

## DIE BEHANDLUNG GEOMORPHOLOGISCHER STRUKTUREN IM STUTTGARTER HÖHENLINIENPROGRAMM

von Eberhard Aßmus, Wien

### 1. EINLEITUNG

Im vorhergehenden Vortrag hat Herr Stanger bereits den Teil unserer Programmentwicklungen angesprochen, der Thema der folgenden Ausführungen sein soll:

Es handelt sich um die Weiterentwicklung des Stuttgarter Höhenlinienprogramms mit dem Ziel, geomorphologisch komplizierte Geländeformen mathematisch exakt zu behandeln.

Das bisherige Programm (Grundprogramm) erfüllt bei der Wiedergabe sehr ungleichförmiger Geländestrukturen nicht immer die von der Kartographie gestellten Anforderungen. Schwierigkeiten treten dabei weniger bei ausgerundeten Kleinformen auf, z.B. bei Kartenblättern im Moränengebiet. Die Qualität der Höhenlinien hängt in solchen Fällen nur von der Dichte der gemessenen Stützpunkte ab. Wie bei der tachymetrischen Geländeaufnahme immer schon üblich, sollten deshalb in Gebieten mit vielen Kleinformen etwas mehr Punkte erfaßt werden als in weniger stark strukturiertem Gelände.

Dagegen war das Problem von linienhaften Geländeformen, entlang denen die Geländeneigung sich plötzlich ändert, bisher noch nicht ganz befriedigend gelöst. Vor allem von Kartenblättern in großen Maßstäben wird aber erwartet, daß solche Strukturen, wie z.B. Erosionsrinnen, Dämme und Einschnitte von Verkehrswegen oder Flüssen, Steinbrüche, Kiesgruben usw. an Hand des Höhenlinienbildes richtig interpretiert werden können. Auch bei kleinerem Maßstab dürfte ein erweitertes Programm Qualitätssteigerungen mit sich bringen, denkt man z.B. an eine genauere Verarbeitung von Bergkämmen oder Talformen.

Wie im vorhergehenden Vortrag deutlich wurde, liefert das Grundprogramm bei der Bearbeitung der meisten Kartenblätter zufriedenstellende Ergebnisse. Insbesondere die Genauigkeit der automatisch gewonnenen Schichtlinien ist mit der bei konventionellen Verfahren gewohnten Genauigkeit durchaus vergleichbar.

Die mehr geomorphologisch orientierten Kartographen stützten ihre Kritik an automatischen Verfahren wie dem unsrigen deshalb bisher vor allem auf die vereinzelt auftretenden Schwierigkeiten der Automation mit jenen oben erwähnten linienhaften Geländeformen. Allerdings hat man oft den Eindruck, daß jene Kartographen in Wirklichkeit den sinnvollen Einsatz der elektronischen Datenverarbeitung in der Kartographie grundsätzlich für unmöglich halten. Wenn man nur an die künstlerischen Spitzenprodukte der Hochgebirgskartographie denkt, so ist diese Skepsis sicher berechtigt, und Computerprogramme werden bei solchen Aufgaben die konventionellen Methoden kaum ersetzen können. Aber es gibt auch Gebiete der Erde, in denen eine Karte nicht wie im Gebirge vor allem aus geomorphologischen Details besteht; es gibt auch Anwendungsgebiete der Kartographie, in denen weniger ästhetische Grundsätze eine Rolle spielen, sondern eher Gesichtspunkte der Wirtschaftlichkeit und der Herstellungszeit einer Karte.

Um das Detailproblem der exakten Erfassung von Böschungskanten besser in den Griff zu bekommen, wurde in den letzten 1 1/2 Jahren an den Instituten von Prof. Ackermann und von Prof. Kraus eine entsprechende Erweiterung des Stuttgarter Höhenlinienprogramms entwickelt. In diesem Vortrag wird diese Programmversion erläutert und ihre Leistungsfähigkeit durch eine Reihe praktischer Beispiele belegt.

## 2. BEHANDLUNG LINIENHAFTER GELÄNDEFORMEN IM GRUNDPROGRAMM

Wie bekannt unterteilen wir die Eingabedaten, die Stützpunkte für die Interpolation des Digitalen Höhenmodells (DHM) in mehrere Gruppen: in Massenpunkte, markante Höhenpunkte, singuläre Punkte und in die für das erweiterte Programm besonders wichtigen Punkte auf Bruch- und Strukturlinien. Unter Bruchlinien verstehen wir Linien, in denen die Gelände­fläche plötzlich ihre Nei­gung ändert, also abknickt; Struktur­linien haben dagegen nur die Aufgabe, den Liniencharakter einer Geländeform hervorzuheben.

Zu Beginn des Programms sind die Bruch- und Struktur­linienpunkte in ihrem Zusammenhang auf den Linien gegeben, d.h. es ist bekannt, mit welchem Punkt eine Linie beginnt und wieviele der da­nach folgenden Punkte zu dieser Linie gehören. Nach dem Einsortieren der Stützpunkte in die Recheneinheiten wird in der bisherigen Programmversion diese Linieninformation nicht mehr be­nötigt. Die Bruch- und Struktur­linienpunkte werden bei der Interpolation des DHM genauso wie die Massenpunkte als einzelne, unabhängige Stützpunkte verwendet, mit folgenden Ausnahmen:

Erstens ist es möglich, Linienpunkte stärker einzuhalten als Massenpunkte, und zweitens wird in Recheneinheiten mit Bruchlinien eine Kovarianzfunktion gewählt, die besser geeignet ist, das Abknicken einer Fläche zuzulassen, als die Glockenkurve, z.B. eine abfallende Gerade.

Die Unzulänglichkeiten des Grundprogramms traten nicht bei Struktur­linien mit ihren ausgerundeten Geländeformen auf, sondern ausschließlich im Falle der Bruchlinie, wenn also die Geländeober­fläche abknickt.

Ein einfaches simuliertes Interpolationsbeispiel verdeutlicht die Art der aufgetretenen Schwierigkeiten:

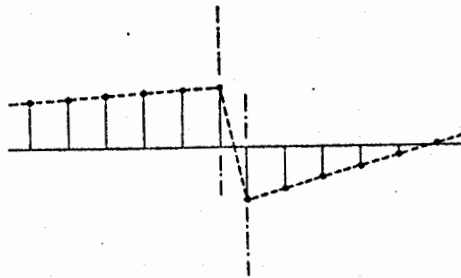


Bild 1

Die vorgegebenen 12 Stützpunkte (Bild 1) repräsentieren eine Kurve, die in 2 Stützpunkten abknicken soll. An diesen Stellen ist die Tangente an die Kurve nicht eindeutig definiert. Man kann die Kurve auch als Schnitt durch eine Fläche betrachten, in der zwei Bruchkanten verlaufen.

In Bild 2 werden drei verschiedene Glockenkurven als Kovarianzfunktion vorgegeben. Die Interpolation auf Grund der 12 Stützpunkte aus Bild 1 erfolgt nach der bisherigen Methode, also ohne Berücksichtigung der Knickstellen.

Bei Verwendung einer relativ flachen Glockenkurve als Kovarianzfunktion, wie im oberen der drei Interpolationsversuche, werden die Stützpunkte sehr weiträumig miteinander korreliert, auch über die Knickstellen hinweg, denn die Kovarianz nimmt mit wachsender Entfernung  $d$  nur langsam ab. Die interpolierte Kurve schwingt neben den Knickstellen stark aus und kann dem abknickenden Verlauf der im Bild 1 vorgegebenen Soll-Kurve nur allmählich folgen.

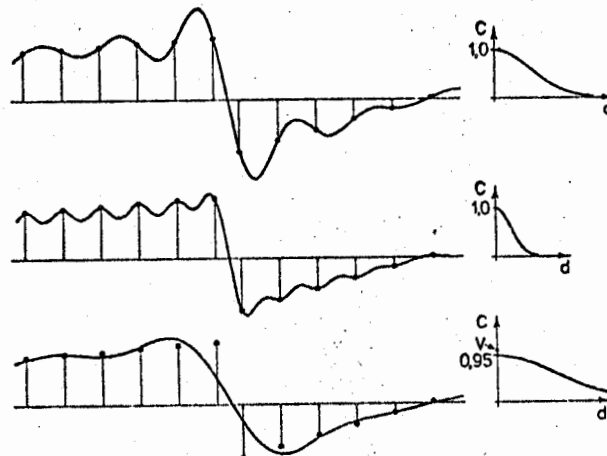


Bild 2

Im mittleren Bild ist die Interpolation mit einer beträchtlich steileren Kovarianzfunktion durchgeführt. Die Korrelationen zwischen den Stützpunkten wurden dadurch so stark verringert, daß das Ausschwingen der berechneten Kurve neben den Knickstellen fast völlig verhindert wird. Dies führt aber dort, wo die Kurve annähernd geradlinig verlaufen sollte dazu, daß das Interpolationsergebnis zwischen den Stützpunkten betragsmäßig kleiner ist als die benachbarten Stützwerte; bei der Berechnung des DHM bedeutet dies ein Absinken gegen das Trendpolynom.

Das untere Bild zeigt die dritte Möglichkeit: flache Kovarianzfunktion, aber Prädiktion mit Filterung (Scheitel der Kovarianzfunktion jetzt 0,95 statt 1,0). Der Nachteil dieser Lösung besteht darin, daß die größten Filterbeträge in den Knickstellen auftreten. Dadurch entsteht eine abgeflachte Kurve ohne starke Krümmungen.

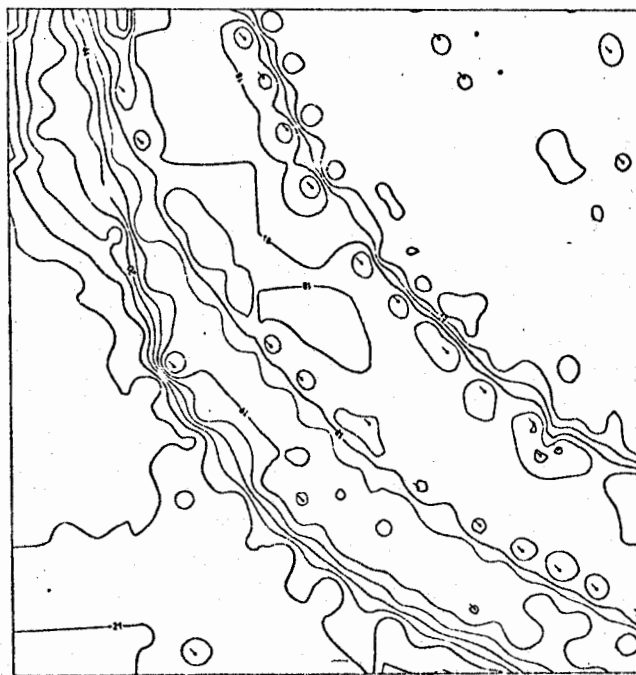


Bild 3

Bild 3 ist ein verkleinerter Ausschnitt aus einer mit dem Grundprogramm berechneten Höhenlinienkarte im Maßstab 1:1 000. Dargestellt werden soll ein fast ebenes Gelände, das von einem breiten, tief eingeschnittenen Fluß mit mehreren angrenzenden Böschungsflächen durchzogen wird. Alle Stützpunkte des Kartenblattes, auch Punkte auf Böschungskanten, wurden in diesem Testbeispiel einheitlich als Massenpunkte behandelt. Das Programm erhielt also keine qualifizierte Information über die in der Natur vorhandenen großen Neigungsänderungen. Deshalb ist das unbrauchbare Interpolationsergebnis im Bild 3 nicht verwunderlich. Es ist aber sehr gut geeignet, die praktische Auswirkung der drei in Bild 2 aufgetretenen Effekte zu veranschaulichen:

Das Gelände schwingt rechts und links von den Böschungsflächen aus; viele geschlossene Höhenlinien in diesem Bereich sind deshalb unrealistisch. Die Böschung wird infolge der Filterung abgeflacht, und schließlich ist die Korrelation zwischen Punkten auf den Böschungskanten so gering, daß sich um jeden Punkt eine kleine hütchenförmige Fläche ausbildet. Aber gerade entlang von linienhaften Strukturen sollte die Interpolation die gemessenen Punkte mit einer möglichst wenig gekrümmten Kurve verbinden.

Im Stuttgarter Höhenlinienprogramm kommt man dieser Idealvorstellung dadurch ziemlich nahe, daß die Bruch- und Strukturlinien verdichtet werden können, d.h. man kann durch lineare Interpolation zwischen aufeinanderfolgende Linienpunkte zusätzliche Stützpunkte berechnen.

Die Forderung nach abknickenden Flächen wird näherungsweise erfüllt, indem man in Recheneinheiten mit Bruchlinien keine Kovarianzfunktion mit horizontaler Tangente im Scheitel ( $d = 0$ ), z.B. eine Glockenkurve, verwendet, sondern eine Kurve mit fallender Tangente. Wie Bild 4 zeigt,

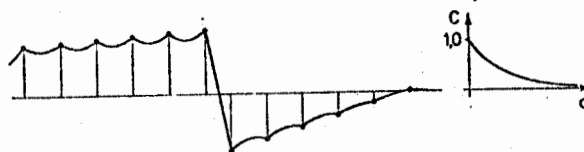


Bild 4

paßt sich die Interpolation bei Verwendung einer derartigen Funktion plötzlichen großen Neigungsänderungen recht gut an. In jedem Stützpunkt bildet die interpolierte Kurve bzw. Fläche eine Spitze. Im ganzen übrigen Interpolationsbereich ist sie aber glatt, sodaß auch mit dieser Methode eine Fläche nicht entlang einer ganzen Linie abknicken kann.

Bild 5 (sh.nächste Seite): Die Anwendung dieser Prinzipien auf dasselbe Datenmaterial wie in Bild 3 bringt eine beträchtliche Verbesserung des Interpolationsergebnisses mit sich. Der Verlauf der Böschungsflächen ist deutlich sichtbar. Allerdings treten weiterhin, wenn auch abgeschwächt, die alten Schwierigkeiten auf: Die Fläche schwingt noch aus, die Böschung ist nicht so steil wie in Wirklichkeit, und die Höhenlinien verlaufen noch unruhig und nicht parallel zu den Böschungskanten.

Im Grundprogramm können also Bruchlinien ihre Funktion, Flächen mit unterschiedlicher Geländeneigung zu trennen, nicht in ausreichendem Maße erfüllen. Diese Eigenschaft führt vor allem dann zu nicht befriedigenden Resultaten, wenn es sich um starke Neigungswechsel handelt, oder wenn zudem auf engem Raum eine ganze Reihe dieser Bruchlinien auftreten. Dagegen sind mit der bisherigen Programmversion berechnete Schichtlinien durchaus akzeptabel, wenn nur geringe Einschnitte vorkommen, wenn die durch Bruchlinien dargestellten Strukturen sich also in der Größenordnung nicht allzu sehr von den anderen Kleinformen der Umgebung unterscheiden. Auch für



Bild 5

die allmählich ins gleichförmige Gelände übergehenden Enden von Einschnitten und Böschungen sind die Näherungslösungen des Grundprogramms ausreichend.

### 3. DER AUFBAU DES ERWEITERTEN PROGRAMMS

#### 3.1 Die Konzeption zur verbesserten Bestimmung des DHM

Das bisherige Programm stützt sich auf die Behauptung, daß die Korrelationseigenschaften innerhalb einer Recheneinheit als homogen angenommen werden können. Es stellt sich nun heraus, daß diese Betrachtungsweise bei Gelände mit starken Neigungsänderungen nicht mehr angebracht ist.

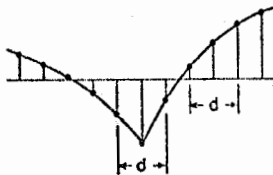


Bild 6

Im Bild 6 wird deutlich, daß zwei Punkte, die auf derselben Seite eines Knickes liegen, stärker korreliert sind als zwei gleich weit entfernte Punkte, die aber durch den Knick getrennt sind. Die Böschungskanten der Geländeoberfläche sind also statistische "Störungslinien", über die hinweg die Korrelationen verringert sind.

Wie noch an Beispielen gezeigt wird, erhält man befriedigende Ergebnisse, wenn man die in der Grundformel der Interpolation nach kleinsten Quadraten auftretenden Kovarianzen nach folgender

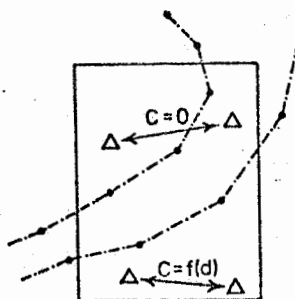


Bild 7

Regel bestimmt (Bild 7) :

Kovarianzen zwischen Punkten, die durch Bruchlinien getrennt sind, erhalten den Wert Null. Alle übrigen Kovarianzen werden wie bisher als Funktion der Entfernung  $d$  zwischen den beiden Punkten berechnet. Dieses einfache und wenig aufwendige Prinzip wird in der erweiterten Programmversion angewandt.

Eine Bruchlinie kann ihre Funktion als Trennungslinie nach dieser Methode aber nur erfüllen, wenn sie die Recheneinheit vollständig in zwei Teilgebiete zerschneidet, wenn sie also die Recheneinheit ganz durchquert. Endet sie dagegen im Innern der Recheneinheit, so läßt sich das qualifizierte Verfahren nicht auf das Bruchlinienreststück anwenden. Dieses wird dann nur im Sinne der im Grundprogramm angewandten Näherungslösung bearbeitet.

### 3.2. Beschreibung der einzelnen Programmerweiterungen

#### 3.2.1. Gebietseinteilung:

Im Programm sind einige Möglichkeiten vorgesehen, auch in der Recheneinheit endende Bruchlinien für die Unterteilung der Recheneinheit in Teilgebiete aufbereiten zu können:

a) Linien, die im Überlappungsbereich der Recheneinheit enden, werden zum Rand der Bruttorecheneinheit verlängert. <sup>1)</sup>

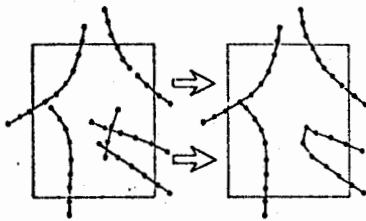


Bild 8

b) Endet in der Nettorecheneinheit eine Bruchlinie in der Nähe einer anderen Linie, so werden beide Linien in dem im Bild 8 skizzierten Sinne kombiniert. Dieser Fall tritt vor allem bei der Bearbeitung photogrammetrisch gewonnener Daten auf, z.B. bei der ungenauen Registrierung der Einmündung eines Baches in einen anderen.

Auf diese Weise erreicht man, daß möglichst alle Bruchlinien die Recheneinheit durchqueren und eine Gebietseinteilung durchführen. Alle Stützpunkte und alle Interpolationspunkte werden mittels Kennziffern einem der auf diese Weise gewonnenen Teilgebiete zugeordnet.

Punkte auf den Bruchlinien werden zweimal als Stützpunkte verwendet; in jedes der beiden benachbarten Teilgebiete wird einer dieser Punkte einsortiert.

#### 3.2.2 Interpolation der Höhen des engen, rechteckigen Rasters:

Die in der Grundgleichung der Interpolation auftretenden Kovarianzen werden nach der unter 3.1 beschriebenen Methode berechnet. Durch dieses Verfahren werden die Teilgebiete unabhängig voneinander interpoliert. Die doppelte Verwendung der Bruchlinienpunkte als Stützpunkte in beiden benachbarten Gebieten verhindert Klaffungen des DHM an den Rändern der Teilgebiete, also im Bereich der Bruchlinien. Das Raster repräsentiert eine Geländeoberfläche, die in den Bruchlinien Kanten bildet.

Wie im Grundprogramm werden die Höhen des Rasters in Profilen über das ganze Kartenblatt erfaßt und auf einem Datenträger abgespeichert.

#### 3.2.3 Die Bruchlinien als Teil des DHM:

In der Nähe von Bruchlinien reicht es nicht aus, das interpolierte Gelände nur in Form von Rasterhöhen zu kennen. Die durch die Bruchlinien vorhandene geomorphologische Information wird auch bei den Anwendungen des DHM, z.B. bei der Höhenlinienberechnung, benötigt.

Deshalb werden die ursprünglichen Bruchlinien durch Einschalten der Schnittpunkte zwischen den

1) In der Nettorecheneinheit wird das DHM berechnet. Dazu verwendet werden Stützpunkte aus der Bruttorecheneinheit.  
Überlappungsbereich = Bruttorecheneinheit - Nettorecheneinheit.

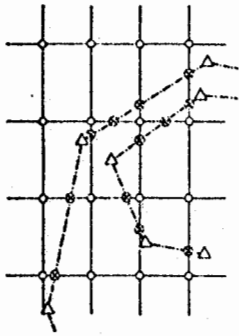


Bild 9

Bruchlinien und den Rasterlinien verdichtet (Bild 9). Um aber Geländekanten und Rasterpunkte einander möglichst gut anzupassen, werden die Höhen dieser verdichteten Punktfolgen nicht durch lineare Interpolation sondern wie die Rasterhöhen durch Prädiktion bestimmt.

Die Koordinaten der so gewonnenen Bruchlinien werden im Anschluß an die Rasterhöhen auf dem Magnetband oder auf der Magnetplatte abgespeichert. Da dadurch gezielt die wichtigsten geomorphologischen Strukturen erfaßt werden, genügt bei dieser Programmversion eine etwas größere Maschenweite des Rasters als bisher.

### 3.2.4 Erweiterungen bei der Interpolation der Höhenlinien:

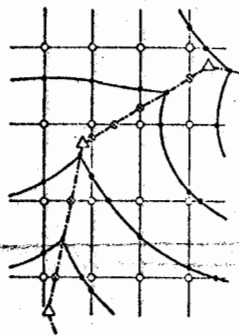


Bild 10

- a) Normalerweise berechnen sich Höhenlinienpunkte wie bisher durch lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Rasterhöhen. Falls aber eine Bruchlinie zwischen diesen beiden Punkten verläuft, so wird der auf der entsprechenden Rasterlinie liegende Bruchlinienpunkt berücksichtigt: Es wird zweimal linear interpoliert, jeweils zwischen einem Rasterpunkt und dem Bruchlinienpunkt (Bild 10).
- b) Zusätzlich zur Interpolation entlang der Rasterlinien werden auch auf der Bruchlinie selbst Höhenlinienpunkte interpoliert.
- c) Entsprechend der Definition von Bruchlinien müssen Höhenlinien beim Überschreiten von Bruchkanten einen Knick bilden. Dies läßt sich folgendermaßen realisieren: Im Punkt auf der Bruchlinie endet ein Höhenlinienteilstück. Das nächste Teilstück beginnt mit einem Punkt mit denselben Koordinaten. Dadurch wird vermieden, daß der Zeichenautomat mit seiner Kurveninterpolation den erwünschten Knick ausrundet.

## 4. SIMULIERTE BEISPIELE

Die Leistungsfähigkeit der erweiterten Methode wird an kleinen simulierten Kartenblättern mit jeweils 4 Recheneinheiten demonstriert. Stützpunkte für die Interpolation sind rasterförmig angeordnete Einzelpunkte und Punkte auf Bruchlinien.

### 4.1 Durchgehende Bruchlinien

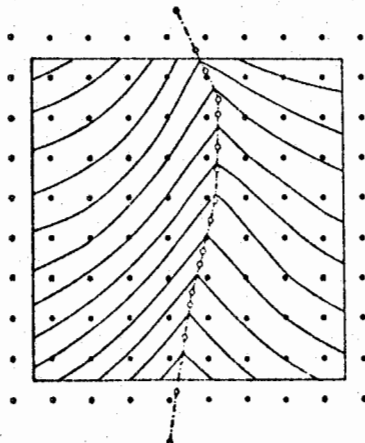


Bild 11

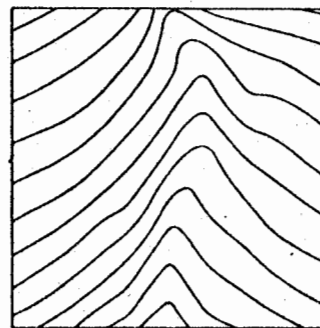


Bild 12

Bild 11 enthält die berechneten Schichtlinien im Bereich eines Geländeeinschnittes. Zusätzlich eingetragen ist die Lage der Massenpunkte und der Bruchlinie. Die Höhenlinien haben einen sehr ruhigen Verlauf, bilden aber im Einschnitt den erwünschten Knick.

Im Vergleich dazu in Bild 12 die Lösung derselben Aufgabe durch das Grundprogramm: Die Fläche ist in der ganzen Recheneinheit glatt; allerdings ist die Scharungsplastik nicht so ausgeprägt wie in Bild 11, und der Einschnitt wird ausgerundet.

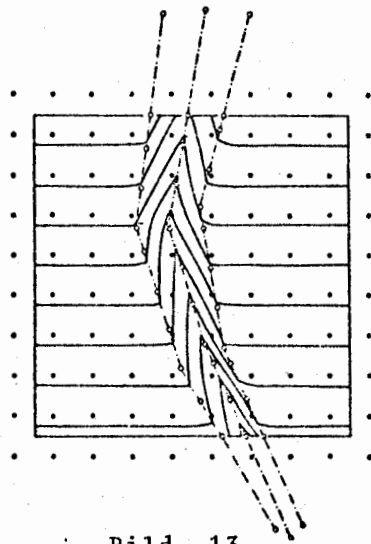


Bild 13

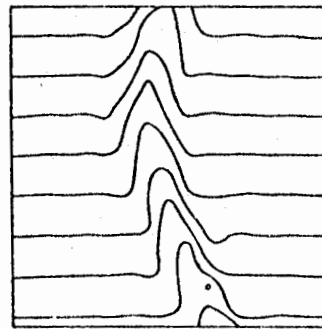


Bild 14

Bild 13 ist das Ergebnis der Interpolation mit der Bruchlinienversion in einem Gelände mit einer durch 3 Bruchkanten festgelegten Erosionsrinne.

Bild 14:

Dasselbe Gelände, aber mit dem Grundprogramm berechnet. Die interpolierte Fläche schwingt an den Rändern der Erosionsrinne aus. Nur so kann sie die starke Neigungsänderung einigermaßen wiedergeben.

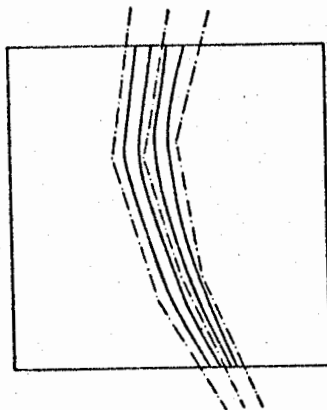


Bild 15

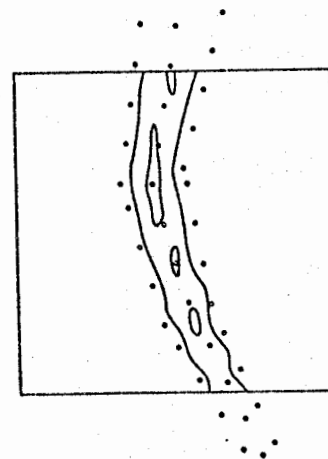


Bild 16

Bild 15:

Horizontale Ebene mit V-förmigem Einschnitt. Das erweiterte Programm errechnet Schichtlinien, die parallel zu den Böschungskanten verlaufen.



**Bild 16:**

Als Information über den Verlauf dieses Grabens stehen dem Grundprogramm nur die als Kreise eingezeichneten Stützpunkte auf den Bruchlinien zur Verfügung. Deshalb können die mit dieser Version berechneten Schichtlinien die linienhafte Geländestructur nur unzureichend wiedergeben.

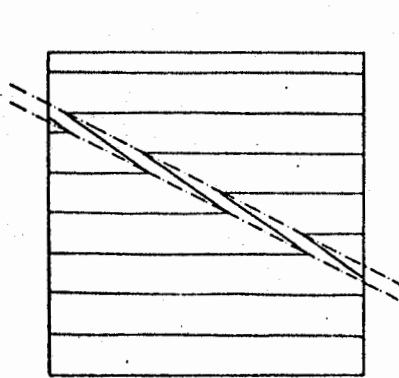


Bild 17

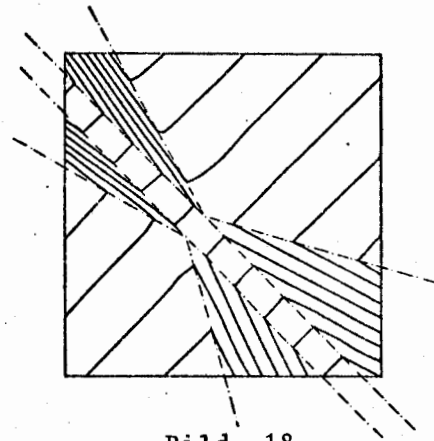


Bild 18

**Bild 17:**

Die Bruchlinienversion ermöglicht auch die exakte Darstellung von Geländeversetzungen. Die schmale Zwischenfläche darf allerdings nicht senkrecht oder gar überhängend sein. Diese Fälle sind z.Zt. im Programm noch nicht vorgesehen.

Im Bild 18 sind in einem Gelände mit Straße, Damm und Einschnitt Höhenlinien gerechnet. Bemerkenswert ist vor allem, daß die Schichtlinien die Straße annähernd rechtwinkelig zum Straßenrand überqueren.

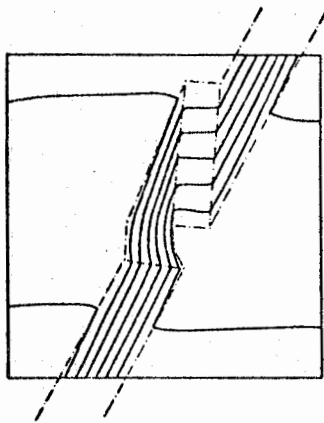


Bild 19

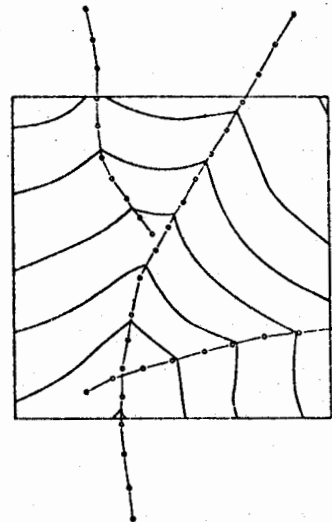


Bild 20

**Bild 19:**

Künstliche Steilfläche mit Rampe.

Bild 20 zeigt die Wirksamkeit einer schon erwähnten Programmeigenschaft (sh. Bild 8): Bei der photogrammetrischen Datenerfassung kann man kaum erreichen, daß eine Linie, die in eine andere einmünden soll, genau in einem Punkt dieser zweiten Linie endet. Das Programm setzt solche Linien richtig zusammen und produziert deshalb auch in diesem Fall abknickende Höhenlinien.

#### 4.2 Bruchlinien, die in der Recheneinheit enden

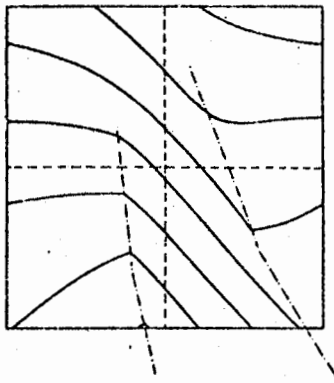


Bild 21

Im Bild 21 treten zwei Bruchkanten auf, die allmählich in das ruhigere Gelände übergehen. In den beiden unteren Recheneinheiten ist die Gebietseinteilung noch möglich. Deshalb bildet die Fläche dort Kanten aus.

In der oberen Bildhälfte werden die Bruchlinien wie im Grundprogramm behandelt, mit einem Unterschied: Auch auf frei endenden Bruchlinien werden Höhenlinienpunkte interpoliert. In diesen Punkten wird die Interpolation des Zeichenautomaten unterbrochen.

Bei den Endstücken von Bruchlinien, die wie in Bild 21 eine allmählich schwächer werdende Kante darstellen, ist die Näherungslösung des Grundprogramms vollkommen ausreichend.

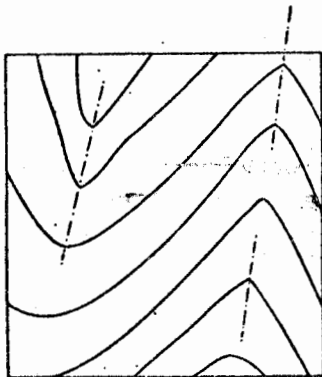


Bild 22

In Bild 22 ist keine Gebietseinteilung möglich, da nur kurze Bruchlinienstücke gemessen worden sind. Der Grund für das trotzdem ordentliche Ergebnis ist vor allem die ausreichend große Dichte der rasterförmig angeordneten Stützpunkte. Die Knicke der Höhenlinie in den Einschnitten entstehen durch die Unterbrechung der Interpolation der Zeichenanlage an diesen Stellen.

Am oberen Ende der linken Bruchlinie in Bild 22 wurde ein Gelände mit einer tiefen Kerbe vorgegeben. Dieser Einschnitt wird jedoch stark ausgerundet und abgeflacht. Die Ursache liegt in der (absichtlich) schlechten Datenerfassung: Die Bruchlinie

endet, obwohl der Einschnitt noch sehr ausgeprägt ist. Starke Bruchkanten müssen also unbedingt in ihrem gesamten Verlauf innerhalb des Kartenblattes eingemessen werden. Wenn in den Daten die Struktur des Geländes nicht vollständig erfaßt ist, kann im Ergebnis keine befriedigende Wiedergabe der Geländeform erwartet werden.

#### 5. MIT DER BRUCHLINIENVERSION BEARBEITETE KARTENBLÄTTER

Drei auf Tachymeteraufnahmen beruhende Höhenlinienpläne sollen beweisen, daß die recht guten Ergebnisse der simulierten Beispiele in Kapitel 4 realistisch sind. Das Datenmaterial für diese Karten wurde uns vom Landesvermessungsamt Hannover und von der Straßenbauverwaltung zur Verfügung gestellt.

Für die Berechnung der Höhenlinien in Bild 23 (sh.nächste Seite) wurden dieselben Daten wie für Bild 3 und Bild 4 verwendet. Die damals mit dem Grundprogramm berechneten Schichtlinien wiesen einige Mängel auf. Diese Schwierigkeiten treten bei Anwendung des erweiterten Programms nicht mehr auf: Die Höhenlinien verlaufen etwa parallel zu den Bruchlinien; die Böschungen haben die wahre Neigung und die Höhenlinien auf den Flächen neben den Steilhängen sind durch gemessene Punkte begründet.

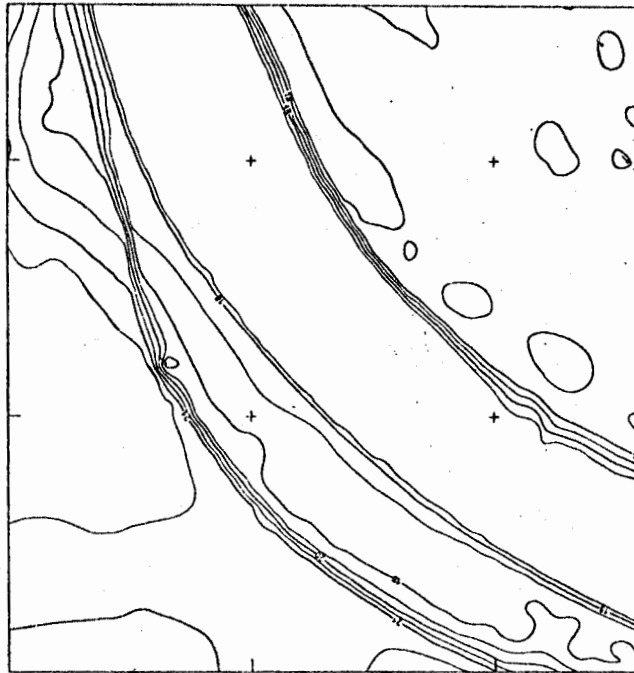


Bild 23

Bild 24 (sh. nächste Seite) ist die Verkleinerung eines für Zwecke des Straßenbaues hergestellten Höhenlinienplanes im Maßstab 1:1 000. Auch das Grundprogramm konnte dieses Kartenblatt mit ordentlicher Qualität berechnen, da keine extremen Böschungsflächen, sondern nur einige Erosionsrinnen und Wegeinschnitte auftreten.

Die damals ausgerundeten Geländekanten werden mit dem erweiterten Programm durch das Abknicken der Höhenlinien geomorphologisch richtig wiedergegeben. Fehlinterpretationen der Geländeformen werden mit dieser Methode vermieden.

### HOEHENLINIENKARTE 1/5000

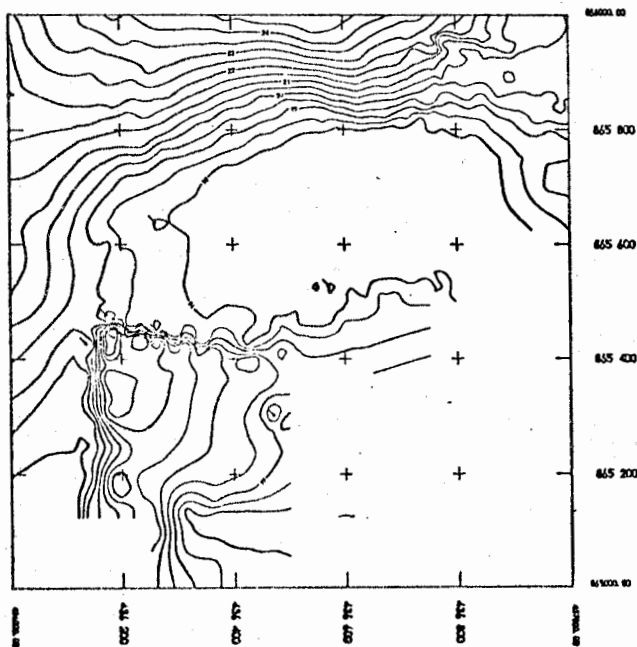


Bild 25

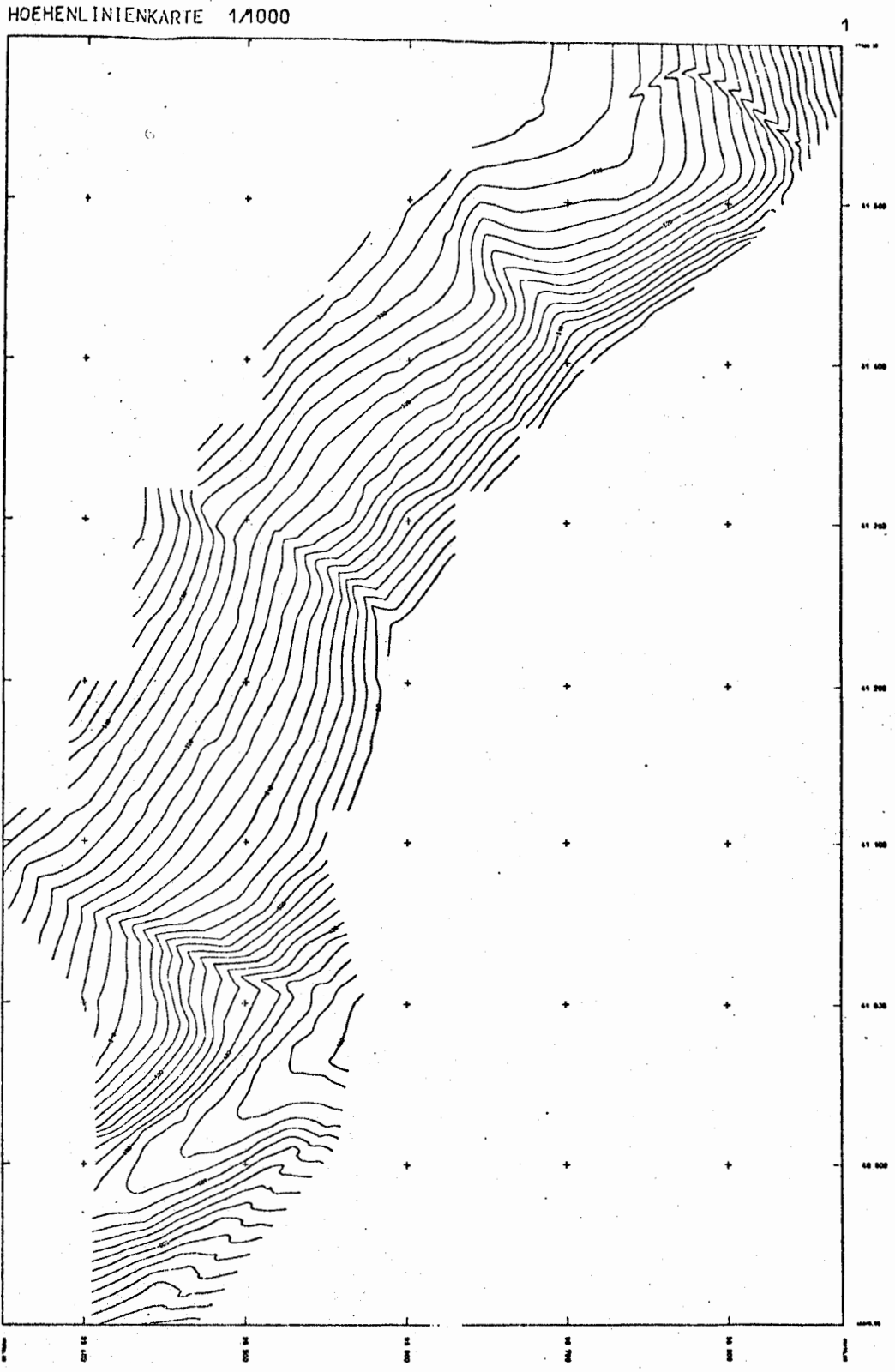


Bild 24

### HOEHENLINIENKARTE 1:5000

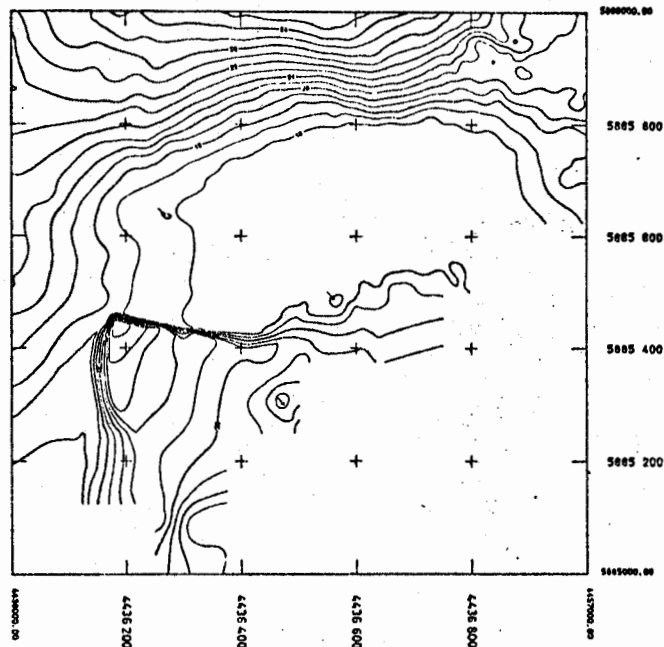


Bild 26

Bild 25 und Bild 26 sind Verkleinerungen eines Kartenblattes im Maßstab 1:5 000 mit sehr unterschiedlichen Geländeformen. Bei der Berechnung der Höhenlinien mit der Grundversion waren keine Bruchlinien bekannt. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß das Ergebnis in Bild 25 im ebenen Gebiet und im leichten Hang zufriedenstellend ist, aber im Bereich einer steilen Böschung Mängel aufweist.

Um das erweiterte Programm anwenden zu können, wurden noch 2 Bruchlinien angegeben. Mit dieser Programmversion werden alle Geländeformen des Kartenblattes (Bild 26) mit ausreichender Qualität wiedergegeben.

Einige wenige Angaben zu den Rechenkosten und zur Rechenzeiterhöhung bei Anwendung der Bruchlinienversion im Gegensatz zum Grundprogramm:

Die Rechenkosten mit dem Grundprogramm liegen für die drei vorgestellten Kartenblätter je nach Größe zwischen etwa 90 DM und 200 DM. Die Berechnung der Kartenblätter mit der Bruchlinienversion ist zwischen 0 % und 50 % teurer, je nach Häufigkeit der Bruchlinien. Nach der bevorstehenden Überarbeitung und Optimierung des erweiterten Programms wird der Unterschied in den Rechenkosten zwischen Bruchlinienversion und Grundversion geringer werden.

#### 6. EIN VERFEINERTES KONZEPT ZUR BEHANDLUNG VON BRUCHLINIEN

Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm wurde im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz in der Praxis entwickelt. Deshalb muß ein solches Programm in Bezug auf die Qualität der Ergebnisse und auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens konventionellen Methoden überlegen oder wenigstens ebenbürtig sein. Strenge Lösungsansätze liefern zwar die besten Resultate, sie sind aber meist sehr aufwendig. Deshalb kann ein Computerprogramm immer nur ein Kompromiß zwischen der idealen und der wirtschaftlichsten Lösung sein.

Auch die in diesem Vortrag vorgestellte Konzeption der Bruchlinienversion ist praxisorientiert, was durch den verhältnismäßig geringen Anstieg der Rechenkosten zum Ausdruck kommt. Trotzdem sollte man nach weiteren Verfeinerungen der Methode suchen, obwohl sie zunächst für die Praxis ohne Bedeutung sind. Eine solche Verfeinerung soll zum Abschluß dieser Ausführungen kurz skizziert werden:

In Abschnitt 3.1 wurde gezeigt, daß in Recheneinheiten mit Bruchlinien keine homogenen Korrelationsverhältnisse mehr vorliegen, sondern daß die Korrelation zwischen Punkten auf verschiedenen Seiten einer Bruchlinie geringer ist, als es dem Punktabstand entspricht. Als Maß für die Verringerung der Kovarianzen bietet sich folgendes Prinzip an:

Man sucht - ohne die Bruchlinie zu überqueren - den kürzesten Weg zwischen den zu korrelierenden Punkten (Bild 27).

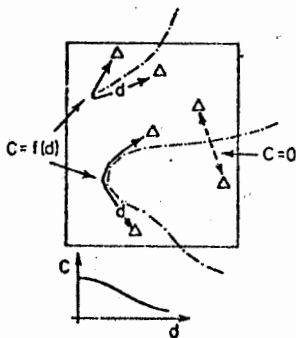


Bild 27

Diese Strecke  $d$  führt, in die Gleichung der Kovarianzfunktion eingesetzt, zur gesuchten Kovarianz.

Je größer der "Umweg" um die Bruchlinien ist, umso stärker ist die trennende Wirkung der Bruchkanten, d.h. umso kleiner wird die Kovarianz  $C$ . Durch die Recheneinheit hindurchgehende Bruchlinien werden mittels Gebietseinteilung erfaßt.

Diese exaktere Methode wurde versuchsweise in das Höhenlinienprogramm eingebaut. Ein erstes Rechenergebnis mit einem Kartenblatt mit simu-

lierten Daten liegt bereits vor:

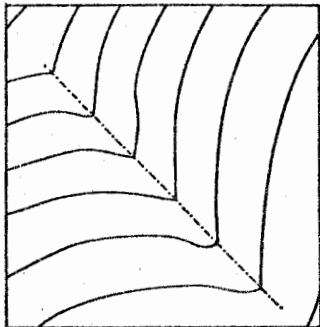


Bild 28

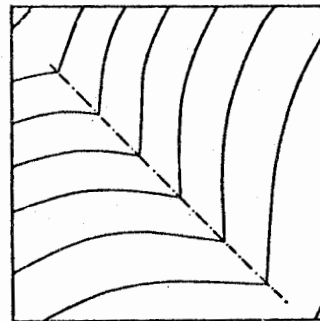


Bild 29

Die Höhenlinien in Bild 28 sind noch ohne die vorhin gemachten Zusätze berechnet; die Bruchlinien werden nur näherungsweise berücksichtigt, da sie in der Recheneinheit enden. Trotzdem ist das Ergebnis besser als erwartet. Die Schichtlinien schwingen nur kurz vor Erreichen der Bruchlinie ein wenig aus.

In Bild 29 wurde die eben beschriebene Methode angewandt. Die kleinen Mängel von Bild 28 sind verschwunden; die Höhenlinien knicken entlang der Bruchlinie ab.

Das Prinzip dieser verfeinerten Methode ist klar und einfach. Es läßt sich im Computer aber leider nur durch sehr komplizierte Rechenoperationen realisieren. Die Methode arbeitet deshalb

völlig unwirtschaftlich und ist zunächst nur für wissenschaftliche Untersuchungen interessant.

Wir sind aber z.Zt. dabei, ähnlich exakte, aber weniger kostspielige Ansätze zu suchen.

Die letzten Ausführungen sollten zeigen, daß man auf dem Gebiet der Digitaltechnik wohl nie einen endgültigen Abschluß erreicht, sondern daß sich immer wieder neue Lösungsmöglichkeiten aufzeigen.

#### LITERATUR

- KRAUS, K. : Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie, BuL 40, S.3-8, 1972.
- STANGER, W.: Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und Ergebnisse. Numerische Photogrammetrie, Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 5, S.255-282.
- ASSMUS, E. und KRAUS, K.: Die Interpolation nach kleinsten Quadraten - Prädiktionswerte simulierter Beispiele und ihre Genauigkeiten. DGK, Reihe A, Heft Nr.76, München 1974.
- ASSMUS, E.: Extension of Stuttgart Contour Program to terrain break-lines; Presented paper, Symposium of Commission III, Stuttgart, 1974.

