im Punkt (I,K) entspricht dem Krümmungsradius der Schnittkurve der Oberfläche im Punkt (I,K) mit einer Vertikalebene in x-Richtung. Ein entsprechendes Vorgehen in y-Richtung liefert den Krümmungsradius ρ_y in y-Richtung. Wird noch der Krümmungsradius entlang einer der beiden Rasterdiagonalen bestimmt, so lassen sich aus den genannten drei Krümmungsradien die beiden Hauptkrümmungsradien R_1 und R_2 im Rasterpunkt (I,K) ableiten.

Liegt die Flächengleichung für lokale Polynome in der Form $z = f(x,y)$ vor, so kann die mittlere Krümmung KM in einem Oberflächenpunkt nach BRONSTEIN und SEMENDJAJEW [29] Seite 224 wie folgt berechnet werden:

$$KM = \frac{r(1+q^2) - 2pqs + t(1+p^2)}{2(1+p^2+q^2)^{3/2}}, \quad (4.34)$$

wobei gilt:

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}. \quad (4.35)$$

Für die Gaußsche Krümmung KG folgt

$$KG = \frac{rt - s^2}{(1+p^2+q^2)^2}. \quad (4.36)$$

Wenn auch bei der Bestimmung der Oberflächenkrümmung mit Hilfe lokaler Polynome neben den Werten p bis t noch für jedes lokale Polynom die Polynomkoeffizienten zu ermitteln sind, dürfte der hierfür erforderliche Rechenaufwand denjenigen, der bei der Verwendung der Rasterhöhen samt den dazugehörigen Kurvensteigungen zu erwarten ist, voraussichtlich nicht wesentlich übersteigen.

4.4 Ableitung von Profilen

Im Planungswesen werden Profile bisher für zwei Aufgaben herangezogen:

- Als Längsprofile zur graphischen Darstellung des Höhenverlaufs einer Trasse und
- als Querprofile zur Massenberechnung.

Während vor dem Einsatz von Rechenautomaten Querprofile graphisch dargestellt und Massen daraus halbgraphisch berechnet wurden, werden seit Einführung der elektronischen Datenverarbeitung zwei Wege beschritten. Im ersten Fall wird das alte Verfahren zur Massenberechnung im Prinzip beibehalten und lediglich dahingehend modifiziert, daß die Profile punktweise im Rechner gespeichert werden. Im zweiten Fall wird von der linienförmigen Punktanordnung entlang von Profilen vollständig abgegangen und auf flächenhaft verteilte Daten in Form eines digitalen Höhenmodells zurückgegriffen.

Unabhängig davon eignet sich ein digitales Höhenmodell vorzüglich zur rechnerischen Ableitung von Profilen. Dabei werden die Höhenwerte der einzelnen Profilpunkte durch eine Interpolation im digitalen Höhenmodell gewonnen. Wird ein engmaschiges rasterförmiges digitales Höhenmodell zugrunde gelegt, so reicht es in der Regel aus, zur Interpolation durch die benachbarten vier Rasterhöhen z.B. ein hyperbolisches Paraboloid zu legen und darauf den lagemäßig gegebenen Profilpunkt einzurechnen. Sind im digitalen Höhenmodell neben den Rasterpunkten auch Bruchkantenpunkte abgespeichert, so wird diese Bruchkanteninformation bei der Interpolation von Profilpunkten in demselben Umfang herangezogen wie bei der Ableitung von Höhenschichtlinien.

Entsprechend der Auszeichnung von Höhenlinien werden auch benachbarte Profilpunkte am Zeichenautomaten durch eine glatte Kurve höherer Ordnung verbunden, die an Bruchkanten jedoch unterbrochen wird.

4.5 Berechnung von Massen

Erdmassen oder Massen ganz allgemein sind im Ingenieurbauwesen hauptsächlich bei Projekten aus dem Arbeitsbereich des

- Verkehrswegebau mit mehr oder weniger langgestreckten Interessenbereichen entlang von Trassenachsen und bei
- großräumigen Eingriffen in die Geländeoberfläche mit einer mehr flächenhaften Ausdehnung

zu bestimmen. Beispiele für die zweite Gruppe sind z.B. im Wasserbau bei der Anlage von Speicherbecken oder Wasserrückhaltebecken, bei Flughafenplanungen (GRUBER |70|) und bei Rebflurbereinigungen (BÜRKLE |31|) zu finden.

Mit dem Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung in der Straßenbauverwaltung wurden zunächst Rechenprogramme erstellt, die wohl auf die Besonderheiten der EDV Rücksicht nahmen, aber im Prinzip die bis dahin üblichen manuellen Verfahren, die auf der Querprofilmessung aufbauten, weitgehend unverändert auf die Rechenanlage übertragen. Als Verfahren, die speziell für den Einsatz der EDV zur Massenberechnung konzipiert wurden, sei für den Bereich des Verkehrswegebbaus das von BENNER [18] entwickelte Verfahren der Erdmassenberechnung durch exakte Integration mittels elektronischer Datenverarbeitungsanlagen angeführt. Seine Grundidee dabei ist es, zwei in Achsrichtung durchlaufende Körper mit einer gemeinsamen Bezugsebene zu schaffen. Dabei wird der erste Körper nur von regelmäßigen Flächen begrenzt; nämlich von dem fortschreitenden Regelprofil, das seitlich bis zu seinem Schnitt mit dem Gelände reicht, hier in eine Vertikale übergeht, die an der horizontalen Bezugsfläche endet. Der zweite Körper besitzt als Oberfläche die Geländeoberfläche. Zur Massenberechnung werden beide Körper einander überlagert und die Massendifferenz berechnet.

Zur Berechnung des Volumens des zweiten Körpers zwischen Geländeoberfläche und Bezugsebene schlägt BENNER vor, aus dem rasterförmigen digitalen Höhenmodell, das im übergeordneten Koordinatensystem orientiert ist, zunächst ein spezielles Höhenmodell abzuleiten, das auf die projektierte Trassenachse bezogen ist. Die weiteren Berechnungen werden in diesem speziellen Höhenmodell durchgeführt,

Vergleichbare trassenangelehnte Koordinatensysteme sind bei flächenhafter Ausdehnung des Planungsobjektes nicht in jedem Fall sinnvoll (siehe auch VÖLKER [216]). In Rebflurbereinigungen z.B. würden nach diesem Vorschlag die einzelnen Wirtschaftswege eigene Koordinatensysteme erhalten. Neben der Herstellung eindeutiger Nahtstellen zwischen den Systemen wäre hier vor jeder Folgeberechnung zu prüfen, in welchem Koordinatenteilsystem sie durchzuführen ist. Es wird deshalb vorgeschlagen, für die Massenberechnung flächenhafter Baumaßnahmen ein rasterförmiges digitales Höhenmodell zugrunde zu legen, das sinnvollerweise im übergeordneten Koordinatensystem orientiert ist,

Der Grundgedanke ist dabei der, daß für die Geländeoberfläche vor und nach der Baumaßnahme getrennte rasterförmige digitale Höhenmodelle erzeugt werden. Da identische Rasterpunkte in beiden digitalen Höhenmodellen einander lagemäßig eindeutig zugeordnet sind, kann die Verwendung einer Referenzfläche zur Massenberechnung entfallen. Es ist ausreichend, die Höhendifferenzen zwischen beiden digitalen Höhenmodellen in sämtlichen Rasterpunkten innerhalb des zu bearbeitenden Gebietes zu bestimmen (sie bilden ein digitales Höhendifferenzenmodell) und daraus Volumina abzuleiten. Bei dem zweiten digitalen Höhenmodell spielt es dabei keine Rolle, ob es sich um ein Höhenmodell handelt, das als Planungsvariante erstellt wurde, oder das die geplante Oberfläche wiedergibt und zur endgültigen Massenabrechnung verwendet wird.

Im Regelfall ist jedoch nicht das Volumen zwischen den beiden Höhenmodellen über das gesamte Interessengebiet hinweg gesucht, da hier Auftrag und Abtrag bereits gegeneinander aufgerechnet sind. Der Arbeitsaufwand, der für den Massentransport erforderlich ist, kann dabei nicht mehr festgestellt werden. Zur überschlägigen Bestimmung der Transportwege sollte das gesamte Gebiet, entsprechend dem Vor-

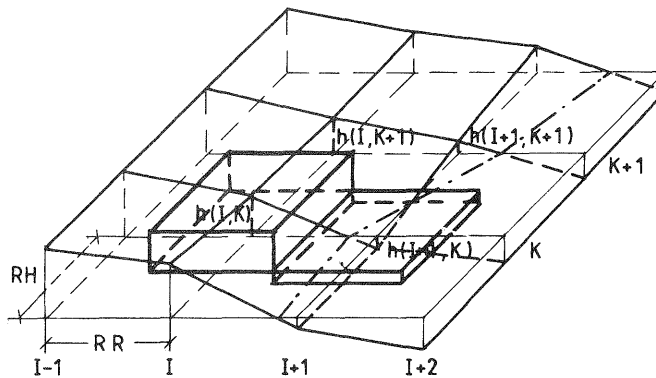
gehen im Straßenbau, durch Querschnittsebenen oder beliebig vorgegebene Abgrenzungen unterteilt und die Massen der einzelnen Teilgebiete getrennt berechnet und ausgegeben werden können. Dadurch wäre es möglich, qualitative Merkmale der Massen (z.B. verschiedene Bodenarten oder Härtegrade) zu berücksichtigen. Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, zusätzlich die Verschneidungslinien der beiden Höhenmodelle als Begrenzungslinien heranzuziehen. In diesem Fall wird das Volumen eines jeden Auf- und Abtrags getrennt berechnet und ausgegeben.

Werden die Volumina anschließend noch in einen Isolinienplan übernommen, in dem die Höhendifferenzen der beiden digitalen Höhenmodelle graphisch dargestellt sind, so kann dies als gute Grundlage zur überschlägigen Berechnung des bei der Planie anfallenden Transportaufwands dienen.

Die Massenberechnung selbst innerhalb der einzelnen Teilgebiete erfolgt durch ein Aufsummieren des Volumens von Prismen über den einzelnen Rasterelementen (Abb. 4-9). Über die Höhendifferenzen h in den vier Rastereckpunkten, das Rasterintervall Rechts RR und das Rasterintervall Hoch RH ergibt sich das Volumen V des vierseitigen Prismas zu

$$V = \frac{1}{4}(h(I,K)+h(I,K+1)+h(I+1,K+1)+h(I+1,K)) \cdot RR \cdot RH \quad (4.37)$$

Eine Vereinfachung ist möglich, wenn man sich Hilfsrasterelemente gebildet denkt, die gegenüber dem Ausgangsraster um das halbe Rasterintervall nach Rechts und Hoch verschoben sind und in deren Mitte der alte Rasterpunkt liegt. Dann setzt sich das Volumen aus Würfeln zusammen, wobei die Rasterelemente die konstante Grundfläche und die Höhendifferenzen $h(I,K)$ die Höhe bilden. In diesem Fall muß nur noch das Volumen derjenigen versetzten Rasterelemente gesondert als Prisma



- Verschneidungslinie der beiden digitalen Höhenmodelle
- Bezugshorizont mit Rasterlinien
- versetztes Rasterelement
- $h(I,K)$ Höhendifferenz zwischen den beiden Höhenmodellen im Rasterpunkt (I,K)
- RR Rasterintervall Rechts
- RH Rasterintervall Hoch

Abb. 4-9 Massenberechnung im Höhenraster

berechnet werden, die entweder von der Gebietsgrenze, einer Verschneidungslinie der beiden Höhenmodelle oder einer Geländebruchkante durchschnitten werden. Die Verschneidungslinie der beiden Höhenmodelle ist identisch mit der Isolinie $h=0$ im digitalen Höhendifferenzenmodell.

Diese Art der Volumenbestimmung zeichnet sich durch kurze Rechenzeiten aus, da, von den Randelementen und den angeführten Ausnahmen abgesehen, nur die Höhendifferenzen in den Rasterpunkten aufzusummieren sind und ihre Summe mit der Fläche eines Rasterelements zu multiplizieren ist. Krümmungen der Oberfläche innerhalb eines Rasterelements werden dabei nicht berücksichtigt. Diese Vernachlässigungen sind jedoch normalerweise unerheblich, wenn das Rasterintervall auf das jeweilige Gelände bzw. auf die gewünschte Genauigkeit der Massen richtig abgestimmt ist; zudem gleichen sich konvexe und konkave Krümmungen über größere Flächen hinweg aus.

Zur Abschätzung der Genauigkeit der Massenberechnung gehen wir davon aus, daß eine Rasterhöhe des ersten digitalen Höhenmodells den mittleren Fehler m_{H1} , die entsprechende Rasterhöhe des zweiten Höhenmodells den mittleren Fehler m_{H2} besitzt. Der mittlere Fehler m_h der Höhendifferenz in diesem Rasterpunkt beträgt dann

$$m_h = \pm \sqrt{m_{H1}^2 + m_{H2}^2} . \quad (4.38)$$

Bezeichnen wir das Rasterintervall Rechts mit RR und Hoch mit RH, so erhalten wir als mittleren Fehler m_v eines Volumens, das sich über n Rasterelemente erstreckt

$$m_v = \sqrt{n} \cdot RR \cdot RH \cdot m_h . \quad (4.39)$$

Der mittlere Fehler eines Volumens steigt somit mit der Anzahl und der Fläche der Rasterelemente, nicht jedoch mit dem Betrag des Volumens selbst. Bei einer Rebflurbereinigung z.B., in der 100 ha Fläche zu planieren sind, einem Rasterintervall Rechts und Hoch $RR_1 = RH_1 = 5$ m und einem mittleren Höhenfehler eines Rasterpunkts in beiden Höhenmodellen $m_{H1} = m_{H2} = \pm 0,1$ m ergibt sich ein mittlerer Fehler für das Volumen von $m_{v1} \approx \pm 706$ m³. In der Praxis muß jedoch wohl davon ausgegangen werden, daß der mittlere Höhenfehler eines Rasterpunktes, der aus Stützpunkten mit einem mittleren Höhenfehler von mindestens $\pm 0,1$ m (Geländerauhigkeit) abgeleitet wird, die angesetzten $\pm 0,1$ m überschreitet.

Als Vergleich soll der mittlere Fehler der Massenberechnung mit Hilfe von Profilen abgeschätzt werden. Wenn wir davon ausgehen, daß Querprofile über das gesamte Projekt hinweg im Abstand von 20 m vorliegen und entlang der Profile alle 10 m die Geländehöhe bestimmt wurde, so läßt sich diese Punktanordnung auch als ein rechteckiges Raster mit einem Rasterabstand Rechts $RR_2 = 10$ m und einem Rasterabstand Hoch $RH_2 = 20$ m deuten. Unter der Annahme, daß der mittlere Höhenfehler eines Profilverpunktes vor und nach der Planie $m_{H1} = m_{H2} = \pm 0,1$ m beträgt, erhalten wir als mittleren Fehler für das über Querprofile bestimmte Volumen $m_{v2} \approx \pm 2000$ m³.

Das Verhältnis der mittleren Fehler eines über ein quadratisches Raster bestimmten Volumens m_{v1} zu einem über Querprofile bestimmten Volumen m_{v2} bestimmt sich

bei gleichem mittleren Höhenfehler mit den Rasterintervallen Rechts RR_1 bzw. RR_2 und Hoch RH_1 bzw. RH_2 nach

$$\frac{m_{V1}}{m_{V2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{RR_2}{RR_1} \cdot \frac{RH_2}{RH_1}}} \quad (4.40)$$

Im oben aufgeführten Beispiel, dem ein engmaschiges Höhenmodell bzw. weitgehend realistische Werte zur Erarbeitung baureifer ingenieurbautechnischer Entwürfe mit Hilfe von Querprofilen zugrunde gelegt sind, beträgt das Verhältnis der mittleren Fehler der Volumina $m_{V1}/m_{V2} = 1/\sqrt{8}$. Nicht enthalten sind dabei diejenigen Fehler, die bei der Massenberechnung über Querprofile mit zunehmendem Profilabstand durch die Vernachlässigung der Oberflächenkrümmung entstehen.

CLERICI und KUBIK untersuchen in [36] die theoretische Genauigkeit, mit welcher Volumina aus interpolierten Rasterhöhen abgeleitet werden können. Dabei zeigt sich, daß der mittlere Fehler eines Volumens mit wachsendem Stützpunktabstand ansteigt.

MORITZ [151] weist darauf hin, daß Gleichung (4.39) nur unter der Voraussetzung gilt, daß die mittleren Fehler m_{H1} und m_{H2} der Höhenmodelle bzw. die mittleren Fehler m_H der Höhendifferenzen in benachbarten Rasterpunkten nicht korreliert sind. Liegt eine Korrelation der Höhenfehler in benachbarten Rasterpunkten vor, so reicht die Angabe des mittleren Höhenfehlers eines Rasterpunktes nicht mehr aus, um daraus die Genauigkeit einer abgeleiteten Größe, wie z.B. eines Rauminhaltes von Erdmassen, zu bestimmen. MORITZ schlägt deshalb vor, zur Beschreibung der Höhengenaugkeit von Höhenschichtlinien außer dem mittleren Höhenfehler noch eine weitere Konstante, das Streuungsintegral, anzugeben. Mit diesen Größen läßt sich dann auch die Genauigkeit von Größen abschätzen, die aus den Höhenwerten abgeleitet sind.

Die hohe Genauigkeit der Massenberechnung über ein engmaschiges digitales Höhenmodell erlaubt es somit, für die Bestimmung der Rasterhöhen der projektierten Oberfläche im Planungsstadium Interpolationsformeln zu verwenden, die nicht die höchste Genauigkeit liefern, dafür aber schnell auszuführen sind.

Werden die Höhendifferenzen zwischen dem digitalen Höhenmodell der alten Geländeoberfläche und demjenigen der projektierten neuen Oberfläche in den einzelnen Rasterpunkten als digitales Höhendifferenzenmodell abgespeichert, so können daraus mit Hilfe eines Isolinienprogramms neben den Verschneidungskurven der beiden Flächen auch Isolinien konstanten Auf- und Abtrags abgeleitet werden. Bei unsicheren Kenntnissen über den geologischen Aufbau des Untergrundes empfiehlt es sich, die Lage der maximalen Abträge in die Natur zu übertragen. Eine Probebohrung bis zur Tiefe des geplanten Abtrags zeigt, ob z.B. anstehendes hartes Gestein eine Verwirklichung der Planung in Frage stellt. Wird der Aufwand zur Ausführung dieser Planung zu groß, so ist gegebenenfalls die Geländehöhe dieser Punkte unter Berücksichtigung des möglichen Abtrages als Zwangspunkt in einem weiteren Berechnungslauf für ein modifiziertes Höhenmodell der projektierten Oberfläche einzuführen, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

4.6 Digitale Oberflächenmodellierung

Bei ingenieurbautechnischen Maßnahmen, wie z.B. im Wasserbau, im Siedlungsbau oder in Flurbereinigungen, sind des öfteren Eingriffe in die bestehende Geländeoberfläche erforderlich, die zu größeren flächenhaften Planierungen führen. Je nach ihrem Umfang und den örtlichen Verhältnissen können diese Maßnahmen sehr kostspielig werden.

Die Planungen und die genäherte Festlegung des Umfangs der zu bewegenden Massen einschließlich der Überprüfung der Transportwege erfolgen bisher überwiegend manuell. Dazu werden Querprofile für das bestehende Gelände photogrammetrisch bzw. terrestrisch aufgenommen oder aus Höhenlinienplänen abgeleitet. Mit Hilfe der konstruierten Querprofile der planierten Geländeoberfläche lassen sich damit die Massen genähert berechnen.

Ein digitales Höhenmodell erlaubt es, diese manuelle Planung der planierten Oberfläche rechnerisch durchzuführen. Wenn wir davon ausgehen, daß die alte Oberfläche durch ein digitales Höhenmodell gegeben ist, so wird daraus ein Höhenmodell der projektierten, planierten Oberfläche unter Berücksichtigung folgender Forderungen rechnerisch abgeleitet:

- a) Die Höhendifferenzen zwischen bestehendem und planiertem Gelände sollen möglichst klein sein, d.h. der Umfang des Auf- und Abtrags soll minimiert werden.
- b) Für die zu bewegenden Massen soll ein Ausgleich, ein Überschuß oder ein Defizit vorgegeben werden können.
- c) Im Falle eines Abtrags sollen unterschiedliche qualitative Merkmale des Bodens (z.B. Härtegrade) berücksichtigt werden.
- d) Zwangspunkte sollen höhenmäßig angehalten werden können.
- e) Die planierte Geländeoberfläche soll möglichst kleine Neigungen zwischen benachbarten Rasterpunkten besitzen und/oder die Geländeoberfläche soll für ein bestimmtes Gebiet auf einen vorgegebenen Neigungswert hin einplaniert bzw. abgeflacht werden können. Wird die Neigung der Oberfläche in Richtung der Rasterlinien durch die Neigung in Fallrichtung ersetzt, so kann der Fallwinkel beeinflußt werden. In einzelnen Fällen ist es sinnvoll, gleichzeitig auch die Änderungen der Fallrichtung zu minimieren.
- f) Die Krümmung der planierten Oberfläche soll möglichst klein sein.

Insbesondere im Hinblick auf die Forderungen a, b und e erscheint es sinnvoll, eine Unterteilung des Bearbeitungsgebietes in einzelne Teilgebiete mit unterschiedlichen Vorgaben vorzusehen. Die Reihenfolge der vorstehenden sechs Forderungen, deren Berücksichtigung bei einer digitalen Oberflächenmodellierung möglich sein sollte, sagt noch nichts über ihre Wertigkeit in einem konkreten Anwendungsfall aus. So wird z.B. bei Planierungsarbeiten in einer Rebflurbereinigung die Forderung e zusammen mit der Forderung b ein größeres Gewicht besitzen im Vergleich z.B. zur Forderung a.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt KRAUS [118] vor, die Ausgleichsrechnung heranzuziehen. Die angeführten Forderungen bei der rechnerischen Ableitung der projizierten Oberfläche aus der bestehenden werden dabei als Verbesserungsgleichungen für die einzelnen Rasterhöhen des digitalen Höhenmodells der alten Geländeoberfläche oder als Bedingungsgleichungen dargestellt. Dieser Ansatz erlaubt rechentechisch eine direkte Lösung. Gleichzeitig bewirkt die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate eine möglichst geringe Umformung des Geländes (WINDHOLZ [226]).

Die Forderung nach möglichst kleinen Höhendifferenzen $h(I,K)$ zwischen den Rasterhöhen der Höhenmodelle vor und nach der Planierung läßt sich mit folgender Verbesserungsgleichung darstellen:

$$v_h(I,K) = h(I,K) \cdot p(I,K) \quad (4.41)$$

mit $h(I,K)$ Höhendifferenz der Höhenmodelle vor und nach der Planie im Rasterpunkt (I,K)

$p(I,I)$ Gewicht der Höhendifferenz im Rasterpunkt (I,K) .

Werden die Verbesserungsgleichungen (4.41) für jeden Rasterpunkt des digitalen Höhenmodells angesetzt und nehmen sie an einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen teil, so bewirkt dies eine Minimierung der Höhendifferenzen im gesamten Höhenmodell und damit eine Minimierung der Massenbewegungen.

Im Regelfall wird das Gewicht $p(I,K)$ für den Rasterpunkt (I,K) mit 1 eingeführt. Wählen wir dieses Gewicht sehr groß, so bedeutet dies, daß die Rasterhöhe des alten Höhenmodells angehalten wird. Auf diese Art und Weise können Zwangspunkte behandelt werden. Liegt das Gewicht geringfügig über 1, so können damit unterschiedliche qualitative Merkmale des Bodens (z.B. verschiedene Härtegrade) berücksichtigt werden. Allerdings bewirkt dieser Ansatz, daß die planierte Oberfläche für $p > 1$ nicht nur im Falle eines Abtrags, sondern auch bei einer Aufschüttung näher an der alten Oberfläche verläuft als bei $p = 1$. In der Praxis dürfte dies jedoch kaum zu Problemen führen, da in der Regel bereits anhand eines Höhenlinienplans des alten Geländes grob abgeschätzt werden kann, wo voraussichtlich Aufträge erfolgen werden. Bei der Gewichtsfestsetzung kann dies dann berücksichtigt werden.

Bezeichnen wir den Rasterabstand Rechts des digitalen Höhenmodells mit RR und den Rasterabstand Hoch mit RH, so liefert ein Aufsummieren sämtlicher Höhendifferenzen $h(I,K)$ in den Rasterpunkten, multipliziert mit der Rasterfläche, folgende Bedingungsgleichung für einen Massenausgleich:

$$\frac{RR \cdot RH}{4} \cdot \sum_{I=1}^N \sum_{K=1}^M h(I,K) \cdot d(I,K) = K \quad (4.42)$$

mit

N Anzahl der Rasterpunkte in der Rechtsausdehnung des DHM

M Anzahl der Rasterpunkte in der Hochausdehnung des DHM

$h(I,K)$ Höhendifferenz im Rasterpunkt (I,K) zwischen den Höhenmodellen vor und nach der Planie

- $d(I,K)$ Gewichtungsfaktor
 = 4 für Rasterpunkt im Inneren des DHM
 = 2 für Rasterpunkt am Rand des DHM
 = 1 für Rasterpunkt in einem Eck des DHM
- K Faktor zur Festlegung des Massenausgleichs
 = 0 für Massenausgleich
 < 0 für Massenüberschuß
 > 0 für Massendefizit.

Über die Rasterhöhen $H(I,K)$ des digitalen Höhenmodells, die dazugehörigen Höhendifferenzen $h(I,K)$ und das Rasterintervall RR ergibt sich folgende Gleichung für den Tangens der Geländeneigung $\alpha(I,K)$ des planierten Geländes im Rasterpunkt (I,K) in der Rechtsausdehnung des Höhenmodells zu

$$\alpha(I,K) = \frac{(H(I+1,K)+h(I+1,K))-(H(I,K)+h(I,K))}{RR} \quad (4.43)$$

Im Sinne einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen werden die Höhendifferenzen $h(I+1,K)$ und $h(I,K)$ als Unbekannte gedeutet, so daß wir folgende Verbesserungsgleichungen für die Geländeneigung $\alpha(I,K)$ erhalten:

$$v_{\alpha(I,K)} = \frac{1}{RR} h(I+1,K) - \frac{1}{RR} h(I,K) - \underbrace{\left(\alpha_R - \left(\frac{H(I+1,K)-H(I,K)}{RR} \right) \right)}_{\text{Absolutglied}} \quad (4.44)$$

mit

α_R Richtwert für die Geländeneigung.

Wird das Absolutglied als Differenz aus dem Richtwert α_R für die Geländeneigung und der Neigung des ursprünglichen Geländes positiv, so wird es bei der Aufstellung der Verbesserungsgleichungen Null gesetzt. Dadurch wird erreicht, daß ein Gelände, dessen Neigung den Richtwert α_R übersteigt, abgeflacht wird und gleichzeitig ein Gelände, dessen Neigung geringer als der Richtwert α_R ist, in seiner Neigung durch diese Verbesserungsgleichung nicht verändert wird. Soll das planierte Gelände möglichst horizontal sein, so ist der Richtwert $\alpha_R = 0$ zu setzen. Wird dagegen angestrebt, einen Hang möglichst gleichmäßig auf eine vorgegebene Neigung zu planieren, so wird dieser vorgegebene Wert als Richtwert eingeführt.

Neben den Verbesserungsgleichungen für die Geländeneigung können noch Verbesserungsgleichungen für die Krümmung der Geländeoberfläche angesetzt werden. Eine Minimierung der Krümmung führt zu einer weitgehend ebenen Oberfläche. Im Rahmen einer Rebflurbereinigung z.B. ist eine Minimierung der Gelände­krümmung zwischen benachbarten Wirtschaftswegen in Fallrichtung erforderlich. Zur Angabe der Krümmung entlang der Rasterlinien wird die Pfeilhöhe $f(I,K)$ im Rasterpunkt (I,K) über der Sehne zwischen den beiden benachbarten Rasterhöhen $H(I-1,K)$ und $H(I+1,K)$ eingeführt (Abb. 4-10):

$$f(I,K) = \frac{1}{2}(H(I-1,K)+h(I-1,K)+H(I+1,K)+h(I+1,K))-(H(I,K)+h(I,K)) \quad (4.45)$$

Werden auch hier die Höhendifferenzen $h(I-1,K)$, $h(I,K)$ und $h(I+1,K)$ als Unbekannte gedeutet, so ergibt sich die Verbesserungsgleichung

$$v_{f(I,K)} = \frac{1}{2}h(I-1,K) + \frac{1}{2}h(I+1,K) - h(I,K) - \underbrace{\left(f_R - \left(\frac{1}{2}(H(I-1,K) + H(I+1,K)) - H(I,K) \right) \right)}_{\text{Absolutglied}} \quad (4.46)$$

mit

f_R Richtwert für die Pfeilhöhe.

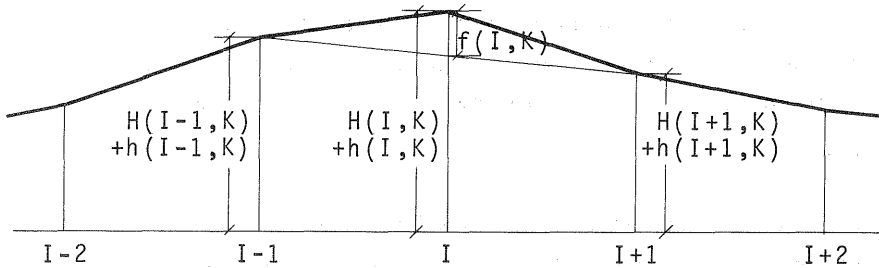


Abb. 4-10 Bestimmung der Oberflächenkrümmung entlang einer Rasterlinie Hoch = Konst.

Wird als Ergebnis der Ausgleichung eine weitgehend ebene Oberfläche angestrebt, so wird für die Pfeilhöhe der Richtwert $f_R = 0$ eingeführt.

Der Ansatz der Gleichung (4.46) minimiert die Krümmung der Oberfläche bezogen auf die Geländekleinformen, da jeweils drei benachbarte Rasterhöhen herangezogen werden. Auf die Übereinstimmung dieses Ansatzes mit den Verbesserungsgleichungen (3.12) der Interpolation mit linearen finiten Elementen in Abschnitt 3.2.6 sei besonders hingewiesen. Unabhängig davon ist es aber möglich, daß die Oberflächenkrümmung in mehreren benachbarten Rasterpunkten dasselbe Vorzeichen aufweist und sich somit aufaddiert. Dies ist z.B. in der Rebflurbereinigung insoweit nicht erwünscht, als die vertikalen Abweichungen der projektierten Geländeoberfläche in Bearbeitungsrichtung, die weitgehend der Fallrichtung entspricht, von der Sehne zwischen zwei benachbarten Wirtschaftswegen einen vorgegebenen maximalen Wert nicht überschreiten sollten (siehe auch Abschnitt 7.2). Daraus folgt, daß zusätzlich noch die Krümmungen der projektierten Oberfläche bezogen auf größere Geländeformen in der Bearbeitungsrichtung zu minimieren sind.

Zur Vereinfachung ersetzen wir dazu die Fallrichtung durch eine Rasterrichtung. Die Rasterlinie Hoch = K soll z.B. zwei benachbarte Wege genähert in den Rasterpunkten (N,K) bzw. (M,K) schneiden. Wir stellen für sämtliche Rasterpunkte mit $N < \text{Rechtswert} < M$ die Verbesserungsgleichung für die Pfeilhöhe über der Sehne durch diese beiden Punkte auf und führen sie in die Ausgleichung ein. Damit erreichen wir, daß neben der Minimierung der Krümmung auch die vertikale Abweichung der Oberfläche von der Sehne in einer bevorzugten Richtung minimiert wird.

Voraussichtlich bessere Ergebnisse können wir bei der Berechnung der projektierten Oberfläche erzielen, wenn wir die Verbesserungsgleichungen für die Neigung oder Krümmung nicht in der starren Richtung der Rasterlinien, sondern in Fall-

richtung der alten Oberfläche einführen. Nach Gleichung (4.4) kann der Tangens des Fallwinkels $\beta(I,K)$ der Oberfläche im Rasterpunkt (I,K) über die Rasterhöhen $H(I,K)$ und die dazugehörigen Höhendifferenzen $h(I,K)$ wie folgt berechnet werden:

$$\beta(I,K) = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{RR} (H(I-1,K)+h(I-1,K)-H(I+1,K)-h(I+1,K)))^2 + \left(\frac{1}{RH} (H(I,K-1)+h(I,K-1)-H(I,K+1)-h(I,K+1)))^2\right)} \quad (4.47)$$

mit

RR Rasterintervall in der Rechtsausdehnung

RH Rasterintervall in der Hochoausdehnung.

Die Rasterhöhe $\bar{H}(I,K)$ der planierten Oberfläche setzt sich nun im Sinne der Ausgleichsrechnung aus der Rasterhöhe der alten Geländeoberfläche $H(I,K)$ als Näherungswert und einer unregelmäßigen Korrektur $h(I,K)$ zusammen:

$$\bar{H}(I,K) = H(I,K) + h(I,K) . \quad (4.48)$$

Setzen wir ein quadratisches Raster mit dem Rasterintervall 1 voraus, so erhalten wir als linearisierte Verbesserungsgleichung für den Fallwinkel $\beta(I,K)$:

$$v_{\beta(I,K)} = \frac{1}{4\beta(I,K)} \left[\begin{aligned} &[(H(I-1,K)-H(I+1,K)) \cdot h(I-1,K) \\ &+(H(I+1,K)-H(I-1,K)) \cdot h(I+1,K) \\ &+(H(I,K-1)-H(I,K+1)) \cdot h(I,K-1) \\ &+(H(I,K+1)-H(I,K-1)) \cdot h(I,K+1)] \\ &\underbrace{- (\beta_R - \beta(I,K))}_{\text{Absolutglied}} \end{aligned} \right] \quad (4.49)$$

mit

β_R Richtwert für die Geländeneigung

$\beta(I,K)$ Näherungswert für den Fallwinkel.

Der Näherungswert für den Fallwinkel $\beta(I,K)$ wird dabei mit Hilfe der Rasterhöhen der alten Oberfläche nach Gleichung (4.4) berechnet.

Die Auswirkung des dargestellten Ausgleichsansatzes zeigen die beiden folgenden Abbildungen, die WINDHOLZ [226] entnommen sind. Abbildung 4-11 zeigt das ursprüngliche Gelände. Die digitale Oberflächenmodellierung mit angesetztem Massenausgleich und unveränderlichen Rasterpunkten entlang des Gebietsrandes führt zum Ergebnis der Abbildung 4-12. Dabei beträgt der Richtwert α_R für die maximale Neigung des planierten Geländes 10 % der größten Neigung des unplanierten Geländes.

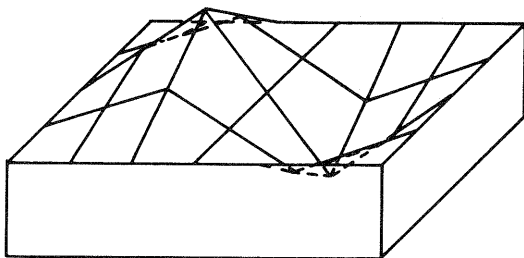


Abb. 4-11 Unplaniertes Gelände

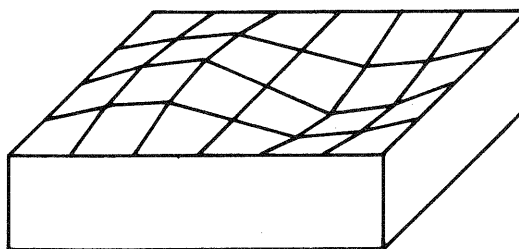


Abb. 4-12 Planiertes Gelände nach einem Massenausgleich

Das Ergebnis bestätigt die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des ausgleichstechnischen Ansatzes. Zur Überwindung von Schwierigkeiten, die bei der Ausgleichung in bestimmten Fällen auftreten können, und zur praktischen Durchführung der Berechnungen gibt WINDHOLZ in |226| verschiedene Hinweise.

5. Empirische Untersuchungen zur Ableitung eines digitalen Neigungsmodells

Im 5. Kapitel wird die Leistungsfähigkeit des im 4. Kapitel entworfenen digitalen Neigungsmodells anhand praktischer Beispiele überprüft. Dazu werden für Kartenmaßstäbe 1:2500 und 1:10000 digitale Höhenmodelle mit dem Höhenlinienprogramm SCOP berechnet. Diese Höhenmodelle bilden die Grundlage zur Ableitung von digitalen Neigungsmodellen und von Gefällstufen- und Expositionskarten.

Anhand tabellarischer Übersichten über die Auswirkung der Wahl einiger Programmparameter können allgemeingültige Hinweise zur praktischen Berechnung digitaler Höhenmodelle mit dem Programm SCOP gewonnen werden. Die aus dem digitalen Neigungsmodell rechnerisch abgeleiteten Gefällstufen- und Expositionskarten werden mit Karten, die nach den bisher üblichen Verfahrenstechniken manuell erzeugt wurden, in bezug auf ihre Genauigkeit, Vollständigkeit und den Herstellungsaufwand verglichen.

5.1 Bildmaterial und Vergleichsauswertungen

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde ein Versuchsgebiet benötigt, für das sowohl eine großmaßstäbige Befliegung als Grundlage für eine Digitalisierung der Geländeoberfläche als auch eine oder mehrere konventionell hergestellte Gefällstufenkarten vorliegen. Das einzige verfügbare Material mit Vergleichsauswertungen, das für diese Arbeit gefunden werden konnte, wurde vom Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Versuchsgebiete liegen in den beiden Flurbereinigungsverfahren Götzingen im Odenwaldkreis und Feldstetten, Alb-Donau-Kreis. Die Luftbilder im Bildmaßstab 1:8000 wurden im Zuge einer Erstbefliegung mit einer Reihenmeßkammer RMK 15/23 aufgenommen. Zweck des Bildfluges im Rahmen der Flurbereinigung war eine Auswertung der Geländetopographie im Maßstab 1:2500.

Für die beiden Testgebiete standen folgende Unterlagen zur Verfügung:

Versuchsgebiet Götzingen

- Katastergrundriß 1:2500,
- direkte photogrammetrische Höhenlinienkartierung 1:2500,
- Feldaufnahme der Gefällstufenkarte mit dem Freihandgefällmesser 1:2500,
- direkt photogrammetrisch abgeleitete Gefällstufenkarte 1:2500
- zwei Orthophotos 1:2500

Versuchsgebiet Feldstetten

- Katastergrundriß 1:2500,
- direkte photogrammetrische Höhenlinienkartierung 1:2500,
- mehrere unabhängige Feldaufnahmen der Gefällstufenkarte mit dem Freihandgefällmesser 1:2500,
- Orthophoto 1:2500.

Während die großmaßstäbigen Auswertungen in den beiden Flurbereinigungsverfahren Götzingen und Feldstetten vom Blickwinkel der landwirtschaftlichen Planung aus zur agrarstrukturellen Detailplanung zu rechnen sind, handelt es sich beim dritten Versuchsgebiet um ein Beispiel, das vom Maßstab her bereits zur agrarstrukturellen Rahmenplanung verwendet werden kann. Die Luftbilder des Versuchsgebietes Ranggen wurden vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Wien, mit einer Normalwinkelkammer 21/23 im Bildmaßstab 1:30 000 befliegen. Sie geben einen Ausschnitt aus dem Inntal wieder. Zweck dieser Befliegung war eine Forschungsarbeit zur Erstellung einer Flächenbilanz (FISCHLER [53]), bei der u.a. untersucht werden sollte, in welchem Umfang dazu Luftbilder verwendet werden können. Für diese Forschungsarbeit wurden mit dem im 4. Kapitel vorgestellten Rechenprogramm Gefällstufenkarten abgeleitet, die dort in Untersuchungen zur Kartierung von Bearbeitbarkeitsgrenzen für landwirtschaftliche Maschinen einbezogen wurden.

Vergleichsauswertungen für die rechnerisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Versuchsgebiets Ranggen liegen leider nicht vor. Ein Orthophoto im Maßstab 1:10 000 steht zur Verfügung.

5.2 Datenerfassung

Zur praktischen Erprobung der vorgeschlagenen rechnerischen Ableitung eines digitalen Neigungsmodells wurden vier photogrammetrische Modelle profilweise abgefahren und die digitalisierten Modellpunkte entsprechend den Anforderungen des Höhenlinienprogramms SCOP auf Magnetband registriert.

Die Digitalisierung der Modelle 82158216 (Versuchsgebiet Feldstetten) und 7050707 und 7260728 (Versuchsgebiet Götzingen) erfolgte freundlicherweise durch die Firma Wild, Heerbrugg, am Autograph Wild A8 mit Orthophotozusatz PPO-8 und dem Registriergerät EK8. Parallel zur profilweisen Modellabtastung wurden Orthophotos im Maßstab 1:2500 hergestellt (Abb. 7-1 und 7-2). Bei einem Bildmaßstab von ca. 1:8000 erfolgte die Modellauswertung im Maßstab 1:4000. Da zur Orthophotoherstellung im Maßstab 1:2500 eine Streifenbreite von 5 mm zur Belichtung verwendet wurde, führte dies im Modell zu einem Profilabstand von 3,125 mm. Entlang der Profile wurde nach konstantem Zeitintervall registriert, wobei sich ein durchschnittlicher Registrierabstand zwischen 2,1 und 2,8 mm als der Schwierigkeit des Geländes angemessen erwies (Tabelle 5-1).

In Abbildung 5-1 ist der Punktauftrag des Modells 82158216 innerhalb des Kartenblattes Feldstetten, in Abbildung 5-2 derjenige der Modelle 7050707 und 7260728 im Kartenblatt Götzingen wiedergegeben. Dabei sind die

- Profilpunkte als Einzelpunkte,
- die Bruchlinienpunkte durch Polygonzüge verbunden,
- die markanten Höhenpunkte mit Kreuzchen dargestellt.

Die Herstellung der Orthophotos, die Digitalisierung und Berechnung des digitalen Höhenmodells erfolgten bei den Beispielen Feldstetten und Götzingen für den Kartenmaßstab 1:2500. Er ist der gebräuchliche Maßstab für die Verfahrenskarten im Flurbereinigungsverfahren. Um die Ergebnisse der Versuche im handlichen Format darstellen zu können, wurden die vorliegenden Kartenbeispiele aus der Flurbereinigungsverwaltung für diese Arbeit in den Maßstab von ungefähr 8 500 verkleinert.

FELDSTETTEN

1

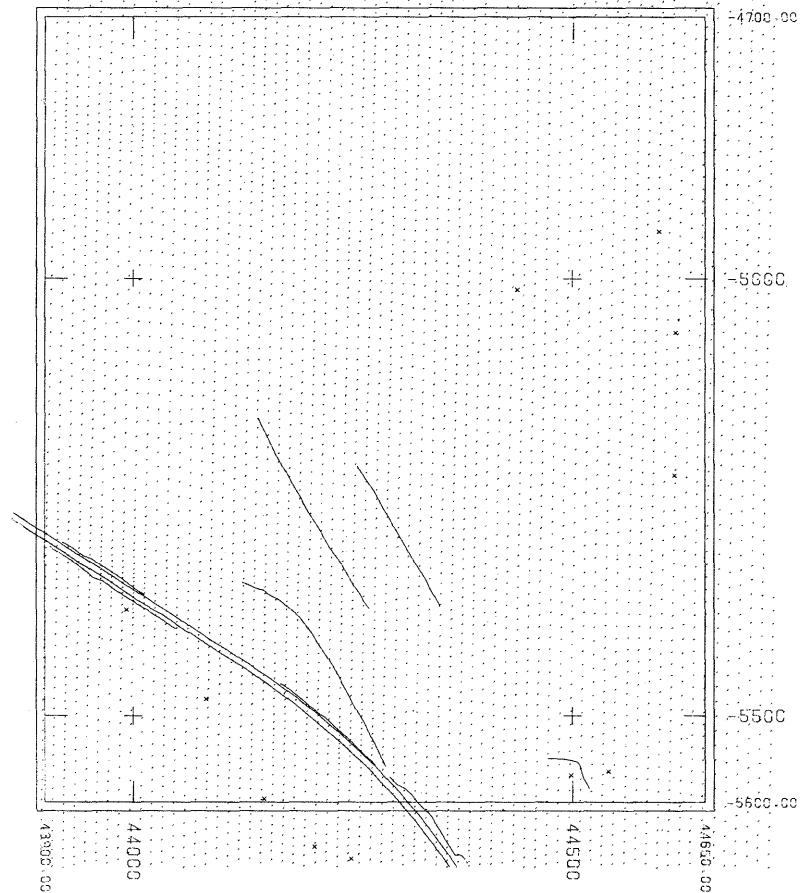
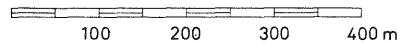


Abb. 5-1 Punktauftrag des Kartenblattes Feldstetten

- Profilpunkt
- Bruchlinie
- * markanter Höhenpunkt



GOETZINGEN

2

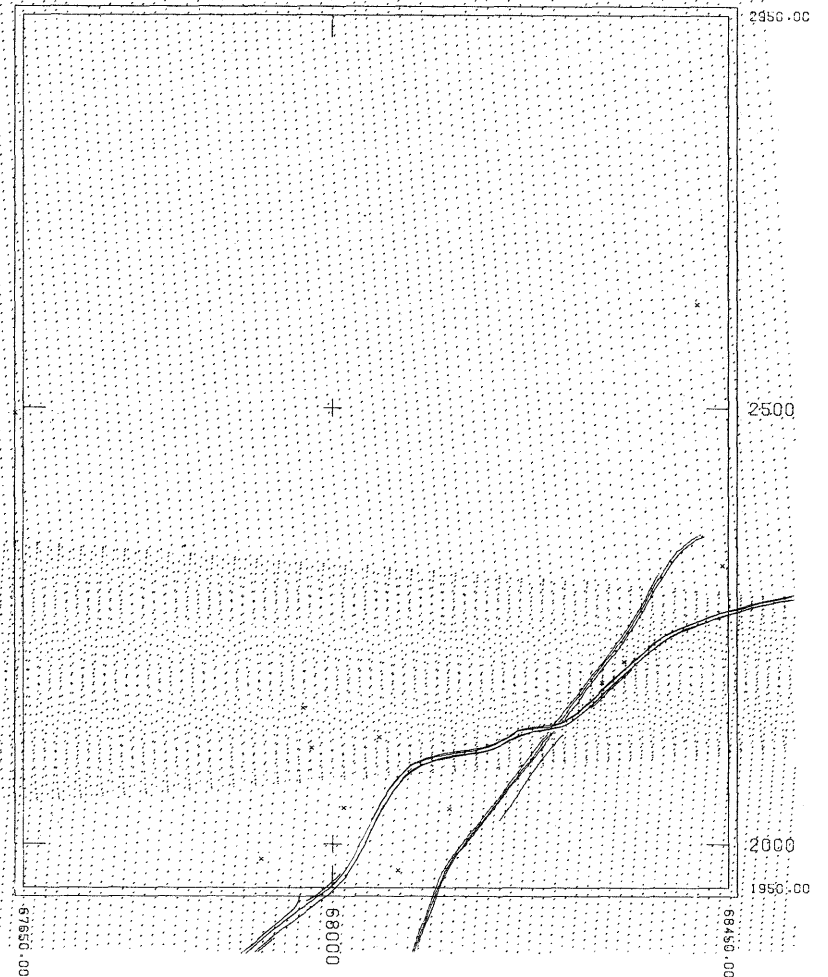
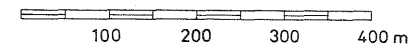


Abb. 5-2 Punktauftrag des Kartenblattes Götzingen

- Profilpunkt
- Bruchlinie
- * markanter Höhenpunkt



2.

RANGGEN

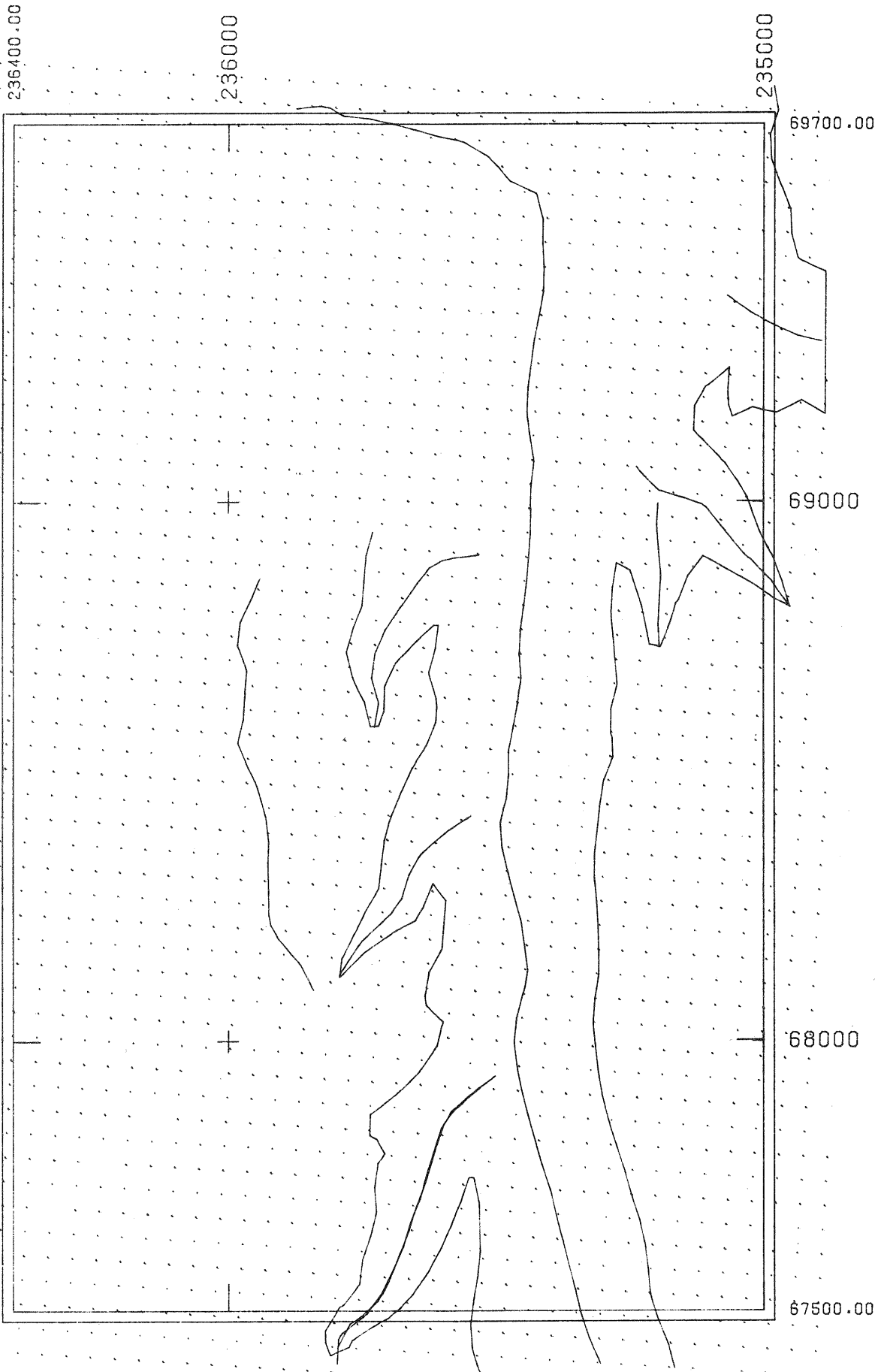
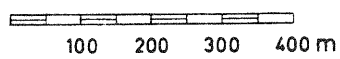


Abb. 5-3 Punktauftrag des Kartenblattes Ranggen

- Profilpunkt
- Bruchlinie



Die Digitalisierung des Modells 1196 (Versuchsgebiet Ranggen) erfolgte durch das Institut für Geodäsie und Fernerkundung der Universität für Bodenkultur, Wien, am Planimat von Zeiss mit DTM-Zusatz. Bei einem Bildmaßstab von 1:30 000 und einem Modellmaßstab von 1:15 000 wurde als Kartenmaßstab 1:10 000 gewählt. Die Digitalisierung erfolgte entlang von Profilen nach konstantem Wegintervall. Mit Hilfe des DTM-Zusatzes wurde dabei zwischen den Profilverpunkten schnell gefahren und in der Nähe der Meßpunkte die Geschwindigkeit automatisch verringert.

Der Punktauftrag des Kartenblattes Ranggen ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Weitere Angaben zur Digitalisierung der Modelle ergeben sich aus Tabelle 5-1. Abbildung 7-3 zeigt das Orthophoto, das am Wild Avioplan OR1 hergestellt wurde.

Kartenblatt Kartenmaßstab Modell Nr.	Feldstetten	Götzingen		Ranggen
	1:2500 82158216	1:2500 7050707 7260728		1:10 000 1196
Bildmaßstab	1:8000	1:8000	1:8000	1:30 000
Modellmaßstab	1:4000	1:4000	1:4000	1:15 000
Flughöhe (m)	1200	1200	1200	6 300
Modellausdehnung (mm ²)	214x285	241x245	236x234	171x135
Profilabstand (mm)	3,125	3,125	3,125	3,0
Registrierung im Profil				
- nach konst. Zeitintervall (sec)	0,5 ($\hat{=}$ 2,8 mm)	0,5 ($\hat{=}$ 2,3 mm)	0,5 ($\hat{=}$ 2,1 mm)	- -
- nach konst. Wegintervall (mm)	-	-	-	3,0
Anzahl der registrierten				
- Profilverpunkte	6 926	8 071	8 335	2 609
- Bruchlinienpunkte	538	272	1 587	440
- markanten Höhenpunkte	11	8	12	0

Tab. 5-1 Angaben zur Datenerfassung

5.3 Datenaufbereitung

5.3.1 Absolute Orientierung der Modelle

Zur absoluten Orientierung der Modelle 82158216, 7050707 und 7260728 der Beispiele Feldstetten und Götzingen (Modellmaßstab 1:4000) liegen als Lagepaßpunkte 5 trigonometrische Punkte und 6 graphisch bestimmte Punkte in Form von signalisierten Grenzpunkten oder topographischen Punkten vor.

Nach der Aussonderung von zwei graphisch bestimmten Lagepaßpunkten verbleiben nach der ebenen Helmerttransformation in den Lagepaßpunkten Streckenfehler im Mittel von 0,7 m und maximal von 1,2 m. Im Zeichenmaßstab 1:2500 entspricht der Maximalfehler ca. 0,5 mm und liegt damit an der oberen Grenze der zulässigen Toleranz.

Für die Horizontierung der drei Modelle sind 11 Höhenpaßpunkte gegeben, 3 signalisierte Grenzpunkte und 8 topographische Punkte. Die Höhen dieser Paßpunkte liegen auf dm genau vor. Nach der Aussonderung eines Höhenpaßpunktes verbleiben nach einer Neigung der Modelle in X- und Y-Richtung Restklaffen in Z von 5 cm im Mittel bei einem Maximalwert von 8 cm. Die Modellneigung beträgt maximal 0.001 gon. Bei einem relativen Höhenunterschied im Modell von maximal 6 % ist die entsprechend der verwendeten Näherungsformel maximal zulässige Neigung der Modelle von 0.2 gon deutlich unterschritten.

Für das Modell 1196 des Beispiels Ranggen (Modellmaßstab 1:15 000) sind die Koordinaten von 4 Lagepaßpunkten und 5 Höhenpaßpunkten gegeben. Die Lage ist dabei auf cm, die Höhe auf dm angegeben. Je ein Lage- und Höhenpaßpunkt wird wegen größeren Restklaffen ausgesondert. Nach der ebenen Helmerttransformation verbleibt in den Lagepaßpunkten ein mittlerer Streckenfehler von 1.0 m und ein maximaler Streckenfehler von 1.3 m. Die mittlere Restklaffung in Z in den Höhenpaßpunkten beträgt nach der Modellneigung im Mittel 0.33 m bei einem Maximalwert von 0.48 m.

Bei einem relativen Höhenunterschied von 4.1 % ist die entsprechend der verwendeten Näherungsformel zulässige Modellneigung von ca. 0.3 gon mit einer tatsächlichen Neigung von 0.0009 gon weit unterschritten.

5.3.2 Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers

Alle vier Modelle 82158216, 7050707, 7260728 und 1196 wurden mäanderförmig entlang von Profilen abgefahren und digitalisiert. Bei den drei erstgenannten Modellen erfolgte gleichzeitig die Herstellung von Orthophotos. Zur Eliminierung des systematischen Anteils des Abtastfehlers unterziehen wir die Höhenwerte der Profilpunkte dieser Modelle einer Korrektur mittels linearer Prädiktion (siehe KRAUS [116]). Die Ergebnisse dieser Korrektur sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt.

Bei den Modellen 82158216, 7050707 und 7260728 stellt das angewandte Verfahren in einer Fläche, die zwischen 73 % und 92 % der gesamten Modellfläche schwankt, einen Abtastfehler fest. Der quadratische Mittelwert der Korrektur in allen Profilpunkten liegt zwischen 0.13 m (Modell 7260728) und 0.30 m (Modell 7050707). Dies entspricht 0.11 ‰ bzw. 0.25 ‰ der Flughöhe hg und liegt damit etwas unter dem in der Literatur angegebenen Wert des mittleren Höhenfehlers bei manueller Profilabtastung von ca. 0.4 ‰ hg (Tabelle 2-1). Die maximale Korrektur aller Profilpunkte liegt zwischen 0.88 m und 2.68 m bzw. zwischen 0.7 ‰ und 2.2 ‰ der Flughöhe.

Neben der mittleren Korrektur aller Profilpunkte besitzen noch die maximale Korrektur aller Profilpunkte und der maximale Mittelwert für eine vorgegebene Flächeneinheit besondere Aussagekraft. Als Flächeneinheit verwenden wir die Recheneinheit (RE) ohne deren Überlappungsbereich (Netto-Recheneinheit) und bilden den quadratischen Mittelwert der Korrekturen sämtlicher Profilpunkte. Der größte Mittelwert aus allen Recheneinheiten wird als Maximalwert des Mittels der Korrekturen in einer Recheneinheit in Tabelle 5-2 angegeben.

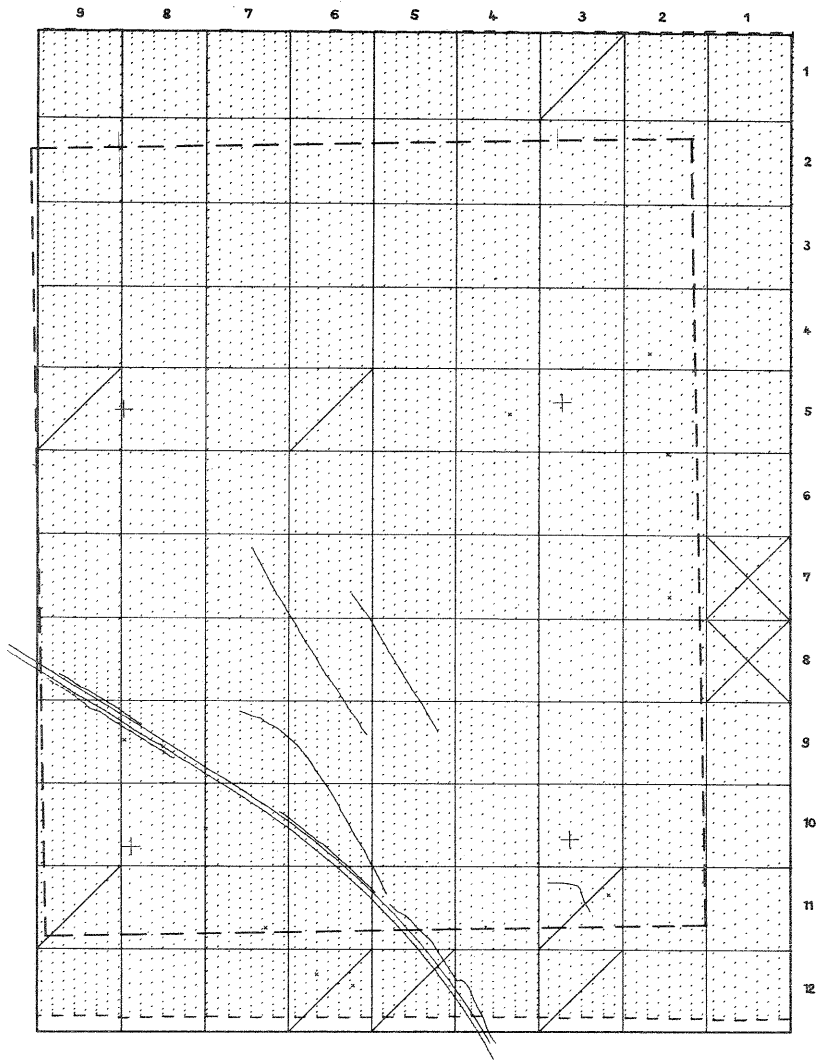
Kartenblatt Modell Nr.,	Feldstetten	Götzingen		Ranggen
	82158216	7050707	7260728	1196
Nettoausdehnung einer RE (mm ²)	24x24	22x22	21x21	24x23
Anzahl der RE im Modell	9x12	11x11	11x11	7x6
Mittlere Stützpunktanzahl in der Brutto-RE	105	115	118	100
Anzahl der RE, in denen ein Abtastfehler festgestellt wurde	99	101	89	14
Anzahl der korrigierten Profilpunkte	5 750	6 180	5 390	910
Mittlere Korrektur aller Profilpunkte (absolut in m)	0.20	0.30	0.13	0.55
(relativ in Promille der Flughöhe hg)	0.17	0.25	0.11	0.09
Maximale Korrektur aller Profilpunkte (absolut in m)	2.61	2.68	0.88	2.00
(relativ in ‰ hg)	2.2	2.2	0.73	0.32
Maximalwert des Mittels der Korrekturen in einer RE (absolut in m)	1.34	1.38	0.45	1.13
(relativ in ‰ hg)	1.1	1.1	0.37	0.18
Abschätzung der Korrekturen über den Scheitelwert der Kreuzkovarianzfunktion:				
- Mittlere Korrektur aller Profilpunkte (m)	0.29	0.36	0.30	-
- Maximalwert des Mittels der Korrekturen in einer RE (m)	1.13	1.02	0.78	-

Tab. 5-2 Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers

Im Modell 7260728 beträgt die maximale Korrektur sämtlicher Profilpunkte 0.88 m bzw. 0.73 ‰ hg. Der Maximalwert des Mittels der Korrekturen über eine Recheneinheit liegt bei 0.45 m bzw. 0.37 ‰ hg. In Abbildung 5-6 sind in den Punktauftrag des Modells 7260728 die Recheneinheiten eingetragen. Diejenigen Recheneinheiten, in denen die maximale Korrektur eines Profilpunktes die Schwelle von 0.4 ‰ hg überschreitet, sind mit einer Diagonallinie gekennzeichnet. Dies tritt in 6 von 121 Recheneinheiten auf. Diese Recheneinheiten liegen bis auf eine entweder im Bereich von Bruchkanten oder am Modellrand. Während Bruchkanten die im hier angewandten Verfahren vorausgesetzte stetige und glatt verlaufende Oberfläche stören, kann am Modellrand eine gewisse Anpassungsphase beim Aufsetzen der Meßmarke auf das Gelände vermutet werden, verursacht durch die Richtungsänderung beim Profilieren.

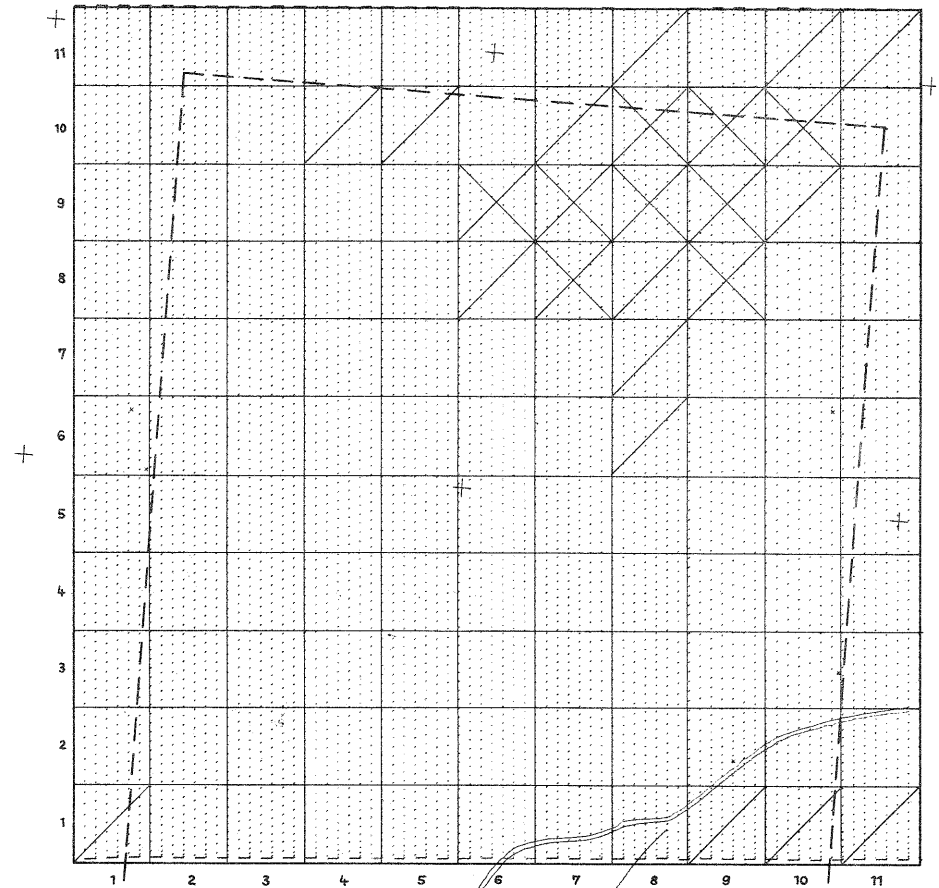
Eine größere maximale Korrektur aller Profilpunkte weisen die Modelle 7050707 und 82158216 mit 2.6 m bzw. 2.2 ‰ hg auf. Der Maximalwert des Mittels der Korrekturen in einer Recheneinheit liegt bei 1.4 m bzw. 1.1 ‰ hg. Gegenüber Modell 7260728 liegen diese Maximalwerte, ebenso wie die mittlere Korrektur aller Profilpunkte, um den Faktor 2-3 höher.

Aus Abbildung 5-5 geht hervor, daß im Modell 7050707 in 24 von insgesamt 121 Recheneinheiten die maximale Korrektur eines Profilpunktes in der Recheneinheit die Schwelle von 0.4 ‰ hg überschreitet. Auch hier liegen diese Recheneinheiten überwiegend am Modellrand oder am Übergang zu einem größeren, geschlossenen Waldgebiet im nördlichen Teil des Modells (siehe Abb. 5-12). In 9 Recheneinheiten übersteigt der Mittelwert der Korrektur aller Profilpunkte in der Recheneinheit den Betrag von 0.4 ‰ hg. Nach Abbildung 5-5 liegen diese Recheneinheiten sämtliche in dem erwähnten Waldgebiet.



- Modellrand
 - - - Kartenblattrand
 - / Maximale Korrektur eines Profilpunktes in der Netto-RE größer als 0.4 ‰ hg
 - / Mittelwert der Korrektur aller Profilpunkte in der Netto-RE größer als 0.4 ‰ hg
- 100 200 300 400 m

Abb. 5-4 Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers im Modell 82158216



- Modellrand
 - - - Kartenblattrand
 - / Maximale Korrektur eines Profilpunktes in der Netto-RE größer als 0.4 ‰ hg
 - / Mittelwert der Korrektur aller Profilpunkte in der Netto-RE größer als 0.4 ‰ hg
- 100 200 300 400 m

Abb. 5-5 Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers im Modell 7050707

Offensichtlich war hier die Geländeoberfläche nicht ausreichend zu erkennen, so daß sie entweder geschätzt oder über die Baumkronen gefahren wurde. Während die so erzielte Höhengenaugigkeit zur Orthoprojektion ausreicht, wäre zu überlegen, ob die Digitalisierung beim Eintritt in geschlossene Waldflächen ohne Bodensicht nicht besser unterbrochen wird. Im vorliegenden Beispiel wird diese Waldfläche von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Im Modell 82158216 überschreitet die maximale Korrektur eines Profilpunktes in der Recheneinheit in 10 von 108 Recheneinheiten den Betrag von 0.4 ‰ hg (Abb. 5-4). Auch diese Recheneinheiten liegen überwiegend am Modellrand bzw. im Bereich von Bruchkanten. In 2 Recheneinheiten übersteigt der Mittelwert der Korrektur aller Profilpunkte in der Recheneinheit den Betrag von 0.4 ‰ hg. Beide Recheneinheiten liegen auch hier in einem geschlossenen Waldgebiet.

Im Modell 1196 (Modellmaßstab 1:15 000) wird in 14 von 42 Recheneinheiten ein Abtastfehler festgestellt. Die mittlere Korrektur aller Profilpunkte beträgt 0.55 m bzw. 0.09 ‰ hg und der Maximalwert der Korrektur der Profilpunkte 2.0 m oder 0.32 ‰ hg. Der größte Mittelwert der Korrektur aller Profilpunkte einer Recheneinheit liegt mit 1.1 m bzw. 0.18 ‰ hg deutlich unter der Schwelle von 0.4 ‰ hg. Diese geringen Filterbeträge und die Tatsache, daß Stützpunkte nur in einem Drittel der Modellfläche überhaupt korrigiert wurden, dürften in erster Linie im Meßverfahren mit der reduzierten Geschwindigkeit während der Messung begründet sein.

Versuche, die Mittelwerte der Korrekturen der Profilpunkte einer Recheneinheit über den Scheitelwert der Kreuzkovarianzfunktion und die Varianz in der Recheneinheit zu berechnen und damit den Rechenaufwand zur Bestimmung der Korrekturen in den einzelnen Profilpunkten zu umgehen, ergaben nur ungenaue Ergebnisse. Für drei Modelle wurden die Korrekturen auf diese Art und Weise abgeschätzt (Tabelle 5-2). Dabei zeigt sich, daß bei den vorliegenden Beispielen die mittlere Korrektur aller Profilpunkte zu groß geschätzt wird, wobei die Abweichungen zwischen 20 % und 130 % schwanken. Der Maximalwert des Mittels der Korrekturen aller Stützpunkte einer Recheneinheit wird in zwei Fällen um ca. 20 % zu klein und in einem Fall um ca. 70 % zu groß geschätzt. Auf die Berechnung der Korrekturen in den einzelnen Profilpunkten kann somit nicht verzichtet werden.

Das Ergebnis der Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers für das Kartenblatt Götzingen zeigen die Höhenlinien der Abbildung 5-11. Mit den korrigierten Höhen der Profilpunkte wurde ein digitales Höhenmodell berechnet und aus diesem Höhenlinien rechnerisch abgeleitet. Abbildung 5-10 zeigt im Vergleich zu Abbildung 5-11 die Höhenlinien, die aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet sind, als dessen Stützpunkte die nicht korrigierten Profilpunkthöhen verwendet wurden.

Beim Vergleich der beiden Höhenlinienpläne zeigen sich nur in dem Waldgebiet am nördlichen Blattrand größere Abweichungen. Die Höhendifferenzen erreichen ungefähr den Betrag der verwendeten Äquidistanz von 2.5 m. Dieser Wert stimmt auch genähert mit der maximalen Korrektur aller Profilpunkte in Modell 7050707 mit 2.68 m (Tabelle 5-2) überein. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Stützwerte

zur Berechnung der digitalen Höhenmodelle in beiden Fällen, unabhängig von der Korrektur des Abtastfehlers, zur Korrektur zufälliger Meßfehler zusätzlich geringfügig gefiltert wurden. Die Filterparameter besitzen in beiden Fällen dieselbe Größe (Tabelle 5-3).

In den Höhenlinienbildern der Beispiele Feldstetten (Abb. 5-8) und Götzingen (Abb. 5-11) treten nur in geringem Umfang im Höhenlinienverlauf Schwingungen mit der doppelten Profilbreite als Wellenlänge auf. Diese Schwingungen lassen auf verbliebene Abtastfehler schließen. Im Höhenlinienbild des Beispiels Ranggen (Abb. 5-13) sind sie in stärkerem Umfang zu erkennen. Offensichtlich gelingt es hier nicht, den Abtastfehler im gewünschten Umfang zu korrigieren. Vermutlich ist damit auch die geringe mittlere Korrektur aller Profilpunkte des Modells 1196 mit $0.09 \text{ ‰} \cdot \text{hg}$ zu erklären (Tabelle 5-2).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das Verfahren der linearen Prädiktion mit zwei verschiedenen Stützpunktgruppen geeignet ist, den systematischen Anteil des Abtastfehlers bei profilweiser Datenerfassung weitgehend zu korrigieren. Die dabei auftretenden Korrekturwerte liegen überwiegend unter dem Betrag von $0.4 \text{ ‰} \cdot \text{hg}$, der in verschiedenen Untersuchungen für manuelles Profilieren als mittlerer Höhenfehler angegeben wird. Größere flächenhaft auftretende Korrekturen haben überwiegend ihren Grund in fehlender Bodensicht, was zu erhöhter Unsicherheit beim Profilieren führt.

5.4 Berechnung des digitalen Höhenmodells

Zum Zeitpunkt der Berechnung des rasterförmigen digitalen Höhenmodells für die vorliegenden Beispiele war die Programmversion von SCOP, welche die Bruchkanten linienhaft berücksichtigt (ASSMUS [9], [10], [11]), noch nicht fertiggestellt. Die Höhenmodelle wurden deshalb mit einer Programmversion von SCOP berechnet, bei der Bruchlinienpunkte lediglich als Stützwerte einer besonderen Punktgruppe eingeführt werden. In der Nachbarschaft von Geländekanten können dabei durch Vernachlässigungen bei der Bestimmung der Korrelationen Fehler in den Rasterhöhen auftreten, die durchaus bis zu mehreren Dezimetern anwachsen können. Auf die Folgerungen aus den Untersuchungen, die in diesem 5. Kapitel durchgeführt werden, haben diese Vernachlässigungen jedoch praktisch keinen Einfluß.

5.4.1 Behandlung des Überlappungsbereichs zweier Modelle

Im Unterschied zum Kartenblatt Feldstetten und Ranggen liegen im Blatt Götzingen Stützpunkte aus zwei Modellen. Die beiden Modelle sind leicht gegeneinander verdreht. Der Überlappungsbereich der beiden Modelle wurde außergewöhnlich groß gewählt und besitzt eine Breite zwischen 180 m und 300 m (Abb. 5-2). Auf der einen Seite erhöht sich durch die verdoppelte Stützpunktzahl im Überlappungsbereich die Rechenzeit zur Interpolation der Rasterhöhen ungefähr um den Faktor 8, auf der anderen Seite ist keine entsprechende Genauigkeitssteigerung in der Höhenbestimmung festzustellen. Unter Berücksichtigung von Genauigkeit und Rechenaufwand ist es deshalb sinnvoll, den Überlappungsbereich an der schmalsten Stelle ungefähr auf den 3- bis 4-fachen Punktabstand einzuschränken. Im vorliegenden Beispiel entspricht dies einer Breite von ca. 40 m.

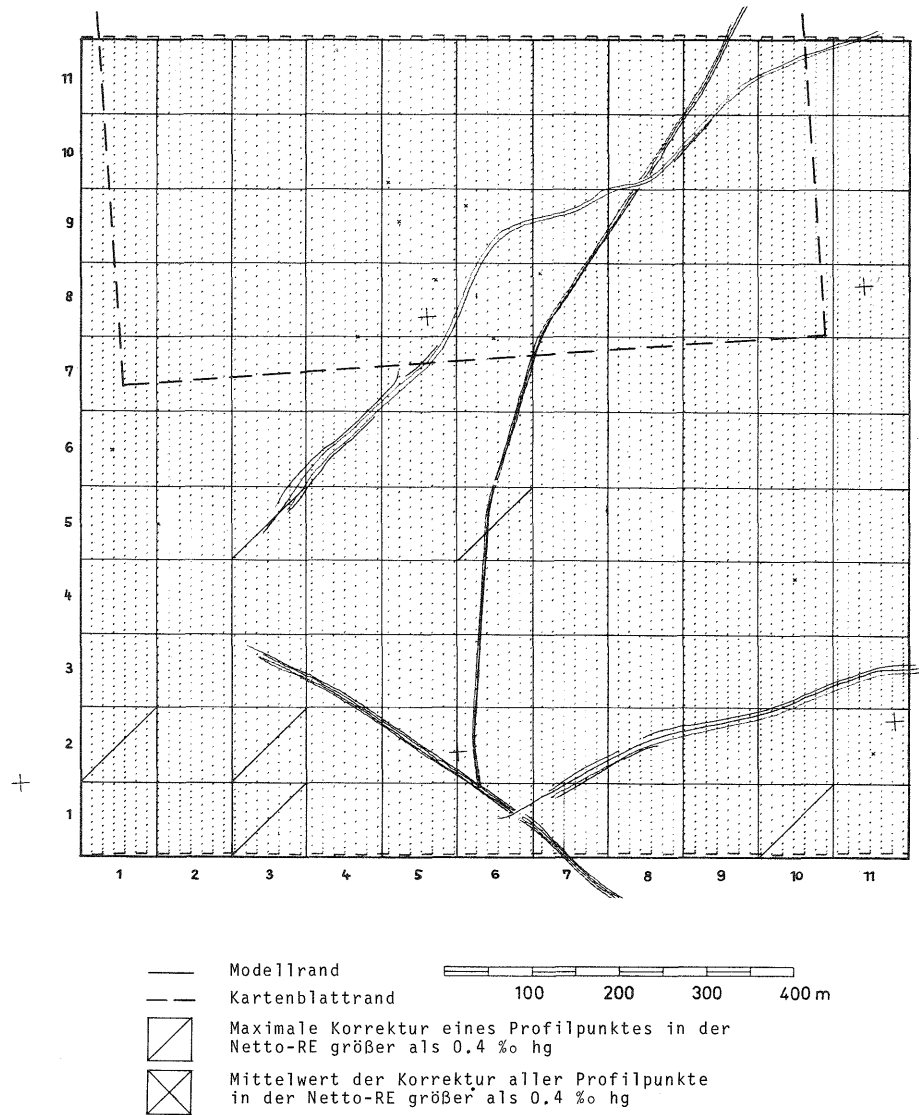


Abb. 5-6 Korrektur des systematischen Anteils des Abtastfehlers im Modell 7260728

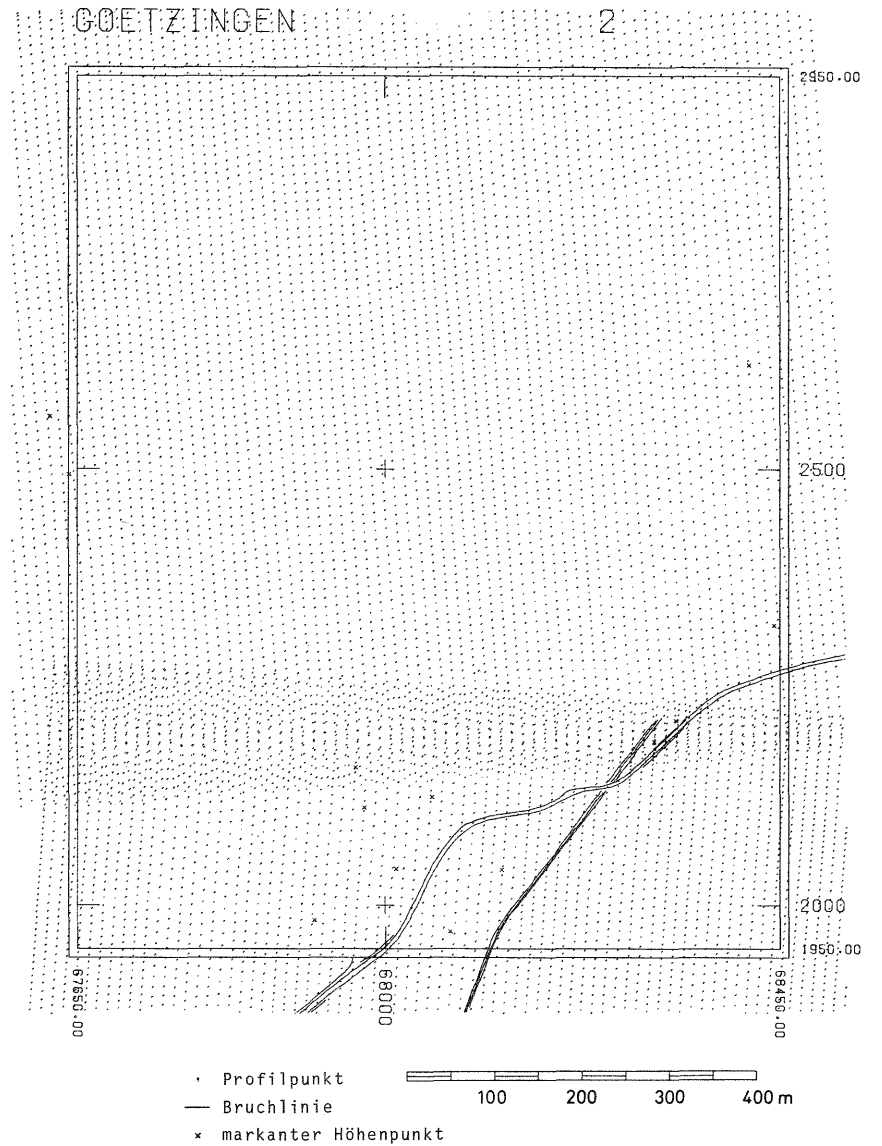


Abb. 5-7 Punktauftrag des Kartenblattes Götzingen (verkleinerter Überlappungsbereich der beiden Modelle)

feldes interpolierten Werte (KRAUS |117|). Insofern ergibt sich aus dem Vergleich der Rasterhöhen entlang der Randlinien, die in benachbarten Stützpunktfeldern interpoliert werden, ein Maß für die innere Genauigkeit der Interpolation und damit für die richtige Abgrenzung der Stützpunktfelder gegeneinander. Zu beachten ist dabei, daß sich neben der Größe des Überlappungsbereichs der Recheneinheiten auch die räumliche Lage der Trendfunktion am Rand der Recheneinheiten im Zusammenhag mit einer möglicherweise zugelassenen Filterung der Stützwerte auf die relative Höhengenaugigkeit auswirken kann.

Mit den Stützpunkten der Abbildung 5-2 und einem Überlappungsbereich der Recheneinheiten von 23.4 m ergeben sich bei verschiedenen Ausdehnungen der Recheneinheiten mittlere Höhendifferenzen entlang der Randlinien zwischen 0.014 m und 0.022 m. Die maximalen Höhenabweichungen liegen zwischen 0.5 und 0.6 m; sie sind für die vorliegenden Auswertungen nicht tragbar.

Die maximalen Höhendifferenzen treten dabei entlang von Randlinien auf, die im Überlappungsgebiet der beiden Modelle liegen. Da hier im Vergleich zu den übrigen Recheneinheiten ungefähr die doppelte Stützpunktzahl vorliegt, kann im verwendeten Rechenprogramm das fest dimensionierte Feld für die Stützpunkte einer Recheneinheit nicht alle gemessenen Punkte aufnehmen. Liegen zu viele Profilpunkte vor, so werden eng benachbarte Punkte zusammengefaßt und die Stützwerte gemittelt. Da maximal 100 Bruchlinienpunkte pro Recheneinheit abgespeichert werden können, bleiben weitere Bruchlinienpunkte bei der Interpolation der Rasterhöhen unberücksichtigt. Je nach der Stützpunktdichte und der Reihenfolge bei der Registrierung der Bruchlinien ist es somit möglich, daß in benachbarten Recheneinheiten im Überlappungsbereich der beiden Modelle unterschiedliche Stützpunkte vorliegen. Diese Inhomogenitäten im Stützpunktfeld führen zu den festgestellten Maximalabweichungen von 0.5 - 0.6 m. Auf diese Art und Weise können Rasterhöhen auch noch im Inneren der Recheneinheiten verfälscht werden.

Um sicherzustellen, daß in benachbarten Recheneinheiten dieselben Stützpunkte verwendet werden, kann folgendermaßen vorgegangen werden:

- Die Reduzierung der Anzahl der Massenpunkte im Überlappungsbereich von Modellen erfolgt in einem Zwischenprogramm und vor der Sortierung in die Recheneinheiten.
- Identische Bruch- oder Strukturlinien sind im Überlappungsbereich auf ihre Identität hin zu überprüfen und miteinander so zu verknüpfen, daß eindeutige und durchgehende Linienzüge entstehen.
- Massenpunkte dürfen bei Vorliegen von Bruchlinien nur dann gemittelt werden, wenn sie auf derselben Teilfläche liegen.

Nachdem die Programmversion von SCOP mit Berücksichtigung der Geländebruchkanten (ASSMUS |9|, |10|, |11|) für diese Beispiele noch nicht zur Verfügung stand, konnten die o.a. Vorschläge nicht verwirklicht werden. Statt dessen wird die Ausdehnung des Überlappungsbereichs auf 40 bis 160 m eingeschränkt (Abb. 5-7). Diese Anordnung der Stützpunkte wird der Interpolation des rasterförmigen digitalen Höhenmodells zugrunde gelegt.

Kartenblatt	Feldstetten	Götzingen	Ranggen
Blattausdehnung (m ²)	750x900	800x1000	2200x1400
Fläche (ha)	67.5	80	308
Anzahl der Stützpunkte			
- Massenpunkte	4 636	8 017	1 908
- Bruchlinienpunkte	461	541	366
- markante Höhenpunkte	9	11	-
Summe der Stützpunkte	5 106	8 569	2 274
Anzahl der RE	15x15	32x25	11x7
Ausdehnung der Netto-RE (m ²)	50x60	25x40	200x200
Überlappung am Rand der RE (m)	23.4	23.4	81,0
Mittlere Anzahl der Stützpunkte der Brutto-RE	71	57	76
Rasterintervall (m)	5	5	10
Anzahl der interpolierten Rasterhöhen	27 331	32 361	31 161
Überprüfen der Rasterhöhen entlang von RE-Randlinien:			
- Anzahl der überprüften Rasterhöhen	4 844	10 839	2 796
- mittlerer Fehler einer Rasterhöhe (m)	0.011	0.012	0.19
- maximaler Fehler einer Rasterhöhe (m)	0.13	0.18	1.40
Filterparameter für die Stützpunkt- gruppe der			
- Massenpunkte (m)	0.04	0.04	0.20
- Bruchlinienpunkte (m)	0.03	0.03	0.15
- markanten Höhenpunkte (m)	0.02	0.02	0.10
Filterbeträge der Stützwerte der			
- Massenpunkte			
Anzahl	4 365	6 844	1 488
mittlerer Filterbetrag (m)	0.04	0.04	0.10
maximaler Filterbetrag (m)	0.65	0.44	2.95
- Bruchlinienpunkte			
Anzahl	411	458	307
mittlerer Filterbetrag (m)	0.07	0.08	0.11
maximaler Filterbetrag (m)	0.38	0.24	1.65
- markanten Höhenpunkte			
Anzahl	9	11	-
mittlerer Filterbetrag (m)	0.01	0.04	-
maximaler Filterbetrag (m)	0.03	0.09	-

Tab. 5-3 Berechnung eines rasterförmigen digitalen Höhenmodells

Die Interpolation der Rasterhöhen in Recheneinheiten bietet im Programm SCOP die Möglichkeit, ein Maß für die innere Genauigkeit der Interpolation anzugeben. Dazu werden die Rasterhöhen entlang der Randlinien zwischen zwei benachbarten Recheneinheiten, die in beiden Recheneinheiten interpoliert werden, miteinander verglichen. Neben dem quadratischen Mittelwert der Höhendifferenzen in sämtlichen Rasterpunkten entlang von Randlinien wird auch die maximale Höhendifferenz bestimmt.

Im Vergleich zu Rasterpunkten im Inneren der Recheneinheit weisen Rasterpunkte entlang der Randlinien eine Randlage in bezug auf das Stützpunktfeld auf. Normalerweise besitzen Werte, die am Rand eines Stützpunktfeldes interpoliert werden, einen größeren mittleren Schätzfehler als die im Inneren des Stützpunkt-

5.4.2 Wahl des Rasterintervalls und der Größe der Recheneinheiten

Für die Beispiele Feldstetten und Götzingen wird ein Rasterintervall von 5 m gewählt, was im Kartenmaßstab 1:2500 einem Abstand von 2 mm entspricht. Das Verhältnis der Anzahl der Stützpunkte / Anzahl der interpolierten Rasterpunkte liegt ungefähr bei 1/5 bis 1/4.

Im Kartenblatt Feldstetten besitzt die Netto-Recheneinheit eine Ausdehnung von $50 \times 60 \text{ m}^2$ mit einem 23.4 m breiten Überlappungsbereich. In der Brutto-Recheneinheit liegen im Mittel 71 Stützpunkte. Beim Beispiel Götzingen überdecken die Recheneinheiten eine Fläche von $25 \times 40 \text{ m}^2$. Bei einem Überlappungsbereich von 23.4 m liegen im Durchschnitt 57 Stützpunkte in einer Brutto-Recheneinheit.

Um im Beispiel Ranggen mit seinem ausgesprochenen Schichtstufenaufbau (Abb. 5-13) und den ausgeprägten Geländekanten (Abb. 5-3) diese mit der verfügbaren Programmversion möglichst gut herauszuarbeiten, wird hier ein 10 m Raster gerechnet, was im Kartenmaßstab 1:10 000 1 mm entspricht. Selbstverständlich kann hier auf ein Rasterintervall von 20 m übergegangen werden, sobald die Programmversion mit strenger Berücksichtigung der Bruchkanten bei der Berechnung des digitalen Höhenmodells zur Verfügung steht. Das Verhältnis der Anzahl der Stützpunkte / Anzahl der interpolierten Rasterpunkte liegt hier aufgrund des verkleinerten Rasterintervalls ungefähr bei 1/17. Die Größe der Netto-Recheneinheit beträgt $200 \times 200 \text{ m}^2$. In der Brutto-Recheneinheit liegen durchschnittlich 76 Stützpunkte.

5.4.3 Filterparameter und Filterbeträge

Zur Interpolation der Rasterhöhen mittels Prädiktionsfilterung werden für die drei Stützpunktgruppen der Massenpunkte, der Bruch- und Strukturlinienpunkte und der markanten Höhenpunkte getrennte Filterparameter eingegeben. Sie stellen den zufälligen Anteil der Stützwerte dar. Diese zufällige Komponente der Stützwerte ermöglicht es, in jeder Recheneinheit für jede Punktgruppe die Kovarianz für die Entfernung Null in bezug zur Varianz V festzulegen. In allen drei Beispielen werden folgende Werte als zufällige Komponente der Stützwerte angesetzt (Tabelle 5-3):

- Massenpunkte	0.033 ‰·Flughöhe hg
- Bruch- und Strukturlinienpunkte	0.025 ‰·hg
- markante Höhenpunkte	0.016 ‰·hg

Diese Abstufung ist dadurch gerechtfertigt, daß die erreichbare Höhengenaugkeit beim profilweisen Modellabtasten durch die minimale Fahrgeschwindigkeit begrenzt ist und somit nicht dieselbe Genauigkeit wie bei der Messung von Punkten entlang charakteristischer Geländelinien oder von Einzelpunkten zu erwarten ist. Weichen direkt benachbarte Stützpunkte, die verschiedenen Punktgruppen angehören, in der Höhe voneinander ab, so kann in dem Stützpunkt, dessen Gruppe einen größeren Filterparameter besitzt, ein größerer Teil des Stützwertes als zufälliger Anteil interpretiert werden im Vergleich zum benachbarten Stützpunkt. Der erste Stützwert kann also stärker gefiltert werden.

Die tatsächliche Auswirkung der Filterparameter auf die einzelnen Stützwerte spiegelt sich in deren Filterbeträgen wider. In Tabelle 5-3 sind für jede der drei Stützpunktgruppen der quadratische Mittelwert der Filterbeträge sämtlicher Stützwerte der Gruppe und der maximale Filterbetrag angegeben.

Für die Stützpunktgruppe der Massenpunkte stimmt bei den Beispielen Feldstetten und Götzingen der mittlere Filterbetrag mit 0.04 m genau mit dem Filterparameter für diese Stützpunktgruppe überein. Im Beispiel Ranggen werden bei den Massenpunkten im Mittel nur 0.10 m gefiltert, obwohl der entsprechende Filterparameter für diese Stützpunktgruppe mit 0.20 m vorgegeben ist. Der Maximalwert des Filterbetrages schwankt bei den drei Beispielen zwischen dem 11-fachen und dem 30-fachen des mittleren Filterbetrages.

In den Bruchlinienpunkten der Beispiele Feldstetten und Götzingen wird mit 0.07 m bzw. 0.08 m im Mittel ein deutlich größerer Betrag gefiltert als in den Massenpunkten und als vom vorgegebenen Filterparameter mit 0.03 m her zu erwarten war. Beim Beispiel Ranggen liegt der mittlere Filterbetrag für die Bruchlinienpunkte mit 0.11 m knapp über demjenigen der Massenpunkte, aber noch unter dem vorgegebenen Filterparameter von 0.15 m. Der maximale Filterbetrag schwankt zwischen dem 3-fachen und dem 15-fachen des mittleren Filterbetrages. Der Hauptgrund für die überraschend hohen Filterbeträge in den Stützwerten der Bruchlinienpunkte dürfte darin zu sehen sein, daß bei der verwendeten Programmversion von SCOP die Geländebruchkanten als Schnittlinien benachbarter Flächen unterschiedlicher Neigung bei der Bestimmung der Korrelation unberücksichtigt bleiben. Dies bedeutet, daß Profilpunkte auf verschiedenen Seiten einer Geländekante als korreliert behandelt werden. Als Ergebnis dieser Vernachlässigung wird das Gelände im Bereich der Bruchkanten ausgerundet, auch wenn die Verwendung einer Geraden als Kovarianzfunktion im Prinzip ein Abknicken im Stützpunkt erlaubt.

Der mittlere Filterbetrag für die markanten Höhenpunkte der Beispiele Feldstetten und Götzingen liegt zwischen 0.01 m und 0.04 m und schwankt um den Filterparameter von 0.02 m. Der maximale Filterbetrag ist auf den 3-fachen mittleren Filterbetrag beschränkt. Da insgesamt lediglich 20 markante Höhenpunkte vorliegen, müssen diese Werte jedoch nicht charakteristisch sein.

Entscheidenden Einfluß auf die Größe der Filterbeträge besitzen die Verteilung der Stützpunkte, die Wahl der Trendfläche in der Recheneinheit und die Wahl und Bestimmung der Kovarianzfunktion. Die Stützpunkte sind bei allen drei Beispielen sehr regelmäßig verteilt und in vergleichbarer Dichte erfaßt. Als Trendfläche wird ebenfalls bei allen Beispielen eine hyperbolische Paraboloidfläche verwendet. Die Varianz der zentrierten Stützwerte einer Recheneinheit beträgt bei den Beispielen Feldstetten und Götzingen im Mittel etwa 0,06 m, im Beispiel Ranggen jedoch ca. 90 m.

Unterschiede treten auch in der Wahl der Kovarianzfunktion auf. In den Beispielen Feldstetten und Götzingen wird in der Mehrzahl der Recheneinheiten eine Glockenkurve verwandt und nur in den Recheneinheiten mit Bruchlinienpunkten eine Gerade. Bedingt durch die ausgedehnten Bruchkanten und starken Änderungen in der Oberflächenkrümmung wird im Beispiel Ranggen fast ausschließlich die

Gerade als Kovarianzfunktion verwendet. Da bei der Verwendung einer Geraden als Kovarianzfunktion die interpolierte Oberfläche in jedem Stützpunkt abknicken kann, wird etwas weniger gefiltert. Dies ist mit ein Grund für die vergleichsweise geringen Filterbeträge dieses Beispiels.

5.4.4 Überprüfen der Rasterhöhen entlang der Randlinien von Recheneinheiten

Die Anzahl der Rasterhöhen, die auf Randlinien von Recheneinheiten liegen und in zwei oder vier benachbarten Recheneinheiten interpoliert werden, liegt zwischen 2 800 (Ranggen) und 10 800 (Götzingen). Für die Beispiele Feldstetten und Götzingen beträgt die mittlere Höhendifferenz einer mehrfach bestimmten Rasterhöhe entlang einer Randlinie 0.011 - 0.012 m (Tabelle 5-3). Die maximale Höhendifferenz steigt für Feldstetten auf 0.13 m und für Götzingen auf 0.18 m an. Vermutlich hängen die größeren Differenzen im Beispiel Götzingen mit den ausgeprägten Geländebruchkanten zusammen. Im Beispiel Ranggen beträgt die mittlere Höhendifferenz 0.19 m bei einem Maximalwert von 1.40 m.

Auf diese Höhendifferenzen wirken sich in erster Linie die Größe des Überlappungsbereichs der Recheneinheiten und der Verlauf der Trendfläche am Rand der Recheneinheiten im Zusammenwirken mit den Filterparametern aus. So muß insbesondere in stark bewegtem Gelände bei größeren Filterparametern mit zunehmenden Höhendifferenzen in den Rasterpunkten der Randlinien gerechnet werden, da identische Stützwerte in benachbarten Recheneinheiten je nach Lage der Trendfläche verschieden gefiltert werden können. Diese Höhendifferenzen können z.B. dadurch verringert werden, daß als Trendfunktion Flächen verwendet werden, die im Bereich der Randlinien der Recheneinheiten stetig ineinander übergehen.

Relativ zur Flughöhe liegen die maximalen Differenzen im Bereich von 0.1 - 0.2 ‰·hg und sind somit im Vergleich zur Meßgenauigkeit bei der Datenerfassung tragbar. Nach strenger Berücksichtigung der Geländekanten bei der Höheninterpolation müßten sie noch geringer ausfallen.

5.5 Meß- und Rechenaufwand zur Erstellung des digitalen Höhenmodells

Zur Abschätzung der Kosten für die Erstellung des digitalen Höhenmodells wird angenommen, daß der Bildflug vorliegt und die terrestrischen Koordinaten der Paßpunkte gegeben sind. Der Gesamtaufwand zur Erstellung eines rasterförmigen Höhenmodells setzt sich dann aus folgenden Einzelarbeiten zusammen:

- Genäherte absolute Modellorientierung am Auswertegerät,
- Digitalisierung der Modelle,
- Vorbereitung des Rechenlaufs,
- Durchführung des Rechenlaufs und
- Beurteilung des Rechenlaufs, u.U. eine Wiederholung.

Für die Modelle 82158216, 7050707 und 7260728 wurde der Zeitaufwand für die genäherte absolute Modellorientierung und für die Erfassung der Bruchlinien geschätzt (Tabelle 5-4), während derjenige für das Profilieren gemessen wurde. Für das Modell 1196 wurde ein pauschaler Zeitaufwand von ca. 6 h für die absolute Modellorientierung und die Digitalisierung angegeben.

Kartenblatt Kartenmaßstab Rasterintervall (m)	Feldstetten 1:2500 5		Götzingen 1:2500 5				Ranggen 1:10 000 10	
Modell	82158216		7050707		726078		1196	
	Zeit	Kosten	Zeit	Kosten	Zeit	Kosten	Zeit	Kosten
<u>Aufwand zur Digitalisierung</u>								
Absolute Modellorientierung (h)	0:45		0:45		0:45		} 6:00	
Profilieren (h)	1:00		1:10		1:10			
Digitalisieren der Bruchlinien (h)	1:00		0:30		1:30			
Summe Digitalisierung	2:45	154 DM	2:25	135 DM	3:25	190 DM	6:00	336 DM
<u>Rechenaufwand zur Interpolation des DHM</u>								
Korrektur des Abtastfehlers								
- CPU (sec)	99		111		112		21	
- IO (sec)	33		36		49		17	
- SS (sec)	110		124		130		27	
Interpolation des DHM								
- CPU (sec)	149		276				106	
- IO (sec)	22		43				19	
- SS (sec)	158		289				112	
Summe Rechenaufwand	268	389 DM	543	787 DM			139	202 DM
<u>Aufwand zur Vorbereitung und</u>								
<u>Überprüfung der Rechenläufe (h)</u>								
	1:30	54 DM	2:30	90 DM			1:30	54 DM
Zwischensumme der Kosten		597 DM		1202 DM				592 DM
Zuschlag für Wiederholungslauf (ca. 50 % des Rechenaufwandes)		203 DM		398 DM				108 DM
<u>Gesamtsumme der Kosten ca.</u>		800 DM		1600 DM				700 DM
Gesamtkosten pro ha bearbeitete Fläche ca.		12 DM		20 DM				2.3 DM

Tab. 5-4 Meß- und Rechenaufwand zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells

Die Rechenzeiten des Programms SCOP beziehen sich auf die Rechenanlage CDC 6600 des Regionalen Rechenzentrums der Universität Stuttgart. Die Rechenzeiten werden dabei nach

- Zentralrechner - Sekunden (CPU)
- Input - Output - Sekunden (IO)
- System - Sekunden (SS)

aufgeteilt. Während die CPU-Zeit voll in die SS-Zeit eingeht, wird die IO-Zeit entsprechend dem Verhältnis des vom jeweiligen Programm verwendeten Kernspeicherplatzes / gesamten verfügbaren Kernspeicherplatz der Rechenanlage angerechnet. Eine Möglichkeit, die Rechenzeit zur Interpolation des rasterförmigen digitalen Höhenmodells für die drei Beispiele miteinander zu vergleichen, ergibt sich, wenn wir die Rechenzeit pro interpolierten Rasterpunkt berechnen. Aus Tabelle 5-5 geht hervor, daß die Rechenzeit pro interpoliertem Rasterpunkt entscheidend vom Verhältnis der Anzahl der Stützpunkte / Anzahl der interpolierten Rasterpunkte abhängt. Zur hohen Rechenzeit im Kartenblatt Götzingen von 0.017 SS/Rasterpunkt ist zu ergänzen, daß sie zum einen durch die Korrektur des Abtastfehlers in zwei Modellen bedingt ist, deren Punkte nur zu ca. 2/3 im Kartenblatt liegen, zum anderen durch eine recht hohe Stützpunktdichte im Vergleich zum Rasterintervall.

Kartenblatt	Feldstetten	Götzingen	Ranggen
Rechenzeit (SS) pro Rasterpunkt des DHM			
- mit Korrektur des Abtastfehlers	0.010	0.017	0.005
- ohne Korrektur des Abtastfehlers	0.006	0.010	0.004
Verhältnis der Anzahl der Stützpunkte / Anzahl der Rasterpunkte	1/5.4	1/3.8	1/13.7

Tab. 5-5 Rechenzeit pro interpolierter Rasterpunkt des digitalen Höhenmodells

Geht man davon aus, daß das Rasterintervall ungefähr $1/3$ des mittleren Punktabstandes beträgt, so ergibt sich ein Punktverhältnis Anzahl der Stützpunkte / Anzahl der Rasterpunkte von $1/9$. Bei einer mittleren Stützpunktzahl von 70 Punkten pro Recheneinheit kann von einer Rechenzeit von ca. 0.008 SS/Rasterpunkt ausgegangen werden, falls der Abtastfehler zu eliminieren ist. Ohne diese Korrektur ermäßigt sich die Rechenzeit auf ca. 0.005 SS/Rasterpunkt.

Durch einen Vergleichslauf wird am Beispiel Ranggen ermittelt, wie sich ein verändertes Rasterintervall bei gleichbleibender Größe der Recheneinheiten auf die Rechenzeit auswirkt. Eine Verdoppelung des Rasterintervalls ergibt im 3. Programmteil von SCOP, in dem die Prädiktion der Rasterhöhen durchgeführt wird, eine Verringerung der CPU-Zeit um ca. 50 % und umgerechnet auf den gesamten Rechenlauf von ca. 40 % der Rechenzeit.

Zum Vergleich der anfallenden Kosten mit denjenigen anderer Verfahren wird der Aufwand zu Berechnung des digitalen Höhenmodells näherungsweise in die dadurch anfallenden Kosten umgerechnet. Nach den Sätzen der AdV (Stand: 1976) werden dabei für die photogrammetrische Auswertung für einen Ingenieur mit Auswertegerät 56 DM/h und zur Vorbereitung und Überprüfung der Rechenläufe für einen Ingenieur 36 DM/h verrechnet. Zur Umrechnung der Rechenzeit verwenden wir den Satz der Firma Control Data GmbH, der für die Cyber 175, eine im Vergleich zur CDC 6600 etwas schnellere Rechenanlage, bei mittlerer Wartezeit zwischen 1.25 DM/SS und 1.45 DM/SS liegt (Stand: 1976), Angesetzt wird der zweite, höhere Betrag.

Nicht enthalten in den Rechenkosten sind Kosten für das Auflegen für Magnetbänder, Input-Output u.a. Vorgesehen ist jedoch ein Wiederholungslauf für die Berechnungen. Während die geringen Rechenzeiten bei der Wiederholung der absoluten Modellorientierung mit ca. 10 - 15 SS pro Modell nicht ins Gewicht fallen, sind Wiederholungsläufe zur Korrektur des Abtastfehlers oder der Interpolation der Rasterhöhen recht aufwendig. Im augenblicklichen Versuchsstadium ist in mehr als der Hälfte aller Fälle ein zweiter Rechenlauf erforderlich. Durch eine standardisierte Datenerfassung, wie sie für eine routinemäßige Produktion erforderlich ist, kann diese Zahl in Zukunft sicher gesenkt werden. Für die vorliegenden Beispiele schlagen wir für Wiederholungsläufe 50 % der gesamten Rechenkosten zu den Gesamtkosten hinzu.

Im Vergleich zum Kartenblatt Feldstetten mit Gesamtkosten von ca. 800 DM bis zur Berechnung des rasterförmigen digitalen Höhenmodells ergibt sich für das Kartenblatt Götzingen mit ca. 1600 DM der doppelte Betrag. Wie bereits erwähnt, hängt dies damit zusammen, daß das Kartenblatt Götzingen von zwei Modellen überdeckt wird, wobei ca. 1/3 der Modellpunkte außerhalb des Kartenblatts liegen, aber an der modellweisen Korrektur des Abtastfehlers teilnehmen; zudem sind in diesen beiden Modellen die Punktabstände im Profil geringer. Nicht zuletzt überdeckt das Kartenblatt Götzingen (80 ha) gegenüber dem Kartenblatt Feldstetten (67.5 ha) eine um 18 % größere Fläche. Bezogen auf 1 ha bearbeitete Fläche liegen die Gesamtkosten zwischen 12 DM und 20 DM.

Das Kartenblatt Ranggen (308 ha) weist mit Gesamtkosten von ca. 700 DM im Vergleich zum Kartenblatt Feldstetten ungefähr die doppelten Kosten für die Digitalisierung auf, jedoch betragen die Rechenkosten dank der geringeren Stützpunktzahl hier nur die Hälfte. Die Gesamtkosten betragen hier nur ca. 2.30 DM/ha bearbeitete Fläche.

5.6 Ableitung von Höhenlinien

Ausgehend von digitalen Höhenmodellen, die mit der vorläufigen Programmversion von SCOP ohne strenge Berücksichtigung von Bruchkanten erzeugt wurden, werden mit dem Isolinenprogramm von SCOP Höhenlinien rechnerisch abgeleitet. Da in diesen Höhenmodellen nur die Rasterhöhen, nicht jedoch die Bruchkantenpunkte abgespeichert sind, kann der Verlauf von Bruchkanten im Höhenlinienbild nur in dem Umfang wiedergegeben werden, wie er unmittelbar aus den Rasterhöhen hervorgeht. An Bruchkanten abknickende Höhenlinien werden deshalb, in Abhängigkeit vom Rasterintervall, mehr oder weniger stark ausgerundet.

Die automatisch abgeleiteten Höhenlinien der Beispiele Feldstetten und Götzingen sind mit einer Äquidistanz von 2.5 m in den Abbildungen 5-8 und 5-11 dargestellt. Im Beispiel Ranggen (Abb. 5-13) beträgt die Äquidistanz 10 m. Eine Zusammenstellung der Rechenzeiten und der bei der Ableitung der Höhenlinien entstehenden Kosten enthält Tabelle 5-6. Die Kosten für den Zeichenautomaten Coragraph DC 2 sind dabei mit 100 DM/h (Stand: 1976) angesetzt.

Im Vergleich zur rechnerischen Ableitung von Höhenlinien benötigen beim Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg zwei Auswerter mit einem photogrammetrischen Analogauswertegerät im Mittel rd. 8 Stunden für die direkte photogrammetrische Höhenlinienkartierung eines Stereomodells. Dabei wechseln sich die beiden Auswerter am Auswertegerät und beim Gravieren der Schichtlinien ab. Die Kosten der Analogauswertung betragen hier ca. 5.30 DM/ha bearbeitete Fläche. Sie liegen damit um rd. 70 Prozent über den Kosten der automatischen Ableitung von Höhenlinien aus dem digitalen Höhenmodell (wobei vorausgesetzt wird, daß ein digitales Höhenmodell vorliegt).

Die Auszeichnung der rechnerisch abgeleiteten Höhenlinien der drei Kartenblätter erfolgt

- online am Calcomp-960-Plotter des Rechenzentrums der Universität Stuttgart als Testzeichnung mit Kugelschreiber und
- offline am Coragraph DC 2 mit dem Zeichentisch 1700 der Firma Contraves AG als Gravur.

Kartenblatt Kartenmaßstab	Feldstetten 1:2500		Götzingen 1:2500		Ranggen 1:10 000	
Rasterintervall (m)	5		5		10	
Anzahl der interpol. Isolinienpunkte	5175		6067		12 752	
Rechenzeit						
- CPU (sec)	16		19		14	
- IO (sec)	79		75		69	
- SS (sec)	31	45 DM	33	48 DM	28	41 DM
Jobvorbereitung (h)	0:15	9 DM	0:15	9 DM	0:15	9 DM
Zeichenzeit (h) im Maßstab	1:5000		1:5000		1:10 000	
- Calcomp 960 Plotter	0:03		0:03,5		0:07	
- Coragraph DC 2	1:10	117 DM	1:23	138 DM	1:45	175 DM
<u>Gesamtkosten</u>		171 DM		195 DM		225 DM
Gesamtkosten pro ha bear- beitete Fläche (im Karten- maßstab) ca.		3.10 DM		3.00 DM		0.70 DM

Tab. 5-6 Rechen- und Zeichenaufwand zur automatischen Ableitung von Höhenlinien aus dem digitalen Höhenmodell

Die folgenden Abbildungen geben die Auszeichnungen am Contraves Zeichentisch wieder, dessen Zeichengenauigkeit höher ist. Zudem erlaubt seine Zeichensoftware eine Verbindung der einzelnen Höhenlinienpunkte durch eine spline-Funktion.

Die Angabe der Zeichenzeiten der Tabellen 5-6 und 5-7 beziehen sich für die Beispiele Feldstetten und Götzingen auf den Zeichenmaßstab 1:5000. Für den Kartenmaßstab 1:2500 sind sie ungefähr um 30 Prozent zu erhöhen.

Ein visueller Vergleich der aus dem digitalen Höhenmodell automatisch abgeleiteten Höhenlinien des Beispiels Götzingen (Abb. 5-11) mit der direkten photogrammetrischen Höhenlinienkartierung (Abb. 5-12) zeigt mit Ausnahme des Waldgebietes eine gute Übereinstimmung der Höhenlinien. Dabei ist zu beachten, daß in der direkten photogrammetrischen Höhenlinienkartierung die Äquidistanz von 2.5 m teilweise durch ein 1 m - Intervall ersetzt wurde.

Wenn auch in den vorliegenden Beispielen keine Genauigkeitsuntersuchungen zur Höhenlinieninterpolation durchgeführt wurden, kann aufgrund der Ergebnisse anderer Untersuchungen (Adv |8|, HEEGE und RIEGER |80|, MASSA und WAIZENEGGER |143|, SCHILCHER |177|, STANGER |198|) davon ausgegangen werden, daß die geometrische Genauigkeit der automatischen Höhenlinieninterpolation die amtlichen Fehlergrenzen in jedem Fall einhält. Bei einem Genauigkeitsvergleich für das Internationale Orthophoto Experiment 1972-76 (BLACHUT, v. WIJK |22|) wurde ein photogrammetrisches Modell (Bildmaßstab 1:10 000) zweimal am Wild A8 im Modellmaßstab 1:5000 profilweise digitalisiert. Die automatische Ableitung von Höhenlinien erfolgte u.a. mit der vorläufigen Version des Programms SCOP. In der Höhenlinienkarte im Maßstab 1:2500 wurde der mittlere Höhenfehler m_z über Einzelpunkte auf den Höhenlinien bestimmt. In Abhängigkeit von der Geländeneigung α liegt er für die aus den beiden Digitalisierungen abgeleiteten Höhenlinienkarten bei $m_z = \pm (0.25 + 1.0 \tan \alpha)$ m bzw. $m_z = \pm (0.15 + 1.6 \tan \alpha)$ m.

FELDS TETTEN

1

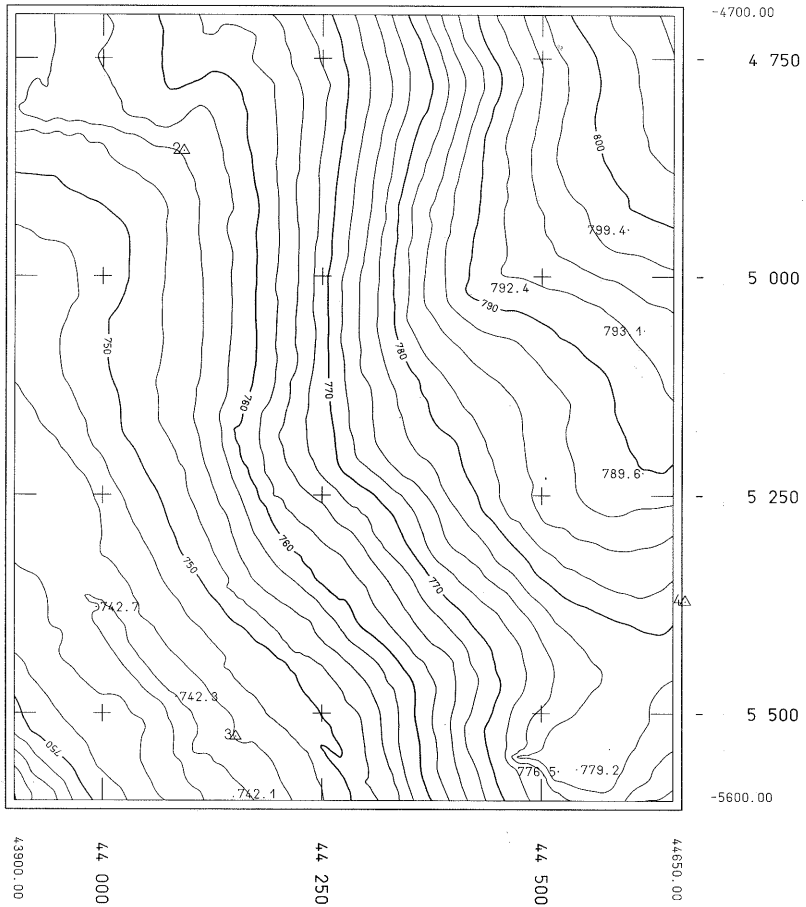


Abb. 5-8 Automatisch abgeleitete Höhenlinien des Kartenblattes Feldstetten

FELDS TETTEN

1

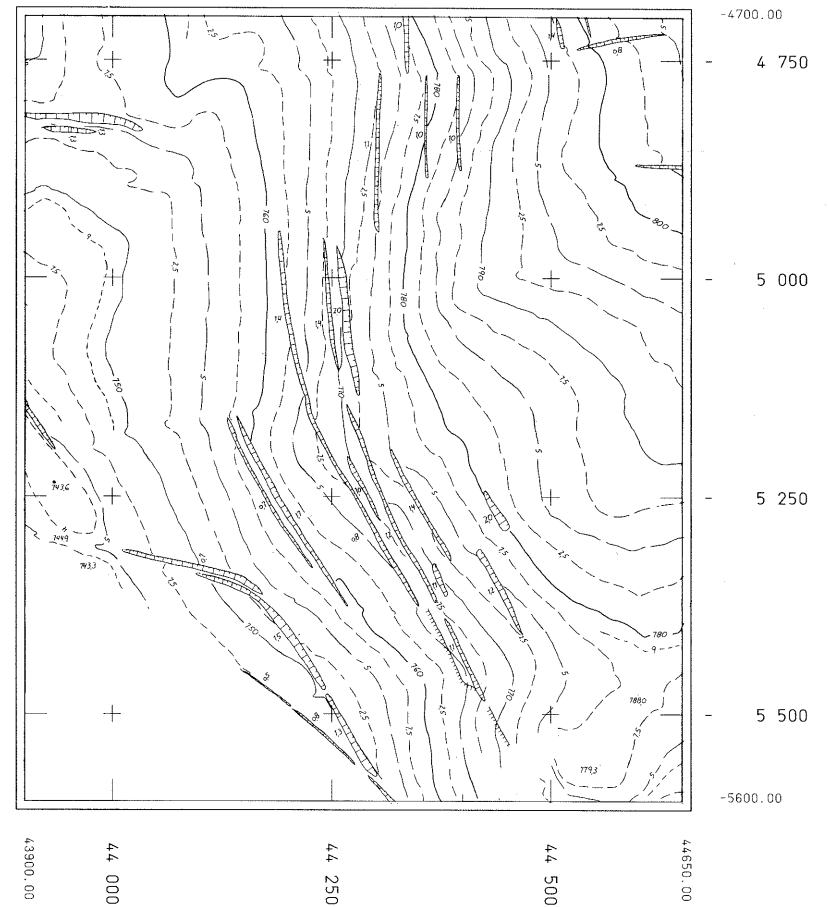


Abb. 5-9 Direkte photogrammetrische Höhenlinienkartierung des Kartenblattes Feldstetten

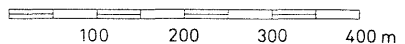
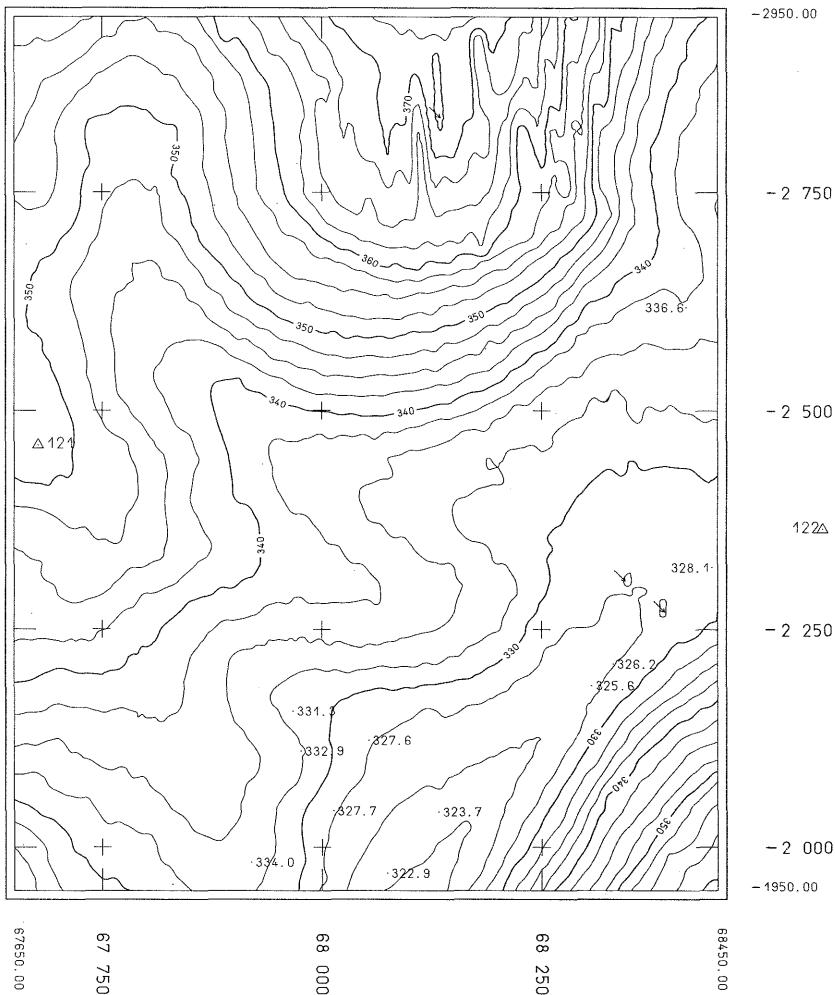


Abb. 5-10 Automatisch abgeleitete Höhenlinien des Kartenblattes Götzingen - ohne Korrektur des Abtastfehlers

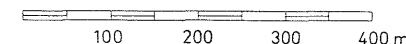
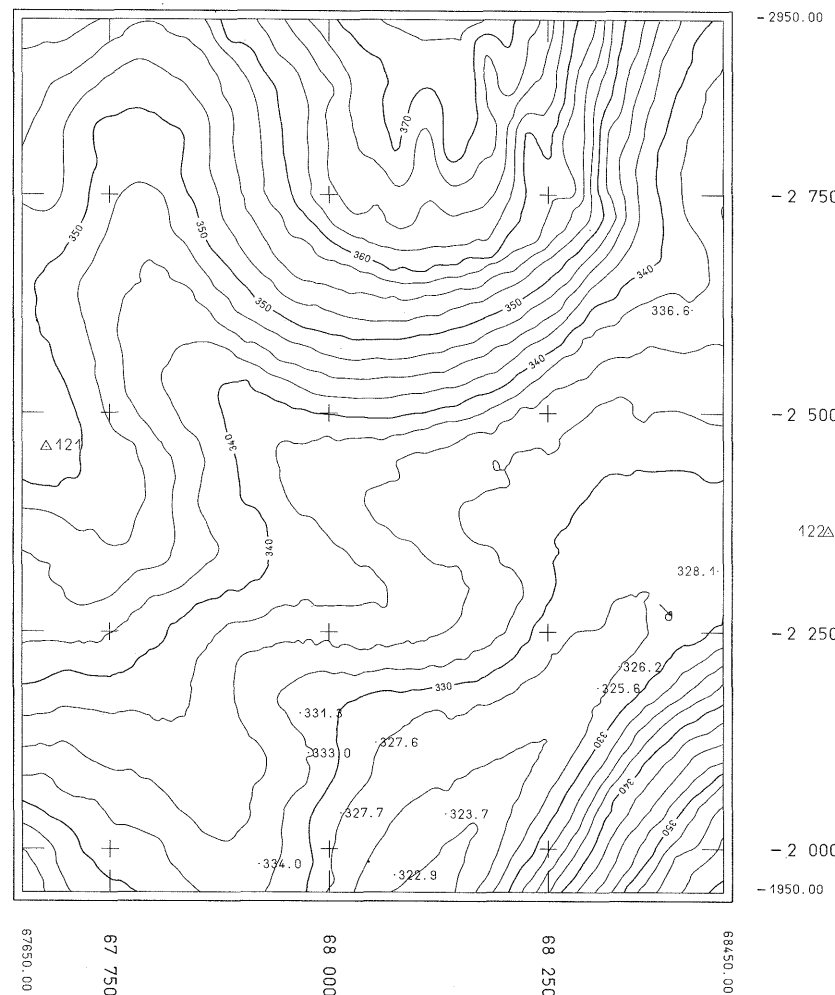
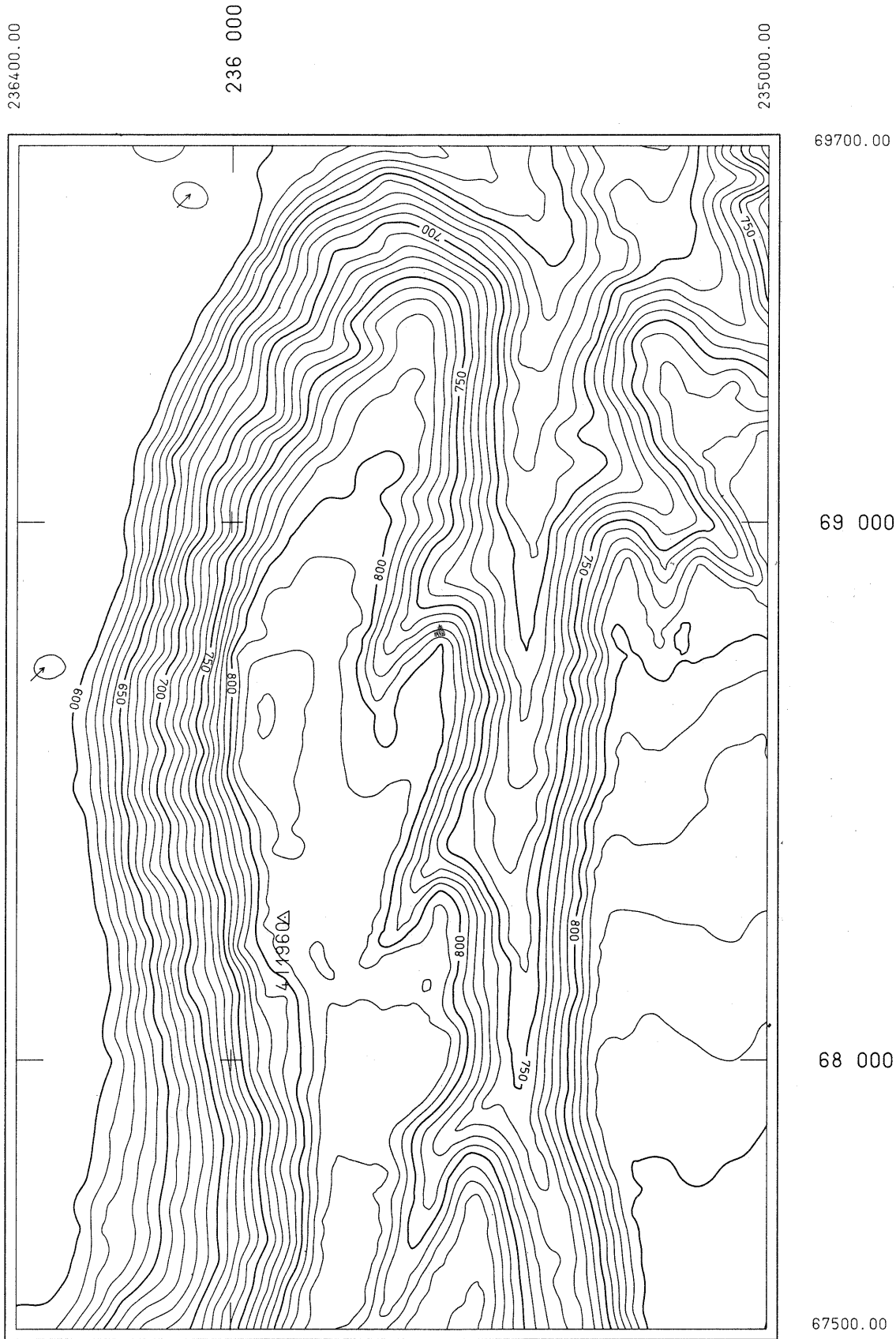


Abb. 5-11 Automatisch abgeleitete Höhenlinien des Kartenblattes Götzingen - mit Korrektur des Abtastfehlers

RANGGEN

2



100 200 300 400 m

Abb. 5-13 Automatisch abgeleitete Höhenlinien des Kartenblattes Ranggen

Im Vergleich dazu beträgt der zulässige mittlere Höhenfehler nach der amtlichen Fehlergrenze für die württembergische Höhenflurkarte im Maßstab 1:2500 für die Feldlage $m_z = \pm (0.3 + 4 \tan\alpha)$ m und für die Waldlage $m_z = \pm (0.4 + 5 \tan\alpha)$ m.

Die morphologische Richtigkeit bzw. Aussagekraft der mit der vorläufigen Version von SCOP automatisch abgeleiteten Höhenlinien kann in kontinuierlich verlaufenden Gelände als zufriedenstellend bezeichnet werden. Im Bereich von Geländebruchkanten sind jedoch noch Mängel vorhanden. Diese werden durch die Bruchkantenversion des Programms SCOP sicherlich weitgehend behoben werden (AdV |8|, ASSMUS |9|, |10|, |11|).

5.7 Ableitung des digitalen Neigungsmodells und von Gefällstufen- und Expositionskarten

Für das Beispiel Götzingen wird aus dem digitalen Höhenmodell mit der Rasterweite 5 m nach den Gleichungen (4.4) und (4.6) ein digitales Neigungsmodell mit demselben Rasterintervall abgeleitet. Die aus diesem Neigungsmodell abgeleitete Gefällstufenkarte zeigt Abbildung 5-16. Die Informationsdichte der dargestellten Isolinien ist verwirrend und für Zwecke der Flurbereinigung zu groß. Linienzüge, die sich unruhig hin- und herschlängeln, sind dabei ebenso wenig erwünscht wie eine Vielzahl kleiner geschlossener Isolinien.

Programmtechnisch kann eine Unterdrückung kleiner geschlossener Isolinien dadurch erreicht werden, daß deren eingeschlossene Fläche bestimmt und mit einer vorgegebenen Flächenschranke verglichen wird. Wird die Flächenschranke unterschritten, so wird diese Isolinie beim Auszeichnen unterdrückt.

Eine generelle Glättung der Linienzüge kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden, z.B. durch

- eine linienweise Glättung mittels gleitender Mittelwertbildung (GOTTSCHALK |66|),
- die Berechnung eines geglätteten digitalen Höhenmodells z.B. mit Hilfe der Prädiktionsfilterung, wobei die zufällige Komponente der Stützwerte größer angesetzt wird, was zu einer stärkeren Filterung führt, oder durch eine qualifizierte Verminderung der Ausgangsinformation (GOTTSCHALK |65|),
- eine Vergrößerung des Rasterintervalls bei der Berechnung des digitalen Neigungsmodells um ein ganzzahliges Vielfaches n ; nur jede n -te Rasterhöhe des digitalen Höhenmodells wird herangezogen,
- eine Vergrößerung des Rasterintervalls bei der Berechnung des digitalen Neigungsmodells um ein ganzzahliges Vielfaches n ; jede n -te Rasterhöhe des Höhenmodells wird als Mittelwert aus den unmittelbar benachbarten, übersprungenen Rasterhöhen und der n -ten Rasterhöhe selbst neu bestimmt.

Bei einer linienweisen Glättung besteht bei den vielen Kleinformen der interpolierten Linienzüge die Gefahr, daß die Nachbarschaftstreue bei stärker geglätteten, eng benachbarten Linien nicht ausreichend erhalten bleibt und Isolinien sich u.U. berühren oder schneiden können. Das Glättungsverfahren selbst stellt einen zusätzlichen Rechenlauf nach der Interpolation der Isolinien dar.

Die Berechnung eines stärker geglätteten digitalen Höhenmodells erfordert eine Wiederholung der rechenintensiven Prädiktionsfilterung zur Interpolation der Rasterhöhen. Aufgrund dieses einmal investierten hohen Rechenaufwands müßte geprüft werden, ob das geglättete Höhenmodell für andere Anwendungsbereiche nicht zusätzlich abgespeichert werden sollte. Der hohe Rechenaufwand und der gegebenenfalls erforderliche zusätzliche Speicherplatz sprechen gegen diesen Vorschlag.

Das ohne Zweifel einfachste Vorgehen ergibt sich aus dem dritten Vorschlag, nämlich nur jeden n-ten Rasterpunkt des digitalen Höhenmodells zur Berechnung des Neigungsmodells heranzuziehen, wobei sich das Rasterintervall des Neigungsmodells dadurch um den Faktor n vergrößert. Da sich entsprechend die Anzahl der Rasterpunkte des digitalen Neigungsmodells um den Faktor n^2 verringert, geht der Rechenaufwand hier wie auch bei der Ableitung von Isolinen aus dem Neigungsmodell spürbar zurück. Während bei glatten Oberflächen der Grad der Glättung mit einem größer werdenden Faktor n zunimmt, können bei diesem Vorschlag im Bereich von Geländekanten störende Verfälschungen in der Geländeneigung auftreten.

Berechnen wir, entsprechend dem vierten Vorschlag, in jedem n-ten Rasterpunkt die Höhe z.B. durch eine Mittelbildung neu, in die auch die übersprungenen benachbarten Rasterhöhen eingehen, so wird dies bei stetigen und glatten Oberflächen die Glättung unterstützen. Im Bereich von Geländekanten kann es jedoch diese einebnen bzw. zu mehr oder weniger verfälschten Höhen führen. Der letzte Vorschlag wird somit erst bei Berücksichtigung der Geländebruchkanten das gewünschte Ergebnis liefern. Da die digitalen Höhenmodelle, die für die vorliegenden Beispiele erzeugt wurden, diese Geländekanten noch nicht enthalten, wird auf das einfache Verfahren des dritten Vorschlags zurückgegriffen. Dazu vergrößern wir das Rasterintervall des digitalen Neigungsmodells gegenüber dem des Höhenmodells um den Faktor 2 von 5 m auf 10 m.

Die aus dem digitalen Neigungsmodell mit 10 m Rasterintervall abgeleitete Gefällstufenkarte zeigt Abbildung 5-17. Gegenüber der aus dem Neigungsmodell mit 5 m Rasterintervall abgeleiteten Gefällstufenkarte (Abb. 5-16) ist die Isoliniendarstellung wesentlich übersichtlicher geworden. Wenn wir auch hier berücksichtigen, daß die Isolinen in dem Waldgebiet am nördlichen Blattrand ebenso wie bei der Höhendarstellung außer Betracht zu lassen sind, so führt die Verdopplung des Rasterintervalls sehr nahe an das angestrebte Ziel heran: Die Isolinen werden in einem vernünftigen Umfang geglättet, wobei charakteristische Formen noch erhalten bleiben. Kleine geschlossene Isolinen werden beim Auszeichnen unterdrückt.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird das Rasterintervall bei der Berechnung der digitalen Neigungsmodelle für die drei Beispiele gegenüber dem Rasterintervall des Höhenmodells verdoppelt. Bei den Beispielen Feldstetten und Götzingen beträgt das Rasterintervall des Neigungsmodells somit 10 m, beim Beispiel Ranggen 20 m. Für die beiden Beispiele Feldstetten und Götzingen werden im digitalen Neigungsmodell Isolinen interpoliert, die in der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg üblich sind. In der Gefällstufenkarte sind dies die Geländeneigungen 6, 10, 14, 18 und 22 Prozent (Abb. 5-14 und 5-17) und in der Expositionskarte die in den Rebflurbereinigungen verwendeten Richtungen von 25, 75, 125, 175, 225, 275, 325 und 375 gon (Abb. 5-15 und 5-18).

Kartenblatt Kartenmaßstab	Feldstetten 1:2500		Götzingen 1:2500		Ranggen 1:10 000	
		Kosten (DM)		Kosten (DM)		Kosten (DM)
A) Berechnung des DNM						
Rasterintervall (m)	10		10		20	
Anzahl der Rasterpunkte	6916		8181		7881	
Rechenzeit						
- CPU (sec)	2		2		2	
- IO (sec)	18		20		12	
- SS (sec)	5	7	5	7	4	6
Jobvorbereitung (h)	0:15	9	0:15	9	0:15	9
Summe A		16 DM		16 DM		15 DM
B) Gefällstufenkarte						
Anzahl der interpol. Isolinienpunkte	2957		3627		5082	
Rechenzeit						
- CPU (sec)	8		9		11	
- IO (sec)	43		49		55	
- SS (sec)	17	25	20	29	24	35
Jobvorbereitung (h)	0:15	9	0:15	9	0:15	9
Zeichenzeit (h) im Maßstab	1:5000		1:5000		1:10000	
- Calcomp-960-Plotter	0:02		0:02		0:03	
- Coragraph DC 2	0:41	68	0:50	84	1:10	117
Summe B		102 DM		122 DM		161 DM
C) Expositions-karte						
Anzahl der interpol. Isolinienpunkte	2374		4017		2707	
Rechenzeit						
- CPU (sec)	10		13		9	
- IO (sec)	45		54		38	
- SS (sec)	20	29	25	36	17	25
Jobvorbereitung (h)	0:15	9	0:15	9	0:15	9
Zeichenzeit (h) im Maßstab	1:5000		1:5000		1:10000	
- Calcomp-960-Plotter	0:02		0:02		0:02	
- Coragraph DC 2	0:33	55	0:55	92	0:37	62
Summe C		93 DM		137 DM		96 DM
Gesamtkosten		211 DM		275 DM		272 DM
Gesamtkosten pro ha bear- beitete Fläche (im Karten- maßstab) ca,		3.70 DM		4.10 DM		0.90 DM

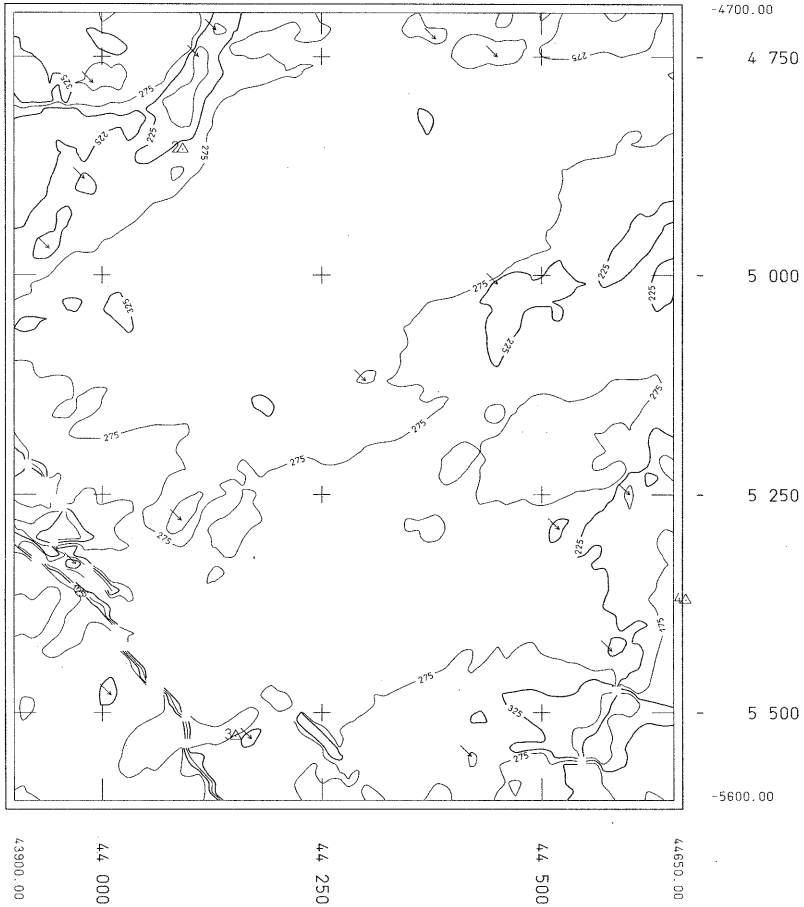
Tab. 5-7 Rechen- und Zeichenaufwand zur Ableitung einer Gefällstufen- und Expositions-karte

Entsprechend der in Abschnitt 5.1 erläuterten Aufgabenstellung sind für das Beispiel Ranggen in der Gefällstufenkarte andere Isolinien darzustellen. Interpoliert werden die Linien mit 20, 25, 40, 60 und 80 Prozent Gefälle (Abb. 5-19). Die Expositions-karte zeigt die Richtungen 50, 150, 250 und 350 gon (Abb. 5-20). Auf die verwirrende Vielzahl an Linien konstanter Fallrichtung in der Talaue des Inns am linken Bildrand der Abbildung 5-20 sei besonders hingewiesen. Hier zeigt sich, daß in fast ebenem Gelände kleine Differenzen in den Höhenwerten starke Änderungen in der Fallrichtung hervorrufen, so daß die Expositions-karte hier nur zusammen mit einer Höhenlinienkarte richtig interpretiert werden kann.

Der Rechen- und Zeichenaufwand, der im Zusammenhang mit der Bearbeitung dieser Beispiele entsteht, ist in Tabelle 5-7 zusammengestellt.

FELDSTETTEN

1



EXPOSITIONSKARTE
 INTERPOLIERTE WERTE -
 25.00 75.00 125.00 175.00 225.00 275.00 325.00 375.00 GON

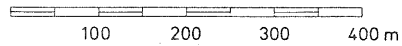
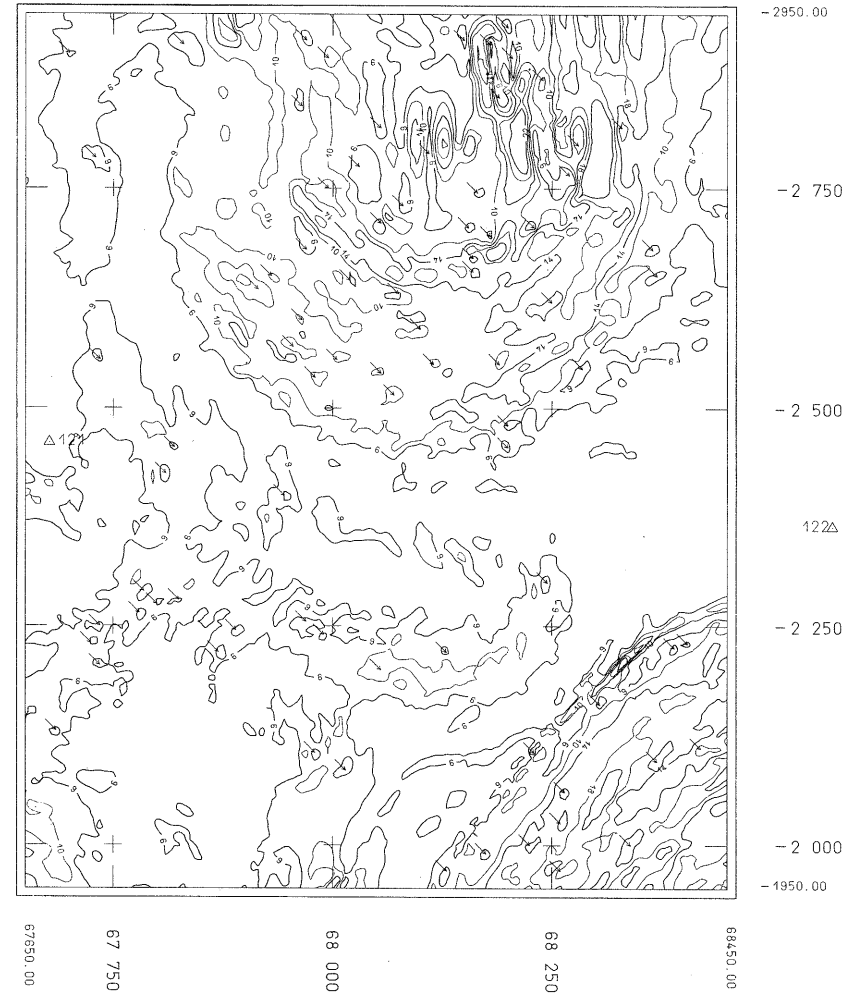


Abb. 5-15 Automatisch abgeleitete Expositionskarte des Kartenblattes Feldstetten

GOETZINGEN

2



GEFÄLLSTUFENKARTE
 INTERPOLIERTE WERTE -
 6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 PROZENT

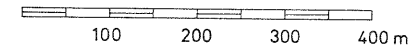
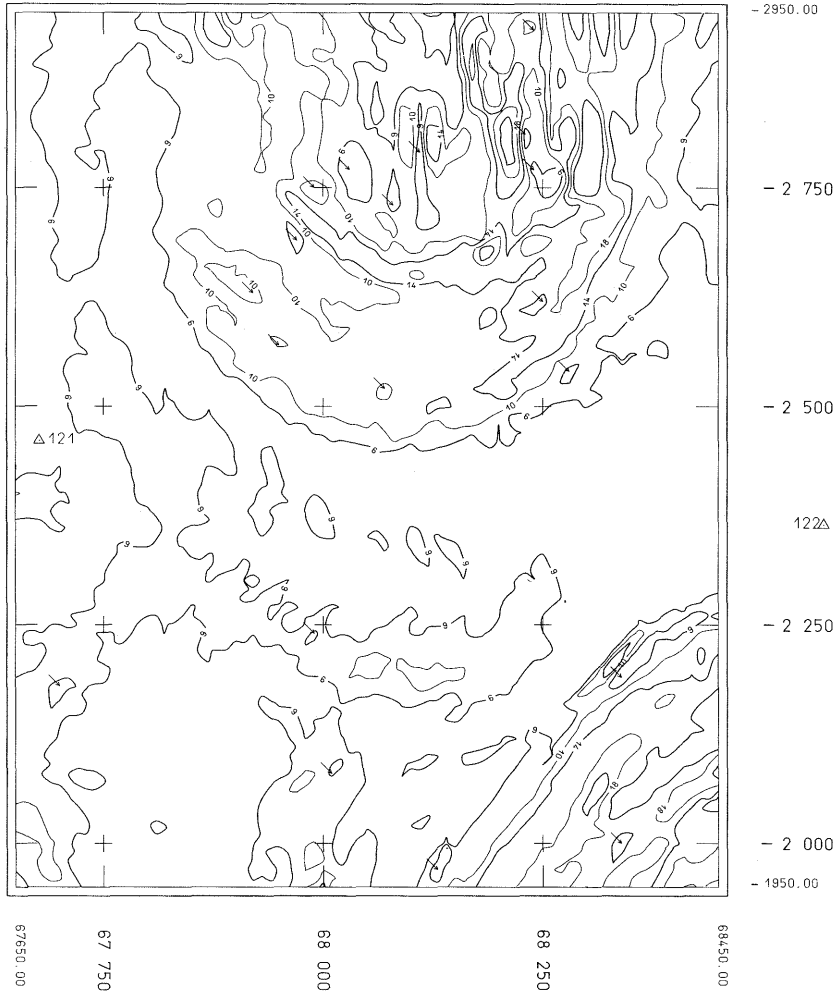
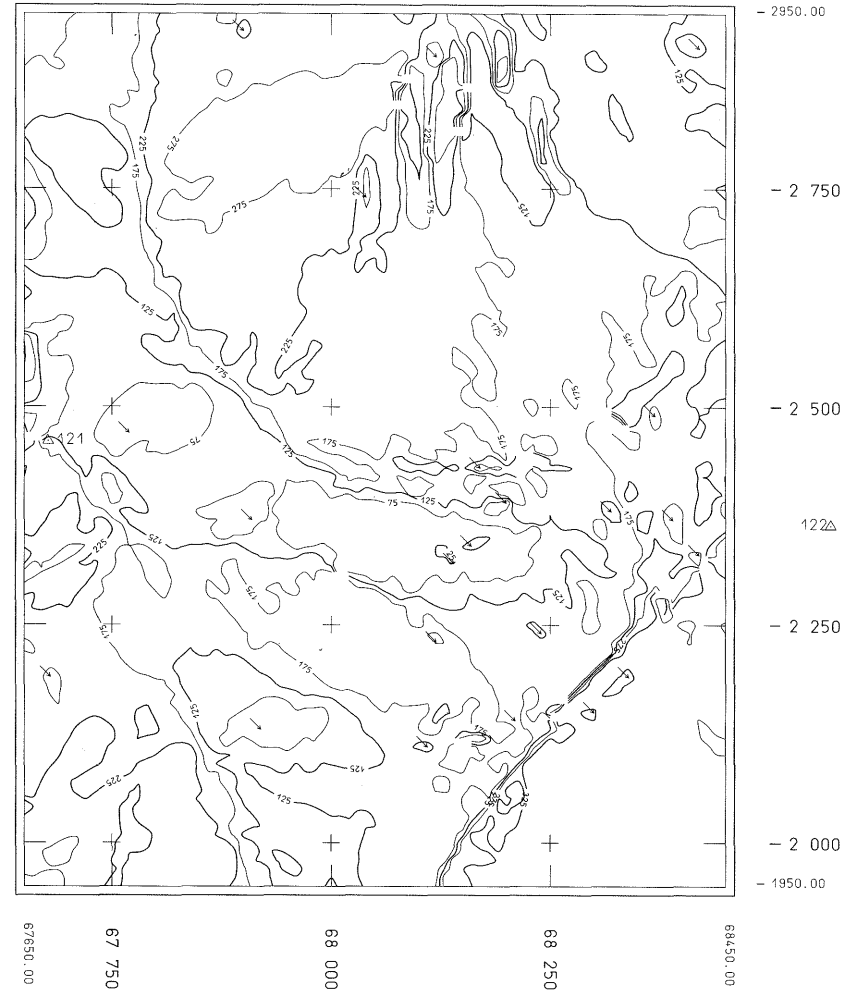


Abb. 5-16 Automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Kartenblattes Götzingen - Rasterintervall des DNM : 5 m



GEFÄHLLSTUFENKARTE
 INTERPOLIERTE WERTE -
 6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 PROZENT

Abb. 5-17 Automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Kartenblattes Götzingen - Rasterintervall des DNM : 10 m



EXPOSITIONSKARTE
 INTERPOLIERTE WERTE - 25.00 75.00 125.00 175.00 225.00 275.00 325.00 375.00 60N

Abb. 5-18 Automatisch abgeleitete Expositionskarte des Kartenblattes Götzingen

236400.00

236 000

235000.00



69700.00

69 000

68 000

67500.00

GEFÄLLSTUFENKARTE
 INTERPOLIERTE WERTE -
 20.00 25.00 40.00 60.00 80.00 PROZENT

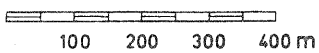
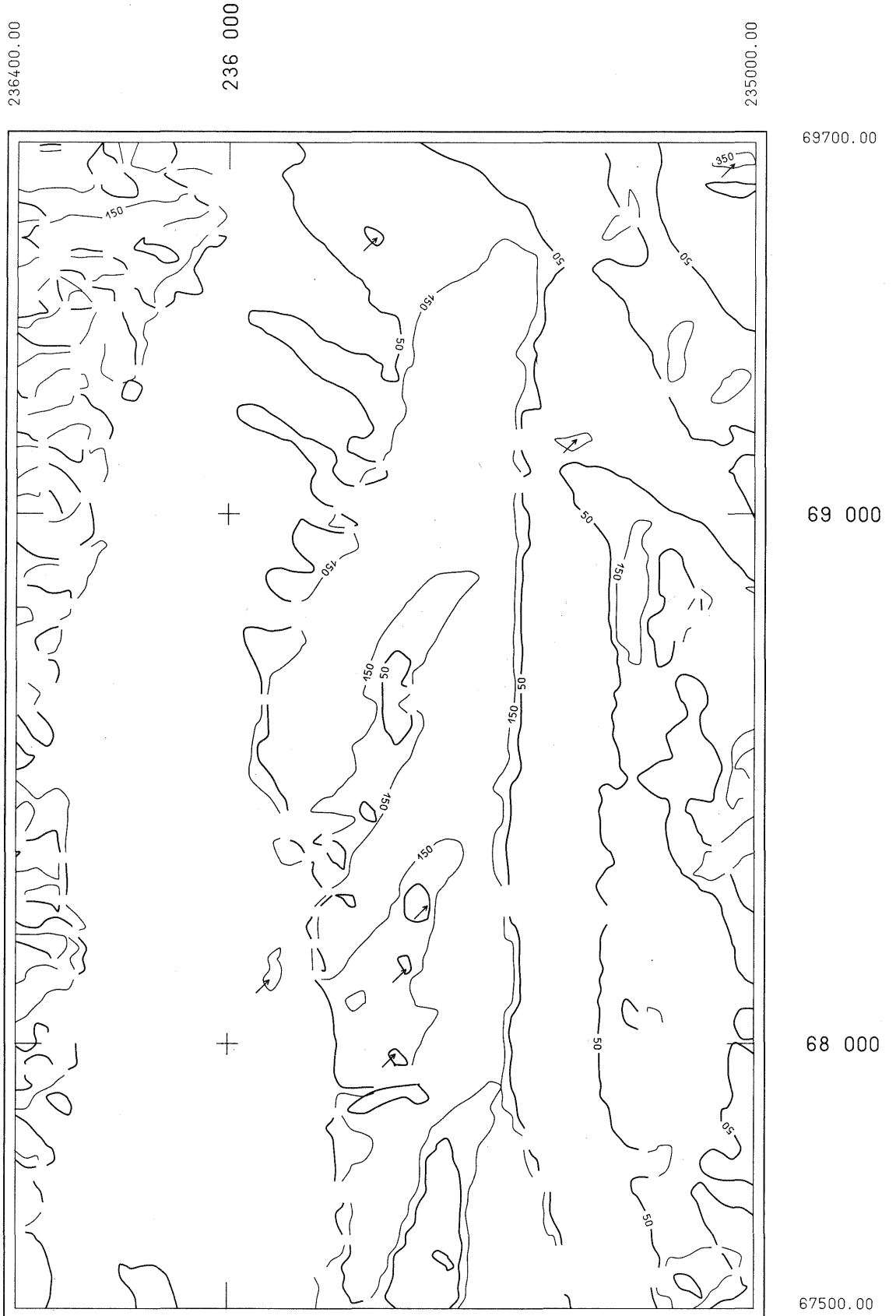


Abb. 5-19 Automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Kartenblattes Ranggen

RANGGEN

2



EXPOSITIONSKARTE
INTERPOLIERTE WERTE -
50.00 150.00 250.00 350.00 GON

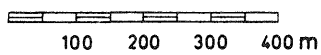


Abb. 5-20 Automatisch abgeleitete Expositionskarte des Kartenblattes Ranggen

5.8 Herstellung der zum Vergleich herangezogenen konventionellen Gefällstufenauswertungen

Für die Testgebiete Feldstetten und Götzingen liegen mehrere Vergleichsauswertungen von Gefällstufenkarten vor, die nach unterschiedlichen konventionellen Verfahren erstellt worden sind. Die Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg hat dafür dankenswerterweise Feldaufnahmen mit dem Freihandgefällmesser und eine direkte photogrammetrische Auswertung zur Verfügung gestellt. Im Rahmen einer Studienarbeit wurden Gefällstufenkarten aus Höhenlinienplänen abgeleitet.

5.8.1 Feldaufnahme mit dem Freihandgefällmesser

Zur Messung der Geländeneigung als Grundlage für die Ableitung einer Gefällstufenkarte wurde in einem Testgebiet des Flurbereinigungsverfahrens Feldstetten das Gelände mit einer größeren Anzahl von Messungslinien überdeckt. Diese Messungslinien verlaufen entweder näherungsweise in Fallrichtung oder entlang charakteristischer Geländelinien. Sie zerlegen das Gelände in unterschiedlich große Vielecke. Die Geländeneigung wurde entlang der Messungslinien durch Zielung in entsprechender Höhe zu einer zweiten Person mit dem Freihandgefällmesser gemessen. Der Abstand der Meßpunkte entlang der Linien pendelt, je nach der Bewegtheit des Geländes, um einen Mittelwert von 40 - 50 m. Im Mittel liegt der Abstand der Messungslinien bei ca. 80 m und erreicht Maximalwerte von 120 m. Die Ermittlung der Geländeneigung mit dem Freihandgefällmesser erfolgte auf 1 Prozent genau und die anschließende Interpolation der vorgegebenen Isolines im Feldriß linear zwischen benachbarten Meßpunkten. In den Abbildungen 5-21 und 5-22 sind die Messungslinien und die Messungen zweier unabhängiger Aufnahmen durch je einen Techniker mit einem Meßgehilfen und die daraus abgeleiteten Gefällstufen dargestellt.

Im Beispiel Götzingen wurden die Meßpunkte genähert in Form eines Rasters flächenhaft verteilt. In jedem Meßpunkt wurde die Fallrichtung geschätzt und die Geländeneigung in dieser Richtung gemessen. Um subjektive Täuschungen des Beobachters z.B. beim Erkennen von Gefällwechseln, Geländekleinformen oder bei der Festlegung der Fallrichtung einzuschränken, wurden die Zielweiten der Schwierigkeit des Geländes angepaßt und die Meßpunktabstände in leicht gewelltem Gelände um 40 m und in stärker bewegtem Gelände zwischen 10 - 20 m gewählt. Um eine möglichst genaue Vergleichsmessung für die anderen Herstellungsverfahren zu erhalten, wurden darüber hinaus im Bereich der Grenzlinien der Gefällstufen zusätzliche Messungen vorgenommen. Die eigentliche Neigungsmessung führten ein Ingenieur und ein Techniker durch gleichzeitige unabhängige Doppelmessung durch. Die maximale Abweichung der beiden Messungen liegt bei 1 Prozent und die mittlere Abweichung ungefähr bei 0.5 Prozent (LANG |123|). Abbildung 5-24 zeigt die abgeleiteten Gefällstufen.

Im Vergleich zum Beispiel Feldstetten weist das Beispiel Götzingen eine wesentlich höhere Meßpunktdichte auf. Sie soll einerseits eine möglichst genaue Abgrenzung der verschiedenen Gefällstufen ermöglichen, steigert gleichzeitig aber auch entsprechend den Meßaufwand. Wird verlangt, daß Neigungsklassen bis zu einer Mindestfläche von 1 a dargestellt werden (LANG |123|), so darf der mittlere

Punktabstand ca. 10 m nicht übersteigen. Kann die Mindestfläche auf ca. 5 - 10 a erhöht werden, was für die Flurbereinigung im Normalfall ausreichen dürfte, so kann der mittlere Meßpunktabstand auf ca. 20 - 35 m vergrößert werden. Im Gegensatz zu einem Punktabstand von 10 m erscheint dieser vergrößerte Punktabstand auch vom Meßaufwand her vertretbar.

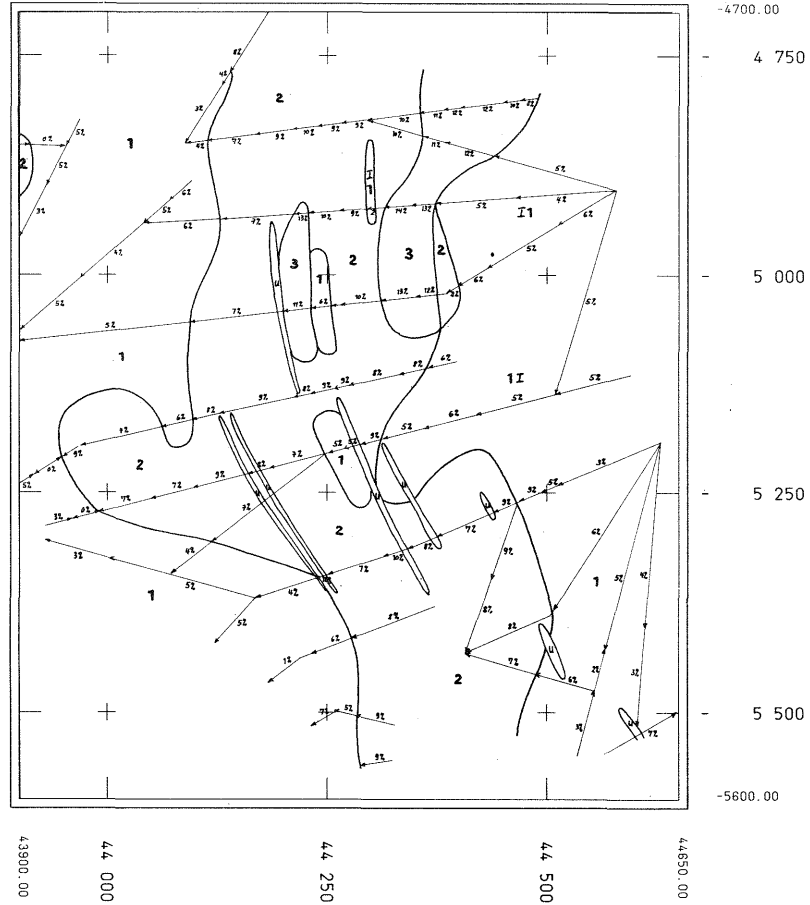
Mit der linienhaften Aufnahmemethode im Beispiel Feldstetten können Flächen unter 1/4 - 1/2 ha kaum erfaßt werden. Selbst wenn die Messung in Profilrichtung dies noch erlauben sollte, so fehlt meist senkrecht zum Profil die erforderliche Information. Zudem wird im flacher werdenden Gelände eine topographisch sinnvolle Auswahl der Messungslinien immer schwieriger, so daß auch hier der Übergang zu einer flächenhaften Meßpunktverteilung unumgänglich wird.

Bedingt durch die hohe Anzahl an Meßpunkten betrug die Aufnahmedauer für die Feldaufnahme des Beispiels Götzingen durch einen Ingenieur und einen Techniker ca. 4 Tage. Im Vergleich dazu erforderte die von dieser Vergleichsaufnahme unabhängige routinemäßige Feldaufnahme durch die zuständige Arbeitsgruppe des Flurbereinigungsamtes (ein Techniker mit einem Meßgehilfen) lediglich einen Zeitaufwand von ca. 2 Tagen. Mit Meßpunktabständen bis zu 50 m wurde dabei eine Gefällstufenkarte erstellt, die nach LANG [123] mit der Vergleichsaufnahme gut übereinstimmen soll.

Vergleichen wir die Isolinien der Feldaufnahme (Abb. 5-24) mit der automatisch abgeleiteten Gefällstufenkarte (Abb. 5-17), so fällt auf, daß bei der Felddaufnahme die Isolinien insgesamt wesentlich stärker geglättet sind. Der Grund dafür ist hauptsächlich in der Ausarbeitung der Felddaufnahme zu sehen, wo entsprechend zur Ausarbeitung der Wertermittlung im Bodenwertriß vielfach versucht wird, die Klassengrenzen des Geländegefälles soweit wie möglich auf unmittelbar benachbarte Flurstücksgrenzen des alten Bestandes abzustimmen. Ein Vergleich der Felddaufnahme mit dem Katastergrundriß der Abbildung 5-12 bestätigt diese Annahme. Ziel dieser Anpassung ist es, die weitere Verarbeitung der Neigungsinformation im Flurbereinigungsverfahren dadurch zu vereinfachen, daß sich die Anzahl der Abschnitte der Neigungsklassen pro Flurstück im alten Bestand verringert. Für den neuen Bestand, der durch das neue Wege- und Gewässernetz gebildet wird, muß dies jedoch nicht ebenfalls zu einer Verringerung der Anzahl der Klassenabschnitte pro Block führen. Es ist deshalb hervorzuheben, daß die geringfügigen Verfälschungen der Ergebnisse der Neigungsbestimmung, die durch die teilweise Anpassung an den Katastergrundriß des alten Bestandes auftreten können, nicht mit der Ermittlung der Geländeneigung selbst, sondern wie bei der Wertermittlung nur mit ihrer im Augenblick üblichen Weiterverarbeitung zusammenhängen.

FELDSTETTEN

1



GEFÄLLSTUFENKARTE
INTERPOLIERTE WERTE -
6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 PROZENT

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

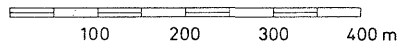
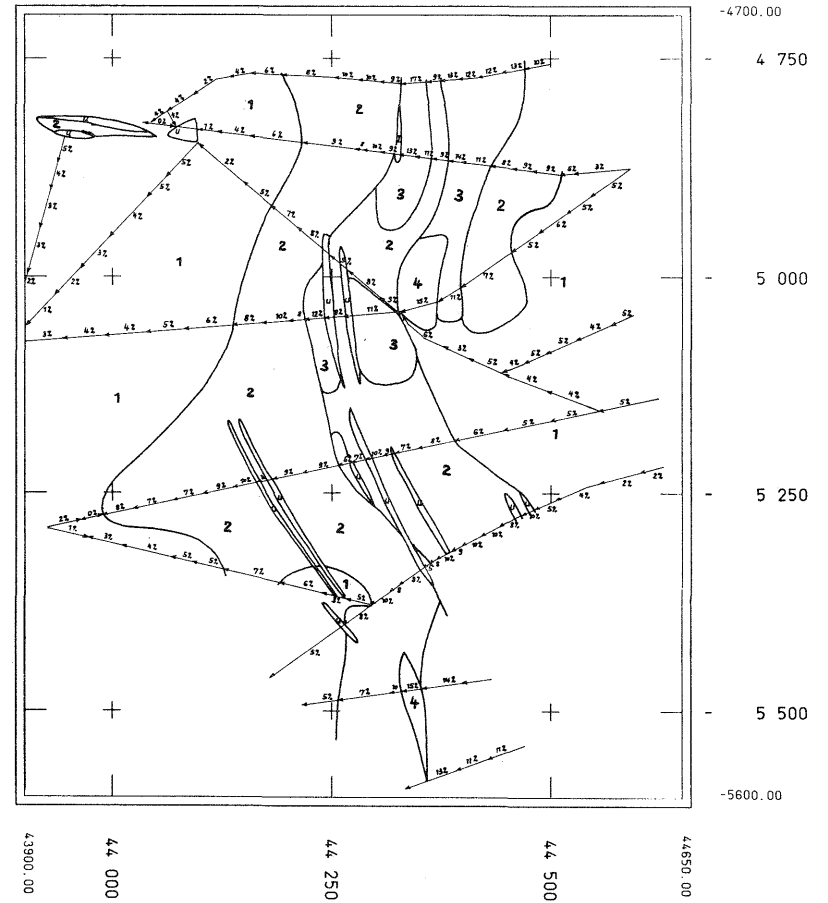


Abb. 5-21 Mit dem Freihandgefällmesser hergestellte Gefällstufenkarte des Kartenblattes Feldstetten (I)

FELDSTETTEN

1



GEFÄLLSTUFENKARTE
INTERPOLIERTE WERTE -
6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 PROZENT

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

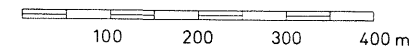
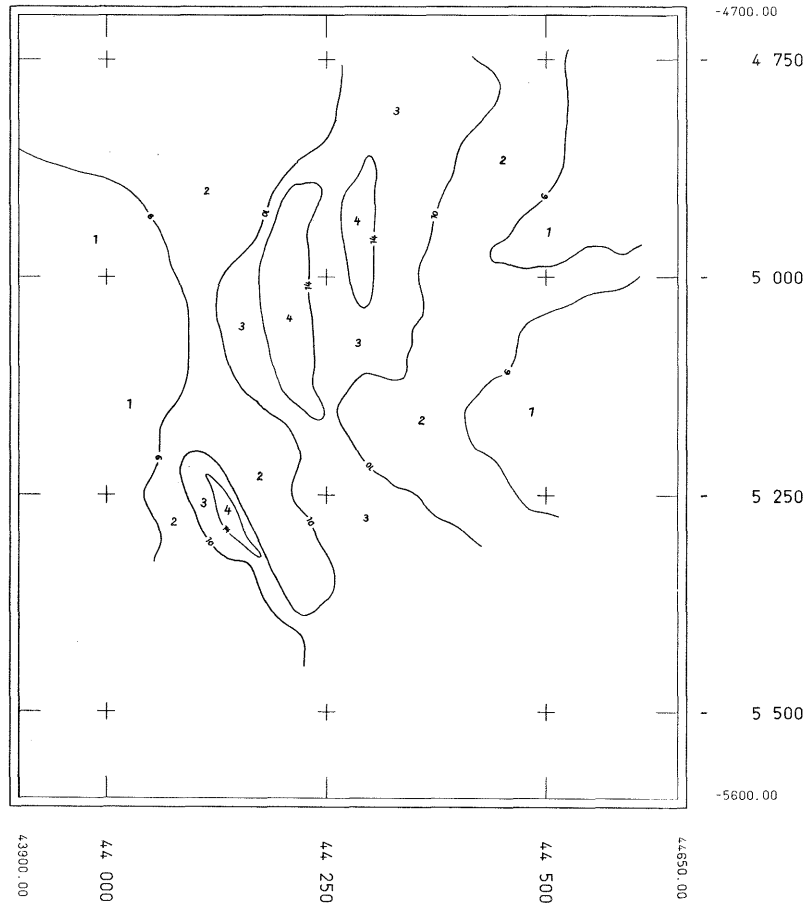


Abb. 5-22 Mit dem Freihandgefällmesser hergestellte Gefällstufenkarte des Kartenblattes Feldstetten (II)

FELDESTETTEN

1



GEFÄLLSTUFENKARTE
INTERPOLIERTE WERTE -
6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 PROZENT

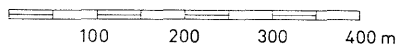
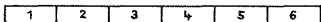
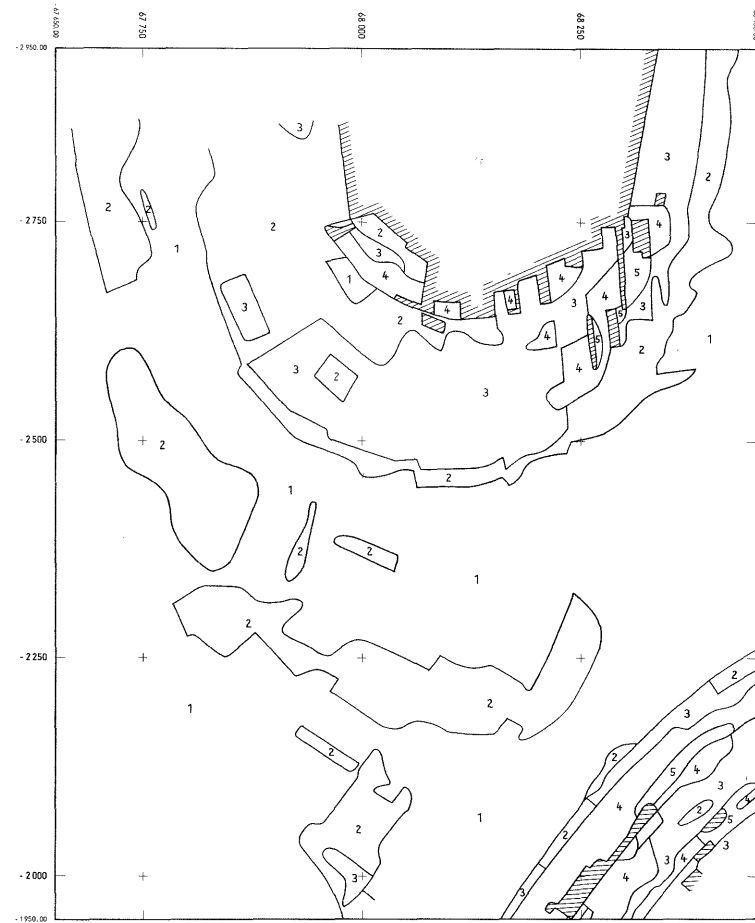


Abb. 5-23 Aus Höhenlinien abgeleitete Gefällstufenkarte eines Ausschnittes des Kartenblattes Feldstetten

GEFÄLLSTUFENKARTE (Feldaufnahme)

-Feldaufnahme durch das Flurbereinigungsamt Buchen
im Gebiet der Flurbereinigung Götzingen, Odenwaldkreis-



Gefällstufen -
1 2 3 4 5 6
6.0 10.0 14.0 18.0 22.0 Prozent

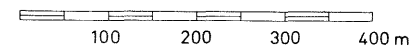


Abb. 5-24 Mit dem Freihandgefällmesser hergestellte Gefällstufenkarte des Kartenblattes Götzingen

GEFÄLLSTUFENKARTE

(direkte photogrammetrische Auswertung)

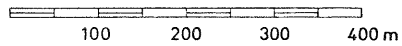
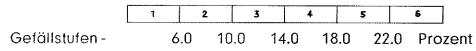
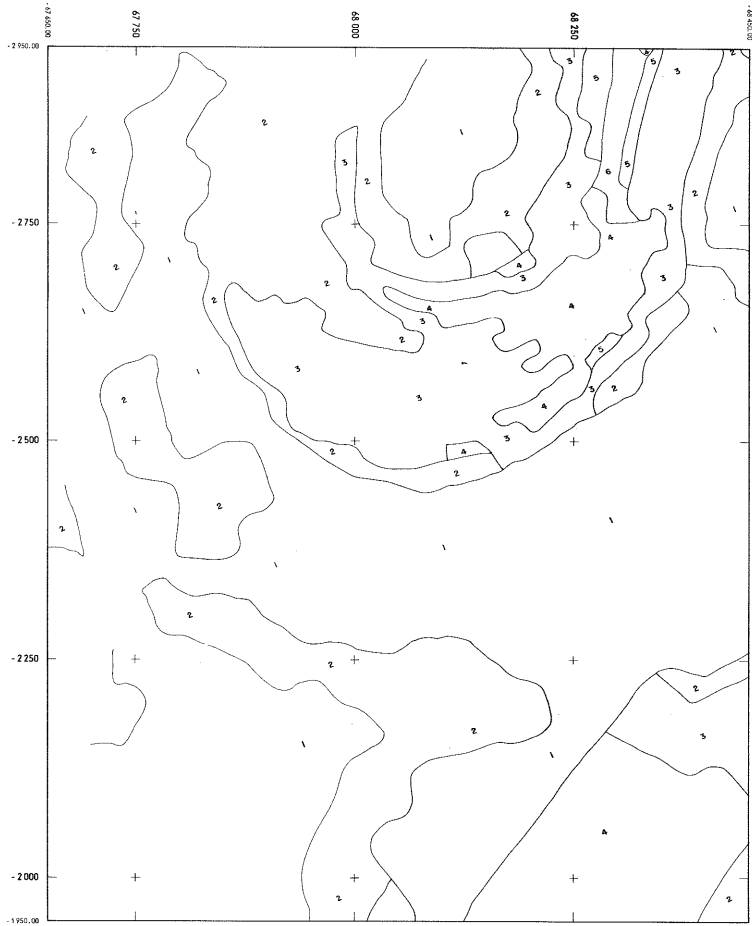
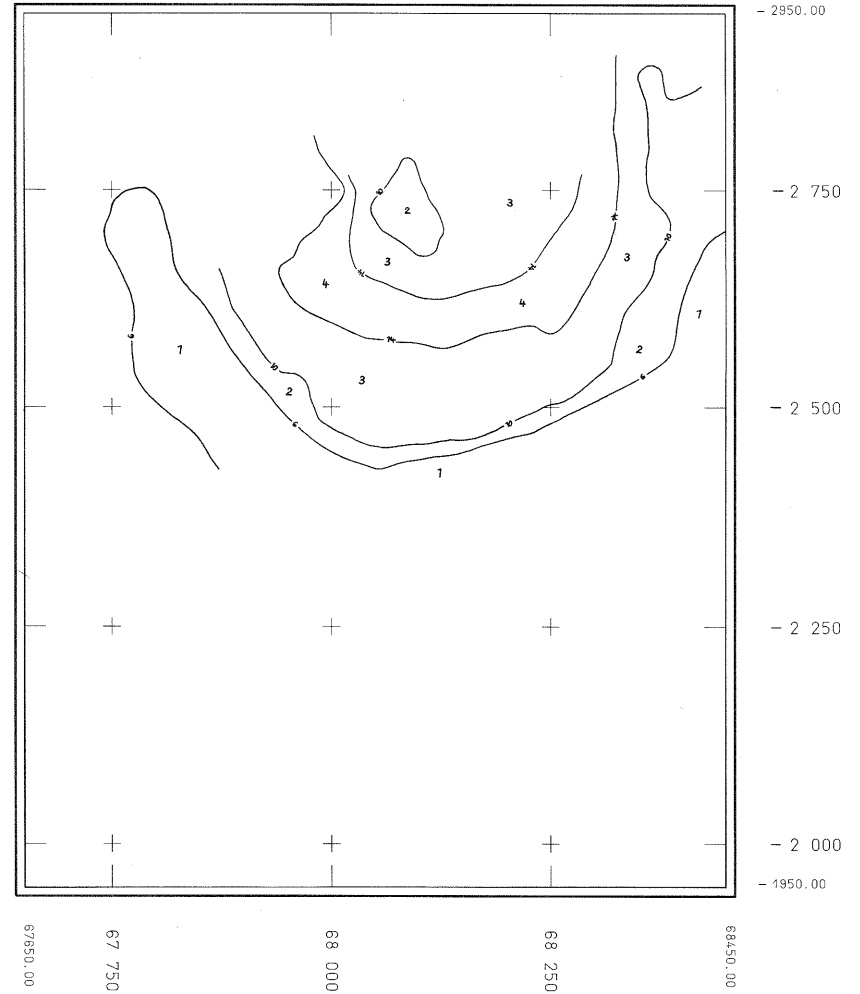


Abb. 5-25 Direkt photogrammetrisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Kartenblattes Götzingen

GOETZINGEN

2



GEFÄLLSTUFENKARTE
INTERPOLIERTE WERTE -
6.00 10.00 14.00 18.00 22.00 PROZENT

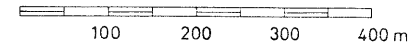


Abb. 5-26 Aus Höhenlinien abgeleitete Gefällstufenkarte eines Ausschnittes des Kartenblattes Götzingen

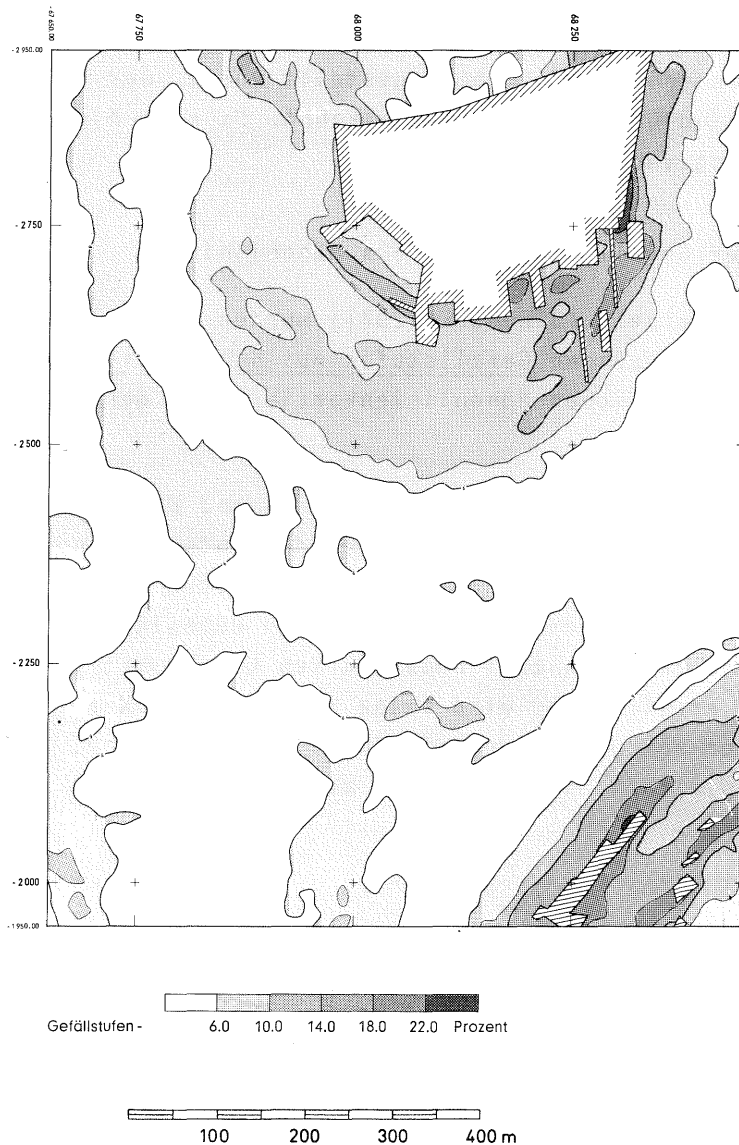


Abb. 5-27 Automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Kartenblattes Götzingen - Rasterintervall des DNM : 12,5 m

5.8.2 Direkte photogrammetrische Gefällstufenauswertung

Die direkte photogrammetrische Gefällstufenauswertung der beiden photogrammetrischen Modelle 7050707 und 7260728 wurde vom Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg an zwei Privatfirmen vergeben. Im einen Fall erfolgte die photogrammetrische Auswertung der Geländeneigung mit Hilfe eines Meßmarkentischchens, das geneigt werden kann. Das Tischchen wird auf die vorgegebene Neigung fest eingestellt und dann so am Gelände entlanggeführt, daß die Tischfläche ständig die Tangentialebene an die Geländeoberfläche bildet. Im Gegensatz zum Abfahren von Höhenlinien muß dazu das Meßmarkentischchen in der Höhe laufend nachgeführt werden.

Abbildung 5-25 zeigt die Gefällstufenauswertung des Beispiels Götzingen durch die Firma Aero-Exploration. Im Vergleich der beiden direkten photogrammetrischen Gefällstufenauswertungen erwies diese sich als die bessere. Ob sie ebenfalls nach dem oben beschriebenen Verfahren hergestellt wurde, war beim Landesamt für Flurbereinigung und Siedlung leider nicht bekannt. Es kann hier somit nur das Ergebnis der Auswertung vorgestellt werden.

5.8.3 Ableitung einer Gefällstufenkarte aus Höhenlinien

Im Rahmen einer Studienarbeit (STRÜBELE [207]) wurden für Teilgebiete der Beispiele Feldstetten und Götzingen Gefällstufen aus Höhenlinien abgeleitet, wobei die direkten photogrammetrischen Höhenlinienkartierungen der Abbildung 5-9 und 5-12 als Grundlage dienten.

Für die vorgegebenen Gefällswerte von 6, 10, 14 und 22 Prozent wird in Abhängigkeit von der Äquidistanz der Höhenlinien der entsprechende horizontale Sollabstand zwischen zwei benachbarten Höhenlinien berechnet. In der Höhenlinienkarte vergleichen wir nun die senkrecht zu den Höhenlinien in Fallrichtung gemessenen Istabstände zwischen zwei benachbarten Linien mit den Sollabständen. Wird ein Sollabstand erreicht, so wird seine Mitte in der Karte durch einen Punkt markiert und der entsprechende Gefällswert angeschrieben. Die Verbindung benachbarter Punkte gleichen Gefälles führt zu den Grenzlinien der Gefällstufen (Abb. 5-28).

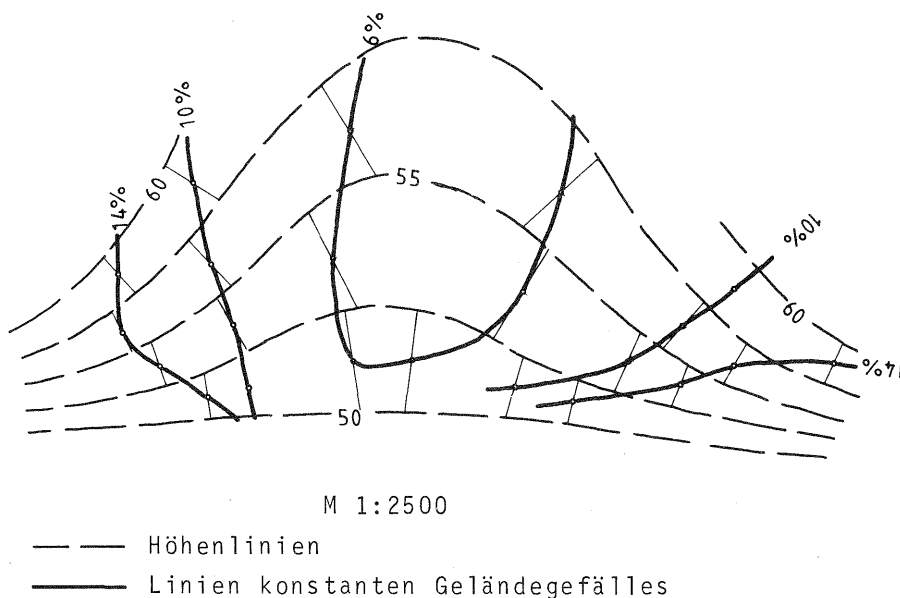


Abb. 5-28 Ableitung von Linien konstanten Gefälles aus Höhenlinien

Aussagen über das Neigungsverhalten des Geländes können bei diesem Verfahren nur in dem Umfang gemacht werden, wie sie aus den Höhenlinien hervorgehen. Zur Ableitung von Gefällstufenkarten aus Höhenlinien ist deshalb die Äquidistanz so zu wählen, daß auch charakteristische Geländekleinformen durch die Höhenlinien im erforderlichen Umfang dargestellt werden. Gegebenenfalls sind dazu auch Zwischenhöhenlinien auszuwerten. Besonderer Wert ist auf die Erfassung von Geländebruchkanten zu legen.

Die für ein Teilgebiet der Beispiele Feldstetten und Götzingen aus Höhenlinien abgeleiteten Gefällstufenkarten zeigen die Abbildungen 5-23 und 5-26.

5.9 Vergleich der nach verschiedenen Verfahren hergestellten Gefällstufenkarten

Für die beiden Testgebiete Feldstetten und Götzingen werden die vorliegenden, nach den oben beschriebenen Verfahren gefertigten Gefällstufenkarten miteinander verglichen. Der Vergleich erstreckt sich auf die mit den verschiedenen Methoden erreichte Genauigkeit in der Abgrenzung der einzelnen Gefällstufen und auf den Aufwand zur Herstellung der verschiedenen Gefällstufenkarten.

5.9.1 Genauigkeitsvergleich

Zur Bestimmung der Genauigkeit der verschiedenen Gefällstufenkarten werden jeweils zwei verschiedene Auswertungen zusammenkopiert. Über die Lageabweichungen identischer Linien konstanten Gefälles bestimmen wir die relative Genauigkeit der beiden Auswertungen.

Zur Ermittlung der absoluten Genauigkeit der einzelnen Gefällstufenauswertungen soll zunächst die Genauigkeit einer Feldaufnahme durch Vergleich zweier unabhängiger Feldaufnahmen mit dem Freihandgefällmesser im Versuchsgebiet Feldstetten bestimmt werden. Durch Vergleich einer dieser beiden Feldaufnahmen mit den anderen Auswertungen können wir dann auch deren Genauigkeit absolut angeben.

Die Genauigkeit der Gefällstufenauswertungen wird vergleichbar dem üblichen Verfahren zur Bestimmung der Genauigkeit von Höhenlinien ermittelt. Während bei Höhenlinien angenommen wird, daß die Höhengenaugkeit vom Geländegefälle abhängt, gehen wir im vorliegenden Falle davon aus, daß der mittlere Fehler des Geländegefälles von der Neigungsänderung bzw. der Oberflächenkrümmung abhängt. Entsprechend der Koppe'schen Formel für den mittleren Fehler von Höhenlinien lautet die Formel für den mittleren Neigungsfehler m_N^i von Linien konstanten Gefälles

$$m_N^i = \pm (a + b \cdot K) \quad (5.1)$$

mit K Krümmung der Oberfläche.

Um den Aufwand zur Bestimmung des relativen mittleren Neigungsfehlers zu beschränken, erfolgt der Vergleich identischer Linien konstanten Gefälles nicht über das gesamte Kartenblatt hinweg, sondern nur in einigen repräsentativen Probegebieten. Diese werden so ausgewählt, daß sie in Gebieten mit unterschiedlicher Oberflächenkrümmung liegen, die wir zu Krümmungsklassen zusammenfassen. Die mittleren Neigungsfehler der einzelnen Krümmungsklassen werden gegen ihre mittlere Krümmung aufgetragen, so daß aus dem Diagramm entnommen werden kann, ob und in welchem Ausmaß der mittlere Neigungsfehler von der Oberflächenkrümmung abhängt.

Die Bestimmung des mittleren Neigungsfehlers über Lageabweichungen identischer Isolinen erfolgt in dem Probegebiet auf zwei Wegen. Bei der ersten Methode wird der mittlere Neigungsfehler m_N^i aus dem Mittel der Lageabweichungen ΔL_i der n Messungen zweier einander entsprechender Isolinen im Probegebiet wie folgt berechnet (Abb. 5-29):

$$m_N^i = \sqrt{\frac{[\Delta L_i^2]}{n}} \cdot K \quad (5.2)$$

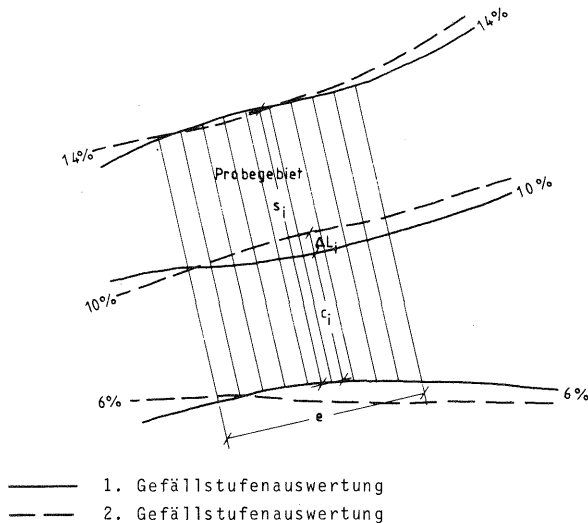


Abb. 5-29 Bestimmung des mittleren Neigungsfehlers m'_N im Probegebiet.

K ist dabei die mittlere Krümmung der Oberfläche im Probegebiet. Sie wird entweder als Mittelwert der Krümmung der n Messungen im Probegebiet bestimmt, wobei gilt

$$K = \frac{[N_d/S_i]}{n} \quad (5.3)$$

mit N_d Neigungsdifferenz der beiden benachbarten Isolinien

S_i Horizontalentfernung der beiden benachbarten Isolinien der Messung i

oder über die konstante Neigungsdifferenz der beiden benachbarten Isolinien und ihre mittlere Horizontalentfernung nach

$$K = \frac{N_d}{S_{\text{Mittel}}} \quad (5.4)$$

$$\text{und } S_{\text{Mittel}} = \frac{F}{e} \quad (5.5)$$

mit F Fläche des Probegebiets

e Ausdehnung des Probegebiets senkrecht zur Messungsrichtung

berechnet werden.

Bei der zweiten Methode wird für jede der n Messungen des Probegebiets die Neigungsdifferenz ΔN_i für die zu untersuchende Isolinie bestimmt und daraus der quadratische Mittelwert gebildet:

$$m'_N = \sqrt{\frac{[\Delta N_i^2]}{n}} \quad (5.6)$$

$$\Delta N_i = \frac{N_d \cdot \Delta L_i}{S_i} \quad (5.7)$$

Werden die beiden Isolinien, die zur untersuchten unmittelbar benachbart sind, in die Genauigkeitsbestimmung miteinbezogen, so werden kleine Unstetigkeiten im Isolinienverlauf weitgehend aufgefangen. Nicht möglich ist dieses Vorgehen bei der Isolinie mit dem kleinsten bzw. dem größten Gefälle. Hier muß man sich auf eine benachbarte Isolinie beschränken,

Wird dieser Vergleich für zwei Gefällstufenkarten durchgeführt, die nach demselben Verfahren abgeleitet worden sind und denen deshalb genähert dieselbe absolute Genauigkeit unterstellt werden kann, so berechnet sich der absolute mittlere Neigungsfehler m_N einer einzigen Auswertung zu

$$m_N = \frac{m_N^i}{\sqrt{2}} \quad (5.8)$$

Nachdem auf diese Weise die absolute Genauigkeit der Neigungsangabe eines Herstellungsverfahrens bestimmt ist, kann die absolute Genauigkeit der Isolinen auch für Gefällstufenkarten angegeben werden, die nach anderen Verfahren abgeleitet worden sind. Durch Vergleich mit einer der beiden Bezugsauswertungen ergibt sich der relative mittlere Neigungsfehler m_N^i über die Lageabweichungen der Isolinen und die Gleichungen (5.2) bzw. (5.6). Zur Bestimmung des absoluten mittleren Neigungsfehlers m_{N2} der zweiten Herstellungsart wird vom relativen Neigungsfehler m_N^i der absolute Neigungsfehler der Bezugsauswertung m_N quadratisch subtrahiert:

$$m_{N2} = \sqrt{m_N^{i2} - m_N^2} \quad (5.9)$$

In Anlehnung an die in der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg üblichen Gefällstufeneinteilung werden für die Testauswertungen sechs Gefällstufen gebildet, die wie folgt gegeneinander abgegrenzt sind:

Gefälle (Prozent)	Gefällstufe
0 - 6	1
6 - 10	2
10 - 14	3
14 - 18	4
18 - 22	5
über 22	6

Dieselbe Gefällstufeneinteilung liegt auch den Vergleichsauswertungen der Beispiele Feldstetten und Götzingen zugrunde.

Zwei unabhängige Gefällstufenauswertungen, die nach demselben Verfahren hergestellt wurden, liegen im vorliegenden Fall nur vom Testbeispiel Feldstetten vor. Es sind zwei Gefällstufenaufnahmen mit dem Freihandgefällmesser, wobei die Geländeneigung entlang der ausgewählten Messungslinien bestimmt wurde. Ein Vergleich der in den Abbildungen 5-21 und 5-22 dargestellten Ergebnisse zeigt deutlich, zu welcher unterschiedlichen Ergebnissen die Aufnahmen führen. Schon die Neigungsmessungen entlang mehr oder weniger identischer Messungslinien unterscheiden sich in einigen Fällen um Beträge bis zu 4 Prozent, was bei Isolinenabständen von ca. 4 Prozent zu Versetzungen um eine volle Gefällstufe führt. In den Bereichen, in denen die Messungslinien nicht übereinstimmen, treten noch größere Differenzen auf, da die Informationsdichte senkrecht zu den Messungslinien rasch abfällt. In diesen Freiräumen wurden die Isolinen vermutlich nach Augenschein in der Örtlichkeit eingetragen.

Wenn diese beiden Gefällstufenkarten über größere Flächen Differenzen von 1 Stufe, vereinzelt von 2 Stufen aufweisen, so ist dies eindeutig auf das hier angewandte unzureichende Aufnahmeverfahren zurückzuführen. Insbesondere im Bereich der Abgrenzungslinien der einzelnen Gefällstufen kann eine dichte Meßpunktfolge

nicht durch subjektive Schätzung der Geländeneigung in der Örtlichkeit ersetzt werden. Sonst läßt sich nicht vermeiden, daß am Übergang der Stufen zum Teil Sprünge auftreten und z.B. die Stufe 2 (6 - 10 %) unmittelbar an die Stufe 4 (14 - 18 %) angrenzt, obwohl dies normalerweise nur bei ausgeprägten Geländebruchkanten vorkommen kann.

Wegen des offensichtlich unzureichenden Aufnahmeverfahrens bei den Feldaufnahmen des Beispiels Feldstetten und den damit verbundenen großen Differenzen in der Gefällstufenkartierung muß darauf verzichtet werden, anhand dieser beiden Auswertungen die absolute Genauigkeit der Neigungsangabe einer Gefällstufenaufnahme mit dem Freihandgefällmesser zu bestimmen. Da im vorliegenden Fall von keinem anderen Verfahren zur Gefällstufenableitung zwei unabhängige Auswertungen vorliegen, können im folgenden nur Aussagen über die relative Genauigkeit der Neigungsangaben der verschiedenen Auswertungen gemacht werden.

Wie bereits erwähnt, werden zur praktischen Durchführung der Bestimmung des relativen mittleren Neigungsfehlers zwei Gefällstufenauswertungen zusammenkopiert und mehrere Probegebiete in Bereichen mit unterschiedlicher Oberflächenkrümmung ausgewählt. Diese Auswahl der Probegebiete wird dadurch eingeschränkt, daß

- die vorliegenden Vergleichsauswertungen meist nur einen Teil der automatisch abgeleiteten Gefällstufenkarten decken und
- die unterschiedlichen Oberflächenkrümmungen in den Beispielen Feldstetten und Götzingen bei den vorgegebenen Gefällwerten aus den interpolierten Isolinien nicht im wünschenswerten Umfang hervorgehen.

Aus diesen Gründen wurden für die einzelnen Vergleiche nur zwischen 4 und 5 Probegebiete mit unterschiedlicher Oberflächenkrümmung ausgewählt (STRÖBELE |207|). Die Anzahl der Messungen in den einzelnen Probegebieten liegt zwischen 5 und 9. Um diese Anzahl zu erhöhen, erfolgt eine Auswertung der Lageabweichungen zwischen entsprechenden Isolinien für alle drei im Probegebiet liegenden Isolinien. Im Beispiel der Abbildung 5-29 bedeutet dies, daß die Bestimmung des mittleren Neigungsfehlers sowohl über die Abweichungen zwischen den beiden 10 %-Linien als auch über die 6 %-Linien und die 14 %-Linien erfolgt. Am aussagekräftigsten ist allerdings der Wert, der mit Hilfe der 10 %-Linie gewonnen wird.

Die für die einzelnen Probegebiete ermittelten mittleren Neigungsfehler, die jeweils nach den Gleichungen (5.2) und (5.6) ermittelt werden, weisen im Mittel eine Differenz von ca. 0.5 % bei einer maximalen Differenz von 2.5 % auf. Etwas größer ist die Differenz zwischen den mittleren Neigungsfehlern für die drei Isolinien einer Messung innerhalb des Probegebiets. Sie liegt im Mittel bei ca. 1.5 % und beträgt maximal 4 %. Die Ursache dafür ist u.a. darin zu suchen, daß die mittlere Oberflächenkrümmung für die beiden außen liegenden Isolinien nicht mit derselben Sicherheit bestimmt werden kann wie für die mittlere Isolinie. In der Summe ergibt sich somit eine Streuung des relativen Neigungsfehlers innerhalb eines Probegebiets von ca. 2 % im Mittel bei einem Maximalwert von ca. 5 %.

Werden die mittleren Neigungsfehler m_N^I in einem Diagramm gegen die Oberflächenkrümmung K aufgetragen, so wird die starke Streuung der Einzelwerte innerhalb der verschiedenen Probegebiete deutlich. Darüber hinaus zeigt sich aber auch, daß in Gebieten mit geringer Oberflächenkrümmung praktisch keine Probegebiete

ausgewählt werden konnten, da hier die Isolinien zu weit auseinanderliegen. Für diese Genauigkeitsuntersuchungen hätte die von der Flurbereinigungsverwaltung übernommene Isolinieneinteilung also durch Isolinien mit einer wesentlich kleineren Neigungsdifferenz ersetzt werden müssen. Dazu wären dann aber keine Vergleichsauswertungen vorhanden gewesen.

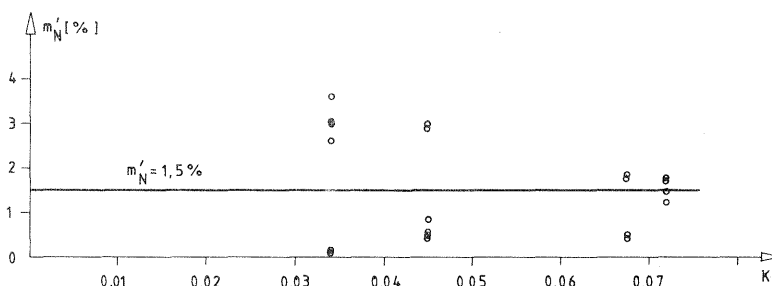


Abb. 5-30 Bestimmung des relativen mittleren Neigungsfehlers m'_N durch Vergleich einer Gefällstufenaufnahme mit dem Freihandgefällmesser und einer Gefällstufenableitung aus Höhenlinien für das Beispiel Feldstetten

In Abbildung 5-30 ist der über Lageabweichungen ermittelte relative Neigungsfehler m'_N für vier Probegebiete gegen die Oberflächenkrümmung K aufgetragen. Zugrunde liegt der Vergleich einer Gefällstufenaufnahme mit dem Freihandgefällmesser und eine Gefällstufenableitung aus Höhenlinien für das Beispiel Feldstetten. Nachdem die Neigungsfehler in den einzelnen Probegebieten und zwischen den einzelnen Probegebieten selbst stark streuen, die Anzahl der Probegebiete recht gering ist und insbesondere in Gebieten mit geringer Oberflächenkrümmung kein Probegebiet möglich war, ist es anhand der vorliegenden Beispiele nicht möglich, gesicherte Aussagen über eine Abhängigkeit des relativen Neigungsfehlers von der Oberflächenkrümmung zu machen. Auf die Bestimmung einer ausgleichenden Fehlergeraden wird deshalb verzichtet und statt dessen für jeden Vergleich ein konstanter mittlerer Neigungsfehler angegeben. Eine Zusammenstellung der so ermittelten relativen mittleren Neigungsfehler für die Vergleiche der verschiedenen Gefällstufenauswertungen enthält Tabelle 5-8.

Art der Ableitung der Gefällstufen			aus Höhenlinien	Feldaufnahme mit Freihandgefällmesser	automatisch	direkt photogrammetrisch
	F	G				
aus Höhenlinien	F	-	±1.5	±0.9	-	
	G	-	±1.3	±1.9	±1.7	
Feldaufnahme mit Freihandgefällmesser	F		-	±1.6	-	
	G		-	±1.5	±1.6	
automatisch	F			-	-	
	G			-	±1.9	
direkt photogrammetrisch	F				-	
	G				-	

Tab. 5-8

Relativer mittlerer Neigungsfehler (in Prozent) durch Vergleich zweier Gefällstufenkarten verschiedener Herstellungsart

F Feldstetten
G Götzingen

Nachzutragen bleibt, daß die automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Beispiels Götzingen, die für diese Genauigkeitsvergleiche verwendet wurde, aus einem Höhenraster mit 6.25 m Rasterintervall abgeleitet worden ist. Im Vergleich zu den Isolinen der Abbildung 5-27, die aus demselben digitalen Höhenmodell, aber mit einem auf 12.5 m verdoppelten Rasterintervall berechnet wurden und im Vergleich zu den Gefällstufen der Abbildung 5-17, die aus einem digitalen Höhenmodell mit einem 10 m-Rasterintervall abgeleitet wurden, weist sie einen deutlich unruhigeren Linienverlauf und wesentlich mehr Kleinformen auf.

Nachdem die mittleren Neigungsfehler der Tabelle 5-8 aus stark streuenden Einzelwerten abgeleitet wurden, sollten erstere nicht zu hoch bewertet werden. Dennoch können einige Folgerungen aus den Ergebnissen gezogen werden. So zeigt sich am Beispiel Feldstetten, daß der relative Neigungsfehler aus dem Vergleich der Feldaufnahme mittels Freihandgefällmesser mit der aus Höhenlinien abgeleiteten Gefällstufenkarte mit $\pm 1.5 \%$ bzw. mit der automatisch abgeleiteten Karte mit $\pm 1.6 \%$ über dem Wert von $\pm 0.9 \%$ liegt, der sich beim Vergleich der aus Höhenlinien abgeleiteten Gefällstufenkarte mit der automatisch abgeleiteten ergibt. Dies bestätigt die Erkenntnis, daß die Feldaufnahme hier die schlechteste der vorliegenden Auswertungen ist.

Beim Beispiel Götzingen ergibt sich aus dem Vergleich der aus Höhenlinien abgeleiteten Auswertung mit der Feldaufnahme mit $\pm 1.3 \%$ der kleinste mittlere Neigungsfehler. Es folgt der Vergleich der Feldaufnahme mit der automatischen Auswertung mit $\pm 1.5 \%$. Etwas schlechter schneiden die Vergleiche der direkten photogrammetrischen Auswertung mit den drei anderen Verfahren mit einem Neigungsfehler zwischen ± 1.6 und $\pm 1.9 \%$ ab. Auch der Vergleich der aus Höhenlinien abgeleiteten Gefällstufenkarte mit der automatisch abgeleiteten Karte führt zu einem mittleren Neigungsfehler von $\pm 1.9 \%$.

Wenn wir davon ausgehen, daß im Beispiel Götzingen die sorgfältig aufgenommene Feldaufnahme von der Genauigkeit her etwa mit der automatischen Auswertung vergleichbar ist, so erhalten wir für die beiden Gefällstufenkarten eine Absolutgenauigkeit des dargestellten Geländegefälles von ca. $\pm 1.1 \%$.

Für eine qualifiziertere Bestimmung des mittleren Neigungsfehlers wäre es unbedingt erforderlich, die Anzahl der Isolinen zu erhöhen, insbesondere in Gebieten mit geringer Oberflächenkrümmung. Für weitere Genauigkeitsuntersuchungen sollten deshalb Isolinen im Abstand von höchstens 2 % Neigungsdifferenz interpoliert werden. Dies würde einerseits den Aufwand zur Erstellung von Vergleichsaufnahmen z.B. mit dem Freihandgefällmesser ungefähr verdoppeln, andererseits aber für die verschiedenen Krümmungsklassen eine ausreichende Anzahl geeigneter Probegebiete liefern. Hier könnte dann die Auswertung jeweils auf die mittlere Isolinie im Probegebiet beschränkt werden.

Einen guten Eindruck von der Vollständigkeit und Genauigkeit der verschiedenen Auswertungen liefert ein optischer Vergleich der verschiedenen Gefällstufenkarten des Beispiels Götzingen. So stellen wir beim Vergleich der Feldaufnahme mit der automatischen Auswertung eine recht gute Übereinstimmung der Isolinen bei den großen Formen und bei der Ausweisung von kleinen Flächen fest. Wenn dabei die Felddaufnahme zum Teil fast geradlinige Isolinen aufweist, so ist dies darauf zurückzuführen, daß die Klassengrenzen der Gefällstufen bei der manuellen

Ausarbeitung des Feldrisses soweit wie möglich an unmittelbar benachbarte Grundstücksgrenzen des alten Bestandes angeglichen werden (siehe Abschnitt 5.8.1). Dadurch werden kleine Restflächen von Gefällstufen in den Grundstücken des alten Bestandes bei der graphischen Weiterverarbeitung vermieden. Der unruhigere Verlauf der automatisch interpolierten Isolinien und damit auch die Verarbeitung kleinerer Teilflächen in den Grundstücken muß sich dann nicht mehr in gleichem Umfang wie bisher als nachteilig auf die Weiterverarbeitung des Geländegefälles auswirken, wenn sie nicht mehr graphisch, sondern numerisch erfolgt. Einige Gedanken zu diesem Punkt folgen im dritten Teil dieser Arbeit.

Abgesehen von Geländebruchkanten folgen bei der automatischen Auswertung die einzelnen Neigungsklassen kontinuierlich aufeinander. Bei der Feldaufnahme dagegen treten in verschiedenen Fällen Sprünge um eine Klasse auf, insbesondere in den steileren Lagen im Nordosten und im Südosten des Blattes Götzingen. Die dabei auftretenden Abweichungen betragen maximal 1 Klasse über Flächen bis zu 50 a. Beim Vergleich der Feldaufnahme mit der aus Höhenlinien abgeleiteten Gefällstufenkarte treten wesentlich größere Abweichungen auf. Flächen bis zu ca. 90 a weichen um 1 Stufe voneinander ab, Flächen bis zu ca. 50 a um 2 Stufen. Im Vergleich zur detaillierten Feldaufnahme enthält die aus Höhenlinien abgeleitete Gefällstufenkarte nur ganz grobe Umrisse der Gefällstufen.

Zu einem mehr oder weniger starken Generalisieren in der Abgrenzung der Gefällstufen neigt auch die direkte photogrammetrische Auswertung. Im Vergleich mit der Feldaufnahme zeigt sich, daß viele Kleinformen nicht erfaßt sind und Flächen bis zu ca. 60 a sich um 1 Stufe unterscheiden. Sehr große Differenzen ergeben sich im Bereich des rechten unteren Blattecks. In der direkten photogrammetrischen Auswertung ist der größte Teil des Hanges in Stufe 4 eingeordnet, die im Nordwesten direkt an Stufe 1 angrenzt. Die Feldaufnahme weist hier eine Vielzahl an Differenzierungen auf.

Für einen Vergleich der automatisch hergestellten Gefällstufenkarte mit der aus Höhenlinien abgeleiteten gilt mehr oder weniger dasselbe wie für den Vergleich der Feldaufnahme mit der aus Höhenlinien abgeleiteten Karte. Beim Vergleich der automatisch hergestellten Gefällstufenkarte mit der direkten photogrammetrischen Gefällstufenauswertung fällt auf, daß in einigen Details im nordöstlichen Teil des Blattes Götzingen eine bessere Übereinstimmung vorhanden ist als beim Vergleich mit der Feldaufnahme. Daraus können wir schließen, daß auch bei der Feldaufnahme wahrscheinlich einige Kleinformen übersehen oder anders interpretiert worden sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die aus den vorliegenden Höhenlinienplänen abgeleiteten Gefällstufenauswertungen sehr stark generalisiert sind und zu wenig Kleinformen enthalten, so daß sie zumindest für die Zwecke der Flurbereinigung nicht ohne weiteres brauchbar sind. Die direkte photogrammetrische Gefällstufenauswertung des Beispiels Götzingen weist im nördlichen Teil eine wesentlich bessere Differenzierung der Geländeneigung als im südlichen Teil auf. Auch diese Art der Erfassung des Geländegefälles ist für die Anforderungen in der Flurbereinigung weder ausreichend vollständig noch ausreichend genau. In welchem Umfang dieses Verfahren u.U. noch verbesserungsfähig ist, kann hier nicht abgeschätzt werden, da über die Details der Auswertung nicht genügend bekannt ist.

Eine für die Zwecke der Flurbereinigung ausreichende Erfassung sowohl der großen Formen als auch der meisten Kleinformen bieten somit nur eine sorgfältige Felddaufnahme mit dem Freihandgefällmesser und die automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte. Dabei muß bei der Felddaufnahme nochmals betont werden, daß nur eine enge, rasterförmige Verteilung der Meßpunkte im Gelände das geforderte Ergebnis liefert. Eine sichere Darstellung von Kleinformen mit einer Fläche von 1 a wird mit vertretbarem Aufwand von beiden Verfahren kaum erreicht. Eine sinnvolle Schranke, die auch den Belangen der Flurbereinigung gerecht wird, dürfte bei einer Mindestfläche von ca. 5 - 10 a liegen.

Da die für diese Arbeit verwendete Programmversion von SCOP zur Berechnung eines digitalen Neigungsmodells und zur Ableitung von Isolinien die Bruchkanteninformationen nicht mitverarbeitet, muß im unmittelbaren Bereich von Geländekanten mit gewissen Verfälschungen im Verlauf der Isolinien gerechnet werden. Die Ursachen sind die folgenden augenblicklichen Vernachlässigungen im Rechenablauf:

- Durch die Korrelation von Stützpunkten über Bruchkanten hinweg kann die Höhe von Rasterpunkten bei der Berechnung des digitalen Höhenmodells verfälscht werden.
- Bei der Ableitung der Neigungswerte aus dem digitalen Höhenmodell können sich Verfälschungen ergeben, wenn zwischen benachbarten Rasterpunkten eine Bruchkante verläuft.
- Werden Isolinien aus dem digitalen Neigungsmodell abgeleitet, so erfolgt dies ohne Abstimmung auf Geländekanten.

Bei dieser vorläufigen Programmversion kann sich somit bei ausgeprägten Geländekanten die Notwendigkeit ergeben, daß in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft die Isolinien manuell überarbeitet werden müssen,

5.9.2 Vergleich der Herstellungskosten der Gefällstufenkarte

Die Rechen- und Zeichenzeiten und die dadurch entstehenden Kosten zur Ableitung von Gefällstufenkarten sind für die Beispiele Feldstetten, Götzingen und Ranggen in den Tabellen 5-4 und 5-7 zusammengestellt. Bei den anderen zum Vergleich herangezogenen Herstellungsverfahren ist nur der Zeitaufwand für die Felddaufnahme des Beispiels Götzingen bekannt. Der Kostenvergleich muß sich deshalb auf die automatische Ableitung und auf die Felddaufnahme des Beispiels Götzingen mit einer Fläche von 80 ha beschränken.

Zur Aufnahme der in Abbildung 5-24 dargestellten Felddaufnahme mit dem Freihandgefällmesser durch das Flurbereinigungsamt Buchen, die als Kontrollmessung für die anderen Aufnahmen besonders sorgfältig durchgeführt wurde, benötigten 1 Ingenieur und 1 Techniker ca. 4 Tage. Bei einem Stundensatz von 36 DM für einen Ingenieur, von 27 DM für einen Techniker und bei 8 Stunden Arbeitszeit pro Tag belaufen sich die Gesamtkosten für die Feldarbeit auf 2 016 DM bzw. auf ca. 25 DM/ha bearbeitete Fläche. Der Zeitaufwand für eine kartographische Überarbeitung der Gefällstufenaufnahme ist dabei nicht berücksichtigt.

Im Vergleich dazu erforderte die davon unabhängige, routinemäßige Felddaufnahme durch die zuständige Arbeitsgruppe des Flurbereinigungsamtes nur die halbe Zeit.

1 Techniker benötigte mit einem Meßgehilfen ca. 2 Tage für die Feldarbeit. Bei einem Stundensatz von 19 DM für einen Meßgehilfen ergeben sich Kosten für die Feldarbeit von 736 DM bzw. ca. 9 DM/ha. Einschränkend ist zu ergänzen, daß das Ergebnis dieser Feldaufnahme nicht überprüft werden konnte. Wenn es auch mit der zuerst erwähnten Feldaufnahme der Abbildung 5-24 gut übereinstimmen soll (LANG |123|), so kann doch kaum davon ausgegangen werden, daß die in der halben Feldarbeitszeit und mit nur einer Messung pro Visur hergestellte Gefällstufenkarte dieselbe hohe Genauigkeit und Detailfülle aufweist wie die Kontrollaufnahme der Abbildung 5-24.

Die Herstellungskosten für die automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte des Beispiels Götzingen ergeben sich aus Tabelle 5-9.

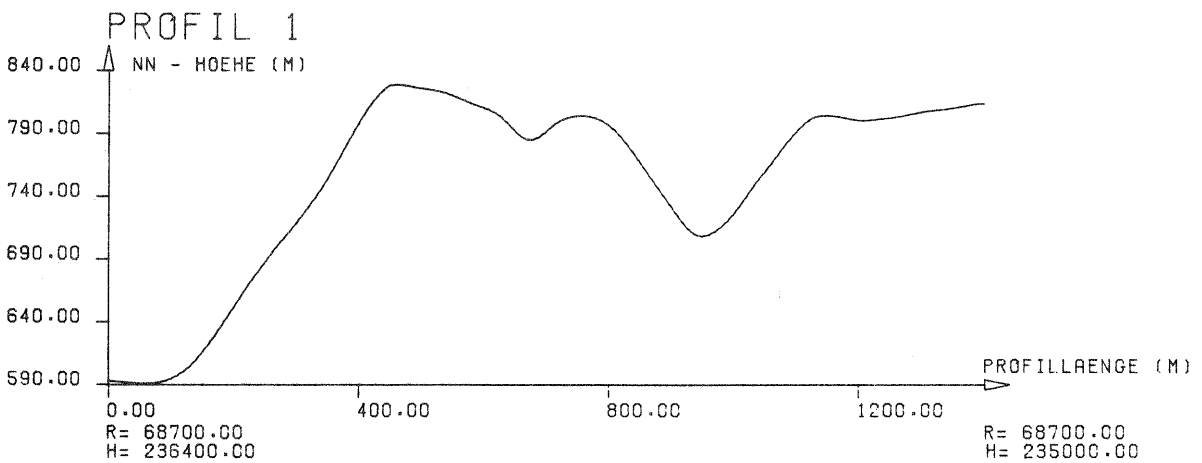
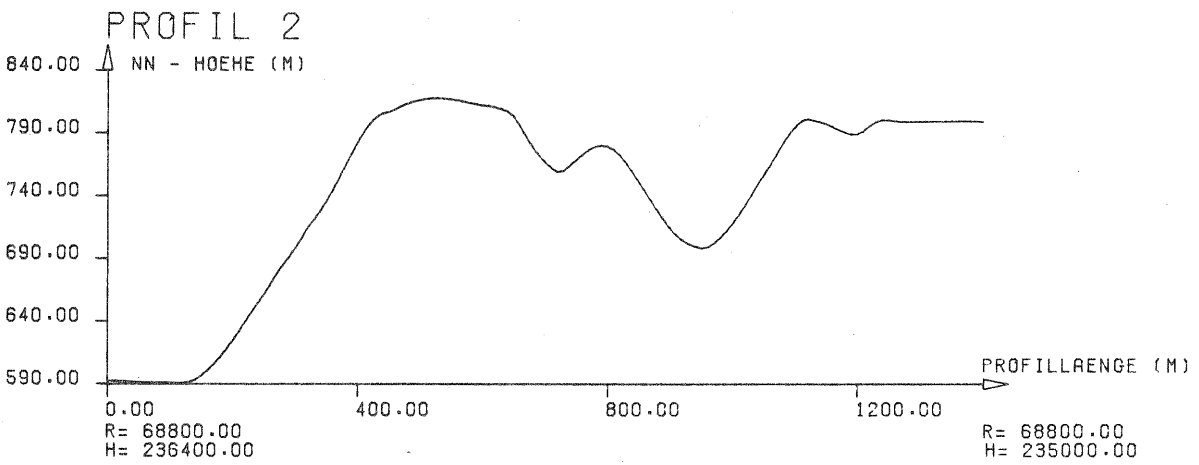
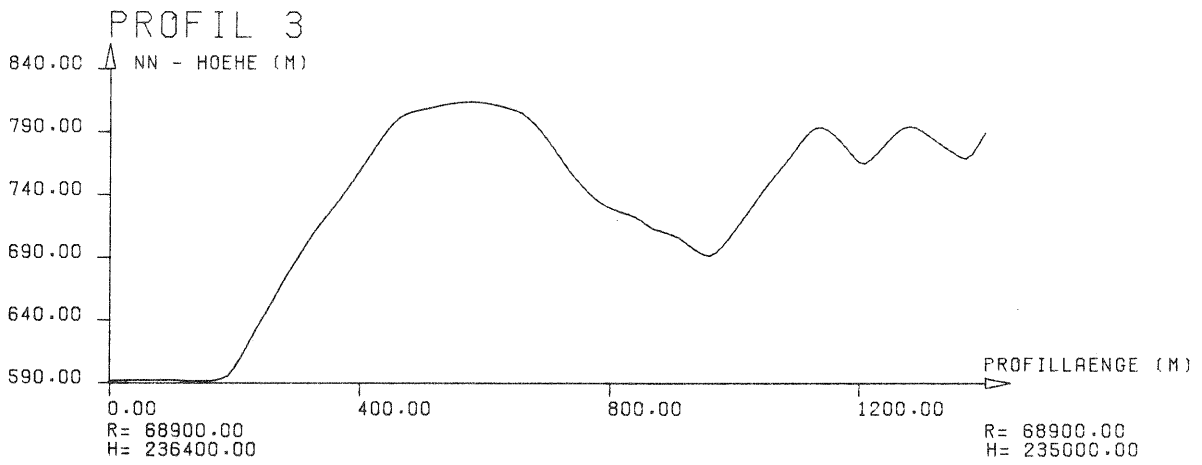
Kartenblatt Kartenmaßstab	Götzingen 1:2500	
	Kosten (DM)	(DM/ha)
<u>Rechnerisch abgeleitete Gefällstufenkarte</u>		
- Datenerfassung	330	4.1
- Rechenkosten		
Berechnung des DHM	1270	15.9
Berechnung des DNM	16	0.2
Ableiten von Gefällstufen	38	0.5
Zwischensumme	1654	20.7
- Zeichenkosten (Gravur am Coragraph DC 2 im Kartenmaßstab)	110	1.4
Summe	1764	22.1
<u>Felddaufnahme mit dem Freihandgefällmesser (Kontrollaufnahme)</u>		
- Feldarbeitszeit: ca. 4 Tage (1 Ingenieur mit 1 Techniker)	2016	25.2

Tab. 5-9 Herstellungskosten der Gefällstufenkarte des Kartenblattes Götzingen

Für die Zeichenkosten wurde die Angabe der Tabelle 5-7, die sich auf den Kartenmaßstab 1:5000 bezieht, auf den Kartenmaßstab 1:2500 näherungsweise umgerechnet.

Die Kosten für die Felddaufnahme der Abbildung 5-24 mit ca. 2000 DM liegen somit in derselben Größenordnung wie die rd. 1800 DM für die automatische Ableitung. Die Routineaufnahme verursacht mit ca. 700 DM ungefähr nur 1/3 dieser Kosten.

Wesentlich günstiger sieht ein Kostenvergleich für die automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte dann aus, wenn wir davon ausgehen können, daß ein digitales Höhenmodell bereits vorliegt, sei es, daß es zur Ableitung von Höhenlinien oder zur Berechnung von Massen bereits erstellt wurde, sei es, daß es in einer Datenbank vorliegt. Unter diesen Umständen fallen nur noch Rechenkosten von ca. 54 DM an, so daß sich die Gesamtkosten auf ca. 164 DM bzw. 2,1 DM/ha bearbeitete Fläche belaufen. In diesem Fall ist das automatische Verfahren auch deutlich kostengünstiger als die routinemäßige Felddaufnahme. Im Rahmen des Einsatzes eines digitalen Höhenmodells ist deshalb besonders zu berücksichtigen, daß sich der Rechenaufwand zur Erzeugung eines qualifizierten, engmaschigen Höhenmodells um so eher lohnt, je häufiger auf seine Höheninformation als Ausgangsinformation für Anwenderprogramme zurückgegriffen wird.



LAENGENMASSTAB 1/ 10000
HOEHENMASSTAB 1/ 5000

Abb. 5-31 Profile des Kartenblattes Ranggen

5.10 Ableitung von Profilen

Als Beispiel für die Ableitung von Profilen aus dem digitalen Höhenmodell werden für das Beispiel Ranggen einige parallele Profile berechnet und am Zeichenautomaten ausgezeichnet. In dem verwendeten Versuchsprogramm werden zunächst die Schnittpunkte des Profils mit den Rasterseiten des Höhenmodells berechnet. Die Höhen dieser Schnittpunkte werden dabei linear zwischen den beiden benachbarten Rasterhöhen eingerechnet. Die Höhenberechnung der Profilanfangs- und -endpunkte erfolgt mit Hilfe einer hyperbolischen Paraboloidfläche. Abbildung 5-31 zeigt die Auszeichnung der Profile am Calcomp-Plotter. Die einzelnen Schnittpunkte des Profils mit den Rasterseiten sind dabei geradlinig verbunden.

In Abhängigkeit vom Rasterintervall und der Höhengenaugigkeit des digitalen Höhenmodells besitzt ein rechnerisch abgeleitetes Profil eine Genauigkeit, die in der Regel mit der Genauigkeit eines sorgfältig tachymetrisch oder photogrammetrisch aufgenommenen Profils durchaus vergleichbar ist. Der Rechenaufwand ist als gering zu bezeichnen. Die Auszeichnung der Profile am Zeichenautomaten erfordert nur wenig Zeit.

Ein erster Vorteil der rechnerischen Ableitung von Profilen aus einem digitalen Höhenmodell gegenüber der tachymetrischen oder photogrammetrischen Profilaufnahme besteht darin, daß das digital vorliegende Ergebnis einschließlich des gewünschten graphischen Rahmens mit geringem Aufwand an einem Zeichenautomaten ausgezeichnet werden kann. Ein zweiter Vorteil ergibt sich dann, wenn durch Verschiebungen der Bezugsachse Umprofilierungen erforderlich werden. Je nach dem Maß der Veränderung dieser Achse kann dies bei tachymetrisch oder photogrammetrisch aufgenommenen Profilen eine Neuaufnahme der Profile erforderlich machen. Liegt im Interessenbereich der Achse jedoch ein digitales Höhenmodell vor, so erlaubt dies, für jede neue Achse die entsprechenden Querprofile mit gleich hoher Genauigkeit und geringem Aufwand abzuleiten.

5.11 Zusammenfassung

Unabhängig von den Zufälligkeiten und Mängeln, die bei den beschriebenen Versuchsauswertungen zur Ableitung von Gefällstufenkarten aufgetreten sind, kann festgehalten werden, daß eine automatisch hergestellte Gefällstufenkarte, die rechnerisch aus einem digitalen Höhenmodell mit 10 m Rasterintervall abgeleitet wird, hinsichtlich ihrer

- Genauigkeit mit einer sehr sorgfältigen konventionellen Feldaufnahme mit dem Freihandgefällmesser vergleichbar ist, hinsichtlich ihrer
- Vollständigkeit der Feldaufnahme als bester konventioneller Aufnahmeart in der Regel etwas überlegen ist und hinsichtlich ihrer
- Wirtschaftlichkeit auch dann einer sehr sorgfältigen konventionellen Feldaufnahme genähert entspricht, wenn das digitale Höhenmodell ausschließlich für die Ableitung der Neigungsinformation zu erstellen ist.

Dieses Ergebnis führt zu der Schlußfolgerung, daß es vertretbar und zu empfehlen ist, für Flurbereinigungsverfahren in bewegtem Gelände routinemäßig Gefällstufenkarten automatisch herzustellen. Dadurch wird es möglich,

- bessere Planungs- und Bewertungsgrundlagen für die Wertermittlung der land-

wirtschaftlich genutzten Flächen und für die wertgleiche Zuteilung der neuen Grundstücke bereitzustellen,

- günstigere Voraussetzungen für eine Einbeziehung der Geländeneigung in eine rechnerisch erstellte Gliederung des alten und neuen Bestandes zu schaffen und
- die Grundlage zu schaffen, um die Geländeneigung in einem teilautomatischen oder iterativ automatischen Zuteilungsentwurf mit zu berücksichtigen.

In Abschnitt 5.4 wurde darauf hingewiesen, daß die digitalen Höhenmodelle der vorliegenden Beispiele mit einer Programmversion von SCOP berechnet werden mußten, in welcher die Bruchkanten noch nicht linienhaft berücksichtigt werden können. Inzwischen ist die Programmversion mit strenger Berücksichtigung der Bruchkanten fertiggestellt, so daß damit genauere digitale Höhenmodelle berechnet werden können. Ob und gegebenenfalls in welchem Umfang die verbesserte Genauigkeit der Rasterhöhen und eine Berücksichtigung der Geländebruchkanten bei der Berechnung der Geländeneigung eine Vergrößerung des hier verwendeten Rasterintervalls von 10 m für die Ableitung von Gefällstufenkarten erlauben, muß in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

Unter dem Blickwinkel der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells auch in der Flurbereinigungsverwaltung erscheint es in Zukunft nicht mehr gerechtfertigt, den Aufwand zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells lediglich einer einzigen Anwendungsmöglichkeit voll anzurechnen. Bestenfalls kann nur ein angemessener Teil zur Anrechnung kommen. Zu überlegen wäre sogar, ob die Erstellung digitaler Höhenmodelle, die in genormter Form in einer Datenbank abgespeichert werden und die Höheninformation des bisherigen Landesgrundkartenwerkes in digitaler Form darstellen, nicht zu den hoheitlichen Aufgaben der Vermessungsverwaltung zu zählen ist. In diesem Fall könnte der Benutzer ebenso auf die Datenbank zurückgreifen, wie er bisher die Grundkartenwerke verwendet.

Rechenkosten für die Benutzer würden somit nur noch durch seine Anwenderprogramme entstehen. Die reinen Rechen- und Zeichenkosten z.B. für eine automatisch abgeleitete Gefällstufenkarte mit einer Fläche von 100 ha reduzieren sich dadurch umgerechnet auf den Arbeitslohn eines Technikers und eines Meßgehilfen für rund 4.5 Stunden. Auch bei der rechnerischen Ableitung von Profilen aus einem digitalen Höhenmodell fallen nur geringe Rechenkosten an.

Bei der digitalen Oberflächenmodellierung kann nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, daß ebenfalls nur geringe Rechenzeiten anfallen werden. Im Verhältnis zu dem zu erwartenden Nutzen, der durch eine optimierte Oberflächengestaltung mit verringerten teuren Erdbewegungen angestrebt wird, dürften sie sich jedoch auch in diesem Fall als gering erweisen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der untersuchte Einsatz eines digitalen Höhenmodells und der daraus abgeleiteten Größen zu besseren Planungsunterlagen und einer fundierteren Planung insgesamt führt. Im Vergleich mit konventionellen Techniken, die dafür in der Flurbereinigungsverwaltung bisher eingesetzt werden, erweist sich das rechnerische Verfahren insbesondere dann als kostengünstiger, wenn es in einem globalen System eines digitalen Geländemodells integriert ist und letzteres datenbankmäßig abgespeichert vorliegt.

Dritter Teil

EINSATZMÖGLICHKEITEN EINES DIGITALEN GELÄNDEMODells IM FLURBEREINIGUNGSVERFAHREN UND ZUSAMMENHANG MIT WEITEREN AUTOMATISIERUNGSTENDENZEN

Der Tätigkeitsbereich des Flurbereinigungsingenieurs hat durch die Einführung des Flurbereinigungsgesetzes (FlurbG) |55| im Jahre 1953 und in der Zeit danach eine wesentliche Erweiterung vom Umfang her und in geringerem Maße auch von seiner Art her erfahren.

Nach dem Feldbereinigungsgesetz von 1886 stand die Anlage eines Feldwegnetzes im Vordergrund des Verfahrens. Auf eine großzügige Zusammenlegung von Parzellen wurde meist kein großer Wert gelegt. Die Reichsumlegungsordnung von 1937 stellte demgegenüber die Zusammenlegung in den Vordergrund. Darüber hinaus ließ sie sowohl die Zuziehung von Ortslagen zum Verfahren als auch Landabzüge zur Aufbringung des Landes für gemeinschaftliche und öffentliche Anlagen, für die dem gemeinen Wohle dienenden Unternehmen, aber auch zur Deckung der Verfahrenskosten zu.

Wesentliche Merkmale der Flurbereinigung nach dem Flurbereinigungsgesetz |55| des Jahres 1953 sind denen der Umlegung nach der Reichsumlegungsordnung ähnlich. Das Flurbereinigungsgesetz paßt einerseits das für die Flurbereinigung geltende Recht an die Rechtsnormen des Grundgesetzes der Bundesrepublik Deutschland an und weitet andererseits seine Zielsetzung aus, indem z.B. der Katalog der öffentlichen Interessen, die im Verfahren zu wahren sind, wesentlich erweitert wird.

Das Gesetz zur Änderung des Flurbereinigungsgesetzes |56| aus dem Jahr 1976 definiert in seinem neu gefaßten § 1 die erweiterte Zielsetzung einer Flurbereinigung, wie sie sich bereits unter dem Flurbereinigungsgesetz aus dem Jahre 1953 entwickelte und die für die heutige integrale Flurneuordnung charakteristisch ist. Danach stellen die Verbesserung der Produktions- und Arbeitsbedingungen in der Land- und Forstwirtschaft, die Förderung der allgemeinen Landeskultur und die Förderung der Landentwicklung eigenständige Voraussetzungen zur Anordnung einer Flurbereinigung dar.

Während unter dem Begriff der Landeskultur früher vor allem die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit verstanden wurde, umfaßt er heute alle ökonomischen und ökologischen Aspekte, die im Zusammenhang mit der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung der Landschaft stehen. Die Landschaftspflege ist somit stärker betont worden.

Die dritte Aufgabe, die Förderung der Landentwicklung, soll einen Ausgleich der verschiedenartigen Interessen und Ansprüche an landwirtschaftlich genutzten Flächen herbeiführen, die insbesondere in stadtnahen Gebieten einer sorgfältigen Abstimmung bedürfen. Der weite Bogen dieses Neugestaltungsauftrages spannt sich somit von der Bodenordnung in Wald und Feld bis zur Dorferneuerung. Einen zusammenfassenden Katalog der vielfältigen Aufgaben und Ziele einer modernen Flurneuordnung enthält § 37 des Flurbereinigungsgesetzes.

Durch ihre erweiterte Aufgabenstellung werden die Flurbereinigungsverfahren insgesamt, insbesondere jedoch die Verfahren zur Bereitstellung von Land in großem

Umfang für Unternehmen nach § 87 FlurbG in Verbindung mit einem Normalverfahren nach §§ 1 und 37 FlurbG, immer komplexer und langwieriger. Gleichzeitig wird von politischer Seite die Forderung erhoben, die Verfahren zu beschleunigen und die Flächenleistung zu steigern.

Bei fast gleichbleibendem Personalstand und allmählich verkürzter Arbeitszeit war die Flurbereinigungsverwaltung von Anfang an bestrebt, unter Ausschöpfung der jeweils vorhandenen technischen Hilfsmittel soweit wie möglich zu rationalisieren und zu automatisieren. So entstanden in den vergangenen Jahren einzelne Glieder einer Automationskette, die Teilbereiche des gesamten Flurbereinigungsverfahrens, wie z.B. die Erstellung von Registern, Verzeichnissen und Auszügen, die Vermessungs- und Rechenarbeiten, die Kartier- und Zeichenarbeiten und das Finanzierungswesen umfassen. Die Lücken in dieser Automationskette gilt es nun Zug um Zug zu schließen.

Unter dem Blickwinkel dieser Entwicklung wird der Begriff der "Automation im Flurbereinigungsverfahren" in der vorliegenden Arbeit weitgehend auf die rechnerische Automation und damit auf den Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) beschränkt. Eine weitere Einschränkung erfolgt dadurch, daß der Einsatz der EDV, wie bereits in der Einleitung erläutert, auf das technische Verfahren der Flurbereinigung begrenzt wird.

Erster Ansatzpunkt für die Automation im Flurbereinigungsverfahren waren neben der Herstellung der Register und Verzeichnisse die vermessungstechnischen Arbeiten. Dabei handelte es sich anfangs um eine reine Übertragung der bis zu diesem Zeitpunkt angewandten Rechenabläufe auf die EDV (STEGMANN |200|). Wenn wir versuchen, die verschiedenen Stufen in der Entwicklung der Automation in der Flurbereinigung zu werten, so sind die angeführten Arbeiten einem sogenannten ersten Niveau zuzurechnen.

Der Einsatz selbstregistrierender elektronischer Tachymeter bei der Feldvermessung und leistungsfähiger photogrammetrischer Auswertegeräte mit automatischer Koordinatenregistrierung markiert den Übergang zur nächsten Stufe der rechnerischen Automation. Die Entwicklung der EDV zu höherer Rechengeschwindigkeit bei vermehrtem Kernspeicherplatz und leistungsfähigen externen Speichermöglichkeiten mit schnellem Zugriff schufen die erforderlichen Voraussetzungen, auch für vermessungstechnische Aufgaben Rechenprogramme zu entwickeln, die im Vergleich zu den Programmen des ersten Niveaus verfeinerte Ansätze erlauben und erst mit Hilfe der EDV vom Rechenumfang her überhaupt bewältigt werden können. Diese Programmsysteme werden im Sinne einer Wertung hier einem zweiten Niveau der Automation zugerechnet. Dazu zählen insbesondere die Bündel- und Blockprogramme zur Auswertung photogrammetrischer Messungen, aber auch die von ACKERMANN |3| vorgeschlagene Übertragung des Prinzips der unabhängigen Modelle auf die Polaraufnahme. Programmsysteme zur Auswertung großflächiger Polaraufnahmen auf der Grundlage modifizierter Blockprogramme (KRAUS und KRACK |119|) bzw. modifizierter Netzausgleichsprogramme (GRÜNDIG |71|) werden in der Flurbereinigungsverwaltung seit einiger Zeit auf ihre Einsatzmöglichkeiten hin erprobt (KLEIN |98|, SCHREYER |182|).

Zu diesem zweiten Niveau sind auch die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Programme zur digitalen Höhenverarbeitung zu rechnen, ebenso wie z.B. Programme zur Erstellung und Fortführung von Datenbanken, welche die Ausgangsinformationen für Anwenderprogramme bereitstellen.

Als zweiter Ansatzpunkt für die Automation sind die Zuteilungsberechnungen zu nennen. Bedingt durch die Vielzahl an Faktoren, welche nach den Vorschriften des Flurbereinigungsgesetzes bei der Zuteilung der neuen Grundstücke im Flurbereinigungsgebiet zu berücksichtigen sind, erstrecken sich bisherige Untersuchungen für einen automatischen Zuteilungsentwurf meist auf vereinfachte Verhältnisse mit wenigen Teilnehmern. Aufgrund der jeweiligen örtlichen Besonderheiten eines Flurbereinigungsgebietes ist es nach KLEMPERT [99] im Augenblick kaum denkbar, daß durch ein allgemeines Rechenprogramm allein ein vollautomatischer Zuteilungsentwurf entsteht, da dieses ein unvorstellbares Maß an Programmierarbeiten, Tätigkeiten bei der Aufbereitung der einzulesenden Daten (besondere Angaben, Anforderungen und Wünsche für jeden Teilnehmer) und an notwendigen Prüfungen erfordert. Die heute bekannten mathematischen Ansätze zur Lösung der äußerst komplexen Zusammenhänge, die bei der rechnerischen Erstellung eines Zuteilungsentwurfs zu berücksichtigen sind, liefern keine eindeutigen, sondern mehr oder weniger zufällige Ergebnisse. Zufriedenstellende Lösungsverfahren für automatische Zuteilungsentwürfe müssen deshalb nach Ansicht von KLEMPERT erst noch entwickelt werden.

Die hier angesprochene Vielfältigkeit der Zusammenhänge unterschiedlicher Faktoren ist kennzeichnend für die Aufgaben der planerischen Automation. Sie werden hier zum dritten Niveau der Automation gerechnet.

Für die heutigen Anforderungen an die Automation in der Flurbereinigung sind hauptsächlich zwei Entwicklungen bestimmend: Zum einen eine inhaltliche Aufgabenausweitung der integralen Flurneuordnung, wie sie sich aus dem novellierten § 1 des Flurbereinigungsgesetzes ergibt, und zum anderen höhere qualitative Ansprüche an die Planungen in der Flurbereinigung, die einer zunehmend kritischer werdenden Einstellung der betroffenen Bürger und einem verstärkten Umweltbewußtsein standhalten und ihm dienen müssen.

Die zunehmende Beurteilung größerer Eingriffe in die Landschaft auf ihre Umweltverträglichkeit hin bedeutet zum Beispiel, daß eine Straßen- oder Wegeplanung nicht schon dann als hinreichend angesehen werden kann, wenn rein technische Bedingungen, wie z.B. Erdmassenausgleich, minimale Streckenlänge oder ein Minimum an verlorenem Höhenunterschied, erfüllt sind, gleichzeitig aber landschaftlich oder ökologisch wertvolle Flächen in Anspruch genommen oder zerstört werden. Aus der Forderung heraus, die Auswirkung einer Maßnahme auf die Umwelt bereits bei der Planung abzuschätzen und zu berücksichtigen, ist der Planer heute in weit größerem Umfang als früher gezwungen, verschiedene Planungsvarianten zu erarbeiten. Diese Varianten sind auf jeder Planungsstufe nach den vorgegebenen Kriterien zu beurteilen und durch erneute Änderungen weiter zu verfeinern, bis als Planungsergebnis ein optimaler Kompromiß zwischen den verschiedenen vorgegebenen, oft recht widersprüchlichen Forderungen erreicht ist.

Voraussetzung für diese Art von Planung ist, daß der Planer durch technische Hilfsmittel in die Lage versetzt wird, eine Vielzahl von Varianten mit vertretbarem Aufwand zu erarbeiten. Neben der Datenerfassung sind dabei hauptsächlich die meist umfangreichen Berechnungen angesprochen, die zur Erarbeitung einer einzigen Variante erforderlich sind. Ermöglicht wird die Berechnung dieser Vielzahl von Varianten heute durch den Einsatz der EDV, deren hohe Rechengeschwindigkeiten eine wirtschaftliche Durchführung und deren programmierbarer Berechnungsablauf eine praktikable Durchführung ermöglichen.

Die Möglichkeiten der EDV haben sich in den vergangenen Jahren durch die Verbilligung der Rechenkosten und die Miniaturisierung der Speicher stark erweitert. Dadurch können heute sehr große Datenmengen wirtschaftlich verarbeitet werden. Aufgaben, die zum zweiten Niveau zu rechnen sind, wie z.B. die Ableitung von Höhenlinienplänen oder Gefällstufenkarten, können heute mit Hilfe der EDV automatisch durchgeführt werden. Ebenso sind die Voraussetzungen zur digitalen Weiterverarbeitung von Höhen- und Neigungsinformationen, wie sie im Verlauf eines Flurbereinigungsverfahrens anfallen, durch die EDV geschaffen.

Die Einbindung dieser und weiterer Einzelinformationen in Programmsysteme der planerischen Automation des dritten Niveaus erfordert zusätzlich mathematische Modelle, welche die gegenseitige Abhängigkeit der verschiedenen Einzelfaktoren hinreichend beschreiben und damit die Veränderung der Vorgaben bei der Berechnung von Planungsvarianten ermöglicht. Programmsysteme des dritten Niveaus im Bereich der planerischen Automation befinden sich heute im Entwicklungs- und Erprobungsstadium. Aufgrund der Vielschichtigkeit dieser Programmsysteme scheint es heute weder sinnvoll noch wünschenswert zu sein, vollautomatische Programmabläufe anzustreben. Vielmehr scheinen teilautomatische Abläufe mit interaktiven Eingriffsmöglichkeiten des Planers mehr Aussicht auf Erfolg zu bieten.

Auf der Grundlage des derzeitigen Standes der Automation in der Flurbereinigung, der Anforderungen, die an die Automation zu stellen sind, sowie der heutigen und der zu erwartenden zukünftigen Möglichkeiten der EDV wird die Aufgabenstellung für den dritten Teil dieser Arbeit entwickelt: Die gegenwärtigen Einsatzmöglichkeiten des digitalen Geländemodells im Flurbereinigungsverfahren sollen untersucht und mögliche zukünftige Entwicklungstendenzen in der rechnerischen Automation unter Einbeziehung des digitalen Geländemodells aufgezeigt werden.

Dazu wird zuerst in Kapitel 6 ein Überblick über die Automation im technischen Verfahren der Flurbereinigung in den vergangenen Jahren gegeben und erläutert, auf welche Art und Weise diejenigen Verfahrensabschnitte bisher bearbeitet werden, für die im folgenden 7. Kapitel der Einsatz des digitalen Geländemodells untersucht wird. In Kapitel 7 erfolgt eine ausführliche Beschreibung der Einbindung des digitalen Geländemodells in das Flurbereinigungsverfahren und der heute realisierbaren Einsatzmöglichkeiten. Auswirkungen auf andere Verfahrensabschnitte werden kurz gestreift. Ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten bei der planerischen Automation unter Verwendung des digitalen Geländemodells schließt sich in Kapitel 8 an.

Für diesen dritten Teil insgesamt sei vorweg angemerkt, daß die einzelnen angesprochenen Verfahrensabschnitte nicht abschließend behandelt werden können.

6. Gegenwärtiger Stand der Automation im technischen Verfahren der Flurbereinigung

Einen umfassenden Überblick über die Entwicklung und den Einsatz der Automation bei der Durchführung der Flurbereinigung in der Bundesrepublik Deutschland vom Beginn im Jahr 1956 bis zum Jahr 1972 gibt LANG [122]. Bei der Beschreibung der Einführung der Automation beschränkt er sich nicht nur auf den Bereich der EDV, sondern er behandelt ebenso ausführlich die Entwicklung der Kartiergeräte bis zu den rechnergesteuerten Zeichenautomaten, der Flächenermittlungsgeräte bis zum rechnergestützten Digitizer, der Vermessungsgeräte vom Code-Theodolit bis zu den ersten registrierenden elektronischen Tachymetern und der Photogrammetrie in Verbindung mit der EDV.

Die Auswirkungen des Einsatzes der Automation in der Flurbereinigung werden anhand der Verhältnisse in Hessen untersucht. Den Zeitaufwendungen, die vor Einführung der Automation bis 1951 erforderlich waren, werden die Zeiten gegenübergestellt, die für dieselben Abschnitte mit den um 1970 angewandten Verfahren benötigt werden. Für die vier Arbeitsabschnitte technisch-planerische Arbeiten, vermessungs- und katastertechnische Arbeiten, rechtlich-verwaltungsmäßige Arbeiten und Allgemeines ermittelt LANG für den Zeitraum vor 1951 einen Zeitaufwand von insgesamt 1201 Tage/100 ha landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) gegenüber 844 Tagen im Jahr 1970. Dies bedeutet eine Zeiteinsparung von ca. 30 Prozent. Bei seinem Ausblick auf künftige Entwicklungstendenzen betont er, daß eine wesentliche Verfahrensänderung oder -beschleunigung nur durch eine völlig neue Methodik erreichbar sein wird, die jedoch im Jahre 1972 nicht abzusehen war.

Zu dem Zeitvergleich von LANG ist einschränkend zu bemerken, daß einerseits ein Arbeitstag vor 1951 mit demjenigen um 1970 wegen der verkürzten Arbeitszeit sicherlich nur noch bedingt vergleichbar ist und andererseits auch die erweiterte Zielsetzung einer Flurbereinigung im Jahre 1970 berücksichtigt werden muß. Zugestimmt werden kann LANG, wenn er davon ausgeht, daß im technischen Bereich der Flurbereinigung noch einige Beschleunigungen und Verbesserungen möglich sind. Diesen Möglichkeiten stehen jedoch im administrativen Bereich beträchtliche Erschwernisse und Verzögerungen durch neue Gesetze und Vorschriften und nicht zuletzt durch weitere Arbeitszeitverkürzungen gegenüber. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß die Beschleunigung des Flurbereinigungsverfahrens, die durch die Automation im technischen Bereich zu erwarten ist, die Verzögerungen im administrativen und planerischen Bereich wenigstens zum Teil ausgleichen wird. Eine erhöhte Flächenleistung der Flurbereinigungsverwaltung in Form von mehr Hektaren bereinigter Fläche pro Jahr ist jedoch kaum zu erwarten.

Auf die Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung speziell in der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg gehen SCHREYER [182] und WAHL [217] ein. SCHREYER erläutert dabei die gesamte Entwicklung der Aufnahme- und Rechenverfahren für die vermessungstechnischen Arbeiten in Baden-Württemberg einschließlich der jeweils gültigen technischen Vorschriften. Er hebt hervor, daß die Einführung der Automation mittels Lochkartenmaschinen durch die Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg im Jahr 1956 richtungsweisend für die Flurbereinigungs- und Vermessungsverwaltungen im In- und Ausland war. Dadurch war es

möglich, die Flurbereinigungsregister automatisch zu erstellen und die im Verfahren üblicherweise anfallenden Berechnungen automatisch durchzuführen.

WAHL |217| geht darüber hinaus auf den praktischen Einsatz der EDV bei der Flurbereinigungsverwaltung ein. Dazu beschreibt er die zur Datenerfassung eingesetzten Geräte und Methoden, behandelt die Datenspeicherung samt Fortführung und die eigentliche Datenverarbeitung. Im Zusammenhang mit der photogrammetrischen Höhenauswertung schlägt er vor, Höhenlinien beim Abfahren am Analoggerät gleichzeitig zu digitalisieren, auf Magnetband abzuspeichern und mit diesem digitalen Geländemodell z.B. Erdmassen zu berechnen.

ABB |1| gibt einen Überblick über die Tätigkeit der "Arbeitsgemeinschaft für das technische Verfahren der Flurbereinigung im Bundesgebiet (AtVF)" von ihrer Gründung 1951 bis zum Jahr 1974. Ein Schwerpunkt ist dabei die Entwicklung des Einsatzes der Automation, bevorzugt die Anwendung der EDV.

KERSTING |97| berichtet über den Einsatz der EDV bei der Landeskulturverwaltung in Rheinland-Pfalz. Nach seiner Meinung sind die wichtigsten Verfahrensabschnitte mit Ausnahme der Planung automatisiert. Es verbleiben noch einzelne Arbeitsgänge, wie z.B. die Übertragung der Wertermittlung von der Karte des alten Bestandes in die Zuteilungskarte, die noch automatisiert werden könnten. Allerdings erscheint es KERSTING nicht sicher, ob der dafür erforderliche Aufwand gerechtfertigt ist. Ausführlich geht er auf die automatische Ermittlung von Flächen aus vorgegebenen Werten ein, was er als Zuteilungsberechnung bezeichnet. Praktisch durchgeführt wird dies, indem Elemente mit gleichen Werten gebildet werden. Im Vergleich zum Vorgehen in Bayern werden jedoch breitere Lamellen gebildet. Diese Zuteilungsberechnung selbst ist als Vorstufe zum automatischen Zuteilungsentwurf zu betrachten.

Die Probleme und Methoden bei der Erarbeitung von Rechenprogrammen für die Erstellung des Zuteilungsentwurfs behandelt KLEMPERT |99|. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchung wird in den Abschnitten 6.5 und 6.7 näher eingegangen werden.

Einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten der Automation in der Flurbereinigung gibt ABB |2|. Unter dem Eindruck des starken Vordringens der registrierenden elektronischen Tachymeter bei der terrestrischen Vermessung geht er davon aus, daß sich die Photogrammetrie zukünftig verstärkt auf die Interpretation, Planungshilfe und Höhen- und Profilauswertung konzentrieren wird. Ein Schwerpunkt wird die Erfassung digitaler Geländemodelle als Grundlage für Höhenpläne, Geländeprofile und Flächen gleicher Geländeneigung sein. Verbesserte Planungsunterlagen können durch die Fertigung kartenergänzender Planungs- und Wertermittlungsunterlagen mit Hilfe von Luftbildern hergestellt werden. Dazu eignen sich besonders maßstabsgerechte Orthophotokarten mit Eindruck des alten Grundstücksbestandes, der Höhenlinien, der Lage photogrammetrisch ermittelter Querprofile und Flächen gleicher Geländeneigung. Auf dieser Grundlage kann auch die Planung und Ausführung von Baumaßnahmen verbessert werden,

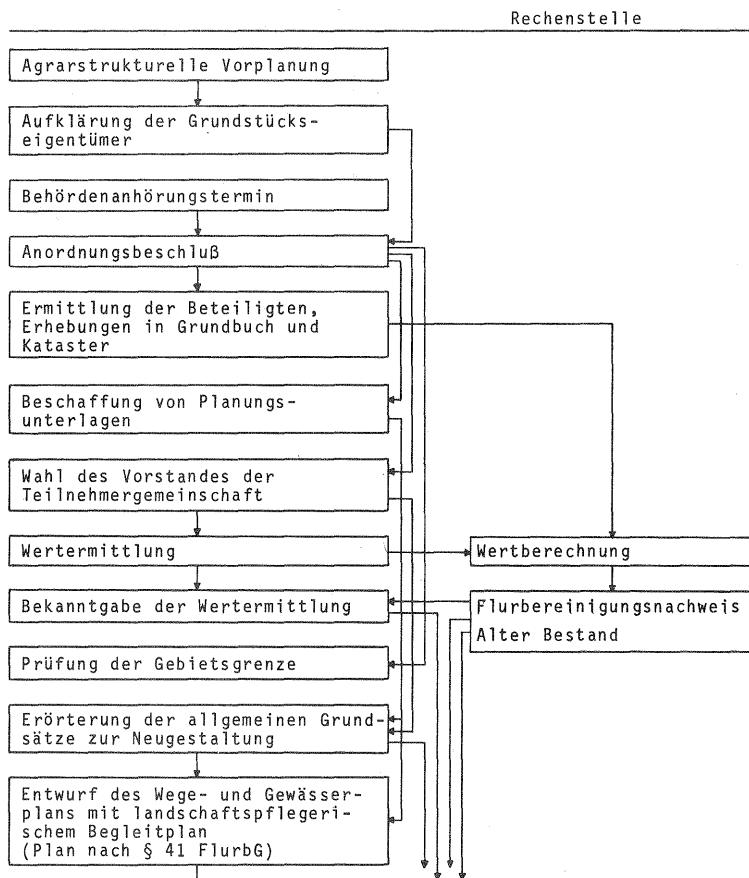
Was die Bewältigung der immer umfangreicher werdenden Register- und Rechenarbeiten betrifft, so geht ABB ebenso wie LANG davon aus, daß in Zukunft sämtliche Daten eines Verfahrens in einer Datenbank gespeichert werden, Zur Verarbeitung

dieser Information werden vermehrt Datenfernübertragung und interaktive Bildschirme eingesetzt werden.

Bei den Planungsaufgaben, wie dem Entwurf des Wege- und Gewässernetzes oder dem Zuteilungsentwurf, wird der interaktive Bildschirm dem planenden Ingenieur die Kommunikation mit der Rechenanlage erleichtern. Bei der Neuanlage von Fernsprecheinrichtungen der Flurbereinigungsbehörden in Bayern sollen darüber hinaus bereits neue Kommunikationssysteme berücksichtigt werden, die es erlauben, mit Hilfe eines speziellen Tastenwahl-Fernsprechapparates den Benutzer einer Rechenanlage unmittelbar an diese anzuschließen. Der Dialog zwischen Benutzer und EDV-Zentrale wird sich dann in der Regel wie im Gespräch abwickeln. Eine Sprachausgabereinheit der Rechenanlage wird die akustische Antwort geben.

Bei der Riß- und Kartenherstellung wird der exakt und schnell arbeitende Elektronenstrahlplotter nach Ansicht von ABB neue Möglichkeiten für die automatische Kartierung eröffnen.

Bevor nun für einzelne Arbeitsabschnitte der heute übliche Arbeitsablauf beschrieben wird, soll vorweg eine vereinfachte Übersicht über den Ablauf eines Flurbereinigungsverfahrens mit seinen wichtigsten Stationen gegeben werden. Das folgende Blockdiagramm (Abb. 6-1) ist insoweit auf die Verhältnisse der Flurbereinigungsverwaltung in Baden-Württemberg abgestimmt, als es diejenigen Aufgaben, welche bisher bei der Rechenstelle des Landesamtes für Flurbereinigung und Siedlung bearbeitet werden, wie z.B. Digitalisieren, elektronische Datenverarbeitung und automatisches Kartieren, in der rechten Spalte getrennt ausweist.



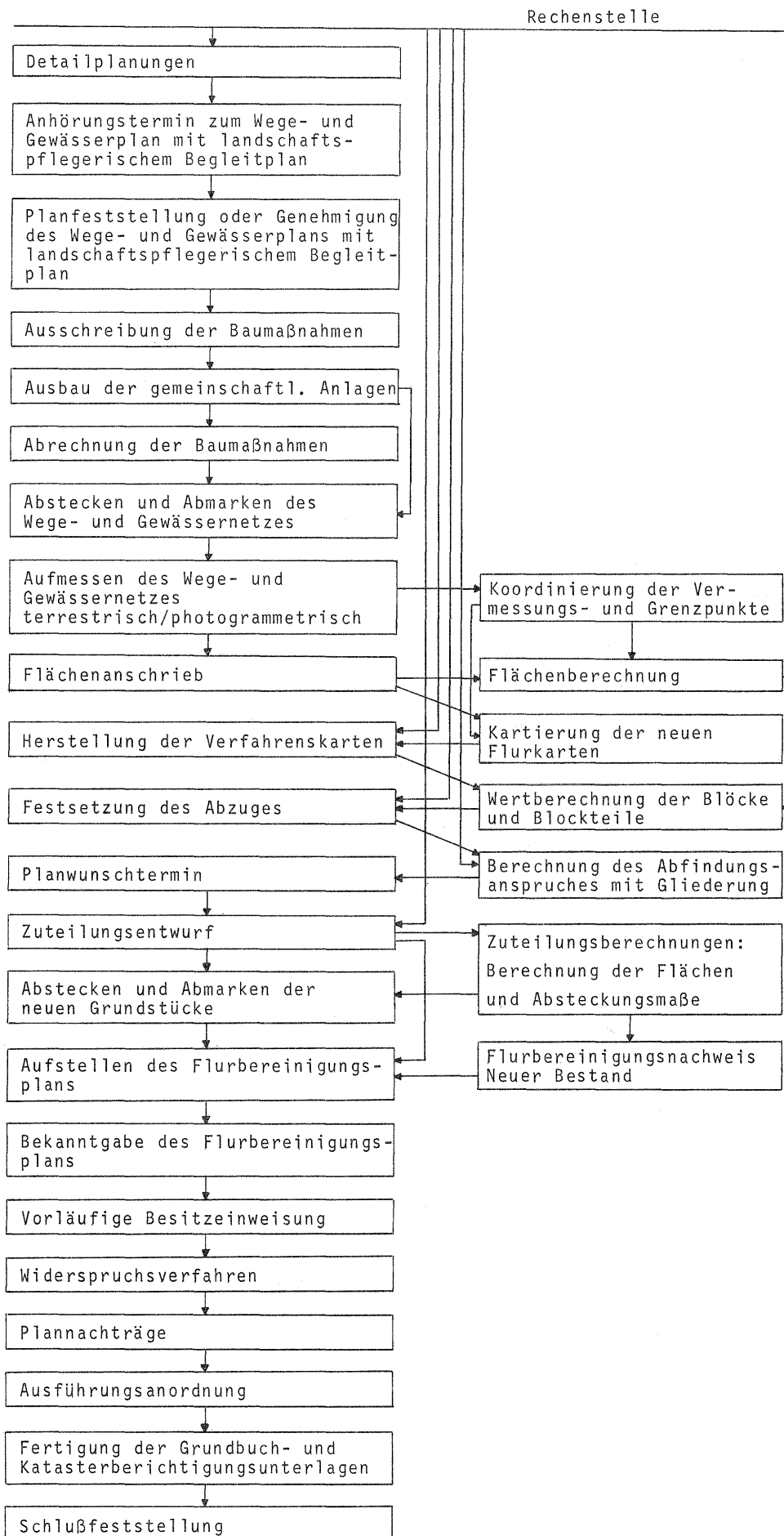


Abb. 6-1 Ablaufstruktur einer Flurbereinigung

Haupteinsatzgebiete der EDV sind bisher im technischen Verfahren die Erstellung von Registern, Verzeichnissen und Auszügen und die vermessungs- und kataster-technischen Arbeiten. Sie gliedern sich hauptsächlich in folgende drei Gruppen:

Vermessungstechnische Berechnungen

- Koordinierung der Vermessungs- und Grenzpunkte im neuen Bestand,
- Berechnung von Absteckungsmaßen der neuen Grundstücke,

Wert- und Flächenberechnungen

- Wertberechnung zur Erstellung des Nachweises alter Bestand,
- Wert- und Flächenberechnung der neuen Blöcke und Blockteile,
- Wert- und Flächenberechnung im Zuge des Zuteilungsentwurfes,

Erstellen von Registern und Verzeichnissen, z.B.

- Flurbereinigungsnachweise des alten Bestandes,
- Abfindungsanspruch mit Gliederung,
- Flurbereinigungsnachweise des neuen Bestandes.

Abgesehen von der Aufstellung der Register und Verzeichnisse handelt es sich mehr oder weniger ausschließlich um die Auswertung von Lagevermessungen und um Lageberechnungen. Die Bestimmung der dritten Dimension, der Höhe, erfolgt in der Flurbereinigungsverwaltung bisher durch Analogauswertung. Entweder liegt die Höheninformation in Form einer Höhenlinienkarte bereits vor oder sie wird am photogrammetrischen Analogauswertegerät graphisch in Form von Höhenlinien oder Profilen ausgewertet. Auch bei der Herstellung von Orthophotos wird in der Flurbereinigungsverwaltung die Höheninformation analog verarbeitet, wenn entweder Profile im photogrammetrischen Modell abgefahren oder im Lesegerät des Orthoprojektors von einer Speicherplatte abgetastet werden.

Soll neben der Lage auch die Höheninformation in die rechnerische Automation einbezogen werden, so kann dies nur dadurch erfolgen, daß das bisherige analoge durch ein digitales Verfahren ersetzt wird. Ein geeignetes Hilfsmittel für die rechnerische Verarbeitung derartiger flächenhaft verteilter Informationen ist ein digitales Geländemodell, speziell auf die Verarbeitung der Höheninformation bezogen ein digitales Höhenmodell.

Hauptziel der Untersuchungen der Kapitel 6 und 7 ist es, eine geschlossene Automationskette für die digitale Höhenverarbeitung zu entwerfen, die sich von der digitalen Datenerfassung über die rechnerische Verarbeitung bis zum numerischen Zwischenergebnis als Ausgangsinformation für Anwenderprogramme oder zur automatischen Kartierung erstreckt. Darüber hinaus wird untersucht, in welchem Umfang sich der Einsatz eines digitalen Geländemodells über die Höheninformation hinaus auf abgeleitete Größen, wie z.B. die Geländeneigung, oder auf andere Arbeitsbereiche übertragen läßt. Dazu werden im einzelnen diejenigen Verfahrensabschnitte eines Flurbereinigungsverfahrens behandelt werden, für welche der Einsatz eines digitalen Geländemodells möglich erscheint oder welche im Zusammenhang mit dem Einsatz eines digitalen Geländemodells zu sehen sind.

Im vorliegenden 6. Kapitel wird für dieselben Arbeitsabschnitte, für die im 7. Kapitel der Einsatz eines digitalen Geländemodells untersucht wird, die Art und Weise der Bearbeitung beschrieben, wie sie bisher üblich ist. Dies bedingt, daß nur auf einzelne, in diesem Zusammenhang relevante Verfahrensabschnitte eingegangen wird. Ihre Stellung und Bedeutung im gesamten Verfahrensablauf der Flurbereinigung kann aus dem Blockdiagramm der Abbildung 6-1 entnommen werden. Für die beschriebenen Arbeitsabschnitte werden in erster Linie die Verhältnisse bei der Flurbereinigungsverwaltung in Baden-Württemberg zugrunde gelegt.

6.1 Beschaffung von Planungsunterlagen

Unter Planungsunterlagen, wie sie für die technische Ausführung eines Flurbereinigungsverfahrens benötigt werden, sind großmaßstäbige topographische Karten und Pläne zu verstehen, die Informationen über Lage und Höhe enthalten. In Baden-Württemberg werden dazu die großmaßstäbigen Landesgrundkartenwerke herangezogen, die sich, bedingt durch die unterschiedliche Entwicklung der Landesvermessungen in den ehemaligen Landesteilen Baden, Württemberg und Hohenzollern, hinsichtlich Maßstab, Inhalt, Blattschnitt, Genauigkeit und Alter unterscheiden.

Im ehemals badischen Landesteil wurden die Katasterkarten als Rahmenkarten im Maßstab 1:1500 oder 1:2000 angelegt. Eine großmaßstäbige Höhenaufnahme fehlt. Nach der Entscheidung, für den gesamten Landesteil Baden mit der Deutschen Grundkarte 1:5000 ein einheitliches Grundkartenwerk herzustellen, wurde mit der Katasterplankarte eine Zwischenlösung geschaffen, die wenigstens eine einheitliche Darstellung des Katastergrundrisses enthält. Die Deutsche Grundkarte ergibt sich nach Durchführung der Höhenauswertung als Zusammendruck der Katasterplankarte mit der kombinierten Höhenauswertung und Grundrißergänzung. Höhenauswertung und Grundrißergänzung werden überwiegend auf photogrammetrischem Wege, in Waldgebieten durch terrestrische Messungen gewonnen. Die erreichte Genauigkeit der Höhendarstellung liegt bei ca. 30 cm (RIEDINGER [169]). Bis Ende 1977 war die Deutsche Grundkarte und damit auch die Höhenauswertung für ca. 50 % der rund 4120 Blätter fertiggestellt, die auf den Landesteil Baden entfallen.

Im ehemals württembergischen Landesteil liegt die Flurkarte, die den Katastergrundriß enthält, als Rahmenkarte einheitlich im Maßstab 1:2500 vor. Eine Kombination der aktualisierten Grundrißfolie mit der Höhenfolie ergibt die Höhenflurkarte im Maßstab 1:2500. Diese Höhenauswertung liegt fast für den gesamten württembergischen Landesteil vor. Je nach dem Zeitpunkt der Aufnahme der einzelnen Blätter weist sie eine unterschiedliche, zum Teil unbefriedigende Höhengenaugigkeit auf. Nach HAMPEL [75] genügt etwa ein Zehntel der Höhenflurkarten nicht mehr modernen Genauigkeitsanforderungen.

Für das ehemals preußische Gebiet Hohenzollern-Sigmaringen war keine großmaßstäbige Höhenaufnahme durchgeführt worden. Die photogrammetrische Bearbeitung der Höhenflurkarte begann deshalb hier ab 1963. Waldgebiete werden terrestrisch aufgenommen. Bei einer Äquidistanz von 10 m und Zwischenkurven im Abstand von 5 m, 2,5 m und 1,25 m liegt die Höhengenaugigkeit der photogrammetrisch gewonnenen Höhenlinien ungefähr bei 25 cm. Im Gebiet Hohenzollern-Sigmaringen waren Ende 1978 noch ca. 50 Blätter der Höhenflurkarte 1:2500 auszuwerten, was ein

knappes Jahr beansprucht. Anschließend kann mit der Herstellung der Höhenflurkarte im Grenzbereich der Kartenwerke 1:2500 und 1:5000 entlang der ehemaligen Landesgrenze begonnen werden (RIEDINGER |169|). Eine Neuaufnahme derjenigen Blätter der Höhenflurkarte mit unzureichender Höhengenaugigkeit könnte sich anschließen.

Liegt bei der Anordnung eines Flurbereinigungsverfahrens noch keine großmaßstäbige Höhenkarte vor, so wird von der Luftbildstelle des Landesamtes für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg eine photogrammetrische Höhenlinienauswertung vorgenommen (Erstbefliegung). In Einzelfällen kommt auch eine terrestrische Aufnahme in Frage, wenn sich z.B. eine Befliegung nicht lohnt oder wenn bewaldete Flächen mit auszuwerten sind. Gleichzeitig mit den Höhenlinien werden auch Böschungen, Raine und Geländekanten kartiert.

Zur Projektierung größerer ingenieurbau technischer Maßnahmen, wie z.B. zum Entwurf der Planierungen bei Rebflurbereinigungen, werden in Baden-Württemberg meist zusätzlich Querprofile aufgenommen. Sie werden überwiegend photogrammetrisch bestimmt.

Eine Alternative zur topographischen Ergänzung der Katasterkarte und zur Katasterkarte als Strichkarte überhaupt stellt das Orthophoto dar. In der Form eines Orthophotoplans findet es dank seiner aktuellen und detailreichen Wiedergabe und der guten geometrischen und maßstäblichen Darstellung der Situation eine zunehmende Verbreitung. So werden bei der Landeskulturverwaltung Rheinland-Pfalz Orthophotopläne mit einkopierten Höhenlinien bereits seit 1967 routinemäßig den Kulturämtern zur Verfügung gestellt (KERSTING |96|). Auch bei der Flurbereinigung in Bayern wird der Orthoprojektor seit 1972 eingesetzt (HENZLER |85|, RAHN und HENZLER |166|).

Welch große Bedeutung der Güte der Kartengrundlagen bei der Durchführung einer Flurbereinigung zukommt, ergibt sich schon allein daraus, daß sie u.a. die Unterlagen für den Entwurf des Wege- und Gewässerplanes mit landschaftspflegerischem Begleitplan (Plan nach § 41 FlurbG) bilden. Je detaillierter und genauer die Planungsunterlagen sind, um so besser kann der Entwurf im Büro vorbereitet und nach der örtlichen Begehung ausgearbeitet werden, um so mehr Feldarbeit kann eingespart werden. Auch bei der Verwendung der Karten als Bodenwertriß macht sich ein aktueller Kartenstand bezahlt. Die Eintragung der Wertermittlung im Feld wird wesentlich erleichtert, auf einen vorherigen Feldvergleich kann weitgehend verzichtet werden.

Entscheidend auf die Höhengenaugigkeit kommt es insbesondere dann an, wenn auf der Grundlage der Höhenflurkarte Dränentwürfe gefertigt werden sollen. Während die Genauigkeit neuerer photogrammetrischer Höhenauswertungen normalerweise ausreicht, können sich bei älteren Höhenflurkarten u. U. Schwierigkeiten ergeben. Ähnliches gilt für die Massenberechnung auf der Grundlage von Höhenlinien.

Bisher erfolgt die Höhenauswertung ausschließlich mit dem Ziel, die Höheninformation graphisch, d.h. in analoger Form, durch Höhenlinien oder Profile darzustellen. Eine Weiterverarbeitung der Geländehöhen erfolgt manuell, wenn z.B. aus Profilen Erdmassen oder aus Höhenwerten die Geländeneigung abgeleitet wird. Dem-

gegenüber ist eine automatische Verarbeitung der Höheninformation auf rechnerischem Wege nur möglich, wenn die Erfassung und Speicherung der Daten digital erfolgt.

Vom Aufwand der Datenerfassung her sind die direkte photogrammetrische Höhenlinienkartierung und die Digitalisierung eines photogrammetrischen Modells ungefähr vergleichbar, wie in Abschnitt 7.1 dargelegt werden wird. Unter dem Gesichtspunkt einer automatischen Weiterverarbeitung der Höheninformation zu abgeleiteten Größen, wie z.B. zu Erdmassen oder Geländeneigungen, ist die digitale Höhenerfassung dank der Erstellung eines digitalen Höhenmodells wesentlich flexibler. Darüber hinaus kann sie z.B. mit der digitalen Geländemodellierung neue Hilfsmittel zur Unterstützung des Flurbereinigungsingenieurs bei der Entwurfsarbeit anbieten.

6.2 Planung und Ausführung ingenieurbautechnischer Maßnahmen

Die Planung ingenieurbautechnischer Maßnahmen ist ein Bestandteil des Entwurfs des Wege- und Gewässerplans mit landschaftspflegerischem Begleitplan bzw. der Detailplanung. Die Bauausführung gehört nach dem Blockdiagramm über die Ablaufstruktur einer Flurbereinigung (Abb. 6-1) zum Ausbau der gemeinschaftlichen Anlagen.

Baumaßnahmen kleineren Umfangs treten mehr oder weniger in jedem Flurbereinigungsverfahren auf, so z.B. beim Ausbau befestigter landwirtschaftlicher Wege. Diese Wege sollen die Fluren ausreichend erschließen, wirtschaftlich geformte Blöcke bilden, in hügeligem Gelände sollen u.a. vorgegebene Höchststeigungen nicht überschritten werden und die Wegeföhrung soll sich harmonisch in die Landschaft einfügen, Hierbei wird meist auf eine Detailplanung verzichtet. Die Baumaßnahmen werden statt dessen an Ort und Stelle abgesteckt. Die örtliche Überprüfung der Maßnahme während der Bauausführung kann im Einzelfall zu kleineren Korrekturen föhren, wobei § 41 Abs. 4 FlurbG zu beachten ist.

Bei umfangreichen Baumaßnahmen, wie sie z.B. bei Rebflurbereinigungen meist anfallen, sind Detailplanungen unumgänglich. Sie werden bisher in der Regel auf der Grundlage von Querprofilen halbgraphisch durchgeföhrt. Dabei werden die zu bewegenden Massen zunächst näherungsweise ermittelt und ein Massenausgleich, bzw. ein Massenüberschuß oder -defizit, bei möglichst kleinen Transportwegen angestrebt. Neben örtlichen Gegebenheiten, wie z.B. den Eigenschaften des Bodens, und Zwangspunkten, wie z.B. vorhandenen Wasser- oder Gasleitungen, Masten von Hochspannungsleitungen oder zu erhaltenden Landschaftsbestandteilen, sind noch verschiedene empirisch gewonnene Erfahrungswerte zu beachten, so z.B., daß

- die Kosten bei Massenbewegungen von oben nach unten geringer sind als bei horizontalem Transport (ca. 15 - 20 % Einsparung möglich),
- die Bodentransportwege möglichst 50 - 100 m nicht überschreiten sollten (v. FIGURA [48]), da sonst die Planierdraupe durch Großbaugeräte wie Schurfkübel zu ersetzen ist, die höhere Kosten verursachen,
- die Kosten, die für die umfangreichen Massenbewegungen zur Erzielung größerer Gewanne oft erforderlich sind, diejenigen für den Bau zusätzlicher Einteilungswege bei kleinerer Gewannlänge, verbunden mit geringeren Massenbewegungen, übersteigen können.

Dies zeigt, daß umfangreiche Massenbewegungen nicht getrennt von den nachfolgenden Wege- und Wasserbaumaßnahmen beurteilt werden dürfen.

Entsprechend den vorgegebenen Anforderungen wird der halbgraphisch erstellte Bauentwurf so lange korrigiert, abgeändert und optimiert, bis ein zufriedenstellender Kompromiß zwischen den verschiedenen Forderungen erreicht ist. Dieser Entwurf wird der Ausschreibung der Baumaßnahme und der Bauausführung zugrunde gelegt.

Bei den Rebflurbereinigungen, die in Baden-Württemberg in den Jahren nach 1950 durchgeführt wurden, handelte es sich überwiegend um flache und mittelsteile Lagen (BÖRKLE |31|). Erdbewegungen wurden nur in bescheidenem Umfang vorgenommen. Die Entwicklung der Baumaschinen zu immer stärkeren und auf bestimmte Aufgaben spezialisierte Typen ermöglichte ungefähr ab 1960 immer umfangreichere Planierungsarbeiten. Dazu kommt, daß die flachen und mittelsteilen Lagen weitgehend bereinigt sind und die Rebflurbereinigung in die schwierigeren steilen Lagen vordringen muß. Diese erfordern immer umfangreichere Erdbewegungen und Baumaßnahmen. Die durchschnittlichen Ausführungskosten von ca. 60 000 DM/ha, die in besonders schwierigen Gebieten auf über 140 000 DM/ha ansteigen können, zeigen deutlich auf, welche entscheidende Bedeutung der Qualität einer derartigen Planung zukommt.

Gleichzeitig werden die teilweise erheblichen Eingriffe in die Landschaft vom Blickpunkt der Bewahrung eines charakteristischen Landschaftsbildes und der Ökologie aus zunehmend kritisiert (z.B. STERN |203|). Rein technische Kriterien, wie ein Massenausgleich, verlieren vor diesem Hintergrund an Gewicht.

Um den Flurbereinigungsingenieur in die Lage zu versetzen, die Auswirkungen seiner Planungen auf die Landschaftsgestaltung, auf die Ökologie und die Umwelt insgesamt besser beurteilen zu können, müssen ihm neue qualifizierte technische Hilfsmittel für die Planung zur Verfügung gestellt werden. Diese müssen ihn in die Lage versetzen, eine Vielzahl von Varianten mit unterschiedlichen Vorgaben zu überprüfen und anhand vorgegebener Kriterien, vielleicht unter Mitarbeit weiterer Fachleute, zu beurteilen. Nur so kann ein befriedigender Kompromiß zwischen meist widerstrebenden Forderungen gefunden werden.

6.3 Berechnung von Massen

Die Abrechnung kleinerer Baumaßnahmen erfolgt meist auf der Zeitbasis. Bei größeren Projekten wird z.B. der Einsatz von Planiertraupen überwiegend nach den Einsatzstunden (BÖRKLE |31|), bei Bodenzufuhr weitgehend über die registrierte Anzahl der Fahrten abgerechnet.

Eine Massenberechnung über eine erneute Aufnahme derselben Profile im planierten Gelände, die bereits im ursprünglichen Gelände aufgemessen worden sind, wird von der Flurbereinigungsverwaltung in Baden-Württemberg kaum durchgeführt. Dadurch wäre ein Vergleich mit der ausgeschriebenen Bauleistung möglich, sofern diese überhaupt in einem Leistungsverzeichnis eindeutig definiert ist und sofern das anstehende bzw. verarbeitete Material weitgehend gleichartig ist, so daß ein gezielter Einbau aufgrund seiner unterschiedlichen Eignung nicht erforderlich ist.

Den Kosten einer erneuten Höhenaufnahme, die im Verhältnis zu den Kosten für die Baumaßnahme sehr gering sind, steht die Möglichkeit gegenüber, die tatsächlich erbrachten Leistungen vom Ergebnis her kontrollieren zu können. Gleichzeitig ergibt sich so eine Kontrollmöglichkeit dafür, wie genau die geplante Geländeoberfläche mit der ursprünglichen Planung übereinstimmt.

6.4 Aufmessung des neuen Wege- und Gewässernetzes einschließlich Auswertung

Die katastertechnische Erfassung und Berechnung des neuen Grundstücksbestandes machte in den vergangenen 25 Jahren tiefgreifende Veränderungen durch. Mit der Einführung der Luftbildvermessung in der Flurbereinigungsverwaltung Mitte der 50-er Jahre (KERSTING |95|) wurden die terrestrischen Aufnahmeverfahren, insbesondere die Polaraufnahme mit dem optischen Reduktionstachymeter mehr oder weniger stark eingeschränkt und schließlich überflügelt. Durch den zunehmenden Einsatz von Rechenautomaten, die Erstellung leistungsfähiger Rechenprogramme und die Verwendung anpassungsfähiger und automatischer Datenerfassungsgeräte gelang es, über die Stufe der reinen Mechanisierung hinaus zumindest einen teilautomatischen Arbeitsablauf einzuführen. Dieser reicht von der photogrammetrischen oder tachymetrischen Vermessung bis zur Koordinierung der Grenzpunkte. Diese können den Grundstein für ein automatisiertes Koordinatenkataster bilden.

Mit dem Einsatz selbstregistrierender elektronischer Tachymeter ab 1972 verlagert sich neuerdings der Schwerpunkt bei der Aufmessung des Wege- und Gewässernetzes in kurzer Zeit von der Photogrammetrie zurück zur tachymetrischen Aufmessung (MÜLLER |154|, |155|, RAHN und HENZLER |166|, ZIPPELIUS |235|), ohne daß die Photogrammetrie dadurch ihre eigenständige Bedeutung verliert.

Der hier angesprochene Aufgabenbereich, insbesondere die Auswertung der Aufmessung des Wege- und Gewässernetzes, ist ein Abschnitt im Flurbereinigungsverfahren, der bisher von der Automation mit am stärksten erfaßt worden ist. Ein wesentlicher Grund dafür ist wohl darin zu sehen, daß sich diese Art von Automation anfangs fast nahtlos in das System der bisher gewohnten Arbeitsabläufe einbauen ließ.

Die Automation erfaßt bisher hauptsächlich die folgenden drei Bereiche:

- Die Meßinstrumente. Hier setzt sich die digitale Datenerfassung zunehmend bei der tachymetrischen Aufnahme und der photogrammetrischen Auswertung durch.
- Die Aufbereitung und Auswertung der registrierten Daten. Dies umfaßt den gesamten Bereich von der Überprüfung des Datenstreifens auf logische Fehler bis zur Berechnung von Punktkoordinaten durch umfangreiche Ausgleichungen.
- Die graphische Darstellung der Aufnahme oder Auswertung mit Hilfe von Zeichenautomaten.

Zukünftig wird ein vierter Aspekt bei der Automation mehr und mehr an Bedeutung gewinnen:

- Die Speicherung der Ergebnisse der Vermessung und weiterer Daten in Datenbanken, z.B. in einer Grundstücksdatenbank. Bisher gehen digital vorliegende Ergebnisse häufig wieder verloren, weil die erforderlichen Datenbanken noch nicht konzipiert bzw. verwirklicht sind.

Als Ergebnis dieses Arbeitsabschnittes liegen die Landeskoordinaten der Eckpunkte der Blöcke digital vor, die vom neuen Wege- und Gewässernetz gebildet werden. Die Voraussetzungen für ihre rechnerische Weiterverarbeitung und ihre Einspeicherung in eine Datenbank sind somit geschaffen.

6.5 Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke

Die Aufgabe der Wertermittlung im Flurbereinigungsverfahren ist in § 27 Satz 1 FlurbG festgelegt: "Um die Teilnehmer mit Land von gleichem Wert abfinden zu können, ist der Wert der alten Grundstücke zu ermitteln." Zur Durchführung der Wertermittlung bestimmt Satz 2: "Die Wertermittlung hat in der Weise zu erfolgen, daß der Wert der Grundstücke eines Teilnehmers im Verhältnis zu dem Wert aller Grundstücke des Flurbereinigungsgebietes zu bestimmen ist."

Der folgende § 28 FlurbG geht speziell auf die Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke ein:

"(1) Für landwirtschaftlich genutzte Grundstücke ist das Wertverhältnis in der Regel nach dem Nutzen zu ermitteln, den sie bei gemeinüblicher ordnungsgemäßer Bewirtschaftung jedem Besitzer ohne Rücksicht auf ihre Entfernung vom Wirtschaftshofe oder von der Ortslage nachhaltig gewähren können. Hierbei sind die Ergebnisse einer Bodenschätzung nach dem Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz) vom 16. Oktober 1934 ... zugrunde zu legen; Abweichungen sind zulässig."

Die folgenden Ausführungen in dieser Arbeit sind auf die Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke beschränkt. Bei der Bestimmung des Nutzens dieser Grundstücke liegt der Schwerpunkt auf der Ermittlung des Bodenwertes und seiner Verarbeitung während des Verfahrens.

Im Flurbereinigungsverfahren wird das Wertverhältnis eines landwirtschaftlich genutzten Grundstücks durch seinen Tauschwert festgelegt. Dieser Tauschwert gibt an, in welchem Verhältnis der Wert der Grundstücke eines Teilnehmers zu dem Wert aller Grundstücke des Flurbereinigungsverfahrens steht. Er ist somit eine relative, auf die Verhältnisse im Flurbereinigungsgebiet begrenzte Größe.

Nach dem Flurbereinigungsgesetz sind der Wertermittlung die Ergebnisse der Bodenschätzung der Finanzverwaltung zugrunde zu legen, deren Ergebnisse in Form von Bodenzahlen entstanden durch einen landesweiten Vergleich der Ertragsfähigkeit des Bodens.

Zur örtlichen Überprüfung der vorliegenden Bodenschätzung werden im Flurbereinigungsgebiet für sämtliche charakteristischen Bodenarten, Zustandsstufen und Entstehungsarten Grablöcher ausgehoben, deren Lage mit den sogenannten Mustergründen der Reichsbodenschätzung identisch sind. Die Beschreibung des Bodenprofils der Reichsbodenschätzung wird überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Diese Mustergründe bilden anschließend den Rahmen für die Einzelbewertung. Das Bodenprofil der Mustergründe wird hinsichtlich seines landwirtschaftlichen Nutzens bewertet und nach einem lokalen, auf das einzelne Verfahren abgestimmten Rahmen in Bodenklassen eingeordnet. Während dieser Rahmen in Bayern 25 - 30 Bodenklassen umfaßt, ist er in Baden-Württemberg meist auf 6 - 10 Klassen begrenzt.

Zur Einzelbewertung wird die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche des Flurbereinigungsgebietes mit einem engmaschigen Netz von Bodenproben überzogen, deren mittlerer Abstand ungefähr bei 30 m liegt. Die einzelnen Bodenproben werden im Vergleich mit den Profilen der Mustergründe bewertet und in die entsprechenden Bodenklassen eingestuft.

Durchgeführt wird die Wertermittlung von landwirtschaftlichen Sachverständigen unter der Leitung des leitenden Flurbereinigungsingenieurs. Welche verschiedenen Einflüsse sich auf die Einzelbewertung trotz der meist großen Erfahrung dieser Sachverständigen auswirken, faßt FUCHS |57| zusammen:

Zufällige Fehler

- persönliche Fehler: Auffassungsunterschiede bei der Mustergrundaufstellung und -bewertung, geistige und körperliche Verfassung der Sachverständigen u.a.,
- örtliche Fehler: Einfluß der Geländeform, des Bodenwechsels, des Wetters, der Jahreszeit u.a.,

Systematische Fehler

- methodische Fehler: Einfluß des Lochabstandes, des Tempos bei der Einzelbewertung, der Zahl und Ausbildung der Sachverständigen, der Auswahl der Lage der Einzelbewertung, des Wechsels bei den Sachverständigen, der örtlichen Abgrenzung und Intervallbreite der Bodenklassen, Fehler der Kartierung, der Generalisierung, der Wertberechnung, der Übertragung in den neuen Bestand u.a.,
- Planungsfehler: Nicht erfaßte Werterhöhung durch Bodenverbesserung, Baulandausweisung oder sonstige besondere Verwertbarkeit von Grundstücken, einseitige Beschwerdeabhilfen, Fehlentscheidungen u.a.

Den mittleren totalen Fehler einer Einzelbewertung durch einen Sachverständigen gibt FUCHS |57| mit ca. ± 2.0 Klassen an, bezogen auf den in Bayern üblichen durchlaufenden Rahmen für die Wertermittlung mit 25 - 30 Klassen. Wäre er nur als zufälliger Fehler zu interpretieren, würde bei einem Punktabstand von 33 m der mittlere zufällige Fehler einer Einzelbewertung in einer Fläche mit 10 ha nach FUCHS auf ± 0.2 Klassen zurückgehen. Tatsächlich summiert sich jedoch in größeren Flächen der systematische Anteil am Gesamtfehler auf,

Geht man davon aus, daß die Genauigkeit der Einzelbewertung und der Abgrenzung der Bodenklassen gegeneinander für die Intervallbreite der Bodenklassen ausschlaggebend ist, so wäre zu überlegen, ob eine Verringerung der in Bayern üblichen 25 - 30 Bodenklassen nicht sinnvoll wäre (FUCHS |59|).

Neben der vollkommenen Neubewertung der Grundstücke in der Flurbereinigung wurden immer wieder Versuche unternommen, die Ergebnisse der Bodenschätzung der Finanzverwaltung in Tauschwerte der Flurbereinigung rechnerisch umzuwandeln. Grundsätzlich verlangt nach FUCHS |58| die Rechtsprechung für eine Wertermittlung, daß sie sowohl in ihren Grundlagen als auch bei der Einschätzung der einzelnen Grundstücke so genau wie eben möglich durchgeführt wird. Die Untersuchungen von FUCHS |58| zur rechnerischen Umwandlung der Ergebnisse der Bodenschätzung der Finanzverwaltung in Tauschwerte der Flurbereinigung ergeben, daß

die Werte hochentwickelter Böden praktisch ohne Genauigkeitsverlust umgewandelt werden können. Für mittlere und schlechte Böden erscheint es jedoch bedenklich, Tauschwerte aus der Reichsbodenschätzung abzuleiten. Um feststellen zu können, in welchem Umfang sich der Aufbau der Böden z.B. durch die Bodenbearbeitung, An- und Abschwemmung verändert hat, ist eine Überprüfung der Ergebnisse der Bodenschätzung erforderlich. Diese weitet sich in der Praxis meist zu einer vollständigen Neubewertung der Böden aus (KLEMPERT |99|).

Bei der Ausarbeitung der Wertermittlung im Bodenwertriß wird vielfach versucht, die Klassengrenzen im Zuge einer begrenzten Generalisierung auf unmittelbar benachbarte Flurstücksgrenzen des alten Bestandes abzustimmen. Dies bedeutet, daß eine nachträgliche Verfälschung der Wertermittlung in geringem Umfang in Kauf genommen wird. Ziel dieser Maßnahme ist die Vereinfachung der weiteren Verarbeitung der Ergebnisse der Wertermittlung. Durch die beschriebene Anpassung wird erreicht, daß sich die Anzahl der Klassenabschnitte pro Flurstück im alten Bestand verringert. Im neuen Bestand, der durch das neue Wege- und Gewässernetz gebildet wird, kann dies jedoch eine Erhöhung der Anzahl der Klassenabschnitte pro Block bedeuten. Es ist deshalb zu betonen, daß diese möglichen geringfügigen Verfälschungen der Ergebnisse der Wertermittlung nicht mit der Durchführung der Wertermittlung selbst, sondern mit ihrer im Augenblick üblichen Weiterverarbeitung zusammenhängen.

Zur Ermittlung des Wertes der Einlagegrundstücke wird die Bodenwertkarte zusammen mit der Karte des alten Bestandes montiert. Die Flächenverschneidung zwischen den Bodenklassen und Flurstücken erfolgt dabei graphisch bzw. analog. Für jedes Flurstück werden die einzelnen Klassenabschnitte digitalisiert (WAHL |217|), deren Fläche über die EDV berechnet und auf die Gesamtfläche des Flurstücks abgeglichen. Das Wertverhältnis der Flurstücke wird anschließend in die Gliederung des alten Bestandes übernommen.

Nach der Aufmessung des neuen Wege- und Gewässernetzes erfolgt die Berechnung des Wertes der neuen Blöcke. Dazu werden, soweit erforderlich, die Klassengrenzen vorweg

- auf die neu aufgemessenen natürlichen Schätzungsgrenzen wie z.B. Böschungen angepaßt und
- Umbonitierungen aufgrund größerer Kultivierungsmaßnahmen eingearbeitet.

Entsprechend dem Vorgehen beim alten Bestand wird die fortgeführte Bodenwertkarte mit der Karte des neuen Bestandes montiert und die einzelnen Klassenabschnitte innerhalb der Blöcke werden digitalisiert. Auf die Berechnung der Teilflächen und die Abgleichung auf die Blockfläche folgt die Wertberechnung für die Blöcke und u.U. eine Zerlegung der Blöcke in einzelne Lamellen mit Wertangabe als Hilfsmittel für die Zuteilungsarbeiten (KLEMPERT |99|).

Die beschriebene Art der Bestimmung des Wertverhältnisses der Flurstücke besticht durch die Einfachheit der graphischen Flächenverschneidung, verlagert jedoch gleichzeitig den gesamten Arbeitsaufwand auf die Digitalisierung der einzelnen Klassenabschnitte. Als durchschnittliche Arbeitsleistung eines Digimeters gibt RUSSLER |173| folgende Werte für einen Arbeitstag mit 8 Stunden an:

Alter Bestand (Einlageberechnung)	:	ca. 120 ha mit ca. 400 Teilflächen,
Neuer Bestand (Blockteilwertberechnung):	:	ca. 150 ha mit ca. 370 Abschnittsflächen.

Vermutlich können diese Flächenleistungen in den Realteilungsgebieten Baden-Württembergs zumindest im alten Bestand nicht erreicht werden. Bei einem Verfahren mit z.B. 1500 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche werden somit zur Digitalisierung des alten Bestandes wenigstens ca. 12 Tage und des neuen Bestandes ca. 10 Tage benötigt.

Ohne Zweifel handelt es sich bei der Wertberechnung der alten Flurstücke bzw. der neuen Blöcke um eine Aufgabe, die im Prinzip für eine automatische Bearbeitung geeignet erscheint. Die Versuche der vergangenen Jahre konzentrierten sich auf die digitale Flächenverschneidung. Obwohl das Problem der rechnerischen Flächenverschneidung aufgrund abgeschlossener Forschungsaufträge als zumindest theoretisch gelöst gelten kann, fehlt es bisher noch an einer intensiven praktischen Erprobung und Bewährung bei der Flurbereinigungsverwaltung (KLEMPERT [99]). Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird in Abschnitt 7,5 eingegangen werden.

Auf neueste rechnergestützte Geräteentwicklungen, die ein weitgehend automatisches Digitalisieren erlauben, wurde bereits in Abschnitt 2.2.3 hingewiesen.

6.6 Ermittlung und Berücksichtigung der Geländeneigung

Im Verfahrensablauf der Flurbereinigung wirkt sich die Geländeneigung hauptsächlich auf die beiden Arbeitsabschnitte der Wertermittlung und des Zuteilungsentwurfes aus.

Als Folge der immer stärker werdenden Mechanisierung in der Landwirtschaft gewinnt die Geländeneigung zunehmend an Bedeutung. Einige der heute verfügbaren landwirtschaftlichen Großgeräte können z.B. nur bis zu bestimmten Maximalneigungen eingesetzt werden. Neben der zunehmenden Erosionsgefahr bei wachsender Geländeneigung ist deshalb die verstärkte Abhängigkeit des Maschineneinsatzes von der Geländeneigung in der Flurbereinigung zu berücksichtigen. So wird heute in Verfahren mit bewegter Geländeoberfläche die Geländeneigung über das gesamte Verfahrensgebiet hinweg meist routinemäßig erfaßt und in Karten dargestellt.

Die Bedeutung der Geländeneigung für die Bewertung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke in der Flurbereinigung wird von MEIMBERG [147] untersucht. Danach kann sich die Geländeneigung sowohl auf der Ertragsseite als auch auf der Kosten- seite für die Landwirtschaft wertbestimmend auswirken.

Auf den landwirtschaftlichen Ertrag wirken sich neben Klima- und Bodenfaktoren auch die Neigung eines Geländes und seine Lage in bezug auf die Einfallrichtung der Sonnenstrahlen, die sogenannte Exposition, aus. Da eine zunehmende Neigung auch die Erosion fördert, findet die Geländeneigung durch Abschlüge zum örtlich vorgefundenen Bodenwert Eingang in die Wertermittlung landwirtschaftlich genutz-

ter Grundstücke im Flurbereinigungsverfahren. Die Begründung für diesen Abzug bei der Wertermittlung folgt aus § 13 FlurbG: "Für landwirtschaftlich genutzte Grundstücke ist das Wertverhältnis in der Regel nach dem Nutzen zu ermitteln, den sie bei gemeinüblicher ordnungsgemäßer Bewirtschaftung jedem Besitzer ... nachhaltig gewähren können." Eine größere Geländeneigung schränkt den landwirtschaftlichen Nutzen ein. So erlauben z.B. die heute verfügbaren Großgeräte eine wirtschaftliche Ackernutzung bis zu einer Neigung von ca. 15 - 20 Prozent (MEIMBERG et al. [148]). Stärker geneigte Flächen sollten als Dauergrünland genutzt werden.

Eine zweite, kostenwirksame Komponente besitzt die Geländeneigung durch ihre betriebswirtschaftliche Auswirkung bei der maschinellen Bearbeitung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke. Diese betriebswirtschaftliche Komponente ist nach § 44 Abs. 2 FlurbG bei der Zuteilung zwingend zu berücksichtigen: "Bei der Landabfindung sind die betriebswirtschaftlichen Verhältnisse aller Teilnehmer gegeneinander abzuwägen und alle Umstände zu berücksichtigen, die auf den Ertrag, die Benutzung und die Verwertung der Grundstücke wesentlichen Einfluß haben." Nach STEUER [204] gehört zu den Umständen, die auf den Ertrag und die Benutzung eines Grundstücks wesentlichen Einfluß haben, auch die Hängigkeit des Geländes.

Nur als Soll-Bestimmung ist § 44 Abs. 4 FlurbG formuliert: "Die Landabfindung eines Teilnehmers soll in der Nutzungsart, Beschaffenheit, Bodengüte und Entfernung vom Wirtschaftshofe oder von der Ortslage seinen alten Grundstücken entsprechen, soweit es mit einer großzügigen Zusammenlegung des Grundbesitzes nach neuzeitlichen betriebswirtschaftlichen Erkenntnissen vereinbar ist." Nach der Rechtsprechung des Flurbereinigungsgerichts Mannheim [54] ist in diesen Ermessensgesichtspunkten auch die Geländeneigung einbezogen.

Was die Bestimmung der Geländeneigung betrifft, so war die bisher gebräuchliche Methode die direkte Neigungsmessung im Gelände mit dem Freihandgefällmesser oder die Ableitung des Geländegefälles aus einem Höhenlinienplan. Die beiden Methoden sind in den Abschnitten 5.8.1 bzw. 5.8.3 ausführlich beschrieben.

Im Zusammenhang mit dem Einsatz der Luftbildauswertung beim Entwurf des Wege- und Gewässernetzes geht LANG [122] davon aus, daß ein aus Höhenlinien abgeleitetes Gefälle für Strecken, die größer als 60 m sind, dieselbe Genauigkeit besitzt wie das mit dem Freihandgefällmesser bestimmte Gefälle. Er folgert daraus, daß für den Entwurf des Wege- und Gewässerplans bei durchschnittlichen Geländeverhältnissen auf die früheren sehr zeitraubenden Gefällmessungen verzichtet werden kann.

Die in dieser Arbeit durchgeführten und in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchungen haben diese Erwartungen nicht bestätigt. Hier soll nicht ausgeschlossen werden, daß die Verwendung einer verkleinerten Äquidistanz bei der direkten photogrammetrischen Höhenlinienkartierung, verbunden mit einem entsprechend erhöhten Aufwand bei der Ableitung des Geländegefälles aus den Höhenlinien, noch zu einer Verbesserung des Ergebnisses führen kann. Aber auch dieser zusätzliche Aufwand an manueller Arbeit wird kaum sicherstellen können, daß das Ergebnis hinsichtlich Genauigkeit und Vollständigkeit für die Belange der Flurbereinigung in jedem Fall ausreicht.

Als Folge der gewachsenen Bedeutung der Geländeneigung bei der Zuteilung in hügeligem Gelände wird in Baden-Württemberg bei Bedarf eine Gliederung der Grundstücke des alten bzw. des neuen Bestandes nach der Geländeneigung durchgeführt. Entsprechend dem Vorgehen zur Herstellung der Gliederung der Grundstücke nach Bodenklassen wird dazu die konventionell gefertigte Gefällstufenkarte mit der Grundrißfolie des alten bzw. des neuen Bestandes zur Deckung gebracht. Die einzelnen Abschnitte der Neigungsklassen innerhalb eines Flurstücks bzw. Blockes werden digitalisiert und nach der Flächenberechnung aufgelistet.

Kennzeichnend für die wachsende Bedeutung der Geländeneigung in Flurbereinigungsverfahren ist die Tatsache, daß sich das Flurbereinigungsgericht bei Widersprüchen gegen die Abfindung nicht immer allein mit den Neigungsangaben der tabellarischen Übersicht des alten und neuen Bestandes zufrieden gibt, sondern die Geländeneigung im Einzelfall in der Örtlichkeit selbst überprüft.

6.7 Zuteilungsentwurf

Als wichtigste planerische Aufgabe eines Flurbereinigungsverfahrens ist die wertgleiche Abfindung sämtlicher Teilnehmer mit Land anzusehen. Planerisch festgelegt wird die Landabfindung im Zuteilungsentwurf.

Die Grundsätze für die Abfindung enthält der zweite Abschnitt des Flurbereinigungsgesetzes. Die Landabfindung regelt § 44 Abs. 1 FlurbG: "Jeder Teilnehmer ist für seine Grundstücke unter Berücksichtigung der nach § 47 vorgenommenen Abzüge mit Land von gleichem Wert abzufinden. Bei der Bemessung der Landabfindung sind die nach den §§ 27 bis 33 ermittelten Werte zugrunde zu legen. Maßgebend ist der Zeitpunkt," Nach Absatz 2 sind darüber hinaus alle Umstände zu berücksichtigen, die auf den Ertrag, die Benutzung und die Verwertung der Grundstücke wesentlichen Einfluß haben. Einerseits müssen die Landabfindungen nach Absatz 3 in möglichst großen Grundstücken ausgewiesen werden; gleichzeitig soll die Landabfindung eines Teilnehmers nach Absatz 4 in der Nutzungsart, Beschaffenheit, Bodengüte und Entfernung vom Wirtschaftshofe oder von der Ortslage seinen alten Grundstücken entsprechen, soweit es mit einer großzügigen Zusammenlegung des Grundbesitzes nach neuzeitlichen betriebswirtschaftlichen Erkenntnissen vereinbar ist.

Bei der Abfindung mit Land von gleichem Wert sind somit neben dem Ergebnis der Wertermittlung u.a. folgende Faktoren zu beachten:

- Grundstücksform,
- Bodenart,
- Bodenklassen,
- Nutzungsart bzw. Nutzungsmöglichkeit,
- Geländeneigung,
- Himmelsrichtung (insbesondere bei Rebflurbereinigungen),
- Wasserverhältnisse,
- Kleinklima (Frostlagen usw.),
- Entfernung vom Hof.

Nachdem die Teilnehmer über ihre Wünsche für die Abfindung gehört worden sind, wird vom Flurbereinigungsingenieur ein Zuteilungsentwurf unter Berücksichtigung der angeführten Kriterien erarbeitet. Als Hilfsmittel dazu steht ihm neben der tabellarischen Gliederung des alten Bestandes und dem Abfindungsanspruch eine mehr oder weniger starke Aufgliederung der Blöcke des neuen Bestandes durch parallel begrenzte Lamellen zur Verfügung, die nach konstantem Wert oder konstanter Fläche in den Block eingerechnet sind (KERSTING |97|, KLEMPERT |99|). Die einzelnen Abfindungen werden durch ein manuelles Aufsummieren der Werte der Lamellen gebildet. Nachdem die Ergebnisse des manuellen Zuteilungsentwurfs abgelocht sind, folgt ihre Auswertung durch die EDV.

Im Hinblick auf einen denkbaren automatisch gefertigten Zuteilungsentwurf gibt KLEMPERT |99| einen Überblick über Probleme und Methoden bei der Erarbeitung von Rechenprogrammen für die Erstellung des Zuteilungsentwurfs. Die maschinentechnischen Voraussetzungen der verfügbaren EDV-Anlagen können nach seiner Ansicht hinsichtlich der Maschinenkapazität als erfüllt angesehen werden. Der hohe externe Speicherbedarf mit ca. 5 - 10 Mio. Bytes kann durch die heutigen Speicher zur Verfügung gestellt werden. Schwierigkeiten sieht er bei der Erstellung der Zuteilungsprogramme, da durch allgemeine Programme allein kein Zuteilungsentwurf entstehen kann. Vielmehr müssen die vielen notwendigen besonderen Anordnungen für jeden betroffenen Teilnehmer aufgestellt werden, was in Vor- oder Unterprogrammen erfolgen kann. Zu diesem laufenden Programmieraufwand, den KLEMPERT auf die Hälfte der Zeit veranschlagt, die der Planer bisher für den gesamten Zuteilungsentwurf nach herkömmlicher Art benötigt, kommen noch die Maschinenkosten der EDV-Anlage, KLEMPERT glaubt deshalb, daß der vollautomatische Zuteilungsentwurf von der Wirtschaftlichkeit her schlecht abschneidet. Insgesamt beschreibt er vier verschiedene Stufen der Automation des Zuteilungsentwurfes:

- Den teilautomatischen Zuteilungsentwurf,
- den teilautomatischen Zuteilungsentwurf mit Dialogbetrieb,
- den iterativ automatisch ablaufenden Zuteilungsentwurf und
- den vollautomatischen Zuteilungsentwurf.

Zusammenfassend stellt KLEMPERT fest, daß Zuteilungsentwürfe mit Hilfe der EDV ein sehr hohes Maß sowohl an Programmierarbeiten (ca. 50 Mannjahre geschätzt) als auch an Tätigkeiten bei der Aufbereitung der einzulesenden Daten und vor allem an notwendigen Prüfungen erfordern. Einen echten Fortschritt sieht er kurzfristig durch die Anwendung des "teilautomatischen Zuteilungsentwurfs" und langfristig durch den Einsatz des "iterativ automatisch ablaufenden Zuteilungsentwurfes".

Mit dem Ziel, den betriebswirtschaftlichen Aufwand nach der Zuteilung zu minimieren entwickelten HUPFELD |92|, PELZER |161| und SCHRADER |181| Ansätze für einen rechnerischen Zuteilungsentwurf, wobei sie als Lösungsansatz die Verfahren der Optimierungsrechnung vorschlugen. Nach PELZER |161| kann nur der praktische Versuch an größeren Objekten zeigen, ob und in welchem Ausmaß es überhaupt möglich und sinnvoll ist, einen Zuteilungsentwurf mit mathematischen Methoden zu behandeln. Wegen der geringen Flexibilität eines jeden mathematischen Modells scheint ihm eine gewisse Zurückhaltung bei der Beurteilung der Erfolgsaussichten geboten.

KROPFF [121] versucht, die vorliegenden ersten theoretischen Ansätze zum Einsatz der Optimierungsrechnung bei der Zuteilungsplanung auf ihre grundsätzliche praktische Eignung hin zu prüfen. Aufgrund der verschiedenen Forderungen des Flurbereinigungsgesetzes stellt er ein System von Restriktionen für die Zuteilungsoptimierung auf. Das Optimum der Zielfunktion definiert auch er bezüglich des Bewirtschaftungsaufwandes, wobei er drei Ziele herausstellt:

- Maximale Flächengröße der Einzelzuteilung,
- minimale Zerstreung der einzelnen Betriebszuteilungen untereinander und
- minimale Zerstreung der Einzelabfindungen bezogen auf die jeweilige Hofstelle.

Für zwei Flurbereinigungsverfahren führt er eine rechnerische Zuteilungsplanung durch, wobei er voraussetzt, daß über die Wünsche der Beteiligten noch keinerlei Informationen vorliegen. Die Ergebnisse lassen eine grundsätzliche Eignung des Modells für eine automatische Zuteilung erkennen, wobei der wirtschaftliche Einsatz für größere Verfahren im Augenblick noch nicht gesichert ist. Nach Auffassung von KROPFF kann ein auf dem entworfenen Konzept basierendes Zuteilungsprogramm zunächst dem Planer bereits vor Abhaltung des Planwunschtermins einen Überblick darüber geben, welche Flächengrößen etwa in welcher Lage entstehen müssen und in welchem Gebiet die einzelnen Teilnehmer bevorzugt abgefunden werden sollten. Ein vollautomatisches Zuteilungssystem, welches bei Vorgabe neuer Bedingungen jeweils eine neue Optimierungsberechnung durchführt, ist nach Ansicht von GRAFAREND et al. [69] S. 461 derzeit ökonomisch nicht vertretbar, da sich dabei der Berechnungsaufwand mit der Anzahl der Wiederholungen multipliziert.

An dieser Stelle soll nochmals betont werden, daß der automatische Zuteilungsentwurf als Ganzes der Ebene der planerischen Automation und damit dem dritten Niveau der Automation zuzurechnen ist. Dennoch können ohne Zweifel diejenigen Teilabschnitte der Zuteilungsarbeiten, die bereits heute automatisierbar sind, wie z.B. die Ermittlung von Flächen aus gegebenen Werten (KERSTING [97]), für den Planer ein wesentliches Hilfsmittel beim manuellen Zuteilungsentwurf darstellen.

Eine schrittweise Entwicklung von Rechenprogrammen auf einen teilautomatisch ablaufenden Zuteilungsentwurf zu, wie sie von KLEMPERT [99] oder KROPFF [121] vorgeschlagen wird, verbunden mit interaktiven Eingriffsmöglichkeiten für den planenden Ingenieur, läßt für die Zukunft zwei Ziele als erreichbar erscheinen: Zum einen, daß der Planer beim Zuteilungsentwurf durch die Unterstützung der Rechanlage von Routineaufgaben entlastet wird und sich so voll auf seine speziellen Kenntnisse der Örtlichkeit konzentrieren kann, was zu einer Steigerung der Qualität des Zuteilungsentwurfs führen dürfte; zum anderen, daß dies für den Bereich der technisch-planerischen Arbeiten auf lange Sicht gesehen zu einer Zeiteinsparung führen kann.

6.8 Zielvorstellung

Die Übertragung der vermessungstechnischen Arbeiten des ersten Niveaus der Automation auf die EDV kann in der Flurbereinigungsverwaltung als abgeschlossen be-

trachtet werden. Teilbereiche der Automation des zweiten Niveaus, wie die Koordinatenbestimmung von Vermessungs- und Grenzpunkten, sind entweder gelöst oder befinden sich im Stadium der praktischen Erprobung. Andere Bereiche, wie das Projekt einer Grundstücksdatenbank, sind konzipiert und müssen nun realisiert und erprobt werden.

Zum letzten Bereich ist auch das digitale Geländemodell zu rechnen, das bisher von der Flurbereinigungsverwaltung kaum praktisch eingesetzt wird. Vor dem Hintergrund der erweiterten Aufgabenstellung und der wachsenden Komplexität der Flurbereinigungsverfahren reichen die seitherigen Bemühungen zum Einsatz der Automation nicht mehr aus. Die aufgrund der technischen Entwicklung der vergangenen Jahre vergrößerten Möglichkeiten der Automation decken Reserven im technischen Verfahrensablauf auf, die voll ausgeschöpft werden müssen.

Als Lücken in der Automation lassen sich hauptsächlich folgende Bereiche erkennen:

- Die automatische Erfassung sehr großer Datenmengen,
- die datenbankmäßige Verwaltung großer Datenmengen,
- die rechnerische Verarbeitung dieser Daten in Programmen des zweiten Niveaus und
- die rechnerische Weiterverarbeitung großer Datenmengen mit Hilfe von Entscheidungsprogrammen.

Diese Entscheidungsprogramme des Niveaus der planerischen Automation verlieren durch ihren Übergang von einer rein technischen Optimierung zu einer projektbezogenen Wertung ihren streng algorithmischen Aufbau und gewinnen dadurch ihre große Komplexität.

Die schrittweise Schließung dieser Lücken ist die unabdingbare Voraussetzung dafür, daß das Ziel, die Planung fundierter, flexibler und umweltbezogener durchzuführen, in einem überschaubaren Zeitraum erreicht werden kann. Voraussetzung dafür ist, daß sämtliche erforderlichen grundlegenden Daten gesammelt und erfaßt werden und ihr gegenseitiges Zusammenwirken und ihre Abhängigkeiten soweit wie möglich berücksichtigt werden. Zur Verwaltung dieser großen Datenmengen müssen Leistungsfähige Datenbanksysteme bereitgestellt werden.

Eine praktische Realisierung der dargestellten hohen Ansprüche an die Datenerfassung, die Datenverarbeitung und an eine verständliche Darstellung der Ergebnisse in Form von Tabellen, Diagrammen und Zeichnungen ist erst denkbar, nachdem eine stürmische technische Entwicklung im Instrumentenbau, auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung und der Zeichenautomation in den vergangenen Jahren die Voraussetzungen dafür geschaffen hat.

Beispielhaft seien auf dem Gebiet des Instrumentenbaus die selbstregistrierenden elektronischen Tachymeter und die Orthoprojektion genannt. Hier brachte die Einführung einer neuen Generation elektronischer Tachymeter (LEITZ |128|) und digital gesteuerter Orthoprojektoren (FAUST |47|, PÖLZLEITNER |163|) neue Impulse. Größere Flexibilität und verbesserte Genauigkeit vergrößern die Einsatzmöglichkeiten und damit auch die Wirtschaftlichkeit der Geräte.

Zur automatischen Kartierung werden heute überwiegend genaue Präzisionszeichentische oder schnelle Plotter eingesetzt. Neue Möglichkeiten scheint hier der Elektronenstrahlplotter zu eröffnen, dessen Zeichnung auf Mikrofilm festgehalten und anschließend vergrößert wird. Er zeichnet etwa 200 - 300mal schneller als ein Trommelplotter und kann bei dieser Geschwindigkeit bereits auch als Schnelldrucker einer Rechenanlage eingesetzt werden. Für die Darstellung einer württembergischen Flurkarte z.B. benötigt er nur noch ca. 20 Sekunden (ZIPPELIUS |233|).

Auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung ist der Trend zur weiteren Miniaturisierung der Bausteine, zur Verbesserung des Preis/Leistungs-Verhältnisses und zum zunehmenden Einsatz der mittleren Datentechnik von besonderer Bedeutung. Während im Jahre 1965 ein elektronischer Baustein rund 100 Funktionen enthielt, waren es 1976 ca. 10 000 auf wesentlich kleinerem Raum. 1985 werden es vermutlich ca. 1 Mio. sein (Stuttgarter Zeitung |209|). Der Preis pro Funktion hatte 1965 noch 1 DM betragen. 1976 lag er ungefähr bei einem Pfennig und 1985 wird er voraussichtlich nur noch 1/10 bis 1/100 Pfennig betragen.

Im Zusammenhang damit hat sich das Preis/Leistungs-Verhältnis von Rechenanlagen in den vergangenen Jahren stark verbessert. Wird es für Großrechenanlagen im Jahre 1968 mit 100 angesetzt, so ging es bis 1977 auf ca. 30 zurück.

Miniaturisierung der Bauteile und Verbesserung des Preis/Leistungs-Verhältnisses zusammen ermöglichen es, daß seit einigen Jahren zunehmend Rechenanlagen der mittleren Datentechnik auf den Markt kommen. Sie zeichnen sich durch einen beachtlichen Komfort im Betriebssystem und bei der Programmierung aus. Ein Ausbau dieser Anlagen kann nach dem Baukastensystem erfolgen. Ein weiteres wichtiges Argument ist, daß die Anlage im eigenen Haus steht. Diese Gesichtspunkte zusammen sichern der mittleren Datentechnik einen festen Platz neben Großrechenanlagen.

Die Verbilligung der Rechenzeit und die Verfügbarkeit schneller Großrechner bzw. zunehmend leistungsfähiger Anlagen der mittleren Datentechnik ermöglichen es heute, rechen- und speicherintensive Methoden zur Erzeugung digitaler Geländemodelle praktisch einzusetzen.

Eine brauchbare Gerätegrundausrüstung ist bei der Flurbereinigungsverwaltung weitgehend vorhanden (LANG |122|). Analytische Auswertegeräte, wie sie z.B. bei der Flurbereinigungsverwaltung in Bayern (ZIPPELIUS |236|) oder Baden-Württemberg bereits zur Verfügung stehen, schaffen die Voraussetzung für eine flexiblere und wirtschaftlichere photogrammetrische Datenerfassung. Nachdem somit die technischen Voraussetzungen für den Einsatz des digitalen Geländemodells in der Flurbereinigungsverwaltung weitgehend geschaffen sind, fehlt es noch an einer Gesamtkonzeption.

Welche der Einsatzmöglichkeiten des digitalen Geländemodells im Flurbereinigungsverfahren heute realisierbar sind, wird in Kapitel 7 beschrieben. In welchen Arbeitsabschnitten in Zukunft im Rahmen der planerischen Automation ein Einsatz möglich erscheint, wird in Kapitel 8 diskutiert. Im Zusammenhang mit der planerischen Automation ist das digitale Geländemodell als Teil einer umfassenden Landschaftsdatenbank bzw. eines Landinformationssystems zu sehen. Erste Ansätze zur praktischen Verwirklichung derartiger Datenbanken sind bereits erkennbar.

7. Einsatzmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells im Verfahrensablauf der Flurbereinigung

Im 7. Kapitel wird gezeigt, wie im Verfahrensablauf der Flurbereinigung eine der bestehenden Lücken in der Automation des sogenannten zweiten Niveaus durch den Einsatz eines digitalen Geländemodells geschlossen werden kann.

Durch ein digitales Geländemodell werden die Voraussetzungen geschaffen, aussagekräftigere und vollständigere Planungsunterlagen schneller als bisher bereitzustellen. Diese sollen den Planer in die Lage versetzen, die im Rahmen der Flurbereinigung erforderlichen Eingriffe in die Landschaft einerseits hinsichtlich der Baukosten zu optimieren, andererseits diesen Entwurf mit vertretbaren Mitteln so zu modifizieren, daß die Eingriffe in Umwelt, Naturhaushalt und Landschaftsbild möglichst gering gehalten werden können. Vor dem Hintergrund des allgemein verstärkten Umweltbewußtseins trägt das digitale Geländemodell dazu bei, auf kritische Fragen schneller als bisher eine qualifizierte Antwort geben zu können. Dadurch gelingt es, den Planungsprozeß sachlicher, überschaubarer und demokratischer zu gestalten.

Das digitale Geländemodell stellt ein verhältnismäßig klar begrenztes und abgeschlossenes System dar. Ein modularer Aufbau verbindet automatischen Datenfluß mit manuellen Eingriffsmöglichkeiten. Auf die Datenerfassung, die je nach der Art der zu erfassenden Information recht verschieden aussehen kann, folgt die Berechnung eines digitalen Modells. Dieses wird als zentraler Informationsspeicher datenbankähnlich abgespeichert und verwaltet. Verschiedene Anwenderprogramme für die Auswertung der gespeicherten Daten erzeugen als Ergebnis numerische oder graphische Ausgaben.

Verknüpfungspunkte mit dem bisher üblichen Verfahrensablauf in der Flurbereinigung ergeben sich somit bei der Datenerfassung und bei der rechnerischen Weiterverarbeitung der Ergebnisse, die mit Hilfe des digitalen Geländemodells gewonnen werden. Diese klar definierten Schnittstellen erleichtern die Verwirklichung des Einsatzes des digitalen Geländemodells im Flurbereinigungsverfahren. In gleicher Richtung wirkt sich eine verstärkte Flexibilität bei der digitalen Datenerfassung aus. Rechnergestützte Geräte, wie z.B. analytische Auswertegeräte, erlauben bei der Datenerfassung eine schnelle Anpassung an die jeweilige Aufgabe. Für die Anwenderprogramme, die auf den Daten des digitalen Geländemodells oder auf daraus abgeleiteten Größen aufbauen, empfiehlt sich eine schrittweise Realisierung.

Im folgenden wird der Ablauf eines Flurbereinigungsverfahrens beschrieben, wie er sich mit dem Einsatz eines digitalen Geländemodells im Augenblick darstellt. Dabei werden, wie in Kapitel 6, nur diejenigen Arbeitsabschnitte behandelt, deren Ablauf sich dadurch verändert oder die an den Schnittstellen berührt werden. Schwerpunkte bilden dabei die Beschaffung von Planungsunterlagen und die digitale Höhenverarbeitung insgesamt, die rechnerische Geländemodellierung und die rechnerische Verarbeitung der Ergebnisse der Wertermittlung und der Geländeneigung.

7.1 Beschaffung von Planungsunterlagen

Von Planungsunterlagen für Zwecke der Flurbereinigung wird verlangt, daß sie einen aktuellen Stand, hohen Informationsgehalt und eine ausreichend hohe Genauigkeit aufweisen. Hergestellt wurden sie früher überwiegend in Form von konventionellen, großmaßstäbigen topographischen Strichkarten oder Plänen. Für bestimmte Projekte wurden sie durch Querprofile ergänzt.

Im Laufe der 60er Jahre trat der Luftbildplan daneben. Anfangs mit dem Entzerrungsgerät gefertigt, wird er ab 1967 bei der Landeskulturverwaltung Rheinland-Pfalz routinemäßig für sämtliche Verfahren durch Orthoprojektion hergestellt (KERSTING |96|).

Auch bei anderen Flurbereinigungsverwaltungen steigt der Bedarf an Erstbefliegungen zur Herstellung von Planungsunterlagen in den letzten Jahren stark an (HENZLER |85|, RAHN und HENZLER |166|). Ursache dafür sind der aktuelle Stand und die hohe Informationsdichte des Luftbildes. Nachdem durch das Verfahren der Orthoprojektion eine Lagegenauigkeit von 0,1 mm bis 0,2 mm erreicht wird (SCHWIDEFSKY und ACKERMANN |190|), tritt der Orthophotoplan als Planungsgrundlage auch dort immer stärker in den Vordergrund, wo eine Grundkarte als Strichkarte vorliegt, aber vielleicht hinsichtlich Fortführungsstand oder Genauigkeit nicht zufriedenstellt. Die zunehmende Wirtschaftlichkeit der Orthoprojektion (HÖHLE und STEWARDSON |90|) unterstützt diese Entwicklung.

Für die Anwendungsbereiche in der Flurbereinigung hat sich eine Kombination von Orthophotoplan und Strichkarte als besonders vorteilhaft herausgestellt.

Neben dem analogen Ergebnis in Form eines Orthophotoplane bietet die bisher übliche profilweise Modellabtastung zur Höhennachführung des analog gesteuerten Orthoprojektors gewissermaßen als Nebenprodukt eine Einstiegsmöglichkeit in die digitale Erfassung der Höheninformation. Während das photogrammetrische Modell profilweise abgetastet wird, werden laufend die Modellkoordinaten von Profilknoten digital abgegriffen und gespeichert. Sie bilden die Ausgangsinformation für eine anschließende rechnerische Höhenverarbeitung.

Im Unterschied dazu müssen bei der digital gesteuerten Orthoprojektion Bild- oder Modellkoordinaten oder ein Höhenmodell in digitaler Form vorliegen. Wegen ihrer verbesserten Bildqualität und größeren Wirtschaftlichkeit werden digital gesteuerte Orthoprojektoren in Zukunft sicherlich an Bedeutung gewinnen.

Selbstverständlich eignet sich auch die tachymetrische Geländeaufnahme mit Hilfe von registrierenden elektronischen Tachymetern, Situation und Höhe des Geländes digital zu erfassen (KRAUS |114|). Durch den Vorteil der Photogrammetrie, die im Orthophoto gleichzeitig einen hochwertigen Kartenersatz liefert, wird der Einsatz der Tachymetrie in der Flurbereinigung jedoch hauptsächlich auf dichte Waldgebiete oder kleinere Flächen begrenzt. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich deshalb im wesentlichen darauf, die gegenwärtigen Möglichkeiten der photogrammetrischen Herstellung von Planungsunterlagen darzustellen.

Großmaßstäbige Befliegungen zur Beschaffung von Planungsunterlagen werden bis heute fast ausschließlich mit Schwarz-Weiß-Filmen durchgeführt. Auf die praktische Anwendung des Farbfilms wirkten sich bisher neben Farbverfälschungen insbesondere die schwierigere Verarbeitung und die höheren Kosten aus. Dennoch sollte im Rahmen der Befliegung eines Flurbereinigungsgebietes überprüft werden, ob diese Nachteile nicht dadurch aufgewogen werden können, daß z.B.

- der Feldvergleich erleichtert und, verglichen mit der Schwarz-Weiß-Aufnahme, sicherer wird und
- der farbige Bildplan sich insbesondere als Orientierungshilfe bei Verhandlungen mit Grundstückseigentümern empfiehlt, da diese sich auf konventionellen Strichkarten meist nur schwer zurechtfinden.

Auf die Befliegung von Ortschaften in Tiefflügen mit großen Bildmaßstäben (M 1:6000) weist HENZLER [85] hin. Für die Aufstellung von Bauleitplänen oder als Hilfsmittel bei Ortssanierungen sind Luftbildpläne im Maßstab 1:2000 oder 1:1000 aufgrund ihres aktuellen Standes besonders hilfreich. Eigene Ortsbefliegungen gewinnen deshalb in der Flurbereinigung immer mehr an Bedeutung. Wegen der geringeren Verdeckung durch Gebäude empfehlen sich für diese Aufgaben Schmalwinkelkamern mit großer Brennweite.

Seit einigen Jahren ermöglichen es die neuen Verfahren der Fernerkundung, zusätzlich zum Luftbild weitere Informationen über die Geländeoberfläche zu erfassen. So können z.B. die Wasserverhältnisse in den oberen Bodenschichten mit Hilfe von thermischen Luftaufnahmen erfaßt werden (SCHWIDEFSKY und ACKERMANN [190]). Dazu wird im Meßflugzeug neben der Luftbildkammer ein Infrarot-Zeilen-Abtaster eingebaut. Für das Flurbereinigungsgebiet ist durch die Thermalaufnahmen die Grundlage geschaffen, um Naßgebiete abzugrenzen und ältere Dränsysteme, von denen keine Pläne vorliegen, die jedoch noch intakt sind, zu kartieren.

Die Auswertung der Luftbilder gliedert sich in die Grundriß- und die Höhenauswertung. Bisher dient die Grundrißauswertung überwiegend der Fortführung und Ergänzung vorhandener Strichkarten. Durchgeführt wird sie meist am photogrammetrischen Stereoauswertegerät. Mit dem Einsatz der Orthoprojektion bildet sich für den Grundriß durch den Orthophotoplan eine eigenständige Art der Darstellung heraus. Nicht nur durch seinen aktuellen Stand und seine hohe Informationsdichte, sondern auch durch den geringeren Zeit- und Kostenaufwand für die Herstellung im Vergleich zur Strichkarte, liefert der Orthophotoplan eine ausgezeichnete Grundlage für Planungen aller Art.

In der Flurbereinigungsverwaltung wird der Orthophotoplan bisher in den Ländern Rheinland-Pfalz (KERSTING [96]) und Bayern (HENZLER [85]) in großem Umfang eingesetzt. Verwendet wird er in erster Linie als Bodenwertriß bei der Wertermittlung, wobei sich ein vorausgehender Feldvergleich erübrigt, und als Planungsgrundlage für den Entwurf sowohl des Wege- und Gewässerplans als auch des landschaftspflegerischen Begleitplans. Auch für Meliorationsentwürfe und für erste Zuteilungsentwürfe beim Planwuschtermin stellt er eine vorzügliche Planungsgrundlage dar.

Beispiele für Orthophotopläne zeigen die Abbildungen 7-1 (Feldstetten), 7-2 (Götzingen) und 7-3 (Ranggen). Sie geben die Geländeausschnitte wieder, die im 5. Kapitel für die Untersuchungen zur Ableitung eines digitalen Neigungsmodells verwendet wurden. Die Orthoprojektion für die beiden Beispiele Feldstetten und Götzingen wurde am Wild A 8 mit Orthophotozusatz PPO-8 im Maßstab 1:2500 (Bildmaßstab 1:8000) durchgeführt. Nach der Montage des Orthophoto-Negativs mit dem Positivfilm des Katastergrundrisses erfolgte eine Verkleinerung in den Maßstab 1:5000. Die Kontrastarmut der Bilder der Abbildungen 7-1 und 7-2 liegt hauptsächlich in der schlechten Qualität der Luftbilder, aber auch im weiteren Verarbeitungsprozeß begründet. Die beiden Beispiele sollen lediglich die Möglichkeit demonstrieren, Orthophoto und Strichkarte zur Steigerung der Aussagekraft des Bildplans zu kombinieren. Ausdrücklich sei betont, daß damit nichts über eine sinnvolle Auswahl des Inhalts einer Strichkarte für diesen Zweck und über die heute vorhandenen reproduktionstechnischen Möglichkeiten zur Abschwächung einer Strichvorlage ausgesagt ist, wodurch eine Überlastung des Orthophotos verhindert werden kann.

Das Orthophoto für das Beispiel Ranggen (Abb. 7-3) wurde am Wild Avioplan OR 1 des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen und des Instituts für Photogrammetrie der Technischen Universität in Wien hergestellt. Die Steuerdaten für die Orthoprojektion im Maßstab 1:10 000 (Bildmaßstab 1:30 000) wurden mit dem Programm SORA-OP berechnet (OTEPKA und LOITSCH |159|). Insgesamt ist die photographische Qualität des Bildes sehr gut, wenn auch einzelne Belichtungsstreifen im Orthophoto noch erkennbar sind.

Für den praktischen Einsatz in der Flurbereinigungsverwaltung ist die beliebige Kombinationsmöglichkeit der verschiedenen Einzelinformationen zur Herstellung von Planungsunterlagen ausschlaggebend. Als Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Vervielfältigung von Luftbildplänen oder Luftbildkarten nennt HENZLER |85| die Photokopie, die Lichtpause und den Offsetdruck. Zur Kombination von Luftbild mit Strichbild schlägt POPP |164| die Photolyse-Kopie vor, die es erlaubt, zwei vorhandene Bilder oder Zeichnungen auf einem Film oder einem Papierabzug zu vereinen. Dabei erscheint das erste Bild als übliches schwarzes Silberbild. Das zweite Bild wird photolytisch durch eine zweite Belichtung als farbiges Strichbild zusätzlich hervorgerufen.

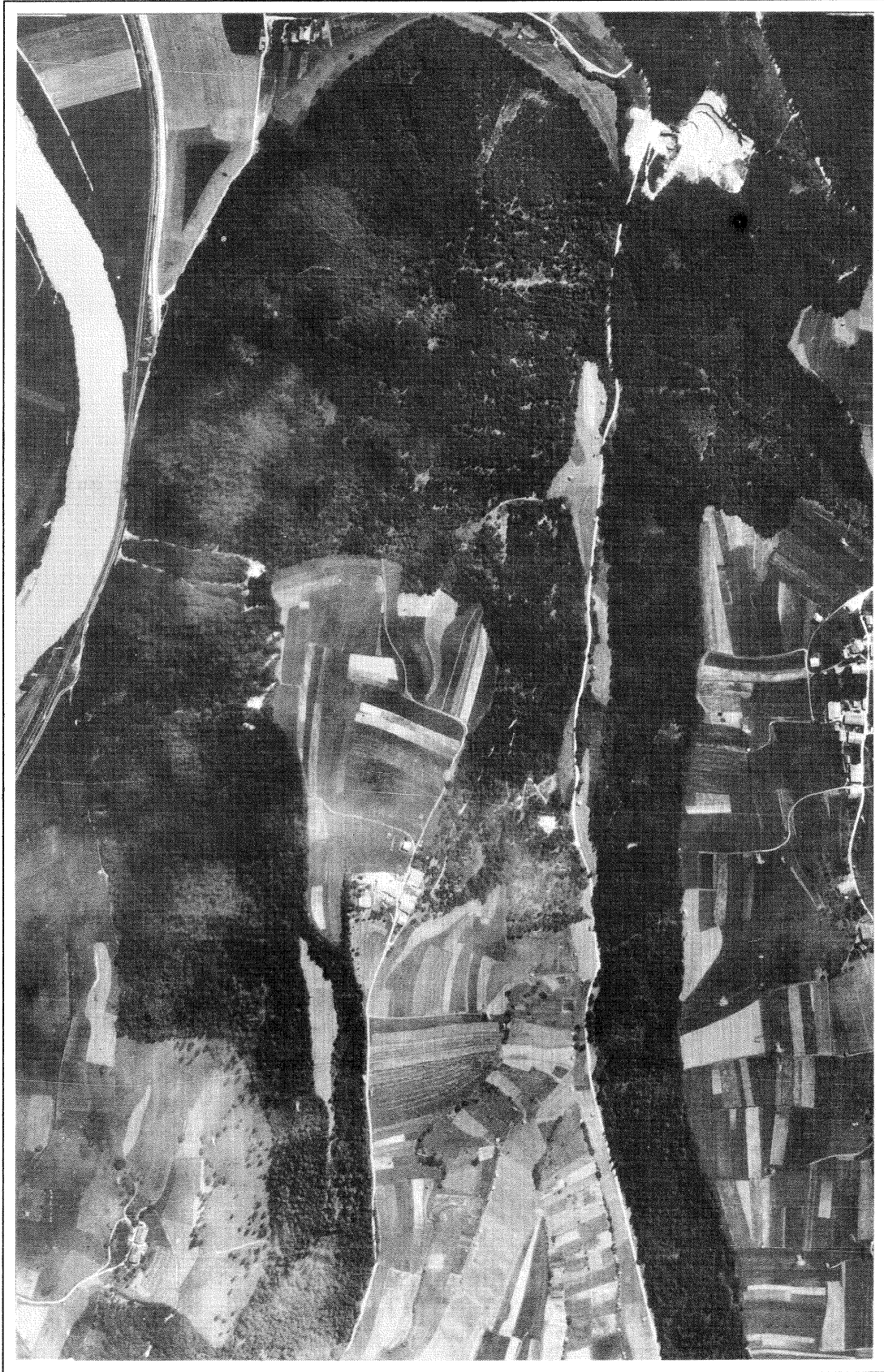
Wie die Grundrißkartierung wird auch die Höhenauswertung bisher fast ausschließlich durch direkte Kartierung von Höhenschichtlinien am photogrammetrischen Analogauswertegerät vorgenommen.

Überhaupt nicht oder nicht im wünschenswerten Umfang wird bisher die Höheninformation verwertet, die bei der profilweisen Modellabtastung zur Orthophotoherstellung als Nebenprodukt anfällt. Höhenlinien, die aus Profilschraffen abgeleitet sind, konnten sich wegen ihrer unzureichenden absoluten Höhengenaugigkeit (0.4 bis 0.5 % der Flughöhe nach SCHWIDEFSKY und ACKERMANN |190|) nicht durchsetzen (KERSTING |96|) und müssen als überholt betrachtet werden. Bessere Ergebnisse werden mit dem Höhenschichtlinienzeichner zum Orthoprojektor GZ 1 bei der bayrischen Flurbereinigungsverwaltung erzielt.

236400.00

236 000

235000.00



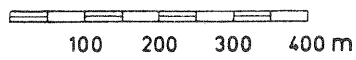
69700.00

69 000

68 000

67500.00

Abb. 7-3 Orthophotoplan Ranggen



Werden die Höhenwerte entlang der Profile digital abgegriffen und gespeichert, so können daraus Höhenlinien rechnerisch abgeleitet werden. Entscheidend für die absolute Genauigkeit der abgeleiteten Höhenlinien sind in erster Linie die Genauigkeit, mit der die Profile im Modell abgetastet werden, der Profilabstand und der Punktabstand entlang des Profils. Für die Orthoprojektion allein ist eine begrenzte Höhengenaugigkeit beim Profilieren ausreichend. Daraus rechnerisch abgeleitete Höhenlinien genügen den Anforderungen in der Flurbereinigung jedoch nur bedingt. Dies bedeutet, daß für die rechnerische Ableitung von Höhenlinien ausreichend hoher Genauigkeit die Genauigkeit der Profilabtastung gesteigert werden muß. Auch eine Verkleinerung des Profilabstandes muß zur Steigerung der Genauigkeit rechnerisch abgeleiteter Höhenlinien in Betracht gezogen werden. Beide Maßnahmen erhöhen den Herstellungsaufwand und mindern die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Zu beachten ist, daß für den Einsatz in der Flurbereinigung neben der Höhenlinie als Höhenangabe auch die exakte Erfassung von größeren Rainen und Böschungen einschließlich deren Höhe und von Geländekanten erforderlich ist. Im Orthophoto selbst sind Böschungen nicht ohne weiteres zu erkennen; ebenso gehen sie aus den profilweise erfaßten Punkthöhen nur begrenzt hervor. Dies bedeutet, daß Raine, Böschungen und Geländekanten im Anschluß an das profilweise Abtasten des Modells getrennt abgefahren und digitalisiert werden müssen.

Als Alternative zur rechnerischen Ableitung von Höhengeschichtlinien aus Profilpunkten schlägt FINSTERWALDER [50] vor, zu überlegen, ob es dort, wo der Geländedarstellung besondere Bedeutung beigemessen wird, nicht zweckmäßig wäre, statt der Profillinien die Schichtlinien direkt zu bestimmen, um daraus - gleichfalls als Nebenprodukt - Profillinien für die Differentialentzerrung rechnerisch abzuleiten. Ausgangspunkt für die Überlegungen FINSTERWALDERS in [49], [50], [52] ist dabei die Feststellung BRANDSTÄTTERS [25], daß photogrammetrische Schichtlinien, die im Stereomodell direkt gezogen werden, im Rahmen der Zeichengenaugigkeit alle Kleinformen wiedergeben und deshalb als "exakte Schichtlinien" bezeichnet werden können.

Neuere Genauigkeitsvergleiche verschiedener Höhenlinienauswertungen (AdV [8], SCHILCHER [177]) weisen nach, daß Höhenlinien, die aus sorgfältig abgefahrenen Profilen rechnerisch abgeleitet werden, dann eine hohe geometrische Genauigkeit und eine gute morphologische Richtigkeit aufweisen, wenn als Ausgangsinformation die geomorphologisch wichtigen Bruchkanten und Strukturlinien des Geländes zusätzlich erfaßt werden. Im Vergleich zur direkten photogrammetrischen Höhengeschichtlinienkartierung ist der mittlere Höhenfehler der rechnerisch abgeleiteten Höhenlinien im flachen Gelände etwas geringer und in steilem Gelände, in Abhängigkeit von Profilabstand und Profilrichtung, etwas größer. Wenn somit BRANDSTÄTTER die direkt abgefahrne photogrammetrische Höhengeschichtlinie als "exakte Schichtlinie" bezeichnet, so dürfte dies für deren morphologische Richtigkeit in der Regel weitgehend zutreffen, nicht ohne weiteres jedoch für die geometrische Genauigkeit.

Das Verhältnis des Zeitaufwands für die ausschließlich profilweise Modellabtastung zur direkten Höhenlinienkartierung liegt im Mittel bei 1 : 2.5. Nach

neueren Untersuchungen ist der Zeitaufwand zur Festlegung, Erfassung und Digitalisierung geomorphologisch wichtiger Linien in bewegtem Gelände ebenso hoch oder höher als der, welcher zur profilweisen Datenerfassung erforderlich ist (SCHILCHER |177|). Insgesamt entspricht somit der Gesamtaufwand zur profilweisen Digitalisierung eines Modells genähert demjenigen für eine direkte photogrammetrische Höhenlinienkartierung.

Bei der direkten Höhenlinienkartierung schließt sich normalerweise eine kartographische Überarbeitung der Höhenlinien an. Die dafür und für die rechnerische Ableitung von Profilen für die Differentialverzerrung erforderlichen Kosten sind wiederum genähert mit den Kosten für die Berechnung von Höhenlinien aus Profilverpunkten und das automatische Auszeichnen am Zeichenautomaten vergleichbar. Da die Höhenlinien für die Aufgaben in der Flurbereinigung nicht immer dieselbe hohe kartographische Qualität wie für topographische Zwecke besitzen müssen, reicht oft eine geringere Überarbeitung der direkt abgefahrenen Höhenlinien aus. Dagegen gewinnt die digitale, profilweise Datenerfassung dann an Wirtschaftlichkeit, wenn die Profilverpunkte im Zuge der Orthoprojektion als Nebenprodukt anfallen und lediglich die geomorphologisch wichtigen Bruchkanten und Strukturlinien zusätzlich zu erfassen sind.

Um eine sinnvolle Kombination der Herstellung von Orthophotoplänen mit der Datenerfassung zur Berechnung digitaler Höhenmodelle zu erreichen, wird für den praktischen Einsatz im Flurbereinigungsverfahren folgender Weg vorgeschlagen: Das Gelände wird photogrammetrisch durch eine für eine Höhengewinnung ausreichende Anzahl von Einzelpunkten entlang von Profilen oder in einem Raster z.B. mit einem analytischen Auswertegerät digital erfaßt. Diese Geländepunkte dienen einerseits zur Herstellung von Orthophotoplänen durch einen digital gesteuerten Orthoprojektor. Andererseits eignen sie sich, ergänzt durch Einzelpunkte entlang geomorphologisch wichtiger Geländelinien und um Kuppen- und Muldenpunkte, zur Erzeugung digitaler Höhenmodelle.

Die zukünftigen Möglichkeiten bei der Beschaffung von Planungsunterlagen für die Flurbereinigung sind eng mit den Fortschritten verbunden, die bei der Automation in der Photogrammetrie erzielt werden können. Im photogrammetrischen Gerätebau ist eine zunehmende Einbeziehung von elektronischen Rechnern in die Zweibildauswertung erkennbar. Diese Rechner erlauben es, die projektiven Beziehungen zwischen Gelände und den Bildern rechnerisch zu verwirklichen. Einen Überblick über die nach diesem Prinzip arbeitenden analytischen Auswertegeräte geben z.B. HOBBIÉ |88| und KONECNY |105|, |106|, |107|, |108|. Während das konventionelle photogrammetrische Analoggerät mit Zusatzgeräten zur digitalen Datenerfassung ausgerüstet werden muß, enthält das analytische Auswertegerät bereits die entsprechenden Komponenten. Es erscheint deshalb besonders geeignet zum halbautomatischen Abfahren von Profilen oder Rastern und zum Anfahren von Einzelpunkten (RÜDENAUER |170|).

In der nächsten Stufe der Automation übernehmen Bildkorrelatoren die automatische Nachführung der Höhe. Ein analytisches Auswertegerät mit analog-elektrischem Bildkorrelator ist z.B. das "Gestalt-System" von HOBROUGH (HOBROUGH |89|). Anfangs nur zur Produktion von Orthophotos eingesetzt wird es inzwischen auch zur

Gewinnung von Höheninformation verwendet (ALLAM und WONG |6|). Bildkorrelatoren als Zusatzgeräte zu Analogauswertegeräten, wie z.B. der Itek-Korrelator zum Planimat von Zeiss, Oberkochen, oder der Oromat-Korrelator zum Topocart aus Jena (MARCKWARDT |142|) beschränken sich auf das automatische Abtasten von Profilen. Ein automatisches Verfolgen von Höhenlinien erscheint beim augenblicklichen Stand der Technik noch nicht realisierbar.

Neueste Entwicklungen haben zum Ziel, die analog arbeitenden Korrelatoren durch eine digitale Bildkorrelation zu ersetzen. Erfolgt im ersten Fall die Korrelation in kleinen, flächenhaften Bildelementen, so wird bei der digitalen Bildkorrelation von der Korrelation entlang von Kernstrahlen Gebrauch gemacht (KREILING |120|). In Zukunft scheint es möglich zu sein, durch den Einsatz digitaler Prozessoren bei der Korrelation und der Differentialentzerrung die Auswertezeit für Höhenlinien oder Orthophoto auf wenige Minuten pro Bild zu verkürzen (KONECNY et al. |109|). So könnte sich z.B. die Herstellungszeit für ein Orthophoto von derzeit ca. 5 h bei konventioneller Profilabtastung in Zukunft auf ca. 10 - 20 min. bei vollautomatischem Betrieb reduzieren. Auch die Herstellungskosten könnten nach dieser Abschätzung von derzeit 275 DM auf zukünftig ca. 140 DM bei vollautomatischer Herstellung ungefähr um den Faktor 2 verringert werden.

Dieser kurze Überblick über den gegenwärtigen Stand und die mögliche zukünftige Entwicklung im photogrammetrischen Gerätebau zeigt, daß auf dem Gebiet der digitalen Datengewinnung und der Differentialentzerrung durch den Einsatz von analytischen Auswertegeräten und von Bildkorrelatoren teilautomatische Auswerteprozesse bereits heute realisierbar sind. Die zukünftige Entwicklung wird nicht nur den vollautomatischen Arbeitsablauf zum Ziel haben, sondern seine Wirtschaftlichkeit voraussichtlich deutlich steigern.

Die Fortschritte in der photogrammetrischen Automation und die hohe Qualität der photogrammetrisch erzeugten Ergebnisse empfehlen diese Verfahren bereits heute für den Routineeinsatz in der Flurbereinigung. Die Zukunft wird mit der zu erwartenden Steigerung der Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren dies bestätigen.

7.2 Planung und Ausführung ingenieurbautechnischer Maßnahmen

Verglichen mit den teilweise erheblichen Eingriffen in das Gelände, die im Verkehrswegebau aufgrund der vorgegebenen Entwurfparameter heute üblich sind, handelt es sich bei den Wege- und Gewässerbaumaßnahmen im Rahmen einer Flurbereinigung abgesehen von Rebflurbereinigungen normalerweise um Projekte, deren ingenieurbautechnischer Aufwand recht gering ist. Beim Entwurf des landwirtschaftlichen Wegenetzes müssen einerseits die übergeordneten Verbindungen für den landwirtschaftlichen Verkehr geschaffen, andererseits die Fluren insgesamt ausreichend erschlossen und gleichzeitig wirtschaftliche Formen der dadurch gebildeten neuen Blöcke sichergestellt werden. Darüber hinaus sollen sich die befestigten Feldwege harmonisch in das Gelände einfügen. Dies und die auf den langsameren landwirtschaftlichen Verkehr abgestimmten Entwurfparameter bedingen, daß sich das landwirtschaftliche Wegenetz in wesentlich stärkerem Umfang an die bestehenden Geländeformen anpassen kann und muß als z.B. klassifizierte Straßen.

Auch zukünftig kann deshalb davon ausgegangen werden, daß diese relativ kleinen Projekte im Einzelfall wie bisher weitgehend in der Örtlichkeit in das Gelände eingepaßt werden. Bei größeren Eingriffen ins Gelände sollte jedoch, ebenso wie im Verkehrswegebau, die graphische Planung mit Querprofilen durch eine digitale mit Hilfe eines digitalen Geländemodells ersetzt werden.

Günstige Voraussetzungen für den Einsatz eines digitalen Geländemodells liegen bei größeren, flächenhaft ausgedehnten Projekten vor, wie sie z.B. bei der Durchführung von Rebflurbereinigungen oder bei der Anlage größerer Wasserflächen zur Wasserrückhaltung und zur Landschaftsgestaltung zu bearbeiten sind. Die dabei anfallenden umfangreichen Planierungen können mit Hilfe eines digitalen Geländemodells weitgehend numerisch vorgeplant werden. Nach einer photogrammetrischen oder tachymetrischen Geländeaufnahme wird ein digitales Höhenmodell der alten Geländeoberfläche erstellt, das die Grundlage zur rechnerischen Geländemodellierung, zur numerischen oder graphischen Wiedergabe des projektierten Geländes und, nach einer erneuten Höhenaufnahme nach der Bauausführung, zur Abrechnung der bewegten Massen liefert. Wie bereits in Abschnitt 4.5 erläutert, empfiehlt sich für diese Zwecke der Einsatz eines rasterförmigen digitalen Höhenmodells.

In seiner Denkschrift zur Landeshaushaltsrechnung für das Haushaltsjahr 1974 be- anstandet der Rechnungshof Baden-Württemberg [168] die Abrechnung eines Rebflurbereinigungsverfahrens, wie sie bisher in diesem Land üblich ist. Dabei kritisiert er insbesondere im Zusammenhang mit der Vergabe von Planierungsarbeiten den Abschluß von Pauschalverträgen, falls die Bauleistungen nicht genau beschrieben sind. Nachdem im untersuchten Fall die Planierungsarbeiten, die als Stundenlohnvertrag ausgeschrieben worden waren, nahezu doppelt so viel gekostet hatten wie veranschlagt war, wertet der Rechnungshof dies als ein Zeichen unzureichender Bauvorbereitung. Tatsächlich sind bei dieser Art der Ausschreibung die eingehenden Angebote nur bedingt miteinander vergleichbar. Auch von Seiten der interessierten Baufirmen wird verschiedentlich ein eindeutigeres Leistungsverzeichnis gewünscht.

Das digitale Höhenmodell bildet hier zusammen mit der digitalen Oberflächenmodellierung ein geeignetes Instrumentarium, um Erdmassen bei umfangreichen Planierungsarbeiten bestmöglich berechnen zu können. Auf dieser Grundlage kann dann ein eindeutiges Leistungsverzeichnis erstellt werden.

Entsprechend der unterschiedlichen geologischen Verhältnisse trifft die Rebflurbereinigung in Baden-Württemberg in den Hauptanbaugebieten des Keupers im Landesteil Württemberg und des Löß im Landesteil Baden auf recht verschiedene Ausgangssituationen. Die Formation des Keupers mit ihren unterschiedlich harten Gesteinsschichten führte zu der charakteristischen Schichtstufenlandschaft. Die unterschiedlichen Fallwinkel der einzelnen Schichten, die von deren Härte abhängen, sollen auch im Zuge der Rebflurbereinigung sowohl aus ökonomischen Gründen (minimale Massenbewegungen) als auch unter landschaftserhaltenden Aspekten beibehalten werden.

Andere Verhältnisse finden wir im Lößgebiet des Kaiserstuhls vor. Charakteristisch für dieses Gebiet ist die Terrassierung der Hänge. Dabei ist zu beachten, daß die heute vorhandenen und vertrauten Kleinterrassen sicherlich nicht den

natürlichen Zustand darstellen und somit als Kulturlandschaft zu bezeichnen sind. Von seiner Standfestigkeit her erlaubt der Löß unter günstigen Voraussetzungen die Anlage sehr hoher und steiler Böschungen, so daß auch wesentlich größere Terrassen als bisher üblich angelegt werden können.

Diese unterschiedlichen Gegebenheiten in der Schichtstufenlandschaft des Keupers und des terrassierten Geländes im Löß führen auch zu Unterschieden im Vorgehen bei der digitalen Oberflächenmodellierung. Für beide Geländetypen wird im folgenden ein Vorschlag für den Arbeitsablauf skizziert.

Auf der Grundlage der digitalen Auswertung der Erstbefliegung bzw. einer tachymetrischen Höhenaufnahme wird in beiden Fällen von der alten Geländeoberfläche des Projektgebietes ein digitales Höhenmodell berechnet (DHM_{alt}). Zur visuellen Kontrolle und zur Dokumentation des alten Zustandes werden Höhenlinien rechnerisch abgeleitet und ausgezeichnet.

In der Schichtstufenlandschaft des Keupers schließt sich eine Digitalisierung der großräumigen Geländebruchkanten als Verschneidungslinien der verschiedenen geologischen Schichtstufen an. Diese Bruchkantenpunkte werden im ersten Berechnungslauf zur digitalen Oberflächenmodellierung von ihrer Höhe her mit großem Gewicht und damit weitgehend als Zwangspunkte eingeführt. Zur Aufstellung der Verbesserungsgleichungen für die Geländeneigung $\alpha(I,K)$ im Rasterpunkt (I,K) muß dabei zunächst anhand der digital vorliegenden Bruchkanten festgestellt werden, in welcher Schichtstufe der Rasterpunkt liegt. In der Verbesserungsgleichung ist dann der entsprechende Richtwert für die Geländeneigung der jeweiligen Schichtstufe einzuführen. Weitere Bedingungen sind ein vorzugebender Massenausgleich und andere, in Abschnitt 4.6 beschriebene Forderungen.

Als Ergebnis liegt ein erster Entwurf zur projektierten, planierten Geländeoberfläche in Form eines digitalen Höhenmodells (DHM_{neu}) vor. Aus diesem werden die Höhenlinien der projektierten Oberfläche rechnerisch abgeleitet und am Zeichenautomaten ausgezeichnet.

Dieser Höhenlinienplan dient jetzt als Arbeitsgrundlage für eine manuelle Überarbeitung der rechnerisch erzeugten Geländeoberfläche. Dazu wird der Verlauf der Wirtschaftswege (Aufstiegs- und Zonenwege) unter Berücksichtigung der vorgegebenen Maximalsteigung von 8 - 12 %, der üblichen Gewanntiefe in Weinberg zwischen 60 und 100 m (v. FIGURA |48|) und anderer anerkannter Erfahrungswerte im Höhenlinienplan kartiert. Die Einteilungswege werden dabei als einfache Klappwege angenommen. Der Höhenverlauf der Wege wird durch die Eintragung gleichabständiger Achspunkthöhen im Plan festgelegt. Es ist anzustreben, daß die Wirtschaftswege in ihrem Höhenverlauf sich soweit wie möglich an die Geländeoberfläche anpassen.

Um eine maschinelle Bearbeitung der planierten Gewanne zu ermöglichen, muß das Gelände jeweils zwischen zwei Wirtschaftswegen in Fallrichtung eine gleichmäßige Neigung aufweisen. Diese Forderung hängt mit der Bodenbearbeitung durch Pflüge zusammen, die bei Bearbeitung mit Seilzug an einem Stahldrahtseil hängen und von der Arbeitsmaschine, die jeweils am oberen Weg steht, hoch gezogen werden. Die projektierte Geländeoberfläche soll sich deshalb in Fallrichtung möglichst gut an die geradlinige Verbindungslinie zwischen den beiden jeweils benachbarten

Wirtschaftswegen anschmiegen. Bei der rechnerischen Geländemodellierung ist somit zu fordern, daß die vertikale Abweichung des projizierten Geländes entlang der Sehne in Fallrichtung, die hier als Durchbiegung d bezeichnet wird, ein vorgegebenes Maß von ca. 0.5 m nicht übersteigen darf (Abb. 7-4).

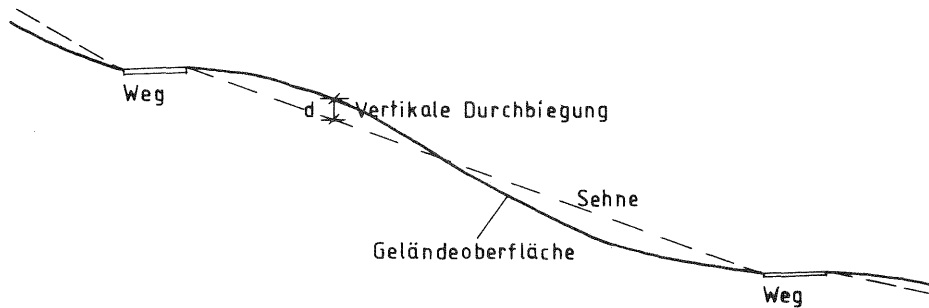


Abb. 7-4 Geländeschnitt in Fallrichtung

Wollen wir diese Durchbiegung zwischen jeweils zwei benachbarten Wirtschaftswegen bei der Berechnung der planierten Oberfläche mit berücksichtigen, so müssen wir zunächst mit den Randlinien der Wirtschaftwege die neuen Blöcke in Form von geschlossenen Polygonen digitalisieren und abspeichern. Die Aufstellung der Verbesserungsgleichung für die vertikale Durchbiegung der Geländeoberfläche kann für einen Rasterpunkt (I,K) folgendermaßen ablaufen:

- Feststellen, in welchem geschlossenen Wegepolygon der Rasterpunkt (I,K) liegt,
- Bestimmung der Fallrichtung im Rasterpunkt (I,K) mit Hilfe des vorliegenden DHM,
- Berechnung der beiden nächstliegenden Schnitte der Geraden durch den Rasterpunkt (I,K) in Fallrichtung mit dem Wegepolygon,
- Bestimmung der Höhe dieser beiden Schnittpunkte,
- Aufstellung der Verbesserungsgleichung für die Durchbiegung im Rasterpunkt (I,K) .

Die Abführung des Oberflächenwassers im Weinberg erfolgt durch Wasserstaffeln. Diese verlaufen in Geländemulden ins Tal. Die Geländemulden selbst müssen genähert parallel zur Zeilenrichtung in Fallrichtung der planierten Geländeoberfläche verlaufen. Zwischen übereinanderliegenden Blöcken sollen sie nicht senkrecht zur Fallrichtung gegeneinander versetzt sein.

Voraussichtlich wird durch die o.a. Begrenzung der Durchbiegung des Geländes in Fallrichtung die Anlage von Wasserstaffeln in Geländemulden erleichtert. Überprüft wird dies im Höhenlinienplan des ersten Entwurfs der geplanten Geländeoberfläche anhand der aus den Höhenlinien graphisch abgeleiteten Falllinien. Daneben läßt sich eine Falllinie, ausgehend von einem koordinatenmäßig vorgegebenen Ausgangspunkt, aber auch wie in Abschnitt 4.1.8 beschrieben aus dem digitalen Neigungsmodell rechnerisch ableiten und an einem Bildschirm oder einem Zeichenautomaten im Grundriß auszeichnen. Stimmt diese Muldenlinie mit der voraussichtlichen Zeilenrichtung nicht in ausreichendem Maße überein, so werden in diesem Bereich einige Geländepunkte digitalisiert und mit veränderten Höhen versehen, so daß die Wasserabführung verbessert wird.

In einem ersten Wiederholungslauf der rechnerischen Oberflächenmodellierung werden diese Geländepunkte mit großem Gewicht eingeführt. Gleichzeitig wird die Durchbiegung der Geländeoberfläche zwischen benachbarten Wirtschaftswegen minimiert. Ergeben sich zwischen der überarbeiteten Geländeoberfläche und der Gradienten der Wirtschaftswegen größere Höhendifferenzen (Größenordnung im Meterbereich), so ist zu prüfen, ob die Wirtschaftswegen nicht durch eine Verschiebung im Grundriß oder eine Änderung der Gradienten besser an die Geländeoberfläche angepaßt werden können. Gelingt dies nicht, so ist die Geländeoberfläche nochmals zu modifizieren. Dazu wird die Höhe einiger Punkte entlang der entsprechenden Wege im anschließenden Wiederholungslauf zur Berechnung der projizierten Oberfläche mit einem großen Gewicht in die Ausgleichung eingeführt. Sie wirken somit wie Zwangspunkte bei der Berechnung der neuen Geländeoberfläche.

Nach einigen wenigen Wiederholungsläufen kann vermutlich davon ausgegangen werden, daß sich das Netz der Wirtschaftswegen mit ausreichender Genauigkeit in die projizierte Oberfläche einfügt.

Vor der örtlichen Durchführung der Planierungsarbeiten wird die rechnerisch ermittelte Oberfläche noch in bezug auf die Transportwege der zu bewegenden Massen und auf die Stellen mit maximalem Abtrag hin überprüft. Dazu werden in jedem Rasterpunkt des digitalen Höhenmodells rechnerisch die Höhendifferenzen zwischen dem DHM_{alt} und dem DHM_{neu} gebildet. Zusammen ergeben diese Werte ein digitales Höhendifferenzenmodell. Die aus diesem Modell abgeleiteten Isolinien stellen Linien gleichen Auf- oder Abtrags dar. Für die verschiedenen Auf- und Abträge bzw. für vorgegebene Bereiche sind die Volumina getrennt zu berechnen und in der Isolinienkarte automatisch einzutragen. Ein visueller Vergleich auf der Karte zeigt, ob die entstehenden Transportwege wirtschaftlich sind.

Weiterhin sind sämtliche Abtragsflächen, insbesondere deren Maximalwerte, daraufhin zu überprüfen, ob der Abtrag im geplanten Umfang überhaupt möglich ist oder ob anstehende Gesteinsschichten Sprengungen oder vergleichbar hohen Aufwand erfordern. Sind die geologischen Verhältnisse nicht ausreichend sicher bekannt, so empfiehlt es sich, die Lage des maximalen Abtrags aus der Karte in die Natur zu übertragen und eine Probebohrung durchzuführen. Ergibt die örtliche Überprüfung, daß der Abtrag z.B. durch anstehendes Gestein kostspielig wird, so ist zu überlegen, ob die projizierte Oberfläche nicht erneut modifiziert werden sollte. Gegebenenfalls wäre dieser Punkt als Zwangspunkt in einem erneuten Wiederholungslauf zur Berechnung einer modifizierten Geländeoberfläche einzuführen.

Als Anhaltspunkt für die Durchführung der Planierungsarbeiten im Gelände empfiehlt es sich, zusätzlich zur Höhenangabe für die neuen Wirtschaftswegen und andere Geländepunkte die Null-Linie der Differenzhöhe als Verschneidungslinie der alten und neuen Geländeoberfläche näherungsweise im Gelände abzustecken.

Oft sind neben den in Abschnitt 4.6 genannten Bedingungen noch weitere Kriterien bei großen Planierungen zu beachten. So sind z.B. beim Transport der zu bewegenden Massen nicht nur die Transportwege als solche zu minimieren, sondern es muß dabei gleichzeitig das Bodengefüge berücksichtigt werden. Dies kann bedeuten,

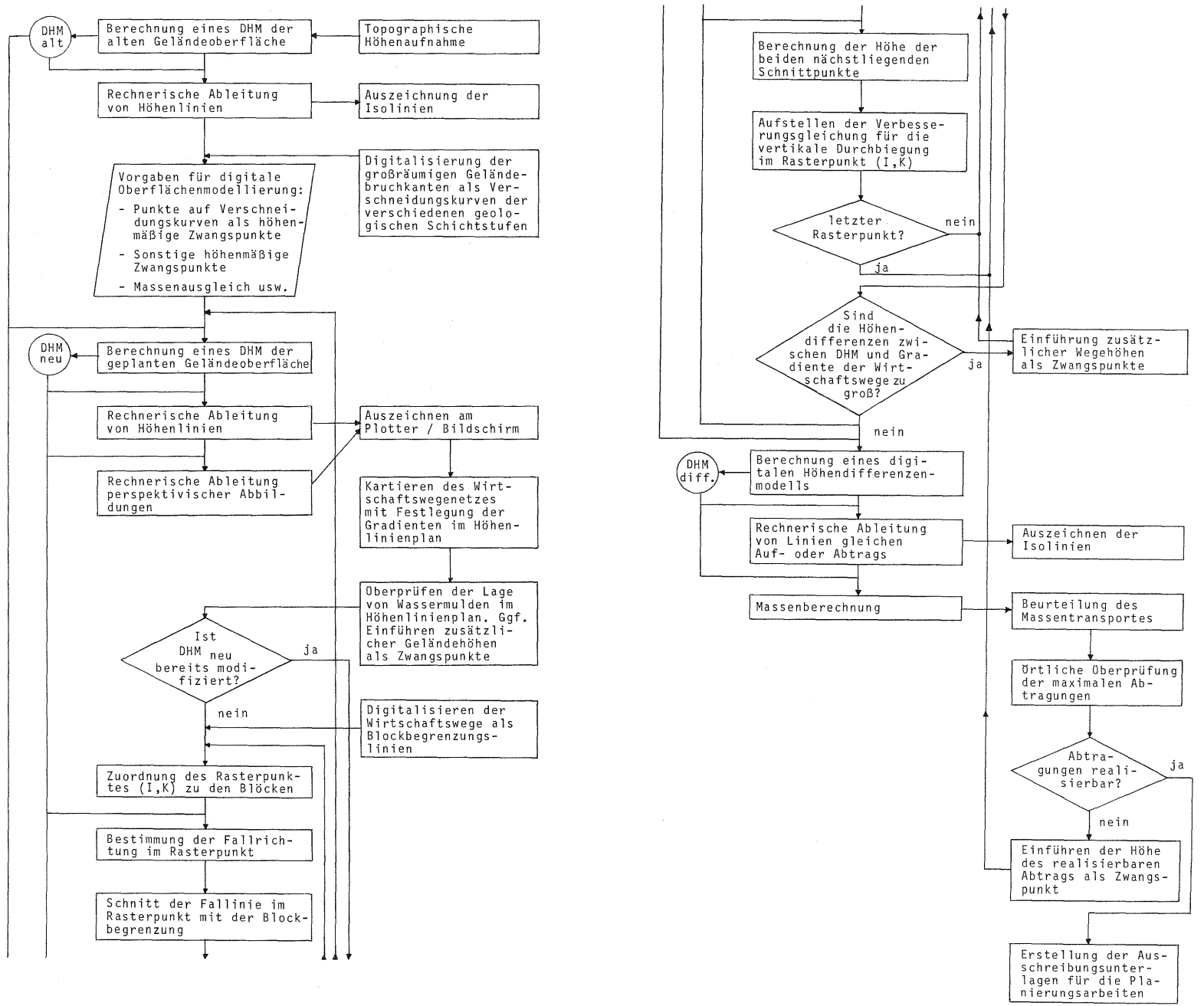
daß an einer Stelle z.B. der Oberboden weggeschoben, das darunter anstehende steinige Material gelöst und abgefahren, zuletzt der Oberboden wieder einplaniert werden muß.

Zwar ist es denkbar, die anstehenden Boden- bzw. Gesteinshorizonte in vorliegenden geologischen Karten zu digitalisieren oder durch Probebohrungen zu erfassen und daraus ein digitales Höhenmodell für die einzelnen Horizonte zu berechnen. Nach einem ersten Durchlauf zur Berechnung einer projektierten Oberfläche könnten in jedem Rasterpunkt die Höhenverbesserung bestimmt und mit Hilfe der digitalen Höhenmodelle der verschiedenen Horizonte deren Härte durch Einführen von Gewichten bei Wiederholungsläufen berücksichtigt werden. Ähnlich komplexe Vorgänge wie ein mehrmaliges Bewegen von Erdmassen mit Zwischenlagerung sollten jedoch bei den Automationsbestrebungen zurückgestellt und wie bisher vom Ingenieur selbst geplant werden. Eine Zusammenfassung der beschriebenen Arbeitsschritte enthält das Blockdiagramm der Abbildung 7-5.

Bei den terrasierten Hängen des Löß handelt es sich um Flächen, die in stärkerem Umfang den Eingriff des Menschen in die Landschaft erkennen lassen als die Schichtstufenlandschaft des Keupers. Dabei wird ein Hang in Abhängigkeit von seiner Neigung in eine Folge mehr oder weniger großer Terrassen aufgelöst. Das Ergebnis ist eine künstliche Terrassenlandschaft, die in der Regel um so weniger natürlich erscheint, je tiefer die Terrassen und je höher und steiler die Böschungen ausgebildet sind. Die geometrischen Formen der Terrassen sind von der Geländeform her mit dem ursprünglich weitgehend gleichmäßig geneigten Gelände ebenso wenig unmittelbar in Verbindung zu bringen wie die neuen Großterrassen mit den alten Kleinterrassen. Deshalb kann die digitale Oberflächenmodellierung, wie sie in Abschnitt 4.6 vorgeschlagen wird, hier nicht sinnvoll eingesetzt werden. Statt dessen wird davon ausgegangen, daß ein Geländeformungsplan als Entwurf der neuen Geländeoberfläche mit dem neuen Wege- und Gewässernetz wie bisher manuell vom Ingenieur erstellt wird.

Zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells der geplanten Geländeoberfläche (DHM_{neu}) wird die Höheninformation dieses Entwurfs durch eine Digitalisierung der Böschungskanten und der neuen Wege einschließlich der Höhen für die EDV verarbeitbar gemacht. Dazu werden die Terrassenflächen der einzelnen Gewanne ebenso wie die dazu gehörenden Böschungen durch geschlossene Polygone digitalisiert. Nachdem für die geplanten Böschungen bestimmte vorgegebene Neigungswerte angestrebt werden, sind die jeweiligen Böschungsober- bzw. Böschungsunterkanten in ihrer Lage und Höhe nicht unabhängig voneinander. Es wäre somit möglich, entweder nur die Böschungsoberkanten oder die Böschungsunterkanten zu digitalisieren und die fehlende Böschungskante rechnerisch durch die Verschneidung der Böschung mit der angrenzenden Terrassenfläche zu ermitteln. Zur rechnerischen Erzeugung des digitalen Höhenmodells der geplanten Geländeoberfläche werden die Höhenwerte des Rasters innerhalb eines Gewannes zwischen den Blockbegrenzungslinien bzw. Böschungskanten in Fallrichtung linear eingerechnet.

Abb. 7-5 Ablaufstruktur einer digitalen Oberflächenmodellierung in der Schichtstufenlandwirtschaft des Keupers



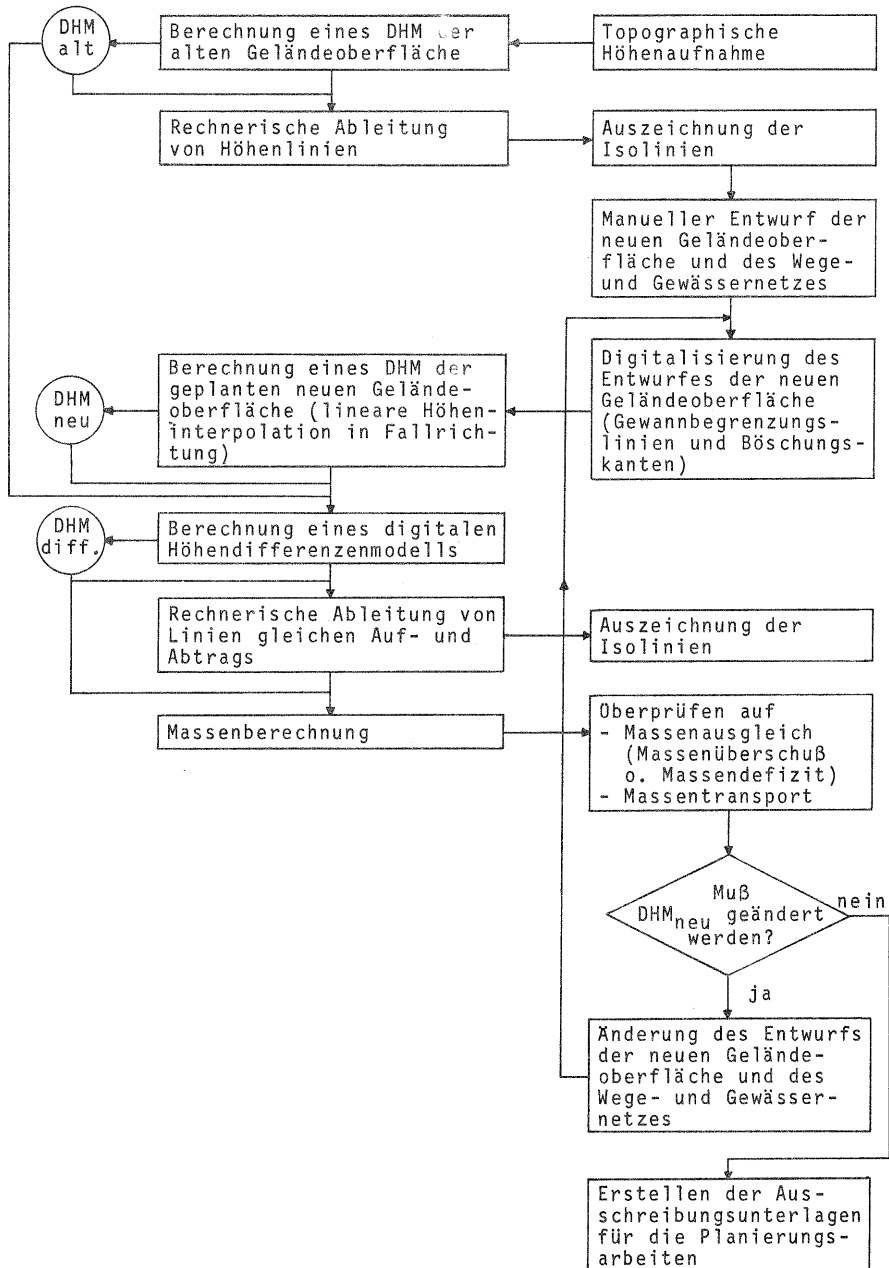


Abb. 7-6 Massenberechnung bei terrasierten Hängen

Die folgende Berechnung eines digitalen Höhendifferenzenmodells ($DHM_{\text{neu}} - DHM_{\text{alt}}$) mit anschließender Massenberechnung entspricht dem vorgeschlagenen Vorgehen bei der digitalen Oberflächenmodellierung in der Schichtstufenlandschaft (Abb. 7-5). Die Massenberechnung wird auf den angestrebten Massenausgleich (bzw. Massenüberschuß oder Massendefizit) und auf den erforderlichen Massentransport hin überprüft. Ergeben sich hier Änderungswünsche, so sind diese durch Änderungen im Entwurfsplan der geplanten neuen Geländeoberfläche zu berücksichtigen.

Die geänderten Bereiche sind neu zu digitalisieren und in die vorhergehende Digitalisierung einzufügen. Anhand der erneuten Digitalisierung wird ein geändertes digitales Höhenmodell der neuen Geländeoberfläche erstellt. Eine Überprüfung der erneuten Massenberechnung ergibt, ob der Entwurf den vorgegebenen Kriterien entspricht oder ob er nochmals geändert werden muß.

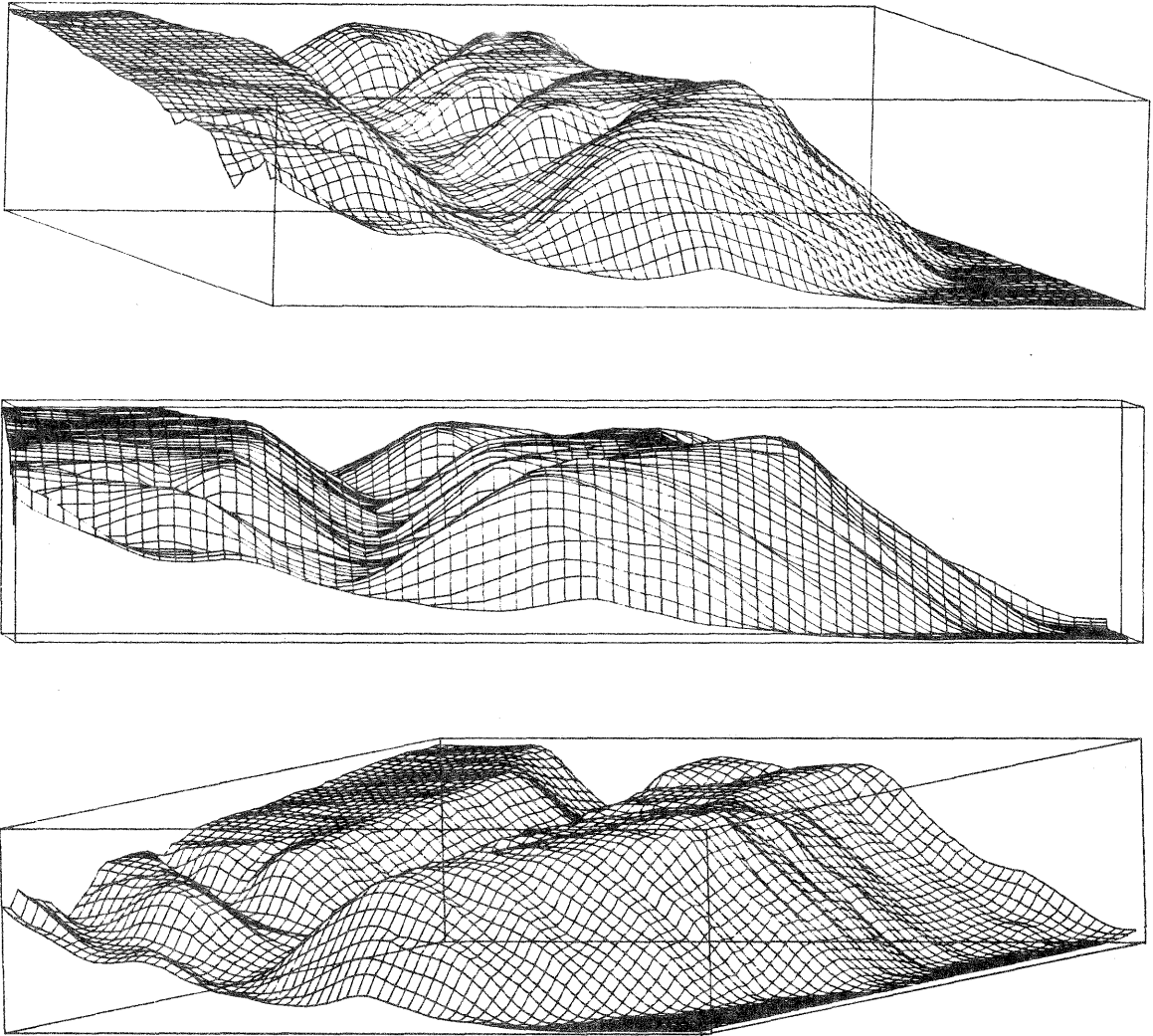


Abb. 7-7 Räumliche Darstellung des DHM für das Beispiel Ranggen

Entspricht der Entwurf den Vorgaben, so werden die Ergebnisse der letzten Massenberechnung zusammen mit der Auszeichnung der Auf- und Abträge der Ausschreibung der Planierungsarbeiten zugrunde gelegt. Eine Übersicht über die einzelnen Arbeitsschritte enthält das Blockdiagramm der Abbildung 7-6.

Hervorzuheben ist, daß sich für die digitale Oberflächenmodellierung ein interaktives Arbeiten mit einem graphischen Bildschirm empfiehlt. Ein interaktiver Bildschirm erscheint hier als ideales Hilfsmittel, um einerseits das geplante neue Gelände in seinem jeweiligen Zustand und in der jeweils gewünschten Form darstellen und es andererseits z.B. durch die Erfassung weiterer Zwangspunkte modellieren zu können.

Eine wichtige Hilfe bei der Beurteilung des Ergebnisses der digitalen Oberflächenmodellierung liefert, neben der Höhenlinienauszeichnung, die perspektivische Darstellung des rasterförmigen digitalen Höhenmodells selbst. Abbildung 7-7 zeigt drei verschiedene räumliche Darstellungen des digitalen Höhenmodells des Beispiels Ranggen mit Blick von Südosten, Osten und Nordosten auf das Gelände. Das dargestellte Rasterintervall Rechts beträgt dabei jeweils 40 m, das Rasterintervall Hoch 20 m. In Abhängigkeit von den Standpunktkoordinaten des Betrachters

und seiner Höhe wird die räumliche Abbildung unter Berücksichtigung von Verdeckungen berechnet und das räumliche Bild an einem Plotter oder Bildschirmgerät ausgegeben. Die Berechnung der vorliegenden Beispiele erfolgte mit Hilfe eines Rechenprogramms für räumliche Darstellung, das z.B. am Regionalen Rechenzentrum der Universität Stuttgart zur Verfügung steht.

Unter der Voraussetzung, daß der Standpunkt des Betrachters in bezug auf die interessierenden Geländeabschnitte zweckmäßig und die Größe des dargestellten Rasterintervalls sinnvoll gewählt sind, erlauben diese räumlichen Bilder eine detaillierte Wiedergabe von Kleinformen im Oberflächenverlauf des Geländes. Verglichen mit einer Höhenliniendarstellung, ihrer hohen Informationsdichte entlang der Höhenlinie und der mehr oder weniger rasch abfallenden Informationsdichte in Fallrichtung weist das Raster eine flächenhaft gleichmäßig verteilte Informationsdichte auf. Das Problem der zweckmäßigen Wahl der Äquidistanz oder von Zwischenhöhenlinien in bewegtem Gelände tritt bei der Auszeichnung eines Höhenrasters nicht auf.

ZIPPELIUS |236| schlägt vor, in der perspektivischen Darstellung des digitalen Höhenmodells die zum Ausbau vorgesehenen Flurbereinigungswege mit darzustellen. Durch diese Darstellung der Morphologie des Flurbereinigungsgebietes zusammen mit dem das Landschaftsbild prägenden Wegenetz könnten die Verhandlung mit den Planungspartnern und den Teilnehmern erleichtert werden. Ferner könnte die Darstellung bei der häuslichen Prüfung des Entwurfs Hilfsdienste leisten und Demonstrationsobjekt beim Planfeststellungsverfahren sein.

Während sich somit im normalen Flurbereinigungsverfahren, in dem nennenswerte Veränderungen der Geländeoberfläche nicht zu erwarten sind, perspektivische Geländedarstellungen zur Demonstration der vorhandenen Geländeoberfläche empfehlen, bieten sie sich bei Rebverfahren mit ihren großen Massenbewegungen als Hilfsmittel für die Planung und zur Kontrolle der Veränderung der Geländeoberfläche an.

Eine zunehmende Bedeutung gewinnt die rechnerunterstützte Oberflächenmodellierung und Planung dadurch, daß sich die Bewertung des Natur- und Landschaftschutzes in den vergangenen Jahren entscheidend verändert hat. War bisher die Planung weitgehend an der Forderung nach einer maschinellen und wirtschaftlichen Bearbeitbarkeit der Rebflächen orientiert (Stuttgarter Zeitung |212|), so gewinnt in den letzten Jahren die Beachtung der ökologischen Zusammenhänge und der Bewahrung charakteristischer Landschaftsformen immer mehr an Bedeutung. Neben neuen Erkenntnissen in anderen Bereichen können die beschriebenen Hilfsmittel der digitalen Oberflächenmodellierung in Zukunft mit dazu beitragen, daß die in Rebverfahren unumgänglichen umfangreichen Erdbewegungen nicht mehr dieselben nachteiligen Auswirkungen auf Landschaftsbild und Ökologie aufweisen, die bisher teilweise zu beobachten sind.

Auf eine dieser nachteiligen Auswirkungen gehen ENDLICHER |45| und SCHROEDER |184| ein, die Untersuchungsergebnisse zur Überprüfung der Temperaturverhältnisse auf den planierten Großterrassen des Kaiserstuhls nach der Rebflurbereinigung mitteilen. Neben Meßfahrten durch repräsentative Landschaftsteile wurden hier im Rahmen des erdwissenschaftlichen Flugzeugmeßprogramms der Bundesrepu-

blik Deutschland in den vergangenen Jahren Thermalaufnahmen durchgeführt. Eine Überprüfung der Temperaturverhältnisse ergab, daß die durchschnittlichen Lufttemperaturen auf den Großterrassen um einige Grad Celsius unter denen der alten Kleinterrassen liegen. Die beachtliche Größe der neuen Terrassen steigert in Strahlungsnächten die Produktion von Kaltluft, was bei den nach innen geneigten Großterrassen zu einem Kaltluftstau und zu einer größeren Frostgefährdung im Frühjahr und Herbst führt.

Vermutlich sind dafür verschiedene Ursachen zusammen verantwortlich: Die nach innen geneigten Terrassen mit ihrer überwiegend ungünstigeren Sonneneinstrahlung, die Kaltluft, die nicht mehr nach außen talwärts abfließen kann, sondern sich innen teilweise staut und der geringere Humusgehalt der oberen Bodenschicht nach der Planie. Im Zuge der Planierungsarbeiten wurde bisher der humose Oberboden, der als virusverseucht galt, bewußt vergraben. Der nach oben beförderte humusarme Löß führte zu einer Aufhellung der Oberfläche, zu stärkerer Lichtreflektion und damit zu einer geringeren durchschnittlichen Lufttemperatur. Die geringere Wasseraufnahmefähigkeit des rohen Löß bewirkte im Zusammenhang mit dem Problem der Wasserabführung die Anlage nach innen geneigter Terrassen. Zur Frage nach innen geneigter Terrassen lagen aber anfangs von meteorologischer und weinbaulicher Seite her nur unzureichende Erkenntnisse vor.

Diese kurze und keineswegs abschließende Darstellung führt die enge Verknüpfung der technischen Planung der neuen Geländeoberfläche mit deren unmittelbaren Auswirkungen auf den Naturhaushalt deutlich vor Augen. Machen wir uns noch die unvermeidlichen Auswirkungen dieser Geländeingriffe auf das Landschaftsbild bewußt, so ist die Forderung nur konsequent, daß alle erfolgversprechenden und verfügbaren Hilfsmittel eingesetzt werden müssen, um bei der technischen Planung derart umfangreicher Eingriffe in die Geländeoberfläche Ergebnisse zu erreichen, die die Belange der Winzer und die des Natur- und Landschaftsschutzes bestmöglich miteinander verbinden.

In Baden-Württemberg ist seit dem Inkrafttreten des Flurbereinigungsgesetzes im Jahre 1954 bis zum Jahr 1979 eine Rebfläche von ca. 13 500 ha bei einer Gesamtrebfläche von ca. 25 700 ha bereinigt worden, Ungefähr 3000 ha Rebflächen liegen in solchen Steillagen, daß sie als nicht bereinigungsfähig gelten. Rund 9200 ha zunehmend steiler und schwieriger werdende Rebflächen müssen noch bereinigt werden, was bei einer jährlichen Leistung von ca. 600 ha noch einen Zeitraum von ca. 15 Jahren beanspruchen wird (BÜRKLE |32|, Bundesministerium |33|). Im Zuge einer rechnerunterstützten Planung kann das digitale Geländemodell und die digitale Oberflächenmodellierung den Planer bei der Bewältigung dieser schwierigen Aufgabe wirkungsvoll unterstützen.

7.3 Berechnung von Massen

Liegen digitale Höhenmodelle sowohl für die alte Geländeoberfläche (DHM_{alt}) als auch für die projektierte neue Geländeoberfläche ($DHM_{neu\ Soll}$) vor, so kann die Massenberechnung für die gesamte Baumaßnahme, für die einzelnen Auf- und Abtragsflächen oder für vorgegebene Bereiche numerisch, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, mit geringem Aufwand durchgeführt werden.

Vermutlich wird es nicht immer möglich sein, aus den Teilmassen der Auf- und Abtragsflächen oder beliebig abgegrenzter Bereiche mit Hilfe der Kosten für die Einzelpositionen, wie z.B. Lösen, Laden und Transport von Boden, die Gesamtkosten der Planierungsarbeiten abzuleiten. Zusätzliche Arbeiten, wie z.B. die Zwischenlagerung von Boden, erhöhen den Arbeitsaufwand und damit die Kosten. Dennoch bilden diese Teilmassen eine objektive und bestmögliche Basis, auf welcher die Baumaßnahme ausgeschrieben werden kann. Ebenso können die Teilmassen dazu dienen, die bei der Durchführung der Planung anfallende Anzahl an Transportbewegungen zu kontrollieren.

Eine Möglichkeit zur durchgreifenden Kontrolle der Güte der Bauausführung ergibt sich, wenn von der neuen Oberfläche nach der Planie wiederum ein digitales Höhenmodell ($DHM_{\text{neu Ist}}$) erzeugt wird. Eine Berechnung der Massen zwischen dem $DHM_{\text{neu Soll}}$ und dem $DHM_{\text{neu Ist}}$ zeigt die zuviel oder zuwenig bewegten Massen auf. Daneben können in einer Isolinienkarte die Höhenabweichungen zwischen beiden Höhenmodellen ausgezeichnet werden.

7.4 Aufmessung des neuen Wege- und Gewässernetzes

Durch die Aufmessung des Wege- und Gewässernetzes werden die Eckpunkte der neuen Blöcke im übergeordneten Landeskoordinatensystem festgelegt. Für unsere Betrachtungen ist es nur wesentlich, daß damit die neuen Blöcke digital in demselben Koordinatensystem wie das digitale Geländemodell vorliegen. Die Voraussetzung für eine rechnerische Verschneidung der beiden Systeme ist somit gegeben.

7.5 Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke

Als Kartengrundlage für die Wertermittlung wird in zunehmendem Umfang neben der Katasterkarte der Orthophotoplan eingesetzt (BATZ [14], HENZLER [85], KERSTING [96]). Offene Fragen scheint es jedoch noch bei den Verfahren zur Vervielfältigung von Orthophotoplänen für den Feldeinsatz zu geben. Den unterschiedlichen Forderungen, die an den Orthophotoplan bei seiner Verwendung als Feldriß für die Wertermittlung gestellt werden, wie z.B. gute Wiedergabe mit hohem Detailreichtum, gute Lesbarkeit, Maßhaltigkeit, gute Beschriftbarkeit auch unter Einwirkung von Feuchtigkeit und ein einfaches, preiswertes Vervielfältigungsverfahren, konnte bisher nicht vollständig Rechnung getragen werden. Vielleicht bietet das von POPP [164] beschriebene Verfahren der Photolyse zur Kombination von Orthophoto und Strichvorlage (z.B. alter oder neuer Bestand und Ergebnisse der Reichsbodenschätzung oder Höhenlinien) auch hinsichtlich der Vervielfältigung neue Möglichkeiten.

Zur Vereinfachung der rechnerischen Weiterverarbeitung der Ergebnisse der Wertermittlung wird vorgeschlagen, zunächst ein rasterförmiges digitales Bodenwertmodell (DBM) zu erzeugen. Vergleichbar dem digitalen Höhenmodell wird hier in rasterförmig verteilten Punkten die Bodenklasse abgespeichert.

Wird von einer vollständig neuen Wertermittlung im Felde ausgegangen, so kann zur Erzeugung des digitalen Bodenwertmodells im Prinzip ähnlich vorgegangen werden wie bei der Berechnung des digitalen Höhenmodells: Die Lage der einzelnen

Bodenproben, die in einem mehr oder weniger engmaschigen Netz über die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche des Flurbereinigungsgebiets verteilt sind, wird entweder direkt in der Örtlichkeit mit einem registrierenden elektronischen Tachymeter oder einfacher im Feldriß durch ein Digitalisiergerät erfaßt. In jedem Punkt wird die Bodenklasse registriert, wie sie örtlich festgestellt worden ist. Wertabzüge, die z.B. durch Waldschatten, stauende Nässe oder Geländeneigung verursacht sein können, müssen entweder bereits berücksichtigt oder in einem getrennten digitalen Modell enthalten sein, so daß sie rechnerisch berücksichtigt werden können.

Ändert sich die Bewertung zwischen benachbarten Bodenproben nicht kontinuierlich (Klassenfolge der Einzelbewertung z.B. 2, 2, 3, 3, 4, 4), sondern plötzlich (Klassenfolge der Einzelbewertung z.B. 2, 2, 2, 3, 4, 5), was bei der Wertermittlung landwirtschaftlich genutzter Grundstücke sicherlich häufig der Fall ist, so muß an der Stelle der Änderung eine "Bruchlinie" erfaßt werden (im 2. Beispiel zwischen den Klassen 2 und 3). Voraussichtlich häufiger als Bruchlinien dürften jedoch "Unstetigkeiten" auftreten, wenn nicht unmittelbar benachbarte Bodenklassen aneinander grenzen (Klassenfolge der Einzelbewertung z.B. 2, 3, 3, 3, 5, 5, 5, 4). Entsprechend den Unstetigkeitslinien im digitalen Höhenmodell oder den Geländebruchkanten im digitalen Neigungsmodell besitzen Punkte entlang solcher Linien für die beiden angrenzenden Flächen unterschiedliche Werte.

Die Rasterwerte des digitalen Bodenwertmodells werden aus den unregelmäßig verteilten Stützpunkten der einzelnen Bodenproben rechnerisch interpoliert. Da die Bewertung der einzelnen Bodenproben durch Einstufung in eine der Klassen des vorgegebenen Rahmens erfolgt, muß bei der rechnerischen Ableitung der Klassengrenzen berücksichtigt werden, daß als Wert für eine gesuchte Isolinie jeweils der Mittelwert der beiden benachbarten Bodenklassen vorzugeben ist (Beispiel: Isolinie 3.5 als Grenze der Bodenklassen 3 und 4). Die Isolinien werden anschließend am Zeichenautomaten ausgezeichnet. Die zahlreichen Bruchlinien oder Unstetigkeitslinien erhöhen den Aufwand der Datenerfassung und die Rechenzeit bei der Interpolation des Rasters ganz wesentlich. Die sicherlich leistungsfähige, aber auch zeitaufwendige lineare Prädiktion sollte für diese Zwecke deshalb durch einen einfacheren Interpolationsansatz ersetzt werden.

Schwierigkeiten bei der nachträglichen Berücksichtigung weiterer, den Bodenwert beeinflussender Faktoren legen die Frage nahe, ob die seither übliche Verfahrensweise nicht doch stärker angehalten werden kann. Werden die Klassengrenzen, wie bisher üblich, manuell im Bodenwertriß festgelegt, so können die endgültigen Klassengrenzen anschließend im Bodenwertriß digitalisiert werden. Auf die Möglichkeiten einer (teil-)automatischen Digitalisierung mit Hilfe eines Raster-scanners (HOFMANN [91]) wird besonders hingewiesen. Die Begrenzungspolygone für jede Klassenfläche werden als geschlossenes Polygon digitalisiert und mit der Bodenklasse gekennzeichnet. Mehrfach digitalisierte Linien werden vorweg auf ihre Übereinstimmung geprüft und gemittelt. Die Bestimmung der Rasterwerte des digitalen Bodenwertmodells aus den digitalisierten Klassengrenzen ergibt sich bei profilweiser Abspeicherung aus dem Flußdiagramm der Abbildung 7-8.

Eine Änderung der Ergebnisse der Wertermittlung als Grundlage für die Zuteilung der neuen Grundstücke kann erforderlich werden, wenn im Zuge des Flurbereinigerungsverfahrens z.B. bodenverbessernde Maßnahmen ausgeführt werden oder wenn Schutzstreifen für neu gebaute Hochspannungsfreileitungen gesichert und in der Bewertung zurückgestuft werden sollen. Durch diese in § 46 FlurbG vorgesehene Umbonitierung werden die ursprünglichen Bodenwerte verändert. Zur Übernahme dieser Veränderungen in das digitale Bodenwertmodell wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Digitalisieren des Begrenzungspolygons der in ihrem Wert veränderten Fläche getrennt nach Bodenklassen mit Abgleichung auf die Gesamtfläche,
- Bestimmung der Profile innerhalb des Polygons und der Rasterpunkte in den einzelnen Profilen, deren Bodenwert zu ändern ist (entsprechend Flußdiagramm Abb. 7-8),
- Lesen des Profiles,
- Besetzen der Rasterpunkte im Profil mit dem neuen Bodenwert,
- Einfügen des geänderten Profils in das digitale Bodenwertmodell.

Bei der hier vorgeschlagenen Abspeicherung der Bodenwerte in Rasterpunkten ändern sich somit nur die Rasterwerte innerhalb derjenigen Flächen, deren Bewertung zu verändern ist. Demgegenüber sind bei einer direkten Abspeicherung der Klassenbegrenzungspolygone zunächst die alten Begrenzungspolygone zu identifizieren, zu verändern oder zu löschen, bevor neue eingefügt werden können. Im Gegensatz zu einer rasterförmigen Abspeicherung des Bodenwertmodells ändert sich dadurch normalerweise der Umfang des erforderlichen Speicherplatzes.

Zur Erstellung der Gliederung des alten Bestandes nach Werten bzw. des Blockteilverzeichnisses des neuen Bestandes ist das rasterförmige digitale Bodenwertmodell mit den Grundstücken des alten Bestandes bzw. den Blockpolygonen des neuen Bestandes zu verschneiden. Eine automatische Bearbeitung dieses Verfahrensschrittes ist dann möglich, wenn die bisher angewandte graphische Flächenverschneidung durch eine rechnerische ersetzt wird.

Bisherige Untersuchungen zur analytischen Flächenverschneidung gehen von folgenden Überlegungen aus:

- Die Flurstücksgrenzen des alten bzw. die Blockgrenzen des neuen Bestandes liegen digital vor. Sie bilden das Flurstücksnetz.
- Die Klassengrenzen der Wertermittlung liegen ebenfalls digital vor. Sie bilden das Polygonnetz der Wertermittlung.
- Die bisher übliche graphische Überlagerung der beiden Netze wird durch eine rechnerische Überlagerung ersetzt, d.h. mit Hilfe eines Rechenprogramms werden beide Netze analytisch miteinander verschnitten.

Das Flurstücksnetz wird dabei durch die Grenzpunkte gebildet, deren Koordinaten in einem vorgegebenen Umdrehungssinn aufeinander folgen. Verläuft die Flurstücksgrenze zwischen zwei benachbarten Grenzpunkten nicht geradlinig, sondern z.B. entlang eines Kreisbogens, so ist dies besonders zu berücksichtigen.

Die Verwirklichung der Idee einer analytischen Flächenverschneidung durch ein Rechenprogramm, das auf die Belange der Flurbereinigung abgestimmt ist, wurde

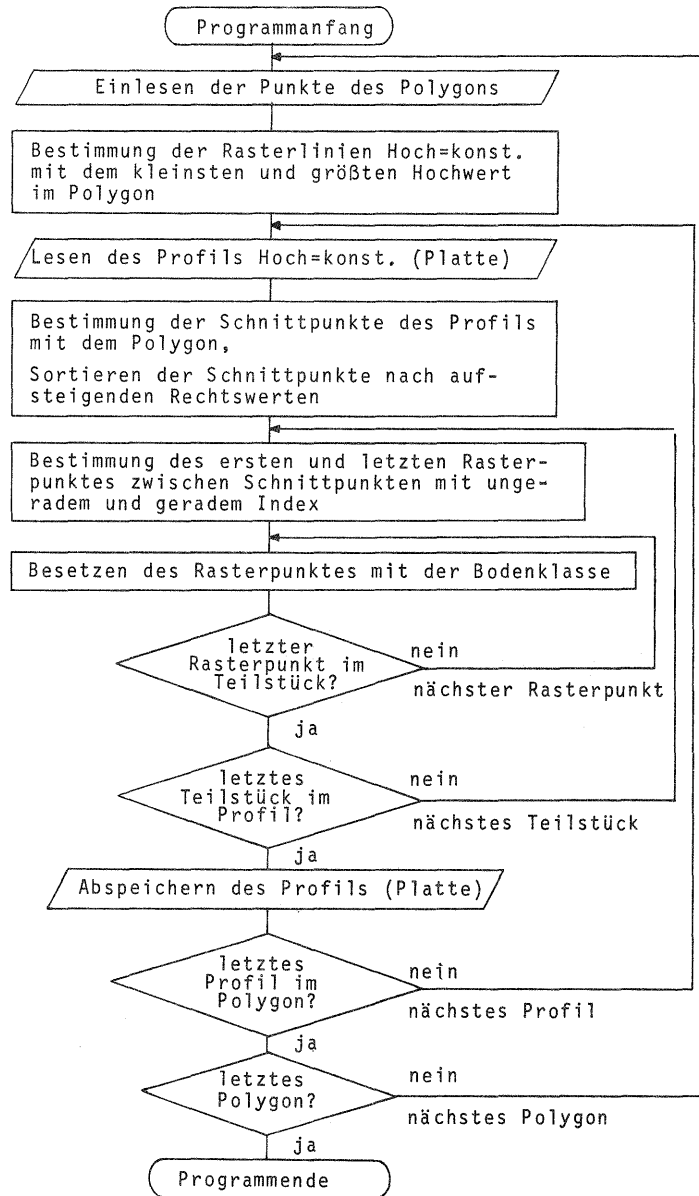
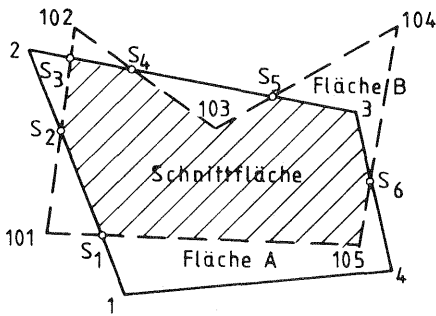


Abb. 7-8 Flußdiagramm zur Erzeugung eines rasterförmigen digitalen Bodenwertmodells

bisher nur in einigen wenigen Fällen bekannt, so z.B. von BAUMGARTNER und MÜLLER [16], Geodata-Service GmbH [61], KAUFMANN und BIGLER [94] und PLATTER [162]. Bei der Masse der Daten, die normalerweise in einem Flurbereinigungsverfahren mit seiner großen Zahl von Flurstücken, Blöcken und Klassenflächen anfallen, ist dafür Voraussetzung, daß eine Rechenanlage mit einem sehr schnellen Zentralrechner und großer externer Speichermöglichkeit mit schnellem Zugriff zur Verfügung steht. Nur so besteht die Möglichkeit, die Aufgabe auch von der wirtschaftlichen Seite her in den Griff zu bekommen (RUSSLER [173]).

Die eigentliche Schwierigkeit liegt dabei nicht darin, die Schnittpunkte der beiden Polygonnetze zu bestimmen, sondern die Reihenfolge der Eckpunkte der Schnittfläche bei einem vorgegebenen Drehsinn festzulegen. Die richtige Reihenfolge ist für die anschließende Flächenberechnung unerlässlich.

KAUFMANN und BIGLER [94] führen zwei Lösungsmöglichkeiten dafür an. Als erstes Verfahren geben sie den Simplex-Algorithmus an. Dieser beschreibt wohl automatisch die gesuchte Folge der Eckpunkte der Schnittfläche, versagt aber, wenn die Schnittfläche konkav ist (Abb. 7-9). Da konkave Flächen ebenso häufig auftreten können wie konvexe, kann die Berechnung mit dem Simplex-Algorithmus auf einfache Art und Weise nicht durchgeführt werden.



- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| 1 ... 4 | Eckpunkte der Fläche A |
| 101 ... 104 | Eckpunkte der Fläche B |
| S ₁ ... S ₆ | Schnittpunkte der beiden Flächen |

Abb. 7-9 Schnittfläche mit konkaver Umfangsbegrenzung

Bei der zweiten Lösungsmöglichkeit, dem sogenannten Punktsequenzverfahren, wird dadurch eine Punktsequenz im Uhrzeigersinn erreicht, daß in jedem Schnittpunkt der Begrenzungslinien der beiden Flächen neu entschieden wird, ob der Begrenzungslinie der Fläche A oder derjenigen der Fläche B gefolgt wird.

Die zweite Methode führt bei ebenen, geradlinig begrenzten Flächen immer zum gesuchten Ergebnis, erfordert aber einen wesentlich größeren organisatorischen Aufwand im Vergleich zur Simplex-Methode.

Bei der programmtechnischen Realisierung des Lösungsverfahrens wird zunächst eine Grobselektion mit Hilfe eines Rechtecktests durchgeführt. Dazu werden die minimalen und die maximalen Rechts- und Hochkoordinaten der beiden Flächen miteinander verglichen. Flächen, die sich nicht überlappen, können sofort ausgeschieden werden (Abb. 7-10).

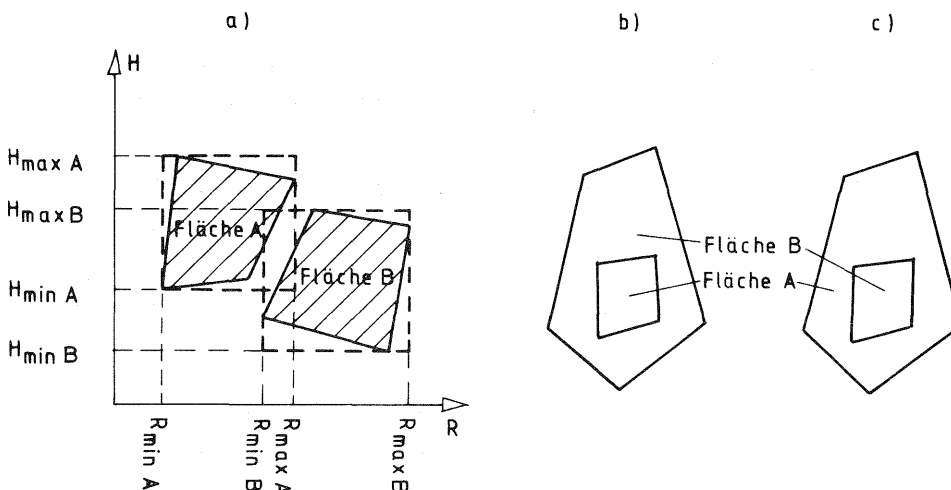


Abb. 7-10 Bestimmung der gegenseitigen Lage von Flächen, die sich nicht schneiden

Sind bei der Suche nach Schnittpunkten keine aufzufinden, so können drei Fälle vorliegen:

- a) Beide Flächen liegen nebeneinander,
- b) Fläche A liegt vollständig innerhalb Fläche B oder
- c) Fläche B liegt vollständig innerhalb Fläche A.

In allen drei Fällen muß die Eckpunktsequenz nicht bestimmt werden. In den letzten beiden Fällen ergibt sie sich direkt aus der Folge der Eckpunkte der gegebenen Flächen.

Die Wirtschaftlichkeit des auf dem beschriebenen Ansatz beruhenden Programms GZ-1 kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Bei einigen praktischen Einsätzen sollen sich die Kosten nach KAUFMANN und BIGLER [94] im herkömmlichen Rahmen gehalten haben.

Im Forschungsauftrag der Geodata-Service GmbH [61] wird vorweg die Frage untersucht, wie das Ergebnis der Wertermittlung in das übergeordnete Koordinatensystem des neuen Wege- und Gewässernetzes übertragen werden kann. Es wird vorgeschlagen, eine maschenweise Transformation mit Hilfe von Paßpunkten durchzuführen. Die Rechenzeit, die für die anschließende rechnerische Flächenverschneidung benötigt wird, ist für das bearbeitete Beispiel verhältnismäßig lang. Es wird jedoch die Hoffnung geäußert, daß sie sich durch den Einsatz leistungsfähiger Rechenanlagen noch deutlich verringern läßt. Zielvorstellung für die vollständige Speicherung der Koordinaten der Eckpunkte der Klassengrenzen ist die Zuteilungsberechnung nach vorgegebenen Werten.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt der Überlegungen zur rechnerischen Flächenverschneidung auf der Überlagerung des Polygonnetzes des alten bzw. neuen Bestandes mit dem regelmäßigen Raster des digitalen Bodenwertmodells. Während die Grenzpunkte der Flurstücke des neuen Bestandes nach der Aufmessung des neuen Wege- und Gewässernetzes im übergeordneten Koordinatensystem digital vorliegen und ihre Aufeinanderfolge aus dem Anschrieb für die Flächenberechnung entnommen werden kann, sieht es bei den Flurstücken des alten Bestandes im Augenblick noch nicht so günstig aus.

Die Grenzpunkte der Flurstücke des alten Bestandes müssen für eine rechnerische Flächenverschneidung mit dem Raster des Bodenwertmodells zunächst digitalisiert werden. Die aus Koordinaten berechneten Flächen sind entweder anhand der Fehlergrenzen mit den Sollflächen zu vergleichen oder besser auf die Sollflächen des Liegenschaftskatasters abzugleichen und aus den Flächendifferenzen benachbarter Flurstücksflächen rückwärts wieder Korrekturen für die Grenzpunktkoordinaten abzuleiten. Der im zweiten Fall erforderliche hohe Rechenaufwand und der in Abschnitt 6.5 angeführte hohe Zeitaufwand für die Digitalisierung selbst führen zu dem Ergebnis, daß eine rechnerische Flächenverschneidung für den alten Bestand wohl erst dann in Frage kommt, wenn die Grenzpunktkoordinaten samt ihrer Folge aus der geplanten Grundstücksdatenbank übernommen werden können.

Für eine rechnerische Verschneidung des neuen Bestandes mit dem Raster der Wertermittlung sind demgegenüber bereits heute die Voraussetzungen geschaffen. Welche Genauigkeit bei dem vorgeschlagenen Verfahren der rechnerischen Flächen-

verschneidung erzielt werden kann, welcher Rechenaufwand und welcher Speicherbedarf erforderlich ist, wird im folgenden Abschnitt im Zusammenhang mit Überlegungen zur rechnerischen Verarbeitung der Geländeneigung untersucht.

Daß für die Gliederung nach Werten (als Ergebnis der Verschneidung des alten bzw. neuen Bestandes mit dem digitalen Bodenwertmodell) eine höhere Genauigkeit erforderlich ist als für die Neigungsgliederung (als Ergebnis der Verschneidung des alten bzw. neuen Bestandes mit dem digitalen Neigungsmodell) sei hier erwähnt. Dies ändert jedoch nichts daran, daß die Überlegungen des folgenden Abschnitts grundsätzlich auch für eine entsprechende rechnerische Verarbeitung der Ergebnisse der Wertermittlung gelten.

7.6 Ermittlung und Berücksichtigung der Geländeneigung

Nachdem bereits zur Herstellung aktueller Planungsunterlagen vom gesamten Flurbereinigungsgebiet, wie in Abschnitt 7.1 beschrieben, ein digitales Höhenmodell erzeugt worden ist, erfolgt die Ableitung der Geländeneigung rechnerisch aus dem digitalen Höhenmodell (siehe Abschnitt 4.1). Als Ergebnis erhalten wir ein rasterförmiges digitales Neigungsmodell (DNM), das sich aus den Neigungsinformationen in sämtlichen Raster- und Bruchkantenpunkten zusammensetzt. Graphisch dargestellt wird das Neigungsverhalten des Geländes in der Gefällstufenkarte, die durch das in Abschnitt 4.1.5 beschriebene Isolinienprogramm aus dem digitalen Neigungsmodell rechnerisch abgeleitet und am Zeichenautomaten ausgegeben wird.

Als Vorteile einer rechnerischen Ableitung der Geländeneigung mit datenbankähnlicher Abspeicherung des digitalen Neigungsmodells sind insbesondere

- die hohe Genauigkeit der aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Neigungsinformation,
- die Einsparung des Digitalisierungsaufwandes einer graphischen Vorlage bei der rechnerischen Weiterverarbeitung zur Erstellung der Gliederung des alten bzw. neuen Bestandes und
- die Einsatzmöglichkeiten der digitalen Neigungsinformation als Eingabe für einen teilautomatischen Zuteilungsentwurf

hervorzuheben.

In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt bei der rechnerischen Flächenverschneidung. Dabei wird untersucht, welche Möglichkeiten die rechnerische Überlagerung des Polygonnetzes des alten bzw. neuen Bestandes mit dem regelmäßigen Raster des digitalen Neigungsmodells bietet. Setzen wir voraus, daß die Grundstücke des alten Bestandes bzw. die Blöcke des neuen Bestandes als geschlossene Polygone vorliegen und das digitale Geländemodell profilweise abgespeichert ist, so kann die rechnerische Verschneidung wie in Abbildung 7-11 dargestellt ablaufen.

Schneidet eine Profillinie $Hoch=konst.$ das Polygon in mehr als zwei Punkten, werden die Schnittpunkte nach aufsteigenden Rechtskoordinaten sortiert. Das Profil liegt dann immer zwischen einem Schnittpunkt mit ungeradem und einem mit geradem Index innerhalb des Polygons (Abb. 7-12). Für jedes Flurstück bzw. für jeden Block wird die Anzahl der Rasterpunkte getrennt nach den einzelnen Neigungs-

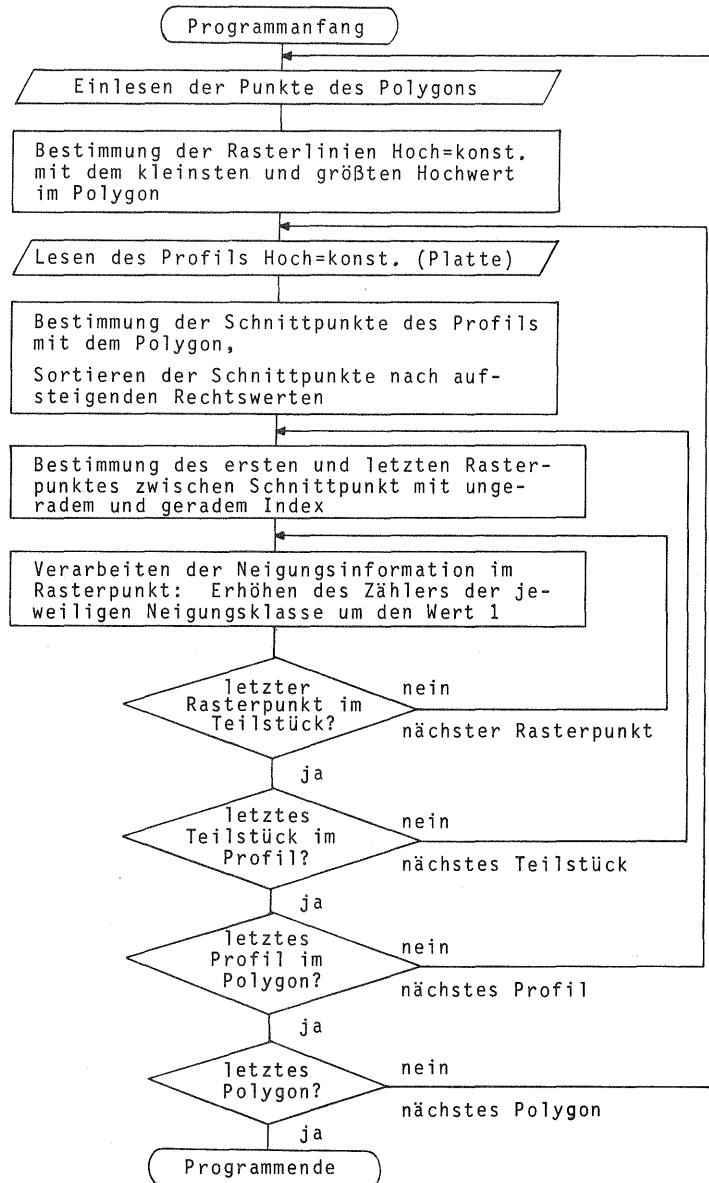


Abb. 7-11 Flußdiagramm zur Verschneidung eines Polygonnetzes mit einem regelmäßigen Raster

klassen aufsummiert. Die Bestimmung der Teilflächen der einzelnen Klassenabschnitte erfolgt durch Einteilung der gegebenen Gesamtfläche proportional zur Anzahl der Rasterpunkte pro Neigungsklasse.

Im Gegensatz zur rechnerischen Verschneidung zweier Polygonnetze handelt es sich bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren zur Überlagerung eines Polygonnetzes mit einem regelmäßigen Raster um eine Näherungsmethode zur Flächenbestimmung. Entscheidend für einen praktischen Einsatz dieser Art der Flächenverschneidung ist einerseits die Genauigkeit der Flächenermittlung und andererseits der erforderliche Rechenaufwand. Beide Kriterien wie auch die Frage, bis zu welcher Grenze kleine oder schmale Flächen durch ein Raster überhaupt dargestellt werden können, hängen von der Wahl des Rasterintervalls ab.

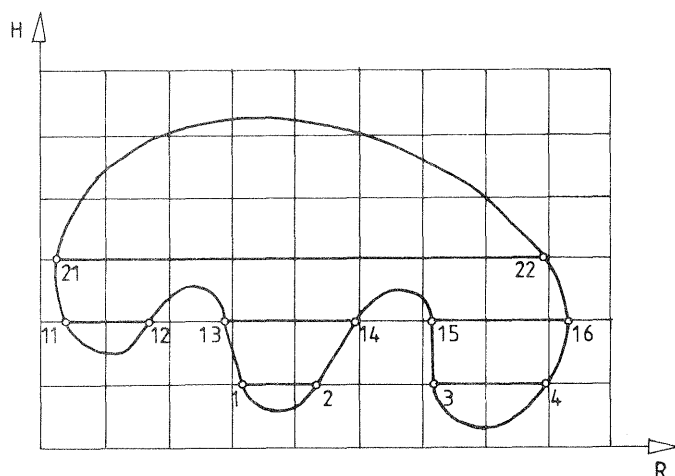


Abb. 7-12 Bestimmung der Schnittpunkte der Profile Hoch=konst. mit einem Polygon

Die Gliederung nach Neigungsklassen muß nur für landwirtschaftlich genutzte Grundstücke durchgeführt werden, nicht jedoch für Wege, Gräben oder Gewässer. Dies bedeutet, daß für die Gliederung des alten Bestandes die alten Wegeflächen nicht erfaßt sein müssen. Für die Erstellung der Gliederung des neuen Bestandes ist es jedoch erforderlich, daß diejenigen Wegeflächen des alten Bestandes erfaßt sind, die innerhalb der neuen Blöcke liegen und somit Teile der neuen Grundstücke bilden.

Ähnliches gilt auch für die Gliederung nach Wertklassen. Auch hier ist eine Gliederung für Wege, Gräben usw. im alten Bestand entbehrlich. Verlaufen alte Wege im neuen Bestand innerhalb eines Blockes mit anderen Bodenklassen, so müssen sie auch hier erfaßt sein. Demgegenüber kann auf die Gliederung für die neuen Wege- und Gewässerflächen verzichtet werden.

Nachdem das digitale Neigungsmodell bzw. das digitale Bodenwertmodell sowohl dem Polygonnetz der Grundstücke des alten Bestandes als auch dem Polygonnetz der Blockgrenzen des neuen Bestandes rechnerisch überlagert werden soll, ist es unumgänglich, daß auch die Neigung bzw. die Bodenklasse der alten Wege und Gräben erfaßt ist. Als Folge der geringeren Genauigkeitsanforderungen an die Neigungsgliederung im Vergleich zur Gliederung nach Wertklassen ist es jedoch denkbar, daß für das digitale Neigungsmodell insgesamt ein weiteres Raster verwendet wird als für das digitale Bodenwertmodell.

In Abschnitt 6.5 wurde darauf hingewiesen, daß die Rechtsprechung für die Wertermittlung verlangt, daß sie sowohl in ihren Grundlagen als auch bei der Einzelbewertung so genau wie eben möglich durchgeführt wird. Daraus ist die Forderung abzuleiten, daß auch die Gliederung des alten bzw. des neuen Bestandes nach Werten so genau wie möglich zu erfolgen hat, da sie die Grundlage für die Zuteilung bildet.

Bisher legt die Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg der Abgleichung der mit dem Digimeter bestimmten Abschnittsflächen auf die Sollflächen die dreifache Fehlergrenze D für Flächenbestimmungen der Technischen Anweisung für Württemberg aus dem Jahre 1895 für Geländeklasse III zugrunde. Da auch die hier vorgeschlagene Flächenbestimmung mit Hilfe eines regelmäßigen Rasters für die Gliederung

nach Werten nach Möglichkeit entsprechend genau erfolgen soll, muß sich die Wahl des Rasterintervalls ebenfalls an dieser Fehlergrenze orientieren.

Die Fehlergrenze D_1 , die der Abgleichung der mit dem Digimeter bestimmten Abschnittsflächen auf die Flurstückssollfläche zugrunde gelegt wird, lautet:

$$D_1 = 3 \cdot D \quad (7.1)$$

$$\text{mit } D = (0.75 \sqrt{F} + 0.00075 \cdot F)$$

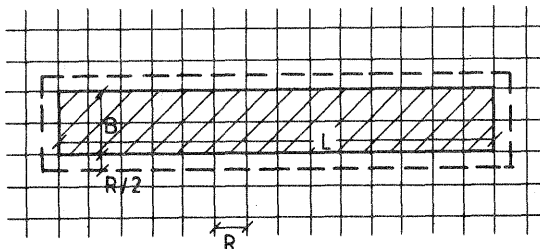
(Fehlergrenzen D , D_1 und Fläche F in m^2).

Übersteigt bei der Digimetermessung die Differenz zwischen der Summe der einzelnen Abschnittsflächen und der gegebenen Gesamtfläche eines Flurstücks bzw. Blocks den dreifachen Betrag der Fehlergrenze D , so ist die Flächenbestimmung zu wiederholen. Der Vergleich der aufsummierten Teilflächen erfolgt nun mit der erhöhten Fehlergrenze $D_2 = 5 \cdot D$.

Zur Ableitung des maximal möglichen Fehlers bei der Flächenbestimmung mit Hilfe eines Rasters werden folgende vereinfachende Annahmen gemacht:

- Die Grundstücke werden durch Rechtecke angenähert,
- das Verhältnis Grundstückslänge/-breite wird im alten und neuen Bestand mit 7/1 angenommen,
- das Raster ist quadratisch und
- das Rasterintervall ist klein im Vergleich zur Grundstückslänge bzw. -breite.

Unter diesen Annahmen kann der Fehler der Flächenbestimmung entlang des gesamten Umfangs der Grundstücke maximal die Hälfte eines Rasterintervalls betragen:



- F ... Grundstücksfläche
- L ... Grundstückslänge
- B ... Grundstücksbreite
- U ... Grundstücksumfang
- R ... Rasterintervall

Abb. 7-13 Flächenbestimmung im Raster

Mit dem angenommenen Verhältnis $L/B = 7/1$ und den Beziehungen

$$B = \sqrt{\frac{F}{7}}$$

$$L = \sqrt{7F}$$

erhalten wir als maximal möglichen Flächenfehler D_R im Raster:

$$D_R = \pm \left(U \cdot \frac{R}{2} \right)$$

$$= \pm (L+B) \cdot R$$

$$D_R = \pm \left(8 \cdot \sqrt{\frac{F}{7}} \cdot R \right) \quad (7.2)$$

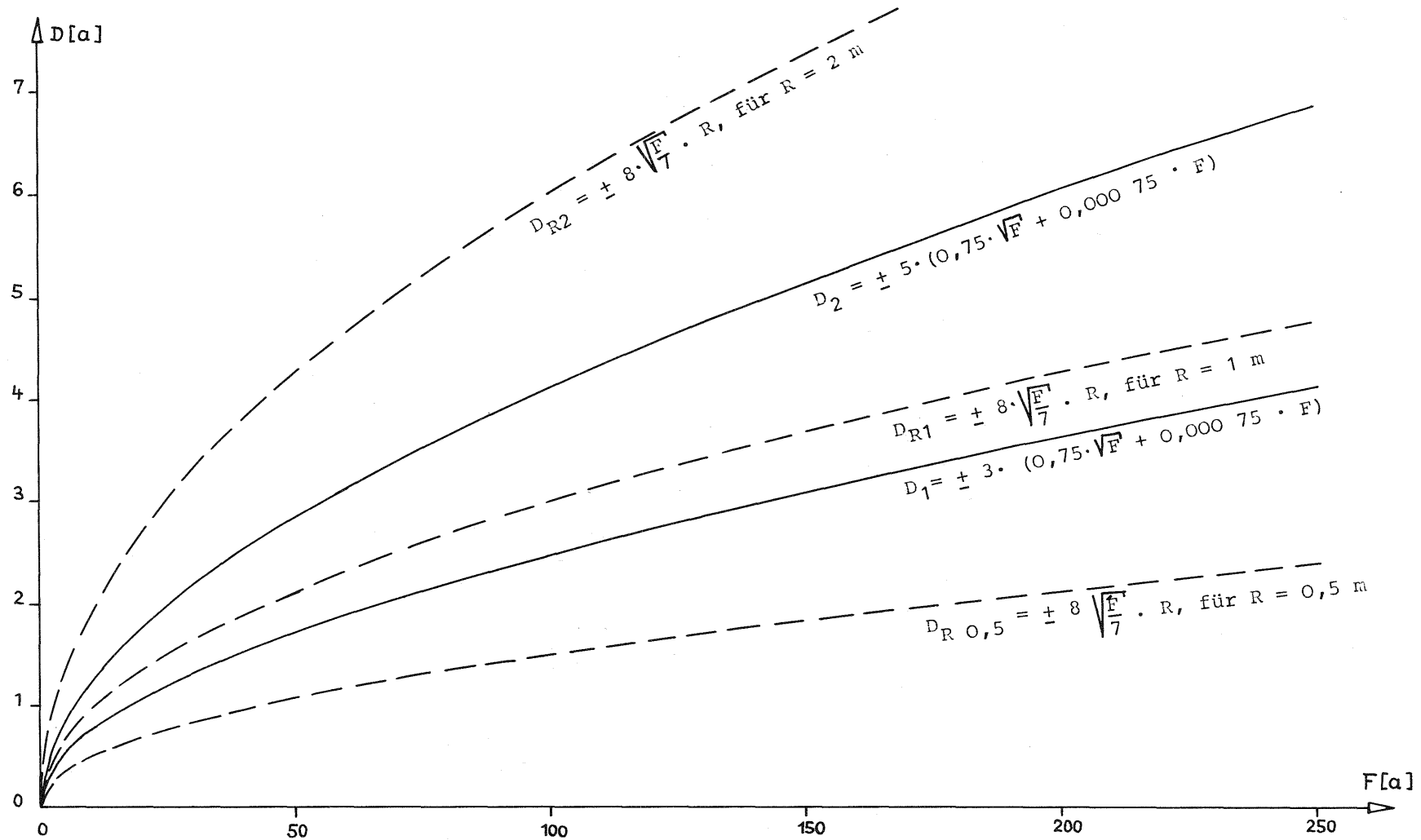


Abb. 7-14 Fehlergrenzen für die Flächenermittlung

In Abbildung 7-14 sind die Fehlergrenzen D_1 und D_2 für die Flächenermittlung mit Hilfe des Digimeters dargestellt. Ihnen sind die maximal möglichen Flächenfehler D_{R2} , D_{R1} und $D_{R0.5}$ gegenübergestellt, die bei der Flächenbestimmung in einem Raster mit 2 m, 1 m und 0.5 m Rasterintervall auftreten können. Die Fehlerkurve D_{R1} für die Flächenbestimmung aus dem 1 m-Raster liegt zwischen den beiden bisher verwendeten Fehlerkurven D_1 und D_2 knapp über der Kurve für D_1 .

Unter dem Blickwinkel der bisher angestrebten Genauigkeit bei der Flächenbestimmung ist ein Rasterintervall von 1 m somit ausreichend. Auch zur Erfassung kleiner bzw. schmaler Objekte, wie z.B. von Feldwegen oder Böschungen, ist es hinreichend klein. Die Genauigkeit der örtlichen Festlegung der Klassengrenzen samt ihrer Übertragung in den Feldriß dürfte sich sowohl bei der Geländeneigung als auch beim Bodenwert in der Regel ungefähr in der Größenordnung von ca. 10 m bewegen. Bei stark wechselndem Untergrund (z.B. örtliche Naßstellen oder Felsplatten) ist von einer etwas genaueren Abgrenzung der Bodenklassen auszugehen. Von dieser Seite her wäre somit ein Rasterintervall von 5 bis 10 m ausreichend. Wenn den folgenden Überlegungen dennoch ein Rasterintervall von 1 m zugrunde gelegt wird, so deshalb, weil ein 5 m oder 10 m Raster zu weitmaschig erscheint, um schmale, langgestreckte Flächen ausreichend zu erfassen.

Die Neigungswerte in den einzelnen Rasterpunkten werden auf einem externen Speicher abgelegt. Da die rechnerische Weiterverarbeitung der Neigungswerte nur bei einem sehr schnellen Zugriff zu den Rasterwerten sinnvoll ist, kommt als Speicher derzeit nur eine Magnetplatte mit direktem Zugriff in Frage. Das Abspeichern der Neigungswerte selbst kann entweder linienhaft entlang von Profilen oder flächenhaft z.B. in Speicherquadraten erfolgen.

Zur Abschätzung des Rechenaufwands bei der rechnerischen Weiterverarbeitung der Neigungswerte wird auf Untersuchungen an der Rechananlage CDC Cyber 174 des Regionalen Rechenzentrums an der Universität Stuttgart zurückgegriffen. Ein Direktzugriff zum Plattenspeicher benötigt hier bei einer

- Recordlänge von 500 Worten ca. 0.001 1 CPU sec.,
- Recordlänge von 1000 Worten ca. 0.002 0 CPU sec.

(1 CPU sec. $\hat{=}$ 1 Sekunde Rechenzeit im Zentralrechner).

Hängt die Rechenzeit im Zentralrechner wie im vorliegenden Fall genähert von der Informationsmenge pro Record ab, zu der zugegriffen wird, so empfiehlt es sich, diese Menge auf ca. 500 - 1000 Worte zu beschränken, da pro Zugriff meist nur zu einigen wenigen Rasterwerten zurückgegriffen werden muß. Dies bedeutet bei einem Rasterintervall von 1 m und profilweiser Abspeicherung, daß das Flurbereinigungsgebiet in Blöcke mit z.B. 1000 m Rechtsausdehnung und 1000 m Hochausdehnung zu unterteilen wäre. Bei flächenhafter Abspeicherung würde ein Quadrat mit 100 ha aus 1000 Records mit ca. $31 \times 31 \text{ m}^2$ Fläche bestehen.

Der Rechenaufwand bei der rechnerischen Weiterverarbeitung richtet sich hauptsächlich nach der Anzahl der Direktzugriffe zu den Rasterwerten, da diese ungefähr 500 mal soviel Rechenzeit erfordern wie z.B. eine Multiplikation. Die folgende Abschätzung der erforderlichen Rechenzeit stützt sich deshalb ausschließlich auf die Anzahl der Plattenzugriffe, bezogen auf 100 ha Verfahrensfläche.

Betrachten wir zunächst die Verhältnisse bei einer profilweisen Abspeicherung der Rasterwerte. Dabei wird davon ausgegangen, daß zu sämtlichen Profilen, die ein Flurstück umschließt, jeweils neu zugegriffen werden muß.

	alter Bestand	neuer Bestand
Durchschnittliche Grundstücksgröße (ha)	0.3	1.3
Durchschnittliche Grundstückslänge (m)	150	300
Durchschnittliche Grundstücksbreite (m)	20	43
Anzahl der Plattenzugriffe / Grundstück bei		
- Längsrichtung parallel Profilrichtung	21	
- Längsrichtung senkrecht Profilrichtung	151	
- Längsrichtung unter 50 gon gegen Profilrichtung	107	214
Durchschnittliche Anzahl der Grundstücke / 100 ha	333	77
Durchschnittliche Anzahl der Plattenzugriffe / 100 ha	35 600	16 500
Durchschnittliche Rechenzeit bei 1000 Worten/Record (CPU-sec.)	71	33

Eine Verminderung der Anzahl der Plattenzugriffe läßt folgender Vorschlag erwarten, der zwei Sortiervorgänge erforderlich macht:

- Für jedes Flurstück werden die Indices der Profile mit dem kleinsten und größten Hochwert, für jedes Profil die einzelnen Teilstücke innerhalb, für jedes Teilstück die Indices des ersten und letzten Rasterpunktes bestimmt.
- Für jedes Teilstück eines Profils innerhalb eines Flurstücks wird folgende Information als Record abgespeichert:
 - Flurstücksnummer,
 - Profilindex,
 - Index des ersten und letzten Punktes und ein
 - Leerwort für jede Neigungs- bzw. Bodenklasse.
- Umsortieren der Records nach aufsteigenden Profilnummern.
- Sequentielles, einmaliges Lesen sämtlicher Profile, wobei für jedes Teilstück eines Profils innerhalb eines Flurstücks die Anzahl der Rasterwerte pro Neigungs- bzw. Bodenklasse aufsummiert und in die Leerworte eingespeichert wird. Erneute Zwischenspeicherung der Records.
- Umsortieren der Records nach aufsteigenden Flurstücksnummern,
- Die Anzahl der Rasterwerte pro Neigungs- bzw. Bodenklasse im Profilateilstück wird über alle Teilstücke im Profil und über sämtliche Profile im Flurstück aufsummiert.
Die auf die einzelnen Neigungsklassen entfallenden Grundstücksflächen werden proportional zur Anzahl der Rasterwerte bestimmt.

Diese Art der Datenorganisation bietet den Vorteil, daß die Anzahl der Zugriffe zu den Rasterwerten auf Kosten zweier zusätzlicher Sortiervorgänge von ca. 35 000 bzw. 16 000 auf 1000 gesenkt werden kann. Da Plattenzugriffe im Vergleich zu Operationen im Zentralrechner, wie bereits erwähnt, recht aufwendig sind, be-

steht die Hoffnung, daß mit Hilfe leistungsfähiger Sortierprogramme auf diese Weise Rechenzeit eingespart werden kann.

Als Alternative zur profilweisen Abspeicherung der Rasterwerte bietet sich eine flächenhafte Abspeicherung in quadratischen Speichereinheiten an. Wenn wir von einer Größe von 32 x 32 Rasterwerten pro Speichereinheit ausgehen, erhalten wir bei einem Rasterintervall von 1 m wie bei profilweiser Abspeicherung 1000 Records pro 100 ha. Dank der flächenhaften Ausdehnung der Speichereinheiten vermindert sich die Anzahl der Plattenzugriffe wie folgt:

	alter Bestand	neuer Bestand
Durchschnittliche Grundstücksgröße (ha)	0.3	1.3
Durchschnittliche Grundstückslänge (m)	150	300
Durchschnittliche Grundstücksbreite (m)	20	43
Maximale Anzahl der Plattenzugriffe / Grundstück	13	33
Durchschnittliche Anzahl der Plattenzugriffe / Grundstück	10	27
Durchschnittliche Anzahl der Grundstücke / 100 ha	333	77
Durchschnittliche Anzahl der Plattenzugriffe / 100 ha	3300	2100

Im Vergleich zur profilweisen Abspeicherung geht hier die durchschnittliche Anzahl der Plattenzugriffe ungefähr auf 1/10 zurück.

Wie bereits erwähnt sollen die Neigungs- bzw. Bodenwerte zur Durchführung der rechnerischen Flächenverschneidung auf einer Magnetplatte mit Direktzugriff abgespeichert sein. Zur langfristigen Speicherung des digitalen Neigungsmodells bzw. Bodenwertmodells eines Flurbereinigungsverfahrens über die gesamte Verfahrensdauer hinweg ist als externer Speicher jedoch das Magnetband vorzuziehen. Aus organisatorischen Gründen wäre dabei anzustreben, daß das digitale Modell eines Flurbereinigungsverfahrens auf einem einzigen Magnetband Platz findet.

Zur Abschätzung des Speicherbedarfs für ein rasterförmiges digitales Neigungsmodell gehen wir zunächst von dem Vorschlag des Abschnittes 4.1.3 aus, Fallwinkel und Fallrichtung der Tangentialebene an die Oberfläche in einem Rasterpunkt als ganzzahlige Größen mit je 4 Ziffern zusammen in einem 32-bit-Wort abzuspeichern. Dies bedeutet, daß mit der vollständigen Information eines bereits vorliegenden digitalen Neigungsmodells weitergearbeitet wird, obwohl die vollständige Neigungsinformation nur in der Rebflurbereinigung benötigt wird, in der Regel jedoch der Fallwinkel für die Zwecke der Flurbereinigung ausreicht.

Bei einer Länge des Magnetbandes von 2400 ft (ca. 730 m) und einer Schreibdichte von 1600 BpI können ca. 46 Mio. bits gespeichert werden. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Information so stark geblockt ist, daß die Anzahl der Blockzwischenräume und damit die dafür erforderliche Bandlänge nicht ins Gewicht fallen. Bei der vorgeschlagenen Blockung von 1000 Rasterwerten, eingespeichert in 1000 Worte zu 32 bits, kann dies als genähert erfüllt gelten.

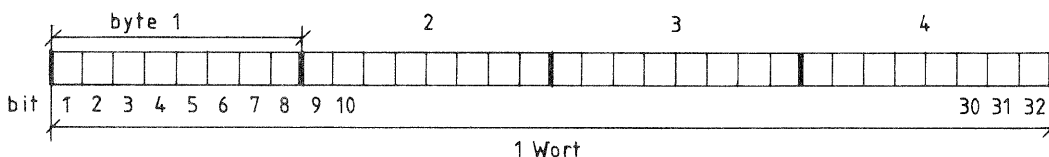
Auf einem Magnetband können somit ca. 1.4 Mio. Neigungswerte abgespeichert werden. Bei einem Rasterintervall von 1 m entspricht dies einer Fläche von ca. 140 ha. Soll z.B. das digitale Neigungsmodell eines Flurbereinigungsverfahrens mit 2000 ha Fläche noch auf einem einzigen Magnetband abgespeichert werden, so ist das Rasterintervall auf 4 m zu vergrößern.

Rasterintervall (m)	Rasterwerte / 100 ha	Abspeicherbare Fläche / Magnetband (2400 ft) (ha)
1.0	1 000 000	143
2.0	250 000	575
4.0	62 500	2 300
5.0	40 000	3 593

Berücksichtigen wir, daß sich die Blockeinteilung des Rasters nur bedingt an eine unregelmäßige Gebietsgrenze anpassen läßt und deshalb auch Speicherplatz für Rasterwerte erforderlich ist, die außerhalb des Verfahrensgebietes liegen, so könnte bei einer Verfahrensfläche von 2000 ha auch bereits ein Rasterintervall von 5 m erforderlich werden. Dieses Rasterintervall ist einerseits wesentlich besser auf die Möglichkeiten der Bestimmung der Geländeneigung abgestimmt als z.B. ein 1 m-Raster, weist jedoch andererseits bei der Flächenbestimmung eine entsprechend geringere Genauigkeit auf und liegt mit seinem maximalen Flächenfehler deutlich über der in Abbildung 7-14 dargestellten Fehlergrenze D_2 .

Eine stärkere Komprimierung der Information in den Rasterpunkten kann dann erreicht werden, wenn in jedem Rasterpunkt statt Fallwinkel und Fallrichtung nur die Neigungsklasse abgespeichert wird. Dazu ist in einem Zwischenschritt festzustellen, in welche der vorgegebenen Neigungsklassen der Betrag des Fallwinkels in einem Rasterpunkt einzuordnen ist. Dieses Vorgehen entspricht der Abspeicherung einer ganzzahligen Bodenklasse in jedem Rasterpunkt bei der Wertermittlung.

Beschränken wir uns bei der Einstufung der Geländeneigung auf maximal 15 Neigungsklassen, so reichen in dualer Schreibweise 4 bits zur Darstellung einer Klasse aus. Bei einer byte-orientierten Rechenanlage können also 2 Neigungsklassen pro byte (1 byte = 8 bits) oder 8 Neigungsklassen pro Wort (1 Wort = 4 bytes = 32 bits) abgespeichert werden.



Ein Magnetband bietet somit ca. 11.5 Mio. Rasterwerten Platz. Dies entspricht bei einem Rasterintervall von 1 m einer Fläche von 1150 ha und damit der Fläche eines kleineren Flurbereinigungsverfahrens.

Rasterintervall (m)	Rasterwerte / 100 ha	Abgespeicherte Fläche / Magnetband (2400 ft) (ha)
1.0	1 000 000	1 150
1.5	444 444	2 588
2.0	250 000	4 600
5.0	40 000	28 750

Sollen z.B. die Neigungswerte bzw. Bodenwerte eines Verfahrens mit 2000 ha Fläche noch auf einem einzigen Magnetband abgespeichert werden, so muß das Rasterintervall von 1 m auf mindestens 1.5 m vergrößert werden. Dieses Intervall führt bei der Flächenermittlung zu einem maximalen Flächenfehler, der nach Abb. 7-14 im Vergleich mit den bisher zur Flächenabgleichung verwendeten Fehlergrenzen im Bereich der als Obergrenze verwendeten Fehlergrenze D_2 liegt. Von der Genauigkeit her wäre es selbst für ein digitales Bodenwertmodell noch brauchbar. Auch schmale, langgestreckte Objekte können noch dargestellt werden und die Genauigkeit, die bei der örtlichen Abgrenzung der verschiedenen Neigungsklassen tatsächlich erreicht wird, ist noch deutlich unterschritten.

Mit der Vergrößerung des Rasterintervalls von 1 m auf 1.5 m ist, neben der Reduzierung des Speicherplatzes, eine Verringerung des Rechenaufwandes bei der rechnerischen Flächenverschneidung verbunden. Gleichzeitig muß aber auch der Rechenaufwand zur Erzeugung eines derart engmaschigen Höhenrasters und zur Ableitung der Neigungsinformation aus dem Höhenraster mit berücksichtigt werden.

Für die Höhenauswertung großmaßstäbiger Karten und Pläne, wie z.B. der württembergischen Höhenflurkarte 1:2500, und für ingenieurbautechnische Detailplanungen erweist sich in der Regel ein Rasterintervall von 5 m als angemessen und ausreichend. Zur Ableitung von Gefällstufen kann das Rasterintervall auf 10 m vergrößert werden (siehe Abschnitt 5.7). Im Vergleich zu einem Rasterintervall von 5 m erfordert die Berechnung eines Höhenrasters mit einem Rasterintervall von 1 m oder 1.5 m einen Rechenaufwand, der ungefähr um den Faktor 10 höher liegt als bei einem 5 m - Raster. Zudem nimmt der Umfang des digitalen Höhenmodells ungefähr um das 25-fache bzw. 10-fache zu. Ob dieser stark erhöhte Rechen- und Speicheraufwand des engen Rasters ausschließlich für die rechnerische Flächenverschneidung mit Hilfe eines Rasters gerechtfertigt ist, erscheint als zweifelhaft und muß sehr sorgfältig geprüft werden.

Ein Vergleich der beiden beschriebenen Methoden zur rechnerischen Flächenverschneidung zeigt deren Vor- und Nachteile auf. Bei den bisher angewandten Methoden der Verschneidung zweier Polygonnetze werden die Begrenzungspolygone der einzelnen Neigungs- bzw. Bodenklassen digitalisiert und abgespeichert. Abgesehen von einer geringfügigen Generalisierung des Linienverlaufes liegen hier als Ergebnis exakte Begrenzungslinien vor. Demgegenüber handelt es sich bei der Flächendarstellung durch ein quadratisches Raster um ein Näherungsverfahren, bei welchem die Begrenzungslinien der einzelnen Flächen indirekt durch die Rasterwerte wiedergegeben werden. Dabei wird die Genauigkeit der Rekonstruktion der Begrenzungslinien aus dem Raster durch das Rasterintervall begrenzt.

Unterschiedlich ist auch die Form der digitalen Modelle: Im ersten Fall liegt ein linienförmiges digitales Modell vor, im zweiten Fall ein rasterförmiges. Dies bedeutet, daß der Speicherplatz, der bei der Rastermethode zur Abspeicherung des Neigungs- bzw. Bodenwertmodells erforderlich ist, von der Anzahl der verwendeten Klassen und Klassenwechseln unabhängig ist und nur vom Rasterintervall abhängt. Bei dem oben vorgeschlagenen Rasterintervall von 1.5 m muß er als sehr groß bezeichnet werden. Wird mit einem linienförmigen Modell gearbeitet, so reicht bei wenigen Klassenwechseln ein geringer Speicherplatz aus. Selbst bei sehr vielen Klassenwechseln im Bearbeitungsgebiet wird er immer noch unter demjenigen liegen, der bei der Rastermethode erforderlich ist.

Ausgangspunkt der Überlegungen beim Einsatz der Rastermethode ist, daß der zusätzliche Aufwand bei der Abspeicherung des digitalen Neigungs- bzw. Bodenwertmodells bei der rechnerischen Weiterverarbeitung dadurch wieder ausgeglichen bzw. mehr als ausgeglichen wird, daß die rechnerische Verschneidung eines Polygonnetzes mit Parallelen zu den Koordinatenachsen (Rasterlinien) einfacher und damit schneller durchgeführt werden kann als die mit einem zweiten, beliebig geformten Polygonnetz. Wird mit einem linienförmigen Neigungs- bzw. Bodenwertmodell gearbeitet, so fallen bei wenigen Klassenwechseln nur sehr geringe Rechenzeiten an, die jedoch mit zunehmender Anzahl an Klassenwechseln beträchtlich ansteigen. Legen wir ein rasterförmiges Neigungsmodell zugrunde, so wird die Rechenzeit bei nur wenigen Klassenwechseln vermutlich über derjenigen liegen, die für ein linienförmiges digitales Neigungsmodell erforderlich ist. Mit zunehmender Anzahl an Klassenwechseln dürfte die Rechenzeit jedoch günstiger werden und bei vielen Klassenwechseln u.U. wirtschaftlicher sein.

Gesicherte Aussagen über die tatsächlich erforderliche Rechenzeit können jedoch erst nach der Durchführung von Versuchen gemacht werden. Erst dann kann beurteilt werden, wie beide Methoden bei den speziellen Verhältnissen, wie sie bei der Flurbereinigung normalerweise auftreten, zu beurteilen sind. Dabei wäre auch zu überprüfen, in welchem Umfang sich der maximal mögliche Flächenfehler bei der Flächenbestimmung mit Hilfe eines Rasters in der Praxis überhaupt auswirkt.

Bei der Beurteilung der verschiedenen Verfahren sollten ihre Einfügung in den gesamten Automationsprozeß und die Wirtschaftlichkeit ausschlaggebend sein. Wenn auch die Entwicklung miniaturisierter Speicher mit erhöhter Kapazität und schnellerem Zugriff in Zukunft die Frage des erforderlichen Speicherplatzes für ein engmaschiges rasterförmiges digitales Modell etwas entschärfen wird, so verbleibt doch der wesentlich höhere Rechenaufwand für die Erstellung eines Höhenrasters mit einem Rasterintervall von ca. 1.5 m. Ist die geringere Genauigkeit der Flächenbestimmung über ein 5 m - Raster nicht tragbar, so dürfte die Methode der Verschneidung zweier Polygonnetze bei einem Vergleich insgesamt voraussichtlich günstiger abschneiden.

Zur praktischen Durchführung der rechnerischen Flächenverschneidung ist es sowohl bei der Verschneidung zweier Polygonnetze als auch beim Einsatz eines Rasters erforderlich, daß neben den Grenzpunkten des neuen Bestandes, die nach der Aufmessung des neuen Wege- und Gewässernetzes im übergeordneten Koordinatensystem digital vorliegen und deren Aufeinanderfolge aus dem Anschlag für die

Flächenberechnung entnommen werden kann, auch die Grenzpunkte der Flurstücke des alten Bestandes digital vorliegen. Diese Forderung wird erst nach Erstellung der Grundstücksdatenbank erfüllt sein. Eine Digitalisierung der Flurstücke des alten Bestandes kann kaum empfohlen werden (siehe Abschnitt 7.5). Dies bedeutet, daß sich eine digitale Verarbeitung der Geländeneigung und des Bodenwertes vorerst auf den neuen Bestand beschränken muß.

Wenn wir davon ausgehen, daß die Gliederung des neuen Bestandes durch eine Verschneidung zweier Polygonnetze wirtschaftlicher und genauer erstellt werden kann, so müssen neben dem neuen Bestand die Begrenzungslinien der einzelnen Klassenflächen digital vorliegen. Sind die Neigungsmessungen bzw. die Wertermittlung konventionell durchgeführt worden und liegen die Grenzen der Neigungs- bzw. Bodenklassen graphisch vor, so sind sie durch Polygone anzunähern, deren Bruchpunkte digitalisiert werden. Zu jeder Klassenfläche wird zusätzlich die Klasse selbst registriert. Vor der rechnerischen Weiterverarbeitung der Daten empfiehlt es sich, die digitalisierten Netze anhand einer Testauszeichnung zu prüfen.

Wird die Gefällstufenkarte rechnerisch aus dem digitalen Neigungsmodell abgeleitet bzw. liegt ein digitales Bodenwertmodell vor, so erübrigt sich eine Digitalisierung der Klassengrenzen. Sie liegen hier als Ausgangsinformation für das Zeichenprogramm punktweise in digitaler Form vor. Da es sich hierbei in der Regel um eine recht dichte Folge von Punkten handelt, werden sie zunächst auf diejenigen Punkte reduziert, die zur Beschreibung der Kurven notwendig und hinreichend sind (GOTTSCHALK [64]). Dies führt zu einer Komprimierung der Daten und gleichzeitig zu einer Verkürzung der Rechenzeit bei der folgenden rechnerischen Flächenverschneidung.

7.7 Zuteilungsentwurf und Vorschläge zur Erstellung weiterer digitaler Modelle

Um eine wertgleiche Abfindung zu erzielen sind neben den Ergebnissen der Wertermittlung und der Geländeneigung weitere Faktoren zu berücksichtigen, deren wichtigste in Abschnitt 6.7 bereits angeführt wurden. Bei der bisher üblichen manuellen Zuteilung werden ihre Auswirkungen meist optisch anhand der jeweiligen Übersichtskarten kontrolliert.

Eine Übernahme weiterer Daten in ein digitales Geländemodell wird den Informationsgehalt automatisch erstellter tabellarischer Gliederungen für die konventionelle Zuteilung wesentlich erhöhen. Für einen teilautomatischen Zuteilungsentwurf müssen diese zu berücksichtigenden Faktoren zwingend in digitaler Form vorliegen. Sind sie in digitalen Modellen auf schnellen Massenspeichern abgelegt, so kann das Zuteilungsprogramm jederzeit darauf zurückgreifen.

Nach § 44 Abs. 4 FlurbG soll die Landabfindung eines Teilnehmers in der Nutzungsart, Beschaffenheit, Bodengüte und Entfernung vom Wirtschaftshofe oder von der Ortslage seinen alten Grundstücken entsprechen, soweit es mit einer großzügigen Zusammenlegung des Grundbesitzes nach neuzeitlichen betriebswirtschaftlichen Erkenntnissen vereinbar ist. Somit wäre zunächst ein digitales Bodennutzungsmodell zu erstellen, das einerseits die tatsächliche bzw. die mögliche Bodennutzung und andererseits die planerisch vorgesehene Verwertbarkeit der Grundstücke enthält.

Bei der tatsächlichen Bodennutzung könnte z.B. zwischen Ackerland, Grünland, Wechselland, Obstbaumgrundstücken, Wald, bebauter Fläche, Ödland und Wasserflächen unterschieden werden. Nach Einrichtung der Grundstücksdatenbank können die Nutzungsarten des alten Bestandes direkt aus dieser übernommen werden. Die planerisch vorgesehene Verwertbarkeit der Grundstücke wird z.B. dem Flächennutzungsplan entnommen. Neben Flächen für die Land- und Forstwirtschaft sind hier Flächen besonderer Verwertbarkeit wie z.B. Bauflächen, Bauerwartungsland und Abbauf Flächen zu unterscheiden.

Aus den Ergebnissen der Reichsbodenschätzung wird das digitale Bodenartenmodell abgeleitet. Es ist die digitale Darstellung der bisher üblichen Bodenartenkarte. Nach der Erstellung der Grundstücksdatenbank wird eine direkte Übernahme möglich sein.

Die genannten Modelle sind vom Aufbau her sowohl linienhaft als auch rasterförmig denkbar. Für eine Entscheidung über die Form der Abspeicherung gelten dieselben Kriterien, wie sie in Abschnitt 7.6 angeführt wurden. Entscheidend ist, daß sich die einzelnen digitalen Modelle nahtlos in das Gesamtsystem einfügen.

Die mittlere Entfernung zwischen der Hofstelle und dem alten bzw. den neuen Grundstücken wird bei der Erstellung des Zuteilungsentwurfes soweit wie möglich berücksichtigt. Genau bestimmt wird sie jedoch bei der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg nur bei der Vorlage von Widersprüchen gegen die Zuteilung. Als Grundlage dafür wird die Wegeausbaukarte herangezogen. Eine größere Bedeutung erhält diese mittlere Entfernung, wenn sie, neben der Entfernung der Abfindungsgrundstücke untereinander, in Programmen zur Berechnung von Zuteilungsentwürfen als Parameter angesetzt wird, der zu optimieren ist. So kann z.B. vorgegeben werden, daß die Summe der von allen Teilnehmern zu erbringenden Fahrleistungen möglichst klein wird (PELZER |161|).

In ebenem Gelände mag es ausreichend sein, die Entfernungen näherungsweise aus den Lagekoordinaten der Hofstelle und dem Schwerpunkt der Grundstücke abzuleiten. In bewegtem Gelände ist dies, bedingt durch die Topographie, kaum mehr hinreichend. Neben der Wegführung sind noch die Art des Wegeausbaus, die Ausbaubreite und die Steigerungsverhältnisse zu berücksichtigen. Für diese Aufgabe erscheint ein linienhaftes digitales Modell besonders geeignet, bei dem das Wegenetz in einzelne "Linien" (Kanten) zerlegt wird, die sich in den "Knoten" schneiden (Abb. 7-15).

Dieser Ansatz ist von WEBER |219|, |220| zur Erstellung von Datenbanken für die topographische Kartographie vorgeschlagen worden. In unserem Fall werden die Linien dabei durch Polygone gebildet, deren Bruchpunkte auf der Wegeausbaukarte digitalisiert werden. Zu jeder Linie werden die verschlüsselte Ausbauart und Steigungsverhältnisse mit abgespeichert, Durch die in den Knoten abgespeicherte Information werden aneinander angrenzende Linien miteinander verbunden.

Aufgabe eines Rechenprogramms ist nun die Bestimmung des kürzesten Weges zwischen zwei vorgegebenen Punkten, wobei Ausbauart und Steigungsverhältnis über Gewichte berücksichtigt werden. Vom Schwerpunkt eines Grundstückes ausgehend wird zunächst bestimmt, in welcher Masche des Wegenetzes das Grundstück liegt.

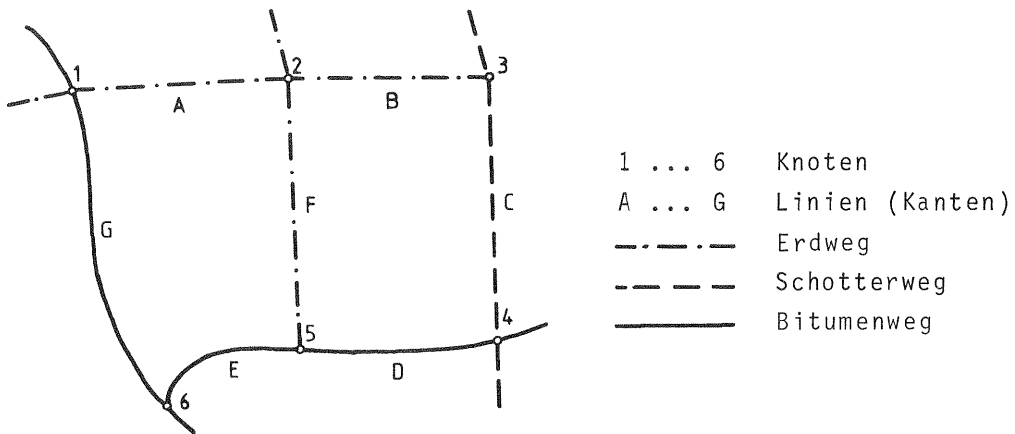


Abb. 7-15 Zerlegung des Wegenetzes in ein linienhaftes System von Linien und Knoten

Nachdem festgestellt worden ist, welche der an das Grundstück angrenzenden Linien befestigt ist, wird auf dieser in Richtung Zielpunkt zum nächsten Knoten fortgeschritten. Im Knoten wird ermittelt, welche Linien anschließen. Entlang der befestigten Linien wird nacheinander in Richtung Zielpunkt weitergeschritten, bis dieser erreicht ist.

Grenzt ein Grundstück an mehr als eine befestigte Linie, so sind die Entfernungsbestimmungen für jede Linie getrennt durchzuführen und miteinander zu vergleichen. Gehen von einem Knoten mehr als eine befestigte Linie ab, so verzweigt sich der Weg. Der Grad der Verzweigung nimmt normalerweise mit wachsender Entfernung vom Ausgangspunkt zu. Das Programm vergleicht die verschiedenen Varianten, wählt die günstigste Verbindung aus und bestimmt deren Länge. Die mittlere Entfernung zwischen der Hofstelle und den alten bzw. neuen Grundstücken ergibt sich als Mittelwert der kürzesten Verbindungen zwischen der Hofstelle und den einzelnen Grundstücken mit den Grundstücksflächen als Gewicht.

Als Methode zur praktischen Durchführung der Ermittlung des kürzesten Weges zwischen zwei Punkten in einem vorgegebenen Wegenetz eignen sich nach WEBER [222] insbesondere die Methoden der mathematischen Optimierung und nach KROPFF [121] speziell die der dynamischen Optimierung. Es ist davon auszugehen, daß der Rechenaufwand für die vorgeschlagene exakte Entfernungsbestimmung hoch sein wird. Ob dadurch ein praktischer Einsatz im Flurbereinigungsverfahren gefährdet wird, müssen praktische Versuche zeigen. Vermutlich könnte eine interaktive Unterstützung über einen graphischen Bildschirm den Rechenprozeß wesentlich beschleunigen.

7.8 Erstellung digitaler Modelle auf der Grundlage von Bewertungen

In den Abschnitten 7.1 bis 7.7 wurden Einsatzmöglichkeiten für ein digitales Geländemodell im Flurbereinigungsverfahren aufgezeigt, die im Prinzip auf objektiven mathematischen oder geometrischen Grundlagen ruhen. Der besseren Handhabung wegen werden sie im Einzelfall durch Näherungslösungen ersetzt. Eine Ausnahme stellt die Bestimmung des Bodenwerts landwirtschaftlich genutzter Grundstücke dar. Die bei der Wertermittlung festgelegte Bodenbewertung wird ebenso wie die Bodennutzung oder die Bodenart als Teil eines digitalen Geländemodells

mit dem Ziel erfaßt, sie einer weitgehend exakten und vollständigen Berücksichtigung bei den anfallenden Planungsprozessen zuzuführen.

Die im vorausgehenden Abschnitt 7.7 angeführte Bestimmung der mittleren Entfernung zwischen der Hofstelle und sämtlichen Grundstücken eines Eigentümers bzw. die Bestimmung der jeweils kürzesten Entfernung zwischen der Hofstelle und den einzelnen Grundstücken unterscheidet sich von den anderen angeführten digitalen Modellen nicht nur durch die Verwendung eines linienhaften digitalen Modells. Die Berücksichtigung von Wegeausbauart, Wegebreite und Steigungsverhältnisse erfordert bei der Bestimmung der kürzesten befestigten Wegeverbindung zwischen zwei vorgegebenen Punkten eine Bewertung der einzelnen Faktoren.

Die Durchführung der Bewertung erfolgt durch ein Bewertungsprogramm. Im vorliegenden Fall der Entfernungsbestimmung sind nur wenige und verhältnismäßig einfache Kriterien miteinander in Beziehung zu setzen. Er kann als erster Schritt auf dem Weg zu den komplexen Bewertungsprogrammen angesehen werden, die für den Bereich der planerischen Automation kennzeichnend sind. Auf diese zukünftigen Automatisierungstendenzen wird im abschließenden 8. Kapitel eingegangen werden.

8. Zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten für die Automation in der Flurbereinigung

Übergeordnetes Ziel für die zukünftige Entwicklung der Automation in der Flurbereinigung ist die Schaffung eines sogenannten integrierten Systems für das gesamte technische Verfahren. Nach SCHWIDEFSKY und ACKERMANN [190] betont dieser Begriff, daß zu der Komponentenoptimierung, auf die sich die bisherigen Bemühungen weitgehend konzentriert haben, die Systemoptimierung hinzutritt. Darunter ist das optimale Ineinandergreifen, Austauschen und Kombinieren von Einheiten eines Systems im Sinne der Prozeß-Automation zu verstehen.

Von der Anwendung her sind integrierte Systeme zu fordern, die einerseits weitestgehende Flexibilität und Anpassung der Verfahrensabläufe und Ergebnisse an die erweiterten Anforderungen im Flurbereinigungsverfahren erlauben, andererseits jedoch auf einer weitgehenden Beibehaltung leistungsfähiger konventioneller Auswertegeräte und Verfahrensabläufe mit möglichst häufiger Zwischenschaltung digitaler Registrier-, Rechen- und Speicherprozesse aufbauen. Als Hauptvorteil eines solchen integrierten Systems ist hervorzuheben, daß die Möglichkeiten des Gesamtsystems nicht durch diejenigen der einzelnen eingesetzten Geräte begrenzt sind. Die zwischengeschalteten Rechenprozesse erlauben vielfältige erweiterte Möglichkeiten.

Zwei Aspekte eines integrierten Systems für die Automation in der Flurbereinigung werden in diesem Kapitel beleuchtet:

- Die Ausweitung des automatischen Datenflusses generell und im Detail unter dem besonderen Blickwinkel, daß die Ausgangsdaten, die für den Einsatz eines digitalen Geländemodells erforderlich sind, in digitaler Form bereitgestellt werden und

- die rechnerische Weiterverarbeitung der Informationen des digitalen Geländemodells zu digitalen Planungs- und Bewertungsmodellen durch Programme der planerischen Automation.

Vorweg sei eingeschränkt, daß diese beiden Bereiche hier nicht abschließend behandelt werden können.

8.1 Ausweitung des automatischen Datenflusses

Wesentlicher Bestandteil eines zukünftigen integrierten Systems für die Automation in der Flurbereinigung wird eine zentrale Datenbank sein, die sämtliche Daten enthält, die im Verlaufe des Flurbereinigungsverfahrens von Bedeutung sind. Der weite Bogen dieser Daten spannt sich von den Angaben der Grundstücke des alten Bestandes über die Daten zur Topographie des Verfahrensgebietes, Planungsdaten, den Daten der Neuaufnahme des Wege- und Gewässernetzes bis zu den Angaben der neuen Grundstücke und den Daten der neuen Kartenwerke.

Unter diesem Blickwinkel ist das digitale Geländemodell als Teil einer umfassenden topographischen Datenbank oder einer Landschaftsdatenbank zu betrachten. Diese wiederum bildet einen wesentlichen Bestandteil eines übergeordneten Informationsspeichers, für den zunehmend der Begriff des Landinformationssystems verwendet wird (z.B. ALBERTZ |5|, EICHHORN |44|, MECKENSTOCK in MAGEL |136|, SECKEL |191|, SVVK-Kommission |213|).

Erste Ansätze zur praktischen Verwirklichung derartiger Datenbanken sind bei verschiedenen Fachverwaltungen, bezogen auf deren spezielle Aufgabenbereiche, bereits zu erkennen. So sind z.B. bei der Flurbereinigungsverwaltung einzelne Bestandteile einer Datenbank für die Verfahrensdurchführung bereits heute vorhanden. Das Problem ist hier neben der Informationsverarbeitung hauptsächlich die Datengewinnung. Eine Übernahme von Daten anderer Fachverwaltungen ist bisher praktisch nicht möglich, da sich allgemeine Datenbanken dort meist erst im Stadium der Konzipierung oder der Erstellung befinden.

An der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg z.B. wird mit dem Aufbau einer Landschaftsdatenbank begonnen (EHMKE |43|). Der baden-württembergische Minister für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt, WEISER, geht im Vorwort zu |223| auf die Biotopkartierung ein, die in Baden-Württemberg durchgeführt wurde. In diesem Zusammenhang fordert er, daß deren Ergebnisse ebenso wie diejenigen systematischer Erfassungen von Einzelarten, Artengruppen und Lebensgemeinschaften möglichst rasch Eingang in eine Datenbank finden, die eine Auswertung auch bei aktuellen Fragen der Planung erlaubt. Das Autobahnamt Baden-Württemberg beabsichtigt, mit Hilfe einer Landschaftsdatenbank ökologische Synopsen zur Beurteilung von Entwürfen anzufertigen (SCHEEL |175|). Die Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland arbeiten an der Aufstellung einer Grundstücksdatenbank (SCHLEHUBER |178|).

Teilweise scheinen sich diese Projekte zu ergänzen, teilweise auch zu überschneiden. Es erscheint deshalb dringend erforderlich, die verschiedenen Bemühungen der interessierten Stellen rechtzeitig zu koordinieren und erfolgreich zusammen-

zufassen. Nur so kann verhindert werden, daß z.B. Arbeiten zur Datengewinnung mehrfach ausgeführt werden, mehrfach erfaßte Daten nicht übereinstimmen oder das vorhandene Datenmaterial nicht optimal genutzt wird.

Am Beispiel der Grundstücksdatenbank wird im folgenden dargestellt, welche Möglichkeiten ein derartiger zentraler Informationsspeicher für die angestrebte Ausweitung des automatischen Datenflusses im Flurbereinigungsverfahren bietet. Gleichzeitig zeigt dieses Beispiel aber auch, welcher hoher Stellenwert einer guten Zusammenarbeit verschiedener Verwaltungen bei der Erstellung und optimalen Nutzung fachüberschreitender Informationsspeicher zukommt.

Nachdem die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1971 das Rahmen-Soll-Konzept für das "automatisierte Liegenschaftskataster als Basis der Grundstücksdatenbank" beschlossen hat (NITTINGER |156|), ist eine tragfähige Grundlage für die weitere Diskussion über Form, Inhalt und Anwendungsmöglichkeiten der in der Grundstücksdatenbank (GDB) gespeicherten Daten geschaffen (z.B. BARWINSKI |13|, HERZFELD |86|, MANDEL |137|, SCHRIEVER |183|, WOLF |227|, ZIPPELIUS |234|). Nach SCHLEHUBER |178| kann damit gerechnet werden, daß im Jahre 1979 einsatzreife Programme für das automatisierte Liegenschaftsbuch, das automatisierte Grundbuch sowie für Teilabschnitte der automatisierten Liegenschaftskarte vorliegen. Die eigentliche Umstellung des Buchnachweises wird nach seiner Ansicht voraussichtlich einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren beanspruchen. Zur Erfassung der Daten der automatisierten Liegenschaftskarte wird man voraussichtlich in noch größeren Zeiträumen denken müssen.

Im Verfahrensablauf der Flurbereinigung fällt der Grundstücksdatenbank die Aufgabe zu, die Schnittstelle zwischen Liegenschaftskataster einschließlich Grundbuch auf der einen Seite und dem alten Bestand im Flurbereinigungsverfahren auf der anderen Seite für einen automatischen Datenfluß im Sinne eines integrierten Systems durchlässig zu machen. Dasselbe gilt für die Übernahme des neuen Bestandes der Flurbereinigung in das Liegenschaftskataster und das Grundbuch. Im Blockdiagramm über die Ablaufstruktur einer Flurbereinigung (Abb. 6-1) sind damit die Arbeitsabschnitte "Ermittlung der Beteiligten, Erhebungen in Grundbuch und Kataster" einschließlich deren Übergabe an Grundbuchamt bzw. Vermessungsverwaltung angesprochen.

Die Erhebung des alten Bestandes im Liegenschaftskataster und im Grundbuch ist bisher sehr zeitaufwendig. Nach LANG |122| werden ca. 8 Tage manuelle Arbeit pro 100 ha Verfahrensfläche zur Erhebung des alten Bestandes benötigt. Bei einer Verfahrensfläche von beispielsweise 1500 ha ist somit ein Techniker fast 6 Monate ausschließlich mit der Erhebung des alten Bestandes beschäftigt. Nach der getrennten Ablochung der Erhebungen aus Grundbuch und Kataster erfolgt ein maschineller Vergleich der Angaben. Unstimmigkeiten als Folge widersprüchlicher Angaben von Liegenschaftskataster und Grundbuch werden aufgelistet. Sie sind durch teilweise recht zeitaufwendige Nachforschungen zu klären, so wenn z.B. das Grundbuch wegen seines Antragsprinzips noch nicht berichtigt ist. Als Ergebnis werden die Verzeichnisse des alten Bestandes automatisch - bisher mit Ausnahme der Eintragung der Belastungen - hergestellt (SCHNEIDER |180|).

Bei diesem Arbeitsabschnitt, wie auch bei der Abgabe der Grundbuch- und Katasterberichtigungsunterlagen an das Grundbuchamt und die Vermessungsverwaltung, verspricht der Einsatz der Grundstücksdatenbank eine durchgreifende Entlastung von manueller Arbeit. Die Umstellung von Grundbuch und Liegenschaftskataster auf die EDV wird einen stärker normierten Aufbau bedingen, gleichzeitig aber ihre Aktualität und Aussagekraft erhöhen (Gemarkungserlaß |60|). Nach einer Anpassung an die Spezifikationen der Grundstücksdatenbank wird auch die Flurbereinigungsverwaltung deren Vorteile voll nutzen können, wobei folgende Gesichtspunkte besonders hervorgehoben werden sollen:

- Durch die automatische Übernahme sämtlicher Grundstücksdaten aus der Grundstücksdatenbank in den alten Bestand erübrigt sich die teilweise Doppelarbeit durch die Erhebungen im Grundbuch und im Liegenschaftskataster. Ein Vergleich beider Erhebungen mit anschließender Aufklärung der Differenzen entfällt.
- Die Belastungen der einzelnen Grundstücke entsprechend den Eintragungen in Abteilung II und III des Grundbuches werden bisher getrennt von den anderen Angaben manuell in die Lastenblätter übernommen. Die Grundstücksdatenbank ermöglicht auch die automatische Übernahme der Belastungen.
- Die Ergebnisse der Reichsbodenschätzung stehen für den Fall in der Grundstücksdatenbank abrufbereit, daß sie entweder im Einzelfall ganz oder teilweise übernommen werden oder rechnerisch umgewandelt werden können.
- Die Fortführung der Grundstücksdaten des alten Bestandes während des Flurbereinigungsverfahrens wird durch eine laufende Übernahme der Veränderungen im Bestand der Grundstücksdatenbank sichergestellt.
- Über die automatisierte Liegenschaftskarte stehen die Grenzen der Flurstücke des alten Bestandes digital in Landeskoordinaten zur Verfügung. Im Hinblick auf den Einsatz eines digitalen Geländemodells sind damit die Voraussetzungen für eine rechnerische Weiterverarbeitung der im digitalen Geländemodell gespeicherten Daten geschaffen. Die bisher erforderliche Digitalisierung der Grundstücksgrenzen des alten Bestandes für eine rechnerische Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell erübrigt sich.
- Entsprechend der Übernahme der Daten des alten Bestandes werden die Daten des neuen Bestandes wieder automatisch in die Grundstücksdatenbank übergeben.
- Die Belastungen der Grundstücke des neuen Bestandes werden in die Grundstücksdatenbank übergeben.
- Auch die neue Liegenschaftskarte wird wieder in die Grundstücksdatenbank eingespeichert und zur Erzeugung der Steuerimpulse für einen Zeichenautomaten dienen, der die neuen Grundkarten automatisch herstellt.

Diese keineswegs abschließende Zusammenstellung zeigt, welch hohen Rationalisierungseffekt die Einführung der Grundstücksdatenbank für die Flurbereinigung haben wird, sobald sie erstellt sein wird und geeignete Programme zur Überbrückung der Schnittstelle Grundstücksdatenbank - Flurbereinigungsverfahren zur Verfügung stehen werden. Im Vergleich zur Erstellung der Grundstücksdatenbank selbst dürfte diese Überbrückung nur einen relativ geringen Aufwand erfordern. Gleichzeitig wird beim Grundbuchamt und bei der Vermessungsverwaltung eine spürbare Ent-

lastung durch eine automatisierte Übernahme der Grundbuch- und Katasterberichtigungsunterlagen eintreten.

Darüber hinaus wird aber auch deutlich, daß die Bausteine Grundstücksdatenbank und digitales Geländemodell sich im Sinne der angestrebten Systemoptimierung insoweit ergänzen, als die Grundstücksdatenbank mit dazu beiträgt, daß die Daten des digitalen Geländemodells rechnerisch weiterverarbeitet werden können.

8.2 Bereitstellung digitaler Planungs- und Bewertungsmodelle

Ziel des Einsatzes digitaler Planungs- und Bewertungsmodelle ist die Forderung, weiträumige, komplexe Planungen auf eine fundiertere Grundlage zu stellen, sie stärker auf ihre Umweltverträglichkeit hin zu überprüfen und den technischen Planungsvorgang insgesamt flexibler zu machen. Mit einer verstärkten Flexibilität soll ausgedrückt werden, daß der Planer in die Lage versetzt werden soll, mit den von der Planung betroffenen oder an ihr interessierten Bürgern, wie auch mit den zu beteiligenden Behörden, eine Art Dialog einzugehen. Der einzelne interessierte Bürger könnte dadurch wenigstens in begrenztem Umfang in den Planungsprozeß selbst und die Erarbeitung eines optimalen Kompromisses als Ergebnis der Planung einbezogen werden.

Die heute häufig anzutreffende Hilflosigkeit des Einzelnen gegenüber einer übermächtig erscheinenden Verwaltung hat bei Planungsprozessen hauptsächlich drei Ursachen: Erstens die mehr oder weniger weitgehende Unkenntnis des Bürgers über den technischen und rechtlichen Planungsablauf, zweitens seine Befürchtung, daß auf eine Planung von außen her Einfluß genommen werden könnte und drittens die Tendenz einer Verwaltung, ihre entscheidungsreif ausgearbeiteten Planungen möglichst unverändert durchzusetzen. Neue technische Hilfsmittel, wie z.B. digitale Planungs- und Bewertungsmodelle, können sowohl den technischen Planungsablauf als auch das Verhalten der Verwaltung beeinflussen. Sie können den Planer in die Lage versetzen, einerseits mehrere Varianten eines Projekts auszuarbeiten und miteinander zu vergleichen und andererseits die Auswirkungen nachträglicher sinnvoller Alternativvorschläge schnell und ausreichend sicher zu ermitteln. Vielleicht kann dies trotz der weiter steigenden Konzentration von Daten dazu beitragen, das Vertrauen des Bürgers in den Planungsprozeß wenigstens im technischen Bereich wieder zu stärken und den Planungsprozeß insgesamt demokratischer zu machen. Vielleicht wird sich aber auch der Bürger der Informationsfülle gegenüber, über welche die Verwaltung verfügen wird, noch hilfloser fühlen, was zu dem Ergebnis führen kann, daß emotionale Vorbehalte um so größer werden.

Diese Forderung ist keineswegs auf größere Projekte im Rahmen von Flurbereinigungen beschränkt. Es muß hier sogar ausdrücklich betont werden, daß bei Planungen im Flurbereinigungsverfahren für den einzelnen Teilnehmer eine Mitsprachemöglichkeit durch die frühzeitige Beteiligung des Vorstandes der Teilnehmergeinschaft oder des Teilnehmers selbst sichergestellt ist. Eine größere Bedeutung dürfte diese Forderung bei raumübergreifenden Maßnahmen haben, wie sie im Bereich von Gemeinden oder Verwaltungsgemeinschaften (z.B. Flächennutzungs-

planung), in der Regional- und Landesplanung (z.B. zentrale Abfalldeponien, Flughafen- oder Kraftwerkstandorte) oder im Verkehrswegebau (z.B. Schnellbahntrassen, Fernverkehrsstraßen, Kanalisierung von Wasserläufen) anfallen. Eine zunehmende Anzahl von Bürgern, die sich gegen derartige Großprojekte zur Wehr setzen, unterstreicht diese Forderung.

Im Flurbereinigungsverfahren zeichnen sich für die Zukunft zwei wichtige Anwendungsbereiche für den Einsatz digitaler Planungs- und Bewertungsmodelle ab:

- Der teilautomatische oder iterativ automatische Zuteilungsentwurf und
- die Berücksichtigung der Auswirkungen größerer Geländeingriffe auf die Umwelt.

Im ersten Fall ist das Ziel, einen optimalen Zuteilungsentwurf unter Berücksichtigung und Abwägung sämtlicher Faktoren zu erarbeiten, die nach dem Flurbereinigungsgesetz bei der Zuteilung zu beachten sind. Im zweiten Fall sind Modellberechnungen zur Beurteilung der Auswirkungen von Eingriffen in Landschaft und Umwelt durch eine Planungsvariante oder eine Veränderung derselben angesprochen. Trotz der möglichen Unsicherheit der Ausgangsgrundlagen einschließlich deren Bewertung und damit auch des Ergebnisses bieten diese Modellberechnungen wenigstens einen ersten Ansatz für eine Quantifizierung von Informationen, die bisher bei der Planung meist nur sporadisch berücksichtigt werden.

Diese Vorschläge haben Aussicht auf Erfolg, nachdem die technischen Hilfsmittel in Form sehr schneller Rechenanlagen mit großen Kernspeichern und leistungsfähigen externen Massenspeichern mit kurzer Zugriffszeit zur Verfügung stehen.

Erste Vorschläge zur Verwirklichung eines digitalen Bewertungsmodells haben MILLER und LAFLAMME [149] bereits im Jahre 1958 gemacht. Für den Bereich des Straßenbaus schlagen sie vor, analog zum digitalen Geländemodell die Grundstückspreise im Interessenstreifen in einem digitalen Modell abzuspeichern und daraus die Grunderwerbskosten verschiedener Trassenvarianten rechnerisch abzuleiten. Über diesen Vorschlag, die relativen Grunderwerbskosten zu erfassen, geht ihr zweiter Vorschlag hinaus, ein digitales Modell zu erstellen, das sämtliche Kosten- und Nutzenfaktoren für ein bestimmtes Projekt enthält. Als Ausgangsgrundlage liegen verschiedene digitale Einzelmodelle mit unterschiedlichen Angaben vor. Die einzelnen Werte des digitalen Kosten-Nutzen-Modells werden nun dadurch ermittelt, daß in identischen Punkten dieser Einzelmodelle deren Angaben als Kosten bzw. Nutzen interpretiert, in eine einheitliche ökonomische Größe umgerechnet und aufsummiert werden. In diesem Pseudowertmodell wird dann die wirtschaftlichste Lösung des Problems, wie z.B. eine optimale Trassenführung, rechnerisch bestimmt. Ein vergleichbares Konzept stellt MANOLOPOULOS in [138] vor.

Schwierigkeiten ergeben sich bei der Erstellung eines Kosten-Nutzen-Modells dann, wenn einer bestimmten Planungsvariante eine nicht immer überschaubare Folge von Reaktionen gegenübersteht, die sich oft nicht als Kosten oder Nutzen, d.h. in Geld, ausdrücken lassen. Soll z.B. eine Straßentrasse durch einen Wald geführt werden, so ist das anfallende Holz, sofern es verwertbar ist, volkswirtschaftlich gesehen ein Nutzen. Der gleichzeitig entstehende ökologische Schaden für die Umwelt wird den Nutzen jedoch oft überwiegen, wobei der Schaden weder in seiner Größe noch in Geldeinheiten genau angegeben werden kann. Auch bei der Be-

urteilung von Flurbereinigungsprojekten nehmen die nicht durch Geld ausdrückbaren Kosten und Nutzen einen zunehmend breiter werdenden Raum ein.

Sind über derart komplexe Systeme Entscheidungen zu treffen, so schlägt MÜSER |150| dafür die Anwendung der Nutzwert-Analyse vor. Die Nutzwert-Analyse wird definiert als die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Referenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen (MÜSER |150|). Ihre Aufgabe ist es, diejenige Alternative zu ermitteln, deren Zielwertkombination einen maximalen Gesamtnutzen verspricht.

Im Gegensatz zur Kosten-Nutzen-Analyse arbeitet die Nutzwert-Analyse nicht mit ökonomischen Ertragsgrößen, sondern mit dimensionslosen Ordnungsindices. Der für eine Entscheidung erforderliche Vergleich verschiedener Planungsalternativen setzt eine Bewertung der Folgen dieser Alternativen, gemessen am jeweiligen Zielkriterium, voraus. Diese Bewertung erweist sich als das zentrale Problem der Nutzwert-Analyse. Dabei sind neben objektiven Informationen, wie z.B. Längen, Kosten oder Zeit, auch subjektive Informationen zu bewerten, die z.B. auf ästhetischen Anschauungen aufbauen. So schwierig die Bewertung subjektiver Momente im Einzelfall auch sein mag, bietet dieses Verfahren doch den Vorteil, auch diese subjektiven Momente bewußt in die Entscheidungsfindung mit einzubeziehen. Allerdings enthält es auch die Gefahr, daß über eine gezielte Steuerung der Bewertung das Ergebnis manipuliert werden kann. Als Konsequenz dieses Ansatzes liefert die Nutzwert-Analyse keine Aussage über den ökonomischen Wert der verschiedenen Planungsalternativen. Unter Abwägung verschiedener Zielkonflikte, die durch sich widersprechende Ausgangsforderungen bedingt sind, zeigt diese Methode den günstigsten Kompromiß auf. Selbst diese Entscheidungshilfen können jedoch nichts daran ändern, daß auch bei derart schwierigen Planungen letztlich "politische" Entscheidungen getroffen werden müssen durch eine subjektive Wertung derjenigen, die die Entscheidungsgewalt haben,

Nach VESTER |215| reicht es jedoch nicht aus, die uns umgebende Wirklichkeit nur durch eine Sammlung, Untersuchung und Aufsummierung von Details zu erfassen. Entscheidend ist vielmehr, daß wir ein derart komplex vernetztes System ganzheitlich durch Untersuchung der die Details verbindenden Struktur und Dynamik beschreiben.

Als Anwendungsbereiche der Nutzwert-Analyse in der Flurbereinigung führt MÜSER |150| u.a. die großräumige Zuordnung und Entflechtung von Funktionen zur Lösung von Konfliktsituationen an. Im erweiterten Sinn können dazu auch projektierte Eingriffe in Landschaft und Naturhaushalt gerechnet werden, deren gesamte Auswirkungen durch die eingangs erwähnten Modellberechnungen vorab studiert werden müssen. RUWENSTOCK u.a. |174| setzen die Nutzwert-Analyse ein, um die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen und Maßnahmenbündel in der Flurbereinigung festzustellen. Darüber hinaus weisen sie aber auch darauf hin, daß sich diese Methode z.B. zum Vergleich unterschiedlicher Lösungen (Alternativen) in einem konkreten Verfahrensgebiet oder zur Optimierung des Maßnahmeneinsatzes bei vorgegebenen Kosten eignet.

Werden diese Modellberechnungen mit Hilfe der Nutzwert-Analyse durchgeführt, so bieten sich digitale Modelle als Hilfsmittel zur Durchführung der Bewertung der Ausgangsinformationen an. Dabei hat der Planer vorweg den Bewertungsmaßstab für die jeweilige Ausgangsinformation einzugeben. Die Durchführung der Bewertung selbst erfolgt rechnerisch, indem im Interessenstreifen die Information des jeweiligen digitalen Modells entsprechend dem vorgegebenen Maßstab bewertet wird. Auf diese Art und Weise kann die Durchführung der Nutzwert-Analyse weitgehend automatisiert werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, daß diejenigen Informationen, welche sich entweder auf die Planungsalternativen auswirken oder von diesen beeinflußt werden, möglichst vollständig in digitalen Modellen abgespeichert sind.

Über die Abspeicherung derjenigen Informationen des digitalen Geländemodells hinaus, die im 7. Kapitel beschrieben worden sind, wird für weiträumige Planungen in Zukunft die Bereitstellung weiterer planungsrelevanter Daten unumgänglich sein. Diese Informationen gehören weitgehend noch zum digitalen Geländemodell, greifen aber auch darüber hinaus und sind insoweit der übergeordneten Stufe des Landinformationssystems zuzurechnen. Im Hinblick auf Planungen in Flurbereinigungsverfahren sind insbesondere zu erwähnen:

Geologie

- Geologischer Aufbau des Untergrundes

Wasserhaushalt

- Niederschläge
- Bodenwassergehalt in den belebten oberen Bodenschichten
- Grundwasser (Qualität, Menge, Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit)

Klima

- Lufttemperatur
- Luftbewegung (Windstärke, -richtung)
- Bewegung von Kaltluftströmen in Gelände mit ausgeprägtem Mikrorelief (Frostgefährdung)

Natur- und Landschaftsschutz

- Geschützte Gebiete und Einzelobjekte
- Erhaltenswerte Biotope

Ob es sinnvoll ist, für derartige Informationen allgemein verwendbare digitale Modelle zu erstellen und fortzuführen, oder ob es effizienter ist, die für ein bestimmtes Planungsvorhaben relevanten Merkmale durch weiter entwickelte und verfeinerte Datenerfassungsmethoden der Photogrammetrie und Fernerkundung ad hoc zu ergänzen, wie dies HEILAND [81] vorschlägt, soll hier nicht untersucht werden.

Weitere Informationen können durch eine gemeinsame Auswertung der bereits angeführten Daten gewonnen werden. So erlauben z.B. die Zusammenschau der Informationen

Geländeneigung, Bodennutzung, Bodenprofil,
Niederschläge und Lufttemperatur

bei entsprechender Bewertung der einzelnen Faktoren u.a. Rückschlüsse, in welchem Umgang ein Gebiet erosionsgefährdet ist.

Zusammen mit weiteren Daten eines Landinformationssystems aus dem geodätisch-vermessungstechnischen, dem juristischen und dem technischen Bereich bilden diese Informationen eine tragfähige Grundlage für die rechnerische Durchführung von Modellberechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen weiträumiger Planungen. Der Vorteil derartiger Planungs- und Bewertungsmodelle ist darin zu sehen, daß sie dem Planer Entscheidungshilfen

- mit hohem Informationsgehalt,
- auf vergleichbarer Grundlage,
- entsprechend der Ausgangsinformation und der gewählten Bewertung vergleichsweise objektiv und
- schnell

liefern. Diese Hilfen bilden die Grundlage für die Entscheidungsfindung in einer Umwelt mit wachsenden gegenseitigen Abhängigkeiten.

8.3 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund einer starken Aufgabenausweitung der integralen Flurneueordnung und der gleichzeitigen Forderung nach einer Beschleunigung der Verfahren werden Vorschläge untersucht, wie die Leistungsfähigkeit der Flurbereinigung durch einen verstärkten Einsatz der Automation, insbesondere durch den Einsatz eines digitalen Geländemodells gesteigert werden kann.

Im ersten Teil werden Fragen, die sich bei der Realisierung eines digitalen Höhenmodells als Teil eines digitalen Geländemodells stellen, wie die Datenerfassung und die verschiedenen Interpolationsmethoden, eingehend diskutiert.

Auf der Grundlage eines rasterförmigen digitalen Höhenmodells werden im zweiten Teil mehrere praktische Anwendungen entwickelt, die insbesondere für den Einsatz in der Flurbereinigungsverwaltung von Interesse sind. Zunächst wird die Berechnung eines digitalen Neigungsmodells mit anschließender Ableitung einer Gefällstufen- und Expositionskarte, von Falllinien, Krümmungen oder Schummerungsvorlagen für topographische Karten beschrieben. Die Ableitung von Profilen aus dem digitalen Höhenmodell, die Massenberechnung und die digitale Oberflächenmodellierung schließen sich an.

Der Schwerpunkt des zweiten Teiles liegt auf der empirischen Untersuchung der Genauigkeit von Gefällstufenkarten, die nach dem beschriebenen Verfahren rechnerisch abgeleitet und mit konventionell hergestellten Gefällstufenkarten verglichen werden. Für die Beispiele, die von der Flurbereinigungsverwaltung zur Verfügung gestellt sind, wird vorweg der Arbeitsablauf bei der praktischen Berechnung eines rasterförmigen digitalen Höhenmodells mit dem Höhenlinienprogramm SCOP von der Datenerfassung über die Datenaufbereitung und die Auswirkung verschiedener Programmparameter bis zur Ableitung von Höhenlinien beschrieben.

Als Ergebnis der praktischen Ableitung eines digitalen Neigungsmodells aus dem digitalen Höhenmodell ergibt sich, daß die Genauigkeit einer Gefällstufenkarte,

die aus einem Höhenraster mit 10 m Rasterintervall automatisch abgeleitet wird, durchaus mit derjenigen einer sehr sorgfältigen Feldaufnahme mit dem Freihandgefällmesser vergleichbar ist. Auch vom Herstellungsaufwand her liegen beide Verfahren nicht weit auseinander. Seine hohe Wirtschaftlichkeit erweist das rechnerische Verfahren jedoch erst dann, wenn die Information des digitalen Höhenmodells in einer Datenbank bereitgestellt und als Grundlage für weitere Anwendungen verwendet wird.

Ob eine verbesserte Genauigkeit der Rasterhöhen, die sich voraussichtlich aus einer linienhaften Berücksichtigung der Geländebruchkanten bei der Höheninterpolation ergibt, und eine Berücksichtigung der Geländebruchkanten bei der Berechnung der Geländeneigung eine Vergrößerung des hier verwendeten Rasterintervalls von 10 m für die Ableitung von Gefällstufenkarten erlauben, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Ziel des dritten Teils dieser Arbeit ist es, Einsatzmöglichkeiten eines digitalen Geländemodells im Verfahrensablauf der Flurbereinigung aufzuzeigen. Dazu wird zunächst der augenblickliche Stand der Automation im technischen Verfahren in verschiedenen Verfahrensabschnitten aufgezeigt und kritisch gewürdigt. Vorschläge und Untersuchungen zum Einsatz des digitalen Geländemodells in eben diesen Verfahrensabschnitten folgen. Schwerpunkte bilden dabei die digitale Oberflächenmodellierung und die rechnerische Verschneidung eines rasterförmigen digitalen Bodenwert- bzw. Neigungsmodells mit den Polygonnetzen der Flurstücke des alten bzw. der Blöcke des neuen Bestandes,

Während diese Vorschläge bereits heute realisiert werden können, behandelt das abschließende Kapitel zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten für die Automation in der Flurbereinigung. Ausgangspunkt ist ein zentraler, datenbankmäßig verwalteter Informationsspeicher, der sämtliche Daten sammelt, die während des Flurbereinigungsverfahrens anfallen. Welche Reserven an manueller Tätigkeit durch die Einführung eines derartigen zentralen Datenspeichers freigesetzt werden können, wird am Beispiel der Grundstücksdatenbank dargelegt. Erste Ansatzpunkte zur Verwirklichung derartiger Datenspeicher sind vorhanden. Ihr praktischer Einsatz wird jedoch noch mehrere Jahre auf sich warten lassen.

Ebenfalls als zukünftige Entwicklungsmöglichkeit ist die Erstellung digitaler Planungs- und Bewertungsmodelle anzusehen. Hauptanwendungsbereiche im Rahmen eines Flurbereinigungsverfahrens werden der teilautomatische oder iterativ automatische Zuteilungsentwurf und die Durchführung von Modellberechnungen zur Beurteilung der Auswirkungen großräumiger Planungen sein. Über die ingenieurmäßige Optimierung von Projekten hinaus sollen dabei z.B. Auswirkungen von Eingriffen in den Naturhaushalt und das Landschaftsbild bei der Entwurfserarbeitung mit berücksichtigt werden. Die hier vorgeschlagenen Modellberechnungen sind als Hilfsmittel für den Planer zu verstehen. Ihre Aufgabe ist es, den günstigsten Kompromiß bei einer bestmöglichen Abwägung vieler, teilweise gegensätzlicher Gesichtspunkte zu erarbeiten. Durch das technische Hilfsmittel des Planungs- und Bewertungsmodells ergeben sich für den von der Planung betroffenen Bürger neue Möglichkeiten, in begrenztem Umfang an der Planung mitzuwirken. Das Planungsverfahren selbst wird flexibler und dadurch vielleicht demokratischer.

LITERATURVERZEICHNIS

Abkürzungen:

AVN	Allgemeine Vermessungs-Nachrichten
BGB1.	Bundesgesetzblatt
BuL	Bildmessung und Luftbildwesen
DGK	Deutsche Geodätische Kommission
GAB1	Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg
PE	Photogrammetric Engineering and Remote Sensing
RzF	Rechtsprechung zur Flurbereinigung
VR	Vermessungstechnische Rundschau
Vt	Vermessungstechnik
ZfV	Zeitschrift für Vermessungswesen

- [1] ABB, W.: 50. Tagung der Arbeitsgemeinschaft für das technische Verfahren der Flurbereinigung im Bundesgebiet. ZfV 99, S. 414-419, 1974.
- [2] ABB, W.: Die Automation der Flurbereinigung in der Bundesrepublik Deutschland. Bayer. Berichte aus der Flurbereinigung Nr. 21, S. 5-8, 1975.
- [3] ACKERMANN, F.: Neue Ziele und Methoden der automatischen Berechnung umfangreicher Polaraufnahmen. Sammlung Wichmann, Neue Folge, Nr. 15, S. 17-30, 1970.
- [4] ACKERMANN, F.: The accuracy of digital height models, Vorträge der 37. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart vom 24.-28.9.1979. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 6, S. 133-144, 1980.
- [5] ALBERTZ, J.: Landinformationssysteme aus photogrammetrischer Sicht. Vorträge der 37. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart vom 24.-28.9.1979. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 6, S. 153-164, 1980.
- [6] ALLAM, M.M., WONG, C.K.: Gridding topographical surfaces, XIII Congress of the ISP, Commission III, presented paper, Helsinki 1976.
- [7] AMADESI, E., VIANELLO, G.: Construction scheme of a slope stability map by air photographs. 36. Photogrammetrische Woche 1977, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 4, S. 233-242, 1977.
- [8] Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) - Arbeitskreis Topographie: Erprobung von Höhenlinieninterpolationsprogrammen - Schlußbericht -. Herausgegeben vom Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, 1980.
- [9] ASSMUS, E.: Extension of Stuttgart Contour Program to Treating Terrain Break-Lines. Proceedings of the Symposium of the ISP, Commission III, Stuttgart 2.-6.9.1974. DGK, Reihe B, Heft Nr. 214, S.171-178, München 1975.
- [10] ASSMUS, E.: Die Behandlung geomorphologischer Strukturen im Stuttgarter Höhenlinienprogramm. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Heft 1, S. 131-145, 1976.
- [11] ASSMUS, E.: Berücksichtigung von Geländekanten im Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Theorie und Ergebnisse, Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der Technischen Universität Wien, Nr. 8, S. 51-63, 1976.

- [12] ASSMUS, E., KRAUS, K.: Die Interpolation nach kleinsten Quadraten - Prädiktionswerte simulierter Beispiele und ihre Genauigkeit. DGK, Reihe A, Heft Nr. 76, München 1974.
- [13] BARWINSKI, K.: Aspekte zum Aufbau einer Grundstücksdatenbank unter Berücksichtigung der Organisation der automatisierten Datenverarbeitung in Nordrhein-Westfalen. ZfV 100, S. 201-207, 1975.
- [14] BATZ, E.: Zur Automatisierung des Verfahrensablaufs der Flurbereinigung in Hessen. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 15, S. 65-69, 1974.
- [15] BAUHUBER, E., ERLACHER, V., GÜNTHER, P.: Ein Programmsystem für die Behandlung digitaler Höhenmodelle. BuL 43, S. 103-107, 1975.
- [16] BAUMGARTNER, E., MÖLLER, R.: Digitalisieren im Landumlegungsverfahren. AVN 84, S. 59-61, 1977.
- [17] BECK, W.: Geländeformen, Reproduktion, Topographische Karten und Karten-Abbildungen. In JORDAN, EGGERT, KNEISSL: Handbuch der Vermessungskunde, Band Ia, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1957.
- [18] BENNER, E.: Ein neues Verfahren der Erdmassenberechnung durch exakte Integration mittels elektronischer Datenverarbeitung. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 127, S. 25-81, 1972.
- [19] BERNHARD, I.: A report of first experience of data acquisition for the WILD AVIOPLAN ORI and the planned programme of work in the federal department of standards and surveys. XIII Congress of the ISP, Commission IV, presented paper, Helsinki 1976.
- [20] BEYER, A.: Zur Erfassung flachen Geländes durch willkürlich verteilte Höhenpunkte, Vt 20, S. 266-270, 1972.
- [21] BRIGGS, I.C.: Machine contouring using minimum curvature. Geophysics 39, S. 39-48, 1974.
- [22] BLACHUT, T.J., van WIJK, M.C.: Results of the International Orthophoto Experiment 1972-76. XIII Congress of the ISP, Commission IV, presented paper, Helsinki 1976.
- [23] BOPP, H.: Möglichkeiten zur Erzeugung eines Gradientenflächenmodells. CAD-Bericht "Zur digitalen Beschreibung von Planungsunterlagen für ein Optimierungssystem im Verkehrswegebau", Gesellschaft für Kernforschung MBH Karlsruhe, S. B1-B54, 1975.
- [24] BOSMAN, E.R., ECKHART, D., KUBIK, K.: Delft - A Programme System for Surface Approximation. BuL 40, S. 13-20, 1972.
- [25] BRANDSTÄTTER, L.: Exakte Schichtlinien und topographische Geländedarstellung. Sonderheft Nr. 18 der Öster. ZfV, Wien 1957.
- [26] BRASSEL, K.: Modelle und Versuche zur automatischen Schräglightschattierung. Ein Beitrag zur Computer-Kartographie. Verlag Buchdruckerei E. Brassel, Klosters/Schweiz, 1973.
- [27] BRINDÖPKE, W.: Photogrammetrische Höhenauswertung für die Herstellung der DGK 1:5000 im Flachland. ZfV 93, S. 226-230, 1968.
- [28] BRINDÖPKE, W.: Schrittweise Automatisierung der photogrammetrischen Höhenaufnahme. ZfV 94, S. 268-272, 1969.
- [29] BRONSTEIN, I.N., SEMENDJAJEW, K.A.: Taschenbuch der Mathematik. Harri Deutsch Verlag, Frankfurt/Main 1961.
- [30] BRUNKEN, G.: Automatische Zeichnung von Höhenlinienplänen. DGK, Reihe C, Heft Nr. 173, München 1972.
- [31] BÜRKLE, W.: Aktuelles aus der Rebflurbereinigung in Baden-Württemberg. Rebe und Wein, S. 322-326 und S. 383-386, 1970.

- [32] BURKLE, W.: Die Rebflurbereinigung in Württemberg. Weinland Württemberg, S. 50-53, Südwestdeutsche Verlagsanstalt, Mannheim 1976.
- [33] Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Herausgeber): Flurbereinigung und Wiederaufbau in den Weinbergen. Sonderheft der Schriftenreihe für Flurbereinigung, 8. Auflage, Bonn 1979.
- [34] CAZABAT, C.: L'aide apportée par les photographies aériennes à l'élaboration des cartes de zones de pente. XI Congress of the ISP, Commission VII, presented paper, Lausanne 1968.
- [35] CHILES, J.P., DELFINER, P.: Reconstitution par krigeage de la surface topographique à partir de divers schémas d'échantillonnage photogrammétrique. Société Française de Photogrammetrie, Bulletin No 57, S. 42-50, 1975.
- [36] CLERICI, E., KUBIK, K.: The theoretical accuracy of point interpolation on topographic surfaces. Proceedings of the Symposium of the ISP, Commission III, Stuttgart 2.-6.9.1974. DGK, Reihe B, Heft Nr. 214, S. 179-187, München 1975.
- [37] DONIÉ, M.: Die Aufgaben der Flurbereinigung sind gewachsen. Staatsanzeiger für Baden-Württemberg vom 14.5.1977, 26. Jg., Nr. 38, S. 5.
- [38] DÜPPE, R.D., GOTTSCHALK, H.-J.: Automatische Interpolation von Isolinen bei willkürlich verteilten Stützpunkten. AVN 77, S. 423-426, 1970.
- [39] EBNER, H.: Zwei neue Interpolationsverfahren und Beispiele für ihre Anwendung. BuL 47, S. 15-27, 1979.
- [40] EBNER, H., HOFMANN-WELLENHOF, B., REISS, P., STEIDLER, F.: HIFI - Ein Minicomputer-Programmsystem für Höheninterpolation mit finiten Elementen. ZfV 105, S. 215-225, 1980.
- [41] EBNER, H., REISS, P.: Height interpolation by the method of finite elements. Symposium of the ISP, Commission III, presented paper, Moscow 1978. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe II, Heft Nr. 36, S. 79-94, 1978.
- [42] EBNER, H., REISS, P.: Photogrammetrische Herstellung von Gefällstufenkarten. Schriftenreihe der Arge Flurb, Heft 3, S. 17-27, 1980.
- [43] EHMKE, W.: Der landschaftspflegerische Begleitplan und seine Abgrenzung zu Einzelaufgaben. In "Fortbildung im Naturschutz", Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg, Nr. 10, herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 1977.
- [44] EICHHORN, G.: Grundlagen eines Landinformationssystems. AVN 86, S. 7-12, 1979.
- [45] ENDLICHER, W.: Geländeklimatologische Untersuchungen im Weinbaugebiet des Kaiserstuhls. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 150, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a.M. 1980.
- [46] ETHROG, U.: Eine neue Interpolationsmethode für digitale Geländemodelle. VR 40, S. 16-21, 1978.
- [47] FAUST, H.-W.: Orthocomp Z2, The Analytical Orthoprojector from Carl Zeiss. BuL 80, S. 110-118, 1980.
- [48] v. FIGURA, K.: Rebflurbereinigungen - auch in einer Großstadt. VR 30, S. 411-424, 1968.
- [49] FINSTERWALDER, R.: Zur Geländeerfassung durch Schichtlinien und Profile. BuL 38, S. 349-354, 1970.
- [50] FINSTERWALDER, R.: Zur Gewinnung von Profilen aus Schichtlinien zum Zwecke der Differentialentzerrung. ZfV 97, S. 193-196, 1972.

- [51] FINSTERWALDER, R.: Zur Beurteilung der Geländedarstellung in topographischen Karten. Société Française de Photogramm trie, Bulletin Nr. 57, S. 9-16, 1975.
- [52] FINSTERWALDER, R.: Oberlegungen zur Ableitung eines digitalen Geländemodells aus Höhenlinien. ZfV 100, S. 458-461, 1975.
- [53] FISCHLER, F.: Die Flächenbilanz. Grundlagen, Methoden und Anwendungsmöglichkeiten. Forschungsbericht am Institut für Landwirtschaftliche Betriebswirtschaft, Abteilung für Landwirtschaftliche Regionalplanung an der Universität für Bodenkultur, Wien 1978.
- [54] Flurbereinigungsgericht Mannheim: Urteil vom 9.9.1971 - VII 1029/69, Rechtsprechung zur Flurbereinigung (RzF) 44 II S. 67.5 und vom 13.3.1969 - VII 744/67, RzF 44 IV S. 29.1.
- [55] Flurbereinigungsgesetz vom 14.7.1953 (BGBI. I, S. 591).
- [56] Gesetz zur Änderung des Flurbereinigungsgesetzes vom 15.3.1976 (BGBI. I, S. 533).
- [57] FUCHS, H.G.: Eine Fehleranalyse der Flurbereinigungssch tzung. AVN 76, S. 386-391 und S. 437-452, 1969.
- [58] FUCHS, H.G.: Bodenschätzung und Flurbereinigung '74. AVN 81, S. 91-103, 1974.
- [59] FUCHS, H.G.: Das Sch tzungsintervall. AVN 83, S. 77-83, 1976.
- [60] Gemeinsamer Erlaß des Innenministeriums und des Justizministeriums über die Bezeichnung und Abgrenzung von Gemarkungen (Gemarkungserla  vom 31.5.1977, GABL vom 26.9.1977, S. 1021-1057.
- [61] Geodata-Service GmbH: Forschungsauftrag des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: EDV-Programm für die Durchführung der Sch tzungsberechnung im Flurbereinigungsverfahren mittels automatischer Flächenverschneidung, Olpe 1973.
- [62] GERMAN, R., EICHHORST, U.: Hangneigungen und ihre Bedeutung für Landschaftspflege und Planung. Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg, Band 49/50, S. 115-135, herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg - Institut für Ökologie und Naturschutz, 1979.
- [63] GÖPFERT, W.: Interpolationsergebnisse mit der Multiquadratischen Methode. ZfV 102, S. 457-460, 1977.
- [64] GOTTSCHALK, H.-J.: Datenreduktion und Generalisierung bei digitalisierten Linien. AVN 79, S. 293-299, 1972.
- [65] GOTTSCHALK, H.-J.: Die Generalisierung von Isolinien als Ergebnis der Generalisierung von Flächen. ZfV 97, S. 489-494, 1972.
- [66] GOTTSCHALK, H.-J.: Automatische Generalisierung von Siedlungen, Verkehrswegen, Höhenlinien, Wasserläufen und Vegetationsgrenzen für eine kleinma stabige topographische Karte. ZfV 99, S. 338-342, 1974.
- [67] GOTTSCHALK, H.-J.: Schr glichtschattierung mit einem Schwarz-Weiß-Plotter. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Nr. 68, S. 23-29, 1975.
- [68] GRAFAREND, E.: Nichtlineare Prädiktion. ZfV 97, S. 245-255, 1972.
- [69] GRAFAREND, E., HEISTER, H., KELM, R., KROPFF, H., SCHAFFRIN, B.: Optimierung geodätischer Me operationen. Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 11, 1979.
- [70] GRUBER, C.: Erfahrungen bei der Anwendung eines digitalen Geländemodells und Abrechnung eines internationalen Großflughafens. AVN 81, S. 311-320, 1974.

- [71] GRÜNDIG, L.: Ein Verfahren zur Auswertung und strengen Ausgleichung von großräumigen Polaraufnahmen. ZfV 100, S. 451-457, 1975.
- [72] GRUNDEY, M., HAKE, G.: Herstellung topographischer Grundkarten im Wege der Registriertachymetrie. AVN 83, S. 58-71, 1976.
- [73] GRUNDEY, M., KRUSE, I.: Berechnung und Auswertung von digitalen Flächenmodellen (DFM). AVN 85, S. 100-108, 1978.
- [74] HAENDEL, B., KLUKE, J., LÜKE, B.: Digitales Flächenmodell und automatische Höhenlinienkartierung - methodische Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. VR 37, S. 107-121, 1975.
- [75] HAMPEL, G.: Topographische Landesaufnahme. In "150 Jahre Württembergische Landesvermessung 1818-1968", herausgegeben vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, S. 212-232, Stuttgart 1968.
- [76] HARDY, J.W.: Automatic Stereoplotting with the EC-5/Planimat. BuL 38, S. 62-68, 1970.
- [77] HARDY, R.L.: Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. Journal of Geophysical Research, Vol. 76, No. 8, S. 1905-1915, 1971.
- [78] HARDY, R.L.: Geodetic applications of multiquadric analysis. AVN 79, S. 398-404, 1972.
- [79] HARDY, R.L.: Least squares prediction, PE, Vol. XLIII, S. 475-492, 1977.
- [80] HEEGE, S., RIEGER, G.: Untersuchungen zur Genauigkeit photogrammetrischer und digitaler Schichtlinien. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 1977.
- [81] HEILAND, K.: Einsatz der analytischen Photogrammetrie in der Planung. XIV Kongreß der ISP, Kommission IV, presented paper, Hamburg 1980.
- [82] HEIN, G., LENZE, K.: Zur Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit verschiedener Interpolations- und Prädiktionsmethoden. ZfV 104, S. 492-505, 1979.
- [83] HEISSLER, V.: Kartographie. Sammlung Göschen, Band 30/30a, Walter de Gruyter u. Co., Berlin 1966.
- [84] HELAVA, U.V.: Digital correlation in photogrammetric instruments. XIII Congress of the ISP, Commission III, presented paper, Helsinki 1976.
- [85] HENZLER, G.: Die Luftbildmessung in der bayerischen Flurbereinigung. Bayer, Berichte aus der Flurbereinigung 21, S. 37-55, 1975.
- [86] HERZFELD, G.: Auf dem Weg zur Grundstücksdatenbank. ZfV 98, S. 536-544, 1973.
- [87] HOBBIIE, D.: Höhenauswertung in Orthoprojektoren. BuL 39, S. 29-36, 1971.
- [88] HOBBIIE, D.: C100 PLANICOMP - the analytical stereoplotting system from Carl Zeiss of Oberkochen, XIII Congress of the ISP, Commission II, presented paper, Helsinki 1976.
- [89] HOBROUGH, G.L., HOBROUGH, T.B.: Image correlator speed limits. BuL 39, S. 20-24, 1971.
- [90] HÖHLE, J., STEWARDSON, P.B.: Orthophotogeräte und ihre Wirtschaftlichkeit. BuL 45, S. 7-14, 1977.
- [91] HOFMANN, O.: Kartoscan - Ein neues MBB-Datenerfassungssystem für die Kartographie. AVN 84, S. 62-65, 1977.
- [92] HUPFELD, W.: Ein Beispiel zur mathematischen Planungsrechnung. ZfV 96, S. 61-65, 1971.

- [93] JACOBSEN, K.: Profilweise Höhenmessung für die Deutsche Grundkarte (DGK 5). BuL 42, S. 131-133, 1974.
- [94] KAUFMANN, J., BIGLER, H.: Ein erweiterter Ansatz zur Anwendung des Computers in Landumlegungsverfahren. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, Fachblatt 2, S. 39-44, 1973.
- [95] KERSTING, R.: Die Anwendung der Luftbildmessung in der Flurbereinigung. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Heft 26, Kleins Druck- und Verlagsanstalt GmbH, Lengerich (Westfalen) 1959.
- [96] KERSTING, R.: Erfahrungen mit dem Orthoprojektor GZ1 in der Landeskulturverwaltung Rheinland-Pfalz. BuL 37, S. 192-196, 1969.
- [97] KERSTING, R.: Elektronische Datenverarbeitung in der Landeskulturverwaltung Rheinland-Pfalz. AVN 80, S. 333-338, 1973.
- [98] KLEIN, W.: Die großräumige Polaraufnahme und die Blockausgleichung als Meß- und Rechenverfahren in der Flurbereinigung. Geodätische Woche Köln 1975, S. 286-294, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1976.
- [99] KLEMPERT, B.: Probleme und Methoden bei der Erarbeitung von Rechenprogrammen für die Erstellung des Zuteilungsentwurfs bei Flurbereinigungen. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Heft 62, Landwirtschaftsverlag GmbH, Hilstrup 1974.
- [100] KOCH, K.R.: Höheninterpolation mittels gleitender Schrägebene und Prädiktion. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik Nr. 12, S. 229-232, 1973.
- [101] KOCH, K.R.: Digitales Geländemodell und automatische Höhenlinienzeichnung. ZfV 98, S. 346-352, 1973.
- [102] KOCH, K.R.: Digitales Geländemodell und Höhenlinienzeichnung für Zwecke der Ingenieurvermessung und der Topographie. VR 37, S. 1-8, 1975.
- [103] KOCH, K.R.: Vergleich von Kovarianzberechnungen für die Höheninterpolation. Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn, Nr. 35, 1975.
- [104] KONECNY, G.: Zukunftsaufgaben der Photogrammetrie. ZfV 99, S. 527-535, 1974.
- [105] KONECNY, G.: Digitalauswertung in der Photogrammetrie. Geodätische Woche Köln 1975, S. 220-230, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1976.
- [106] KONECNY, G.: Rechnergestützte Stereokartierung mit dem Analytischen Plotter. Vorträge der 35. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart vom 8. bis 13. September 1975. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 2, S. 251-266, 1976.
- [107] KONECNY, G.: Der Analytische Plotter und seine anwendungsbezogene Programmierung. BuL 44, S. 65-76, 1976.
- [108] KONECNY, G.: Analytische Auswertegeräte-Zielsetzung, Entwicklung und technische Realisierung. 36. Photogrammetrische Woche 1977, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 4, S. 51-80, 1977.
- [109] KONECNY, G.: KAZMIERCZAK, H., GEMMAR, P.: Digitale Prozessoren für Differentialentzerrung und Bildkorrelation. BuL 46, S. 99-109, 1978.
- [110] KRATKY, V.: Spectral analysis of some interpolation methods. Symposium of the ISP, Commission IV, presented paper, Ottawa 1978.
- [111] KRAUS, K.: Zur Auswertung nichtorientierter Luftbilder. BuL 39, S. 157-164, 1971.

- [112] KRAUS, K.: Automatische Berechnung digitaler Höhenlinien. ZfV 96, S. 233-239, 1971.
- [113] KRAUS, K.: Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie. BuL 40, S. 7-12, 1972.
- [114] KRAUS, K.: Rationalisierung der tachymetrischen Geländeaufnahme und Automatisierung der Weiterverarbeitung zur großmaßstäbigen Karte. AVN 80, S. 2-15, 1973.
- [115] KRAUS, K.: Ein allgemeines digitales Geländemodell - Theorie und Anwendungsmöglichkeiten. Numerische Photogrammetrie von F. Ackermann, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5, S. 225-251, 1973.
- [116] KRAUS, K.: Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützpunkt-Gruppen. ZfV 98, S. 146-153, 1973.
- [117] KRAUS, K.: Untersuchung zur Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten. ZfV 99, S. 198-205, 1974.
- [118] KRAUS, K.: Weitere Entwicklungen und Anwendungen der digitalen Höhenlinienkartierung und des digitalen Geländemodelles. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 1, S. 147-157, 1976.
- [119] KRAUS, K., KRACK, K.: Detailprobleme und Erfahrungen bei der Bearbeitung großräumiger Polaraufnahmen. Sammlung Wichmann, Neue Folge, Nr. 19, S. 82-97, 1972.
- [120] KREILING, W.: Automatische Herstellung von Höhenmodellen und Orthophotos aus Stereobildern durch digitale Korrelation. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 1976.
- [121] KROPFF, H.: Ein Optimierungsansatz zur Automatisierung von Zuteilungsplänen in der Flurbereinigung. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Heft 65, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup 1977.
- [122] LANG, E.: Der Einsatz der Automation in der Flurbereinigung. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Heft 60, Landwirtschaftsverlag GmbH Hiltrup, 1972.
- [123] LANG, K.: Bericht über die Überprüfung der Gefällstufenkarte 1:2500 im Bereich der Flurbereinigung Götzingen, Odenwaldkreis. Flurbereinigungsamt Buchen/Odw. - Verfahrensakten der Flurbereinigung Götzingen, Odenwaldkreis, 1971.
- [124] LAUER, S.: Anwendung der skalaren Prädiktion auf das Problem des digitalen Geländemodells. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Heft 51, S. 105-116, 1972.
- [125] LAUER, S.: Automatische Höhenlinienzeichnung mit Darstellung von Geländeunstetigkeiten und digitales Geländemodell. VR 38, S. 1-14, 1976.
- [126] LAUER, S., WROBEL, B.: Eine elementare Herleitung der vektoriiellen Prädiktions-Filterung. ZfV 97, S. 97-104 und S. 173-179, 1972.
- [127] LEBERL, F.: Interpolation in Square Grid DJM. ITC Journal Nr. 5, S. 756-807, 1973.
- [128] LEITZ, H.: Zehn Jahre elektronische Tachymetrie - Zeiss: 1968 RegElta 14 - 1978 Elta 2 und Elta 4. ZfV 103, S. 437-446, 1978.
- [129] LINDIG, G.: Weitere Erfahrungen mit dem ITEK-Korrelator EC-5. XIII Kongreß der ISP, Kommission II, presented paper, Helsinki 1976.
- [130] LINKWITZ, K.: Digitale Geländemodelle. BuL 38, S. 76-84, 1970.
- [131] LINKWITZ, K., NAKAMURA, H., PROFKE, L.: Mathematische Grundlagen digitaler Geländemodelle und Vorschläge für ihre Verwirklichung. Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 127, 1972.

- | 132 | MAKAROVIČ, B.: Progressive sampling for digital terrain models. ITC Journal Nr. 3, S. 397-416, 1973.
- | 133 | MAKAROVIČ, B.: Amended Strategy for progressive sampling. ITC Journal Nr. 1, S. 117-128, 1975.
- | 134 | MAKAROVIČ, B.: A Digital Terrain Model System. ITC Journal Nr. 1, S. 57-83, 1976.
- | 135 | MAKAROVIČ, B.: Composite sampling for Digital Terrain Models. ITC Journal Nr. 3, S. 406-433, 1977.
- | 136 | MAGEL, H.: DVW-Arbeitsgruppen - Vorträge und Podiumsdiskussionen. DVW-Arbeitsgruppe A. Bericht über die Podiumsdiskussion zum Thema: "Optimale Daseinsvorsorge durch Intensivierung vorgegebener und Einrichtung neuer Arbeitsgebiete sowie durch Erschließung von Randgebieten und verbreiterte Ausbildung in Tätigkeiten des Vermessungswesens." ZfV 103, S. 628-630, 1978.
- | 137 | MANDEL, E.: Ein Modell für die integrierte Datenverarbeitung mit einer Fachdatenbank Vermessung. ZfV 95, S. 73-85, 1970.
- | 138 | MANOLOPOULOS, N.: Trassenfindung und Optimierung mit dem Programmsystem OPT-1. CAD-Bericht 126, Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 109-162, 1979.
- | 139 | MARCKWARDT, W.: Zur Interpolation im digitalen Modell. Vt 25, S. 230-232, 1977.
- | 140 | MARCKWARDT, W.: Application and accuracy of the TOPOMAT automatic restitution system. XIII Congress of the ISP, Commission II, presented paper, Helsinki 1976.
- | 141 | MARCKWARDT, W.: Digital filtering of profile data. XIII Congress of the ISP, Commission II, presented paper, Helsinki 1976.
- | 142 | MARCKWARDT, W.: Neue Lösungswege zur Automatisierung der Differential-entzerrung. BuL 45, S. 153-159, 1977.
- | 143 | MASSA, W., WAIZENEGGER, G.: Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit der automatischen Höhenlinieninterpolation. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 1977.
- | 144 | MASSON d'AUTUME, G.: L'interpolation par une règle flexible et ses applications en photogrammétrie numérique. XIII Congress of the ISP, Commission III, presented paper, Helsinki 1976.
- | 145 | MASSON d'AUTUME, G.: Surface modelling by means of an elastic grid. Symposium of the ISP, Commission III, presented paper, Moscow 1978.
- | 146 | MATHERON, G.: Le krigeage universel. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, fascicule 1, Fontainebleau 1969.
- | 147 | MEIMBERG, P.: Die Bewertung hängiger Grundstücke bei der Flurbereinigung. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Heft 50, Landwirtschaftsverlag GmbH, Hilstrup 1968.
- | 148 | MEIMBERG, P., RING, W., SCHÜNKE, U., RÜHMANN, H., WAMSER, K.: Die wirtschaftlichen Grenzen der mechanisierten Bodennutzung am Hang und ihre Bedeutung für eine Bewertung hängiger Grundstücke in der Flurbereinigung. Schriftenreihe für Flurbereinigung, Heft 33, Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart 1962.
- | 149 | MILLER, C.L., LAFLAMME, R.A.: The digital terrain model - theory and application. PE 24, S. 433-442, 1958.
- | 150 | MÖSER, H.: Nutzwertanalytische Ansätze in der Flurbereinigungsplanung. ZfV 100, S. 105-116, 1975.

- [151] MORITZ, H.: Zur Genauigkeit der Höhenschichtlinien. ZfV 89, S. 453-456, 1964.
- [152] MORITZ, H.: Neuere Ausgleichungs- und Prädiktionsverfahren. ZfV 98, S. 137-146, 1973.
- [153] MORITZ, H.: Least-squares collocation. Reviews of geophysics and space physics, Vol. 16, S. 421-430, 1978.
- [154] MÖLLER, W.: Auswertemethode für registrierende Tachymeter in der Bayer. Flurbereinigung. ZfV 100, S. 116-120, 1975.
- [155] MÖLLER, W.: Überlegungen zum Einsatz der Blockausgleichungsprogramme des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart für Reg-Elta-Auswertungen. Bayer. Berichte aus der Flurbereinigung 21, S. 69-77, 1975.
- [156] NITTINGER, J.: Automatisiertes Liegenschaftskataster als Basis der Grundstücksdatenbank. Rahmen-Soll-Konzept. ZfV 97, S. 86-87, 1972.
- [157] OBERMEIER, H.: Höhenlinien als Grundlage der Differentialentzerrung. Dissertation von dem Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, 1975.
- [158] OLEA, R.A.: Optimal Contour Mapping Using Universal Kriging. Journal of Geophysical Research, Vol. 79, No. 5, S. 695-702, 1974.
- [159] OTEPKA, G., LOITSCH, J.: Ein Programm zur digital gesteuerten Orthophotoproduktion. Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen, Technische Universität Wien, Heft 8, S. 23-49, 1976.
- [160] PAPE, E.: Die Deutsche Grundkarte 1:5000 als Luftbildkarte. BuL 39, S. 194-198, 1971.
- [161] PELZER, H.: Zur Berechnung optimaler Zuteilungspläne bei der Flurbereinigung. VR 34, S. 345-353, 1972.
- [162] PLATTER, N.: Das EDV-Programmsystem UDM 78 zur Auswertung von zweidimensionalen Modellüberlagerungen. DVW-Nachrichten 8/78 Nr. 480, ZfV 103, S. IX-X, 1978.
- [163] PÖLZLEITNER, F.: Orthophotoherstellung mittels Bildkoordinaten im Universalorthophotosystem. ZfV 100, S. 42-47, 1975.
- [164] POPP, A.: Reprotechnik in der Flurbereinigung. Bayer. Berichte aus der Flurbereinigung 21, S. 85-99, 1975.
- [165] QUADFLIEG, F.: Das "neue" Flurbereinigungsgesetz und seine Auswirkungen. ZfV 101, S. 169-175, 1976.
- [166] RAHN, B., HENZLER, G.: Zur Situation der terrestrischen und photogrammetrischen Vermessung bei der Flurbereinigung in Bayern. ZfV 99, S. 167-174, 1974.
- [167] RAPIOR, L., BOPP, D.: Weiterentwicklung des Programmes "Auswertung digitales Geländemodell". BuL 43, S. 108-114, 1975.
- [168] Rechnungshof Baden-Württemberg: Denkschrift zur Landeshaushaltsrechnung von Baden-Württemberg für das Haushaltsjahr 1974.
- [169] RIEDINGER, G.: Photogrammetrische Arbeiten beim Landesvermessungsamt Baden-Württemberg. Mitteilungen des Deutschen Vereins für Vermessungswesen, Landesverein Baden-Württemberg, 25, Heft 1/2, S. 27-34, 1978.
- [170] RÜDENAUER, H.: Digitale Datenerfassung mit dem Analytischen Plotter AP/C-3. XIII Congress of the ISP, Commission II, presented paper, Helsinki 1976.

- [171] RÜDENAUER, H.: Analytische Plotter-Programme zur objektiven on-line Punktdichtenbestimmung in digitalen Höhenmodellen. XIV Kongreß der ISP, Kommission II, presented paper, Hamburg 1980.
- [172] RÜDENAUER, H.: Experimentelle Genauigkeitsanalyse digitaler Höhenmodelle. XIV Kongreß der ISP, Kommission IV, presented paper, Hamburg 1980.
- [173] RUSSELER, M.: Der Einsatz von Flächenermittlungsgeräten in der Flurbereinigung. Bayer. Berichte aus der Flurbereinigung 21, S. 101-109, 1975.
- [174] RUWENSTOCK, G., SCHIERENBECK, B., STÖCKMEYER, P.: Effizienz der Flurbereinigung. Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe B: Flurbereinigung Heft 69, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 1980.
- [175] SCHEEL, G.: Die Autobahn Stuttgart- Westlicher Bodensee; Aufgaben des Geodäten bei der Planung, Bauausführung und Bodenordnung. Vortrag im Rahmen des geodätischen Kolloquiums der Universität Stuttgart. am 8.12.1978.
- [176] SCHENK, M.: Die Terrainendarstellung. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Sonderheft Prof. Dr.-Ing. Herbert Knorr zum 65. Geburtstag, S. 129-132, 1975.
- [177] SCHILCHER, M.: A comparison of the accuracy of several contour plots of the Söhnstetten test field. 36. Photogrammetrische Woche 1977, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 4, S. 29-50, 1977.
- [178] SCHLEHUBER, J.: Die Grundstücksdatenbank. ZfV 102, S. 532-540, 1977.
- [179] SCHNEIDER, H.: Untersuchungen am Orthoprojektor GZ1 über die Höhengenaugigkeit der Profilschraffenmethode. DGK, Reihe C, Heft Nr. 162, München 1971.
- [180] SCHNEIDER, E.: Zusammenarbeit zwischen Flurbereinigung und Grundstücksdatenbank. Bayer. Berichte aus der Flurbereinigung 21, S. 111-127, 1975.
- [181] SCHRADER, B.: Ablaufplanung und mathematische Optimierung bei der Flurbereinigung. VR 33, S. 419-426, 1971, VR 33, S. 460-462 und S. 485-491, 1971.
- [182] SCHREYER, A.: Die Entwicklung der Aufnahme- und Rechenverfahren bei der Flurbereinigung in Baden-Württemberg. Mitteilungen des Deutschen Vereins für Vermessungswesen, Landesverein Baden-Württemberg, 25, Heft 1/2, S. 4-26, 1978.
- [183] SCHRIEVER, H.: Zur Entstehung der Grundstücksdatenbank. ZfV 102, S. 389-397, 1977.
- [184] SCHROEDER, M.: Das erdwissenschaftliche Flugzeugmeßprogramm (FMP) der Bundesrepublik Deutschland. 36. Photogrammetrische Woche 1977, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 4, S. 215-228, 1977.
- [185] SCHULT, R.: Ein System digitaler Geländemodelle. AVN 81, S. 304-311, 1974.
- [186] SCHULT, R.: Ein digitales Höhenmodell in Form eines Programmbausteins, das geeignet ist für den Einbau in das Optimierungsprogramm SCHEK. CAD-Bericht "Zur digitalen Beschreibung von Planungsunterlagen für ein Optimierungssystem im Verkehrswegebau". Gesellschaft für Kernforschung MBH Karlsruhe, S. A1-A80, 1975.
- [187] SCHUT, G.H.: Evaluation of some interpolation methods. Proceedings of the Symposium of the ISP, Commission III, Stuttgart 2.-6.9.1974. DGK, Reihe B, Heft Nr. 214, S. 160-170, München 1975.

- |188| SCHUT, G.H.: Review of interpolation methods for digital terrain models. XIII Congress of the ISP, Commission III, invited paper, Helsinki 1976.
- |189| SCHWEBEL, R.: Neue Instrumente zur Digitalisierung von photogrammetrischen Modellen. BuL 39, S. 48-54, 1971.
- |190| SCHWIDEFSKY, K., ACKERMANN, F.: Photogrammetrie. Teubner-Verlag, Stuttgart 1976.
- |191| SECKEL, H.: Symposium der FIG über Landinformationssysteme. AVN 86, S. 13-16, 1979.
- |192| SEELE, W.: Raumordnerische Aspekte und Perspektiven im Vermessungswesen. Bericht über Referate und Podiumsdiskussion am 26.9.1974. ZfV 99, S. 536-543, 1974.
- |193| SILAR, F.: Das digitale Geländemodell - Theorie und Praxis. Vt 20, S. 327-329, 1972.
- |194| SIMA, J.: Prinzipien des ČS digitalen Geländemodells. Vt 20, S. 48-51, 1972.
- |195| SPEIGHT, J.G.: Landform pattern description from aerial photographs. Photogrammetria, Vol. 32, S. 161-182, 1977.
- |196| STANGER, W.: Erfahrungen mit dem Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und Ergebnisse. Numerische Photogrammetrie von F. Ackermann, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5, S. 255-282, 1973.
- |197| STANGER, W.: Automatische Herstellung einer Gefällstufenkarte. Société Française de Photogrammetrie, Bulletin No. 57, S. 34-41, 1975.
- |198| STANGER, W.: Erfahrungen mit dem Stuttgarter Höhenlinienprogramm. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 1, S. 113-130, 1976.
- |199| STANGER, W.: The Stuttgart Contour Program SCOP - Further Development and Review of its Application, XIII Congress of the ISP, Commission III, presented paper, Helsinki 1976.
- |200| STEGMANN, A.: Die Anwendung des Lochkartenverfahrens bei der Flurbereinigung in Baden-Württemberg. ZfV 83, S. 416-424, 1958.
- |201| STEGMANN, A.: Die Lage in der Flurbereinigung. ZfV 85, S. 478-481, 1960.
- |202| STEPHANI, M.: Arbeitskreis "Numerische Photogrammetrie". BuL 43, S. 116-117, 1975.
- |203| STERN, H.: Der häßliche Weinberg. GEO Nr. 10, S. 130-156, 1979.
- |204| STEUER, R.: Das Flurbereinigungs-gesetz, Kommentar. C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München und Berlin 1967.
- |205| STEWARDSON, P.B., KRAUS, K., GSELL, I.C.: DACS - Digital Automatic Contouring System. XII Congress of the ISP, Commission IV, presented paper, Ottawa 1972.
- |206| STRAUSS, R.: Wiesbadener Topographisches Zeichenprogramm. CAD-Bericht "Das digitale Geländemodell". Gesellschaft für Kernforschung MBH Karlsruhe, S. 129-141, 1976.
- |207| STRÖBELE, H.: Manuelle Ableitung von Gefällstufen aus Höhenlinien und Vergleich der Ergebnisse mit Gefällstufen, die nach anderen Methoden gewonnen wurden. Unveröffentlichte Studienarbeit am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 1974.
- |208| STRÖSSNER, G.: Aufgaben und Probleme der Flurbereinigung heute. ZfV 101, S. 339-346, 1976.

- [209] Stuttgarter Zeitung: Wie der Wandel von der Agrar- zur Industriegesellschaft. StZ vom 26.11.1976, S. 15.
- [210] Stuttgarter Zeitung: Flurbilanz soll Entscheidungshilfen für die künftige Landesplanung liefern. StZ vom 15.12.1976.
- [211] Stuttgarter Zeitung: Flurbilanz bis Ende 1978. StZ vom 15.3.1977.
- [212] Stuttgarter Zeitung: Auch dem Weinbaupräsidenten blutet das Herz. StZ vom 14.10.1977, S. 6.
- [213] SVVK-Kommission "Mehrzweckkataster": Von der Grundbuchvermessung zum Landinformationssystem. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 77, S. 258-265, 1979.
- [214] TORLEGÅRD, K.: Digital Terrain Models - General Survey and Swedish Experiences. Bul 40, S. 21-30, 1972.
- [215] VESTER, F.: Neuland des Denkens - Vom technokratischen zum kybernetischen Zeitalter. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1980.
- [216] VÖLKER, W.: Neue Verfahren für die Massenermittlung. CAD-Bericht 126, Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 195-257, 1979.
- [217] WAHL, E.: Erfassung und Verarbeitung von Daten im Bereich des Landesamts für Flurbereinigung und Siedlung Baden-Württemberg. ZfV 93, S. 494-502, 1968.
- [218] WAHL, E.: Die Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung in der Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg. DGK, Reihe B, Heft Nr. 216, S. 145-153, München 1976.
- [219] WEBER, W.: Datenstrukturen für topographische Datenbanken. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Sonderheft Prof. Dr.-Ing. Herbert Knorr zum 65. Geburtstag, S. 141-156, 1975.
- [220] WEBER, W.: Ein kartographisches Datenbanksystem. DGK, Reihe B, Heft Nr. 208, Verlag des Instituts für Angewandte Geodäsie, Frankfurt am Main 1975.
- [221] WEBER, W.: Einige kartographische Anwendungen der digitalen Bildverarbeitung. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Nr. 72, S. 103-122, 1977.
- [222] WEBER, W.: Rechnergestützte Landkartenherstellung. ZfV 104, S. 1-13, 1979.
- [223] WEISER, G.: Geleitwort zu "Fragen des Artenschutzes in Baden-Württemberg". Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg, Heft 11, herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 1978.
- [224] WILD, E.: Interpolation with weight-functions - a general interpolation method. XIV Kongreß der ISP, Kommission III, presented paper, Hamburg 1980.
- [225] WILD, E.: Interpolation mit Gewichtsfunktionen. Dissertation am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, in Vorbereitung.
- [226] WINDHOLZ, G.: Gezielte Landschaftsgestaltung mit Hilfe des digitalen Geländemodells. AVN 85, S. 108-112, 1978.
- [227] WOLF, D.: Automatisierung des Liegenschaftskatasters im Hinblick auf ein grundstücksbezogenes Informationssystem. ZfV 97, S. 49-56, 1972.
- [228] WOLF, F.-M.: Zweckmäßigkeit von digitalen Geländemodellen im Straßenwesen. CAD-Bericht 126, Kernforschungszentrum Karlsruhe, S. 51-63, 1979.

- | 229 | WOLF, H.: Prädiktion und Punktausgleichung. ZfV 94, S. 165-169, 1969.
- | 230 | WOLF, H.: Die Sonderfälle der diskreten Kollokation. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie 65, S. 132-138, 1977.
- | 231 | WOLF, H.: Multiquadratische Methode und Kollokation. AVN 88, S. 89-95, 1981.
- | 232 | ZARZYCKI, J.M.: Experience with the automated contouring by Gestalt Photomapper GPM-2 for production of 1:50 000 maps. XIII Congress of the ISP, Commission IV, presented paper, Helsinki 1976.
- | 233 | ZIPPELIUS, K.: Die digitale Flurkarte als Bestandteil eines automatisierten Liegenschaftskatasters. Bayer. Berichte aus der Flurbereinigung 21, S. 9-19, 1975.
- | 234 | ZIPPELIUS, K.: Die digitale Flurkarte als Bestandteil eines automatisierten Liegenschaftskatasters. ZfV 100, S. 35-42, 1975.
- | 235 | ZIPPELIUS, K.: Aufgaben, Organisation und Entwicklung der Vermessung in der Bayer. Flurbereinigung. AVN 83, S. 264-270, 1976.
- | 236 | ZIPPELIUS, K.: Neue Anwendung analytischer Auswertegeräte in der Flurbereinigung. Vorträge der 37. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart vom 24.-28.9.1979. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 6, S. 85-98, 1980.
- | 237 | ZUMOFEN, G., LEONI, M.: Neue Programmsysteme zur Berechnung und Darstellung von Isolinien mit Hilfe von Kleincomputern. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 75, S. 189-194, 1977.

LEBENS LAUF

Wilhelm S T A N G E R

24. März 1943 geboren in Stuttgart
Vater: Adolf Stanger, Mutter: Charlotte Stanger
- 1949 - 1953 Besuch der Volksschule in Leinfelden
- 1953 - 1962 Besuch des Gymnasiums in Stuttgart-Vaihingen,
Reifeprüfung 1962
- 1962 Halbjähriges Vorpraktikum beim Stadtmessungsamt
der Stadt Stuttgart
- 1962 - 1966 Studium der Geodäsie an der Technischen
Hochschule Stuttgart,
Diplom-Hauptprüfung 1966
- 1967 - 1968 Grundwehrdienst bei der Bundeswehr
- 1968 - 1970 Vorbereitungsdienst für den höheren vermessungs-
technischen Verwaltungsdienst beim Landesver-
messungsamt Baden-Württemberg,
Große Staatsprüfung 1970
- 1970 - 1971 Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg,
Flurbereinigungsamt Ulm
- 1971 - 1977 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut
für Photogrammetrie der Universität Stuttgart
- ab 1977 Flurbereinigungsverwaltung Baden-Württemberg,
Flurbereinigungsamt Rottweil