

Studienrichtung Vermessungswesen
Technische Universität Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE
MITTEILUNGEN

Heft 39

Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles

von
Wolfgang Rieger

Veröffentlichung des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung

Geowiss. Mitt.
39, 1992

Wien, im Juli 1992

Herausgeber und Verleger: O. Prof. Dr.-Ing. Karl Kraus
Vorstand des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung
der Technischen Universität Wien
A-1040 Wien, Gußhausstr. 27-29

Die Kosten für den Druck wurden aus der ordentlichen Dotation und
aus eigenen Einnahmen des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung
der Technischen Universität Wien getragen.

Druck: Lischkar & Co Ges. m. b. H.
1120 Wien

Auflage: 500 Stück

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Verfahren zur Ableitung der Gefällsrichtung sowie der Tal- und Kammstruktur eines Geländes aus einem digitalen Höhenmodell (DHM) mit regelmäßigem Rechteckraster vorgestellt. Eine Methode zum automatischen Auffinden von Flußnetzen und Einzugsgebieten wird praktisch erprobt.

Zunächst werden die wichtigsten Begriffe und Zusammenhänge erklärt. Im nächsten Abschnitt wird die Simulation des idealisierten Wasserabflusses im Geländemodell als ein Verfahren zur Bestimmung des Flußnetzes vorgestellt. Einzugsgebiete werden zu den Flußstücken definiert und mittels Flutens des Geländes markiert. Zur Verbesserung des Verfahrens kommt eine gewichtete Zuordnung der Rastermaschen zu den Einzugsgebieten zum Einsatz ("Abflußanteilswerte").

Der Behandlung der Mulden ist ein eigener Abschnitt gewidmet. Insbesondere werden Verfahren zur Herstellung eines muldenfreien digitalen Höhenmodelles als Grundlage der Flußlinien- und Einzugsgebietsermittlung entwickelt.

Weiters werden Methoden zur Berechnung von Falllinien untersucht. Das Falllinienvektorfeld als Darstellungsform des Geländes wird als ein Modul zum Programmsystem SCOP eingerichtet.

Eine Pyramidenstruktur der DHM-Daten wird als eine sehr elegante und effektive Art der Bearbeitung sehr großer Modelle einerseits und für die Bearbeitung von Modellen in unterschiedlichen Maßstäben andererseits vorgeschlagen.

Im Anhang wird eine Programmumgebung beschrieben, die speziell für die Entwicklung und das Testen von Algorithmen mit Rasterdaten erstellt wurde. Schwergewicht lag dabei auf der leichten Erweiterbarkeit, einer hohen Flexibilität und der Möglichkeit, komplexe Abläufe in sogenannten Prozeduren zusammenzufassen.

Abstract

In this treatise possibilities are tested to extract hydrologically interesting basic terrain features from a digital terrain model (DTM) based on a regular rectangle grid. A method for the automated derivation of river networks and basin delineation as well as the derivation of slope vectors is practically proved.

At first the main concepts and terms are discussed. The next part introduces summing up of the water flow as a method to obtain the river network. Catchment areas are defined for river sections (between two neighbouring nodes) and found by "flooding" the DTM with regard to their weighted affiliation to the river sections.

Pit removal is an own task discussed in the next section. Methods are developed that allow for the derivation of a model without pits. These model is then used for obtaining river networks and delineating basins.

Following, methods are tested to calculate slope vectors. The slope vectors array is implemented within the DTM program package SCOP. It allows for special graphic representations of the terrain.

A pyramide structure of the DTM-data is proposed as a very elegant and effective method for working with very large models as well as for working with a DTM at pretty different scales.

In the appendix a developing environment is described, that has been developed especially for developing and testing algorithms with raster data. Emphasis was put on the ease of enhancement, high flexibility and the possibility to allocate complex operations within so-called procedures.

II

Vorwort

Ich bin der Herr dein Gott, der ich dich ... aus der Knechtschaft geführt habe. Du sollst keine anderen Götter haben neben mir.

Du sollst dir kein Bildnis noch irgendein Gleichnis machen, weder von dem, was oben im Himmel, noch von dem, was unten auf Erden, ..., ist: Bete sie nicht an und diene ihnen nicht!

(Aus: "Die Bibel" nach der Übersetzung M. Luthers, Stuttgart 1985. Ausschnitt aus dem 2. Buch Mose, Kap. 20, Verse 2-5)

Ich möchte eine wissenschaftliche Arbeit nicht beginnen, ohne innezuhalten, um auf Gott zu hören, der der Schöpfer aller Dinge ist. Er ist es, der uns alles gegeben hat, das Leben mit allem, was dazu gehört, den Verstand und die Fähigkeit zu denken und wissenschaftlich zu arbeiten. Er ist es, der all das erfunden, geschaffen und konstruiert hat, worüber sich Generationen von Wissenschaftlern in aller Welt den Kopf zerbrochen haben und zerbrechen. Er ist es, der uns warnt, Ihn nicht zu vergessen. Und Er ist es, der uns aus jeglicher Sklaverei, aus jeglicher Knechtschaft befreien kann und will, wenn wir es zulassen. Nur wenn wir Ihm dienen, sind wir frei. Denn Er allein weiß, was wir brauchen, und Er will das Beste für uns - nicht das Gute, sondern das Beste.

Gott warnt uns, daß jedes Bildnis und Gleichnis die Gefahr in sich birgt, es anzubeten und ihm zu dienen. Gerade die Wissenschaft, die ja davon lebt, daß wir die beobachtbaren Dinge in Modellen zu erfassen versuchen, ist ein gutes Beispiel für diese Gefahr und die Aktualität dieser Warnung.

Längst ist die Wissenschaft in verschiedensten Formen ein fester, nicht mehr wegzudenkender Bestandteil unseres Lebens geworden. Die Errungenschaften, die sie uns im täglichen Leben brachte, sind oft sehr angenehm. Die Folgen wissenschaftlichen Arbeitens haben unser Leben in allen Bereichen grundlegend verändert und geprägt. Aber sie ist seit langem kein hehrer König mehr, sondern sie ist ein erbarmungsloser Tyrann geworden. Ich will dies an einigen Beispielen aufzeigen.

Jeder Staat, der international nicht auf der Strecke bleiben will, der mitmischen will im wirtschaftlichen und politischen Weltgeschehen, muß einen beträchtlichen Teil seines Bruttosozialproduktes in die Forschung investieren. Niemand kann es sich auf die Dauer leisten, aus diesem Teufelskreis auszubrechen.

Es gibt für die Wissenschaft keine Grenzen. Alles, was machbar und finanzierbar ist, wird erforscht. Ob es uns mehr nützt oder mehr schadet, ob es überhaupt notwendig ist, interessiert dabei ebenso wenig wie die Frage, ob es ethisch oder moralisch vertretbar ist, anders gesagt, ob es vor Gott recht ist. Aus "wissenschaftlichen Gründen" ist alles erlaubt, "wissenschaftliches Interesse" kann jedes Tun des Menschen rechtfertigen und unter dem Titel "Freiheit der Wissenschaft" fallen alle Grenzen und Schranken.

Kein Mensch kann diese Entwicklung aufhalten. Niemand kann bremsen oder lenken. Niemand hat die Macht, eine unglückliche Entwicklung der Forschung unmöglich zu machen. Die Wissenschaft ist wie ein eigenständiges Wesen geworden, und die Menschheit hängt an ihrem Zügel, ohne die geringste Möglichkeit zu haben, irgendwie zu steuern. Wir werden einfach mitgerissen.

Wer kann sagen, daß wir der Wissenschaft nicht dienen? Die Sprache selbst, die sehr feinfühlig auf die unterschiedlichsten Entwicklungen reagiert, liefert den schlüssigsten Beweis: Wer kennt nicht die vielen Nachrufe auf große Wissenschaftler, in denen sie unverhohlen gepriesen wurden als Menschen, die "ihr Leben ganz im Dienste der Wissenschaft verbrachten"?

Die Gefahr liegt aber nicht nur im Dienen, sondern auch im Anbeten. Anbeten - nur Gott ist es wert, angebetet zu werden. Nur Er ist es wert, daß wir Ihn um Hilfe bitten. Nur Er hat die Kraft und auch die Macht, uns immer und wirklich zu helfen. Nur Er hat die Liebe, und nur Er kennt uns so gut, daß Er immer das Beste für uns Menschen tun kann und will - auch wenn wir Menschen oft nicht erkennen, daß sein Tun das Beste für uns ist.

Die Wissenschaft - und in ihrem Gefolge die Technik - hat uns nicht nur Angenehmes gebracht. Angesichts rasanter zerstörender Prozesse verschiedenster Art, die teilweise globales Ausmaß angenommen haben, angesichts von Waffenarsenalen, die die gesamte Menschheit viele Male zu vernichten imstande sind, angesichts eines Lebensstils in den Industrieländern, der die Menschen auf Basis reiner Lustbefriedigung in Lieblosigkeit, Einsamkeit und Sinnlosigkeit treibt, angesichts himmelschreiender Ungerechtigkeiten zwischen reichen und armen Teilen der Welt, angesichts all dieser und vieler anderer Probleme kann die Art und Weise, wie wir Wissenschaft betreiben, nicht mehr kritiklos hingenommen werden. Und es ist wieder Gott, der uns den Rettungsanker hingeworfen hat, der uns aus unserer Misere herausholen will: Ihm sollen wir vertrauen, Ihn um Hilfe bitten. Wir sollen endlich einsehen, daß Menschen die Probleme niemals dauerhaft gelöst haben, ja, daß gut erscheinende Lösungen oft langfristig gesehen die Lage verschlechtern. Wir sollen einsehen, daß wir das Überleben der Menschheit nicht im Griff haben - und schon gar nicht mit unkontrollierter Wissenschaft. Einsehen, daß wir versagt haben, damit wir umkehren zu Ihm, der allein alle Probleme lösen kann.

Aber wir neigen viel eher dazu, jetzt erst recht all unsere Hoffnung auf Wissenschaft und Forschung zu stützen. Wir wollen aus der Geschichte nicht lernen, daß alle Wissenschaft neben Verbesserungen immer auch zu Verschlechterungen beigetragen hat. Und, Hand auf's Herz, erhoffen wir nicht wirklich, daß "die Wissenschaft irgendwann unsere Probleme schon lösen wird"? Das ist Anbetung in Reinform - und davor warnt Gott uns eindringlichst. Denn nur Er hat die Macht, uns aus jeder Sklaverei zu führen, und nur Er ist auch stärker als die Zwänge, die zur grenzenlosen Wissenschaft treiben. Ohne seine Hilfe bleibt der Mensch ein Sklave der Wissenschaft, einer Wissenschaft, die noch nie Erbarmen mit uns hatte. Nur wenn die Menschheit sich unter Gottes Führung stellt, kann die Wissenschaft das werden, was sie eigentlich sein sollte: Ein Diener des Menschen. Und wieviel Segen könnte sie uns dann bringen, wenn eine starke und liebende Hand lenkt!

Bezogen auf die Geowissenschaften will ich noch einen Gedanken aufbringen: Das eingangs zitierte Bibelwort erinnert mich auch daran, daß alle unsere Modelle nicht die Dinge selbst sind, die wir zu beschreiben versuchen. Jedes Modell ist und bleibt unvollständig, berücksichtigt nur einen Teilaspekt der Wirklichkeit und ist fehlerhaft. Es besteht die Gefahr - und die Computertechnik hat sehr viel dazu beigetragen -, daß wir das Modell mit der Wirklichkeit verwechseln.

Auf Grund der zunehmenden Automatisierung durch die Computertechnik sind gerade die Geowissenschaften noch in einem weiteren Bereich sehr gefährdet: Außerordentlich komplexe Programmsysteme sind in der Lage, aus vorgegebenen Daten die unterschiedlichsten Aspekte herauszuarbeiten. Dabei taucht aber niemals die Frage auf, ob die Ausgangsdaten die gezogenen Schlüsse überhaupt zulassen. Mir ist zum Beispiel kein Programm bekannt, das sich weigern würde, aus einem Ausgangsdatenmaterial 1:50000 einen Plan 1:100 zu erstellen.

Das Vertrauen in die EDV nimmt immer mehr zu, und ich habe manchmal den Eindruck, daß vor dem Bildschirm das kritische Denken abgeschaltet wird. Es muß die vordringliche Aufgabe der Universitäten und gerade der Geowissenschaften werden, auf die Zusammenhänge der Fehlerlehre

IV

unermüdlich hinzuweisen. Es besteht heute die ernsthafte Gefahr, daß das Wissen um diese Dinge, von Generationen verantwortungsbewußter Wissenschaftler vertieft und überdacht, an der Hürde der EDV scheitert. Und unzählige Computer werden in den Händen schlecht ausgebildeter Benutzer bald aus einer unvorstellbaren Datenmenge alles, was gewünscht ist, produzieren.

Danksagung

Mein Dank im Zusammenhang mit dieser Arbeit geht zuallererst an meine geliebten Eltern, denen ich nicht nur mein Leben, sondern auch eine sehr glückliche Kindheit und Jugend verdanke ebenso wie eine sehr weise und gute Erziehung. Weisheit ist ja die Fähigkeit, Wissen anzuwenden. Sie haben mich immer unterstützt und mir auch zu dieser Arbeit viel Freude und Mut geschenkt.

Mein Betreuer Professor Kraus verdient großen Dank dafür, daß er es als eine sehr wichtige Aufgabe ansieht, Dissertanten größtmöglich zu unterstützen, und ich habe es auch seinem Drängen zu verdanken, daß die Arbeit nunmehr fertig ist. Dank sei ihm auch ausgesprochen für die mustergültige Leitung seines Institutes, für das tiefe Vertrauen, das er in all seine Mitarbeiter hat und für seinen menschlich großartigen Umgang mit ihnen.

Herrn Professor Gutknecht vom Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft danke ich herzlich für seine Bereitschaft, die Zweitbegutachtung der Arbeit vorzunehmen, und für die zahlreichen wertvollen Anregungen, die dazu verhalfen, die Arbeit abzurunden.

Herrn Kager danke ich für seine Anregungen und Gedanken, wengleich die Gespräche mit ihm auch sehr anstrengend sein konnten: Der Flut seiner Ideen konnte ich mich nur durch bewußtes Abblocken erwehren, und vieles, das er vorschlug, mußte unberücksichtigt bleiben. Ebenso danke ich Herrn Behr, der mir seitens der Hydrologie das Verständnis vertiefte, wengleich auch zahlreiche seiner Ideen unberücksichtigt bleiben mußten.

An alle Kollegen geht mein Dank für das angenehme Arbeitsklima, die große Hilfsbereitschaft in kleinen wie in großen Dingen, und für ihre Anregungen, ihr Zuhören, ihre Anteilnahme und ihr Verständnis.

Allen Freunden und Bekannten, die mich in jener Zeit durch Gespräche und Taten unterstützt haben, die Verständnis mit meiner knapp bemessenen Zeit hatten und mich immer wieder ermutigten, sei auf diesem Wege ebenfalls mein herzlicher Dank ausgesprochen.

Und schließlich danke ich meinem Gott und Herrn Jesus Christus, der mich mit den Fähigkeiten zu dieser Arbeit ausgestattet hat, dem ich alles verdanke, was ich bin und habe. Er ist mir im Verlaufe der Arbeit auf ganz unvergleichliche Weise begegnet und hat mich aus einer trüben Zeit herausgeholt. Er hat mich unzählige Male ermutigt, weiterzumachen an dieser Arbeit und hat mich allezeit begleitet und mit Seiner Kraft ausgestattet, sodaß ich die mühsame Kleinarbeit mit Freude zu Ende bringen konnte. Es war eine harte, aber schöne Schule, und Dir, Herr, sei aller Dank!

* Diese Arbeit wurde an der Technisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Wien zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen und Definitionen	2
2.1. Das Digitale Geländemodell	2
2.1.1. Allgemeines	2
2.1.2. Definition der Geländeoberfläche aus Rasterpunkten	4
2.1.3. Die Funktionsmodelle - das Mehrschichtenmodell	7
2.2. Darstellung von Linien in Vektor- und Rasterform	8
2.3. Definitionen	10
2.3.1. Begriffe, die im Raster Verwendung finden	10
2.3.2. Begriffe für den Wasserabfluß	11
2.3.3. Geländeformen	12
2.3.3.1. Tal	12
2.3.3.2. Hang	13
2.3.3.3. Kamm	14
2.3.4. Das Einzugsgebiet	14
2.3.5. Mulden und Muldeneinzugsgebiete	16
2.3.6. Flüsse	19
3. Die Ermittlung der Einzugsgebiete und Flußläufe	20
3.1. Schwierigkeiten	20
3.1.1. Schwierigkeiten aus der Rasterdarstellung	20
3.1.1.1. Informationsverlust und Formveränderung	20
3.1.1.2. Lageänderung durch Diskretisierung	21
3.1.1.3. Richtungsänderung durch die Rasterlage	22
3.1.2. Schwierigkeiten bei Anwendung lokaler Verfahren	22
3.2. Die Ermittlung der Flußläufe	25
3.2.1. Das Summationsverfahren	26
3.2.2. Das modifizierte Summationsverfahren	30
3.2.3. Die Bestimmung der Flußläufe	31
3.3. Die Bestimmung der Einzugsgebiete	34
3.3.1. Das Auffüllen des Geländes	34
3.3.2. Auffüllen nach Abflußanteilswerten	36
3.3.3. Ermittlung der Grenzlinien zwischen den Einzugsgebieten	38
3.4. Mulden und Muldeneinzugsgebiete	39
3.4.1. Bestimmen der Mulden durch Auffüllen	40
3.4.2. Absenken der Muldenpfade	41
3.4.3. Anheben der Mulden	43
3.5. Das Verfahren in der Praxis	46
4. Falllinienberechnung im Raster	50
4.1. Berechnung einzelner Falllinien	50
4.2. Das Falllinien-Vektorfeld	52
4.2.1. Allgemeines	52
4.2.2. Implementation im Programmsystem SCOP	53

5. Genauigkeitsüberlegungen	58
5.1. Allgemeines	58
5.2. Genauigkeit abgeleiteter Größen	59
5.2.1. Genauigkeit der Falllinienvektoren	59
5.2.2. Genauigkeit der Neigung	60
5.2.3. Genauigkeit der Exposition	62
5.3. Lagegenauigkeit von aus dem Raster abgeleiteten Linien	64
5.4. Mulden	65
6. Erweiterungen und Ausblick	68
6.1. Bearbeitung beliebig großer Modelle	68
6.2. Überlappende Teilgebiete	68
6.3. Übergabe von Summationswerten über Teilgebiete	69
6.4. Berechnung in Pyramidenstruktur	70
6.5. Anwendung der Verfahren zur Datenerfassung	72
Anhang: Schaffen einer Entwicklungsumgebung	73
A.1. Zweck und Vorgaben	73
A.2. Notwendigkeit	73
A.3. Das Programm MATRIX	74
A.3.1. Programmaufbau	74
A.3.2. Der Befehlsinterpreter	75
A.3.2.1. Allgemeines	75
A.3.2.2. Allgemeine Befehlssyntax	76
A.3.2.3. Deklaration von Befehlen	78
A.3.2.4. Programmstruktur	79
A.3.2.5. Schnittstellen	81
A.3.3. Die Programmsteuereinheit	82
A.3.3.1. Allgemeines	82
A.3.3.2. Arbeitsweise	82
A.3.3.3. Befehle der Programmsteuereinheit	84
A.3.4. Die Variablen	85
A.3.4.1. Allgemeines, Struktur der Variablen	85
A.3.4.2. Verwaltung der Variablen	88
A.3.5. Programm Meldungen	88
A.3.6. Operationen mit Daten	89
A.3.6.1. Operationen der Programmsteuereinheit	89
A.3.6.2. Operationen für die Matrizenbearbeitung	90
A.3.6.3. Graphische Ausgabe	91
Literaturverzeichnis	92
Lebenslauf	95

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag darstellen, Rechenmodelle zu hydrologischen und geomorphologischen Fragestellungen zu liefern. Die vorgestellten Verfahren können Hydrologen bei der Erstellung von komplexen Abflußmodellen ebenso helfen wie Geographen, Kartographen und Photogrammetern bei der Kontrolle und Verbesserung von Grundlagendaten. Insbesondere die Güte der digitalen Höhenmodelle läßt sich unter Heranziehung der Tal- und Kammlinien prüfen.

Die Topographie der Erdoberfläche ist sehr stark mit dem Verhalten und den Eigenschaften des Wassers verbunden. Zur Untersuchung der Geländeoberfläche ist es deshalb vernünftig, auf den Wasserabfluß Rücksicht zu nehmen. Das Ziel der Arbeit ist, aus der Geometrie des Geländes hydrologisch bedeutsame Geländeformen zu erkennen. Dies wird durch die Verwendung eines idealisierten Wasserabflusses erreicht: Einerseits finden nur die Höhenunterschiede im Geländemodell Berücksichtigung; andererseits werden Oberflächenbedeckung, Abflußgeschwindigkeit und Neigung nicht in die Untersuchungen einbezogen, wiewohl die Methoden meistens eine derartige Berücksichtigung gestatten würden. Auch wird eine völlig gleichmäßige Beregnung über das gesamte betrachtete Gebiet angenommen, was für die Ableitung der Formen vollkommen ausreicht.

Da die Fragestellung vor allem in Richtung auf die Ableitung von Gerinnelinien sowie Einzugsgebieten aus der Oberflächenform abzielt, kann bei der Simulation des Wasserabflusses auf die zeitliche Abfolge verzichtet werden. Es wird ein fiktiver Zustand des Wasserabflusses angenommen, der sich bei andauernder, gleichmäßiger Beregnung des gesamten Gebietes ergäbe. Das Gebiet wird hierzu in kleine Flächenelemente unterteilt. Die Beregnung erfolgt je Flächenelement, wobei unterstellt wird, daß das gesamte je Flächenelement durch Beregnung und Zufluß angesammelte Wasser genau dann vollständig abfließt, wenn mit einer Wassereinheit beregnet wird. Diese sehr vereinfachenden Annahmen liefern gute Ergebnisse sowohl in Bezug auf die Geländeform als auch in Bezug auf die Einzugsgebiete und Flußläufe.

Als Geländeoberfläche wird entsprechend den genannten Idealisierungen des Wasserabflusses eine ebenfalls idealisierte Oberfläche ohne Bodenbedeckung und ohne Berücksichtigung der kleinräumigen Geländerauhigkeit angenommen; das Wasser soll überall von höheren zu tieferen Punkten abfließen können. Es wird nur der Oberflächenabfluß behandelt, ein Versickern im Boden sowie der unterirdische Abfluß werden nicht in Betracht gezogen. Dementsprechend ist die Einführung eines sogenannten "muldenfreien" Höhenmodelles notwendig, um den Wasserabfluß rechnerisch auch über Mulden hinweg vornehmen zu können. Es handelt sich hierbei um ein aus rechentechnischen Gründen verändertes Höhenmodell, aus dem alle Mulden entfernt wurden. Damit ist eine geschlossene Bearbeitung des Wasserabflusses möglich.

Die meisten der angewendeten Verfahren lassen sich um die genannten Faktoren erweitern, wenn entsprechende Modelle der Bodenrauhigkeit, Bodendurchlässigkeit usw. verfügbar sind. Die Abflußgeschwindigkeit läßt sich als Funktion der Steilheit und der Bodenbedeckung einbringen. Damit können die Verfahren auch als Grundlage für genauere Simulationen des nicht-idealisierten Wasserabflusses dienen.

2. Grundlagen und Definitionen

2.1. Das Digitale Geländemodell

2.1.1. Allgemeines

Grundlage aller Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit ist ein rechtwinkeliges Rastermodell. Die Punkte werden in einer Matrix abgelegt, sodaß sich die Lagekoordinaten aus der Position in der Matrix ergeben und nur der Höhenwert selbst gespeichert wird. Dieses Modell besitzt eine Reihe von überragenden Vorteilen:

- Die Lageinformation ist implizit gegeben, was eine sehr **kompakte Abspeicherung** der Daten erlaubt: Lediglich die Höhenwerte sind abzulegen.
- Die **Adressierung** innerhalb der Matrix gestaltet sich sehr einfach (Abb. 2-1):

Mit ns, nz Anzahl Spalten / Zeilen in der Matrix,
 is Spalte des aktuellen Punktes (0,1,2, ... $ns-1$)
 iz Zeile des aktuellen Punktes (0,1,2, ... $nz-1$)
 $madr(P)$ Adresse des Punktes innerhalb der Matrix

ergibt sich, wenn die Matrixelemente sequentiell im Speicher abgelegt sind:

$$madr(P) = iz \cdot ns + is$$

Addiert man noch die Adresse des Elementes (0, 0), das ist $aadr(Matrix)$, so erhält man mit der Länge eines Rasterelementes, el , die absolute Adresse von P , $aadr(P)$, in der Form:

$$aadr(P) = aadr(Matrix) + (iz \cdot ns + is) \cdot el.$$

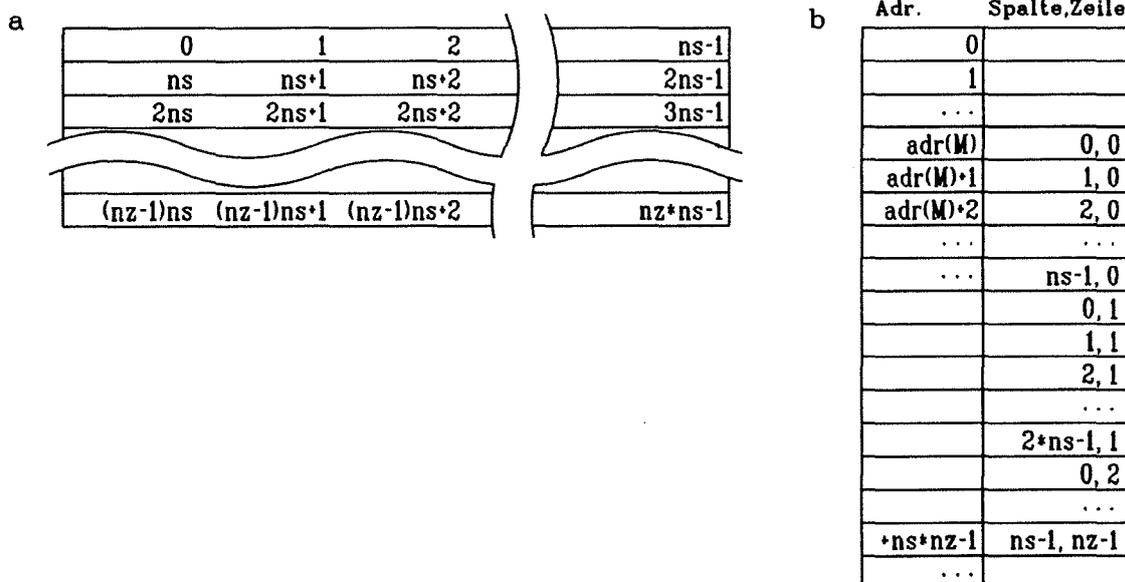


Abb. 2-1: Adressen in der Matrix (a) und Darstellung im Speicher (b)

- Ein weiterer Vorteil besteht in der Einheitlichkeit der **Nachbarschaftsbeziehungen**: Um von einem beliebigen Punkt innerhalb der Matrix zu einem bestimmten Nachbarn zu gelangen, ist unabhängig von der Lage des Punktes immer derselbe Wert ("Offset") zur Punktdresse zu addieren (Abb. 2-2).

	3						
4	A	2				3	
	1				4	B	2
			3			1	
		4	C	2			
			1				

Abb. 2-2: Nachbarschaftsbeziehungen in der Matrix:

$$\text{madr}(\text{Nachbar 1 zu A}) = \text{madr}(A) - ns \cdot el$$

$$\text{madr}(\text{Nachbar 1 zu B}) = \text{madr}(B) - ns \cdot el$$

Leider weisen die reinen Rastermodelle auch eine Reihe von Nachteilen auf, auf deren Auswirkungen später noch näher eingegangen wird. An erster Stelle ist zu vermerken, daß die Willkürlichkeit des Rasters Formen verfälschen, in Extremfällen sogar fast unkenntlich machen kann. Um dies zu umgehen, muß der Raster verdichtet werden, was bei der starren Struktur des Rasters in Bereichen mit gleichmäßiger Oberfläche zu einer erheblichen Redundanz der abgelegten Daten führt. Als weiterer Nachteil ist das Fehlen von Geländekanten zu werten (Aßmus 1976). Zur Umgehung der genannten Nachteile wurden gute Möglichkeiten entworfen, sodaß heute sehr leistungsfähige und qualitativ höchstwertige Geländemodelle mit Rasterstruktur und Geländekanten verfügbar sind, die in der Praxis vielfach erprobt wurden (Aßmus 1976, Stanger 1984, Köstli, Sigle 1986, Toomey 1988).

Als Grundlage der Berechnungen wurde das Programmpaket SCOP herangezogen (Waldhäusl, Molnar 1991). Es handelt sich um ein Softwarepaket, das in Zusammenarbeit der Institute für Photogrammetrie der Technischen Universitäten in Wien und in Stuttgart entwickelt wurde. In die Rasterstruktur kann bei SCOP Vektorinformation in Form von Bruch- und Formlinien (Kraus, 1987) eingebettet werden, wodurch ein qualitativ sehr hochwertiges Geländemodell entsteht. Darüber hinaus bietet SCOP die Möglichkeit, den Raster lokal zu vergrößern, was in Zonen geringerer Geländerauhigkeit den Speicheraufwand erheblich vermindert (Abb. 2-3).

Für die vorliegenden Untersuchungen wird bewußt auf die Verwendung dieser Erweiterungen des reinen Rastermodelles verzichtet und nur der regelmäßige Raster verwendet, was die Berechnungen wesentlich vereinfacht. Auf Möglichkeiten zur Berücksichtigung von lokalen Rasterverdichtungen und Vektorinformation (Bruch- und Formlinien) wird in Kap. 6 näher eingegangen. Hier sei nur noch angemerkt, daß die Einfachheit der Struktur in reinen Rastermodellen die Berechnungen ideal für moderne Höchstleistungsrechner mit Vektor- oder Parallelprozessor-Architekturen zugänglich macht. Durch die beständig sinkenden Kosten für Speicher und die parallel dazu steigenden Kapazitäten wird auch der Nachteil des höheren Speicheraufwandes immer stärker in den Hintergrund gedrängt.

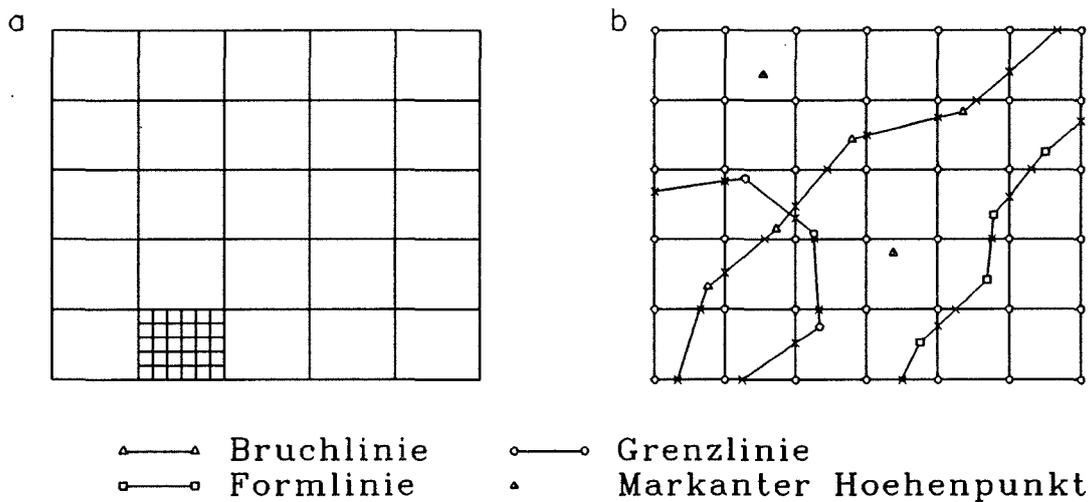


Abb. 2-3: Die Datenstruktur von SCOP: a) Raster der Recheneinheiten, b) Struktur einer Recheneinheit mit Bruch-, Form- und Randlinien und Gitterschnittpunkten.

2.1.2. Definition der Geländeoberfläche aus Rasterpunkten

Die heutzutage verwendeten digitalen Geländemodelle beschreiben die Geländeoberfläche durch Angabe von einzelnen besonderen Punkten. Unabhängig von der Struktur der Geländemodelle besteht daher das Problem, aus einer endlichen Anzahl von Punkten eine Fläche zu rekonstruieren. Über die Fläche zwischen den Punkten ist im Regelfall keinerlei Information verfügbar, sodaß Annahmen getroffen werden müssen. Um hier eine Wiederholbarkeit der Berechnungen zu ermöglichen, fordert Kraus, daß zusätzlich zu den Rasterpunkten die Angabe der Methode zur Berechnung der Flächen zwischen den Punkten ein wesentlicher Bestandteil des digitalen Geländemodell ist (Kraus 1987, S. 198). Die Verwendung eines digitalen Geländemodell umschließt demgemäß immer die Verwendung der im Modell abgelegten Punkte **und** der Funktionen zur Definition der Zwischenflächen (meist handelt es sich hierbei um Interpolationsfunktionen aus den nächstgelegenen Modellpunkten).

Bei der Auswahl der Verfügungen über die Zwischenflächen kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten vorgegangen werden. In einem universell einsetzbaren Geländemodell liegt das Schwergewicht naturgemäß auf kartographisch hochwertigen Höhenlinien und auf einer möglichst schnellen Berechnung der Höhenwerte (siehe z.B. Leberl, 1975). Für hydrologische Belange gelten davon abweichende Forderungen: Die Fläche soll die tatsächlichen Neigungs- und Krümmungsverhältnisse möglichst gut nachbilden und die Falllinien korrekt wiedergeben.

Besonders im regelmäßigen Rastermodell ergeben sich Schwierigkeiten im Bereich von Tälern und Kämmen: Durch die Willkürlichkeit der Rasterlage sind die meisten Tal- und Kammlinien zwischen und nicht genau auf Rasterpunkten angeordnet. Passende Interpolationsverfahren müssen diesem Umstand Rechnung tragen, was die Interpolation aber sehr aufwendig gestaltet, da nur Interpolation höherer als linearer Ordnung dies ermöglicht (Abb. 2-4).

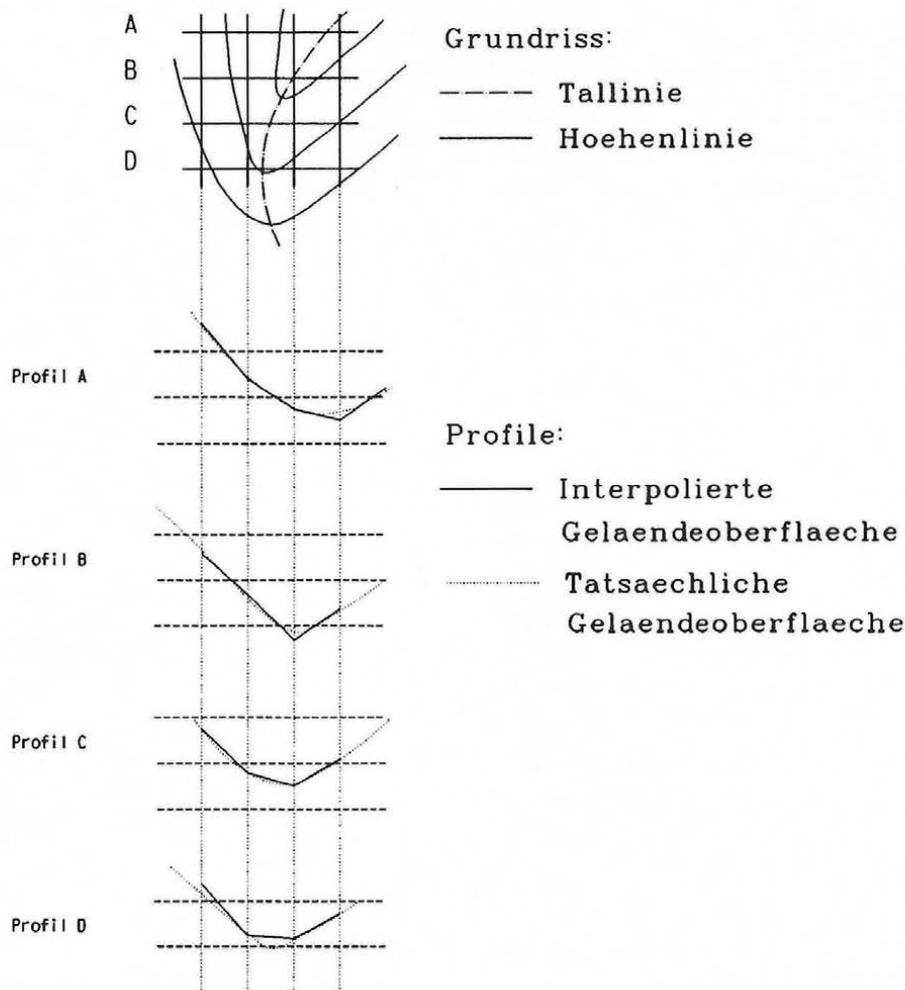


Abb. 2-4: Definition der Fläche zwischen den Stützpunkten des Rastermodelles

Da das Wasser über die Fläche abfließt, ist es notwendig, eine flächige Darstellung des Geländes heranzuziehen. Es soll nun ein Ansatz gezeigt werden, der auf die Interpolation der Fläche zwischen den Rasterpunkten verzichtet; solcherart werden die große Schwierigkeit der Definition geeigneter Flächen (die doch keine für diese Zwecke befriedigende Rekonstruktion der tatsächlichen Oberfläche ergeben) sowie der dazu nötige hohe Berechnungsaufwand umgangen, wenngleich um den Preis einer geringeren Genauigkeit (vgl. hierzu die generellen Genauigkeitsüberlegungen, Kap. 5).

Der hier gewählte Ansatz ersetzt die Oberfläche durch diskrete Flächenelemente. Die Höhe jedes Rasterpunktes wird als die mittlere Höhe einer ihn umgebenden Rastermasche angesehen. Nunmehr wird nicht versucht, in der Rastermasche die Oberfläche nachzubilden, sondern es werden Beziehungen zwischen benachbarten Maschen auf Basis ihrer Höhendifferenz und unter Berücksichtigung der Neigung definiert. Die Berechnungen gestalten sich sehr einfach und sind leicht zu schematisieren.

Abbildung 2-5 zeigt die Anordnung und läßt erkennen, daß dieses Modell auch gewonnen werden kann, indem man den Ausgangsraster um je eine halbe Rasterweite längs der beiden Achsen verschiebt und die ursprünglichen Rasterpunkthöhen als Höhen der neuen Rastermaschen auffaßt.

Die Darstellung bringt eine Vergrößerung gegenüber der punktwisen Darstellung, was zu einem Genauigkeitsverlust führt. Die lagemäßige Versetzung von Punkten übersteigt jedoch in der Regel eine halbe Rasterweite nicht. Andererseits wird die Definition des Wasserabflusses wesentlich erleichtert und, wie noch gezeigt wird, die Berechnung der Täler und Einzugsgebietsgrenzen sehr elegant und einfach möglich.

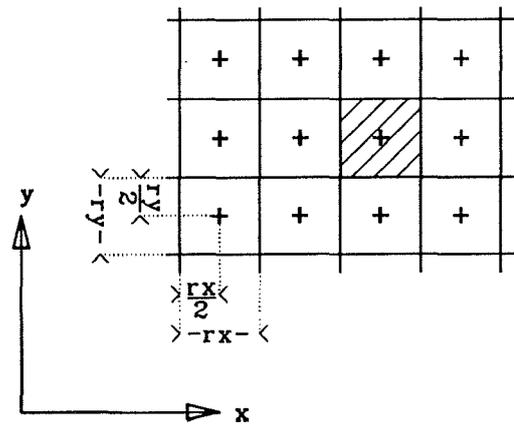


Abb. 2-5: Definition der Rastermaschen aus den Rasterpunkten des digitalen Geländemodells

Abbildung 2-6 zeigt ein Blockbild der hier gewählten Flächendefinition. Man beachte, daß keine geschlossene Fläche definiert ist, sondern Flächenelemente, zwischen denen in der Folge Beziehungen erklärt werden. Diese Flächendarstellung erlaubt eine einfache Formulierung von Übergängen zu den Nachbarn. Das Wasser kann durch die 4 Seiten zu den Nachbarzellen überfließen, wobei die Seitenlängen der Grenzen sowie die Entfernung zu jeder Nachbarzelle gleiche Größe aufweisen (im Quadratraster). Somit ist eine völlig gleichmäßige Definition unabhängig von der Richtung möglich, was eine weitere Vereinfachung mit sich bringt. Dieser gleichmäßige Übergang zur Rastermasche ist übrigens nur in Rastern aus gleichseitigen Dreiecken, Quadraten oder aus gleichseitigen, regelmäßigen Sechsecken möglich (Abb. 2-7).

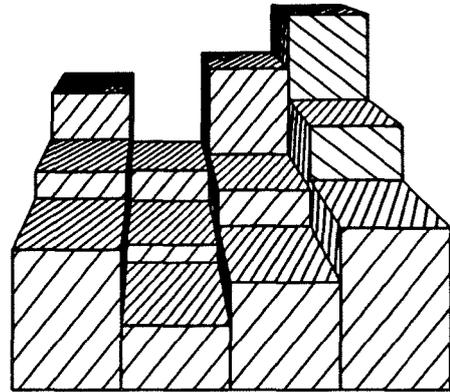


Abb. 2-6: Blockbild der Flächendefinition

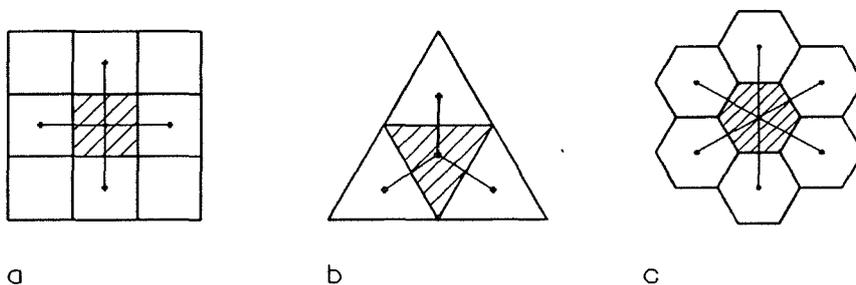


Abb. 2-7: Regelmäßige Rastermaschenanordnungen mit gleichmäßigem Übergang zu den Nachbarzellen

In den weiteren Untersuchungen kommt diese Art der Definition zur Anwendung. Es werden Möglichkeiten gezeigt, den Abfluß zu simulieren und Falllinien sowie Einzugsgrößen abzuleiten. Weiters ist diese Methode eng verwandt mit der Darstellung in der digitalen Bildverarbeitung, weswegen aus jenem Bereich zahlreiche Algorithmen übernommen werden können.

2.1.3. Die Funktionsmodelle - das Mehrschichtenmodell

Legt man zum digitalen Höhenmodell weitere Modelle identer Struktur an, wobei anstelle der Höhenwerte beliebige andere Daten abgelegt werden, so entstehen sogenannte "Funktionsmodelle". Diese lassen sich zu einem "Mehrschichtenmodell" zusammenfassen (Abb. 2-8), vgl. auch Köstli, Sigle (1986) und Waldhäusl, Molnar (1991).

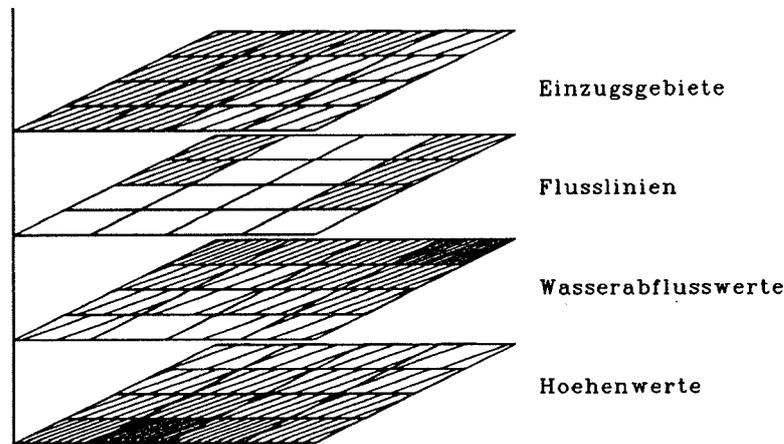


Abb. 2-8: Mehrschichtenmodell

Die abgelegten Daten können in den einzelnen Funktionsmodellen von völlig unterschiedlicher Art sein. Beispiele von Funktionsmodellen, die im Verlaufe dieser Arbeit auftreten, sind:

- Höhenmodell:* Die mittleren Höhen der Rastermaschen.
- Wasserabflußmodell:* Die Menge des durch eine Rastermasche fließenden Wassers.
- EZG-Modell:* Kodiertes Modell mit der Nummer des Einzugsgebietes, dem die jeweilige Rastermasche angehört.
- Schummerungsmodell:* Es wird ein Helligkeitswert in Abhängigkeit des Einfallswinkels der angenommenen Beleuchtung abgelegt.

Die Adressierung eines Flächenelementes ist in allen Funktionsmodellen - also innerhalb jeder Matrix - gleich. Lediglich die absolute Adresse ändert sich in Abhängigkeit von der Anfangsadresse der Matrix und der Länge eines einzelnen Elementes.

2.2. Darstellung von Linien in Vektor- und Rasterform

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind Linien: Die Einzugsgebiete werden durch ihre Grenzlinien angegeben, die Flüsse ergeben sich in Form ihrer Achsen. Die Darstellung dieser Linien kann in Vektor- oder in Rasterform erfolgen.

In Vektorform werden die genannten Linien üblicherweise als Polygone dargestellt. Entsprechend der Hierarchie in Flußnetzen können die Flüsse und Grenzen in einer passenden Struktur hierarchisch gegliedert sein (Behr, Hochstöger, 1989).

Erfolgen die Berechnungen im Raster, so fallen die Linienelemente als kodierte Rasterelemente an. Es entsteht eine Matrix, die lagemäßig dieselbe Struktur wie die Matrix mit den Höhenwerten besitzt; anstelle der Höhenwerte wird aber jetzt die Information abgelegt, ob eine Rastermasche im Verlaufe einer Linie liegt oder nicht (Abb. 2-9).

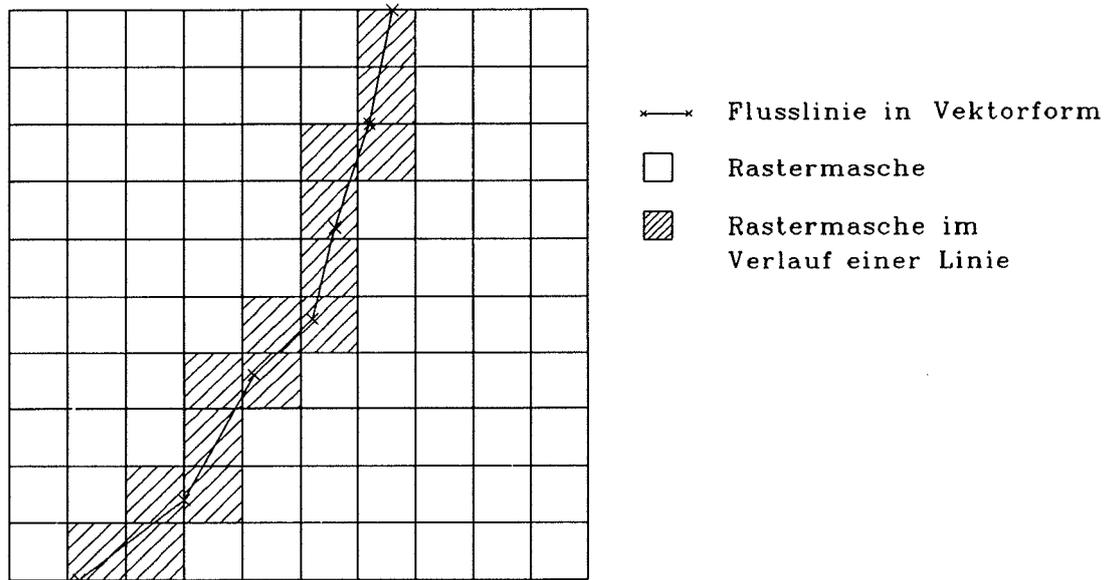


Abb. 2-9: Linie in Raster- und Vektorform

Diese sogenannte "kodierte Darstellung" erlaubt, ebenso wie die Vektorform, eine Gliederung in Linien verschiedenster Art, indem für unterschiedliche Liniensegmente unterschiedliche Codes vergeben werden. Darüber hinaus können bei der Rasterdarstellung auch Flächen in ebenderselben Weise kodiert werden.

Abbildung 2-10 zeigt ein Flußnetz, in dem Einzugsgebietsgrenzen mit der Nummer -1, Flußknotenpunkte mit 1, Flußstücke mit Nummern von 2 aufwärts und die zugehörigen Einzugsgebiete mit entsprechender negativer Nummer angegeben sind.

Eine Umrechnung von der einen in die andere Form ist verhältnismäßig einfach möglich. Insbesondere ist die sogenannte Vektor-Raster-Konversion, also die Kodierung einer als Polygon gegebenen Linie in eine Matrix, völlig unproblematisch (vgl. Abb. 2-9). Die Umwandlung in der anderen Richtung ist bei der in Abbildung 2-10 gezeigten durchkodierte Form ebenfalls einfach, wenn die Voraussetzung erfüllt ist, daß die Linien immer nur eine Rastermasche als Breitenausdehnung besitzen. In der vorliegenden Arbeit werden daher als Ergebnis nur Linien der Breite von höchstens einer Rastermasche akzeptiert.

Die sich aus der Umrechnung in Vektorform ergebenden Polygone weisen eine Strukturierung entsprechend dem Raster auf und sind sehr stark von der Rasterlage abhängig, wie aus Abb. 2-11 ersichtlich.

Eine genaue Rekonstruktion der Linie, als Inversion der Raster-Vektor-Konversion aus Abb. 2-9, ist nicht möglich. Daher muß entweder nachfolgend ein Glättungsalgorithmus angewendet werden, der insbesondere die Treppenkurven, die bei Verlauf der Linie schräg zum Raster entstehen, zu

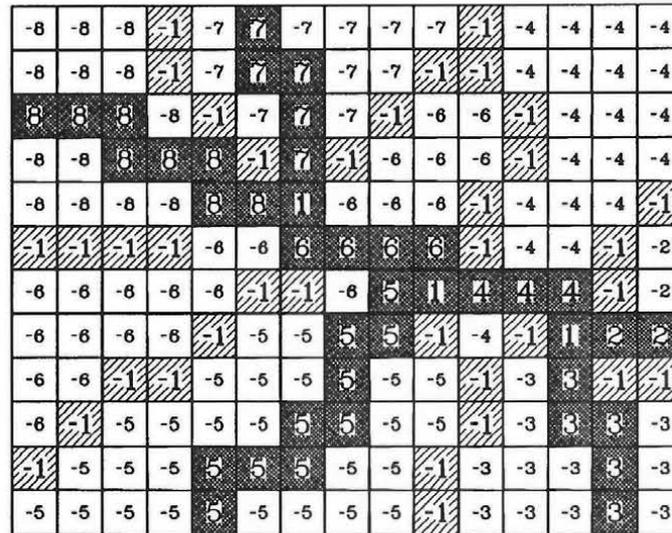


Abb. 2-10: Kodierte Darstellung von Einzugsgebieten und Flüssen

glätten in der Lage ist; oder es muß zusätzliche Information zum Verlauf der Linie herangezogen werden, wie dies beispielsweise bei Flüssen und Einzugsgebietsgrenzen möglich ist: In diesem Fall kann die Höheninformation verwendet werden, um die Linien entlang der Talböden (Flüsse) oder entlang der Kämme (Grenzen) zwischen den markierten Rastermaschen zu interpolieren. Eine geeignete Verfügung über die Interpolationsfläche wird durch die nunmehr gute Kenntnis der Tal- bzw. Kammrichtung wesentlich erleichtert (z. B. eine zylindrische Fläche mit genähert bekannter Achsrichtung).

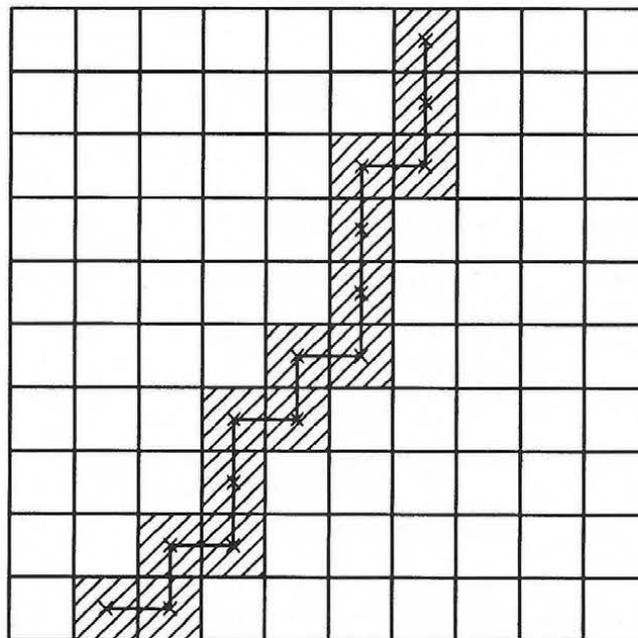


Abb. 2-11: Vektorisierung einer im Raster kodierten Linie

Auf die Raster-Vektor-Konversion wird nicht näher eingegangen; es sei auf die einschlägige Literatur, besonders im Bereich der digitalen Bildverarbeitung, hingewiesen.

2.3. Definitionen

Es folgen Definitionen der wichtigsten Begriffe, die in dieser Arbeit in bestimmter Form verwendet werden.

2.3.1. Begriffe, die im Raster Verwendung finden

Das **Untersuchungsgebiet** ist das Gebiet, innerhalb dessen die Berechnungen bzw. Untersuchungen durchgeführt werden sollen. In diesem Gebiet müssen Höhendaten vorliegen. Auszuschließende Teilgebiete können durch einen bestimmten Wert gekennzeichnet werden, der niemals als Höhenwert auftritt.

Mit **Punkt** wird im allgemeinen ein **Rasterpunkt** bezeichnet. Da nur reine Rastermodelle betrachtet werden, ist ein Punkt im Verlaufe einer Linie ebenfalls ein Rasterpunkt (erst bei der Raster-Vektor-Konversion und einer nachfolgenden oder unmittelbaren Interpolation von Zwischenpunkten oder einer Glättung werden Linien unabhängig vom Raster abgelegt, daher fallen nach diesem Schritt die Linien- und Rasterpunkte auseinander).

Als **Rastermasche**, kurz **Masche**, wird hier das Rechteck bezeichnet, das sich bei Verschiebung des Rasters in den Achsrichtungen um jeweils die halbe Rasterweite ergibt. Der innen liegende Rasterpunkt ist Mittelpunkt dieser Masche.

Als **Standpunkt** gilt immer der Punkt oder die Rastermasche, in dem oder in der eine Untersuchung oder Berechnung durchgeführt wird.

Nachbarpunkte, kurz **Nachbarn**, sind Rasterpunkte oder Rastermaschen in einer Umgebung des Standpunktes. Die Entfernung der Nachbarn vom Standpunkt gibt die **Ordnung** der Nachbarn an. Es handelt sich hierbei um die Anzahl der Rasterweiten zwischen Standpunkt und Nachbarpunkt, wobei in der Regel aufgerundet wird. So gibt es für jeden Punkt 4 Nachbarn der Ordnung 1, weitere 4 der Ordnung 1,5 (exakt $\sqrt{2}$), 4 Nachbarn der Ordnung 2, 8 Nachbarn der Ordnung 2,3 (oder 2,5 in Abb. 2-12)

und so fort. Allgemein gilt, daß mit der Ordnung x eine Ellipse um den Standpunkt gelegt wird, deren Hauptachsen in den beiden Koordinatenachsen liegen und die Länge von x -mal der jeweiligen Rasterweite haben. Alle Punkte, die innerhalb dieser Ellipse liegen, sind Nachbarn der Ordnung kleiner gleich x (Abb. 2-12).

Durch die Verwendung einer Ellipse ist die Definition unabhängig vom Verhältnis der beiden Rasterweiten zueinander. Für Rastermaschen gilt dieselbe Definition, wobei als Bezugspunkt der Maschenmittelpunkt herangezogen wird (Abb. 2-13).

Wenn von **kleinräumigen** und **großräumigen Formen** die Rede ist, so gilt dies immer bezogen auf die Rasterweite; kleinräumige Formen lassen sich aus der Betrachtung der Nachbarn bis zur Ord-

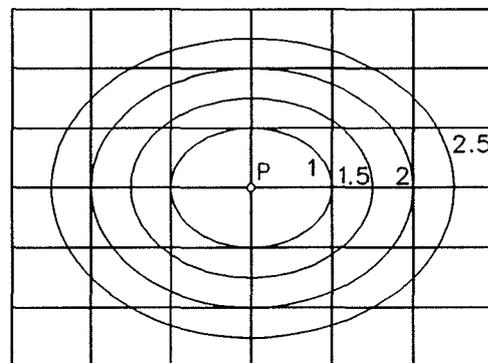


Abb. 2-12: Ordnungen von Nachbarpunkten

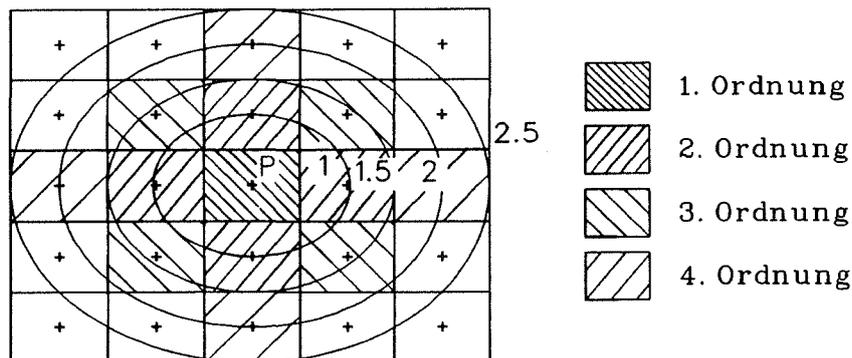


Abb. 2-13: Ordnungen von Nachbarrastermaschen

nung 1,5, also der unmittelbaren Nachbarn, erkennen. Großräumige Formen erstrecken sich über Nachbarn der Ordnung 2 und (meistens wesentlich) größer. Diese Formen können aus der Betrachtung der 4 oder 8 Nachbarn der Ordnungen 1 oder 1,5 nicht erkannt werden. Gerade diese Formen, die ja im Gelände eine sehr wichtige Rolle spielen, sollen in der vorliegenden Arbeit gesucht werden.

Als **Pfad** gilt eine ununterbrochene Folge von jeweils paarweise benachbarten Rastermaschen, die in ihrer Gesamtheit eine Linie im Gelände ergibt.

2.3.2. Begriffe für den Wasserabfluß

Die **Falllinien** sind jene Linien, die sich bei Hinabschreiten immer in Richtung der stärksten Geländeneigung ergeben. Sie schneiden jede Höhenlinie rechtwinklig (Abb. 2-14). Die Definition ist rein differentialgeometrisch, die Falllinien sind somit Kenngrößen der Geländeoberfläche.

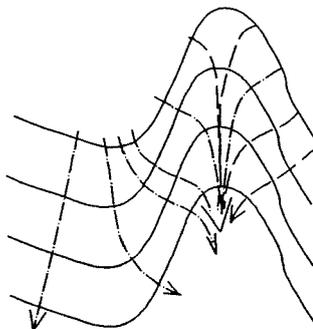


Abb. 2-14: Falllinien und Höhenlinien

Die **Abflußlinien** sind jene Linien, entlang derer das Wasser im Gelände abfließt. In der vorliegenden Arbeit sind sie mit den Falllinien gleichgesetzt, da - wie eingangs vorausgesetzt - physikalische Gegebenheiten, wie Bodenrauhigkeit, Bewuchs und andere Hindernisse sowie die Abflußgeschwindigkeit für die Berechnung des idealisierten Wasserabflusses nicht berücksichtigt werden. In der Natur kann das Wasser bei ausreichend hoher Geschwindigkeit im Zuge stärkerer Krümmungen der Falllinien diese verlassen und in Extremfällen sogar kurze Gegensteigungen überwinden. Im Gegensatz zur Definition der Falllinie ist die Abflußlinie in der Natur nicht differentialgeometrisch aus der Topographie definiert und nicht aus ihr alleine ableitbar.

2.3.3. Geländeformen

Die wichtigsten großräumigen Geländeformen sind Tal, Kamm und Hang. Weitere Formen haben nur kleinräumige Bedeutung oder lassen sich auf diese drei Grundformen zurückführen. Sattelflächen beispielsweise lassen sich in die Formen Tal, Hang und Kamm aufgliedern, wobei noch zusätzlich ein Sattelpunkt auftritt, der nur als Kleinform von Bedeutung ist. Horizontalebene sind verebnete Hänge. Hangaufsteilungen oder -abflachungen sind wie Hänge zu behandeln. Die in diesen Fällen überlagerten Formen haben zwar den Krümmungscharakter von Tälern oder Kämmen; in diesen Zonen kommt es jedoch nicht zur Ausbildung von Flüssen bzw. Wasserscheiden, da die Linie der Aufsteilung selbst keine Falllinie ist, während Talsohle und Kammlinie Falllinien darstellen.

In freier Natur treten Geländeformen so gut wie niemals völlig rein über weitere Strecken auf, sie sind nahezu immer überlagert von anderen Formen. So wird man im Verlauf von größeren Hängen auf Rinnen und Rücken, Verflachungen und Aufsteilungen stoßen. Taleinmündungen, Gipfel- und Sattelpunkte sowie Kammverzweigungen sind weitere Beispiele für derartige Störungen.

2.3.3.1. Tal

Im Bereich eines Tales verlaufen die Abflußlinien zueinander, sie konvergieren. Daher sammelt sich in Tälern das Wasser, sodaß es zur Ausbildung größerer Abflußlinien, Bäche bzw. Flüsse, kommt. Talbereiche lassen sich daher leicht an der großen Ansammlung von Wasser erkennen. Hinunter zu kann der Abfluß im Verlaufe von Tälern leicht angegeben werden, da es - abgesehen von ganz seltenen Ausnahmen - keinerlei Verzweigungen gibt. Da die Abflußlinien im Talbereich konvergieren, gibt es im Verlaufe der Talsohle nur eine einzige Abflußlinie. Streng geometrisch verläuft in der Talsohle eine Falllinie, die Tallinie (vgl. dazu auch die differentialgeometrisch sehr klare Arbeit von Finsterwalder, 1986). Im Idealfall einer glatten Oberfläche schneidet sie alle Schichtenlinien rechtwinkelig. Legt man in jedem Punkt der Tallinie ein Querprofil (das ist in Richtung der Tangente an die Schichtenlinie im jeweiligen Talsohlenpunkt), so erhält man in jedem dieser Profile eine horizontale Tangente und zugleich ein Minimum genau im Talsohlenpunkt (Abb. 2-15).

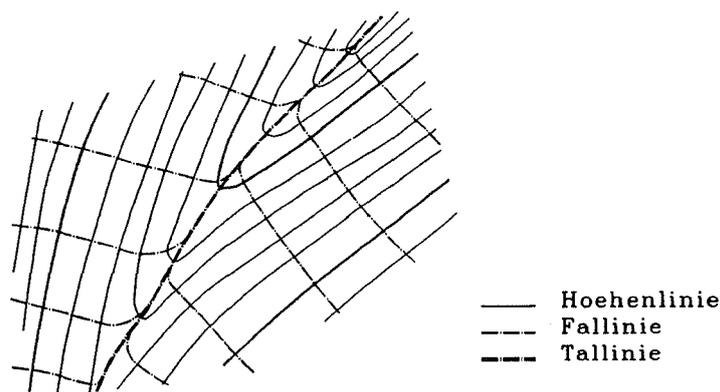


Abb. 2-15: Schichten- und Falllinien im Tal

Lokale Betrachtung eines Talpunktes zeigt, daß mehr Nachbarn zu dem Talpunkt auftreten, die Zufluß spenden, also höher liegen, als solche, die Abfluß vom Talpunkt erhalten. Theoretisch gibt es zu einem Talpunkt überhaupt nur einen einzigen Unterlieger, auf Grund der Rasterstruktur können aber mehrere Nachbarn tiefer liegen (Abb. 2-16).

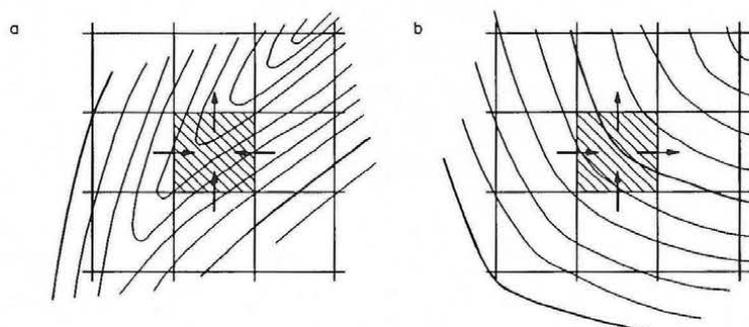


Abb. 2-16: Talpunkt mit a) 1, b) 2 unmittelbar benachbarten Unterliegern

Die Täler eines Gebietes bilden im Regelfall in ihrer Gesamtheit ein zusammenhängendes Liniennetz, das von unten nach oben hin Baumstruktur aufweist. Die Taleinmündungspunkte sind die Knotenpunkte dieser Struktur, die Talabschnitte die Kanten (Zweige; Abb. 2-17).

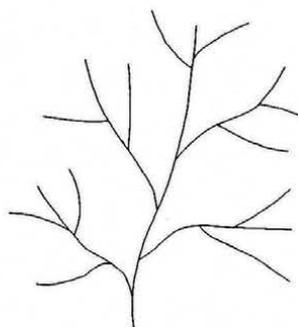


Abb. 2-17: Baumstruktur des Talnetzes

2.3.3.2. Hang

In einem Hang verlaufen die Abflußlinien annähernd parallel. Hangaufsteilungen, -abflachungen oder "-verwindungen" ändern wenig an der ungefähren Parallelität der Abflußlinien, sie bewirken höchstens ein Zusammen- oder Auseinanderrücken dieser Linien (Abb. 2-18). Im Verlaufe einer Abflußlinie ändert sich die durchfließende Wassermenge nur auf Grund der zunehmenden Länge der Linie und damit der Vergrößerung des Einzugsgebietes längs der Linie (unter der eingangs getroffenen Annahme gleicher Beregnung in jeder Rastermasche).

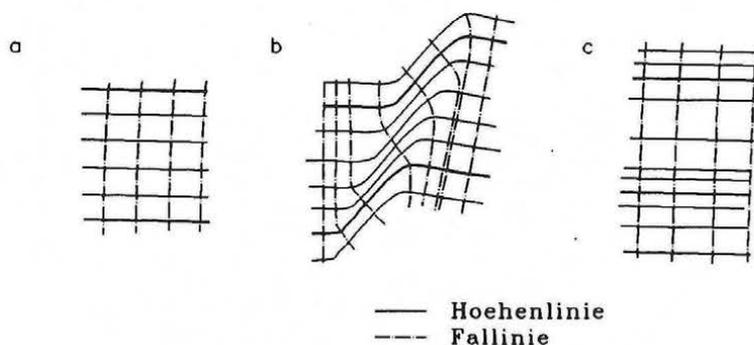


Abb. 2-18: Fall- und Höhenlinien im Bereich von Hangzonen

2.3.3.3. Kamm

Im Bereich von Kämmen laufen die Abflußlinien auseinander, sie divergieren. Das Wasser neigt daher sehr stark dazu, den Kammbereich zu verlassen und in die begrenzenden Hänge abzufließen, weshalb die Kammbereiche wasserarm sind. Wie im Tal gibt es im Idealfall einer glatten Oberfläche entlang eines Kammes eine Fallinie, die Kammlinie, deren Querprofile in jedem Kammpunkt horizontale Geländetangenten aufweisen.

Im Gegensatz zu den Tälern bilden die Käme normalerweise über größere Bereiche hin kein zusammenhängendes Liniennetz. In ihrem Verlaufe treten häufig Gipfelpunkte auf, also Punkte ohne höhere Nachbarn. Die Ursache für diese Unterschiede zu den Tälern liegt in der Entstehung: Die Täler werden zusätzlich zu den geologischen Vorgängen sehr stark vom Wasser mitgeformt, das das Bestreben zeigt, nach unten hin abzufließen. Täler weisen daher meist ein geschlossenes Liniennetz auf und enthalten in der Regel keine Mulden, die die Gegenstücke zu den Gipfeln darstellen. Mulden werden nämlich meist durch Wasser aufgefüllt (Seen, im Extremfall die Weltmeere), oder müßten einen unterirdischen Abfluß besitzen. In ganz seltenen Fällen reicht die hohe Verdunstung aus, das zufließende Wasser zu entfernen (als Beispiel sei der geomorphologisch hochinteressante Graben des Jordan mit dem Toten Meer in Israel genannt, wo das Wasser in einer Depression von fast 400m unter dem weltweiten Meeresspiegel keine Möglichkeit des Abfließens hat).

Im allgemeinen besitzt ein Kammpunkt mehr Unterlieger, denen er Wasser spendet, als Oberlieger, von denen er Wasser empfängt. Wieder kann, wie bei Talpunkten, diese Regel durch die Rasterdarstellung verfälscht werden.

2.3.4. Das Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet (EZG) wird zu einem beliebigen Geländepunkt, dem **Basispunkt**, definiert. Es sei jenes Gebiet, das durch alle Abflußlinien aufgespannt wird, die von oben in den Basispunkt münden. Dieser Punkt wird daher in der Folge meist **Abflußpunkt** genannt. Die beiden Namen ergeben sich aus der unterschiedlichen Definition: Das Einzugsgebiet wird zu einem Basispunkt ermittelt, der Abflußpunkt ist jener Punkt, durch den alles Wasser des Einzugsgebietes hindurchfließt. Das Einzugsgebiet zu einem Basispunkt ist eindeutig. Umgekehrt gibt es zu diesem Einzugsgebiet nur einen einzigen Abflußpunkt, der ident ist mit dem Basispunkt (Abb. 2-19). Die Unterscheidung von Abfluß- und Basispunkt ist vor allem im Zusammenhang mit Mulden von Bedeutung.

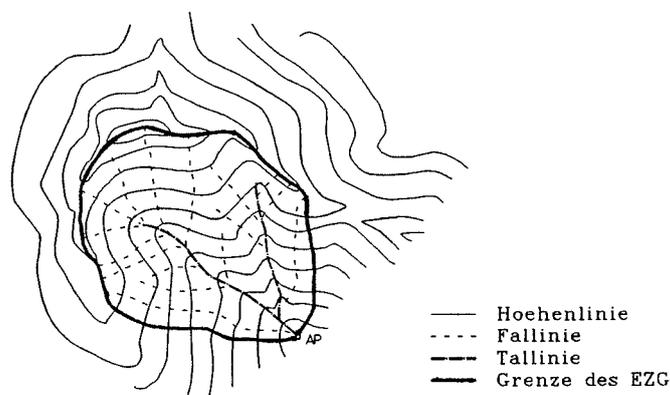


Abb. 2-19: Einzugsgebiet

Der Abflußpunkt ist in der vorliegenden Arbeit immer eine Rastermasche, ebenso ergeben sich die Abflußlinien als Abfolgen von benachbarten Rastermaschen (**Abflußpfade**). An sich gibt es zu jedem Punkt nur genau eine Abflußlinie; durch die räumliche Ausdehnung der Abflußpfade ist es hier aber möglich, daß zu einer beliebigen Rastermasche im Einzugsgebiet mehrere Abflußpfade in diesem Einzugsgebiet auftreten. Der Abflußpfad selbst führt immer bergab.

Der Abflußpunkt ist der einzige Punkt, über den ein Wasseraustausch des Einzugsgebietes mit seiner Umgebung stattfindet (immer hinaus aus dem Einzugsgebiet). Durch die Arbeit mit Rastermaschen allerdings ist im Randbereich des Einzugsgebietes normalerweise die Zugehörigkeit der Maschen zu den benachbarten Einzugsgebieten nicht eindeutig, sodaß das durch Rastermaschen aufgespannte Einzugsgebiet auch im Randbereich einen geringfügigen Wasseraustausch mit seiner Umgebung zeigt (in beiden Richtungen).

Der **Rand** eines Einzugsgebietes ist die Grenze zwischen dem Einzugsgebiet und seinen Nachbargebieten. Er verläuft in der Regel entlang von Kämmen, kann aber auch (über kürzere Strecken) entlang einer Fallinie in einem Hang verlaufen (Abb. 2-19). Der Rand ist weder im Raster des Modelles noch in der Natur eine klar definierte Linie im mathematisch-geometrischen Sinne, sondern ein Band, in dessen Verlauf das Wasser in die anliegenden Hänge abflutet.

Im Untersuchungsgebiet wird unterschieden zwischen **globalen** und **lokalen Einzugsgebieten**. Globale Einzugsgebiete entwässern zum Rand des Untersuchungsgebietes, während der Abflußpunkt lokaler Einzugsgebiete im Inneren des Untersuchungsgebietes liegt.

Untereinzugsgebiete ergeben sich aus der Teilung eines größeren Einzugsgebietes in kleinere Einheiten. Die Teilung kann notwendig sein, wenn in einem großen Einzugsgebiet mehrere Nebenflüsse zum Hauptfluß existieren, deren Einzugsgebiete gesondert auszuweisen sind (Abb. 2-20).

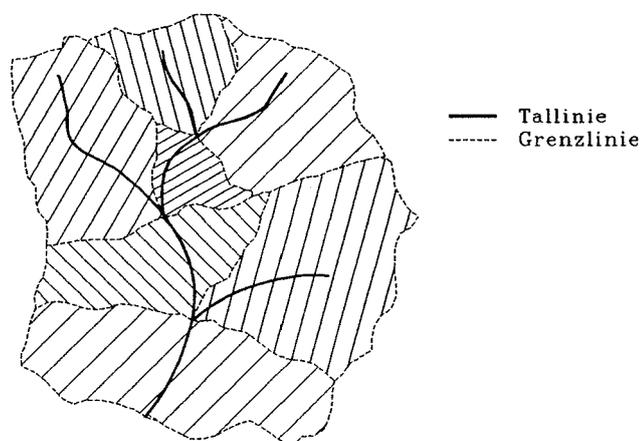


Abb. 2-20: Unterteilungen eines Einzugsgebietes

Der **Unterlieger** ist im allgemeinen eine beliebige Rastermasche, die im Verlaufe des Abflußpfades des Standpunktes liegt. Wird die unmittelbare Umgebung eines Standpunktes betrachtet, so handelt es sich um einen der tieferen Nachbarn. In Bezug auf Einzugsgebiete ist ein unterhalb befindliches Einzugsgebiet gemeint, das ist eines, zu dem das betrachtete entwässert. Im speziellen kann auch der unmittelbar angrenzende Unterlieger gemeint sein.

Unter der **Größe** eines Einzugsgebietes wird seine Fläche verstanden. Im Raster kann es auch die Anzahl der Rastermaschen im Einzugsgebiet sein, dieser Wert ist mit der Fläche einer Rastermasche zu multiplizieren, um die eigentliche Fläche zu erhalten.

2.3.5. Mulden und Muldeneinzugsgebiete

Die **Mulde** ist ein Gebiet, das tiefer liegt als das umliegende Gelände. Der tiefste Punkt in der Mulde wird als **Muldenpunkt** bezeichnet (bei den folgenden Untersuchungen handelt es sich natürlich wieder um eine Rastermasche). Im Idealfall einer glatten Oberfläche besitzt der Muldenpunkt eine horizontale Tangentialebene. Mathematisch gesehen gibt es zum Muldenpunkt eine Umgebung mit Radius größer Null, in der alle Punkte höher liegen als er selbst. Bezüglich der Berechnung haben Mulden die Eigenschaft, daß sie den Abfluß unter der hier genannten Voraussetzung der rein oberflächigen Bewegung unterbrechen. Somit endet jede Abflußlinie, die einen Muldenpunkt erreicht, der Muldenpunkt definiert also eine "Senke". Abbildung 2-21 zeigt das Schichtenlinienbild einer Mulde. Die strichlierte Linie grenzt die Mulde ein.

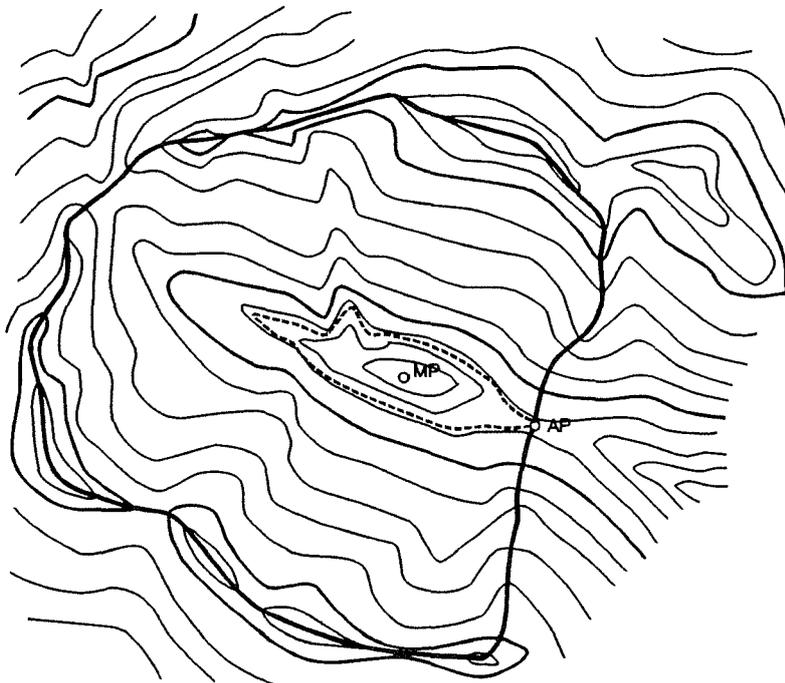


Abb. 2-21: Mulde und Muldeneinzugsgebiet

Das **Muldeneinzugsgebiet** ist jenes Einzugsgebiet, dessen Basispunkt der Muldenpunkt ist. In Abbildung 2-21 ist es das dick eingegrenzte Gebiet. Der **Abflußpunkt des Muldeneinzugsgebietes** wird etwas anders definiert als für das Einzugsgebiet: Er sei jener Punkt, über den das Muldeneinzugsgebiet entwässert. Er ist somit nicht ident dem Muldenpunkt.

Um den Abflußpunkt festzulegen, ist zunächst zu überlegen, wie Mulden im digitalen Geländemodell entstehen. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Mulden:

1) Mulden, die nur im Raster des digitalen Geländemodelles auftreten

Diese Art von Mulden ist die weitaus häufigste. Da diese Mulden in der Natur nicht auftreten, werden sie als **Scheinmulden** (im englischen Sprachgebrauch "spurious pits", vgl. Jenson und Domingue, 1988; Hutchinson, 1989 u. v. a.) bezeichnet. Sie können durch Ungenauigkeiten in den Ausgangsdaten für die Erstellung des digitalen Höhenmodelles entstehen, ebenso durch die Interpolation und schließlich durch die Rasterlage. Abbildung 2-22 zeigt typische Scheinmulden dieser Art im Verlaufe eines Tales.

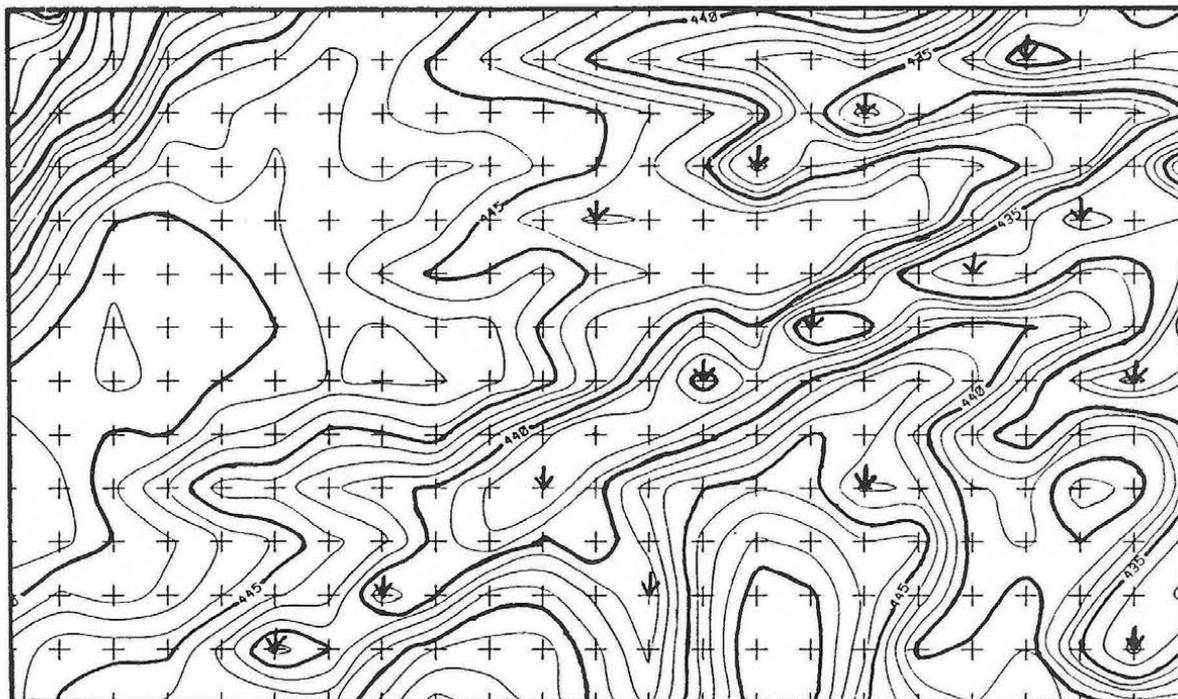


Abb. 2-22: Scheinmulden im Raster: Die Schichtenlinien stellen die Oberfläche dar, wie sie sich aus den Rasterpunkten ergibt.
+ Rasterpunkt

2) Mulden, die in der Natur tatsächlich auftreten:

Hierunter fallen jene immer wieder auftretenden kleinen Mulden, die meist unterirdisch entwässern. Oft bilden sich in ihnen bei stärkeren Niederschlägen kleine Seen aus, da das Wasser nicht ausreichend schnell abfließen kann. In der vorliegenden Arbeit sollen die Täler und Einzugsgebiete gefunden werden, daher wird der unterirdische Abfluß nicht berücksichtigt. Treten derartige Mulden im Modell auf, so wird der oberflächige Wasserabfluß bei nur lokaler Betrachtungsweise unterbrochen, während im Vergleich in der Natur nur geringfügige "Störungen" auftreten.

Ebenfalls in diese Gruppe fallen große Mulden und Seen, wie zum Beispiel Talbecken (das bereits erwähnte Becken des Toten Meeres in Israel, die Kontinentalmulden in Australien, aber auch zahlreiche verhältnismäßig kleinere Beckenlagen, oft in Karstgebieten), die eigenständige Einzugsgebiete darstellen und aus denen das Wasser entweder überhaupt nicht abfließen kann oder über unterirdische Wege in zum Teil weit entfernte Gebiete entwässert.

Alle Scheinmulden sowie die für den Wasserabfluß unbedeutenden im Gelände und im Modell auftretenden Mulden müssen für die Berechnung des Wasserabflusses besonders behandelt werden. Es bieten sich dabei zwei Möglichkeiten an: Die Berücksichtigung bei der Durchführung des jeweiligen Verfahrens - das ist leider nicht bei jedem Verfahren möglich. Daher wird als zweite Möglichkeit das digitale Höhenmodell durch Elimination der Mulden vor den jeweiligen Berechnungen in der Weise verändert, daß ein muldenfreies Modell entsteht. Diese Methode kann ihrerseits derart eingesetzt werden, daß die Höhenwerte selbst verändert werden oder daß ohne Veränderung

der Höhenwerte gearbeitet wird. In letzterem Fall werden zum Beispiel Bearbeitungsreihenfolgen für die Rasterpunkte definiert, die von den tatsächlichen Höhenverhältnissen derart abweichen, daß sie die Reihenfolge in einem entsprechenden muldenfreien Modell angeben (vgl. O'Callaghan und Mark, 1984, Jenson und Domingue, 1988, Hutchinson, 1989 u.a.). Dies wird in Kap. 3.4. näher erläutert.

Als **Abflußpunkt des Muldeneinzugsgebietes** wird nun jener Punkt festgelegt, über den das Wasser bei Auffüllen der Mulde abfließt. Es ist dies der niedrigste Randpunkt des Muldeneinzugsgebietes. Der Abflußpunkt ist damit immer ein Sattelpunkt. Die Festlegung ist sinnvoll, wenngleich nicht streng: Der im digitalen Geländemodell niedrigste Randpunkt der Mulde muß keineswegs der tatsächliche Abflußpunkt sein. Näheres hierzu siehe in Kap. 5.4. über Genauigkeiten. Diese Definition ist mangels besserer sehr verbreitet, so wird sie u.a. von O'Callaghan und Mark (1984) und Jenson und Domingue (1988) verwendet. Hutchinson (1989) geht einen Schritt weiter und untersucht, ob auch andere Randminima als Abflußpunkte in Frage kommen. Allerdings erfolgt seine Untersuchung im Zuge der Interpolation des digitalen Höhenmodelles, sodaß er die Stützpunkte zur Entscheidung heranziehen kann. Es ist dies sicherlich die beste Vorgangsweise. Sie muß hier aber unterbleiben, da bei den handelsüblichen Geländemodellprogrammen weder die ungefilterten Stützpunkte abgelegt werden noch eine Interpolation der Höhenwerte unmittelbar zu den weiterführenden Berechnungen erfolgt. Vielmehr liegen heute oft digitale Geländemodelle vor, von denen die Originaldaten der Berechnung nicht mehr vorhanden sind.

Im besonderen wird der Abflußpfad des Muldeneinzugsgebietes, der **Muldenpfad**, definiert. Dies sei jene Abflußlinie, die vom Abflußpunkt zum Muldenpunkt (in die Mulde hinein) einerseits und vom Abflußpunkt nach außen bis unter den Muldenpunkt verläuft (Abb. 2-23).

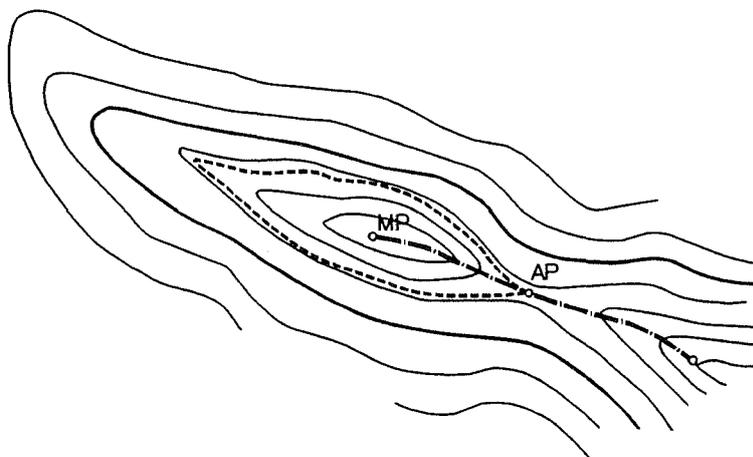


Abb. 2-23: Abflußpfad eines Muldeneinzugsgebietes

Die **Tiefe** einer Mulde bestimmt sich aus der Höhendifferenz zwischen dem Abflußpunkt und dem Muldenpunkt. Die Tiefe ist jene Höhe, die das Wasser an der tiefsten Stelle, also über dem Muldenpunkt, erreicht, wenn man die Mulde mit Wasser auffüllt. Ein weiteres Auffüllen bewirkt ein Überfließen des Wassers über den Rand des Muldeneinzugsgebietes.

Die **Ordnung** einer Mulde ist durch den Abstand von Mulden- und Abflußpunkt gegeben. Es wird hierbei dieselbe Definition für die Ordnung verwendet wie für die Nachbarschaft von Rasterpunkten.

Als **muldenfrei**, insbesondere **muldenfrei der Ordnung n** , wird ein Gebiet bezeichnet, in dem keine Mulden der Ordnung n oder größer auftreten. Für ein Verfahren, das bei lokalen Untersuchungen Mulden der Ordnung n erkennen und berücksichtigen kann, entstehen keine Probleme durch Mulden aus einem derartigen Gebiet. Von großer Bedeutung in der vorliegenden Arbeit sind muldenfreie Gebiete der Ordnung 1, das heißt, daß in Betrachtung der vier unmittelbar anliegenden Rastermaschen keine Mulden vorliegen.

Unter **Muldensystemen** sollen Muldeneinzugsgebiete verstanden werden, in denen weitere Mulden eingelagert sind. Für jede einzelne Mulde gilt das oben Gesagte, darüber hinaus gibt es ein übergeordnetes Muldeneinzugsgebiet (oder deren mehrere), das alle innerhalb liegenden Muldeneinzugsgebiete zur Gänze enthält.

2.3.6. Flüsse

Aus Gründen der Einfachheit ist in dieser Arbeit im allgemeinen nur von Flüssen die Rede, unabhängig davon, wieviel Wasser zusammenkommt. Eine Unterteilung in Bäche oder Flußordnungen (vgl. die Publikation der Institute für Wasserwirtschaft und Photogrammetrie, 1989) wird nicht vorgenommen. Flüsse treten auf, wenn sich genügend Wasser in einem Talverlauf sammelt. In der Natur entstehen Flußläufe, in denen das Wasser mit erheblich höherer Geschwindigkeit abfließt als über den sonstigen Boden. An der Entstehung von Flußläufen ist eine ganze Reihe von Faktoren maßgeblich beteiligt. Hier wird als Kriterium nur die Größe des Einzugsgebietes angewendet (vgl. O'Callaghan und Mark, 1984; Jenson und Domingue, 1988). Da im Raster gearbeitet wird, wird ferner eine von der Rasterweite abhängige Mindestlänge der Flüsse gefordert. Zu kurze Flüsse sind nämlich von den Fehlern im digitalen Höhenmodell sehr stark beeinflusst.

Ein besseres Kriterium, das vor allen Dingen den Maßstab des Endproduktes und des digitalen Höhenmodelles berücksichtigt und auf eine Reihe von Kenngrößen und Verhältnissen in Flußeinzugsgebieten eingeht, wird von Tarboton, Bras und Rodriguez-Iturbe (1991) vorgestellt.

Die Einmündung von Flüssen macht eine Unterteilung in Flußstücke notwendig. Als Knotenpunkte werden die Einmündungspunkte verstanden, die Flußstücke sind die Flußlinien zwischen jeweils zwei benachbarten Knotenpunkten.

3. Die Ermittlung der Einzugsgebiete und Flußläufe

3.1. Schwierigkeiten

3.1.1. Schwierigkeiten aus der Rasterdarstellung

3.1.1.1. Informationsverlust und Formveränderung

Die Darstellung des Geländes in einem Raster bringt mit sich, daß nur Geländeformen, die beträchtlich größer als die Rasterweite sind, erkannt werden können ("Abtasttheorem", Kraus 1987, S. 306 ff.). Es ist daher immer eine zum geforderten Detailreichtum passende Rasterweite zu wählen.

Eine weitere Art des Informationsverlustes entsteht durch die Willkürlichkeit der Rasterlage. Gewisse Geländeformen können bei ungünstiger Rasterlage unkenntlich werden. Als Beispiel sei ein tiefer, schmaler Graben in einer fast ebenen Fläche genannt. Dieser Graben kann, abhängig von der Rasterlage, als Graben gut erkannt werden, sich als Linie von Mulden ergeben oder überhaupt wegfallen (Abb. 3-1).

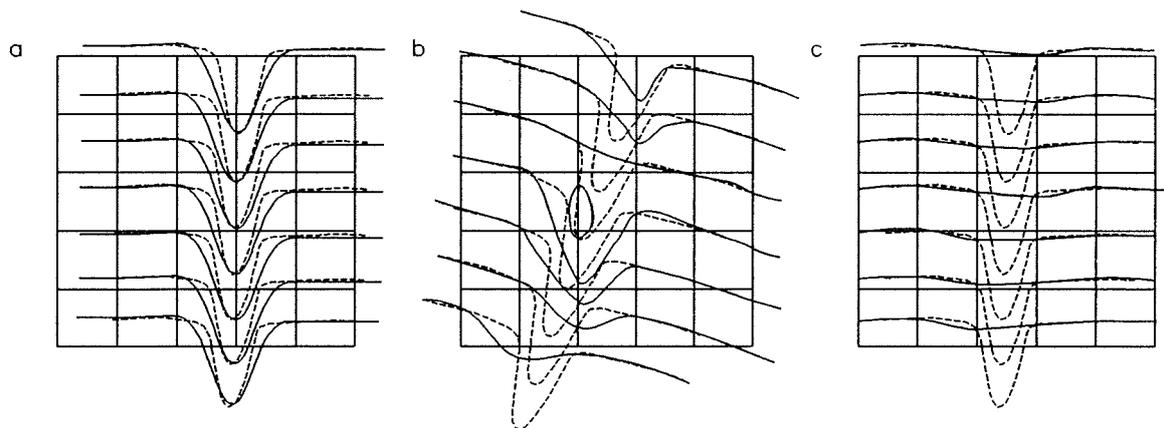


Abb. 3-1: *Tiefer Graben in Abhängigkeit von der Rasterlage*
 ————— gerechnete Höhenlinien, - - - - - Höhenlinien des Geländes

Dieser Art des Informationsverlustes kann nur sehr schwer oder überhaupt nicht begegnet werden. Die Muldenpunkte in Abbildung 3-1b lassen sich zum Graben verbinden, allerdings müssen diese Muldenpunkte nicht von einem Graben herrühren; in letzterem Fall hätte die Interpretation eine Verfälschung der Geländeoberfläche bewirkt. Abbildung 3-1c zeigt, daß die Form wesentlich verändert wird; es ist zwar noch eine Einsenkung zu erkennen, jedoch nichts mehr von der markanten Form (hier zeigt sich vor allem die Wirkung des Abtasttheoremes). In Kapitel 3.4. über Mulden wird darauf noch näher eingegangen.

Die in Abbildung 3-1b und c erwähnte Formveränderung durch die Rasterdarstellung kann gerade in den Talbereichen recht beträchtliche Ausmaße annehmen. So sind Talverläufe oft geradezu durch

Ketten von Scheinmulden gekennzeichnet (Abb. 3-2). Dies gilt umso mehr, je stärker ausgeprägt die Form ist. Andererseits lassen sich die gut ausgeprägten Formen trotz dieser Verfälschungen, wenn sie in ihrer Größe ein Mehrfaches der Rasterweite beanspruchen, immer richtig erkennen; es sind nur geeignete Maßnahmen zur Bereinigung der Unstimmigkeiten zu treffen (s. Kap. 3.4. über Mulden).

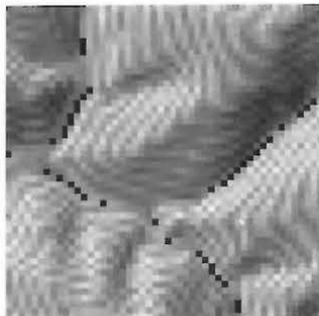


Abb. 3-2: Talverläufe als Ketten von Scheinmulden (schwarze Punkte); hinterlegt sind Schummierung und Höhenliniendarstellung

3.1.1.2. Lageänderung durch Diskretisierung

Da jede Rastermasche genau eine Informationseinheit trägt (je nach Art der Daten Höhe oder Durchflußmenge oder ...), wird der gesamten Maschenfläche diese Information zugewiesen. Ist die zugrundeliegende Information punkt- oder linienförmig, so ergibt sich eine Vergrößerung. Abbildung 3-3 zeigt dies für eine bandförmige Struktur (z. B. einen Fluß).

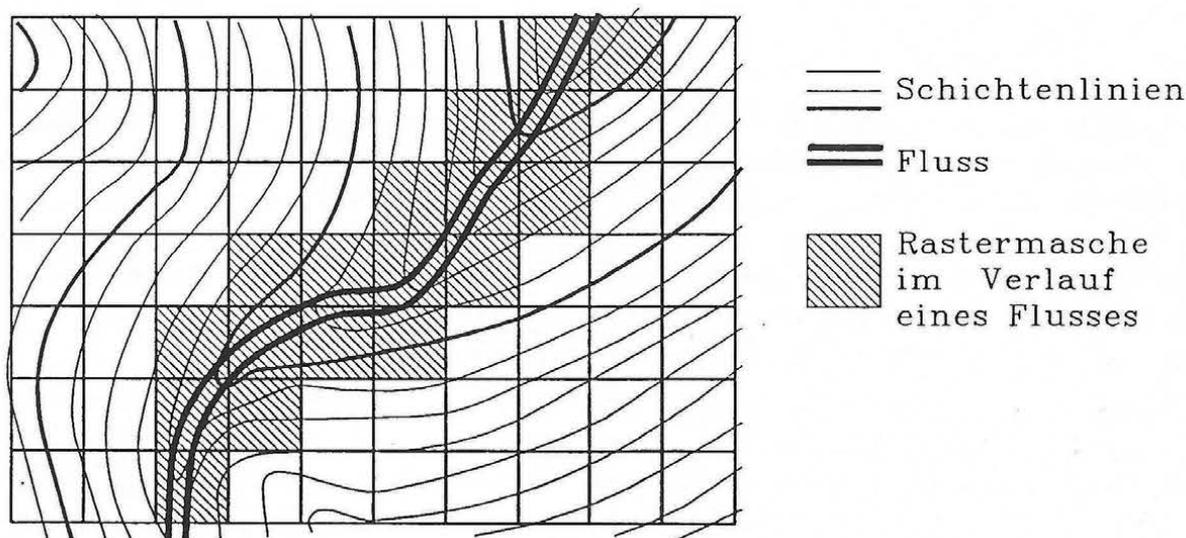


Abb. 3-3: Darstellung einer Linie im Raster

Die gezeigte Struktur der Linie im Raster entsteht, wenn die Verbindung zweier Rastermaschen immer über eine der gemeinsamen Seiten erfolgt. In engen Tälern ist es damit unvermeidlich, daß die Linie sozusagen zwischen den Hängen hin- und herpendelt. Diese Vergrößerungen und Versetzungen werden für den Vorteil der leichteren Berechenbarkeit in Kauf genommen (vgl. Kap. 5. über Genauigkeiten).

3.1.1.3. Richtungsänderung durch die Rasterlage

Ein wesentlich unangenehmerer Fehler als der soeben angesprochene ist die Richtungsänderung. Da eine Linie beim Übergang von einer Rastermasche zur nächsten nur in die vier Achsrichtungen verlaufen kann, muß bei tatsächlich schrägem Verlauf der Linie eine Entscheidung für eine der 4 Richtungen getroffen werden. Wird diese Entscheidung bei jedem Übergang nur aus den lokalen Gegebenheiten getroffen, so kann dies zu dramatischen Richtungsänderungen im Verlauf der Linien führen. Abbildung 3-4 zeigt ein Beispiel dafür bei der Verfolgung einer Fallinie in einem schräg zur Rasterichtung verlaufenden Hang. Die Richtung der stärksten Neigung wird in jeder Masche neu gerechnet, der Übergang erfolgt jeweils in die Rastermasche, in die die neue Richtung zeigt.

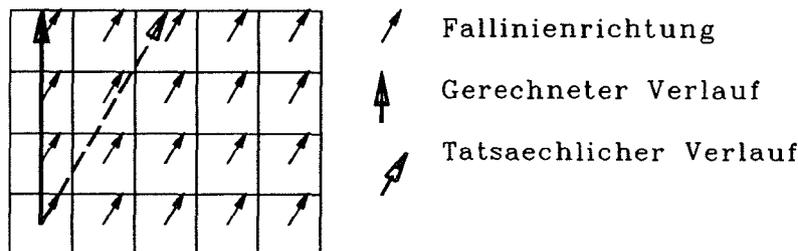


Abb. 3-4: Verfälschung einer Falllinienrichtung durch rein lokale Berechnung

Dieser Fehler muß durch geeignete Methoden in den Griff bekommen werden. In den Kapiteln 3.2.1. und 3.3.2. wird ein entsprechendes Verfahren gezeigt. Siehe dazu auch die allgemeinen Überlegungen zur Falllinienberechnung in Kapitel 4.

3.1.2. Schwierigkeiten bei Anwendung lokaler Verfahren

Mit lokalen Verfahren sind jene Verfahren gemeint, die unter Betrachtung nur der unmittelbaren Umgebung einer Rastermasche arbeiten. Wird ein derartiges Verfahren angewendet, um große Strukturelemente eines Gebietes zu ermitteln, so treten zahlreiche Probleme auf. Die Richtungsänderung der Fallinie aus Kapitel 3.1.1.3. ist auch eine Folge dieser Art der Bearbeitung. Den lokalen Verfahren kommt jedoch eine sehr große Bedeutung zu, da sie einfach zu entwickeln sind und im gesamten Höhenmodell in derselben Weise zum Einsatz kommen. Weiters sind sie in der Regel schnell und können leicht an spezielle Rechnerarchitekturen angepaßt werden.

Die Vor- und Nachteile lokaler Verfahren sollen anhand eines Beispiels erläutert werden. Bild 3-5 zeigt ein Gelände in Schräglichtschummerung mit einer überlagerten Höhenstufendarstellung, die sich durch periodisch wechselnde Grauwerte ergibt. Einer Periodenlänge, d.h. dem Abstand zwischen je zwei Grauwertmaxima, entsprechen 50m Höhenunterschied in der Natur. Die Rasterweite des Höhenmodelles beträgt 25m, wobei jede Rastermasche durch ein Pixel (Bildelement) von 0,225mm Ausdehnung in jeder Achsrichtung dargestellt ist. Das Gelände ist gekennzeichnet durch zwei mächtige Trogtäler und eine Reihe kleinerer, scharf eingeschnittener Seitentäler. Es soll nun versucht werden, die Täler und Kämme zu rekonstruieren.

Nach der Definition sind Täler Bereiche mit konkaver Krümmung der Oberfläche quer zur Talachse. Mit der Bestimmung der Krümmung in jedem Geländepunkt müßte es daher möglich sein, die Täler zu finden.

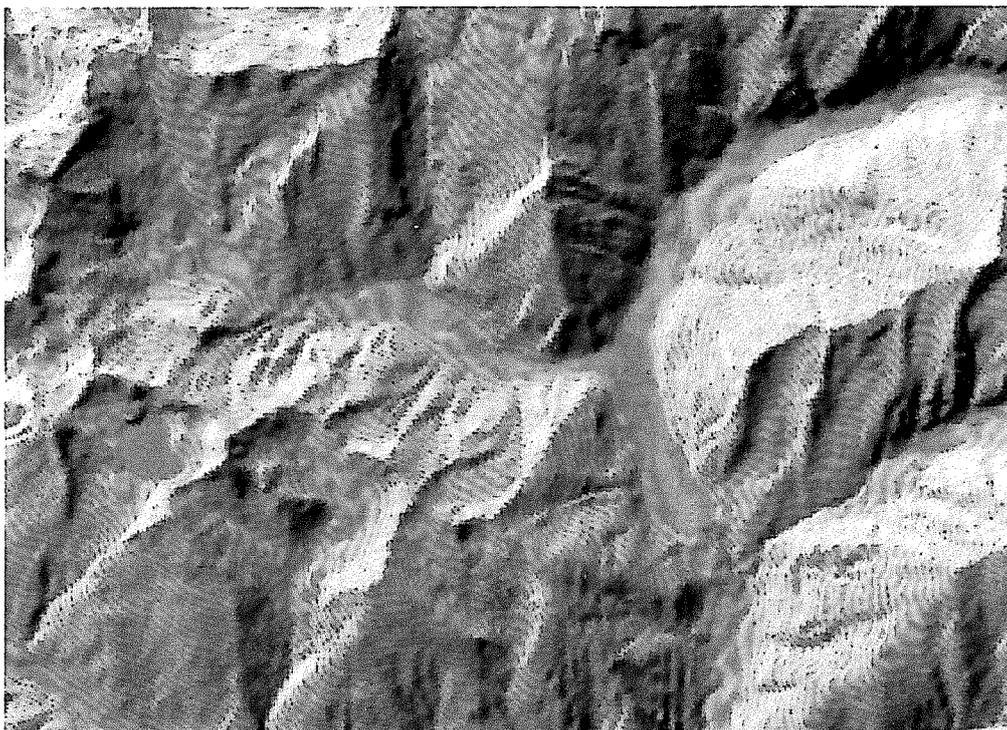


Abb. 3-5: Trogtal in Schummerung mit überlagerter Höhenstufendarstellung

Die Krümmungswerte besitzen jedoch eine Reihe von Nachteilen: Sie sind unbeschränkt im positiven wie im negativen Bereich (wenn man ein Vorzeichen zur Unterscheidung von konkaver und konvexer Krümmung vergibt), ihre Berechnung erfordert einen erheblichen Rechenaufwand, und sie zeigen eine hohe Abhängigkeit von der Ausgeprägtheit der Formen. Gerade die Ausgeprägtheit aber soll möglichst nicht in die Werte eingehen. Um dies zu erreichen, soll hier eine andere Kenngröße herangezogen werden, die einerseits ebenso ein Maß für die Krümmungsverhältnisse liefert, ohne aber dabei von der Ausgeprägtheit der Formen abzuhängen, andererseits auf den Wertebereich zwischen -1 und +1 beschränkt ist.

Die Krümmung einer Fläche im Bereich von Stützpunkten läßt sich aus den Höhenunterschieden des Standpunktes zu den umliegenden Punkten erkennen. In einer schrägen Ebene beispielsweise ist der Höhenunterschied zu den Unterliegern in Summe etwa gleich dem - negativen - Höhenunterschied zu den Oberliegern. In einem Talbereich ist zu erwarten, daß der Höhenunterschied zu den Unterliegern in Summe den negativen zu den Oberliegern übersteigt, für Kampunkte gilt die Umkehrung. Diese Beziehungen lassen sich in einer hier als "Gesamthöhenunterschied" bezeichneten Größe zum Ausdruck bringen:

$$\Delta H_{total} = \sum_i (h_o - h_i)$$

für h_o = Höhe des Standpunktes,
 h_i = Höhe des Nachbarn i

Die Höhenunterschiede lassen sich zwar zu den Nachbarn beliebiger Ordnungen rechnen; unter Heranziehung einer sehr großen Umgebung (z. B. Ordnung 5) handelt es sich jedoch nicht mehr um ein lokales Verfahren, und auch der Rechenaufwand steigt gewaltig. Es läßt sich dann zwar die Großform in diesem Geländebereich eher finden, jedoch nimmt eine derartige Vergrößerung des

Berechnungsbereiches keinerlei Rücksicht auf die tatsächlichen Gegebenheiten: Gräben im Bereich des Trogtales interessieren nicht, während mehrere kleine Paralleltäler im Hangbereich sehr wohl interessieren. Beide Formen werden jedoch gleich behandelt. Daher hat es wenig Sinn, dieses Verfahren über zu große Ordnungen (größer als 1,5, also die 8 unmittelbaren Nachbarn) hinaus zu treiben.

Die Werte lassen sich sehr einfach berechnen und geben ein sehr gutes Bild des Krümmungsverhaltens der Geländeoberfläche im Bereich des Standpunktes. Sie zeigen allerdings eine sehr starke Abhängigkeit von der Ausprägtheit der Formen und sind in ihrem Wertebereich kaum eingrenzbar - es läßt sich kaum mit Sicherheit sagen, wie große Höhendifferenzen zwischen benachbarten Punkten auftreten können. Darum wird eine Normierung vorgenommen, die einerseits eine Eingrenzung auf das Intervall $[-1, +1]$ und andererseits eine Unabhängigkeit von der Ausprägtheit der Form bringen soll: Der größtmögliche Wert, den ΔH_{total} absolut erreichen kann, ist die Summe der Absolutwerte der Höhenunterschiede zu den einzelnen Nachbarn. Eine Division durch diesen Wert erfüllt die Eingrenzung auf das genannte Intervall, sie erfüllt aber ebenso die zweite Bedingung: Eine größere Krümmung der Fläche im Bereich des Standpunktes bewirkt größere Höhenunterschiede (dies gilt natürlich nur für Krümmungen, die in der Grobheit des Rasters dargestellt werden können), die aber gerade durch die genannte Normierung entfernt werden.

Der "normierte Gesamthöhenunterschied" ergibt sich somit aus der Division des oben genannten (nicht normierten) durch den "absoluten":

$$\Delta H_{norm} = \Delta H_{total} / \Delta H_{abs},$$

mit $\Delta H_{abs} = \sum_i |\Delta h_i|.$

Die Höhenunterschiede können noch gewichtet werden. Dies kann durch Division der Entfernung des jeweiligen Nachbarn vom Standpunkt geschehen, was einer linearen Versetzung der Nachbarn in den Einheitskreis um den Standpunkt entspricht. Oder die Gewichtung erfolgt quadratisch mit der Entfernung. Je geringeres Gewicht den entfernteren Nachbarn gegeben wird, umso stärker kommen Kleinformen zur Geltung. Die Gewichte werden in Tabellen abgelegt, da sie ja in jedem Standpunkt für den jeweils entsprechenden Nachbarn im gesamten Modell gleich sind. Eine Gewichtung ist nur bei Heranziehung entfernterer Nachbarn sinnvoll.

Abbildung 3-6 zeigt das Ergebnis der Berechnungen für 8 Nachbarn. Die konkaven Zonen sind hell, die konvexen dunkel, Zonen ohne nennenswerte Krümmungen sind grau dargestellt. Man erkennt gut die Tal- und Kammlinien; zahlreiche Störungen belasten aber das Bild beträchtlich und gestalten das Ermitteln der Linien sehr schwierig. Auch fehlt jeglicher Bezug zur Wichtigkeit der Formen - es ist nicht entscheidbar, ob ein konkaver Bereich eine wichtige oder eine unbedeutende Abflusader darstellt. Insbesondere die breiten Trogtäler sind kaum als einheitliche Formen erkennbar.

Wie man sieht, bringt das lokale Verfahren ein nur teilweise brauchbares Ergebnis; es zeigt allerdings schon brauchbare Ansätze. Insbesondere in Verbindung mit der in Kapitel 6.4. genannten Pyramidenstruktur können so auch die Trogtäler gut gefunden werden.

In den folgenden Kapiteln wird ein Verfahren gezeigt, das mehr von den physikalischen Gegebenheiten ausgeht. Es wird auf die Vorteile der lokalen Verfahren (Einfachheit und Schnelligkeit) nicht verzichtet, dennoch werden zugleich Aussagen über das Gebiet im Großen getroffen. Dazu werden die lokalen Operatoren beibehalten, ihre Wirkung aber wird durch iterative Anwendung oder durch Wahl spezieller Bearbeitungsreihenfolgen der Rasterpunkte grundlegend verändert.

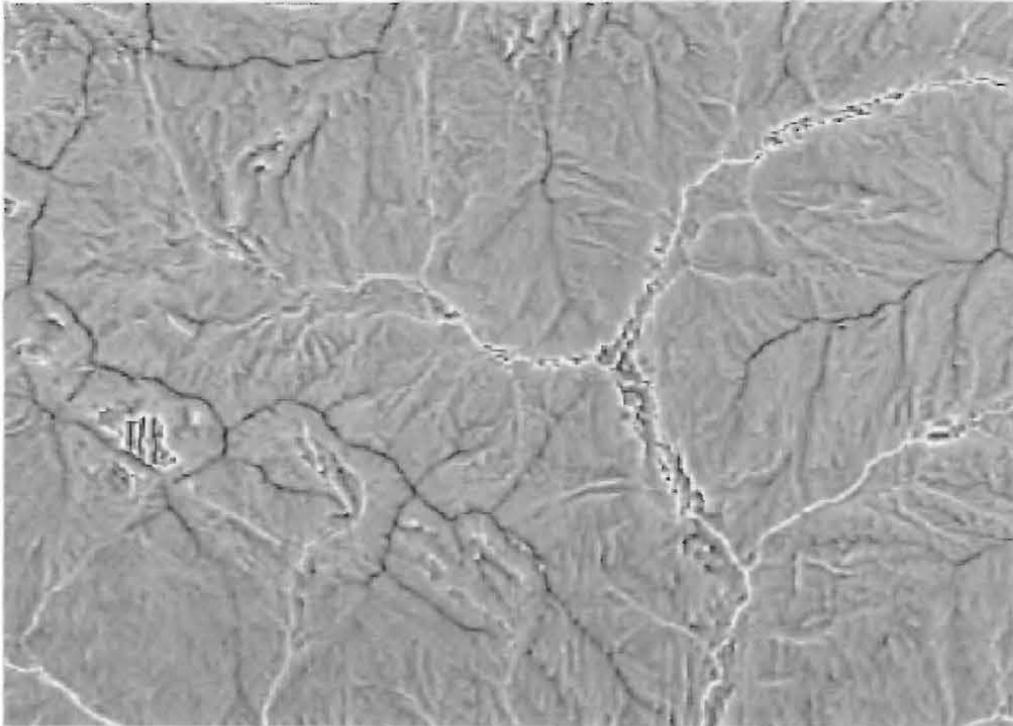


Abb. 3-6: Normierte Gesamthöhenunterschiede zu je 8 Nachbarn im Modell aus Abb. 3-5

3.2. Die Ermittlung der Flußläufe

Flußläufe sind immer in Tälern zu finden, weshalb das Problem auch als Suche der Täler formuliert werden kann. Mit dem Auftreten eines Flußlaufes wird gerechnet, wenn das Einzugsgebiet eines (Tal-) Punktes eine Mindestgröße überschreitet. Als guter Ansatz hat sich die Definition eines Durchflußwertes (im englischen Sprachgebrauch als "flow accumulation value" bezeichnet) erwiesen. Zu jedem Rasterpunkt wird zunächst seine Abflußrichtung festgestellt (zu den Nachbarn der Ordnung 1,5), sodann in einem iterativen Verfahren der Durchflußwert durch einfaches Abzählen aller Oberlieger ermittelt. Überschreitet der Wert eine vorgegebene Schranke, so wird das Auftreten eines Flusses angenommen (O'Callaghan und Mark 1984; Jenson und Domingue 1988).

Die so gewonnenen Flüsse sind, namentlich in großen Einzugsgebieten, von recht inhomogener Breite. Die rein lokalen Operatoren der Abflußrichtung versagen in flachem Gelände teilweise und setzen immer ein muldenfreies DHM voraus. Qian, Ehrlich und Campbell stellten mit "DNESYS" ein Expertensystem vor, das diese Schwierigkeiten teilweise umgeht (Qian et al., 1990). Dazu werden zunächst über einen lokalen Operator im gesamten DHM Talabschnitte ermittelt. Diese Abschnitte werden sodann durch Anwendung verschiedener Kriterien, die sich teilweise aus der Topographie ergeben, miteinander verbunden. Als Kriterien werden u.a. verwendet: Der Höhenunterschied, die Formähnlichkeit, der Abstand, der ungefähre Einmündungswinkel zweier benachbarter Segmente. Das Expertensystem kann um zusätzliche Kriterien erweitert werden, die einzelnen Kriterien können nach Wunsch angewendet werden oder entfallen. Das Verfahren liefert sehr gute Ergebnisse, vor allem deshalb, da das Auffüllen (Einebnen) der Rastermaschen entfällt. Als Nachteil ist jedoch zu

werten, daß für die meisten Kriterien Schwellenwerte anzugeben sind, die über Annahme oder Ablehnung der jeweiligen Verbindung entscheiden. Dies bringt größere Unsicherheit und Willkür. Auch bleiben durchaus einzelne isolierte Flußabschnitte übrig. Das Ergebnis ist ein Netzwerk des Flußsystems mit Flußknoten und Flußstücken.

Es soll nun ein Verfahren gezeigt werden, das ähnlich arbeitet wie das erstgenannte. Es soll aber vor allen Dingen die Abhängigkeiten von der Rasterrichtung ausschalten. Wie im Verfahren von O'Callaghan und Mark (1984) werden auch hier lokale Operatoren durch Ausführen in geeigneter Reihenfolge in der Weise über das gesamte Gebiet erstreckt, daß großräumige Formen erkannt werden können. Die großen Wasseradern treten ja oft im Flachland oder in breiten Trogtälern auf, wo sie aus lokaler Betrachtung nicht erkannt werden, während unbedeutende Nebenflüsse oder Bäche durch ihr tiefes Einschneiden von den lokalen Operatoren sehr deutlich aufgedeckt werden.

3.2.1. Das Summationsverfahren

Der Wasserabfluß soll in Abhängigkeit von den lokalen Höhenunterschieden der Rastermaschen geschätzt werden. Die in einer Rastermasche R_0 mit der Höhe h_0 vorhandene Wassermenge sei w_0 . Die Wassermenge, die R_0 an den Nachbarn R_i (Höhe h_i) entsendet, sei w_i . Das Wasser in R_i wird vollständig auf die tieferliegenden Nachbarn verteilt, wobei die Aufteilung proportional den Höhenunterschieden erfolgt. Es gilt:

$$w_i = w_0 \cdot \Delta h_i / h$$

mit $\Delta h_i = \begin{cases} h_0 - h_i & \text{für } h_0 > h_i \\ 0 & \text{für } h_0 \leq h_i \end{cases}$

und $h = \sum_i \Delta h_i, \quad 1 \leq i \leq 4, \quad h > 0$

Die letztgenannte Bedingung bedeutet Muldenfreiheit der Ordnung 1. Die Aufteilung proportional dem Höhenunterschied gibt den Vorgang des Abflusses nicht exakt wieder. Die damit gewonnenen Ergebnisse stellen jedoch eine sehr gute Näherung des tatsächlichen Abflusses dar. Eine wesentlich genauere - aber auch aufwendigere - Methode wird in Kapitel 4.1. gezeigt.

Zunächst wird das Gebiet mit der Wassereinheit beregnet, sodaß in jeder Rastermasche die Wassermenge 1 auftritt ("Beregnung 1" in Abb. 3-7). Sodann wird das genannte Verfahren für jede Masche durchgeführt. Danach ist in jedem Rasterelement die Durchflußmenge nach einem Schritt abgelegt ("Abfluß 1"). Damit ist ein Schritt dieses Verfahrens eine rein lokale Berechnung. Um nun die großräumige Geländeform erkennen zu können, wird das Verfahren mehrfach wiederholt: Der momentane Wasserstand wird erneut mit der Wassereinheit beregnet, indem zu den angesammelten Wasserwerten 1 addiert wird ("Beregnung 2"); sodann wird das Verfahren der Summation erneut angewendet ("Abfluß 2"). Diese je zwei Schritte werden in Abb. 3-7 als "Iteration" bezeichnet. Die Iterationen werden entweder solange fortgesetzt, bis auf dem längsten im Gebiet vorhandenen Pfad das Wasser vom 1. Iterationsschritt abgeflossen ist (abgesehen von numerischen Ungenauigkeiten würden weitere Iterationen keine Änderung des Wasserstandes mehr ergeben, "Iteration 9"), oder es wird nach einer gewissen Anzahl von Iterationen abgebrochen, wenn keine nennenswerten Änderungen in der Erkennbarkeit größerer Formen mehr zu erwarten sind. Die folgenden Tabellen zeigen die

Iterationsschritte für ein kleines Testgebiet in Zahlen. Das über den Rand hinausfließende Wasser geht für die Berechnung verloren. Am Rand des Gebietes kann zur Verbesserung der Ergebnisse die Höhe des nächsten äußeren Punktes extrapoliert werden (z. B. linear).

Schrägebene					Berechnung 1				
90	88	86	84	82	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
87	85	83	81	79	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
84	82	80	78	76	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
81	79	77	75	73	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
78	76	74	72	70	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Abfluß 1					Berechnung 2				
0.000	0.400	0.400	0.400	0.400	1.000	1.400	1.400	1.400	1.400
0.600	1.000	1.000	1.000	1.000	1.600	2.000	2.000	2.000	2.000
0.600	1.000	1.000	1.000	1.000	1.600	2.000	2.000	2.000	2.000
0.600	1.000	1.000	1.000	1.000	1.600	2.000	2.000	2.000	2.000
0.600	1.000	1.000	1.000	1.000	1.600	2.000	2.000	2.000	2.000
Abfluß 2					Abfluß 3				
0.000	0.400	0.560	0.560	0.560	0.000	0.400	0.560	0.624	0.624
0.600	1.480	1.640	1.640	1.640	0.600	1.480	1.928	1.992	1.992
0.960	1.840	2.000	2.000	2.000	0.960	2.272	2.720	2.784	2.784
0.960	1.840	2.000	2.000	2.000	1.176	2.488	2.936	3.000	3.000
0.960	1.840	2.000	2.000	2.000	1.176	2.488	2.936	3.000	3.000
Abfluß 4					Abfluß 5				
0.000	0.400	0.560	0.624	0.650	0.000	0.400	0.560	0.624	0.650
0.600	1.480	1.928	2.146	2.171	0.600	1.480	1.928	2.146	2.248
0.960	2.272	3.066	3.283	3.309	0.960	2.272	3.066	3.514	3.616
1.176	2.834	3.627	3.845	3.870	1.176	2.834	3.973	4.421	4.523
1.306	2.963	3.757	3.974	4.000	1.306	3.222	4.362	4.810	4.912
Abfluß 6					Abfluß 7				
0.000	0.400	0.560	0.624	0.650	0.000	0.400	0.560	0.624	0.650
0.600	1.480	1.928	2.146	2.248	0.600	1.480	1.928	2.146	2.248
0.960	2.272	3.066	3.514	3.754	0.960	2.272	3.066	3.514	3.754
1.176	2.834	3.973	4.697	4.938	1.176	2.834	3.973	4.697	5.131
1.306	3.222	4.673	5.397	5.638	1.306	3.222	4.673	5.687	6.122
Abfluß 8					Abfluß 9				
0.000	0.400	0.560	0.624	0.650	0.000	0.400	0.560	0.624	0.650
0.600	1.480	1.928	2.146	2.248	0.600	1.480	1.928	2.146	2.248
0.960	2.272	3.066	3.514	3.754	0.960	2.272	3.066	3.514	3.754
1.176	2.834	3.973	4.697	5.131	1.176	2.834	3.973	4.697	5.131
1.306	3.222	4.673	5.687	6.354	1.306	3.222	4.673	5.687	6.354

Abb. 3-7: Höhenwerte und Iterationsstufen des Summationsverfahrens in einer Schrägebene (die Zahlenwerte geben die angesammelten Wasserwerte wieder)

Bild 3-8 zeigt ein gebirgiges Gelände mit 50m Rasterweite. Die Grauwerte der Höhenstufen ändern sich mit einer Periode von 50 Höhenmetern.

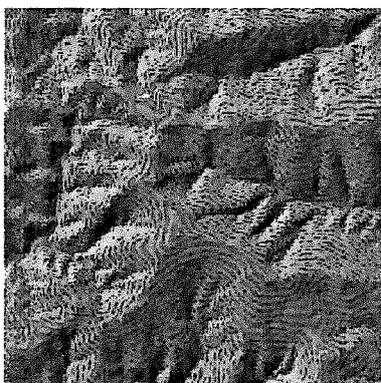


Abb. 3-8: Testgelände in Schräglightschummerung mit überlagerten Höhenstufen

Bild 3-9 zeigt mehrere Iterationsstufen des Summationsverfahrens im Modell aus Bild 3-8. Je heller die Darstellung, umso mehr Wasser fließt durch die entsprechende Rastermasche. Die Darstellung ist in den Bildern a-e an die größte auftretende Wassermenge angepaßt: Der Bereich der Summationswerte wird im Intervall von Wassermenge 0 bis größte in der jeweiligen Iterationsstufe auftretende Wassermenge auf die Grauwerteskala von schwarz bis weiß linear aufgeteilt. Eine weiße Rastermasche in Bild 3-9a enthält also wesentlich weniger Wasser als eine weiße z. B. in Bild 3-9c. Bild 3-9f zeigt die Summationsstufe von Bild 3-9e mit einer Histogrammeinebnung, also einer nichtlinearen Berechnung der Grauwerte aus den Summationswerten.

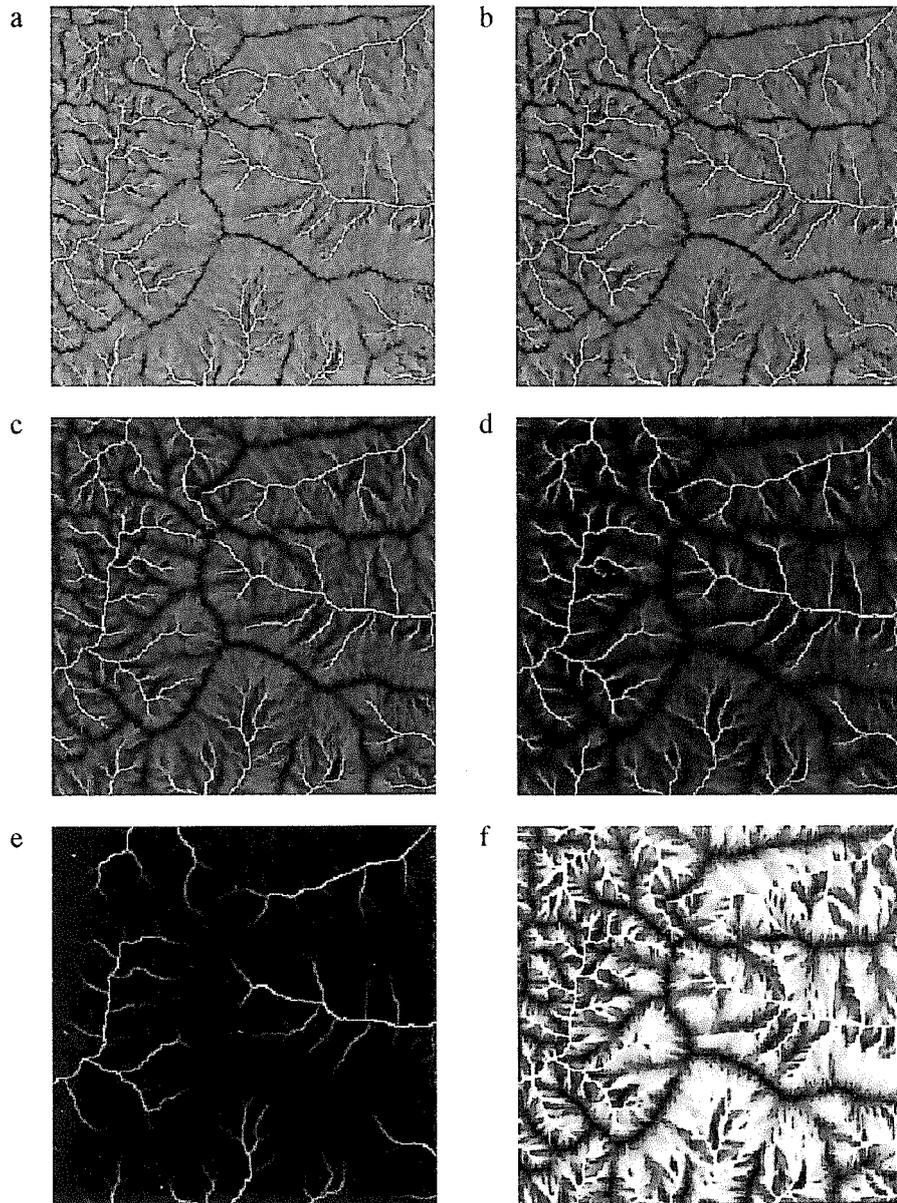


Abb. 3-9: Iterationsschritte des Summationsverfahrens zum Gelände aus Bild 3-8.
Iterationen: a) 1, b) 2, c) 5, d) 10, e) 20, f) Histogrammeinebnung von e).

Bereits nach 20 Iterationen sind die großen Täler deutlich erkennbar, das Ausiterieren würde ungefähr 150 bis 200 Iterationen erfordern. Die Anzahl der Iterationen bedingt, welche Größe des Einzugsgebietes zu einem Punkt herangezogen wird. Nach 20 Iterationen haben somit nur jene Oberlieger eines Punktes Einfluß auf ihn, die entlang von Pfaden nicht weiter als 20 Rastermaschen oberhalb liegen.

Das Verfahren stellt nicht den zeitlichen Ablauf dar, obwohl eine gewisse Ähnlichkeit besteht. Der Abfluß erfolgt hier jedoch von jeder Masche zu ihren Nachbarn in genau derselben Geschwindigkeit und ohne Berücksichtigung der oberflächenspezifischen Größen (Bedeckung, Bodendurchlässigkeit, Neigung, Hanglänge usw.). Als Ergebnis erhält man in jeder Masche ein Maß für die Größe des Einzugsgebietes, ausgedrückt in der Anzahl der oberhalb befindlichen Rastermaschen.

Daß der Wert nicht genau die Größe des Einzugsgebietes darstellt, hängt mit der Grobheit der Abflußberechnung durch die Beschränkung auf die vier Achsrichtungen zusammen. Um die in Kapitel 3.1.1.3. genannten Probleme der Richtungsänderung im Raster zu umgehen, wird hier das Wasser auf alle Unterlieger verteilt. Dadurch kommt es aber zu einer Auffächerung des Wassers nach unten hin (Abb. 3-10b) und umgekehrt zu einer Verbreiterung des Einzugsgebietes nach oben hin. Die Anteile werden zwar mit zunehmender Entfernung sehr klein; außerdem erfolgt ein gewisser Ausgleich dadurch, daß alle Maschen solcherart den anderen einen Teil des Wassers entziehen. Durch die unterschiedlichen Formen und Geländeneigungen erfolgt aber nur ein genäherter Ausgleich, sodaß die Flächen eben nicht genau, sondern nur genähert wiedergegeben werden.

a ----- Höhenwerte -----									
90	88	86	84	82	80	78	76	74	72
87	85	83	81	79	77	75	73	71	69
84	82	80	78	76	74	72	70	68	66
81	79	77	75	73	71	69	67	65	63
78	76	74	72	70	68	66	64	62	60
75	73	71	69	67	65	63	61	59	57
72	70	68	66	64	62	60	58	56	54
b ----- Summationsverfahren ausgehend von einem Punkt -----									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.000	0.400	0.160	0.064	0.026	0.010	0.004	0.002	0.001
0	0.600	0.480	0.288	0.154	0.077	0.037	0.017	0.008	0.004
0	0.360	0.432	0.346	0.230	0.138	0.077	0.041	0.021	0.011
0	0.216	0.346	0.346	0.276	0.194	0.124	0.074	0.042	0.023
0	0.130	0.259	0.311	0.290	0.232	0.167	0.111	0.070	0.042
0	0.078	0.187	0.261	0.279	0.251	0.201	0.147	0.101	0.066
c ----- Summationsverfahren der gesamten Fläche -----									
1.000	1.400	1.560	1.624	1.650	1.660	1.664	1.666	1.666	1.666
1.600	2.480	2.928	3.146	3.248	3.295	3.316	3.326	3.330	3.332
1.960	3.272	4.066	4.514	4.754	4.879	4.941	4.972	4.987	4.994
2.176	3.834	4.973	5.697	6.131	6.380	6.517	6.590	6.628	6.648
2.306	4.222	5.673	6.687	7.354	7.769	8.018	8.161	8.241	8.285
2.383	4.487	6.198	7.492	8.409	9.025	9.421	9.665	9.811	9.895
2.430	4.664	6.585	8.129	9.297	10.134	10.706	11.081	11.319	11.465

Abb. 3-10: Wasserabfluß in einer Schrägebene: a) Höhen, b) Abfluß zu einem Punkt, c) Abfluß in der Ebene

Tabelle 3-10c zeigt das Ergebnis, wenn alle Punkte Wasser spenden. In der Ebene gleichen sich die Anteile, die zu weit seitwärts wandern, gegenseitig aus, sodaß das Ergebnis der Summation dem tatsächlichen Abfluß entspricht. Der Abfluß zu einem Punkt ergibt sich, wenn vor jeder Iteration nur dieser Punkt mit der Wassereinheit beregnet wird, für die Ebene werden alle Punkte mit der Wassereinheit beregnet. Die angezeigten Werte gelten jeweils nach der nächsten Beregnung, das ist die Beregnung zu Beginn der nächsten Iteration.

3.2.2. Das modifizierte Summationsverfahren

Das Verfahren aus Kapitel 3.2.1. läßt sich sehr gut an Rechner mit Parallelprozessoren anpassen. Auf Rechnern mit sequentieller Verarbeitung allerdings benötigt eine größere Anzahl an Iterationen sehr hohe Rechenzeiten. Eine wesentliche Beschleunigung kann dort erreicht werden, wenn die Summation von oben nach unten durchgeführt wird. Zu diesem Zweck muß die Sortierreihenfolge der Maschen des Rastermodelles bezüglich der Höhenwerte in absteigender Form bekannt sein. Dies kann beispielsweise über ein eigenes Indexfeld geschehen, das zusätzlich zur Matrix mit den Höhenwerten angelegt wird. Jedes Element im Indexfeld enthält die Adresse eines Höhenwertes in der Höhenmatrix. Die Adressen werden derart sortiert, daß ihre Abfolge die Punkte der Höhenmatrix in absteigender Reihenfolge ergibt.

Höhenmatrix (die Ziffern vor den Doppelpunkten sind die Matrixadressen):

0:	547,13	1:	538,29	2:	536,83
3:	543,25	4:	541,12	5:	535,59
6:	540,81	7:	537,24	8:	534,65

Absteigend sortiertes Indexfeld:

0	3	4	6	1	7	2	5	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Abb. 3-11: Höhenmatrix und sortiertes Indexfeld

Wird die Summation in der Reihenfolge vorgenommen, wie sie durch das Indexfeld vorgegeben ist, so genügt die einfache Abarbeitung des Indexfeldes, um das gesamte Wasser des Modelles abfließen zu lassen. Waren im Verfahren nach Kapitel 3.2.1. zahlreiche, je nach Größe des Gebietes auch viele hundert, Iterationen notwendig, um das Wasser abfließen zu lassen, so genügt hier ein einziger Berechnungsschritt (falls das sortierte Indexfeld vorliegt; s. dazu später). Günstig ist auch, daß die Summationswerte nur eine einzige Matrix zur Berechnung und Ablage benötigen. Diese wird mit der Wassereinheit belegt, danach wird jede Summation zu der jeweils in der entsprechenden Rastermasche vorhandenen Wassermenge addiert. In den tiefer liegenden Rastermaschen in Tälern wird eine sehr große Wassermenge weitergegeben. Im iterativen Summationsverfahren mußten hingegen immer zwei Felder verwendet werden: Das erste enthielt jeweils die aktuelle abzugebende Wassermenge je Rastermasche, im zweiten, das am Beginn jeder Iteration mit 0 vorbelegt wurde, wurde die Wassermenge aufaddiert. Die Trennung der Felder war notwendig, damit nicht je nach Abflußrichtung später bearbeitete Rastermaschen das erst im aktuellen Arbeitsschritt angesammelte Wasser einer Nachbarmasche weitergaben. Dies hätte zu einer maschenweise ungleichmäßigen Iterationstiefe geführt.

Abgesehen von numerischen Ungenauigkeiten (im iterativen Verfahren wird je Rastermasche sehr oft addiert, im modifizierten Verfahren maximal dreimal im muldenfreien Modell) ergibt das modifizierte Verfahren dasselbe Ergebnis wie das ausiterierte iterative Verfahren. Abbildung 3-12 zeigt das Abflußmodell des Geländes aus Bild 3-8, berechnet nach dem modifizierten Summationsverfahren.

Als Nachteil des modifizierten Verfahrens ist die Notwendigkeit der Verwendung eines sortierten Indexfeldes anzusehen. Bei der weitverbreiteten Größe von 32 Bits je Fließkommazahl und je

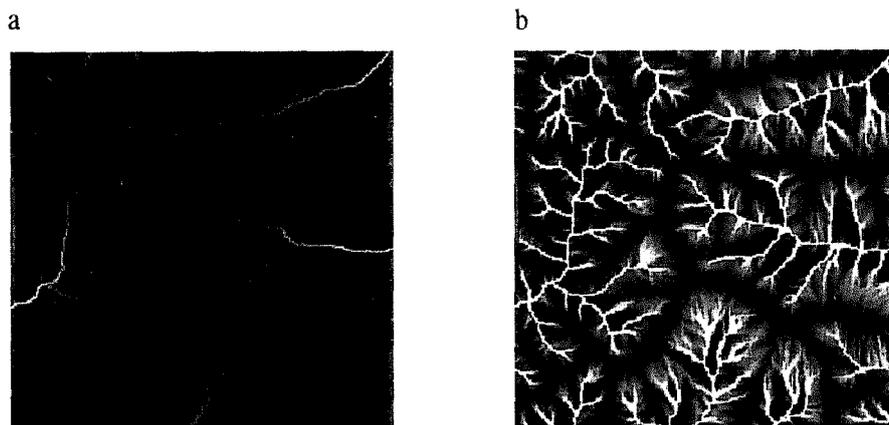


Abb. 3-12: *Modifiziertes Summationsverfahren im Gelände des Bildes 3-8; a) Grauwerte proportional der Wassermenge, b) nach Histogrammeinebnung*

Festkommazahl (ganze Zahlen, "Integer") werden für eine Rastermasche im Höhen- und im Summenfeld je 32 Bits (Fließkommazahl) benötigt, je Element im Indexfeld ebenso (Integerwert). Damit haben Index-, Höhen- und Summenfeld dieselbe Größe. Da beim iterativen Verfahren zwei Summenfelder benötigt werden, sind die beiden Verfahren in Bezug auf Speicherplatzaufwand gleichwertig.

Das Sortieren des Indexfeldes benötigt beträchtliche Rechenzeit. Diese schlägt etwa proportional mit $n \ln n$ (\ln ist der natürliche Logarithmus) für n Elemente zu Buche. Um das iterative Verfahren bis zu Ende zu treiben, muß jedoch mit einem Aufwand proportional $n^{1,5}$ gerechnet werden, da die Anzahl der benötigten Iterationen etwa linear mit der Ausdehnung des Untersuchungsgebietes, das ist bei einem quadratischen Gebiet \sqrt{n} , steigt. Die Berechnungszeit eines Schrittes ist bei beiden Verfahren ungefähr dieselbe und ist proportional mit n . Die Berechnungszeit beim modifizierten Verfahren ist daher, insbesondere bei größeren Gebieten, wesentlich kürzer. Weiters wird bei der Berechnung der Einzugsgebiete nach Kapitel 3.3. das sortierte Indexfeld ebenso benötigt wie bei der Elimination der Mulden (Kapitel 3.4.), sodaß das Sortieren hier keinen zusätzlichen Aufwand darstellt.

3.2.3. Die Bestimmung der Flußläufe

Das Ergebnis des Summationsverfahrens aus Kapitel 3.2.1. und 3.2.2. ist ein digitales Modell, das anstelle der Höhenwerte die Abflußwerte enthält, also eine Ebene des Mehrschichtenmodelles aus Kapitel 2.1.3. darstellt. Da es die ungefähre Einzugsgebietsgröße in jeder Rastermasche angibt, läßt es die wichtigen Abflußlinien sehr gut erkennen. Gibt man vor, daß ein Flußlauf auftritt, wenn eine gewisse Mindestgröße des Einzugsgebietes vorliegt, so lassen sich die Flüsse markieren (vgl. Kap. 2.3.6.). Dies ist in Abbildung 3-13 für die Werte 100 und 200, bei einer Rasterweite von 50m also für Mindestflächen von $0,25\text{km}^2$ bzw. $0,5\text{km}^2$ durchgeführt.

Man sieht, daß hie und da Bäche unterbrochen sind oder sich verbreitern. Unterbrechungen treten vor allem dann auf, wenn bei verhältnismäßig kleinem Einzugsgebiet eine stärkere Talverbreiterung auftritt, oft auch in Nebenflüssen unmittelbar vor ihrer Einmündung in ihren Unterlieger. Darüber hinaus ist das dargestellte Flußnetz völlig ungegliedert. Es soll nun gezeigt werden, wie aus dieser Information einerseits die Flüsse als Linien erhalten werden können und andererseits eine Gliederung in Flußstücke und die zugehörigen Knotenpunkte vorgenommen werden kann.

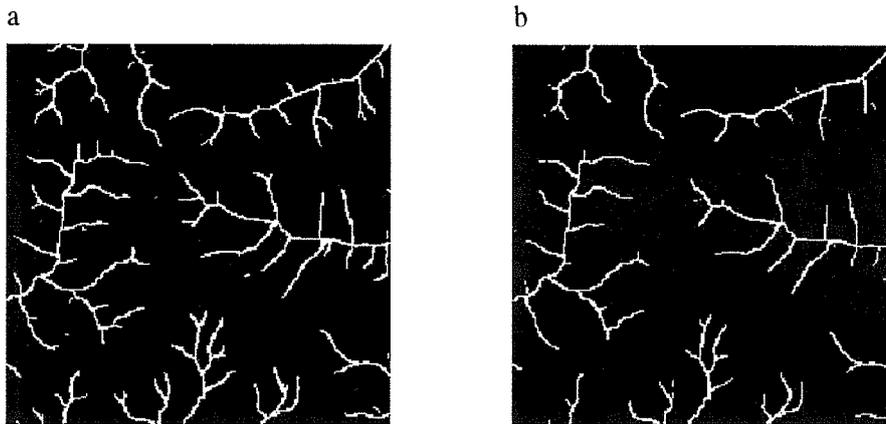


Abb. 3-13: Rastermaschen mit Summationswert größer a) 100, b) 200.

Um bei der Suche der Flußstücke gleichzeitig die Baumstruktur des Flußnetzes aufzubauen, wird von unten begonnen. Das Modell kann mehrere voneinander unabhängige Flußnetze enthalten. Da das Modell muldenfrei ist, muß jedes dieser Netze genau einen Austrittspunkt am Gebietsrand aufweisen. Ein derartiger Austrittspunkt liegt offenbar dann vor, wenn längs des Gebietsrandes das Höhenfeld ein lokales Minimum zeigt (Talpunkt) und der Summationswert in dieser Rastermasche größer ist als der vorgegebene Mindestwert für das Auftreten eines Flusses. Wird der gesamte Gebietsrand auf diese Weise untersucht, so erhält man die Austrittspunkte der Flußnetze. Die Markierung der Linien erfolgt in einem eigenen Modell, dem Flußlinienmodell (ein weiteres Funktionsmodell im Sinne von Kapitel 2.1.3.), ausgehend von den Austrittspunkten.

Für die Linienmarkierung wird jetzt ein rein lokales Kriterium aufgestellt, das angibt, ob ein Nachbar des Standpunktes ebenfalls der Linie angehört: Der Nachbar muß einen Summationswert aufweisen, der größer ist als der vorgegebene Mindestwert, und er muß höher liegen als der Standpunkt. Mit diesem Kriterium läßt sich eine Flußlinie markieren, indem jeweils auf den Nachbarn übergegangen wird, der das Kriterium erfüllt, und dort dasselbe Verfahren wieder angewendet wird.

Es kann mehrere Nachbarn geben, die das genannte Kriterium erfüllen. Die Ursache hierfür kann entweder eine Flußeinmündung oder eine Talverbreiterung sein. Diese zwei Fälle sind bei der lokalen Betrachtung nicht unterscheidbar. Daher wird vorerst angenommen, daß es sich um eine Einmündung handelt. Die Suche verzweigt somit in zwei oder sogar drei Pfade. Bei der Verfolgung dieser Pfade wird entschieden, ob die Verzweigung in einen Seitenfluß gerechtfertigt ist. Dazu wird zunächst zu dem Nachbarn mit dem höchsten Summationswert (das ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der wichtigere Flußlauf) fortgeschritten und der entsprechende Pfad weiter verfolgt. Nach Beendigung dieses Pfades wird der Pfad mit dem nächstniedrigeren Summationswert verfolgt. Nun kann es sein, daß dieser in seinem Verlaufe auf den bereits markierten trifft; dann lag offenbar eine Talverbreiterung vor, der Pfad wird daher verworfen. Oder er stellt eben einen eigenen Flußlauf dar; in diesem Fall wird der Startpunkt der Verzweigung als Knotenpunkt markiert, und das Flußstück erhält eine eigene Nummer. Wird die Hierarchie des Flußnetzes mit aufgebaut, so ist ein neuer Knoten einzurichten.

Das vollständige Kriterium lautet für jeden Nachbarpunkt:

- 1) Summationswert größer als Mindestwert?
- 2) Höhe größer als Standpunktshöhe?
- 3) Noch nicht als Flußpunkt markiert?

Das Ende der Linie ist erreicht, wenn dieses Kriterium in mindestens einer Weise nicht erfüllt ist.

Um nur jene Flüsse zu erhalten, die im Gebiet eine gewisse Rolle spielen, damit ferner in Talverbreiterungen nicht fälschlicherweise ganz kurze Seitenflüsse entstehen, wird gefordert, daß die markierten Pfade eine gewisse Mindestlänge aufweisen müssen, um als eigene Flüsse ausgewiesen zu werden. Ist ein Pfad ab einem Knotenpunkt zu kurz, wird er verworfen und zurückschreitend gelöscht. Um auch vom Gebietsrand weg nur längere Flüsse zu markieren, gilt der Austrittspunkt eines Flusses aus dem Gebiet als der erste Punkt oberhalb eines (in diesem Fall imaginären) Knotens.

Im Falle der Verbreiterungen wird angenommen, daß der Pfad mit der höchsten Wassermenge der eigentliche Abflußpfad ist. Dies wird dadurch erreicht, daß er als erster markiert wird. Wenn nachfolgende Verzweigungen auf ihn stoßen, werden sie verworfen, während er bestehen bleibt.

Es ist noch der Fall zu untersuchen, daß ein Flußnetz mehrere Austrittspunkte besitzt. Dies kann vorkommen, wenn auf Grund von Datenfehlern oder ungünstigen Krümmungen des Tales mehrere Randminima existieren (Abb. 3-14).

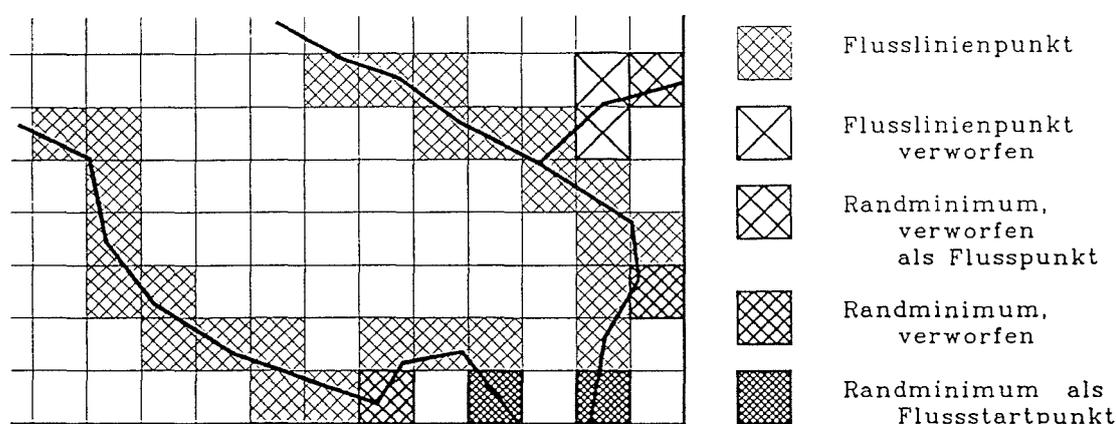


Abb. 3-14: Beispiele für doppelte Randminima

Dazu werden die Randminima von unten nach oben abgearbeitet, sodaß nach den obigen Kriterien die Linie vom jeweils tiefsten Austrittspunkt erhalten bleibt, während allfällige höhere - "scheinbare" - Austrittspunkte und ihre Pfade verworfen werden.

Durch das geschilderte Verfahren entsteht ein Flußnetz, das über Nachbarn 1. Ordnung zusammenhängt. Bild 3-15 zeigt die solcherart abgeleiteten Flußnetze aus dem Modell von Bild 3-8.



Abb. 3-15: Abgeleitete Flußnetze des Geländes aus Bild 3-8 mit hinterlegter Schräglichtschum-merung bei angenommener Nordost-Beleuchtung

Die Berechnung der Flüsse kann auch von vorgegebenen Punkten aus erfolgen. Es treten manchmal trotz verhältnismäßig kleiner oberflächlicher Einzugsgebiete Quellen auf, die der genannte Algorithmus nicht erkennen kann. Derartige Quellpunkte kann man als Flußstartpunkte vorgeben und durch Verfolgung hinunter zu den Flußlauf ermitteln. Es wird dabei jeweils zu demjenigen Unterlieger fortgeschritten, der den höchsten Wasserwert aufweist. Wurde das Flußnetz bereits vorher nach dem oben beschriebenen Verfahren aufgebaut, so endet der neue Flußlauf bei Erreichen eines anderen. Wird dieser andere Flußlauf nicht an seinem Beginn getroffen, so wird er geteilt und ein neuer Knotenpunkt eingerichtet. Anderenfalls wird der neue Flußlauf mit dem dadurch verlängerten alten vereinigt und erhält dessen Nummer.

3.3. Die Bestimmung der Einzugsgebiete

Es sollen nun die Einzugsgebiete zu den in Kapitel 3.2.3. hergeleiteten Flußstücken markiert und eingegrenzt werden. Dazu wird von der Definition des Einzugsgebietes ausgegangen (Kap. 2.3.4.): Von jedem Punkt eines Einzugsgebietes gibt es einen Abflußpfad zum Abflußpunkt. Der Abflußpunkt, der ja zugleich der Basispunkt ist, ist der unterste Punkt des jeweiligen Flußstückes. Verfolgt man vom Abflußpunkt weg alle Falllinien nach oben hin, so erhält man alle Punkte des Einzugsgebietes. Die Falllinienverfolgung nach oben hin gestaltet sich - wie bereits erwähnt - allerdings recht schwierig, da die Falllinien in dieser Richtung stark divergieren. Auch wegen der starken Richtungsverfälschungen bei Fortschreiten nur in den vier Achsrichtungen (Kap. 3.1.1.3.) kommt dieses Verfahren nicht in Frage. Das in der Folge beschriebene Verfahren umgeht diese Probleme und liefert zusätzlich zu den Einzugsgebieten auch die Unterteilungen, die sich aus der Zugehörigkeit zu den Flußstücken ergeben.

Das Einzugsgebiet eines Flußstückes beinhaltet auch die Einzugsgebiete aller Oberlieger, weswegen die Definition etwas zu erweitern ist: Die Einzugsgebiete der Oberlieger eines Flußstückes sollen ausgenommen sein vom Einzugsgebiet dieses Flußstückes.

3.3.1. Das Auffüllen des Geländes

Das Verfahren geht von folgender Überlegung aus: Stellt man ein plastisches Modell des Gebietes in ein Becken und füllt dieses langsam mit Wasser auf, so dringt das Wasser über die Täler höher und höher und füllt die Einzugsgebiete vom Gebietsrand weg. Achtet man darauf, wo das Wasser aus verschiedenen Einzugsgebieten zusammenfließt (meist über Käme hinweg) und markiert diese Linien, so erhält man die Grenzen der globalen Einzugsgebiete. Dieses Verfahren soll nun rechnerisch nachgebildet werden.

Das Auffüllen von unten entspricht wie bei der Summation (Kap. 3.2.2.) der Arbeit in einem nach Höhen sortierten Modell, diesmal allerdings aufsteigend. In jeder Rastermasche sind folgende Untersuchungen bezüglich der Nachbarn 1. Ordnung anzustellen:

- 1) Hat die Rastermasche keinen tiefer liegenden Nachbarn - sie muß in diesem Fall am Rand des Untersuchungsgebietes liegen, da es muldenfrei ist -, so eröffnet sie ein neues Einzugsgebiet, dem eine eindeutige Nummer gegeben wird (z. B. werden die Einzugsgebiete von 1 weg aufsteigend numeriert; die Reihenfolge entspricht dann zugleich der Höhe des Abflußpunktes: Je größer die Nummer, umso höher liegt der Abflußpunkt).
- 2) Hat die Masche tiefer liegende Nachbarn - diese wurden bereits vorher behandelt, da aufsteigend bearbeitet wird -, so wird die Zugehörigkeit der Masche aus der Zugehörigkeit der Nachbarn festgelegt, wobei folgende Fälle zu unterscheiden sind:
 - a) Alle tieferen Nachbarn gehören demselben Einzugsgebiet an - die Masche wird ebenfalls diesem zugeordnet.
 - b) Die tieferen Nachbarn gehören unterschiedlichen Einzugsgebieten an - die Masche liegt entlang einer Einzugsgebietsgrenze, wird also Grenzpunkt.
 - c) Alle tieferen Nachbarn sind Grenzpunkte - die Masche wird ebenfalls Grenzpunkt.
 - d) Bei Kombinationen von a) und c) oder von b) und c) wird wie im Falle von a) bzw. von b) gehandelt.

Die Flußstücke werden in diesem Verfahren derart berücksichtigt, daß die Matrix für die Nummern der Einzugsgebiete mit den Nummern der Flußstücke vorbelegt wird. Eine Rastermasche wird nunmehr nur dann zugeordnet, wenn sie noch unmarkiert war. Damit stellen die Flußstücke bereits markierte Einzugsgebietsteile dar. Es ist darauf zu achten, daß die Nummern eindeutig bleiben, was z. B. dadurch erreicht wird, daß neu zu numerierende Einzugsgebiete Nummern größer als die größte Flußstücknummer erhalten. Allerdings geht in diesem Falle die Korrelation zwischen der Höhe des Abflußpunktes und der Einzugsgebietsnummer teilweise verloren.

Abbildung 3-16 zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen für das Modell aus Bild 3-8. Die Einzugsgebiete sind mit unterschiedlichen Grautönen markiert. Man sieht, daß das Verfahren teilweise recht gute Ergebnisse liefert, daß aber die Grenzen (schwarz) streckenweise unsauber verlaufen: Entlang schwach ausgeprägter Kämmen zeigen sie oft starke Abhängigkeit von der Rasterrichtung, geben also den Kammverlauf nicht korrekt wieder.

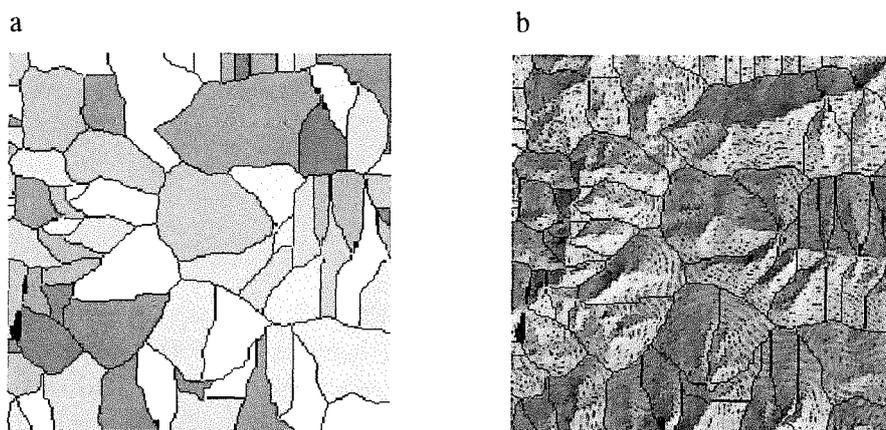


Abb. 3-16: Einzugsgebiete nach dem Auffüllen des Geländes von unten. a) Einzugsgebiete als Grauwerte, b) Grenzen (dunkel) auf Schummerung mit unterlegter Höhenstufendarstellung

3.3.2. Auffüllen nach Abflußanteilswerten

Um die Mängel des Verfahrens aus Kapitel 3.3.1. zu beheben, wird eine ähnliche Aufteilung des Wassers vorgenommen, wie sie bei der Summation verwendet wurde (Kap. 3.2.1.). In jeder Rastermasche werden in Abhängigkeit der Höhenunterschiede Gewichte gerechnet, die angeben, welchen Anteil ihres Wassers die Masche an das jeweilige Unterlieger-Einzugsgebiet entsendet. Diese Werte sollen deshalb Abflußanteilswerte (AAW) genannt werden. Es gilt in Anlehnung an Kapitel 3.2.1.:

Zum Nachbarn R_i entsendet die Masche R_0 die Wassermenge

$$w_i = w_0 \cdot \Delta h_i / h_i, \quad \text{wobei}$$

$$h = \sum_{i=1}^4 \Delta h_i \quad \text{und}$$

$$\Delta h_i = \begin{cases} h_0 - h_i & \text{für } h_0 > h_i \\ 0 & \text{für } h_0 \leq h_i \end{cases}$$

ist. Der Anteil a_{0i} des Nachbarn R_i am Abfluß von Masche R_0 beträgt somit

$$a_{0i} = \Delta h_i / h.$$

Der Anteil des Wassers, das R_0 an den Abflußpunkt des Einzugsgebietes über den Nachbarn R_i entsendet, aaw_{0ie} , ergibt sich als Produkt des Anteiles, den R_i an den Abflußpunkt entsendet, aaw_{ie} , mit dem Anteil, den R_0 an R_i entsendet:

$$aaw_{0ie} = a_{0i} \cdot aaw_{ie}.$$

Der Wert aaw_{ie} ist der Abflußanteilswert der Rastermasche R_i am Basispunkt des Einzugsgebietes e ; er liegt zum Zeitpunkt der Berechnung in R_0 bereits vor, da er in R_i als tieferem Nachbarn von R_0 bereits vorher berechnet wurde. Der Wert aaw_{0ie} ist der Abflußanteilswert der Masche R_0 , also des Standpunktes, am Basispunkt des Einzugsgebietes über den Pfad zum Punkt R_i . Die Abflußanteilswerte über die Pfade zu allen Nachbarn, die zum Einzugsgebiet e entwässern, aufsummiert ergeben den AAW des Standpunktes am Basispunkt:

$$aaw_{0e} = \sum_i (a_{0i} \cdot aaw_{ie}) = \sum_i \left(\frac{aaw_{ie} \cdot \Delta h_i}{\sum_j \Delta h_j} \right) = \frac{\sum_i (aaw_{ie} \cdot \Delta h_i)}{\sum_j \Delta h_j}, \quad (3-1)$$

i und j laufen von 1 bis 4 (Nachbarn 1. Ordnung).

Der AAW wird für den Basispunkt eines Einzugsgebietes mit 1 festgesetzt. Ebenso erhalten die Flußstücke den AAW 1. Abflußanteilswerte kleiner als 1 ergeben sich somit im Grenzbereich von Einzugsgebieten, während im Inneren eines Einzugsgebietes der AAW i. a. 1 beträgt. Da für die Einzugsgebietsnummer nur ein Wert zur Verfügung steht, muß die Entscheidung getroffen werden, welchem Einzugsgebiet die Rastermasche angehört. Dies ist sinnvollerweise jenes mit dem höchsten AAW. Damit die anderen Einzugsgebiete nicht benachteiligt sind, wird im Falle des Zusammentreffens zweier Einzugsgebiete dem zweiten jeweils die Ergänzung des Abflußanteilswertes zum

ersten auf 1 zuerkannt. Ist aaw_{ie_1} der AAW zum Einzugsgebiet e_1 (das ist dasjenige, zu dem R_i hauptsächlich entwässert), so ergibt sich aaw_{ie_2} , der AAW zum Einzugsgebiet e_2 , gemäß

$$aaw_{ie_2} = 1 - aaw_{ie_1}. \quad (3-2)$$

Die Werte aaw_{ie} in Formel (3-1) können nun je nach dem Einzugsgebiet, zu dem die Nachbarmasche entwässert, direkt die Abflußanteilswerte sein, oder sie müssen noch nach Formel (3-2) umgerechnet werden.

Es ist noch zu untersuchen, was geschieht, wenn drei Einzugsgebiete zusammentreffen. Dieser Fall ist selten und tritt meist nur in kleinen Zonen auf. Dann wird der Restanteil des Wassers, das ist $1 - aaw_{ie}$, in jedem Nachbarn willkürlich gleichmäßig auf die Einzugsgebiete e_2 und e_3 aufgeteilt. Der sich daraus ergebende Fehler ist im Normalfall klein.

Weiters ist zu überlegen, wie sich die Abflußanteilswerte zu einem Einzugsgebiet in die benachbarten Einzugsgebiete fortpflanzen. Da die Berechnung in derselben Weise erfolgt wie bei der Summation, tritt auch dieselbe Ungenauigkeit auf (Kap. 3.3.1.). Wieder findet durch das Zusammentreffen der Werte vieler Punkte ein gewisser Ausgleich statt, sodaß zwar der AAW in seinem Wert eher zu gering geschätzt wird, die Relation zum AAW des Nachbareinzugsgebietes aber ungefähr erhalten bleibt. Geringfügig benachteiligt kann - abhängig von der Rasterlage - bei schwach ausgeprägten Formen ein schmales Einzugsgebiet werden, das zwischen zwei anderen eingebettet liegt, da deren Abflußanteilswerte sich jeweils an den Grenzen ergänzen.

Abbildung 3-17a zeigt die solcherart bestimmten Einzugsgebiete zu dem Gelände aus Abbildung 3-8. Die Einzugsgebiete sind je nach ihrer Nummer in unterschiedlichen Grauwerten dargestellt, die Abflußanteilswerte alle auf exakt 1 gesetzt. Dargestellt sind somit jene Einzugsgebiete, zu denen jede Rastermasche mit größter Wahrscheinlichkeit gehört.

Abbildung 3-17b zeigt die Zonen, in denen Abflußanteilswerte kleiner als 1 auftreten, in dunklen Tönen. Je größer der AAW, umso heller die Darstellung. Die weißen Zonen besitzen den AAW 1. Zur besseren Kenntlichkeit sind Abflußanteilswerte kleiner als 1 mit einem Mindestgrauwert belegt, sodaß klar erkennbar ist, in welchen Zonen diese Werte ungleich 1 sind.

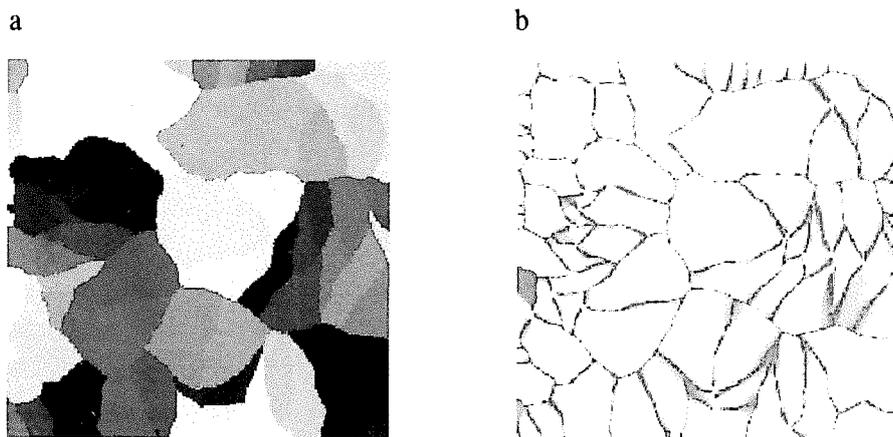


Abb. 3-17: Einzugsgebiete gemäß dem Verfahren nach Abflußanteilswerten. a) Einzugsgebiete, b) Abflußanteilswerte kleiner 1 als Grauwerte.

Bild 3-18 zeigt alle Rastermaschen, in denen der AAW kleiner als 1 ist, in einem mittleren Grau (unabhängig vom Wert des AAW), alle Rastermaschen mit AAW gleich 1 in Weiß. Unterlegt ist die Geländedarstellung mit Schummerung und Höhenstufen.

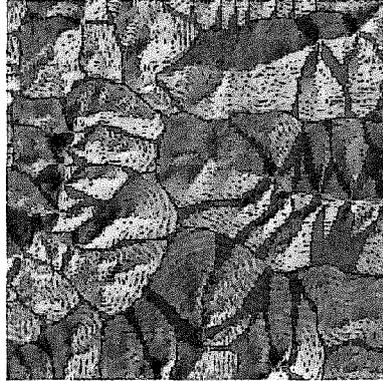


Abb. 3-18: Abflußanteilswerte kleiner 1 als dunkle Flächen auf Geländedarstellung

3.3.3. Ermittlung der Grenzlinien zwischen den Einzugsgebieten

Während sich im Verfahren des Auffüllens ohne Abflußanteilswerte (Kap. 3.3.1.) die Grenzen sofort ergaben, allerdings teilweise als Grenzzonen, fehlen sie im Verfahren mit Abflußanteilswerten (Kap. 3.3.2.). Sie müssen nunmehr gesondert ermittelt werden.

Kandidaten für Grenzpunkte sind offenbar jene Punkte, die Nachbarn aus anderen Einzugsgebieten besitzen. Markiert man alle diese Punkte, so erhält man ein zwei Maschen breites Band als Grenzlinie, da ja immer beide benachbarten Punkte aus zwei Einzugsgebieten das genannte Kriterium erfüllen. Es soll nun immer der höhere der beiden Nachbarn als Grenzpunkt markiert werden. Dazu werden alle Kandidaten für Grenzpunkte von unten nach oben untersucht. Besitzt ein solcher Punkt höhere Nachbarn, die einem anderen Einzugsgebiet angehören, so werden diese als Grenzpunkte markiert. Im Falle, daß ein zu untersuchender Punkt bereits als Grenzpunkt markiert ist, wird er nicht weiter untersucht. Solcherart entsteht eine Linie, die die Grenzen je nach Richtung des Grenzverlaufes relativ zum Raster über Nachbarschaften der Ordnung 1 oder 1,5 darstellt. Bild 3-19 zeigt die Kandidaten der Grenzpunkte zu den Einzugsgebieten aus Abbildung 3-17.

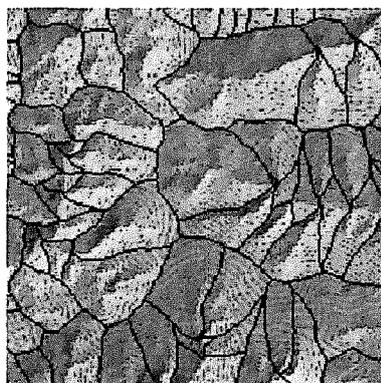


Abb. 3-19: Einzugsgebietsgrenzen auf das Gelände gelegt.

Abbildung 3-20 zeigt in Weiß die Einzugsgebietsgrenzen und in Schwarz die Flüsse. Die rastermäßige Berechnung der Flüsse und Einzugsgebiete ist damit abgeschlossen. Es könnte nunmehr eine Vektorisierung der Linien anschließen (soweit sie bei den Flüssen nicht schon während der Markierung erfolgte, wie in Kap. 3.2.3. beschrieben).

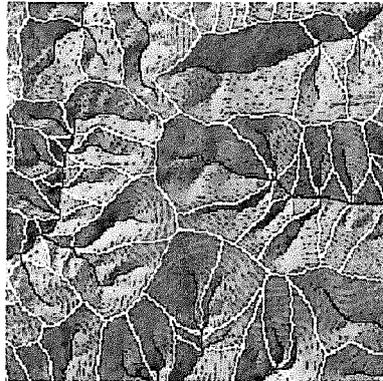


Abb. 3-20: Flüsse und Einzugsgebietsgrenzen mit hinterlegter Geländedarstellung

3.4. Mulden und Muldeneinzugsgebiete

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Vorhandensein eines in 1. Ordnung muldenfreien Höhenmodelles vorausgesetzt. Da normalerweise Mulden in einem DHM auftreten, ist nun zu überlegen, wie ein muldenfreies Modell gewonnen werden kann.

Die Erstellung eines derartigen Modelles ist verhältnismäßig heikel. Es ist nicht möglich, aus den mit verschiedenen Fehlern behafteten und von der Willkür des Rasters abhängigen Rasterpunkthöhen die tatsächliche Geländeform wiederherzustellen. Die Elimination der Mulden erfolgt daher nach willkürlichen Kriterien, wobei als Ziel gesetzt wird, daß im Zuge der Elimination der Mulden eine möglichst geringe Veränderung der Topographie stattfinden soll.

Im günstigsten Fall kann schon bei der Erstellung des Höhenmodelles auf die besonderen Ansprüche der Hydrologie Rücksicht genommen werden. Hutchinson (1989) stellt dazu ein Verfahren vor, das ein Rastermodell ohne Scheinmulden der Ordnung 1,5 und größer erstellt. In einem iterativen Verfahren mit sukzessiver Rasterverdichtung werden Scheinmulden in jeder Stufe der Verdichtung unter Berücksichtigung der Stützpunkte eliminiert. Üblicherweise allerdings stehen derartige, aus hydrologischer Sicht hochwertige Modelle nicht zur Verfügung. Mulden müssen daher i. a. ohne Kenntnis der Stützpunkte aus den Rasterpunkthöhen alleine beseitigt werden.

Verschiedene Ansätze zur Elimination der Mulden sind denkbar. Eine Glättung des digitalen Höhenmodelles, wie z. B. von O'Callaghan und Mark (1984) erwähnt, reduziert zwar meist die Anzahl der Mulden; größere Mulden bleiben aber erhalten, und der weitaus größere Geländebereich - der ja muldenfrei ist - wird ebenso geglättet. Eine Glättung nur in Bereichen mit Mulden ist zwar einfach vorzunehmen, vermag aber natürlich die größeren Mulden ebenso nicht zu entfernen.

Eine andere Methode besteht darin, den eigentlichen Muldenbereich auf die Höhe des Abflusses anzuheben (Jenson und Domingue 1988, Jenson 1991). Man verliert aber dadurch jegliche

Information über die Geländeform innerhalb der Mulde. Namentlich bei ausgedehnten Mulden wird eine größere Fläche vollständig eingeebnet. Da weiters die hier vorgestellten Methoden nicht auf die Bearbeitung völlig ebener Zonen ausgelegt sind, scheidet dieses Verfahren ebenfalls aus. Es wird daher in den folgenden Kapiteln ein anderer Ansatz gebracht. Kapitel 3.4.1. stellt ein Verfahren zum Auffinden von größeren Mulden vor, die Kapitel 3.4.2 und 3.4.3. zeigen Methoden der Elimination, die sich für unterschiedliche Arten von Mulden eignen.

O'Callaghan und Mark (1984) verzichten auf die Veränderung der Geländeform und erstellen nur ein Feld, das für jeden Rasterpunkt die Richtung zum Unterlieger (einer der acht Nachbarpunkte) angibt. Diese Abflußrichtungen weisen ursprünglich zum Muldenpunkt hin und werden derart verändert, daß ein Abfluß längs eines Pfades zum Abflußpunkt hin erfolgen kann. Im wesentlichen entspricht dies der hier vorgestellten Absenkung des in Kapitel 2.3.5. definierten Muldenpfades (Kap. 3.4.2.).

Als Abflußpunkt wird meist - mangels besserer Informationen - der niedrigste Punkt längs des Randes des Muldeneinzugsgebietes herangezogen (O'Callaghan und Mark 1984; Marks, Dozier und Frew 1984). Jenson und Domingue (1988) verfeinern diese Definition derart, daß auch mehrere Abflußpunkte möglich sind. Das Problem hierbei ist allerdings, daß aus den Rasterpunkthöhen in der Regel nicht ersichtlich ist, welche der höheren Randminima als Abflußpunkte in Frage kommen und oft auch innerhalb der Mulde die Abgrenzung, welche Bereiche zu welchem Abflußpunkt entwässern, nicht aus der (meist verfälschten) Geländeform ersichtlich ist. Dies hängt nicht zuletzt damit zusammen, daß die meisten Mulden auf Grund von Datenfehlern oder als Folge des Interpolationsverfahrens entstehen, also nicht die eigentliche Geländeform wiedergeben.

3.4.1. Bestimmen der Mulden durch Auffüllen

In Kapitel 3.3.1. wurde das Verfahren des Auffüllens des Geländes vorgestellt, um mit seiner Hilfe die Einzugsgebiete einzugrenzen. Dasselbe Verfahren eignet sich hervorragend, um auch die Muldeneinzugsgebiete zu markieren und zuzuordnen. Dazu sind einige Erweiterungen nötig, die bei der Untersuchung eines Punktes bezüglich seiner Nachbarn 1. Ordnung eingefügt werden.

Da das Gebiet nun nicht muldenfrei sein muß, kann es vorkommen, daß ein Punkt keine tieferliegenden Nachbarn 1. Ordnung besitzt und nicht am Rand des Untersuchungsgebietes liegt. Ein solcher Punkt ist Muldenpunkt und eröffnet ein Muldeneinzugsgebiet. Zur leichteren Erkennbarkeit erhalten die Muldeneinzugsgebiete negative Nummern.

In der Folge kann der Fall eintreten, daß unter den tieferliegenden Nachbarn einer Masche solche aus einem globalen und solche aus einem Muldeneinzugsgebiet auftreten. Stößt das Muldeneinzugsgebiet zum ersten Mal über einen derartigen Punkt auf ein globales Einzugsgebiet, so liegt der Abflußpunkt vor. Es sind nun mehrere Varianten möglich, wie weiter verfahren wird:

- 1) Die Bearbeitung erfolgt sofort. Das Gelände wird derart verändert, daß keine Mulde mehr vorhanden ist; das Muldeneinzugsgebiet selbst wird zur Gänze dem globalen Einzugsgebiet zugeordnet.
- 2) Für jedes Muldeneinzugsgebiet wird ein Eintrag in einer Tabelle angelegt, der den Muldenpunkt, den Abflußpunkt und das übergeordnete Einzugsgebiet ausweist (s. Tabelle 3-21). Dieser Eintrag

wird bei Auftreten eines neuen Muldenpunktes angelegt und bei Auftreten des Abflußpunktes aktualisiert.

Mulden-EZG-Nr.	Muldenpunkt	Abflußpunkt	Übergeordnetes EZG
-1	24 / 36	23 / 32	+14
-2	26 / 49	25 / 41	+14
-3	29 / 55	28 / 60	+14
-4	28 / 58	28 / 56	-3
...

Abb. 3-21: *Beispiel einer Muldeneinzugsgebiets-Tabelle. Für Muldenpunkt und Abflußpunkt werden die Adressen ihrer Indexfeld-Einträge abgelegt, was eine Reihe von Vorteilen bei der Arbeit bietet. Hier wurden zur besseren Lesbarkeit die Matrixadressen in der Form Spalte/Zeile angegeben.*

Die eigentliche Bearbeitung - das ist die Veränderung der Geländeoberfläche - findet erst nach Beendigung des Auffüll-Verfahrens für alle Muldeneinzugsgebiete statt. Ist ein Muldeneinzugsgebiet bereits über den Abflußpunkt einem anderen Einzugsgebiet (oder Muldeneinzugsgebiet) zugeordnet, so kann in der Folge jeder Punkt, der diesem Muldeneinzugsgebiet zugewiesen würde, entsprechend den Tabelleneinträgen dem zum jeweiligen Zeitpunkt letzten Einzugsgebiet der Zeigerkette zugeordnet werden: Ist das Muldeneinzugsgebiet einem anderen Muldeneinzugsgebiet zugeordnet, so wird der Eintrag zu diesem untersucht. Dies geht solange weiter, bis ein Muldeneinzugsgebiet noch keinen Abflußpunkt besitzt oder bereits einem globalen Einzugsgebiet zugeordnet wurde. Diesem Einzugsgebiet oder Muldeneinzugsgebiet gehört der aktuelle Punkt schließlich an.

Es wird damit noch eine Erweiterung der Untersuchung der Nachbarpunkte nötig: Ist ein Muldeneinzugsgebiet als Nachbar beteiligt, so ist immer die laut Tabelle letzte Stufe der Zuordnung als die Einzugsgebietsnummer heranzuziehen. Anderenfalls würden fälschlich sämtliche Randpunkte des Muldeneinzugsgebietes zu Abflußpunkten werden.

Über dieses Verfahren ist es auch möglich, mehrere Abflußpunkte für ein Muldeneinzugsgebiet zuzulassen (vgl. Jenson und Domingue 1988). Dies wurde allerdings im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt.

Die beiden Verfahren eignen sich für unterschiedliche Arten der Geländeänderung. Es soll nun näher auf Möglichkeiten dieser Veränderung und damit der Erstellung eines muldenfreien digitalen Höhenmodelles eingegangen werden.

3.4.2. Absenken der Muldenpfade

Laut Definition ist der Muldenpfad jener Pfad, der vom Muldenpunkt (MP) über den Abflußpunkt (AP) und außerhalb der Mulde bis unterhalb des Muldenpunktes verläuft (Kap. 2.3.5.). Dieser Pfad führt von MP zu AP gleichmäßig bergauf, von AP hinaus zu gleichmäßig bergab. Er soll nun derart abgesenkt werden, daß er von MP bis AP und weiter bis zu seinem Ende bergab verläuft (Abb. 3-

22). Dazu wird längs des Pfades von MP weg jeder Punkt um einen kleinen Wert ε abgesenkt. Da laut Definition jeder Punkt des Muldeneinzugsgebietes einen immer bergauf verlaufenden Pfad zum Muldenpunkt besitzt (Kap. 2.3.4.), kann jeder Punkt des Muldeneinzugsgebietes über diesen Pfad entwässern. Die Nachbarpunkte des Abflußpfades bleiben unverändert. Um daher keine tief eingeschnittenen Abflußpfade zu erhalten, sollte dieses Verfahren nur bei flacheren Mulden zur Anwendung gelangen.

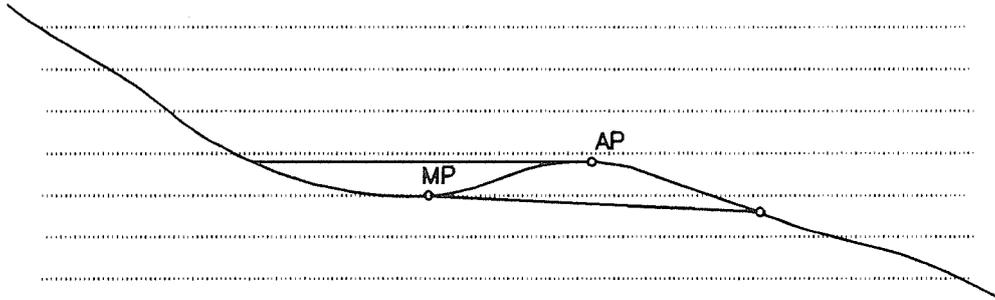


Abb. 3-22: Längenschnitt durch eine Mulde und Muldenpfad

Der Muldenpfad muß vom Abflußpunkt nach außen hin nicht existieren. Folgende Sonderfälle sind denkbar:

- 1) Der Rand des Untersuchungsgebietes wird erreicht, bevor die Geländeoberfläche tiefer liegt als der Muldenpunkt. Da der Rand des Gebietes als Möglichkeit des Abflusses angesehen wird, kann die Mulde hierher entwässern. Dies kann allerdings fehlerhaft sein; s. dazu Kapitel 5 über Genauigkeiten.
- 2) Der Muldenpfad endet vorzeitig in einer weiteren Mulde. Es liegt ein Muldensystem vor, der Abflußpunkt verbindet die beiden Mulden. Um in diesem Fall immer in die richtige Richtung zuzuweisen, ist der Muldenpfad vom höher zum niedriger gelegenen Muldenpunkt zu wählen (vgl. auch O'Callaghan und Mark 1984). Diese Vorgangsweise liegt auch deshalb nahe, weil der tatsächliche Abfluß mit höherer Wahrscheinlichkeit in dieser Richtung erfolgt als in der Gegenrichtung. Da ferner die beiden Mulden nunmehr zu einer vereint werden, die später ebenfalls zugeordnet wird, kann bei dieser Zuordnung später gegebenenfalls eine Korrektur erfolgen (Abb. 3-23).

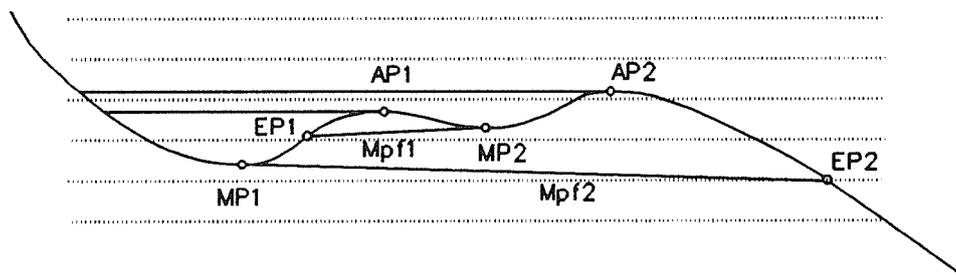


Abb. 3-23: Zuordnung eines Muldensystemes. Die falsche Zuordnungsrichtung in Mpf_1 wird durch Mpf_2 korrigiert.

Wird bei der Vergabe von Nummern für die Muldeneinzugsgebiete streng nach der Reihenfolge des Auftretens der Muldenpunkte vorgegangen, so ist immer die Mulde mit der absolut kleineren Nummer die tiefere.

Das Verfahren eignet sich sehr gut zur Elimination kleinerer Mulden und von Mulden in sehr flachen Gebieten. Der Muldenpfad kann, da er meist nur kurz ist und in Tälern verläuft, ausgehend vom Abflußpunkt immer von einem Punkt zum tiefsten Nachbarn hin verfolgt werden, was eine einfache Bestimmung gestattet (s. Kap. 4.1.).

3.4.3. Anheben der Mulden

Bei größeren und tieferen Mulden erweist sich das in Kapitel 3.4.2. vorgestellte Verfahren der Absenkung des Muldenpfades als ungünstig, da es tiefe Geländeeinschnitte verursacht. Von der Entstehung her sind solche Mulden außerdem meist reine Interpolationseffekte, wie sie bei ungünstiger Stützpunktverteilung auftreten können (z. B. in Trogtälern bei Verwendung digitalisierter Höhenlinien, s. Abb. 3-24).

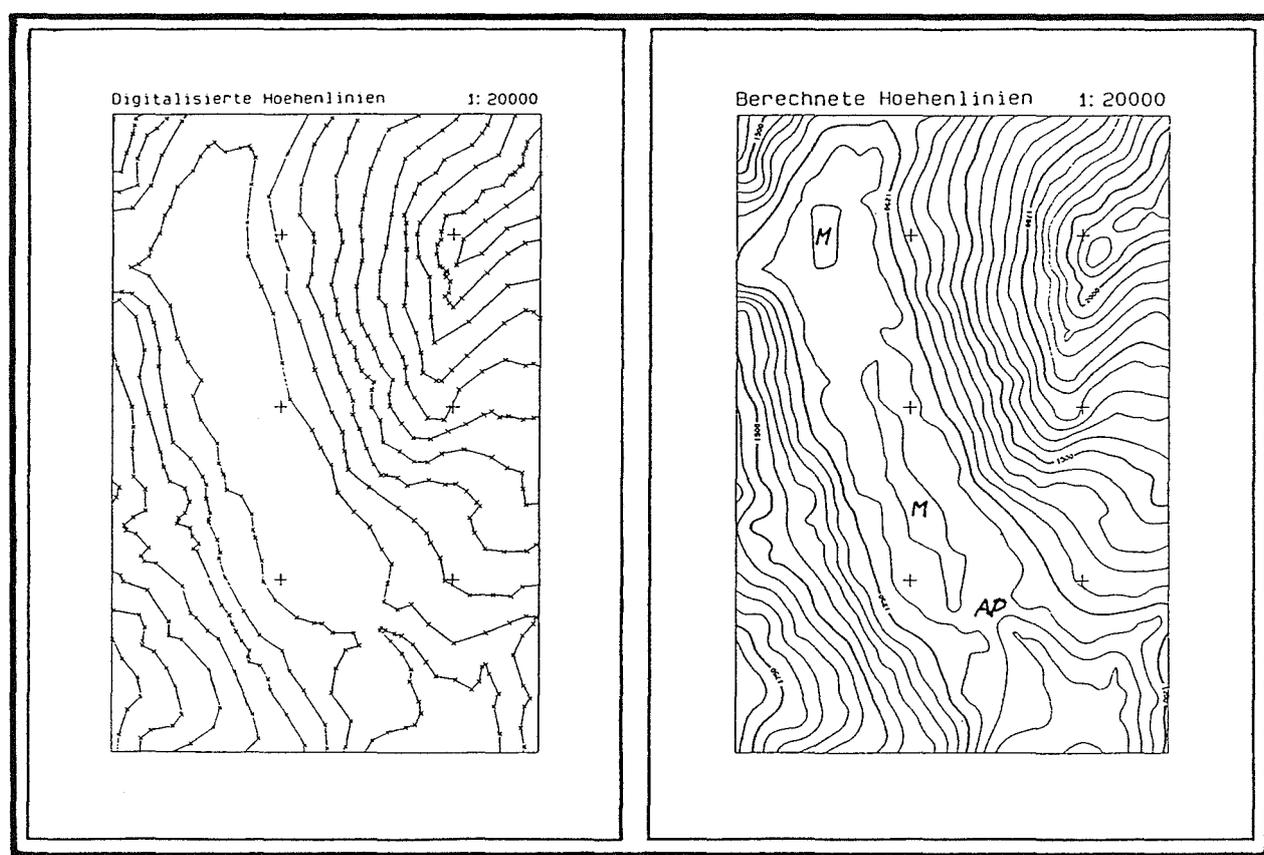


Abb. 3-24: Trogtal aus digitalisierten Höhenlinien im Grundriß: a) Digitalisierte Höhenlinien (100m Intervall) mit den Linienpunkten, b) berechnete Höhenlinien (50m).

Wird die Tallinie nicht zusätzlich digitalisiert, so entstehen im Bereich von Talaufweitungen Mulden (Bereich "M" in Abb. 3-24), im Bereich von Talverengungen ein Sattelpunkt ("AP" in Abb. 3-24). Dies gilt dann, wenn der Algorithmus zur Interpolation des Geländemodelles nicht längs der Talachse zwischen den Schichtenlinien für eine monotone Höhenänderung sorgt.

Da zumeist der Abflußpunkt etwas zu hoch liegt und außerdem ein Anheben der Mulde über den alten Abflußpunkt das Auftreten neuer Mulden auf der anderen Seite der Mulde bewirken könnte, wird der Abflußpunkt geringfügig abgesenkt. Er soll derart abgesenkt werden, daß er noch höher liegt als der nächstniedrigere äußere (also nicht der Mulde angehörende) Nachbar, um nicht eine neue

Mulde entstehen zu lassen; er soll aber auch nicht nennenswert unter den Muldenpunkt abgesenkt werden, um das Gelände nicht unnötig stark zu verändern.

Das Anheben der Mulde wird nun vom Abflußpunkt weg vorgenommen. Vorliegen sollen ein Feld mit den Höhenwerten der Rasterpunkte, ein zweites Feld mit den Nummern der Einzugsgebiete und die Muldeneinzugsgebiets-Tabelle. Ausgehend vom Abflußpunkt wird die Mulde in "Fronten" bearbeitet: Alle Nachbarpunkte des Abflußpunktes, die der Mulde angehören, stellen die erste Front dar. Die jeweils nächste Front ist gegeben durch alle Nachbarn der vorhergehenden, die in der Mulde liegen und noch nicht bearbeitet wurden (Abb. 3-25). Innerhalb einer Front werden die Punkte in gemäß dem Höhenfeld aufsteigender Reihenfolge bearbeitet. Der erste Punkt wird auf einen geringfügig höheren Wert (z. B. um ϵ höher) als der niedrigste Nachbar dieses Punktes in der vorhergehenden Front angehoben. Alle anderen Punkte werden entsprechend ihrer Sortierreihenfolge in der Front um ϵ höher als der jeweilige Vorgänger gesetzt (Abb. 3-25).

----- Höhenwerte -----							
58.000	56.000	52.000	47.000	55.000	59.000	62.000	65.000
55.000	51.000	47.000	41.000	46.000	55.000	60.000	61.000
52.000	48.000	44.000	42.000	42.000	44.000	49.000	57.000
49.000	46.000	42.000	38.000	41.000	45.000	46.000	50.000
45.000	44.000	40.000	37.000	39.000	41.000	40.000	45.000
41.000	<u>43.000</u>	42.000	40.000	43.000	45.000	47.000	50.000
46.000	47.000	45.000	42.000	45.000	46.000	51.000	55.000
51.000	53.000	50.000	45.000	48.000	50.000	53.000	58.000
----- Fronten -----							
			7-2				
			6-3	7-3			
		4-2	5-1	6-1			
		3-1	MP: 4-1	5-2	6-2	7-1	
AP: <u>1-1</u>		2-1	3-2	4-4			
			4-3				
----- Höhen ohne Mulden -----							
58.000	56.000	52.000	47.000	55.000	59.000	62.000	65.000
55.000	51.000	47.000	41.079	46.000	55.000	60.000	61.000
52.000	48.000	44.000	41.076	41.083	44.000	49.000	57.000
49.000	46.000	41.064	41.064	41.068	45.000	46.000	50.000
45.000	44.000	41.057	41.060	41.068	41.071	41.076	45.000
41.000	<u>41.049</u>	41.053	41.060	41.071	45.000	47.000	50.000
46.000	47.000	45.000	41.068	45.000	46.000	51.000	55.000
51.000	53.000	50.000	45.000	48.000	50.000	53.000	58.000

Abb. 3-25: Anheben einer Mulde in Fronten:

- Ausgangswerte (Höhenwerte); fett: Mulde, unterstrichen: AP, kursiv: MP
- Fronten: Die Nummer vor dem "-" gibt die Frontnummer an, die Nummer danach die Reihenfolge der Bearbeitung in der jeweiligen Front
- Höhenwerte des angehobenen Geländes

Die solcherart angehobene Mulde kann zur Gänze zum Abflußpunkt entwässern.

Es ist noch zu überlegen, wie die Veränderung der Höhen auf den Abfluß- und den Muldenpunkt abgestimmt werden soll. Das Anheben der Mulde soll nicht zur Entstehung neuer Mulden führen. Da sämtliche Punkte der Mulde tiefer liegen als der Abflußpunkt und dementsprechend sämtliche Begrenzungspunkte außerhalb der Mulde zumindest die Höhe des Abflußpunktes aufweisen, kann als Bedingung gesetzt werden, daß kein Punkt der Mulde über die Höhe des alten Abflußpunktes

angehoben werden soll. Durch die Verwendung der Fronten entstehen Pfade in der angehobenen Mulde, die von Punkt zu Punkt um ε , in Einzelfällen auch um $2 \cdot \varepsilon$, $3 \cdot \varepsilon$ oder mehr ansteigen. Kennt man den längsten Pfad, so kann man ungefähr abschätzen, um wieviel der neue Abflußpunkt abgesenkt werden muß, damit die genannte Bedingung erfüllt ist. Als guter Näherungswert hat sich bewährt, den Abflußpunkt mindestens um $3 \cdot n \cdot \varepsilon$ abzusenken, wobei n die Pfadlänge zwischen Abfluß- und Muldenpunkt, ausgedrückt in Rasterweiten, darstellt.

Für das Inkrement ε wird ein Wert gewählt, der möglichst groß ist (um möglichst große Höhenunterschiede in der angehobenen Mulde zu erhalten) und dennoch die genannte Bedingung erfüllt. Nimmt man die längste Pfadlänge mit $3 \cdot n$ an (dreifacher Abstand zwischen AP und MP), so ergibt sich für ε :

$$\varepsilon = (h_a - h_n)/3 \cdot n$$

mit h_a = ursprüngliche Höhe des Abflußpunktes,

h_n = Höhe des abgesenkten Abflußpunktes,

n = Abstand zwischen AP und MP in Rasterweiten.

Aus numerischen Gründen darf ε nicht zu klein werden. Bei einfach genauen Gleitkommazahlen der meisten modernen 32-Bit-Rechner stehen ca. 24 Bits für die Mantisse zur Verfügung, was einer Auflösung von 1:16777216 entspricht. Bei einer Seehöhe von 2000m bedeutet dies eine Auflösung von ca. 0,1mm, bei 200m Seehöhe 0,01mm. Um auch im (meist flachen) Tiefland die höhere Auflösung zu ermöglichen, kann man entweder den Wert ε gemäß $\varepsilon = h_a/16777216$ aus der Höhe des Abflußpunktes errechnen, oder man verwendet anstelle der Additionskonstante ε eine Multiplikationskonstante δ der Form

$$\delta = 1 + \varepsilon_G = 1,000\ 000\ 12 \quad \text{für Mantissen mit effektiven 24 Bits,}$$

wobei ε_G nicht kleiner als die Auflösung der Gleitkommazahlen sein darf. Für kleinere und tiefere Mulden kann ε_G durchaus größere Werte annehmen. Wenn der längste Pfad m Punkte weit verläuft, muß zur Erfüllung der genannten Bedingung gelten:

$$h_n \cdot \delta^m \leq h_a.$$

Daraus ergibt sich für δ :

$$\delta \leq (h_a/h_n)^{1/m},$$

wobei zusätzlich gelten muß:

$$\delta \geq 1 + \varepsilon_G.$$

Die zweite Bedingung ist in jedem Fall einzuhalten. Würde dadurch der zuerst abgeschätzte Wert vergrößert, so kann es zum Auftreten von neuen Mulden nach dem Auffüllen kommen. Es muß daher in diesem Fall ein weiterer Test auf das Vorhandensein von Mulden durchgeführt werden.

Die Vorteile des Verfahrens liegen in der groben Bewahrung der Höhenverhältnisse quer zur Mulde (dies könnte durch entsprechende Methoden bei der Berechnung der Höhen einer Front noch verbessert werden) und in der Möglichkeit, Systeme von Mulden in einem Guß zuzuordnen.

3.5. Das Verfahren in der Praxis

Zunächst werden die Muldenpunkte mit einem lokalen Filter geglättet: Jeder Muldenpunkt wird auf den Mittelwert seiner 4 Nachbarn 1. Ordnung gesetzt. Dies beseitigt zahlreiche, an sich völlig unbedeutende, kleine Mulden (vgl. Jenson und Domingue 1988). Sodann werden mit den Verfahren aus Kapitel 3.4.1. die Muldeneinzugsgebiets-Tabellen aufgebaut. Über diese Tabellen werden die Muldeneinzugsgebiete wie in Kapitel 3.4.3. aufgefüllt. In einem dritten Schritt schließlich werden etwaige verbleibende Mulden mittels der Absenkung ihrer Muldenpfade laut Kapitel 3.4.2. entfernt. In sehr flachen Gebieten kann es aus numerischen Gründen nötig werden, den Schritt 3 mehrfach zu wiederholen.

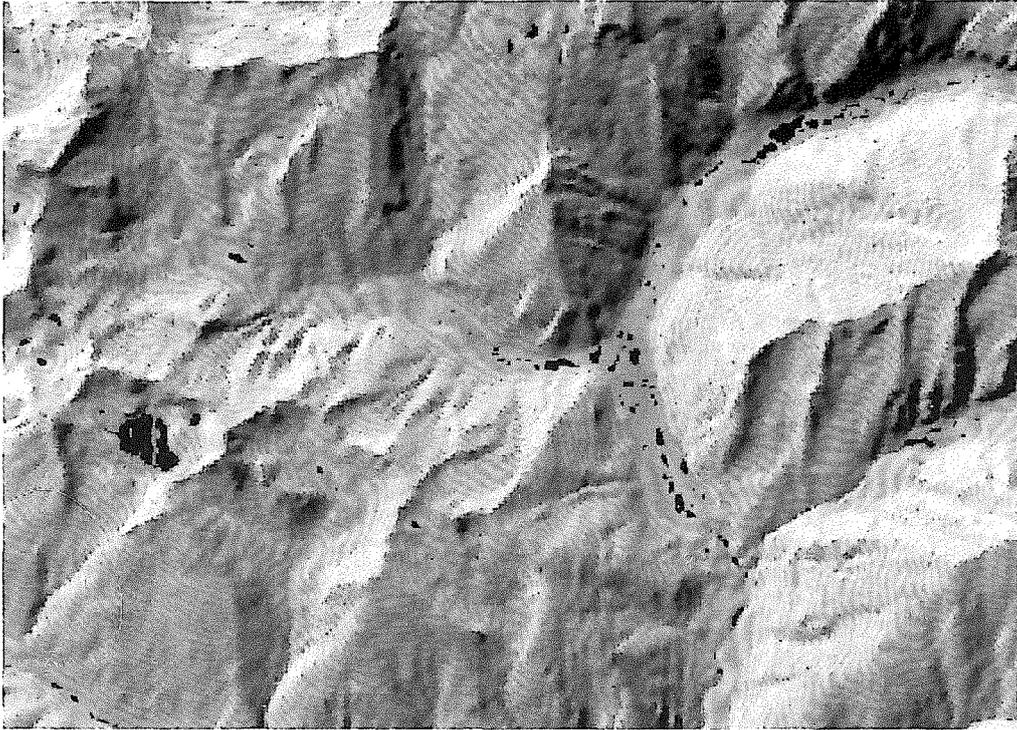
Da in Mulden in den allermeisten Fällen keine Einzugsgebietsgrenzen verlaufen, wird innerhalb der Mulden auf die Abflußanteilschwerte aus Kapitel 3.3.2. verzichtet. Außerhalb kann man sie aber mitrechnen, wodurch die Zuordnung der globalen Einzugsgebiete und die Veränderung des Höhenmodelles in einem Rechenschritt vor sich gehen. Wird mit negativen Nummern für Muldeneinzugsgebiete gearbeitet, so kann aus der Einzugsgebietsnummer jeweils sehr einfach entschieden werden, ob die Abflußanteilschwerte zu berechnen sind. Das Indexfeld muß nach der Geländeänderung neu sortiert werden, wobei man sich auf jene Bereiche im Indexfeld beschränken kann, in denen Höhen verändert wurden. Im Anschluß daran werden die Flüsse nach den Verfahren der Kapitel 3.2.2. und 3.2.3. ermittelt, wobei das Indexfeld für das modifizierte Summationsverfahren bereits vorhanden ist. Für die Ermittlung der (Unter-) Einzugsgebiete zu den Flußstücken kann ebenfalls das bereits sortierte Indexfeld übernommen werden. Parameter sind lediglich für die Berechnung der Flußläufe anzugeben, nämlich die minimale Flußlänge und die Mindestgröße des Einzugsgebietes sowie allfällige besondere Flußstartpunkte (s. Kap. 3.2.3.).

Abbildung 3-26 zeigt das Ergebnis dieses Verfahrens für das Modell aus Bild 3-5. Bild a zeigt die Mulden im ursprünglichen Gelände als schwarze Flächen, Bild b stellt das korrigierte Modell dar und Bild c zeigt die berechneten Flußlinien und Einzugsgebietsgrenzen. Das Modell beinhaltet knapp 300000 Punkte ($637 \cdot 463$), die Rasterweite beträgt in beiden Richtungen 20m. Es traten 215 Mulden mit insgesamt 2165 Punkten auf. Die Berechnungen erforderten auf einer VAX-Station 3200-M76 ca. 9 Minuten CPU-Zeit, wobei zu berücksichtigen ist, daß eine Reihe von Operationen sehr ineffizient oder redundant abläuft, da der Algorithmus nur im Rahmen der Entwicklungsumgebung (s. Anhang) in Form von teilweise recht umfangreichen Prozeduren getestet wurde. Die Rechenzeiten der Verwaltung des Entwicklungssystems sind in dieser Zeitangabe nicht enthalten und schlagen mit weiteren ca. 5 Minuten zu Buche. Werden die Schritte des Verfahrens in einem eigenen Programm zusammengefaßt, so läßt sich die Berechnungszeit mit Sicherheit auf die Hälfte herabsetzen.

Abbildung 3-27 zeigt ein Geländemodell mit extrem vielen Mulden: Von den knapp 200000 Punkten ($351 \cdot 551$) waren 19389 Punkte in 9217 Mulden. Bild a zeigt das ursprüngliche Gelände, Bild b die Mulden als schwarze Flecken im Gelände, Bild c das korrigierte Gelände und Bild d die nach der hier angegebenen Methode berechneten Flüsse und Einzugsgebiete, wobei als Mindestgröße für Einzugsgebiete $0,6\text{km}^2$, als Mindestlänge für Flüsse 40 Rasterweiten vorgegeben wurde. Die Rasterweite beträgt in diesem Modell in beiden Richtungen 50m, die Seehöhen schwanken zwischen 500m und 2000m.

Abb. 3-26: Geländemodell aus Bild 3-5, Maßstab ca. 1:220000. a) Mulden im Gelände (schwarz); b) verändertes Gelände, c) Einzugsgebiete und Flüsse (folgende Seiten).

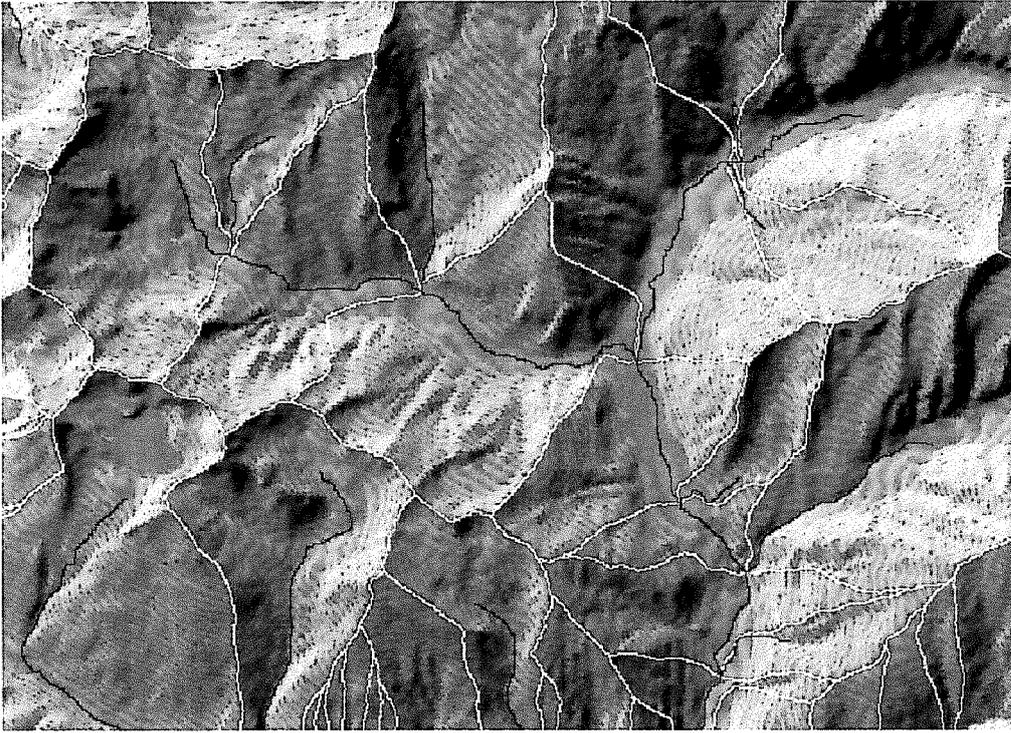
a



b



c



Folgende Seite:

Abb. 3-27: Kirchdorf, Maßstab ca. 1:90000. a) Ursprüngliches Gelände; b) Mulden (schwarz); c) verändertes Gelände; d) Flüsse und Einzugsgebiete nach der beschriebenen Methode.

a



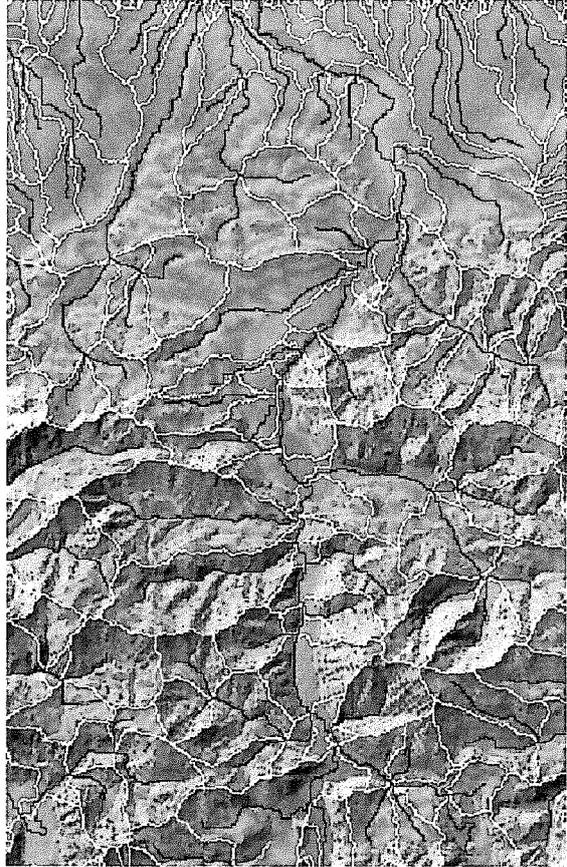
b



c



d



4. Falllinienberechnung im Raster

Die Falllinie als die Linie stärkster Geländeneigung spielt in hydrologischen Untersuchungen eines Geländes eine überragende Rolle, da sie weitestgehend mit der Abflußlinie des Wassers an der Oberfläche zusammenfällt. Von Bedeutung ist sie u.a. zur Flußlinienermittlung, zur Ermittlung von Einzugsgebieten, zur Bestimmung der Abflußlinie von einem gewissen Punkt oder Bereich (Ausbreitung von Hochwasser oder Verunreinigungen). Darüber hinaus spielt sie eine wichtige Rolle im Agrarbereich zur Planung und Festlegung der Bebauungsrichtung in geneigtem Gelände und im Straßenbau zur Bestimmung des Verhaltens von Kaltluft in Nebelbecken (z.B. zur Planung von Durchlässen in Dämmen). Es werden nun einige Methoden gezeigt, wie man im digitalen Höhenmodell die Falllinien ermitteln kann.

4.1. Berechnung einzelner Falllinien

Die Berechnung erfolgt rastermaschenweise, wobei beim Übergang von einer Masche zur nächsten unterschiedliche Berechnungsmethoden angewendet werden können. Da im Gelände die Abflußlinien nahezu immer zu konvergieren neigen - außer in den Kammzonen, die für diese Untersuchung aber von untergeordneter Bedeutung sind -, erfolgt die Berechnung von oben nach unten. Von unten nach oben wird die Berechnung der Falllinien auf Grund der Divergenz in dieser Richtung nur zur Ermittlung der Einzugsgebiete durchgeführt; die Ermittlung einer Falllinie hinauf zu ist ja in der Regel nicht eindeutig möglich.

Die einfachste Methode besteht darin, von einer Rastermasche jeweils zum niedrigsten Nachbarn fortzuschreiten. Die Methode ist nur in Gebieten mit stärkerer Konvergenz der Falllinien anwendbar, da sonst die Willkürlichkeit der Rasterrichtung zu stark zum Tragen kommt. Auf diese Weise wird z. B. der Muldenpfad gefunden (Kap. 3.4.3.). Eine wesentliche Verbesserung ergibt sich unter Zulassung aller 8 Nachbarn der Ordnung kleiner 1,5. In diesem Fall wird auch in Zonen geringerer Falllinienkonvergenz eine richtige Linienführung erzielt (vgl. Kap. 3.1.1.3.). Dennoch zeigt in längeren Schräghängen auch diese Methode Verfälschungen. Abbildung 4-1 zeigt Beispiele für Falllinien nach den genannten Methoden in einem schräg zum Raster verlaufenden Hang.

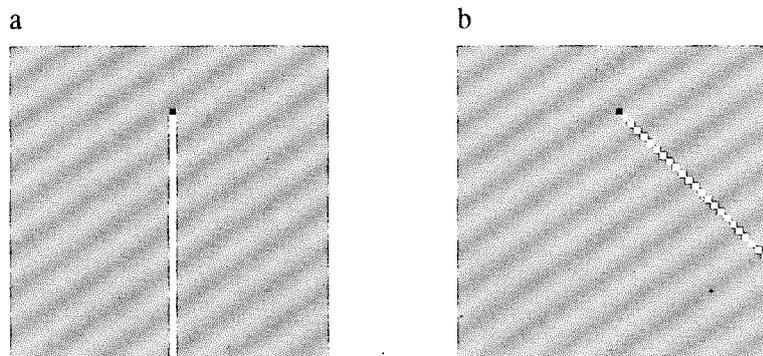


Abb. 4-1: Falllinienverfolgung zum niedrigsten Nachbarn in einer Schrägebene auf Höhenstufendarstellung zu einem der a) 4, b) 8 Nachbarn der Ordnung 1 bzw. 1,5.

Eine wesentliche Verbesserung der Methode wurde mit dem Summationsverfahren (Kap. 3.2.1.) bereits gezeigt. Die Falllinie ergibt sich dort, indem man vom Startpunkt ausgehend, der die Wasser-

menge 1 erhalte, jeweils zu den niedrigeren Nachbarn mit dem größten Summationswert schreitet. Die solcherart entstehende Linie gibt sehr gut die Falllinie wieder. Die Berechnung erfolgt günstigerweise derart, daß man in gleicher Weise wie in Kap. 3.4.3. beim Auffüllen der Mulden Fronten anlegt. Eine Front besteht aus allen tieferliegenden Nachbarn erster Ordnung der vorhergehenden Front. Nun wird innerhalb der Front von oben nach unten die Summation durchgeführt. Um die Berechnung zu beschleunigen und nicht unnötig breite Fronten zu erhalten, kann man unterhalb von Punkten, in denen die durchfließende Wassermenge zu gering ist, auf die nächstfolgende Front verzichten. In diesem Fall ist jedoch zu bedenken, daß damit die abfließende Gesamtwassermenge einer Front kleiner als 1 wird; will man den Anfangswert 1 beibehalten, so ist das Wasser in diesen Randbereichen auf die anderen Punkte der Front aufzuteilen. Abbildung 4-2 zeigt die auf diese Weise berechnete Falllinie in der Schrägebene der Abbildung 4-1.

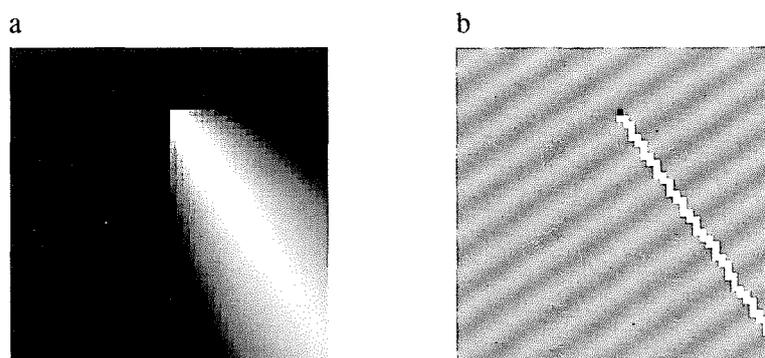


Abb. 4-2: Falllinie nach der Methode der gewichteten Summation: a) Die Werte der Summation, b) die Falllinie als Verbindung der Maxima auf Höhenstufendarstellung

Die Berechnung nach den Verfahren der vorangegangenen Kapitel gibt jeweils nur eine Vereinfachung der tatsächlichen Abläufe wieder. Das Verfahren der Verfolgung zum tiefsten Nachbarn hin ergibt zwar eine klar definierte Linie, ist aber stark abhängig von der Willkür der Rasterrichtung. Das Verfahren der Summation bezieht weit abgelegene Geländeteile in die Berechnung mit ein. Tatsächlich würde das Wasser im geeigneten Gelände keinesfalls so weit seitlich von der Falllinie abweichen. Dennoch können mit diesem Verfahren gute Ergebnisse erzielt werden. Es lohnt jedenfalls nicht, den wesentlich höheren Aufwand einer möglichst genauen Simulation des Abflusses zu treiben, die die Aufspaltung des Wassers durch die Rastermaschen in viele Kanäle berücksichtigt (Abb. 4-3). Die weite Verbreiterung beim Summationsverfahren rührt ja daher, daß das Wasser, das in eine Rastermasche einströmt, auf alle Unterlieger verteilt wird. Wie die Abbildung zeigt, dürfte aber je nach Eintrittszone das Wasser oft nur zu einer einzigen Nachbarmasche, nicht aber zu allen Unterliegern abfließen.

Eine Berechnung, die diese "Abflußkanäle" nachvollzieht, ist zwar verhältnismäßig einfach möglich, allerdings sehr zeitaufwendig, da jeder Kanal einzeln verfolgt werden muß. Man kann zur Beschleunigung sinnvollerweise die Berechnung eines Kanales abbrechen, wenn er bei hoher Konvergenz der Falllinien auf einen bereits berechneten trifft. Allerdings erfordert dies auch das Evidenthalten aller bereits berechneten Kanäle. Dies könnte auch vereinfacht werden, indem man ein Summationsfeld nach der Art des Feldes der Summationswerte im Verfahren nach Kapitel 3.2.1. mitführt. In diesem Feld wird das je Kanal abfließende Wasser aufsummiert. Überschreitet die Wassermenge einen bestimmten Wert, der eine größere Abflußader vermuten läßt (also nahe bei der Wassermenge im Startpunkt liegt), so kann man Kanäle, die auf eine derartige Rastermasche stoßen, beenden.

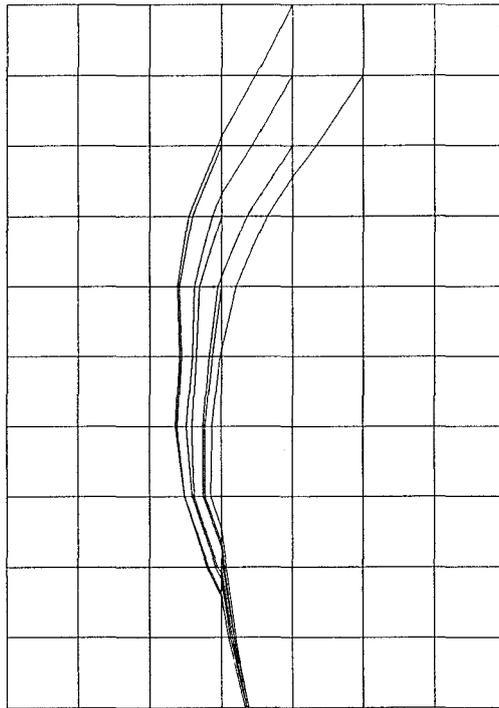


Abb. 4-3: Aufsplitterung des Abflußbandes durch den Raster (S ... Startmasche)

Der hier angewendete Algorithmus arbeitet folgendermaßen: Ein Oberlieger sendet einer Rastermasche Wasser in einem bestimmten Bereich innerhalb der gemeinsamen Seite. Es wird nun berechnet, wie dieser "Kanal" sich in der Rastermasche fortpflanzt, insbesondere an welchen Seiten der Masche er austritt und in welchen Bereichen der Seiten dieser Austritt erfolgt. Die Rastermasche gibt nacheinander an alle ihre Unterlieger, die davon betroffen sind, die Information über den Kanal (Wassermenge, Bereich entlang der gemeinsamen Seite) in gleicher Weise, wie sie diese selbst empfangen hat, weiter. Diese Weitergabe erfolgt, indem das genannte Verfahren in einem Unterprogramm zusammengefaßt ist, das sich selbst unter Weitergabe der genannten Information (zuzüglich Informationen über die aktuelle Rastermasche) rekursiv für jeden der betroffenen Unterlieger aufruft. Ein Kanal ist somit von seinem Beginn bis zu seinem Ende als eine Folge von rekursiven Aufrufen dieses Unterprogrammes gegeben, wobei es im Verlauf nach unten hin immer wieder zu Aufsplitterungen kommt. Die Berechnung, wie sich das Wasser in der Rastermasche selbst fortpflanzt, wird günstigerweise in einem eigenen Unterprogramm vorgenommen; diese Berechnung ist damit völlig unabhängig von der Verfolgung der Kanäle, und sie kann sehr leicht durch ein anderes Verfahren der Fortpflanzung ersetzt werden. Insbesondere sind einfache Verfahren, die innerhalb der Rastermasche eine geradlinige Fortpflanzung annehmen, im Bereich von Kampunkten eine Verteilung auf die Unterlieger entsprechend den Höhenunterschieden oder ähnlichen Kriterien und in Talbereichen einen Ausgangsbereich definieren, ebenso denkbar, wie komplexe Verfahren, die innerhalb der Rastermasche eine Verfolgung der Falllinien unter Berücksichtigung der sich ändernden Krümmung entlang dieser Linien vornehmen.

Die Berechnung der Falllinien zeigt deutlich die Grenzen der reinen Rastermodelle auf. In Geländemodellen, deren Struktur der Oberflächenform angepaßt ist, z. B. Dreiecksverkettungen mit gut ausgewählten Stützpunkten, lassen sich die Falllinien wesentlich günstiger ermitteln.

4.2. Das Falllinien-Vektorfeld

4.2.1. Allgemeines

Da die Falllinien in Tälern konvergieren, eignen sie sich nicht gut für eine linienförmige Darstellung nach Art der Höhenlinien. Abbildung 4-4 zeigt einen Geländeausschnitt mit Fall- und Höhenlinien. In den Talsohlen verläuft eine große Zahl an Falllinien ineinander - im Gegensatz zu Höhenlinien, die einander (abgesehen von senkrechtem und überhängendem Gelände) nicht berühren oder schneiden.

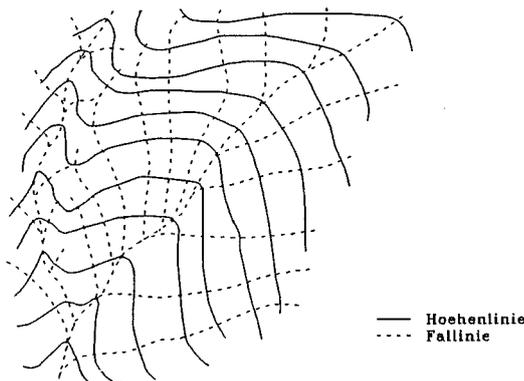


Abb. 4-4: Fall- und Höhenlinien

Es gibt ferner kein einfaches Kriterium für die Festlegung von Startpunkten für Falllinien. Man kann sie entlang von Kammlinien beginnen lassen; jedoch ist dadurch keine Gewähr für eine gute Flächendeckung geleistet. Um ferner nicht unnötig die in Tälern verlaufenden Linien zahlreiche Male zu berechnen, müssen sie in geeigneter Weise zwischengespeichert werden, sodaß erkannt werden kann, ob in hinreichender Nähe bereits eine andere Falllinie berechnet wurde. Ist dies der Fall, so kann die neu berechnete bei Konvergenz der Falllinien in diesem Bereich mit der alten vereinigt werden.

Die genannten Schwierigkeiten können im Raster durch Erstellen eines Vektorfeldes auf elegante Weise umgangen werden: Zu jedem Rasterpunkt wird die Falllinienrichtung bestimmt und als kleiner Pfeil graphisch dargestellt (vgl. Rieger, 1986). Die Berechnung erfolgt rein lokal und erfordert keinerlei Abspeicherung irgendwelcher Zwischenergebnisse (wie dies bei der weiter oben genannten Falllinienverfolgung nötig war). Da jeder Vektor für sich berechnet wird, ist es auch nicht nötig, das gesamte digitale Höhenmodell auf einmal im Arbeitsspeicher verfügbar zu haben, sondern man benötigt je nach Art der Berechnung lediglich eine kleine Umgebung des jeweils bearbeiteten Rasterpunktes. Die gute Flächendeckung ist durch die Anordnung der Vektoren in einem Raster von selbst gegeben.

4.2.2. Implementation im Programmsystem SCOP

Das Programmsystem "SCOP" dient der Erstellung und Bearbeitung von digitalen Höhenmodellen. Es besteht aus einer Reihe von Modulen: Ein Basismodul ermöglicht die Aufnahme und Wartung von Rohdaten sowie die Interpolation von digitalen Höhenmodellen. Solcherart entsteht eine Datenbasis, das eigentliche Höhenmodell. Von diesem ausgehend kann mit Hilfe verschiedener weiterer

Module digitale oder graphische Information verschiedener Art abgeleitet werden, wie z. B. Höhenlinien, Profile, Oberflächen, Volumina, Neigungsmodelle. Das Höhenmodell enthält eine Raster- und Vektorstruktur, die Vorteile der Raster- mit Vorteilen der Vektortechnik verbindet, da Linieninformation (Bruchkanten, Formlinien) in der Rasterstruktur voll integriert ist (Waldhäusl, Molnar 1991, SCOP 1991).

Das Programmsystem SCOP enthält ein Modul zur Berechnung eines digitalen Neigungsmodelles (DNM). Dies ist ein Modell, das dieselbe Struktur aufweist wie ein DHM, anstelle der Höhenwerte werden jedoch Neigungswerte abgelegt. Da entlang von Bruchkanten die Neigungswerte auf beiden Seiten der Linie unterschiedlich sind, werden diese Linien verdoppelt, um beide Neigungswerte aufzunehmen. Dieses Modul wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit um einen Programmteil zur Ausgabe eines Falllinien-Vektorfeldes erweitert. Dazu wurden eine Reihe von neuen Befehlen in das Programm aufgenommen, die der Steuerung der Berechnung und des Aussehens der Pfeile dienen.

Als Falllinienrichtung wird die Tangente an die Falllinie im jeweiligen Rasterpunkt verwendet. Die Berechnung erfolgt in der Form

$$v_x = \frac{h_4 - h_2}{x_2 - x_4}, \quad v_y = \frac{h_1 - h_3}{y_3 - y_1}, \quad (4-1)$$

wobei v_x und v_y die Komponenten des Vektors darstellen, h_i die Höhenwerte und x_i bzw. y_i die x- bzw. y-Koordinatenwerte der dem Rasterpunkt entlang der Koordinatenachsen x und y benachbarten Punkte darstellen (Abb. 4-5a). Die Nachbarpunkte sind üblicherweise ihrerseits Rasterpunkte, können aber auch Linienpunkte sein (Abb. 4-5b). Man beachte, daß hier mit Rasterpunkten, nicht mit Rastermaschen gearbeitet wird.

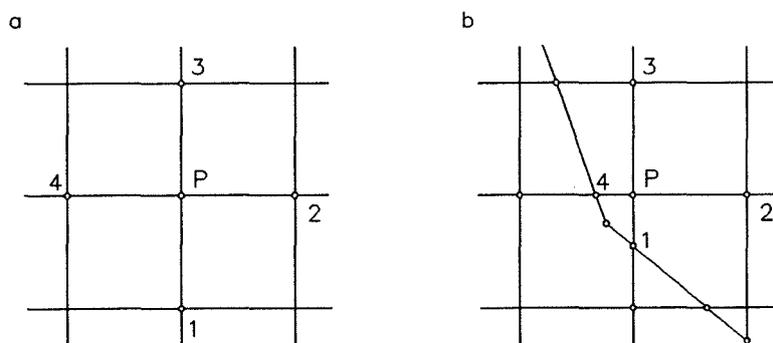


Abb. 4-5: Berechnung der Falllinienrichtung in einem Rasterpunkt: a) Nur Rasterpunkte, b) beim Auftreten von Linienpunkten

Diese Berechnungsart entspricht der Interpolation eines Paraboloides in die Punkte P und 1 bis 4 mit den Parabeln durch 1, P und 3 bzw. 4, P und 2 als Erzeugenden (Rieger). Eine Reihe komplizierterer Ansätze ist denkbar (vgl. Kraus 1987, S. 222 ff.; Palacios-Vélez et al. 1986; Moore et al. 1991), jedoch liefert dieser Ansatz sehr gute und geometrisch gut fundierte Ergebnisse, sodaß die wesentlich rechenaufwendigeren Verfahren nicht notwendig erscheinen (Rieger 1986, Ritter 1987). Abbildung 4-6 zeigt ein Falllinien-Vektorfeld, unterlegt mit Höhenlinien.

Die Länge der Vektoren kann auf mehrerlei Weise festgelegt werden: Entweder werden die Vektoren bis an den Rand einer rechteckigen Box um den Rasterpunkt verlängert bzw. verkürzt (Abb. 4-7). Die Ausrichtung in eine Box, die der Rasterweite entspricht, ergibt eine sehr gute

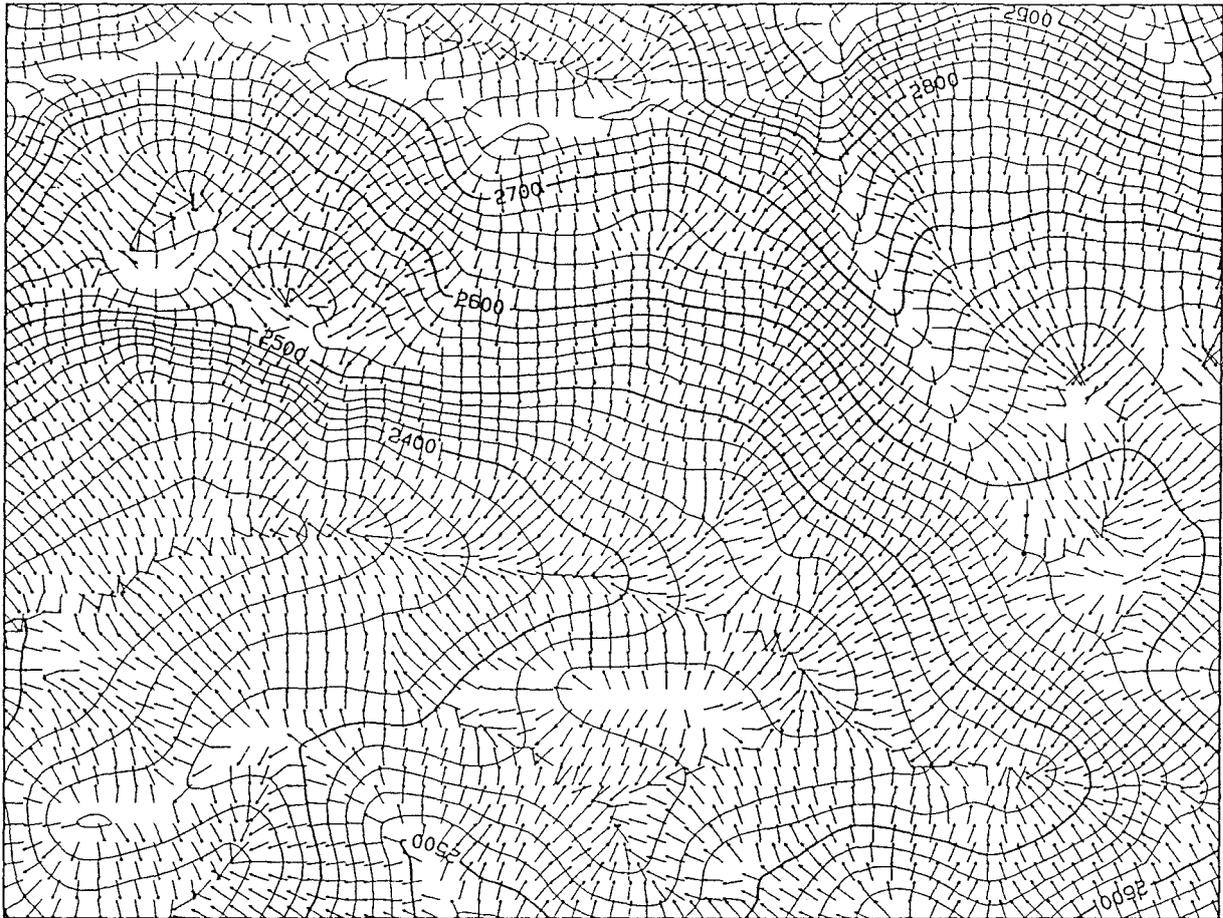


Abb. 4-6: Falllinien-Vektorfeld mit Höhenlinien

Scharung der Vektoren auch in den Diagonalrichtungen des Rasters, im Gegensatz zu Vektoren fixer Länge in allen Richtungen (Verlängerung der Vektoren bis zu einem Kreis um den Rasterpunkt; diese Möglichkeit ist ebenfalls im Programm vorgesehen). Die Box ist mittels eines Faktors in Bezug auf die Rasterweite skalierbar; mit einer Box größer als der Rasterweite kann solcherart ein verlaufendes Vektorenbild mit sehr guten Scharungseffekten geschaffen werden.

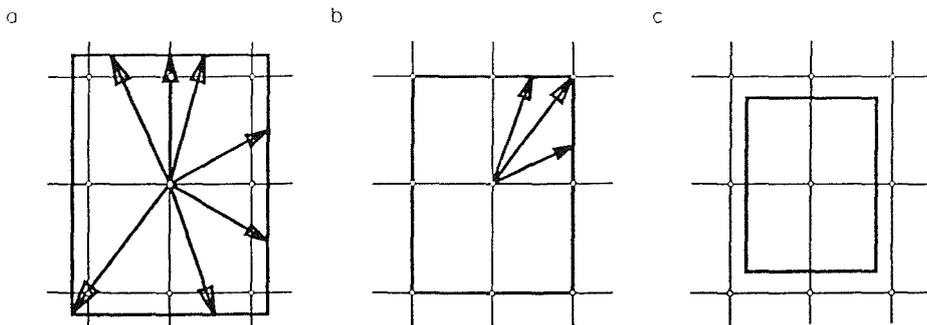


Abb. 4-7: Boxen unterschiedlicher Größe zur Bestimmung der Vektorlänge; a) Faktor 1,2, b) Faktor 1, c) Faktor 0,8.

Die Länge der Vektoren kann weiters nach verschiedenen Kriterien festgelegt werden: Abhängig von der Höhe, der Neigung, der Exposition oder abhängig von den Werten in einem anderen digitalen Modell, in dem beliebige Daten anstelle der Höhenwerte enthalten sein können.

Als Ansatzpunkt der Vektoren kann der Rasterpunkt selbst verwendet werden. Dies war in den Abbildungen 4-6 und 4-7 der Fall. Es ist auch möglich, die Vektormitte in den Rasterpunkt zu legen. Dies hat den Vorteil, daß die Vektoren in Konvergenzzonen einander nicht schneiden; auch ist in diesem Fall die Definition des Falllinienvektors als Tangente besser repräsentiert. Allerdings lassen diese Bilder die Geländestructur bei weitem nicht so gut erkennen wie beim Vektoransatz im Rasterpunkt, wo Talzonen dunkler und Kammzonen als lichte Zonen erscheinen (Abb. 4-8).

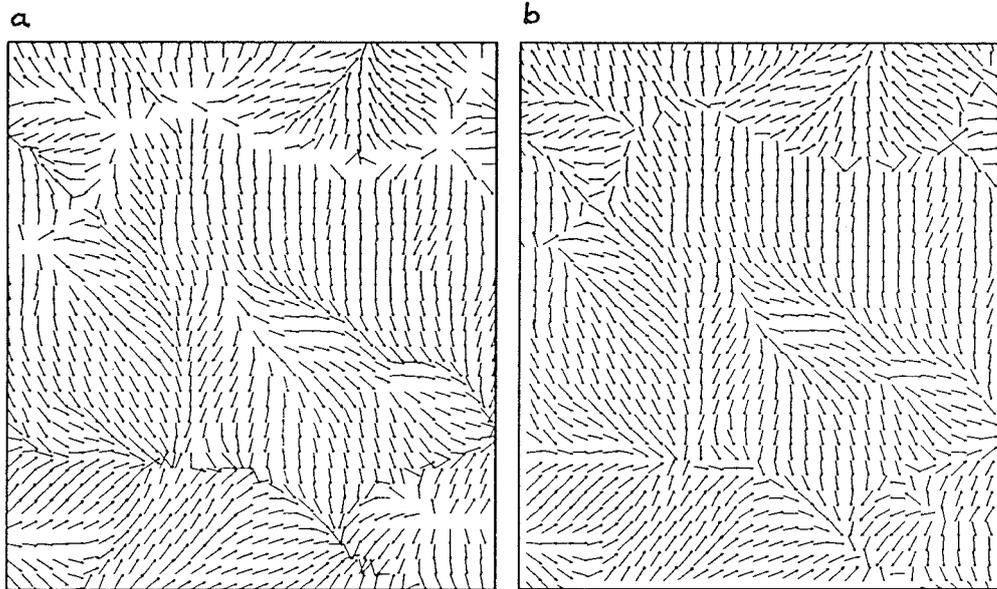


Abb. 4-8: Falllinienvektoren mit a) Vektoranfang b) Vektormitte im Rasterpunkt

Eine weitere Möglichkeit der Variation der Pfeile besteht darin, verschiedene Farben bzw. Plotterstifte in Abhängigkeit von Neigung, Höhe, Exposition oder beliebigen anderen, als digitales Modell in SCOP-Struktur vorliegenden Daten zu verwenden. Mit der Kombination der Variation der Länge und Farbe nach unterschiedlichen Kriterien lassen sich vielfältige thematische Pläne erstellen. Abbildung 4-9 zeigt Hell-, Dunkeleffekte, die bei Variation der Vektorlänge entsprechend der Oberflächenhelligkeit bei einer Beleuchtung des Geländes aus Nordwest entstehen. Diese Effekte sind überlagert mit der Betonung der Kamm- und Tallinien durch den im Rasterpunkt ansetzenden Vektor.

Näheres zur Steuerung kann dem Handbuch von SCOP entnommen werden (SCOP - Benutzeranleitung, Programmteil SCOP.VECTORS). Das Programm kommt derzeit vor allem im agrarischen Bereich zum Einsatz, wurde aber auch schon in Sonderbereichen - Erstellung von Lawinenplänen, Straßenbau - eingesetzt.

KUEHTAI, Beleuchtung aus Nordwest

1: 20000



Abb. 4-9: Vektorenlänge abhängig von der Oberflächenhelligkeit bei Beleuchtung des Geländes aus Nordwest unter einer Zenitdistanz von 50 gon

5. Genauigkeitsüberlegungen

Es werden einige grundsätzliche Überlegungen zur Genauigkeit der aus dem digitalen Höhenmodell abgeleiteten Größen (Falllinienvektoren, Flußläufe, Einzugsgebietsgrenzen) gebracht. Das Thema ist sehr komplex und würde den Rahmen dieser Untersuchungen bei weitem sprengen, wollte man es voll ausschöpfen. Es ist geplant, in Folgearbeiten darauf näher einzugehen.

5.1. Allgemeines

Die Genauigkeit des digitalen Höhenmodelles gibt die Abweichung des Modelles von der Geländeoberfläche an. Üblicherweise basieren die Modelle auf einer Vielzahl von Punkten, die willkürlich oder der Geländeform angepaßt verteilt sind. Die Angabe der Interpolationsfunktion soll ebenfalls Bestandteil des Modelles sein, jedoch kann sie abhängig von der Problemstellung variieren (vgl. Kap. 2.1.2.). Für die Einzelpunkte läßt sich leicht eine Aussage über die Höhengenaugigkeit treffen: Kennt man die Sollhöhen dieser Punkte im Gelände exakt oder, in der Praxis, mit erheblich höherer Genauigkeit, so kann man die Werte der mittleren Abweichung schätzen (vgl. z. B. Leberl 1975, Ackermann 1979, Tempfli 1982, Day und Muller 1988). Üblicherweise wird gefordert, daß die Punkte innerhalb eines gewissen Fehlerbandes die Geländeoberfläche darstellen sollen; daraus ergibt sich der unter Umständen auch variable Stützpunktabstand (Ackermann 1979).

Was als die Geländeoberfläche anzusehen ist, ist keineswegs einfach zu sagen. Jedenfalls handelt es sich immer um eine Vereinfachung der natürlichen Geländeoberfläche. Üblicherweise werden Bewuchs und Kunstbauten nicht zur Geländeoberfläche gerechnet. Der verbleibende natürliche Boden aber ist weder eine unveränderliche Größe noch genau zu definieren: Die Darstellung kann in beliebig hoher Auflösung erfolgen, und Kleinstformen können im Meter-, Zentimeter- und Millimeterbereich und sogar noch kleiner gefunden werden. Die Fraktalgeometrie liefert dazu recht interessante Ansätze und Erklärungen. Mit einer Spektralanalyse des Geländes (Makarovič 1972, Tempfli 1982, Zhang 1988) kann theoretisch ebenfalls eine beliebige Auflösung erreicht werden, allerdings ist da wie dort die Information über die Oberfläche in entsprechender Dichte erforderlich. Auch kann abhängig von der Problemstellung unter einer gewissen, bodenabhängigen Größenordnung (wahrscheinlich im Zentimeter- bis Dezimeterbereich) sicher keine sinnvolle Aussage mehr über die Geländeoberfläche getroffen werden. Als Beispiel hierzu sei ein Acker genannt, dessen Oberfläche sich mit Sicherheit bei jeder Bebauung im Dezimeterbereich verändert. Die Ackerfurchen interessieren in der Regel nicht für die Geländeoberfläche.

Tatsache ist jedenfalls, daß die eigentliche Geländeoberfläche problemspezifisch und maßstabsabhängig zu definieren ist. Für kartographisch schöne Höhenlinien will man eine stark geglättete Fläche, die die im Kartenmaßstab darstellbaren Formen wiedergibt. In ähnlicher Weise lassen sich entsprechende Aussagen für die Bestimmung des Oberflächenabflusses und der Abflußlinien treffen.

Will man die Flüsse eines Geländes ableiten, so interessiert die **Formtreue** des Modelles, das ist in diesem Fall die Lagegenauigkeit der Tallinienpunkte. Analog interessiert für die Einzugsgebietsgrenzen die Lagegenauigkeit der Kammlinienpunkte. Es ist weiters kaum sinnvoll, Abflußlinien abzuleiten, die kürzer sind als 10 bis 20 Rasterweiten. Da nämlich die Rasterweite die vom Modell her gegebene Auflösung darstellt, bedeutet dies eine Querabweichung der Linien von maximal 5 -

10% ihrer Länge. Die Rasterweite hängt also vom geforderten Detailreichtum (in Form der Mindestlänge der Flüsse) ab. Somit ergibt sich die Forderung nach einer Formtreue des Modelles im Bereich der halben Rasterweite und kleiner. Um diese Bedingung zu erfüllen, ist die Fläche zwischen Rasterpunkten jedenfalls mit höherer Ordnung als linear zu interpolieren. Beschränkt man sich auf eine Genauigkeit im Bereich der Rasterweite, so genügt lineare Interpolation; auch die Verfahren aus Kapitel 3. können zur Anwendung kommen.

Für die Falllinienberechnung gilt ebenfalls eine problemabhängige Definition der Geländeoberfläche und der Genauigkeit. Die Rasterweite soll so gewählt werden, daß die interessierenden Formen erkannt werden. Beispielsweise sind für den Wasserabfluß kleinere Böschungen von untergeordneter Bedeutung, vor allem wenn sie quer zur Falllinienrichtung verlaufen. Gräben als Zonen größerer Wasseranhäufung sind jedoch auch bei geringer Größe bereits von Bedeutung.

Der Bewuchs spielt für den Wasserabfluß eine große Rolle, ebenso die Art des Bodens. In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Faktor gänzlich außer Acht gelassen, da ja nur die Oberflächenformen erkannt werden und kein hydrologisches Modell erstellt werden sollte.

Es wird Folgearbeiten überlassen bleiben, qualifiziertere Aussagen besonders über die Formtreue und die Möglichkeiten der Angabe von Geländekenngößen zu treffen. Zum Beispiel hat Kraus 1991 darauf hingewiesen, daß die Linien gleicher Geländeneigung in gleichmäßig geneigten Hängen sehr schlecht definiert sind. Die mittlere Neigung über einen größeren Bereich hin vermag hier wesentlich bessere Aussagen zu treffen (Kraus 1991). Hier soll es vorerst genügen, aus den Höhenfehlern die Fehler abgeleiteter Größen theoretisch abzuschätzen.

5.2. Genauigkeit abgeleiteter Größen

5.2.1. Genauigkeit der Falllinienvektoren

Der Falllinienvektor wurde in Kap. 4.2.1. gemäß

$$v_x = \frac{h_4 - h_2}{x_2 - x_4}, \quad v_y = \frac{h_1 - h_3}{y_3 - y_1} \quad (5-1)$$

berechnet. Die Höhen h_1 bis h_4 seien mit dem zufälligen Fehleranteil r_i und dem systematischen Fehleranteil s_i behaftet:

$$h_i = \bar{h}_i + s_i + r_i, \quad (5-2)$$

- wobei \bar{h}_i ... die Höhen im Modell,
 h_i ... die Höhen im Gelände
 s_i ... den systematischen Fehleranteil und
 r_i ... den zufälligen Fehleranteil bedeuten,

so fallen die systematischen Fehleranteile, wenn sie über zwei Rasterweiten hin näherungsweise konstant sind, bei der Differenzbildung weitgehend heraus. Werden also modellweit die mittleren Höhenfehler etwa empirisch bestimmt, so ist die Annahme durchaus berechtigt, daß systematische Fehleranteile wie zufällige wirken, wodurch die Formgenauigkeit des Höhenmodelles möglicherweise zu schlecht geschätzt wird.

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} \\ \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_y}^2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & \frac{-1}{2 \cdot r w_x} & 0 & \frac{1}{2 \cdot r w_x} \\ \frac{1}{2 \cdot r w_y} & 0 & \frac{-1}{2 \cdot r w_y} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{12} & \sigma_2^2 & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_3^2 & \sigma_{34} \\ \sigma_{14} & \sigma_{24} & \sigma_{34} & \sigma_4^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1/2 \cdot r w_y \\ -1/2 \cdot r w_x & 0 \\ 0 & -1/2 \cdot r w_y \\ 1/2 \cdot r w_x & 0 \end{pmatrix} = \\
&= \frac{1}{4} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{14} - \sigma_{12}}{r w_x} & \frac{\sigma_{24} - \sigma_2^2}{r w_x} & \frac{\sigma_{34} - \sigma_{23}}{r w_x} & \frac{\sigma_4^2 - \sigma_{24}}{r w_x} \\ \frac{\sigma_1^2 - \sigma_{13}}{r w_y} & \frac{\sigma_{12} - \sigma_{23}}{r w_y} & \frac{\sigma_{13} - \sigma_3^2}{r w_y} & \frac{\sigma_{14} - \sigma_{34}}{r w_y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1/r w_y \\ -1/r w_x & 0 \\ 0 & -1/r w_y \\ 1/r w_x & 0 \end{pmatrix} = \\
&= \frac{1}{4} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\sigma_2^2 - 2 \cdot \sigma_{24} + \sigma_4^2}{r w_x^2} & \frac{\sigma_{14} + \sigma_{23} - \sigma_{12} - \sigma_{34}}{r w_x \cdot r w_y} \\ \frac{\sigma_{14} + \sigma_{23} - \sigma_{12} - \sigma_{34}}{r w_x \cdot r w_y} & \frac{\sigma_1^2 - 2 \cdot \sigma_{13} + \sigma_3^2}{r w_y^2} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{5-3}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{v_x}^2 & \sigma_{v_x v_y} \\ \sigma_{v_x v_y} & \sigma_{v_y}^2 \end{pmatrix} = \frac{1}{4 \cdot r w^2} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_2^2 - 2 \cdot \sigma_{24} + \sigma_4^2 & \sigma_{14} + \sigma_{23} - \sigma_{12} - \sigma_{34} \\ \sigma_{14} + \sigma_{23} - \sigma_{12} - \sigma_{34} & \sigma_1^2 - 2 \cdot \sigma_{13} + \sigma_3^2 \end{pmatrix} \tag{5-4}$$

$$\text{und } \sigma_{14} + \sigma_{23} = \sigma_{12} + \sigma_{34},$$

wobei σ_h der mittlere Höhenfehler eines Rasterpunktes ist, $\sigma_{h,2rw}$ die Kovarianz zwischen zwei Rasterpunkten derselben Gitterlinie im Abstand zweier Rasterweiten. Somit ergibt sich für die Fehler der Komponenten des Falllinienvektors bei symmetrischen Varianz-/Kovarianzverhältnissen:

$$\sigma_{v_x}^2 = \sigma_{v_y}^2 = \frac{\sigma_h^2 - \sigma_{h,2rw}}{2 \cdot r w^2}. \tag{5-6}$$

Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil der Berechnung des Vektors aus den Nachbarpunkten ohne Einbeziehung des Standpunktes: Durch den größeren Abstand der Punkte in der Differenz wird der Einfluß von Fehlern in den Höhen um den Faktor $\sqrt{2}/2$ verkleinert.

Geht die Rasterweite gegen 0, so geht $\sigma_{h,2rw}$ gegen σ_h^2 , Ausdruck (5-5) wird unbestimmt ("0/0"). Der Falllinienvektor läßt sich dann nicht rechnen, was korrekt ist. Diese Konstellation entsteht bei einer glatten Oberfläche (ohne Bruchkanten) durch die Interpolation. Werden die Rasterpunkte direkt am photogrammetrischen Auswertegerät gemessen, so gilt obiger Grenzwert nicht:

$$\sigma_h^2 > \lim_{rw \rightarrow 0} \sigma_{h,2rw}.$$

5.2.2. Genauigkeit der Neigung

Die Neigung in einem Punkt läßt sich aus dem Falllinienvektor gemäß

$$n = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (5-7)$$

berechnen. Für symmetrische Varianz-/Kovarianzverhältnisse sind laut Formel (5-4) mit (5-5) die Komponenten des Falllinienvektors voneinander unabhängig. Daher kann das Fehlerfortpflanzungsgesetz für zufällige Fehler angewendet werden, und man erhält:

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{2 \cdot v_x}{2 \cdot n} \cdot \sigma_{v_x} \right)^2 + \left(\frac{2 \cdot v_y}{2 \cdot n} \cdot \sigma_{v_y} \right)^2 = \left(\frac{v_x^2}{n^2} + \frac{v_y^2}{n^2} \right) \cdot \sigma_{v_x}^2 = \sigma_{v_x}^2 = \sigma_{v_y}^2 \quad (5-8)$$

oder, mit Formel (5-6):

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_h^2 - \sigma_{h,2rw}}{2 \cdot rw^2} \quad (5-9)$$

Die Genauigkeit der Neigung hängt vor allem von der Rasterweite des Modelles ab. Für konstante Varianz-/Kovarianzverhältnisse nimmt sie mit abnehmender Rasterweite ab.

Für eine gleichbleibende Aufnahmedisposition ist die Genauigkeit der Neigung völlig unabhängig von den Maßeinheiten; sie hängt nur von der Geländecharakteristik ab: Mit dem Kartenmaßstab m_k und dem Bildmaßstab m_b ergibt sich das Vergrößerungsverhältnis vom Bild zur Karte, v_k , gemäß:

$$v_k = \frac{m_b}{m_k} \quad (5-10)$$

Bei 60% Längsüberdeckung gilt für die sogenannte statische Profilmessung (Kraus 1984, S. 217):

$$\sigma_{h,p} = 0,1 \dots 0,15 \text{ ‰ } H_G, \quad \text{wobei } H_G \text{ die Flughöhe über Grund ist.}$$

Diese Höhengenaugigkeit kann man auch für das digitale Höhenmodell ansetzen. Weiters wird die Rasterweite rw im Kartenmaßstab mit konstanter Größe angesetzt (rw_k), sie stellt einen Kompromiß zwischen guter Qualität des Ergebnisses und möglichst geringem Aufwand dar und wird in der Regel mit 3 .. 5mm angesetzt. Für die Genauigkeit der Neigung ergibt sich sodann mit $m_b = H_G / c$, wobei c die Kammerkonstante darstellt:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot rw} \cdot (\sigma_h^2 - \sigma_{h,2rw})^{1/2} = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot rw_k \cdot m_k} \cdot (\sigma_h^2 - \sigma_{h,2rw})^{1/2} = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot rw_k \cdot m_k} \cdot \sigma_H, \quad (5-11)$$

wobei σ_H den "Gesamtfehler" gemäß $\sigma_H^2 = \sigma_h^2 - \sigma_{h,2rw}$ darstellt. Man erhält damit:

$$\sigma_n = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,15 \text{ ‰ } \cdot H_G}{2 \cdot rw_k \cdot m_b / v_k} = \frac{0,00011 \cdot c \cdot v_k}{rw_k}$$

Die Genauigkeit der Neigung ist also konstant für gleiche Kammerkonstante, gleiches Vergrößerungsverhältnis vom Bild zur Karte und gleiche Rasterweite in der Karte.

Mit $c = 15\text{cm}$, $v_k = 3 \dots 5$, $rw_k = 3 \dots 5\text{mm}$ ergibt sich:

$$\sigma_n = 0,01 \dots 0,02.$$

Dieser Wert ist ein guter Richtwert, der besagt, daß Neigungsdifferenzen von weniger als ca. 1,5% kaum als signifikant angesehen werden können. Diesen Wert erhielten unter anderen auch Stechauner und Ehgartner (1988) aus empirischen Untersuchungen.

Es soll nun untersucht werden, wie sich systematische und zufällige Fehler auf die Neigung auswirken. Abb. 5-1 zeigt Geländeprofile mit überlagerten Profilen aus dem Höhenmodell mit vorwiegend zufälligen bzw. systematischen Fehleranteilen. Die zahlreichen Bodenunebenheiten in Bild (a) wirken wie zufällige Fehler. Die Neigung entspricht eher der Neigung eines gut geglätteten Modelles als der tatsächlichen. Allgemein ist die Neigung jeweils nur bis zu einer gewissen Mindest-rasterweite sinnvoll. Je kleiner die Rasterweite gewählt wird, umso unruhiger wird die Oberfläche. Hierzu bietet die Fraktalgeometrie interessante Ansätze und Erklärungen. Für Neigungskarten ist in erster Linie zu überlegen, in welcher Auflösung die Neigung zu berechnen ist. Dies hat entscheidenden Einfluß auf die Wahl der Rasterweite und DHM-Genauigkeit.

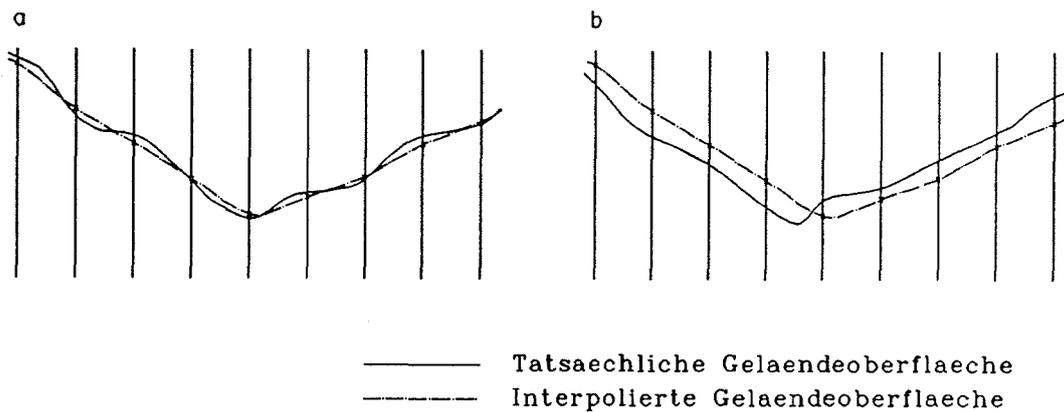


Abb. 5-1: Approximation der Geländeoberfläche bei vorwiegend (a) zufälligen, (b) systematischen Fehlern

Bild (b) zeigt einen Fall, wo die Neigung über weitere Bereiche sehr genau berechnet wird, obwohl die interpolierte Geländeoberfläche offensichtlich eine starke systematische Verfälschung aufweist. Insbesondere ist die Lage des Talpunktes stark versetzt. Allgemein ist in dieser, für den Abtastfehler typischen Situation die Neigung im Bereich von Neigungsänderungen längs eines Profiles falsch; es tritt Lageversetzung ein.

Das Diagramm aus Abb. 5-2 stellt den Fehler der Neigung laut Formel (5-11) für verschiedene Werte von σ_H abhängig von der Rasterweite dar. Man sieht, daß die Genauigkeit lediglich vom Verhältnis (Gesamt-) Höhengenaugkeit des Modelles zu Rasterweite abhängt (Bild b).

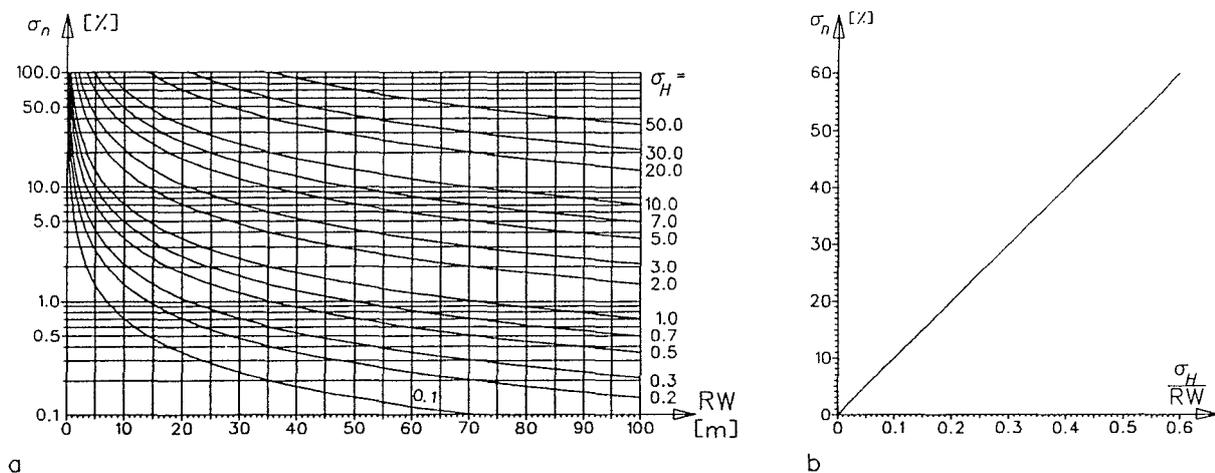


Abb. 5-2: Neigungsfehler abhängig von Rasterweite und Höhengenaugkeit; σ_h in Metern.

5.2.3. Genauigkeit der Exposition

Die Exposition α ist die Richtung, in die der Falllinienvektor zeigt. Sie wird als der Arcus Tangens des Quotienten der beiden Komponenten des Falllinienvektors laut Formel (4-1) berechnet:

$$\alpha = \arctan(v_y / v_x) \quad (5-12)$$

Ihr Fehler berechnet sich aus den Höhenfehlern, wobei wegen der Unabhängigkeit der Komponenten des Falllinienvektors wieder das Fehlerfortpflanzungsgesetz für zufällige Fehler angewendet werden kann, unter Berücksichtigung der Formeln (5-4), (5-5) und (5-6) gemäß

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha^2 &= \left(\frac{1}{1 + v_y^2/v_x^2} \cdot \frac{v_y}{-v_x^2} \cdot \sigma_{v_x} \right)^2 + \left(\frac{1}{1 + v_y^2/v_x^2} \cdot \frac{1}{v_x} \cdot \sigma_{v_y} \right)^2 = \\ &= \left(-\frac{v_y}{v_x^2 + v_y^2} \cdot \sigma_{v_x} \right)^2 + \left(\frac{v_x}{v_x^2 + v_y^2} \cdot \sigma_{v_x} \right)^2 = \\ &= \frac{1}{v_x^2 + v_y^2} \cdot \sigma_{v_x}^2 = \frac{\sigma_{v_x}^2}{n^2} = \frac{\sigma_h^2 - \sigma_{h,2rw}}{2 \cdot r w^2 \cdot n^2} \end{aligned} \quad (5-13)$$

oder

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_n}{n} \quad (5-14)$$

Um σ_α in Neugrad zu erhalten, ist dieser Wert noch mit ρ^{gon} zu multiplizieren:

$$\sigma_\alpha^{gon} = \rho^{gon} \cdot \sigma_\alpha = \frac{200^{gon}}{\pi} \cdot \sigma_\alpha \quad (5-15)$$

Die Genauigkeit hängt also zuallererst von der Neigung, das ist die Länge des Falllinienvektors, ab. Das Diagramm der Abbildung 5-3 zeigt die mittleren Fehler der Exposition für bestimmte Geländeneigungen und bestimmte mittlere Neigungsfehler laut Formel (5-15):

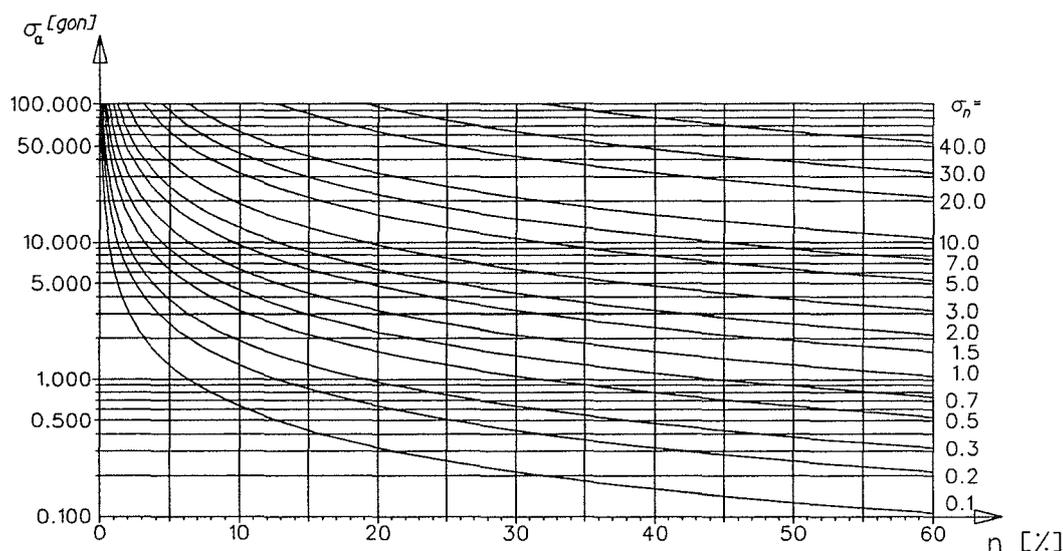


Abb. 5-3: Fehler der Exposition abhängig von Neigung und Fehler der Neigung

Das Diagramm zeigt, daß bereits bei ca. 5% Neigung die Exposition nur noch auf ± 20 Gon bestimmt ist, wenn die Neigung auf 1,5% ($\pm 0,015$) genau bestimmt ist. In noch flacherem Gelände ist sie überhaupt unbestimmt.

Die Frage der Genauigkeit der abgeleiteten Größen sollte jedenfalls weiteren Untersuchungen unterzogen werden, wobei die theoretischen Überlegungen auch anhand von praktischen Untersuchungen geprüft werden sollten.

5.3. Lagegenauigkeit von aus dem Raster abgeleiteten Linien

Es werden wieder nur einige grundsätzliche Überlegungen angestellt; die Problematik würde ebenso wie die Genauigkeit von Neigung und Exposition eine eigene Untersuchung erfordern.

Eine Linie, die im Raster in kodierter Form gegeben ist, kann nicht genauer als auf eine Rastermasche genau positioniert sein. Verbindet man die markierten Rastermaschen, so ist die Lageabweichung niedriger als die halbe Diagonale, wenn die Linie die Rastermasche - was vorausgesetzt wird, überstreicht. Schreitet man von Rasterpunkt zu Rasterpunkt, so erhält man Treppenkurven bei Nachbarschaft 1. Ordnung, abgeschrägte Treppenkurven bei Ordnung 1,5. Durch Glättung läßt sich der Linienverlauf verschönern, es wird aber nicht unbedingt die Genauigkeit erhöht. Eine Erhöhung der Genauigkeit kann erreicht werden, indem man für die auf Rastermaschen genaue Kenntnis der Lage der Linie eine entsprechende Interpolationsfläche heranzieht. Für Einzugsgebietsgrenzen oder Flüsse beispielsweise könnte man durch Vorgabe einer zylindrischen Fläche mit Achsrichtung parallel der Flußlinie gezielt den Kammverlauf bzw. die Talsohle modellieren. Anstelle des Zylinders könnte man auch Querprofile legen. Bedenkt man allerdings, daß die DHM-Genauigkeit und die Rasterweite üblicherweise aufeinander abgestimmt sind (vgl. hierzu auch Jenson, 1991), ferner vielfach das Ausgangsdatenmaterial aus hydrologischer Sicht von geringer Qualität ist, so erscheint es fraglich, ob diese "Subrastergenauigkeit" tatsächlich erzielt werden kann oder ob nicht eine einfache Glättung der Linie ähnliche Genauigkeit bewirkt.

Die in der vorliegenden Arbeit abgeleiteten Flußlinien und Einzugsgebietsgrenzen zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit den in der Karte dargestellten. Im allgemeinen liegen die Abweichungen kaum über zwei bis drei Rasterweiten. In engen Tälern ist die Genauigkeit der Flußlage nur von der Genauigkeit der Lage der Täler im DHM abhängig; in diesem Fall trifft der Algorithmus die im DHM dargestellten Täler sehr genau. In Trogtälern und flachen Gebieten kann es zu größeren Lageversetzungen kommen, wobei dies immer durch Mulden verursacht wird: Innerhalb dieser ist die Geländeoberfläche oft sehr stark verfälscht, sodaß es unmöglich ist, die tatsächlichen Flußläufe zu finden. Allerdings zeigt sich auch hier eine oft überraschend gute Übereinstimmung. Die größten Fehler traten im Zusammenhang mit falschen Abflußpunkten von Mulden auf; dies soll in der Folge erörtert werden.

5.4. Mulden

Es werden jetzt jene Mulden betrachtet, die im Gelände nicht auftreten, also die Scheinmulden. Diese Formen sind an sich nicht in der Natur vorhanden, die Geländeoberfläche wird also mit Sicherheit nicht richtig dargestellt. Dennoch kann es sein, daß - vornehmlich in flachen Gebieten - die Gelände- und die Modellfläche im Bereich des mittleren Fehlers zueinander passen. In diesem Fall sind die Formen derart klein, daß sie vom "Rauschen" übertroffen werden. Eine Änderung einzelner Modellhöhen in derselben Größenordnung verfälscht das Modell somit kaum.

Größere Mulden können durch fehlerhafte oder ungünstige Ausgangsdaten entstehen. Abb. 3-24a zeigt ein Trogtal in Höhenliniendarstellung. Werden digitalisierte Höhenlinien zur DHM-Erstellung verwendet, so ergibt sich eine sehr ungünstige Stützpunktverteilung. Wird bei der Interpolation nicht beachtet, daß entlang der Talachse die Höhen monoton abnehmen sollen, so bewirkt die Interpolation das Entstehen einer Mulde im Bereich des breiteren Teiles des Tales (Abb. 3-24b).

Der tatsächliche Talverlauf ist aus diesen Daten jedenfalls nicht rekonstruierbar. Dies rechtfertigt übrigens auch die Verwendung von Methoden zur Elimination der Mulde, die die Formerhaltung innerhalb der Mulde nicht garantieren.

Im Beispiel der Abbildung 3-24 kann die Lage der Flußlinie innerhalb des Muldenbereiches schwanken. Wird der Flußverlauf innerhalb der Mulde angenommen, so ist der Maximalfehler durch die Breite der Mulde gegeben. Vorausgesetzt ist natürlich, daß die Höhenlinien mit im Vergleich zum DHM hoher Genauigkeit lagerichtig sind.

Digitalisierte Höhenlinien sollten aus diesem Grund nicht alleine zur Erstellung eines digitalen Höhenmodelles herangezogen werden. Bei diesen Daten kommt ja noch die in Kap. 5.1.1. erwähnte Verdrängung in engeren Talbereichen hinzu. Hier sollen unbedingt Zusatzmessungen erfolgen: Entweder durch Digitalisieren in größermaßstäblichen Karten oder durch Einbinden von Luftbildmodellen oder durch Digitalisieren von Formlinien im Bereich der Täler (Talsohle in engen Tälern, die Linien der Hangansätze in Trogtälern u. ä.).

Ein weiteres Problem ist die Zuordnung von Muldeneinzugsgebieten zu anderen Einzugsgebieten. Laut Kap. 2.3.5. wird als Abflußpunkt der niedrigste Punkt im Verlauf des Randes des Muldeneinzugsgebietes herangezogen. Es kann durchaus sein, daß es mehrere Randminima exakt gleicher oder zumindest im Bereich des mittleren Höhenfehlers gleicher Höhe gibt (Abb. 5-4).

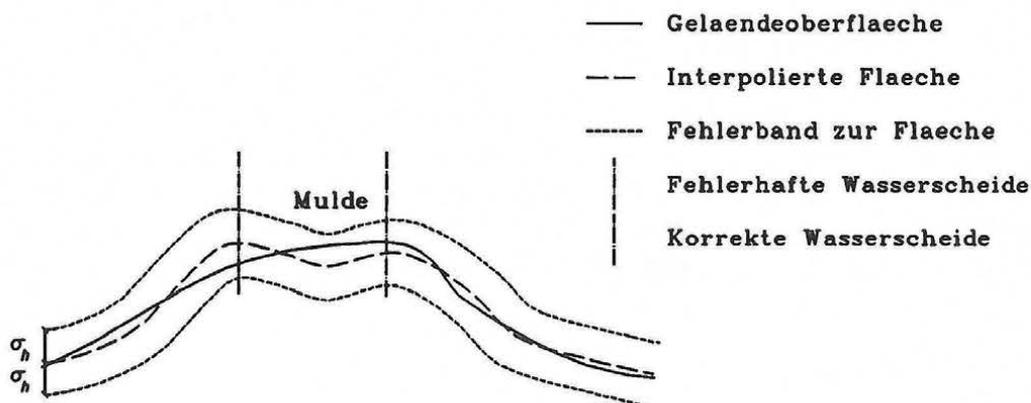


Abb. 5-4: Fehlzurordnung einer Mulde im Kammbereich auf Grund von Höhenfehlern

Es ist in diesem Fall keineswegs leicht, den richtigen Punkt als Abflußpunkt heranzuziehen. Es kann sogar sein, daß die Scheinmulde in der Natur zu zwei oder mehr Einzugsgebieten entwässert, die entsprechenden Grenzen verlaufen dann innerhalb der Mulde.

Um im Falle mehrerer Randminima (R_i) qualifiziertere Aussagen über den richtigen Abflußpunkt zu treffen, kann man in der Umgebung der Randminima lokal die Fläche interpolieren und solcherart eine bessere Höhe für R_i erhalten. Es ist allerdings zu erwarten, daß diese umso niedriger sein wird, je ausgeprägter das Minimum ist. Ob diese Berechnung also eine Verbesserung der Berechnung des Abflußpunktes darstellt, bleibe dahingestellt.

Eine weitere Möglichkeit kann darin bestehen, zusätzliche Kriterien heranzuziehen, um eine Entscheidung über mehrere Randminima zu treffen. Dazu könnte man etwa die überwiegende Talrichtung eines Gebietes oder den vorwiegenden Einmündungswinkel eines Nebenflusses verwenden (Qian, Ehrlich, Campbell, 1990). Diese Methoden wurden in der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht.

Für Wasserscheiden in globalen Einzugsgebieten gilt im Raster dasselbe, vor allem dann, wenn im Wasserscheidenbereich Mulden auftreten (Abb. 5-4). So kann es sein, daß durch Ungenauigkeiten im Modell die tatsächliche Wasserscheide niedriger liegt als ein anderer Paß, wodurch Flußstücke falsch zugeordnet werden.

Die Genauigkeit des Flußnetzes ebenso wie der Einzugsgebietsgrenzen hängt sehr stark vom Höhenmodell (also den Ausgangsdaten, der Interpolationsart und der Datenstruktur), der Morphologie des Geländes und der Umgebung der kritischen Bereiche ab. Die allgemeinen Aussagen müssen im Zuge eingehender Untersuchungen noch geprüft werden, es wird nachfolgenden Arbeiten überlassen bleiben, hier qualifiziertere Ergebnisse zu präsentieren. Insbesondere die Größenordnung der Korrelation in den Höhen benachbarter Rasterpunkte ist eine unbekannte Größe. Es sei an dieser Stelle auch auf die aufschlußreichen Untersuchungen von Susan K. Jenson (1991) hingewiesen, die in einer Reihe von Untersuchungen Genauigkeitsanalysen von Höhenmodellen vornimmt.

Als markantestes Beispiel einer Fehlzuordnung von Mulden sei die Wasserscheide zwischen Salzach- und Saalachtal bei Zell am See im Land Salzburg genannt (Abb. 5-5). In der Natur tritt dort eine außerordentlich schwach ausgeprägte Wasserscheide mit einem Höhenunterschied von nur rund 10 m zwischen dem Zeller See im Süden und dem Graben der Saalach im Norden auf (Pfeile in Bild b). Die Salzach fließt in der Natur südlich des Zeller Sees nach Osten ab (Bild b), wo das breite, sehr flache Trogtal endet und ein enger, anfangs immer noch sehr flacher Talabschnitt beginnt. Der Zeller See entwässert in die Salzach. Im Höhenmodell trat im Bereich des Zeller Sees und der im Norden und Süden anschließenden Trogtäler eine große Mulde auf. Auf Grund des engen Talbereiches der Salzach und der daraus resultierenden größeren Höhen (da das DHM großteils aus digitalisierten Schichtenlinien erstellt war) ergab sich als Abflußpunkt ein Punkt nördlich im Bereich des Saalachtals. Daher ergab sich der falsche Flußverlauf der Salzach durch das Saalachtal mit der falschen Wasserscheide im Kreuzungspunkt der Pfeile in Bild a. Hier wurde durch interaktives Eingreifen eine entsprechende Korrektur des Höhenmodelles vorgenommen.

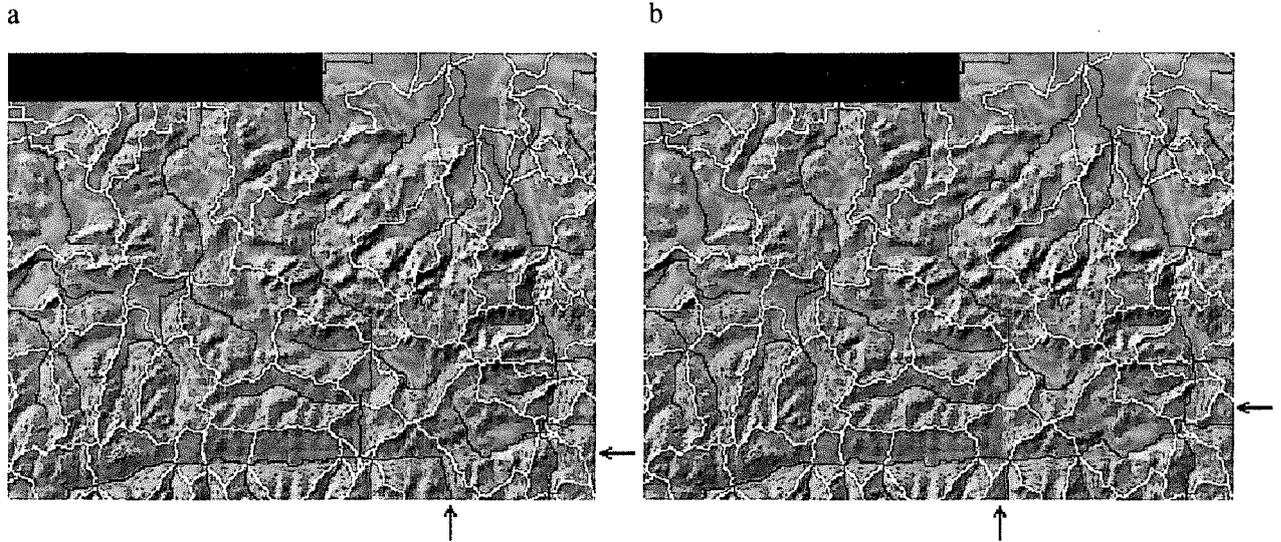


Abb. 5-5: Höhenmodell: Falsche (a) und richtige (b) Flußzuordnung auf Grund schwach ausgeprägter Formen und fehlerhafter Höhen im Bereich der Wasserscheiden (Wasserscheide jeweils im Schnitt der Pfeile).

6. Erweiterungen und Ausblick

6.1. Bearbeitung beliebig großer Modelle

Die niedrigen Kosten für Speicherelemente sowie die hohen Kapazitäten derselben ermöglichen heute den Einsatz von vielen Megabytes (MB) an Speicher auch im PC-Bereich. Rechnet man, daß etwa drei Matrizen in Floatingpoint-Darstellung gleichzeitig im Arbeitsspeicher Platz finden müssen, ferner etwa 1 MB für das Programm und sonstige Daten benötigt wird, so läßt sich bei einem verfügbaren Speicher von 8 MB ein Feld mit rund 600.000 Elementen (ca. $780 \cdot 780$) bearbeiten. Bei 16 MB sind Feldgrößen bis 1,3 Millionen ($1140 \cdot 1140$) Elemente möglich, 32 MB gestatten etwa 2,7 Millionen, also $1640 \cdot 1640$ Elemente. Bei derart großen Feldern ist aber das Sortieren bereits sehr langwierig. Um ferner auch auf Rechnern mit kleinerem Arbeitsspeicher sehr große Modelle bearbeiten zu können und die Maximalgröße der bearbeiteten Modelle möglichst offen zu halten, sollen nun einige Möglichkeiten gezeigt werden.

6.2. Überlappende Teilgebiete

Eine Möglichkeit besteht darin, das gesamte Gebiet in eine Reihe von einander stark überlappenden Teilgebieten zu unterteilen und jedes dieser Teilgebiete gesondert zu bearbeiten. Das Verfahren hat unter anderem den Vorteil, daß man auf mehreren herkömmlichen Rechnern zu gleicher Zeit verschiedene Teilgebiete bearbeiten kann. Es läßt sich also "Parallel-processing" ohne spezielle Rechnerarchitekturen betreiben. Jedes Teilgebiet wird demselben Prozeß zur Berechnung der Flüsse unterzogen, wie in Kapitel 3 beschrieben.

Es ist noch zu überlegen, wie groß die Überlappung zu wählen ist. Dazu sind zwei Kriterien anzuwenden: Einerseits soll die Anzahl der Teilgebiete möglichst gering sein, andererseits soll die Überlappung genügend groß sein, daß auch bedeutende Flüsse, die aus einem anderen Teilbereich hereinfließen, gut erkannt werden. Hinzu kommt, daß Mulden zumindest in einem Teilgebiet zur Gänze enthalten sein sollen; in diesem können sie eliminiert werden. Es zeigte sich, daß die Überlappung sehr groß zu wählen ist, um diese Bedingungen zu erfüllen. 25 Rasterweiten je Teilgebiet, also 50 Rasterweiten gemeinsamer Bereich (12,5 km), erwiesen sich beim DHM von Österreich (250m-Raster) als nicht ausreichend, um die Mulden in den großen Trogtälern immer richtig zu behandeln. In den meisten Fällen wird daher eine Abstimmung auf das Gelände günstig sein (flache Talbereiche zur Gänze in ein Teilgebiet übernehmen, Flachlandbereiche mit umliegenden höheren Zonen in ein Teilgebiet u. ä.). Zur automatischen Einteilung eignet sich auch die Pyramidenstruktur aus Kapitel 6.4.

Mit der Größe der Überlappung steigt natürlich auch der Rechen- und der Speicheraufwand stark an: Für eine Teilgebietsgröße von nm Rasterweiten und die Überlappung \ddot{u} Rasterweiten in allen 4 Richtungen (das sei jener Wert, um den jedes Teilgebiet in allen Richtungen verlängert wird; die tatsächliche Überlappung ist demgemäß doppelt so groß) ergibt sich für ein inneres Teilgebiet für die Gesamtanzahl Punkte, N_G , wenn $N_T = nm$ die Größe des Teilgebietes ist:

$$N_G = (n+2\ddot{u}) \cdot (m+2\ddot{u}) = nm + 2\ddot{u}(n+m) + 4\ddot{u}^2.$$

Ist $n > m$ und $n/m \leq 1,5$, so gilt:

$$2m \leq n+m \leq 3m,$$

damit

$$N_T + 4\ddot{u}m + 4\ddot{u}^2 \leq N_G \leq N_T + 6\ddot{u}m + 4\ddot{u}^2.$$

Für $\ddot{u}=m/2$ ist das zu berechnende Teilgebiet bereits vier mal so groß wie das schließlich verwendete. Dies bedeutet nicht nur beträchtlich höheren Rechenaufwand, sondern auch eine wesentliche Verkleinerung der nutzbaren Teilgebietsgröße: Bei gleicher Speicherauslastung kann je Rechengang effektiv nur ein Viertel der im Speicher möglichen Feldgröße genützt werden, 75% des Speichers sind also durch den Berechnungs-Overhead belegt. Bei 25% Überlappung ist das Verhältnis 1 : 2,25, das bedeutet, daß der Berechnungs-Overhead nur noch ca. 56% des Speichers beträgt (Abb. 6-1).

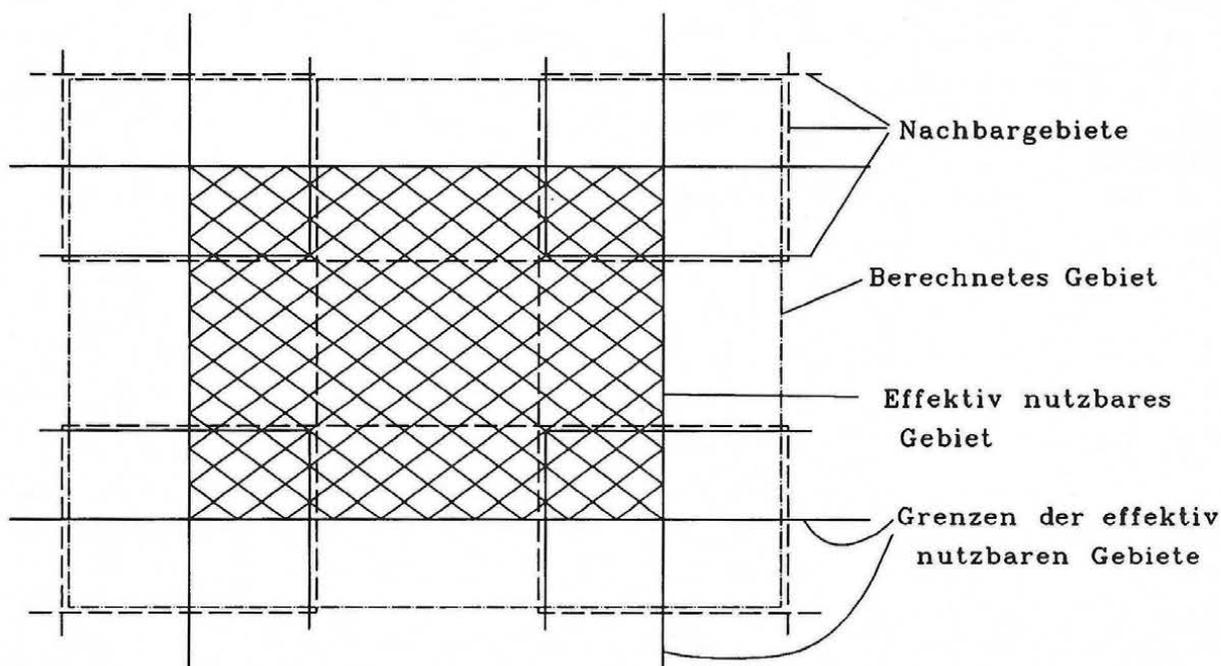


Abb. 6-1: Teilgebiet bei 25% Überlappung

6.3. Übergabe von Summationswerten über Teilgebiete

Eine Verbesserung läßt sich erreichen, indem man die Summationswerte eines bereits berechneten Teilgebietes im Randbereich an die benachbarten Teilgebiete übergibt. In diesem Fall genügt eine geringe Überlappung. Man sollte aber doch einige Rasterweiten wählen (10-20), um die Ungenauigkeiten, die durch Fehlen der äußeren Nachbarn entstehen, gering zu halten. Das Verfahren bietet den Vorteil, daß der Rechen- und Speicheraufwand gering gehalten wird, während gleichzeitig die Unsicherheiten, die im Verfahren aus Kapitel 6.2. genannt waren, kaum mehr zum Tragen kommen.

Zur Übergabe selbst bieten sich zwei Vorgangsweisen an: Entweder man summiert in sämtlichen Teilgebieten und übergibt dann die Randwerte an die Nachbargebiete; nun wird in allen Teilgebieten erneut summiert. Dies könnte eventuell um mehrere Schritte iterativ erweitert werden. Oder man versucht die Teilgebiete so gut wie möglich von oben nach unten zu bearbeiten; im jeweils nächsten

Teilgebiet lassen sich dann die Randwerte der bereits bearbeiteten Teilgebiete übernehmen. Wie im ersten Fall muß allerdings auch hier nach erfolgter Berechnung eine Übergabe der Summationswerte erfolgen. Dies kann (in beiden Fällen) auch lediglich zur Kontrolle geschehen: Nur wenn größere Abweichungen an einem Randbereich bestehen, ist die Berechnung des Teilgebietes zu wiederholen. Es handelt sich dabei um den Fall, daß aus einem Nachbargebiet ein oder mehrere Rastermaschen beträchtlich mehr Wasser beinhalten als im betrachteten und diese Erhöhung eine Veränderung der Interpretation zur Folge hätte (z. B. ein Überschreiten des Mindestwertes für Einzugsgebiete).

Die Übergabe des Wassers hat zu erfolgen, indem im Zielgebiet der äußerste Rand mit den entsprechenden Werten aus den Nachbargebieten belegt wird. Es wird jeweils der größte Wert aller beteiligten Gebiete übernommen. Weitere Iterationen bringen eine bessere Verteilung über das gesamte Gebiet; geht es lediglich um die Ermittlung der Flüsse und Einzugsgebietsgrenzen, so genügt in der Regel ein Übergabeschritt, da große Täler meist ohnehin am Rand eines Teilgebietes eine beträchtliche Wassermenge an die Nachbargebiete übergeben.

Das Verfahren ist nicht geeignet zur Elimination der Mulden. Diese muß nach wie vor im Gebiet mit großer Überlappung vorgenommen werden. Allerdings wird für die Muldenelimination nach Kapitel 3.4.3 nur das Höhenfeld und das vollständige Indexfeld benötigt, was der Verwendung von nur zwei Feldern entspricht. Es ist also wesentlich mehr Speicherplatz verfügbar als bei der Summation (wird bei der Summation etwa 20% Überlappung verwendet, so entspricht dies 50% bei der Muldenelimination).

6.4. Berechnung in Pyramidenstruktur

In der Bildverarbeitung werden für manche Berechnungen Bildpyramiden verwendet. Ausgehend von einer Matrix der Bildelemente werden weitere Matrizen mit jeweils größeren Bildelementen und damit geringerer Anzahl an Elementen erstellt. Werden die Rastermaschen in diesem Sinne als Bildelemente angesehen, so könnte man jeweils durch Verdopplung der Rasterweite eine Matrix mit nur rund einem Viertel der Bildelemente erstellen. Dieser Vorgang läßt sich mehrfach wiederholen, bis eine sehr kleine Matrizengröße erreicht ist. Der Übergang kann beispielsweise durch einfache Mittelung von jeweils vier im Rasterrechteck benachbarten Höhenwerten erfolgen. Wird dieser Algorithmus auf die Höhendaten angewendet, so erhält man ein kleines, nahezu muldenfreies Modell, in dem die wichtigsten Abflußlinien und Einzugsgebiete sehr rasch berechnet werden können (Abb. 6-2).

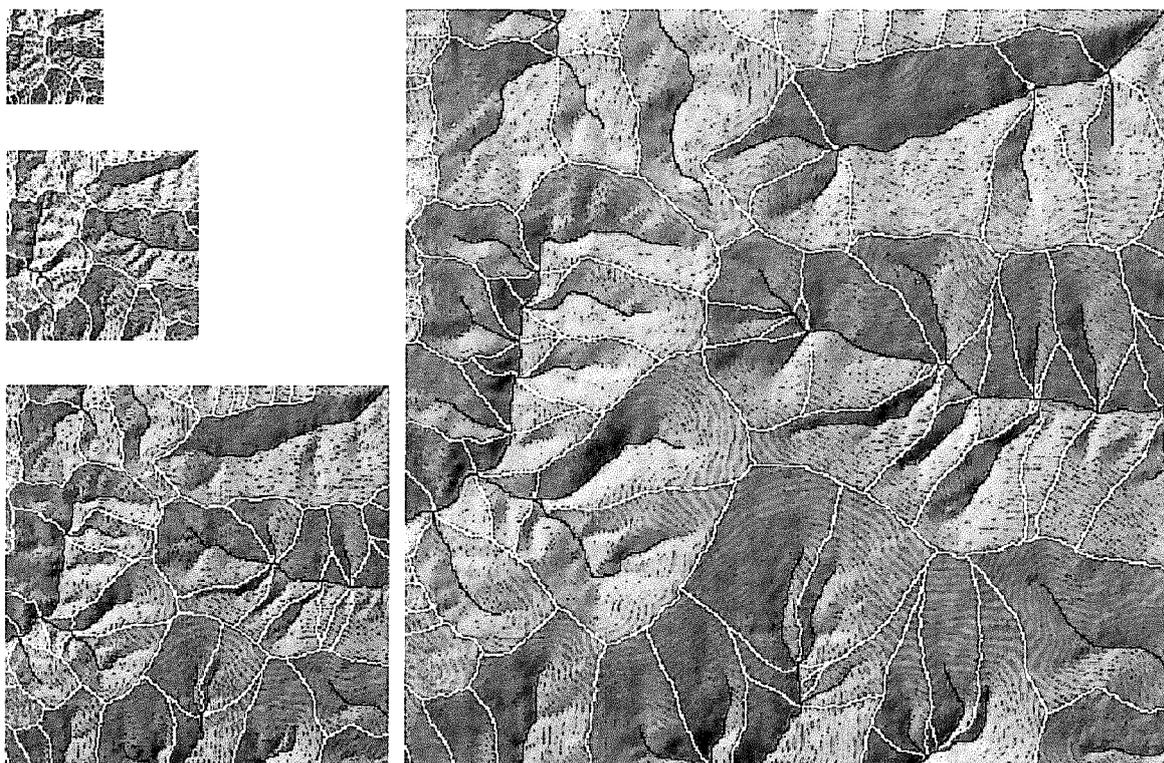
Beim Übergang von einer Stufe zur jeweils nächsten kann nun eine Reihe von Informationen übernommen werden: Die ungefähre Kenntnis der Sortierreihenfolge läßt sich ausnützen, um den Sortiervorgang zu beschleunigen. Die ungefähre Lage der Flüsse und die Abflußrichtungen können das Füllen der Mulden wesentlich beschleunigen. Insbesondere ist auch die heikle Frage des Abflußpunktes wesentlich besser gelöst. Schließlich erlaubt auch die ungefähre Kenntnis der Einzugsgebiete eine sofortige einzugsgebietsweise Berechnung, wobei man noch einen "Sicherheitsbereich" anschließen wird.

Der Sortiervorgang kann einzugsgebietsweise erfolgen: Erst werden alle inneren Punkte der Einzugsgebiete in Gruppen abgelegt und jeweils in sich sortiert. Sodann werden die Punkte im Bereich der Grenzen als zusätzliche Gruppe abgelegt und in sich sortiert. Die Berechnung der Abflußanteilswerte ist dann zwar nicht mehr korrekt, es eröffnen sich aber andere günstige Metho-

den, die auf der ungefähren Kenntnis der Grenzen aufbauen. Die Muldenbehandlung erfolgt jedenfalls korrekt.

Abbildung 6-2 zeigt das Modell aus Bild 3-8 in verschiedenen Vergrößerungsstufen. In jeder Stufe wurden genau die Verfahren aus Kapitel 3.4.4. angewendet, die hier genannten Übergänge wurden nicht vorgenommen. Das Verfahren erscheint sehr gut und bietet eine Reihe anderer Anwendungsmöglichkeiten bis hin zur DHM-Interpolation (vgl. Hutchinson, 1989, der in ähnlicher Weise mit einer groben Rasterweite beginnt und iterativ Verfeinerungen berechnet). Es entspricht einer Bearbeitung in verschiedenen Maßstäben oder Spektralbereichen und ermöglicht so die Bearbeitung großräumiger Formen und, darauf aufbauend, sehr kleiner Formen mit immer denselben Algorithmen.

Eine Unterteilung in Teilgebiete erfolgt am besten einzugsgebietsweise: In jeder Stufe werden die berechneten (größeren) Einzugsgebiete als eigene Teilgebiete für die nächste Stufe ausgesondert. Um im Randbereich die Grenzen richtig zu berechnen, wird das Teilgebiet an allen Rändern um einen Streifen von einigen Rasterweiten Breite vergrößert. Die Vergrößerung kann durchaus großzügig ausfallen, um eine gute Qualität der Ergebnisse zu wahren. Die Rechenzeit steigt trotzdem nicht unverhältnismäßig an, da die Form der Teilgebiete dem zu berechnenden Gebiet entspricht. Ideal wäre es, die Tallinien der Nachbareinzugsgebiete als Begrenzungslinien heranzuziehen.



*Abb. 6-2: Berechnung der Flüsse und Einzugsgebiete in "Pyramidenstruktur":
Rasterweiten und Höhenstufenintervalle: 200m, 100m, 50m, 25m*

6.5. Anwendung der Verfahren zur Datenerfassung

Die Verfahren zur Berechnung der Flußlinien und Einzugsgebietsgrenzen können auch bei der interaktiven oder halbautomatischen Datenerfassung für sehr genaue digitale Höhenmodelle zum Einsatz gelangen: Zunächst wird ein Raster erstellt. Dies kann durch Profilieren im analytischen Auswertegerät ebenso wie durch Korrelation digitaler Bilder geschehen. Solcherart entsteht mit oder ohne nachträgliche Interpolation ein Rastermodell. Nun können im analytischen oder einem entsprechenden Auswertegerät für digitale Bilder verschiedene Elemente zur Kontrolle, Korrektur oder Ergänzungsmessung eingemessen werden. Das Gerät fährt die Punkte nacheinander an, eine allfällige Stereoeinspiegelung kann zusätzlich die berechneten Elemente dem Beobachter sichtbar machen.

Zur Korrektur bzw. Ergänzungsmessung kann das Auswertegerät folgende Elemente anfahren:
Tallinien: Diese lassen sich als Strukturlinien einmessen; dadurch werden einerseits zahlreiche Scheinmulden entfernt, andererseits wird das Flußnetz in Kombination von automatischer Ableitung mit manueller Korrektur gewonnen.

Muldenpunkte: Damit können nach der Einmessung und Korrektur von Tallinien noch verbleibende Scheinmulden bereits bei der Datenerfassung entdeckt und eliminiert werden.

Einzugsgebietsgrenzen, insbesondere im Bereich heikler Wasserscheiden oder größerer Mulden: In diesen Bereichen sind ja möglicherweise Korrekturen des Modelles oder des Abflußpunktes notwendig.

Um diese Informationen bestmöglich anzuwenden und das Rastermodell sinnvoll zu ergänzen, ist ein Geländemodell zu verwenden, das die Linieninformation in das Modell integrieren kann. Denn die rasterbedingten Scheinmulden treten ja im Gelände nicht auf und werden daher nicht durch Korrekturmessungen entfernt.

Anhang: Schaffen einer Entwicklungsumgebung

A.1. Zweck und Vorgaben

Um die Untersuchungen in der gezeigten Weise vornehmen zu können, war es notwendig, eine geeignete Entwicklungsumgebung heranzuziehen, die das Arbeiten mit digitalen Mehrschichtenmodellen gestattet. Ein digitales Modell wird hier als eine Art Objekt (im Sinne der "objektorientierten Programmiersprachen") abgelegt, das Geländedaten und zugehörige Beschreibungen verwaltet. Diese Daten seien über Funktionsaufrufe ansprechbar, weiters sollen beliebige (sinnvolle) Operationen mit diesen Daten vorgenommen werden können. Folgendes wird von der Entwicklungsumgebung gefordert:

Möglichst einfache Bedienung des Programmes.

Die Verwendung mehrerer digitaler Modelle gleichzeitig soll möglich sein, sodaß Operationen mit unterschiedlichen Daten vorgenommen werden können (Arbeit mit Mehrschichtenmodellen, aber auch mit mehreren Modellen unterschiedlicher Bereiche).

Leichte Erweiterbarkeit um Operationen auf digitalen Modellen.

Möglichkeit der Einbindung bestehender Programme oder ihrer Ergebnisse.

Flexible graphische Darstellungsmöglichkeit der Ergebnisse vor allem in Rasterform.

Möglichkeit der Zusammenstellung komplexer Abläufe aus mehreren einfachen Funktionen.

Automatische Wiederholung von Abläufen (z.B. die Ermittlung der Einzugsgebiete für mehrere Basispunkte).

Möglichst weitgehende Portabilität des entstehenden Programmes.

A.2. Notwendigkeit

Die Schaffung einer neuen Untersuchungsumgebung wurde notwendig, weil sich bestehende Programmierumgebungen als zu schwerfällig besonders in Bezug auf Erweiterbarkeit und auf die Verwaltung und Ansprache von Daten erwiesen. So existiert mit dem Programmsystem SCOP am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien zwar ein leistungsfähiges Programmpaket zur Bearbeitung auch mehrerer digitaler Modelle; die Berücksichtigung von Geländekanten und Formlinien sowie die Einteilung des Untersuchungsgebietes in Recheneinheiten bringt aber ein hohes Maß an Verwaltungsaufwand mit sich, der sich beim Austesten einer Vielzahl von Verfahren in unterschiedlichen Kombinationen als ein störender Ballast erwies und den Programmieraufwand unverhältnismäßig erhöht hätte.

Es gibt zwar zu SCOP ein sehr leistungsfähiges Benutzerinterface, "DRE-X" (Molnar, Köstli 1984), dieses weist aber einige Merkmale auf, die einen Einsatz als ungeeignet erschienen ließen: Es ist in FORTRAN, nicht in C programmiert; eine Übergabe von Konstanten kann nur an sogenannte Parameter, das sind Schlüsselwörter innerhalb eines Befehles, erfolgen, was einerseits eine Fülle von Schlüsselwörtern erfordert, andererseits die Befehle sehr lang werden läßt; es ist keine Variablenverwaltung vorgesehen, sodaß nach der Interpretation eine weitere Prüfung der Eingabe notwendig ist.

A.3. Das Programm MATRIX

Um die genannten Bedingungen möglichst gut zu erfüllen, wurde das Programm "MATRIX" entwickelt. Dieses Programm besteht aus einem Interpreter, der die Eingabe von syntaktisch einfachen Befehlen gestattet und der mit einem Laufzeitsystem zur Bearbeitung von einfachen Programmstrukturen - Prozeduren, bedingten und unbedingten Schleifen, Verzweigungen - ausgestattet ist. Dieser Interpreter erlaubt die Zusammenstellung komplexer Abläufe aus einer Reihe von Grundoperationen. Die Definition von beliebig vielen Feldern zur Aufnahme digitaler Modelle (in der Folge auch **Matrizen** genannt) ermöglicht die Durchführung komplexer Operationen und die gleichzeitige Verwendung unterschiedlicher Daten. Der Interpreter läßt sich leicht und ohne Änderungen um zusätzliche Befehle erweitern, es müssen nur die zur Bearbeitung des Befehles notwendigen Unterprogramme bereitgestellt werden. Er erlaubt ferner die interpretative Bearbeitung von Prozeduren, sodaß zahlreiche einfache Funktionen ("Grundfunktionen") in unterschiedlichen Kombinationen zu komplexen Abläufen zusammengestellt werden können, ohne neue Übersetzer- und Bindeläufe notwendig zu machen. Prozeduren können aus dem Programm heraus erstellt oder geändert werden, was einen sehr schnellen Entwicklungszyklus erlaubt.

Das Programm wurde auf einer MicroVAX II und einer VAX-Station 3200, die beide am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung zur Verfügung stehen, unter dem Betriebssystem VMS 5.1 entwickelt. Als Programmiersprache wurde C verwendet, wobei darauf geachtet wurde, den ANSI-Standard einzuhalten und so weit als möglich auf Besonderheiten des VAX-C-Compilers zu verzichten, damit der Code auf andere Rechner übertragbar bleibt. Bei der Programmierung wurde auf weitgehende Modularität und Klarheit der Schnittstellen geachtet, um ein späteres Austauschen von Programmteilen durch andere zu ermöglichen. Keine Rücksicht wurde genommen auf Speichergrößen; alle benötigten Daten werden im Arbeitsspeicher der Maschine gehalten, was eine wesentliche Beschleunigung und Vereinfachung der Verwaltung mit sich bringt. Auf Rechnern mit großen linearen Adreßräumen (bis in den Gigabyte-Bereich) gibt es bei entsprechendem Speicherausbau somit nach oben hin de facto keine Einschränkung der verwendbaren Modellgrößen.

A.3.1. Programmaufbau

Das Programm besteht aus mehreren Teilen, die über klar definierte Schnittstellen miteinander verbunden sind und ihrerseits wieder aus Teilbereichen bestehen (modularer Aufbau). Grob gliedert sich das Programm in einen allgemeinen Teil, den **Interpreter**, der die Steuerung des Programmes übernimmt, und einen speziellen, anwendungsorientierten Teil, der sich mit der **Matrizenbearbeitung** befaßt. Der Interpreter bearbeitet und kodiert die einzelnen Befehle und ruft die jeweilige Funktion auf. Von der Benutzerseite gesehen beinhaltet er eine Reihe allgemeiner Befehle, die die jeweilige Arbeitsumgebung definieren und die wichtigsten Verwaltungsaufgaben vornehmen. Dieser Interpreter hat an sich nichts mit den eigentlichen Matrizenoperationen zu tun und könnte völlig eigenständig in einem Programm zur Bearbeitung gänzlich anderer Probleme Verwendung finden.

Die Matrizenoperationen sind im zweiten Teil als Funktionen über den Matrizen (die ja den eingangs genannten digitalen Modellen entsprechen) zusammengefaßt, hier können jederzeit auf einfache Weise weitere Funktionen eingebunden werden.

Der **Interpreter** seinerseits besteht aus dem Laufzeitsystem, das die Programmsteuerung übernimmt, dem eigentlichen Befehlsinterpreter, der alle Befehle auf syntaktische Korrektheit überprüft

und in einen Zwischencode umwandelt und einem allgemeinen System zur Verwaltung der Daten ("Variablen" oder "Objekte") und Programmstrukturen ("Prozeduren", Schleifen, Verzweigungen, ...).

Das Modul zur **Matrizenbearbeitung** besteht aus einem Teil mit allgemeinen Matrizenoperationen, wie der Definition von Matrizen, Grundoperationen (Belegen mit konstantem Wert, Kopieren von Matrizen, elementweise Addition, Subtraktion, Multiplikation usw.) und erweiterten Operationen (Belegen mit konstantem Wert über Maskenfelder; Sortieroperationen über Indexfelder u.a.) und aus einem Teil mit speziellen Matrizenoperationen, die sich hier problemspezifisch ergeben (Linienverfolgungen, Markieren aller Oberlieger, Zählen von Punkten nach verschiedenen Kriterien, Algorithmen zur Bestimmung von Einzugsgebieten u.a.).

Schema des Programmaufbaues (die durchgezogenen Linien stellen Unterprogrammaufrufe dar, die Aufruffolge ist von oben nach unten und von links nach rechts zu verstehen):

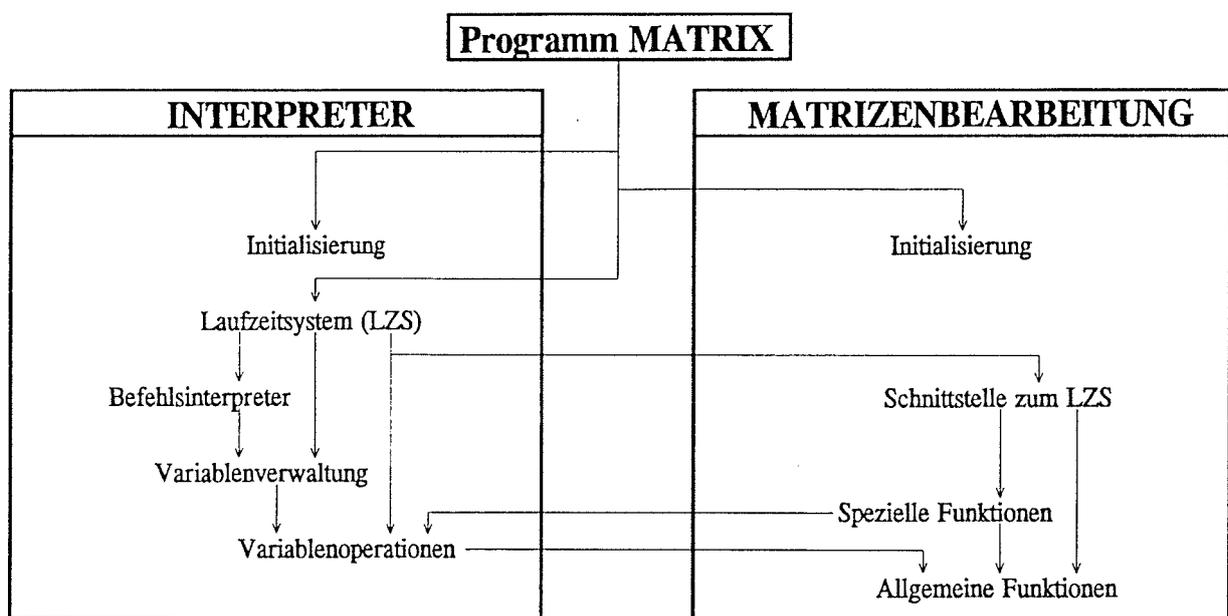


Abb. A-1: Schematischer Programmaufbau

Es folgen kurze Beschreibungen der wichtigsten Programmteile.

A.3.2. Der Befehlsinterpreter

A.3.2.1. Allgemeines

Bei der Entwicklung des Befehlsinterpreters wurde besonderes Augenmerk auf die einfache Definition von Befehlen gelegt. Die Qualität der Syntax des Interpreters war von untergeordneter Wichtigkeit, es sollte vor allem kein zu hoher Entwicklungsaufwand für den Befehlsinterpreter betrieben werden; so wurde ein ziemlich starres System erstellt, das - ähnlich wie viele Programmier-

sprachen - vom Anwender genaue Kenntnis der Befehle und ihrer Parameter verlangt, besonders was Reihenfolge und Datentyp der Parameter betrifft.

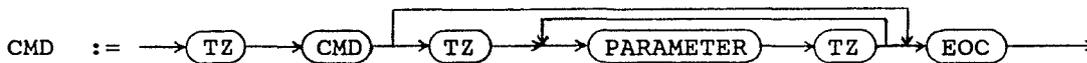
Das zweite Kriterium war die Einfachheit und Klarheit der Schnittstelle zum rufenden Programm, wodurch es möglich sein soll, den Interpreter gegebenenfalls durch einen höher entwickelten zu ersetzen. Es steht heute eine Reihe leistungsfähiger Programme zur Erstellung komplexer "Grammatiken" zur Verfügung, die sich einbinden ließe. Auch Menüsteuerungen und ähnliche Techniken können den derzeitigen Interpreter ersetzen. Ferner wurde von Anfang an die Möglichkeit ins Auge gefaßt, den Interpreter durch einen sogenannten Precompiler zu ersetzen, der die Befehle übersetzt und in einem Zwischencode ablegt, sodaß bei späterer Durchführung nur noch die Interpretation des Zwischencodes notwendig ist; dies würde eine beträchtliche Beschleunigung mit sich bringen.

A.3.2.2. Allgemeine Befehlssyntax

Der Interpreter bearbeitet jeweils einen Befehl. Die Bearbeitung der Befehle erfolgt streng sequenziell. Jeder Befehl besteht aus dem Namen des Befehles und einer Reihe von Parametern, die im allgemeinen eine feste Reihenfolge innerhalb des Befehles haben. Als Parameter kommen ein Unterbefehl oder ein Datenelement in Frage. Jeder Unterbefehl ist in seiner Syntax völlig ident einem Befehl, insbesondere kann er wieder Parameter in fester Reihenfolge erfordern. Als Datenelemente kommen Variablen oder Konstante in Frage. Variablen können über einen Befehl des Laufzeitsystems mit einem beliebigen verfügbaren Datentyp und einem beliebigen Namen deklariert werden. Der Name kann höchstens 31 Zeichen enthalten. Konstante sind Datenelemente, deren Wert direkt in der Befehlszeile eingegeben wird.

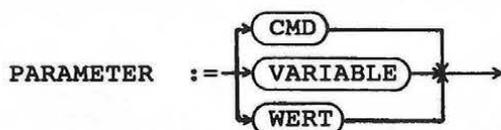
Zu jedem Befehl können bis zu 8 verschiedene Parameter definiert werden. Als Parameter kommen Daten von beliebigem oder von einem bestimmten Typ in Frage, die nur als Variable auftreten können, oder solche, die auch als Konstante eingegeben werden können. Welche Variante für einen Parameter erlaubt ist, ist ebenso wie die Namen der Befehle in einer Befehlsdeklarationsdatei festgelegt.

Die allgemeine Syntax eines Befehles lautet:



- CMD ist ein Befehl
- TZ ist eine beliebige Anzahl von Trennzeichen
- CMD ist der Name des Befehles
- PARAMETER ist ein beliebiger Parameter
- EOC ist das Befehlsende-Zeichen

Die allgemeine Syntax für Parameter lautet:



VARIABLE ist der Name einer Variable

WERT ist ein elementarer Datenwert (Flag, ganze Zahl, Fließkommazahl, Zeichenkette)

Die anderen Bestandteile sind die gleichen wie oben. Es handelt sich um eine rekursive Definition bezüglich **CMD**; dies ermöglicht eine beliebig tiefe Verschachtelung von Unterbefehlen. Die Befehls- worte jeder Befehlsebene sind in einer Tabelle festgelegt, ebenso die zu jeder Ebene gehörenden Parameter. Durch diese Art der Syntax entsteht eine Fülle von Gestaltungsmöglichkeiten für Befehle.

Welche Zeichen als Trennzeichen zwischen Parametern, zur Markierung des Befehlsendes, in Befehlsworten, und in den elementaren Datentypen (einfache numerische Typen, Flags und Zeichen- ketten) Verwendung finden können, ist über sogenannte Zeichen-Sets ("Character sets") festgelegt, die in der Befehlsdeklarationsdatei angegeben werden können.

Beispiele für Befehle:

```
"DEFINE GLOBAL INT VARIABLE_1 VARIABLE_2"
```

ist ein Befehl zur Deklaration von Variablen. Als Informationen benötigt dieser Befehl den Namen der Symboltabelle, in dem die Variablen definiert werden sollen (**GLOBAL** oder **LOCAL**), den Datentyp der anzulegenden Variablen und schließlich die Namen der Variablen.

DEFINE der Befehlsname

GLOBAL ein Unterbefehl ohne weitere Parameter

INT ebenfalls ein Unterbefehl ohne weitere Parameter

VARIABLE_1 der erste Name einer Variablen, es können weitere Namen folgen (hier noch einer).

In diesem Beispiel gehören alle Parameter zum Befehlswort "**DEFINE**". Dies ist nicht aus dem Befehl sondern nur aus der Deklarationsdatei ersichtlich.

```
"LINE linemask startpnt nrpnts maskval HIGHER sum MIN height"
```

Dieses Beispiel zeigt einen etwas komplexeren Befehl zur Definition einer Linienverfolgung. Zur besseren Unterscheidung sind hier alle Variablennamen in Klein-, alle Befehls- oder Unterbefehls- worte in Großbuchstaben angeführt (der Interpreter selbst unterscheidet bei Befehlen und Variablen nicht zwischen Klein- und Großschreibung).

LINE ist der Befehlsname.

linemask ist der Name einer Matrix, in der die Linie mit dem Wert **maskval** zu markieren ist.

startpnt ist der Name des Anfangspunktes für die Linienverfolgung, Datentyp **POINT**.

- `nrpnts` wird nach der Verfolgung mit der Anzahl der markierten Linienpunkte belegt, Datentyp `INT`.
- `maskval` ist der Wert, mit dem markiert wird, Datentyp `FLT`.
- `HIGHER` ist ein Unterbefehl, der eine Matrix erfordert; die Linie soll zu allen Nachbarn hin verfolgt werden, die in der Matrix einen größeren Wert haben als der Standpunkt.
- `sum` gehört zu `HIGHER`, es ist die Matrix, in der das Kriterium von `HIGHER` für jeden Linienpunkt anzuwenden ist; alle Nachbarn, die das Kriterium erfüllen, kommen als Kandidaten für die Linienverfolgung in Frage.
- `MIN` ist wieder ein Unterbefehl, der eine Matrix erfordert; es soll der Nachbar mit dem niedrigsten Wert in der Matrix von allen Kandidaten des vorhergehenden Kriteriums ausgewählt werden.
- `height` Gehört zu `MIN`, es ist die Matrix, in der das Kriterium von `MIN` für jeden Kandidaten anzuwenden ist.

`LINE` endet im Beispiel hier; der Befehl gestattet an sich die Angabe noch weiterer Unterbefehle. Dies ist ebenso wie die Datentypen und die Syntax in der Deklarationsdatei festgelegt.

A.3.2.3. Deklaration von Befehlen

Die Deklaration von Befehlen erfolgt über Befehlsdeklarationsdateien. Diese Dateien werden jeweils zu Beginn des Programmlaufes über den Initialisierungsaufwurf des Befehlsinterpreters eingelesen und daraus intern Befehlstabellen aufgebaut. Die Befehlstabellen ihrerseits werden später zur Interpretation der Befehle herangezogen. Es können beliebig viele derartige Dateien verwendet werden, auf jeder können beliebig viele Befehlstabellen deklariert werden. Die Gesamtanzahl der Tabellen ist in der vorliegenden Programmversion auf 128 beschränkt, diese Anzahl könnte verhältnismäßig einfach erweitert werden, reicht jedoch für die vorliegende Anwendung bei weitem aus (es werden ca. 25 Tabellen verwendet).

Programmintern werden die Befehlstabellen entsprechend den Angaben auf den Deklarationsdateien aufgebaut. Die Tabellen folgen einer Hierarchie in Stufen - über- und untergeordnete Tabellen, je nachdem, ob eine Tabelle Befehle oder Unterbefehle (oder Unterbefehle von Unterbefehlen usw.) beinhaltet - und Folgetabellen, das sind Tabellen derselben Stufe, in die die Befehle zur besseren Übersichtlichkeit gruppiert sind (Abb. A-2).

Folgetabellen bringen eine Vereinfachung der Wartung mit sich und ermöglichen die Aufgliederung eines Programmes in mehrere voneinander weitgehend unabhängige Teile. Im Programm `MATRIX` wurde diese Trennung verwendet, um die allgemeinen Befehle des Interpreters von den speziellen der Matrizenoperationen zu trennen. Der Interpreter stellt somit einen eigenständigen Programmteil dar, der nicht verändert werden muß, wenn im Teil mit den Matrizenoperationen Befehle hinzukommen. Dies macht den Interpreter universell einsetzbar.

Stufe 0	Haupttabelle			
	Folgetab-1			
	Folgetab-2			
			
Stufe 1	Untertab-1.1	Untertab-1.2	Untertab-1.3
	Folgetab-1.1-1	
			
Stufe 2	Untertab-2.1	Untertab-2.2	Untertab-2.3
	Folgetab-2.1-1	
			
.				

Abb. A-2: Schema der Befehlstabellen

Ein Befehlswort oder Unterbefehlswort wird nacheinander in allen Folgetabellen einer Stufe gesucht, bis es gefunden wurde (oder keine weitere Tabelle vorliegt, dies ergibt die Fehlerbedingung "Unbekannter Befehl"). Sind Unterbefehle zu einem Befehl definiert, so gibt es von diesem Befehl, also aus seiner Tabelle, einen Zeiger auf eine Untertabelle. Der Unterbefehl wird in dieser Tabelle und etwaigen ihr zugeordneten Folgetabellen gesucht. Für die Zuordnung von Tabellen gilt, daß jedem Befehl jeder beliebigen Tabelle jede beliebige Tabelle des Systems als Unterbefehlstabelle folgen kann. Weiters kann jede Tabelle einer beliebigen Anzahl von Befehlen als Unterbefehlstabelle zugewiesen sein. Eine Einschränkung ergibt sich lediglich dadurch, daß in der Deklarationsdatei zur Zeit der Deklaration einer Tabelle als Untertabelle zu einem Befehl oder als Folgetabelle zu einer Tabelle diese referenzierte Tabelle bereits deklariert sein muß. Die bearbeitete Tabelle selbst läßt sich auch ansprechen, sodaß rekursive Definitionen von Befehlen möglich sind (zum Beispiel können solcherart beliebig viele Befehle einer Tabelle nacheinander als Unterbefehle gegeben werden, wenn nach jedem dieser Unterbefehle die Tabelle selbst als optionaler Parameter beigefügt ist).

Das Einlesen der Tabellen zu Beginn des Programmlaufes erfordert zwar bei jedem Programmstart Rechenzeit, ermöglicht aber, daß auf einfache Weise Befehle ergänzt und bestehende in ihrer Syntax verändert (insbesondere erweitert) werden können.

A.3.2.4. Programmstruktur

Der Befehlsinterpreter besteht aus mehreren Unterprogrammgruppen, die über eine Reihe von innerhalb des Befehlsinterpreters allgemeinen Variablen miteinander kommunizieren. Es folgt eine kurze Aufzählung und Beschreibung der Unterprogrammgruppen (mit ihrem jeweiligen dreibuchstabigen Kenncode, der zugleich Beginn aller Unterprogrammnamen der Gruppe ist).

ctb

Die erste Gruppe liest die Befehlsdeklarationsdateien ein und baut die Tabellen auf. Jede Tabelle erhält bei ihrer Deklaration eine interne Nummer, die fortlaufend vergeben wird. Die Tabellen werden in der Folge über diese Nummer angesprochen, insbesondere wird diese Nummer in den Parameterdeklarationen der Befehlstabellen verwendet, wenn die entsprechende Tabelle die zu diesem Befehl gehörenden Unterbefehle enthält. Es wird eine nach den Nummern sortierte Liste mit den Zeigern auf die Tabellen angelegt, deren Adresse als globale Variable an den Befehlsinterpreter übergeben wird.

Zur Gruppe der Befehlsinitialisierung gehört auch jener Aufruf, der den Befehlen einer Tabelle Unterprogramme zuweist. Ist einmal eine Befehlstabelle definiert, so kann mit diesem Aufruf für jeden der Befehle die Adresse eines zugehörigen Unterprogrammes angegeben werden. Diese Adresse wird ebenfalls in der Liste abgelegt, sodaß das jeweilige Unterprogramm nach korrekter Interpretation des Befehles angesprungen werden kann. Ist für einen Unterbefehl kein Unterprogramm definiert, so hat dies keine weiteren Folgen; fehlt hingegen bei einem Befehl die Angabe eines Unterprogrammes, so wird nach erfolgreicher Interpretation eine Warnungsmeldung ausgegeben und der nächste Befehl zur Interpretation geholt. Der Befehl wird also ignoriert. Unterprogramme zu Unterbefehlen sind in der vorliegenden Programmversion wirkungslos, sie können aber mit geringfügigen Veränderungen im Parser aktiviert werden. Damit wäre es möglich, Vorverarbeitungen der Eingabe vorzunehmen, Befehlsgruppen zu erstellen - als die eigentlichen Befehle werden dann die Unterbefehle aufgerufen - und Ähnliches mehr.

cmd

Diese Gruppe von Unterprogrammen sorgt für die korrekte Bereitstellung der Befehle. Es können verschiedene Eingabekanäle verwendet werden: Tastatur ("Standardeingabe"), beliebige Dateien, interne Textpuffer. Dazu gibt es eine Reihe von Unterprogrammen, die diese Auswahl vornehmen und Unterprogramme, die für die korrekte Positionierung verantwortlich sind. So muß z. B. nach dem letzten Befehl innerhalb einer Programmschleife an den Anfang positioniert werden; bei Bedingungen (`IF ... ELSE ... ENDIF`) muß der jeweilige Zweig abgearbeitet und der andere übersprungen werden; Prozeduren schließlich sollen gezielt angesprungen werden.

Ein eigener Komplex behandelt die lokalen Variablen des Interpreters. Alle Datenelemente, die als Werte eingegeben werden, und die Befehlscodes aller Befehle und Unterbefehle werden vom Interpreter in eigens dafür zur Verfügung gestellten Variablen abgelegt. Für alle Befehle werden dieselben derartigen Variablen verwendet, sodaß eingegebene Konstanten nur über einen Befehl hin den Wert behalten. Um die Übergabe von Konstanten an Unterprogramme zu ermöglichen, wo diese Werte oft über viele Befehle hin benötigt werden, besteht die Möglichkeit, mehrere Gruppen von lokalen Variablen des Interpreters anzulegen. Soll eine Prozedur aufgerufen werden, so ist eine neue Gruppe anzulegen, wodurch etwaige als Parameter an die Prozedur übergebene Datenwerte nicht verändert werden.

Der Hauptteil von "cmd" ist der eigentliche Befehlsinterpreter. Hier wird ein Befehl bearbeitet und die Eingabe in kodierte Form, das sogenannte "cmd-struct", umgewandelt. Zunächst werden die lokalen Variablen des Befehlsinterpreters gelöscht, sodann wird der nächste Befehl von der gerade aktiven Eingabekanal gelesen und schließlich wird für diesen Befehl der sogenannte Parser mit der aktuellen Haupttabelle aufgerufen. Der Parser zerlegt den Befehl in seine Bestandteile, die "Tokens", und wandelt die Eingabe gemäß den Befehlstabellen um. Er erwartet zunächst ein Befehlswort, das er in der ihm übergebenen Befehlstabelle und allfälligen Folgetabellen sucht. Verläuft die Suche erfolgreich, so werden der zu diesem Befehl gehörende Code, der Statuscode und die Unterprogrammadresse aus der Befehlstabelle entnommen. Da vom Parser über einen Eingabeparameter (den Befehlscode) verlangt werden kann, nur bestimmte Befehle zu interpretieren, untersucht er jetzt, ob der Befehl ein gültiger ist. Wenn nicht, kehrt er ohne weitere Arbeit mit einem entsprechenden Statuscode zurück. Dies wird verwendet, um gezielt Befehle zu suchen, beispielsweise den Deklarationsbefehl einer Prozedur bei deren Aufruf.

Wurde ein gültiger Befehl erkannt, so wird der Rest des Befehles interpretiert. Aus der Befehlstabelle wird entnommen, welche Parameter erwartet werden. Für Unterbefehle ruft sich der Parser rekursiv mit Übergabe der entsprechenden Befehlstabelle auf. Für Datenelemente wird unterschieden

zwischen der Eingabe von Variablen - es müssen gültige Variablennamen folgen, und die Variablen müssen vorhanden sein und im Typ mit der etwaigen Deklaration in der Befehlstabelle übereinstimmen - und der Eingabe von Variablen oder Datenwerten - in diesem Fall wird anhand der Art des nächsten Eingabeelementes (Tokens) überprüft, ob es sich um ein Wort handelt (es wird eine Variable vermutet, Überprüfungen wie oben) oder um einen der Datentypen String, Flag oder numerischer Wert. Stimmt der Wert mit der Deklaration in der Befehlstabelle überein, wird eine lokale Variable des Befehlsinterpreters zur Aufnahme des Wertes herangezogen. In dieser Weise wird mit jedem Parameter verfahren, der einzugeben ist.

Das Ende des Befehles wird an einem Befehlsende-Zeichen in der Eingabe erkannt. Als Fehlerbedingungen können auftreten: Mehr Parameter in der Eingabe als für den Befehl deklariert; weniger Parameter in der Eingabe als für den Befehl deklariert; bei einer Gruppe von Parametern, von denen entweder alle oder keiner anzugeben ist, können Parameter fehlen; und eine Reihe weiterer Fehler aus der Dateibehandlung und der Interpretation.

Der Parser gibt einen Statuscode an das rufende Programm zurück, der den Erfolg der Interpretation beschreibt. Wenn kein Fehler auftrat, wurde der Befehl also vollständig und fehlerfrei interpretiert, der Parser kehrt mit dem Statuscode "OKAY", das ist 0, zurück. Nur in diesem Fall soll das zu dem Befehl gehörende Unterprogramm, dessen Adresse der Parser an das rufende Programm zurückgibt, gestartet werden, da nur in diesem Fall sichergestellt ist, daß alle Parameter richtig gesetzt sind. Im Fehlerfalle wird die Interpretation sofort abgebrochen und - nötigenfalls durch mehrere Ebenen des rekursiven Aufrufes des Parsers hindurch - mit dem jeweiligen Fehlercode, der ungleich Null ist, zurückgekehrt; der Wert hängt vom Fehler ab (Kap. A.3.5., Programmierungen).

A.3.2.5. Schnittstellen

Der Befehlsinterpreter tauscht mit dem rufenden Programm über eine Reihe von Parametern Information aus. Als Eingangsparameter, die also vom rufenden Programm zu setzen sind, dient ein "Sollbefehlscode", der angibt, ob nur ein bestimmter (Code > 0) oder jeder beliebige (Code -1) Befehl der Haupttabellen zu interpretieren ist. Der wichtigste Parameter ist das `cmd-struct`. Es wird vom Interpreter neu initialisiert und mit den Eingabedaten des Befehles belegt. Als Ausgangsparameter dienen schließlich Variable, die den Statuscode, den Befehlscode und die allfällige Unterprogrammadresse des Befehles aus der Befehlstabelle zurückgeben.

Das `cmd-struct` ist im wesentlichen eine Liste der eingegebenen Parameter. Es besteht aus einem Header, der die wichtigsten Informationen zur Beschreibung der Struktur aufnimmt und den Zeigern auf die Variablen, die die Eingabeparameter enthalten.

Die Deklaration des Headers des `cmd-struct` lautet (in der Programmiersprache C; die Texte zwischen den Zeichenfolgen `/*` und `*/` sind Kommentare):

```
typedef struct          /* cmd-struct zur Befehlsübergabe */
{
    long      mcm;      /* Gesamtanzahl freie Datenelemente */
    long      ncm;      /* Anzahl belegte Datenelemente */
    VARHDR    **beg;    /* Zeiger auf Datenanfang */
    VARHDR    **dat;    /* Aktuelle Position im Datenfeld */
} CMDSTR;
```

`mcm` gibt die Anzahl Einträge an, die das `cmd-struct` aufnehmen kann

- `nem` gibt die Anzahl Einträge an, die derzeit belegt sind
- `beg` ist ein Zeiger auf die Position des ersten Eintrages; dieser Wert wird zur Initialisierung gesetzt und nicht mehr verändert; er ist der Zeiger auf das Datenfeld
- `dat` ist der Zeiger auf die gerade aktuelle Position im Datenfeld

Das Datenfeld seinerseits besteht aus einer Liste aus Zeigern auf Variablen. Jede Variable besteht aus einem Header, der eine kurze Beschreibung der Variablen gibt (Kap. A.3.4., Variablen) und dem eigentlichen Datenwert. Die Elemente `beg` und `dat` des `cmd-struct` stellen somit "Zeiger auf Zeiger auf Variablenheader" dar - dies wird durch die zwei Sterne in der Deklaration ausgedrückt.

Der Parser setzt zunächst das `cmd-struct` zurück, das bedeutet, er setzt `nem` auf 0 und `dat` auf den ersten Eintrag, also ident `beg`. Sodann werden sämtliche Eingabewerte, die nicht selbst Variablen sind, in Variable umgewandelt: Für jedes Befehls- oder Unterbefehlswort wird eine Variable vom Typ `INT` angelegt (ganze Zahl, in C als `long` deklariert), in der der Befehlscode laut der Befehlstabelle abgelegt wird. Für jene Datenelemente, für die der Name einer existierenden Variable eingegeben wurde, wird der Zeiger auf diese Variable abgelegt. Für direkte Werteingaben wird eine lokale Variable des Befehlsinterpreters reserviert, der Datenwert dort abgelegt und der Zeiger auf diese Variable übergeben.

In der ersten Variable des `cmd-struct` ist immer der Befehlscode dieses Befehles zu finden. `nem` gibt immer die Anzahl der erfolgreich interpretierten Eingabeelemente, die - nachdem sie gegebenenfalls in Variable umgesetzt wurden - im `cmd-struct` abgelegt wurden. `dat` wird vom Parser auf den Beginn der Liste gesetzt, sodaß die Bearbeitung mit dem Befehlscode beginnen kann. `dat` soll bei der Bearbeitung immer aktualisiert werden, sodaß die Daten jeweils an der richtigen Stelle in der Liste geholt werden können. `beg` und `nem` dürfen nicht verändert werden.

A.3.3. Die Programmsteuereinheit

A.3.3.1. Allgemeines

Die Programmsteuereinheit (kurz Steuereinheit oder Steuerprogramm) kontrolliert den Ablauf des Programmes; ihr obliegt die Bearbeitung von Prozeduren und Kontrollstrukturen, sie sorgt für die Bereitstellung von Variablen und verfügt darüber hinaus über eine Reihe von Verwaltungsbefehlen, die einen komfortablen Betrieb ermöglichen.

A.3.3.2. Arbeitsweise

Das Prinzip, das der Programmsteuereinheit zugrundeliegt, ist folgendes: Jede Funktion, sei es die Interpretation eines Befehles durch den Befehlsinterpreter, sei es die Durchführung eines Befehles durch das entsprechende Unterprogramm, kehrt mit einem Statuscode zurück, der angibt, ob die Funktion korrekt durchgeführt werden konnte (Statuscode = `OKAY` = 0) oder ob ein Fehler auftrat (Statuscode ungleich 0). Anhand dieses Codes kann die rufende Programmeinheit entscheiden, ob die Bearbeitung fortzusetzen, abzubrechen oder eine dem Code angepaßte Fehlerbehandlung vorzunehmen ist. Jedem Fehlercode kann über eine Meldungsdatei eine Meldung zugeordnet werden, die bei Bedarf nach Auftreten des Fehlers auf die Standardausgabe geschrieben wird (Kap. A.3.5., Pro-

grammeldungen). Die zentrale Einheit des Steuerprogrammes, die Hauptschleife, ruft die genannten Funktionen auf und überprüft nach deren Rückkehr jeweils den zurückgegebenen Statuscode. Ist er "OKAY", so wird weitergearbeitet, anderenfalls wird die Bearbeitung beendet und der Code an das rufende Programm zurückgegeben.

Die Programmsteuereinheit läßt sich grob in zwei Bereiche gliedern: In die Hauptschleife, das ist jenes Unterprogramm, das beliebige Befehle bearbeitet, bis eine aus einer Liste von Abbruchbedingungen auftritt; und in einen Bereich, der die Routinen zur Bearbeitung der allgemeinen Befehle des Interpreters enthält.

Nach dem Start des Programmes muß die Steuereinheit über einen eigenen Aufruf initialisiert werden. Als Initialisierung wird die Befehlsdatei mit den allgemeinen Befehlen des Interpreters und die Liste mit den zugehörigen Unterprogrammadressen beim Befehlsinterpreter angemeldet, deshalb muß letzterer bereits vorher initialisiert werden. Danach werden die Symboltabellen für die globalen und die lokalen Variablen und die Parameter angelegt (Kap. A.3.4., Variablen).

Nach der Initialisierung kann das Steuerprogramm seine Arbeit aufnehmen, was durch den Einsprung "exekutiere eine Datei" erreicht wird. Dieses Unterprogramm meldet die als Parameter übergebene Eingabedatei (über ihren Namen) beim Befehlsinterpreter an und startet die Hauptschleife; wenn diese mit einer Fehlerbedingung abbricht, wird der Fehlercode in einer als Eingangsparameter übergebenen Liste der Abbruchbedingungen gesucht, und, falls er gefunden wird, das Unterprogramm unter Rückgabe eben dieses Codes beendet. Anderenfalls wird eine dem Code entsprechende Fehlermeldung ausgegeben und die Hauptschleife erneut gestartet (Abb. A-3).

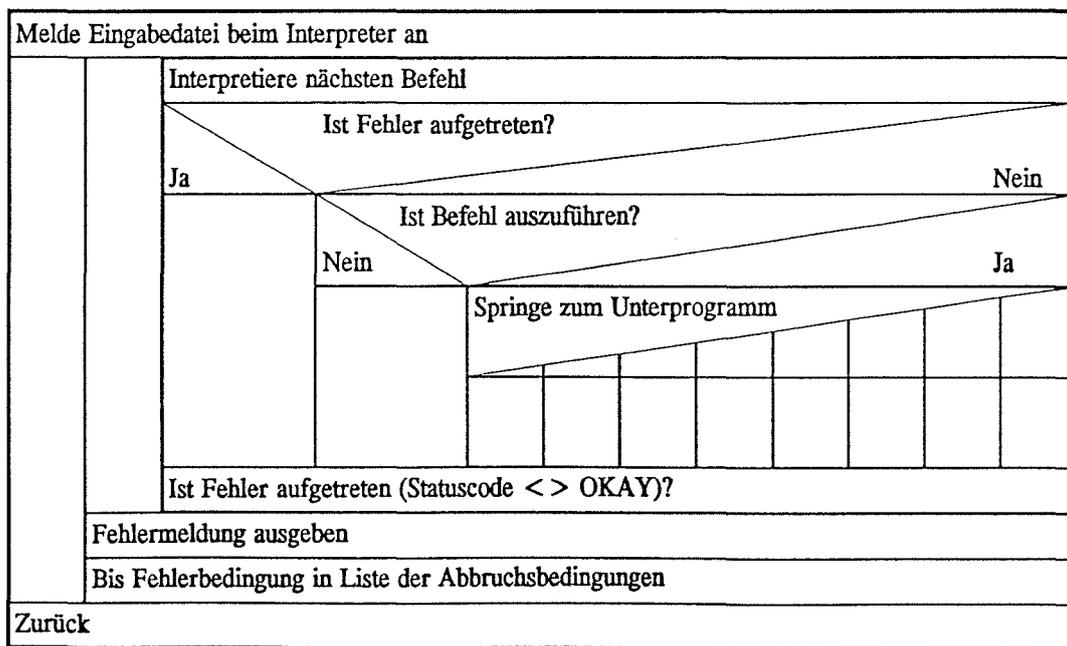


Abb. A-3: Struktogramm des Unterprogrammes "Exekutiere Datei"

Zu Beginn des Durchlaufes der Hauptschleife wird der Befehlsinterpreter aufgerufen. Das Steuerprogramm stellt an diesen Interpreter keine weiteren Forderungen, als daß er mit dem Rückgabecode anzeigt, ob der Befehl korrekt interpretiert werden konnte und in diesem Fall die Unterprogrammadresse, der Statuscode des Befehles und das `cmd-struct` korrekt belegt sind. Ist dies der Fall, so wird überprüft, ob der Befehl unter den aktuellen Bedingungen ablaufen darf (laut Statuscode

"nur vom Terminal", "nur von Prozedur") und ob ein Unterprogramm zum Befehl definiert ist (Unterprogrammadresse ungleich 0). Wenn alles in Ordnung ist, wird dieses Unterprogramm angesprungen, das mit einem Standard-Statuscode zurückkehren muß (0, falls alles in Ordnung, sonst die entsprechende Fehlernummer).

In diese Bearbeitungsstruktur sind alle Strukturbefehle eingefügt: In den Unterprogrammen, in denen Prozeduraufrufe, Schleifen und Verzweigungen behandelt werden, wird die Hauptschleife aufgerufen (dies ist rekursiv, da die Unterprogramme bereits aus der Hauptschleife gerufen wurden). Die entsprechenden Gegenspieler - das sind die Unterprogramme zur Bearbeitung der Rückkehr aus Prozeduren und von Schleifen- und Bedingungsenden - liefern einen Fehlercode, der ungleich "OKAY" ist. Daher bricht die Hauptschleife ab und kehrt somit zum jeweils rufenden Programm zurück. Dort wird untersucht, ob der Code vom jeweiligen Gegenspieler stammt. Wenn ja, wird in der entsprechenden Weise weitergearbeitet: Bei Prozedurende zurückgekehrt, bei Schleifenende die Bedingung neuerlich ausgewertet usw.

Um sicherzustellen, daß bei Verschachtelungen von Strukturen der jeweils entsprechende Gegenspieler den Code geliefert hat, wird im Code im Fehlerfall ein Bit, das einen fatalen Fehler anzeigt, gesetzt. Erscheint beispielsweise ein "Ende der Bedingung"-Befehl in einer Schleife (anstelle eines "Ende der Schleife"-Befehles), so wird in der Routine zur Bearbeitung der Schleife dieses Bit im Fehlercode gesetzt. Nun wird aus allen Ebenen zurückgekehrt, da ein Fehlercode ungleich 0 auftrat. Eine in der Aufruffolge vorher aktivierte Bedingung erkennt somit den Code nicht irrtümlich als ein "Ende der Bedingung", um weiterzuarbeiten.

A.3.3.3. Befehle der Programmsteuereinheit

Die Programmsteuereinheit verfügt über eine Reihe von Befehlen, die allgemein nützliche Operationen ausführen. Jedem dieser Befehle entspricht ein Unterprogramm; die Befehlssyntax (laut Deklarationsdatei) und die Unterprogrammadressen werden im Initialisierungsaufzuruf der Programmsteuereinheit beim Befehlsinterpreter angemeldet. Die Unterprogramme selbst werden bei Anforderung aus der Hauptschleife heraus angesprungen. Folgende Befehle sind implementiert:

1) Steuerbefehle:

Diese Gruppe ermöglicht wichtige Steuerungsarbeiten. Es handelt sich um die Befehle zum Beenden des Programmlaufes, zur Verwaltung von Betriebssystem-Prozessen (in der Version für VAX/VMS), einen Hilfe-Befehl, der kurze Informationen über die einzelnen Befehle während der Arbeit zur Verfügung stellt, einen Befehl, der die Eingabe von Kommentaren ermöglicht (vor allem in Prozeduren von Bedeutung), einen Befehl zur Ausgabe von anwendungsspezifischen Meldungen, einen Befehl zur Steuerung des Umfangs der Programm Meldungen und Befehle zur Verwaltung der Ausgabedateien (Standardausgabe und Protokolldateien aktivieren oder deaktivieren).

2) Verwaltungsbefehle:

Diese Gruppe dient der Verwaltung der Variablen. Variable können in den vordefinierten Symboltabellen angelegt und aus diesen wieder entfernt werden, sie können auf Dateien gespeichert und von diesen wieder gelesen werden, und schließlich kann Information über sie am Bildschirm angezeigt werden. Für jede Variable wird dabei der Name und der Typ angezeigt, die Art der

weiteren Information hängt vom Typ ab: Für die einfachen Variablen (Flags, numerische Werte, Zeichenketten) wird der Wert ausgegeben, für die komplexeren eine kurze Beschreibung über die Art des Inhaltes.

3) Elemente der Programmierung:

Hier finden sich Befehle, die Beginn und Ende einer Prozedur markieren, die den Aufruf von Prozeduren ermöglichen und Befehle zur Verwaltung und Definition von Schleifen und Bedingungen.

4) Befehle zur Verwaltung von Prozeduren:

Diese Befehle beinhalten einen Befehl zum Auflisten vorhandener Prozeduren sowie Befehle zum Unterbrechen, Fortsetzen und Abbrechen von Prozeduren.

5) Datenoperationen:

Die Datenoperationen des Steuerprogrammes sind im Befehl DO zusammengefaßt. Sie werden im Kapitel über die Datenoperationen erklärt. (Kap. A.3.6., Datenoperationen)

A.3.4. Die Variablen

A.3.4.1. Allgemeines, Struktur der Variablen

Der Interpreter gestattet die Anlage und Bearbeitung von sogenannten Variablen. Eine Variable besteht aus einem Header, der eine kurze Beschreibung gibt, und dem eigentlichen Datenteil. Der Header ist für alle Variablen gleich aufgebaut und wird von einer eigenen Routinengruppe verwaltet. Der Datenteil kann seinerseits wiederum aus einem Header bestehen und wird je nach Datentyp von eigenen Routinengruppen verwaltet. In der Programmhierarchie ist der Bereich der Variablenverwaltung untergeordnet unter Befehlsinterpreter und Programmsteuereinheit, diese beiden greifen auf seine Funktionen zu, aber niemals umgekehrt. Der Anwender des Programmes hat niemals direkt mit der Struktur der Variablen zu tun, für ihn gibt es lediglich die Funktionen zu ihrer Bearbeitung, die Frage des Datentyps und die Frage der Zugehörigkeit zu einer Symboltabelle.

Die Struktur eines Variablenheaders, Deklaration in C:

```
typedef struct                /* Variablenheader */
{
    void        *val;        /* Zeiger auf Wertteil */
    short      dsc;        /* Deskriptor */
    short      typ;        /* Datentyp */
    char       nam[STBNCNAM]; /* Name der Variable */
} VARHDR;
```

val ist ein Zeiger auf Daten verschiedenen Typs, z.B. long (32-Bit Integer), float (einfach genaue Fließkommazahl), MATRIX (Matrixheader). Die Deklaration mit "void" bietet in C die Möglichkeit, nicht vorab festzulegen, auf welchen Typ von Daten der Zeiger hinweist. Dies ist eine reine Compilerkonvention, denn die Adresse ist natürlich unabhängig davon, welche Art von Daten sich dort befindet. Lediglich für Zeigeroperationen (Addieren oder Subtrahieren von Offsets) wird vom Compiler die Länge des Objektes, auf das der Zeiger weist, benötigt; diese Operationen werden aber mit den Zeigern in den Headern nicht durchgeführt, daher ist die Deklaration mit void möglich.

Der Deskriptor `dsc` wird derzeit nicht verwendet, er ist für Erweiterungen gedacht, wie etwa die Möglichkeit der Deklaration von Feldern eines Datentyps oder für die Ablage von Information bei der Precompilation, falls ein Precompiler installiert werden sollte. Der Name der Variablen wird in `nam` abgelegt, seine Länge ist über die globale Konstante `STBNCNAM` mit maximal 31 Zeichen (32 Zeichen in `VARHDR`, das letzte Zeichen einer Zeichenkette ist mit Code 0 belegt) festgelegt.

Die Datentypen im einzelnen (Länge in Bytes):

Kurzcode	Interner Typ	Länge	Beschreibung
FLG	short int	2	Logische Variable, TRUE/FALSE
INT	long int	4	Ganze Zahl
FLT	float	4	Einfach genaue Fließkommazahl
DBL	double	8	Doppelt genaue Fließkommazahl
STR	STRING	8+n	String, s. unten
PNT	POINT	32	Punkt, s. unten
MAT	MATRIX	108+n	Matrix, s. unten

Die kleingeschriebenen internen Typen sind Standardtypen von C, die großgeschriebenen, das sind die "komplexen Typen" `STRING`, `POINT` und `MATRIX`, sind selbst definiert:

`STRING`: Deskriptor einer Zeichenkette, enthält eine Variable mit der Länge der Zeichenkette und einen Zeiger auf die Zeichenkette. Die Zeichenkette selbst ist so lange, wie im Element mit der Länge angegeben. Die Deklaration in C lautet:

```
typedef struct {
    long    leng;
    char    *text;
} STRING;
```

`POINT`: Enthält die Indizes des Punktes in einer Matrix, die Maximalindizes derselben Matrix (um sicherzustellen, daß ein Punkt auch wirklich in einer passenden Matrix definiert ist), die 3 Koordinaten des Punktes, eine logische Variable, die angibt, ob der Punkt überhaupt belegt ist, sowie eine Hilfsvariable, die für spezielle Operationen verwendet werden kann (dient der Aufnahme von Richtungsangaben bei manchen Linienverfolgungen).

```
typedef struct /* ----- POINT --- */
{
    FLAG    df; /* TRUE: Definiertes Punkt, FALSE: undefiniert */
    CODE    di; /* Richtungszeiger (0 links unten, 1 unten,..) */
    long    ic; /* Index rechts */
    long    ir; /* Index hoch */
    long    nc; /* Anzahl Indizes rechts */
    long    nr; /* Anzahl Indizes hoch */
    float   xv; /* x-Koordinate */
    float   yv; /* y-Koordinate */
    float   zv; /* z-Koordinate */
} POINT;
```

MATRIX: Der Header besteht aus einer Reihe von Beschreibungen: Der Datentyp der Matrixelemente (in der vorliegenden Programmversion einfach genaue Fließkommazahlen oder vorzeichenlose Bytes, das ist Typ `unsigned char`), die Anzahl der Spalten und Zeilen, die doppelt genauen Koordinaten der linken unteren Ecke (Indizes 0,0), die einfach genaue Angabe der Rasterweiten in den beiden Koordinatenrichtungen (der Raster liegt immer parallel zu den Koordinatenachsen), die Zeiger auf das Datenfeld und ein allfälliges Indexfeld sowie die Angabe der momentan reservierten Größe jedes dieser beiden Felder; des weiteren ein 40 Zeichen langer Titel, eine Variable, die spezielle Statusinformation aufnehmen kann und schließlich der Wert, der undefinierte Datenelemente kennzeichnet (für Bereiche, in denen keine Daten vorliegen oder die aus sonstigen Gründen nicht an der Berechnung teilnehmen sollen).

Die eigentlichen Datenwerte befinden sich in dem Feld, auf das der zugehörige Zeiger hinweist, geordnet nach Zeilen und in jeder Zeile nach Spalten, von der linken unteren Ecke jeweils aufsteigend. Ein Indexfeld kann jederzeit angelegt oder verändert werden und besteht aus einer Reihe von Adressen von Feldelementen innerhalb der Matrix. Diese Adressen ergeben sich als Abstand des jeweiligen Datenelementes vom Feldbeginn. Mit dem Indexfeld können gezielt Punkte in der Matrix angesprochen und mit ihnen spezielle Operationen durchgeführt werden (z.B. sortieren der Zeiger des Indexfeldes nach den Werten der zugehörigen Punkte im Matrixfeld).

```
typedef struct          /* ----- MATRIX --- */
{
    long    dattyp; /* Datentyp der Matrix */
    long    flags; /* Flags zur Verfügung für Programme */
    long    ncols; /* Anzahl Spalten */
    long    nrows; /* Anzahl Zeilen */
    long    nelem; /* Anzahl dzt. reservierter Elemente */
    long    nindx; /* Anzahl Elemente im Indexfeld */
    long    dummy; /* Frei für Erweiterungen */
    float   rwx; /* Rasterweite in x-Richtung */
    float   rwy; /* Rasterweite in y-Richtung */
    float   undef; /* Wert für undefinierte Punkte */
    double  dllx; /* x-Koordinate der Ecke links unten */
    double  dlly; /* y-Koordinate der Ecke links unten */
    float   *array; /* Zeiger auf das Matrixfeld */
    long    *index; /* Zeiger auf das Indexfeld */
    long    dummy1; /* Frei für Erweiterungen */
    char    title[MATNCTIT]; /* Titel der Matrix */
} MATRIX;
```

Die Konstante `MATNCTIT` gibt die Anzahl Zeichen im Titel der Matrix an, ihr Wert beträgt 40, wodurch der Titel höchstens 39 Zeichen enthalten kann (das letzte Zeichen einer Zeichenkette ist gemäß C-Konvention mit dem Code 0 belegt).

Als Datentyp, das ist der Typ eines einzelnen Feldelementes, kommen derzeit `BYT` und `FLT` in Frage (`dattyp`).

Von der Struktur des Programmes sind die Typen `FLG`, `BYT`, `INT`, `FLT`, `DBL` und `STR` Typen, die von der Programmsteuereinheit angelegt werden, sogenannte Standardtypen, während die Typen `POINT` und `MATRIX` erweiterte Typen darstellen, die vom Programmteil zur Matrizenbearbeitung angelegt und verwaltet werden.

A.3.4.2. Verwaltung der Variablen

Die Variablen werden in Symboltabellen zusammengefaßt. Eine Symboltabelle besteht aus einem Header, der eine kurze Beschreibung der Tabelle gibt (Name, unter dem die Tabelle angesprochen werden kann; Anzahl Symbole, die höchstens Platz finden; Anzahl Symbole, die gerade in der Tabelle abgelegt sind; Zusatzinformationen betreffend die Tabellenorganisation) und einer Liste aus Zeigern auf die Variablen. Die Zeiger sind nach der alphabetischen Reihenfolge der Variablennamen sortiert, um Variablen schnell nach ihrem Namen suchen zu können (es wird binär gesucht). Daß in der Symboltabelle nur die Zeiger und nicht auch die Namen abgelegt werden, hat seinen Grund darin, daß einerseits das Einfügen und Löschen von Variablen schnell vonstatten gehen soll, andererseits für verschiedene Zwecke der Name im Variablenheader verfügbar sein soll.

Die Programmsteuereinheit legt folgende Symboltabellen an: Eine in jeder Prozedurebene jederzeit verfügbare Tabelle mit dem Namen "GLOBAL" zur Ablage "globaler Variabler" und zwei Tabellen für jede Prozedur bei deren Start. Die erste dieser beiden lokalen Tabellen, mit dem Namen "PARAME", dient der Aufnahme der Parameter, die an die Prozedur übergeben wurden, die zweite, mit Namen "LOCAL", dient der Aufnahme von lokalen Variablen, die nur innerhalb der Prozedur deklariert werden können, nur in ihr verfügbar sind (auch nicht in einer aus dieser Prozedur gerufenen, außer wenn sie als Parameter übergeben werden) und nach Verlassen der Prozedur gelöscht werden.

Die Symboltabellen werden gemäß dem Zeitpunkt ihrer Anlage aneinandergereiht, also als erste die Tabelle "GLOBAL", sodann "PARAME" (auch die niedrigste Prozedurebene, die Ebene 0 im interaktiven Betrieb, erhält aus Gründen der Einheitlichkeit eine Symboltabelle zur Aufnahme von Parametern; es wäre damit z.B. möglich, Parameter beim Start des Programmes mitzugeben) und schließlich "LOCAL", woraus sich eine umgekehrte Durchsuchungsreihenfolge ergibt: Eine Variable wird zuerst in LOCAL, dann in PARAME und schließlich in GLOBAL gesucht. Wird sie in einer der Tabellen gefunden, so wird die Suche abgebrochen. Es ist damit möglich, Variablen gleichen Namens in verschiedenen Symboltabellen zu halten. Die Variablen in der jeweils untergeordneten Tabelle können damit nicht mehr angesprochen werden (wohl aber entfernt, da beim Löschbefehl der Name der Symboltabelle angegeben werden muß).

Beim Aufruf einer Prozedur können Variable oder Konstante als Parameter übergeben werden. In der gerufenen Prozedur wird in diesem Fall für jeden Parameter ein eigener Variablenheader angelegt, der den Namen des entsprechenden formalen Parameters der Prozedurdeklaration erhält. Der Zeiger auf die Daten wird ident dem Datenzeiger des Headers der entsprechenden als Parameter übergebenen Variable gesetzt. Es gibt solcherart zwei Header, die auf dasselbe Datenelement zeigen. Damit ist es möglich, innerhalb der Prozedur unter dem lokalen Namen auf die Variable des Aufrufes zuzugreifen und den Datenwert zu lesen oder verändern.

A.3.5. Programm Meldungen

Das Konzept der Programm Meldungen geht von dem einfachen Prinzip aus, jede Funktion mit einem Rückgabecode, dem RETURNCODE, zu versehen. Ein Code "OKAY", das ist der Codewert 0, signalisiert eine fehlerfreie Ausführung der Funktion, während ein Code ungleich Null einen Fehler anzeigt. Die Fehlercodes sind gruppiert nach Funktionsgruppen (z.B. Fehler des Befehlsinterpreters, des Steuerprogrammes oder der Einheit zur Bearbeitung der Variablen) und innerhalb jeder

Gruppe fortlaufend numeriert von 0 bis 99. Die Gruppen sind ebenfalls fortlaufend numeriert von 0 bis 99, wobei die Gruppen 0 bis 6 fix vom Interpreter belegt sind; ihre Nummern ergeben sich Modulo 100. So bedeutet z.B. Code 413 die Gruppe 4 und die Fehlernummer 13. Der Wert kann zusätzlich um 16384 erhöht werden (das ist das 15. Bit in maschineninterner Darstellung), dies signalisiert einen fatalen Fehler und wird beispielsweise vom Steuerprogramm verwendet, um falsche Strukturbefehle anzuzeigen. Für den Fehlercode selbst ist dieser Wert nicht von Bedeutung. Das für die Auswertung der Meldungen verantwortliche Programm maskiert die Codes, sodaß nur die 14 niedrigerwertigen Bits übrigbleiben.

Die zu den einzelnen Codes gehörenden Meldungen (es müssen nicht ausschließlich Fehlermeldungen sondern können ganz allgemeine Programm Meldungen sein) sind auf eigenen Dateien abgelegt. Zu Beginn des Programmes werden diese Dateien in ähnlicher Weise wie die Befehlsdeklarationsdateien eingelesen und die Fehlermeldungen in internen Tabellen abgelegt. Dies ermöglicht die flexible Gestaltung der Meldungen, z.B. die einfache Übertragung in andere Sprachen oder die einfache Erweiterung um neue Meldungen. Es gibt mehrere Unterprogramme, die die Ausgabe der Meldungen vornehmen, wobei an manche auch Parameter übergeben werden können. Dies ermöglicht die Ausgabe komplexer Informationen. Von großer Bedeutung ist auch, daß alle Meldungen letztlich von einem einzigen Unterprogramm ausgegeben werden, wodurch es möglich ist, jederzeit alle Ausgaben auf mehrere Kanäle (Dateien) zu verteilen oder in einer speziell an ein Computersystem angepaßten Form vorzunehmen. (Hier zeigte sich auch der große Vorteil dieses modularen Konzeptes: Als es im Zuge umfangreicher Berechnungen notwendig wurde, das Programm im Batchbetrieb ablaufen zu lassen, erwies es sich als günstig, die Ausgaben auch auf einer Protokolldatei aufzuzeichnen. Dies und die Implementation eines zugehörigen Steuerbefehles zum Ein- und Ausschalten des Protokolles sowie zum Umlegen auf eine bestimmte Datei erforderte insgesamt - inklusive aller Tests - nur 3 Stunden Arbeitszeit.)

A.3.6. Operationen mit Daten

A.3.6.1. Operationen der Programmsteuereinheit

Die Programmsteuereinheit stellt mit den einfachen Datentypen eine Reihe von Operationen zur Verfügung. Die Datentypen des Programmteiles für die Matrizenbearbeitung, `POINT` und `MATRIX`, werden von eigenen Unterprogrammen dieses Programmteiles vorgenommen, die über ihre Adresse bei der Anmeldung des jeweiligen Datentyps zur Verfügung gestellt werden. Für die Syntax selbst wurde hier nur ein ganz einfaches Konzept verwirklicht: Es werden immer Einzeloperationen durchgeführt, komplexere Operationen ergeben sich aus der Aneinanderreihung mehrerer derartiger Befehle. Die Syntax ist einheitlich:

```
"DO Operation Resultat Operand1 [Operand2 [Operand3 [...]]]"
```

Die eckigen Klammern symbolisieren hierbei optionale Parameter, also solche, die abhängig von der Operation stehen. Zwischen vielen Typen erfolgen automatische Typumwandlungen; so können beispielsweise mit der Zuordnung eines einfachen Wertes alle Elemente einer Matrix belegt werden. Die Typumwandlung erfolgt immer in Richtung auf den Typ der Ergebnisvariable und wird in Richtung von einfacheren auf kompliziertere Datentypen praktisch immer automatisch durchgeführt. Die Reihenfolge ist hierbei: `BYT`, `INT`, `FLT`, `DBL`, `STR`, `PNT`, `MAT`.

Mit der Zerlegung in Einzeloperationen könnten bei Vorhandensein eines aufwendigeren Interpreters auch komplexe arithmetische Ausdrücke, wenn sie in ihre Bestandteile zerlegt werden, bearbeitet werden.

Es ist eine Reihe von elementaren Datenoperationen verfügbar. Die Art der Operation wird als Unterbefehl "operation" angegeben. Das Ergebnis wird immer in einer oder mehreren Variablen abgelegt, während die Eingangsdaten (Operanden) meist auch Zahlen (Konstante der Eingabe) sein können. Dies wird in der folgenden Liste durch die Unterscheidung "Wert" und "Variable" angedeutet, "Wert" meint also Konstante oder Variable, während "Variable" lediglich die Angabe von Variablen zuläßt. Die meisten Operationen sind auf verschiedenen Datentypen definiert, Matrizenoperationen sind - wenn nicht ausdrücklich anders erwähnt - immer elementweise zu verstehen.

Die Unterbefehle des Befehles "DO":

- Zuweisung eines Wertes an eine Variable,
- Addition zweier Werte und Zuweisung an eine Variable,
- Subtraktion zweier Werte und Zuweisung an eine Variable,
- Multiplikation zweier Werte und Zuweisung an eine Variable,
- Division zweier Werte und Zuweisung an eine Variable,
- Kehrwert eines Wertes und Zuweisung an eine Variable,
- potenzieren eines Wertes und Zuweisung an eine Variable,
- Absolutwert eines Wertes einer Variable zuweisen,
- ganzzahligen Anteil eines Wertes einer Variable zuweisen,
- den Dezimalteil eines Wertes einer Variable zuweisen,
- vollständiger Austausch zweier Variablen, inklusive Datentyp

A.3.6.2. Operationen für die Matrizenbearbeitung

Es gibt eine Gruppe von Operationen, die ebenfalls im Befehl DO zusammengefaßt sind, aber nicht von der Programmsteuereinheit zur Verfügung gestellt werden. Dies wird erreicht durch eine Paralleltabelle in den Befehlsdeklarationsdateien für die Unterbefehle von DO, die im Matrizenenteil deklariert wird. Die arithmetischen Grundoperationen wie Belegen von Matrizen mit Werten, elementweise Addition, Subtraktion, Multiplikation und so fort, sind bei den allgemeinen Befehlen des Parsers zu finden. Das Modul zur Matrizenbearbeitung stellt nur die entsprechenden Unterprogramme zur Verfügung. Eine Reihe von zusätzlichen Befehlen ist unter DO für die Bearbeitung von Punkten und Matrizen vorgesehen:

- Die Punktkoordinaten an Fließkommavariablen zuweisen,
- z-Koordinate eines Punktes an eine Fließkommavariablen zuweisen,
- die Indizes eines Punktes Integervariablen zuweisen,
- die Bezugsgröße des Feldes an eine Integervariablen zuweisen,
- den Wert eines Matrixelementes an eine Fließkommavariablen zuweisen,
- ein Matrixelement gemäß einem Fließkommawert setzen.

Diese Operationen erlauben in Verbindung mit der automatischen Typkonversion, gezielt Elemente in Matrizen zu setzen oder aus Matrizen zu entnehmen. Dazu gibt es noch ein paar Spezialbefehle, die die Konversion von Matrizen des Typs FLT in den Typ BYT und das Kopieren nur des Matrizenheaders gestatten, schließlich das Setzen von Elementen unter einer gewissen Maske, das Zählen von Elementen, das Suchen von Minima und Maxima.

Eine weitere Gruppe von Matrizenbefehlen befaßt sich mit der Verwaltung der Kenngrößen der Matrizen. Es können die Dimension, der Datentyp, die linke untere Ecke, ein beschreibender Text für die Matrix, die Rasterweite und der Wert für undefinierte Elemente gesetzt werden. Weiters stehen Befehle zur Extraktion von Daten aus einem SCOP-DHM zur Verfügung.

Die Indexfeldoperationen erlauben das Anlegen eines Indexfeldes zu einem bestimmten maskierten Bereich (über eine zweite Matrix definiert) und das auf- oder absteigende Sortieren des Indexfeldes.

Spezialbefehle sind schließlich noch für die Berechnung von Faltungen vorgesehen, wobei eine Filtermaske eingelesen, und eine Histogrammeinebnung vorgenommen werden kann:

Die weiteren Operationen sind gezielte Befehle zu den in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Verfahren: Linienverfolgungen nach verschiedenen Kriterien, Einzugsgebietssuche nach verschiedenen Methoden, Algorithmen zur Bearbeitung der Mulden, Operationen mit Randlinien (an der Gebietsbegrenzung, die gegeben ist durch den Rand der Matrix bzw. durch das Aneinandertreffen von Punkten mit definierten Werten und solchen mit dem Wert `undef`) und Ähnliches.

A.3.6.3. Graphische Ausgabe

Das Programm MATRIX bietet im matrizen-spezifischen Teil die Möglichkeit der graphischen Ausgabe auf Rastergeräte. Dazu wurde ein Konzept verwendet, das die Definition sogenannter virtueller graphischer Geräte zuläßt. Es kann eine vom Programm her beliebige Anzahl graphischer Geräte zur gleichen Zeit definiert sein; eine beliebige Anzahl definierter Geräte wiederum kann gleichzeitig aktiv sein, das bedeutet, daß alle graphische Ausgaben auf diese Geräte geleitet werden.

Jedes virtuelle Gerät besitzt intern einen Deskriptor, der den Gerätetyp angibt, einen Zeiger auf das Folgegerät enthält (dadurch entsteht eine Kette der Geräte; bei der graphischen Ausgabe wird jedes Gerät der Kette nacheinander angesprochen), sowie die koordinative Lage des zugehörigen Fensterbereiches (die linke untere Ecke) und einige Zusatzinformation beinhaltet. Es können mehrere verschiedene Geräte angesprochen werden, so z.B. die Graphiktreiber der VAX-Station oder eine Datei, die zur Übertragung auf andere Graphiksysteme dient. Für jeden Gerätetyp gibt es einen eigenen Deskriptor, der das Gerät selbst beschreibt (Größe, Auflösung, Farbzahl, ...).

Als Schnittstellen dienen ein Initialisierungsaufwurf, der die Deskriptoren der Gerätetypen anlegt und die Ketten der aktiven und der inaktiven Ausgabegeräte initialisiert. Ein Aufruf dient zur Anmeldung eines bestimmten Gerätes, eine Reihe von Aufrufen dient der Selektion und Deselektion aktiver Geräte; aktive Geräte können geöffnet werden, das heißt, daß für sie ein Fenster angelegt oder eine Datei geöffnet wird (je nach Gerätetyp). Ein Aufruf dient dem Laden von Lookuptables, schließlich gibt es ein Unterprogramm, das ein Feld (eine Matrix) auf alle aktiven Geräte schreibt und ein Unterprogramm, mit dem Geräte geschlossen werden können.

Intern gibt es für jeden Gerätetyp einen Aufruf, der die jeweilige Funktion übernimmt (Öffnen, Lookuptables laden, Ausgabe, Schließen). Diesen Unterprogrammen ist jeweils eines übergeordnet - die Schnittstelle -, das diese Funktion auf allen aktiven Geräten durchführt und je nach Gerätetyp das entsprechende Unterprogramm des Gerätetyps aufruft. Dieses Konzept gestattet eine leichte Erweiterbarkeit um weitere Gerätetypen und bringt eine hohe Übersichtlichkeit.

Die Ausgabe der Bilder der vorliegenden Arbeit erfolgte mittels eines Prototyps des Laser-Rasterplotters LRP-25 der Firma Leica (Kraus, Jansa 1988, Ecker 1991) aus den Grauwertmatrizen, die mit dem Programm MATRIX berechnet wurden.

Literaturverzeichnis

- Ackermann, F. 1979: The Accuracy of Digital Height Models. Vorträge der 37. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart vom 24. bis 28. September 1979, Schriftenreihe des Institutes für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 6, 1980.
- Aßmus, E., 1976: Berücksichtigung von Geländekanten im Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Theorie und Ergebnisse. Geowissenschaftliche Mitteilungen TU Wien, Heft 8
- Collins, S. H., Moon, G. C., 1981: Algorithms for dense digital terrain models. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol: 47, No. 1, S. 71-76
- Day, T., Muller, J. P., 1988: Quality assessment of digital elevation models produced by automatic stereo matchers from SPOT image pairs. Presented Paper, XVI. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Kyoto 1988. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B3, Commission III, S. 148-159
- Ecker, R., 1991: Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 38, April 1991. Dissertation, ausgeführt am Inst. f. Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien.
- Finsterwalder, R., 1986: Zur Bestimmung von Tal- und Kammlinien. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 5, 1986, S. 184-189
- Finsterwalder, R., 1990: Neue Genauigkeitsmaße für die Geländeerfassung durch digitale Geländemodelle. Zeitschrift für Vermessungswesen, 115. Jahrgang, S. 411-414
- Hadipriono, F. C., Lyon, J. G., Li, T. W. H., 1990: The Development of a Knowledge-Based Expert System for Analysis of Drainage Patterns. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 56, No. 6, Juni 1990, S. 905-909
- Hutchinson, M. F., 1989: A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 106 (1989), S. 211-232
- Hutchinson, M. F., Dowling, T. I., 1991: A Continental Hydrological Assessment of a New Grid-Based Digital Elevation Model of Australia. Hydrological Processes, Vol. 5, S. 45-58
- Institut f. Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft; Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU-Wien, 1989: Digitales Modell des Oberflächenentwässerungssystemes von Österreich. Veröffentlichung der beiden Institute, TU-Wien
- Jenson, S. K., Domingue, J. O., 1988: Extracting topographic structure from digital elevation data for GIS analysis. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 54, No. 11, Nov. 1988, S. 1593-1600
- Jenson, S. K., 1991: Applications of Hydrologic Information Automatically Extracted from Digital Elevation Models. Hydrological Processes, Vol. 5, S. 31-44
- Johnson, L. E., 1989: MAPHYD - A digital map-based hydrologic modeling system. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 55, No. 6, June 1989, S. 911-917
- Köstli, A., Sigle, M., 1986: The random access data structure of the DTM program SCOP. Presented Paper, International Symposium of Commission IV of ISPRS, Edinburgh 1986. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXVI, Commission IV, S. 45-52

- Kraus, K., 1987: Photogrammetrie, Band 2: Theorie und Praxis der Auswertesysteme. Ferd. Dümmlers Verlag, 1. Auflage, Bonn 1987
- Kraus, K., Jansa, J., 1988: Die kartographischen Folgeprodukte des Digitalen Geländemodelles. In: Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, Band 2, S. 66-75, Wien 1988
- Kraus, K., 1990: Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. Ferd. Dümmlers Verlag, 3. Auflage, Bonn 1990
- Kraus, K., 1991: Welche Umweltparameter kann man mit Photogrammetrie und Fernerkundung erfassen? Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 8/9, Aug./Sept. 1991
- Kraus, K., 1991a: Anmerkungen zum Aufsatz von R. Finsterwalder über die Genauigkeit digitaler Geländemodelle. Zeitschrift für Vermessungswesen, 116. Jahrgang, S. 26-27
- Leberl, F., 1975: Photogrammetric Interpolation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 41, S. 603-612
- Makarovič, B., 1972: Information transfer in reconstruction of data from sampled points. Photogrammetria, 4/1972
- Mark, D. M., 1979: Phenomenon-based data-structuring and digital terrain modelling. Geoprocessing, Vol. 1, No. 1, S. 27-36
- Mark, D. M., 1984: Automated detection of drainage networks from digital elevation models. Cartographica 21, S. 168-178
- Marks, D., Dozier, J., Frew, J., 1984: Automated basin delineation from digital elevation data. Geoprocessing, Vol. 2, No. 3, S. 299-311
- Márkus, B., 1986: Terrain analysis in consideration of surface curvature conditions. Separatum, Periodica Polytechnica, TU Budapest
- Molnar, L., Köstli, A., 1984: User Interface Module Comprising both Menu and Command Language Techniques. Presented Paper, International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Rio de Janeiro 1984. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 25/4, Commission IV, S. 299-307, Rio de Janeiro 1984
- Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R., 1991: Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. Hydrological Processes, Vol. 5, 1991, S. 3-30
- O'Callaghan, J. F., Mark, D. M., 1984: The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 28, S. 323-344
- Palacios-Vélez, O. L., Cuevas-Renaud, B., 1986: Automated river-course, ridge, and basin delineation from digital elevation data. Journal of Hydrology, 1986, S. 299-314
- Peucker, T. K., Douglas, D. H., 1975: Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. Computer Graphics and Image Processing 4, 1975, S. 375-387
- Qian, J., Ehrlich, R. W., Campbell, J. B., 1990: DNESYS - An Expert System for Automatic Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 28/1, Jan. 1990, S. 29-45

- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O., 1991: The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models. *Hydrological Processes*, Vol. 5, S. 59-79
- Rieger, W., 1986: Methoden zur Bestimmung von Einzugsgebieten und Abflußlängen aus dem digitalen Höhenmodell. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien, Wien 1986
- Ritter, P., 1987: A vector-based slope and aspect generation algorithm. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 53, No. 8, Aug. 1987, S. 1109-1111
- Sigle, M., 1984: Ein digitales Geländemodell für das Land Baden-Württemberg. Schriftenreihe des Institutes für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 9, 1984
- Stanger, W., 1982: Ein digitales Geländemodell und einige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Flurplanung. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 273, München 1982
- Stechauner, A., Ehartner, M., 1988: Praktische Möglichkeiten für die Bewertung der Bodenerosion in Österreich. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen*, 76. Jahrgang, S. 243-260
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., Rodriguez-Iturbe, I., 1991: On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, Vol. 5, S. 81-100
- Tempfli, K., 1982: Genauigkeitsabschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse. *Geowissenschaftliche Mitteilungen TU-Wien*, Heft 22
- Toomey, M. A. G., 1988: The Alberta Digital Elevation Model. Presented Paper, XVI. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Kyoto 1988. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 27, Commission III, S. 775-783
- Waldhäusl, P., Molnar, L., 1991: Produktinformation - SCOP. Informationsbroschüre des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU-Wien, Wien 1991
- Zhang, Y., 1988: Accuracy Estimation of DTM Using High Sampling Density Profiles. Presented Paper, XVI. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Kyoto 1988. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 27, Part B3, Commission III, S. 857-864

Lebenslauf

Geboren am 24. Juli 1961 in Wien als Sohn des Rechtsanwaltes Dr. Gerhard Rieger und seiner Gattin Eleonore.

1967-1971: Besuch der Evangelischen Volksschule in 1040 Wien, Karlsplatz 14.

1971-1973: Besuch der ersten beiden Klassenzüge des Bundesgymnasiums 5, 1040 Wien, Rainerg. 39.

1973: Nach Übersiedlung Wechsel in das Bundesgymnasium 13, 1130 Wien, Fichtnerg. 15. Dort Besuch des humanistischen Zweiges, Ablegung der Reifeprüfung am 26. Juni 1979.

Herbst 1979: Immatrikulation an der TU-Wien, Studienrichtung Vermessungswesen.

Von 1980 bis 1989 mit Unterbrechungen als Jugendführer im Österreichischen Alpenverein tätig.

April 1986: Abschluß des Studiums in der Wahlfachgruppe Photogrammetrie und Kartographie.

Diplomarbeit: Methoden zur Bestimmung von Einzugsgebieten und Abflußlängen aus dem DHM

Von Mai bis September 1986: Vertragsassistent am Institut für Photogrammetrie der TU-Wien mit 20 Wochenstunden Verpflichtung.

Oktober 1986 bis Mai 1987: Ableistung des Präsenzdienstes beim Österreichischen Bundesheer.

Juni 1987: Wiederaufnahme der Tätigkeit als Vertragsassistent am Institut für Photogrammetrie mit 30 Wochenstunden Verpflichtung. In dieser Zeit Arbeiten bei der Firma IBM im Zuge eines Vertrages zwischen dem Institut und IBM.

Seit 1988 Arbeit an der Dissertation.

Herbst 1988: Begegnung mit dem auferstandenen Herrn Jesus Christus. Annahme seines Erlösungswerkes für mich und Neuorientierung meines Lebens, indem ich mich seiner Führung unterstellte.

Seit März 1990 Universitätsassistent am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Wien.

Bisher erschienen:

- Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1970 - 1973, Dezember 1973.
- Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen, 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English, Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.
- Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1973 - 1974, September 1974.
- Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.
- Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.
- Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.
- Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.
- Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.
- Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.
- Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik, Wien, Mai 1976.
- Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1974 - 1976, November 1976.
- Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1977.
- Heft 13 Veröffentlichung des Instituts für Photogrammetrie anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr.h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.
- Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.
- Heft 15 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.
- Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen 1976 - 1979, Wien, November 1979.
- Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.
- Heft 18 Veröffentlichung des Instituts für Allgemeine Geodäsie anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.
- Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.

- Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.
- Heft 21 Veröffentlichung des Instituts für Kartographie anlässlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.
- Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.
- Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.
- Heft 24 J. JANSA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.
- Heft 25 Zusammenfassungen der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.
- Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.
- Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Wien, Juni 1986.
- Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.
- Heft 29 Veröffentlichung des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie, anlässlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.
- Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.
- Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.
- Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.
- Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.
- Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.
- Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.
- Heft 36 o.Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.
- Heft 37 G. GERSTBACH, H.P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zu GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.
- Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.
- Heft 39 W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodell, Wien, Juli 1992.