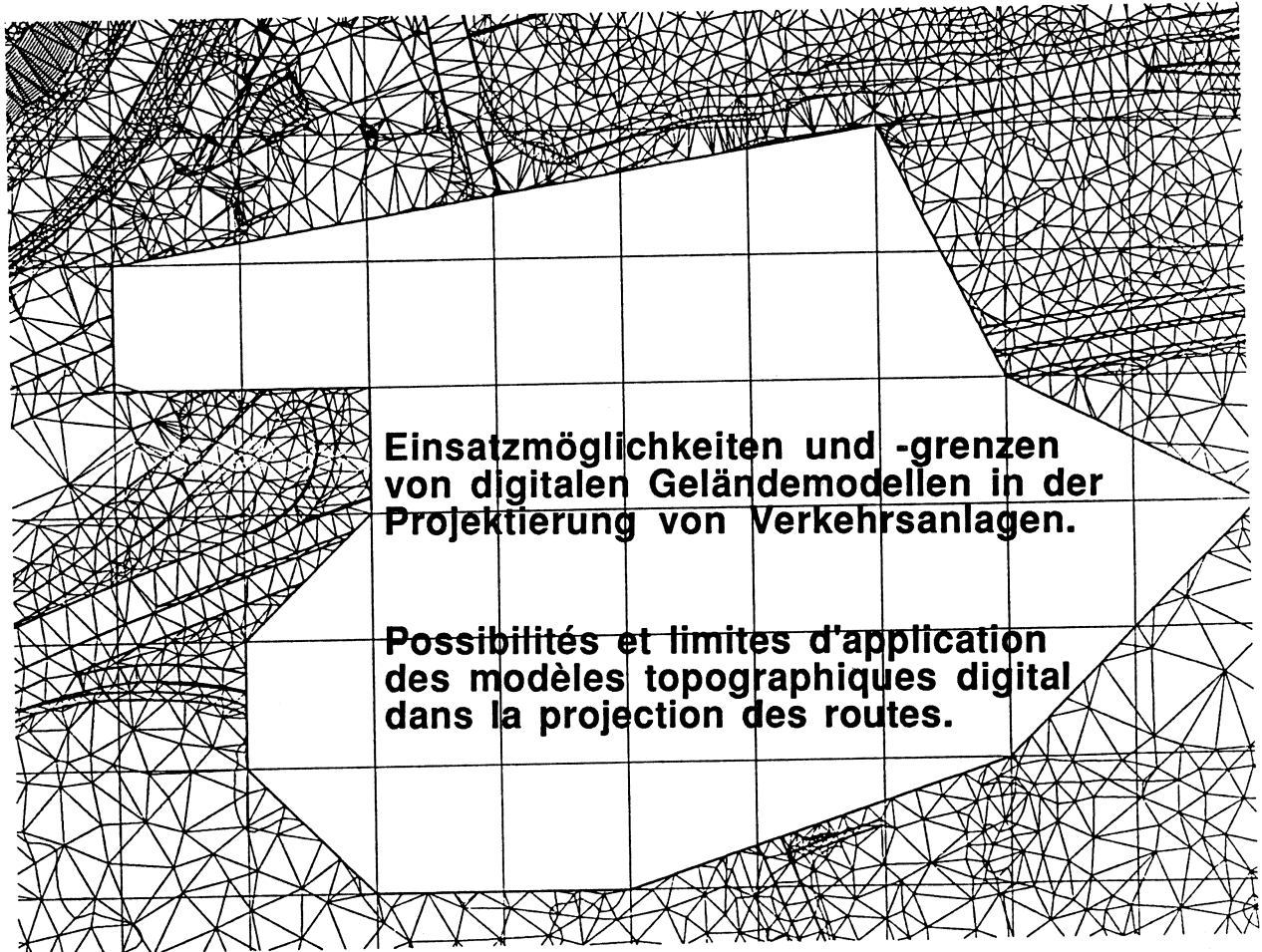


Eidgenössisches Verkehrs- und
Energiewirtschaftsdepartement

Bundesamt für Strassenbau



Zentralschweizerisches Technikum Luzern (ZTL)
Ingenieurschule HTL
G. Appius, dipl.Ing.ETH

Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik,
Strassen- und Eisenbahnbau (IVT) ETH Zürich
H.P Lindenmann, dipl.Ing.ETH

Forschungsauftrag 52/91

Oktober 1993

Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von digitalen Geländemodellen in der Projektierung von Verkehrsanlagen

Zusammenfassung

Mit einem digitalen Geländemodell (DTM) lässt sich die Erdoberfläche über die Koordinaten y, x und h digital beschreiben. Die Abkürzung "DTM" wird aus dem englischen Begriff "Digital Terrain Model" hergeleitet.

Dank der vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten gehören Geländemodelle zu den unentbehrlichen Planungsgrundlagen. Geländemolldaten lassen sich leicht bestimmen. Geländemodelle ermöglichen beliebige Beziehungen zwischen Projekt- und Geländedaten, zum Beispiel für horizontale- und vertikale Linienführungen, für Massenberechnungen, perspektive und fotorealistische Darstellungen, für Lärmschutzberechnungen, ganz allgemein bei allen Planungsaufgaben, bei welchen die 3. Dimension von Bedeutung ist.

Die Geländemolldsoftware verarbeitet im "Black Box Verfahren" Geländemolldaten zum räumlichen Modell. Die inneren Mechanismen sind wenig bekannt. Wichtig ist nur, dass das Resultat den Vorstellungen des Bearbeiters entspricht. Unbekannt bleibt der Einfluss von Störquellen oder fehlerhaften Daten.

Die Forschungsarbeit soll einerseits das tiefere Verständnis zum Geländemolld und den professionellen und fachgerechten Umgang mit diesem fördern helfen. Es wird gezeigt, wie das Gelände im Computer rechnerisch modelliert wird und wie die Dateneingabe den internen Rechenalgorithmus beeinflussen kann. Diese Arbeit soll auch vertrauensfördernd wirken, indem aufgezeigt wird, dass hinter dem "Black Box Verfahren" recht einfache Regeln zugrunde gelegt sind.

Für den Praktiker werden für die Verwendung von DTM-Werkzeugen eine Reihe von Tips von der Datenbeschaffung bis zur Resultatinterpretation angegeben. Sie stellen einen ersten Schritt zum besseren Verständnis beim Einsatz von DTM's bei Bau- und Verkehrsingenieuraufgaben dar.

Possibilités et limites d'application des modèles topographiques digital dans la projection des routes.

Résumé

Le modèle topographique digital (DTM) permet de décrire la surface terrestre en fonction des coordonnées y , x et h . L'abréviation "DTM" dérive de la notion anglaise "Digital Terrain Model".

Vu leur vaste champ d'application, les modèles topographiques font partie intégrante de la base d'un projet. Les données y relatives sont faciles à déterminer. Les modèles topographiques permettent d'établir des relations au choix entre les données du projet et celles du terrain, p. ex. sur le plan du tracé vertical et horizontal, du calcul du terrassement, de la présentation perspective ou réaliste, du calcul de la protection antibruit, ou, en général, à tout moment où la troisième dimension joue un rôle prépondérant dans la planification.

En se servant de la méthode "Black Box", le logiciel transforme les données du modèle topographique en modèle tridimensionnel. Les mécanismes exacts ne sont guère connus. Il suffit seulement que les résultats conviennent aux idées de la personne chargée de l'élaboration du projet. L'influence de sources d'erreurs ou de données incorrectes n'est pas certaine.

Le travail de recherche a pour but de promouvoir une meilleure compréhension ainsi qu'une application professionnelle et adéquate du modèle topographique. Il explique comment le logiciel réussit à modéliser le terrain sur l'écran et dans quelle mesure l'enregistrement des données peut influencer l'algorithme interne. Ensuite ce travail vise également à renforcer la confiance dans ce modèle en montrant que la méthode "Black Box" se base sur des règles relativement simples.

S'adressant à l'utilisateur, ce travail contient de nombreuses recommandations quant à l'exploitation des outils propres au DTM, de l'approvisionnement en données à l'interprétation des résultats. Ces recommandations forment une première étape vers une meilleure compréhension du DTM et de son application dans le cadre des travaux des ingénieurs de bâtiment et de la circulation.

Inhaltsverzeichnis

Seitennummerierung kapitelweise

1	Das digitale Terrainmodell (DTM)	1.1
1.1	Allgemeines	1.1
1.1.1	Eine kurzer Ueberblick	1.1
1.1.2	Im Forschungsbericht werden folgende Hauptaspekte behandelt:.....	1.4
1.1.3	Herkunft der Daten.....	1.4
1.1.4	Verwendete Programmsysteme.....	1.5
1.1.5	Schwerpunkte der Untersuchungen.....	1.6
1.2	Vom Geländeprofil zum Geländemodell.....	1.7
1.2.1	Bisherige Methoden zur Erfassung der Geländedaten	1.7
1.2.2	Die Geländemodellierung	1.8
1.2.3	Begriffe:.....	1.8
1.3	Die einzelnen Elemente und Resultate	1.9
1.3.1	Einzelpunkte	1.9
1.3.2	Harte Bruchkanten und weiche Strukturlinien	1.10
1.3.3	Dreiecksflächen.....	1.10
1.3.4	Höhenkurven :.....	1.11
1.4	Automatisierte Datenerfassung aufgrund von Stereobildpaaren.....	1.11
1.5	Die Datenerfassung als Fundament der Geländemodellierung.....	1.12
1.6	Die Geländemodelle der vorliegenden Untersuchungen.....	1.12
2	Theorie über die Geländemodelle	2.1
2.1	Dreiecksvermaschung versus Rasterinterpolation.....	2.1
2.2	Erfassung der topographischen Form.....	2.2
2.3	Die Rechtecksvermaschung (GRID)	2.2
2.3.1	Rastervermaschung verschiedener Programme.....	2.2
2.3.2	Prinzip der Rastervermaschung	2.2
2.4	Die Dreiecksvermaschung.....	2.3
2.4.1	Prinzip der Dreiecksvermaschung:.....	2.3
2.4.2	Dreiecksvermaschung verschiedener Programme	2.5
2.5	Höheninterpolation für beliebige Punkte (y,x).....	2.7
2.5.1	Höheninterpolation beliebiger Punkte im Rasterverfahren.....	2.7
2.5.2	Höheninterpolation beliebiger Punkte bei der Dreiecksvermaschung.....	2.8
2.6	Interpolation der Höhenkurven.....	2.10
2.6.1	Interpolation der Höhenkurven bei Rasternetzen.....	2.10
2.6.2	Interpolation der Höhenkurven bei der Dreiecksvermaschung	2.10
2.7	Einführen von zusätzlichen Gewichten und Bedingungen.....	2.11
2.8	Beispiele fehlerhafter und richtiger Vermaschungen.....	2.11
2.9	Hinweis zu Programmen ohne Definitionsmöglichkeit für Linien.....	2.13

3	Bestimmung der Geländedaten	3.1
3.1	Allgemeines	3.1
3.2	Datenbeschaffung	3.2
3.3	Datenverwaltung	3.3
3.4	Anwender	3.4
3.5	Herkunft der Daten	3.4
3.5.1	Photogrammetrische Bestimmung von Geländedaten	3.4
3.5.2	Terrestrische Bestimmung und Berechnung der Geländedaten	3.9
3.5.3	Digitalisierung von Geländedaten	3.16
3.5.4	Geländedaten aus Strassenbauprojekten	3.17
4	Geländemodellierung über Höhenkurven	4.1
4.1	Beispiele:	4.1
4.1.1	Modell 1 : Digitalisierung von Einzelpunkten	4.2
4.1.2	Modell 2 : Harte Bruchlinien	4.3
4.1.3	Modell 3 : Harte Bruchlinien und Geländebruchlinien	4.3
4.1.4	Modell 4: Modell 1 Einzelpunkte und Geländebruchlinien	4.4
4.2	Unterschiede zwischen Modellen aus Punkten oder Linien	4.4
4.3	Auswirkung grober Fehler bei Modellen aus Höhenkurven	4.4
4.4	Einzelpunktmodelle mit weichen Geländeformen	4.6
4.5	Folgerung	4.7
5	Zuverlässigkeit der Datenerfassung Genauigkeit und Fehlerausbreitung	5.1
5.1	Die Zuverlässigkeit der Datenerfassung	5.1
5.1.1	Zuverlässigkeitskontrollen bei einer Massenberechnung	5.1
5.1.2	Massnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit	5.3
5.1.3	Weitere Methoden zur Verbesserung der Zuverlässigkeit	5.3
5.2	Genauigkeit und Fehlerausbreitung	5.5
5.2.1	Versuch Glaubenberg Passhöhe	5.5
5.2.2	Versuch Langis	15.1
5.2.3	Die Ausbreitung eines groben Fehlers	5.14
5.2.4	Der Einfluss von Höhenfehlern am Höhenkurvenverlauf	5.15
5.2.5	Fehler am Volumen als Folge der Fehler am Geländemodell	5.17
5.2.6	Fehlerfortpflanzung nach dem Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz:	5.19
6	Bestimmen von Teilmodellen	6.1
6.1	Definition und Berechnung der Umrisslinie des Teilbereichs	6.1
6.2	Aufteilen in Teilmodelle	6.1
6.3	Beispiel 1: Modell Fadenbrücke	6.3
6.4	Beispiel 2: Modell N2-Anschluss Stans-Süd	6.7

7	Schlussfolgerungen.....	7.1
7.1	Allgemeines.....	7.1
7.2	Rechtecksvermaschung versus Dreiecksvermaschung.....	7.1
7.3	Hard- und Software.....	7.1
7.3.1	Funktionsstüchtigkeit von Hard- und Software.....	7.1
7.3.2	Vergleich der Auswerteergebnisse.....	7.1
7.3.3	Möglichkeiten der einzelnen Programmsysteme.....	7.2
7.3.4	Vermaschungsmethode.....	7.2
7.3.5	Bedingung an die Programmsysteme:.....	7.2
7.3.6	Interpolation.....	7.3
7.4	Datenerfassung.....	7.3
7.4.1	Massnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Geländeaufnahmen.....	7.3
7.4.2	Kontrolle der Linien.....	7.6
7.4.3	Bearbeitung grosser Datenmengen.....	7.6
7.4.4	Digitalisierung von Höhenkurven.....	7.7
7.5	Berechnungen.....	7.10
7.5.1	Koordinatenberechnungen.....	7.10
7.5.2	Massenberechnungen.....	7.10
7.6	Höhenkurvendarstellung.....	7.10
7.7	Zukunftsperspektiven.....	7.11
A	Fortran, AWK-Programme + UNIX-Scripts.....	A.1
A.1	Extraktion von Teilmodellen mit Programm OVERMO.....	A.1
A.2	Programme zur Simulation von Geländemodellen.....	A.4
A.3	SIMULATION Geländemodelle (Rechtecke und Ovale).....	A.6
A.3.1	Muster zur Parametersteuerung.....	A.6
A.4	SIMULATION Höhenkurven.....	A.8
A.5	3-D-Darstellungen.....	A.9
A.6	Verdichtung von Punkten auf Bruchkanten und Strukturlinien.....	A.10
A.7	Vom Uebersichtsplan zur Vergrösserung.....	A.11
A.7.1	Uebersicht über Gesamtmodell.....	A.11
A.7.2	Teilmodell.....	A.12
A.7.3	Vergrösserung 1 Teilmodell.....	A.13
A.7.4	Vergrösserung 2 Teilmodell.....	A.14
A.7.5	Vergrösserung 3 Teilmodell.....	A.15

Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung der Wirkung von...

Die Untersuchung wurde durchgeführt, um die Wirkung von...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

Die Untersuchung hat gezeigt, dass...

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass...

1 Das digitale Terrainmodell (DTM)

1.1 Allgemeines

1.1.1 Eine kurzer Ueberblick

Mit einem digitalen Geländemodell (DTM) kann die Erdoberfläche über die Koordinaten y, x und h digital beschrieben werden. Die Abkürzung "DTM" wird aus dem englischen Begriff "Digital Terrain Model" hergeleitet. Die Methode ist in den Bereichen Erd- und Ingenieurwissenschaften (Photogrammetrie, Fernerkundung, Geologie, Geographie, Kartographie) seit den 50-Jahren bekannt. Ende der sechziger Jahre wurde in der Schweiz ein digitales Geländemodell mit dem Namen RIMINI auf Grund militärischer Bedürfnisse landesweit erstellt.

Das Modell RIMINI basiert auf der Rastermethode und weist eine Maschenweite von 250 m auf. Es wurde in militärischen Wiederholungskursen erstellt. Diese manuelle Digitalisierung auf 25'000-er Kartenblätter ist mir als Verfasser dieser Arbeit in angenehmer WK- Erinnerung. Dass ich mich mehr als 30 Jahre später erneut und intensiver mit dieser Materie auseinandersetze, ist wohl eher ein Zufall.

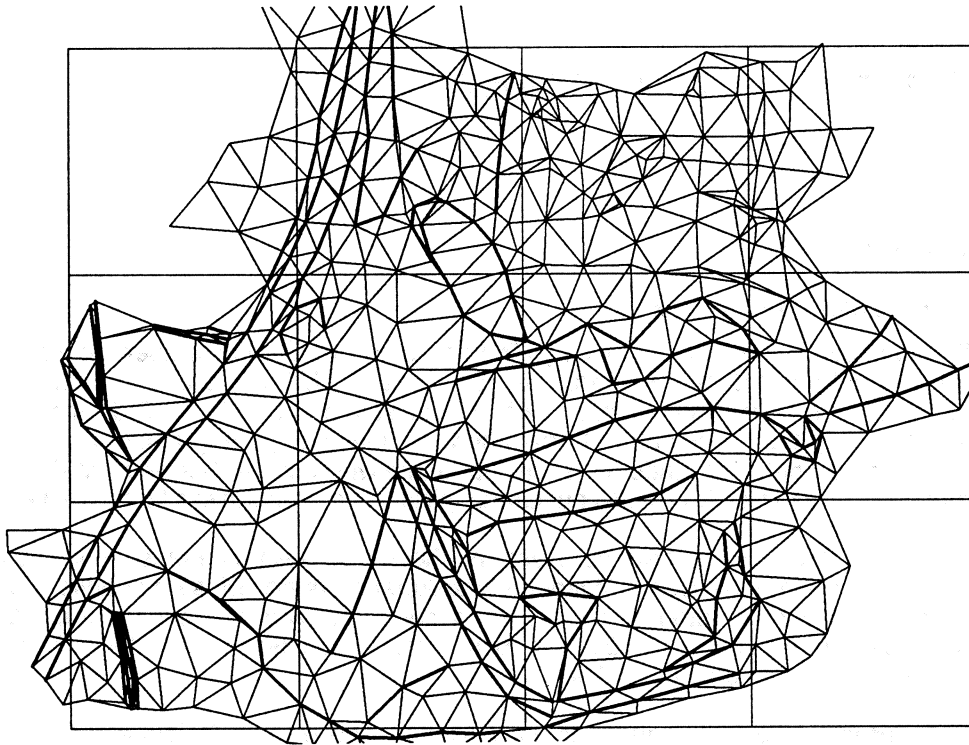
Dank der vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten sind digitale Geländemodelle nicht mehr wegzudenken. Einerseits können Geländedaten sehr einfach erfasst und verarbeitet werden, andererseits besteht ein grosser Trend zu verstärkter Automation. In der Projektierung von Verkehrsanlagen und Grossbauten werden heute üblicherweise Informatikwerkzeuge eingesetzt. Die "Computer Integrierte Planung" hat konventionelle Arbeitsmethoden weitgehend verdrängt. Die Querprofilaufnahme als Grundlage der einfachen Geländemodellierung ist ein Hemniss. Sie ist ortsgebunden und eignet sich nicht für Projektänderungen. Demgegenüber ermöglicht ein DTMPprogramm beliebige Beziehungen zwischen Projekt und Geländedaten, zum Beispiel für horizontale und vertikale Linienführungen, für Massenberechnungen, perspektive und fotorealistische Darstellungen, für Lärmschutzberechnungen und so fort.

In den meisten Fällen sind Geländemodelle Programmsysteme, welche aus mehr oder weniger geordneten Punktmengen ein digitales Geländemodell im "Black Box Verfahren" entstehen lassen. Die inneren Mechanismen sind wenig bekannt. Wichtig ist nur, dass das Resultat den Vorstellungen des Bearbeiters entspricht. Unbekannt ist der Einfluss von Störquellen oder fehlerhafter Daten.

Die Forschungsarbeit soll einerseits das tiefere Verständnis zum Geländemodell und den professionellen und fachgerechten Umgang mit diesem fördern helfen. Es wird gezeigt, wie das Gelände im Computer rechnerisch modelliert wird und wie die Dateneingabe den internen Rechenalgorithmus beeinflussen kann. Diese Arbeit soll auch vertrauensfördernd wirken, indem aufgezeigt wird, dass hinter dem "Black Box Verfahren" recht einfache Regeln zugrunde gelegt sind.

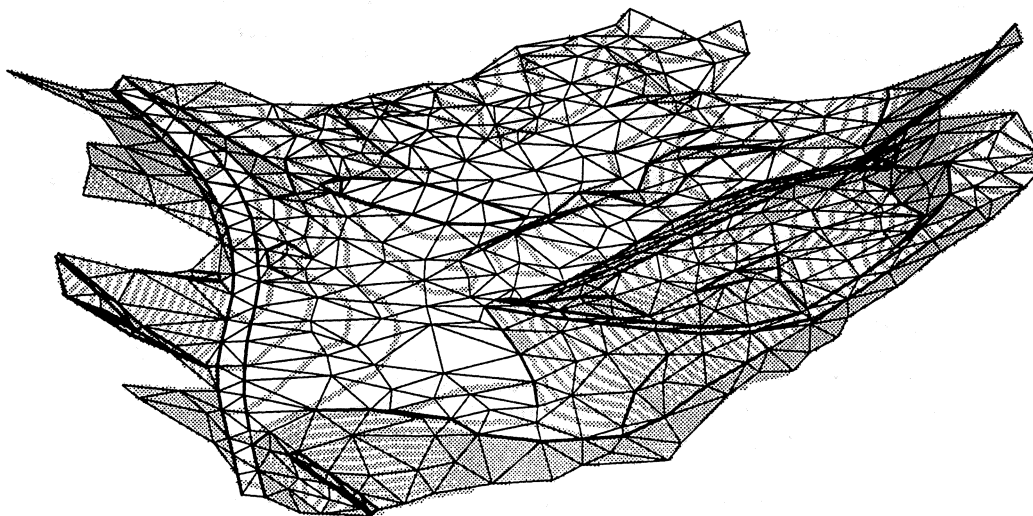
Die heute bekannten DTM basieren auf der Dreiecksvermaschung und der Rastermethode.

Figur 1: Dreiecksvermaschung Modell Glaubenberg Passhöhe

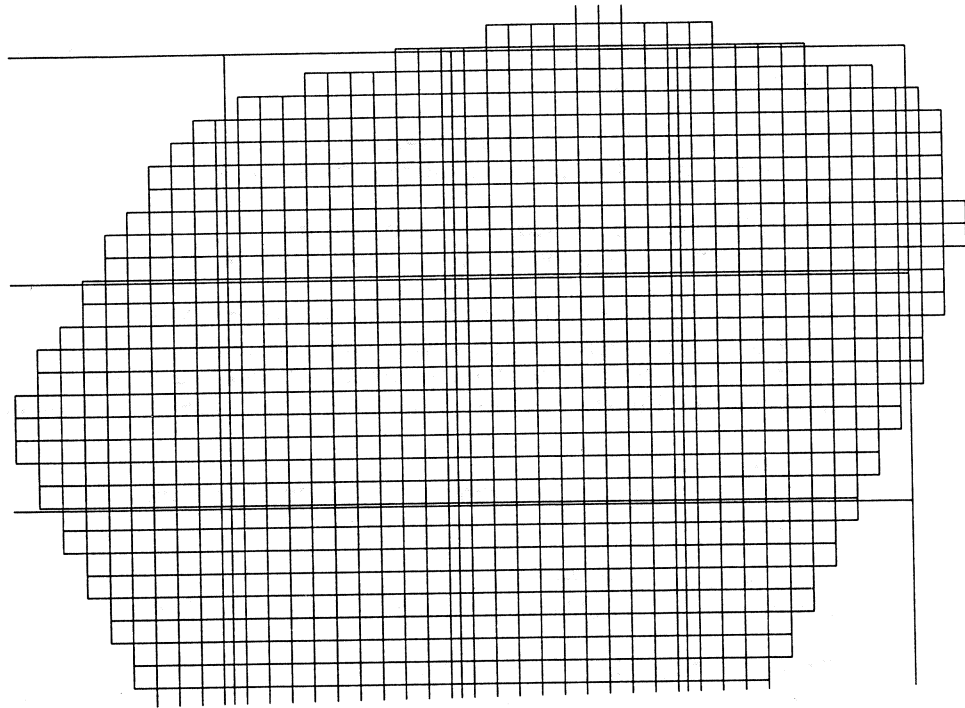


Der Vorteil der Dreiecksstruktur liegt in der optimalen Anpassungsfähigkeit an den Terraincharakter.

Figur 2. Perspektive Ansicht des Modells mit Höhenkurven

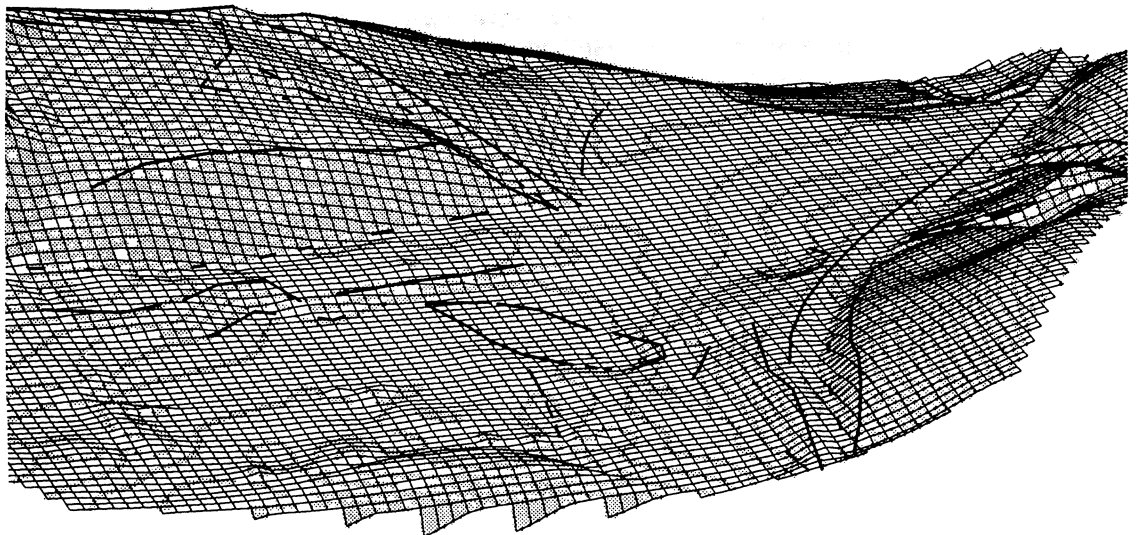


Figur 3: Rastermethode Modell Glaubenberg Passhöhe



Figur 4. Perspektive Ansicht des Modells mit Höhenkurven

Der Vorteil liegt in der Gleichmässigkeit des Rasters, womit ein "geglättetes" und ruhiges Erscheinungsbild der Modellierung erreicht wird.



1.1.2 Im Forschungsbericht werden folgende Hauptaspekte behandelt:

- **Grundlagen eines DTM:**
Dazu gehören eine genauere Beschreibung und mögliche Methoden der digitalen Geländemodellierung.
- **Bestimmung der Geländedaten:**
Hier wird eine Auswahl von Aufnahmeverfahren aufgezeigt.
- **Koordinaten- und Höhenberechnung:**
Wie werden Geländemodelle in das schweizerische Fixpunktnetz integriert.
- **Anwendung verschiedener DTM-Softwarepakete:**
DTM-Software muss vor der Anwendung überprüft werden. Auswertungen mit verschiedenen Programmen zeigen markante Differenzen, welche durch gezielte, rechnerische Punktverdichtungsmassnahmen eliminiert werden können.
- **Interpolation:**
Die Interpolation ist verantwortlich für Knotenberechnungen bei Querprofilen und Höhenkurven.
- **Ausbreitung von Fehlern:**
Wie pflanzen sich Fehler fort und wie kann die Ausbreitung eingedämmt werden.
- **Grenzen digitaler Geländemodelle:**
Sollen möglichst grosse Geländemodelle gerechnet werden oder besteht eine Möglichkeit einfacher Gebietsaufteilung, ohne dabei den Charakter des Modelles zu zerstören.
- **Auftellung in lokale und überblickbare Einheiten:**
Hier wird die Technik des HerauslöSENS gewisser Gebietsteile besprochen.
- **Ueberprüfung der Genauigkeit von Geländemodellen:**
Aufgrund einer grösseren Versuchsanlage werden gerechnete Höhenkoten den exakt eingemessenen Höhen gegenübergestellt und daraus die notwendigen Schlüsse gezogen.
- **Vorschläge für die Weiterentwicklung:**
Der Vormarsch von Geländemodellen ist kaum zu bremsen. In welche Richtung führt der Weg und welche Möglichkeiten bieten sich in Zukunft, wenn Geländemodelle in der Grundlagenvermessung und in der Projektierung von Verkehrsanlagen einen festen Platz haben werden?

1.1.3 Herkunft der Daten

Die verwendeten Datensätze stammen aus der Photogrammetrie der terrestrischen Vermessung sowie der Digitalisierung von Höhenkurven. Ein Teil der Daten ist automatisch generiert worden.

Die verwendeten Testdatensätze sind:

Photogrammetrie:

Modelle Fadenbrücke und Modell Kreuzstrasse
(Nationalstrassen)

Ebenes Gelände mit viel Dammschüttungen und Kunstbauwerken der Nationalstrasse N2

ca: 18'000 Punkte aus dem RAV-Projekt Nidwalden für Testzwecke zur Verfügung gestellt von Vermessungsbüro R. Kägi Luzern (RAV = Reform Amtliche Vermessung)

Terrestrische Aufnahmen:

Modell Glaubenberg Langis und Glaubenberg Passhöhe

kupiertes, flaches bis steiles Gelände mit einigen Böschungskanten und Kunstbauwerken

ca: 2'000 Punkte

Querprofilaufnahmen mit der Setzlatte:

Vermessungskurs ZTL 1992 und 1993

kupiertes, flaches bis steiles Gelände mit einigen Böschungskanten und Kunstbauwerken

Längenprofilaufnahme mit dem Nivelliergerät:

Vermessungskurs ZTL 1992 und 1993

kupiertes, flaches bis steiles Gelände mit einigen Böschungskanten und Kunstbauwerken

Digitalisierung von Höhenkurven:

Melchsee-Frutt

Simulierte Datensätze:

Simulation von Höhenkurven und Geländeformen

1.1.4 Verwendete Programmsysteme

DEMPAC	©Digiplan AG Lenzburg
CIP	©Leica AG
QS	US-Produkt
Quadrangle	US-Produkt
DTM-Programm aus STRATIS	©RIB

Parallel zum Bericht sind diverse Zusatz- und Interfaceprogramme entwickelt worden, welche die Anwendung von DTM-Programmen vereinfachen. Dazu gehören:

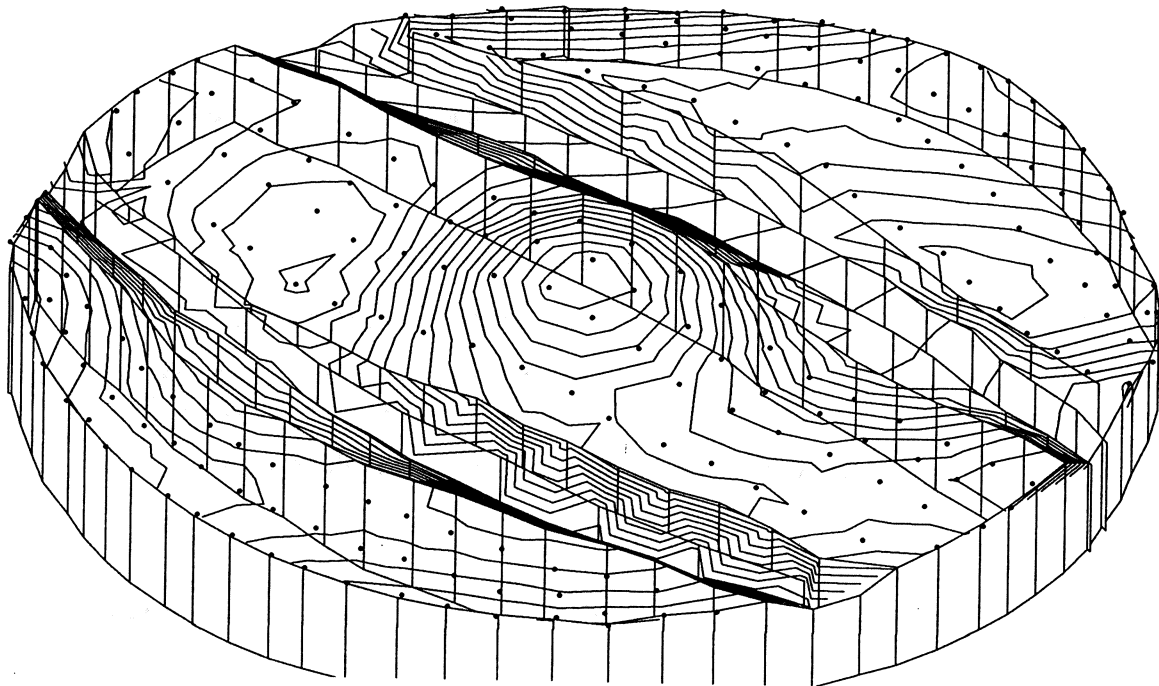
GEOTRI (Auswertung Feldbeob.)	©G: Appius
AVENUE-Programme	©ZTL
AVEUTI	Punktausscheidungsprogramme
LINIE	gezielte Punktverdichtung
DELAUN	Test Delaunay-Kriterium

HOEHEN
AVESIM
KREISE
MODELL

DREID
SIMULA

Test Höhenkurvendigitalisierung
Simulation von Geländeformen
Simulation von Geländeformen
Interfaceprogramm zur Umwandlung der Originaldaten in
anwendungsorientierte Datensätze
Visualisierung von Linienzügen
Simulation von Höhenkurven

Figur 5: Simuliertes Modell



1.1.5 Schwerpunkte der Untersuchungen

Priorität hat die wahrheitsgetreue Modellierung der Terrainoberfläche aus Linien und Punkten. Sofern das Terrainerüst fehlerfrei bestimmt werden kann, spielen Differenzen aus verschiedenen Interpolationsverfahren eine eher untergeordnete Rolle. So ist auch die Darstellung der Höhenkurven von sekundärer Bedeutung. Die grobe Formgebung entsteht aus dem Schnitt einer Niveauläche mit dem, je nach Programm, verdichteten Terrainerüst. Die Abrundung der Kurven gehört in das Kapitel der Interpolation. Hier kann das Wissen über die Prozesse, die zur Bildung der Geländeformen führen, in die Interpolationsform umgesetzt werden. Im kleinmassstäblichen Bereich sind solche Interpolationen erfolgversprechend, im Gegensatz zum grossmassstäblichen Bereich, in welchem die ursprüngliche Form der Erdoberfläche entweder sehr fein gegliedert ist oder durch Bauten und Terrainverschiebungen verändert wurde. Für Quer- und Längsenprofilberechnungen, Massenberechnungen usw. sind kleinste Details von grosser Bedeutung. Im Geländemodell muss der Böschungsknick eines Erddamms vorhanden sein. Die Böschungssignatur genügt für den Kartographen, nicht aber für die Projektierung von Bauwerken.

Im Bericht werden mögliche Interpolationsmethoden erwähnt, hingegen nicht behandelt. Die Oberfläche der Erde weist in der Regel eine sehr komplexe Gestalt auf, die sich weder durch Glattheit und Stetigkeit, noch durch Fraktalität auszeichnet, so dass die Herleitung einer umfassenden Theorie über ihr Verhalten als utopische Aufgabe betrachtet werden muss. Interpolationsansätze findet man im Bericht von Martin Brändli: "Oberflächeninterpolationen aus Höhenkurvendaten" (Geographisches Institut Universität Zürich, 1991).

1.2 Vom Geländeprofil zum Geländemodell

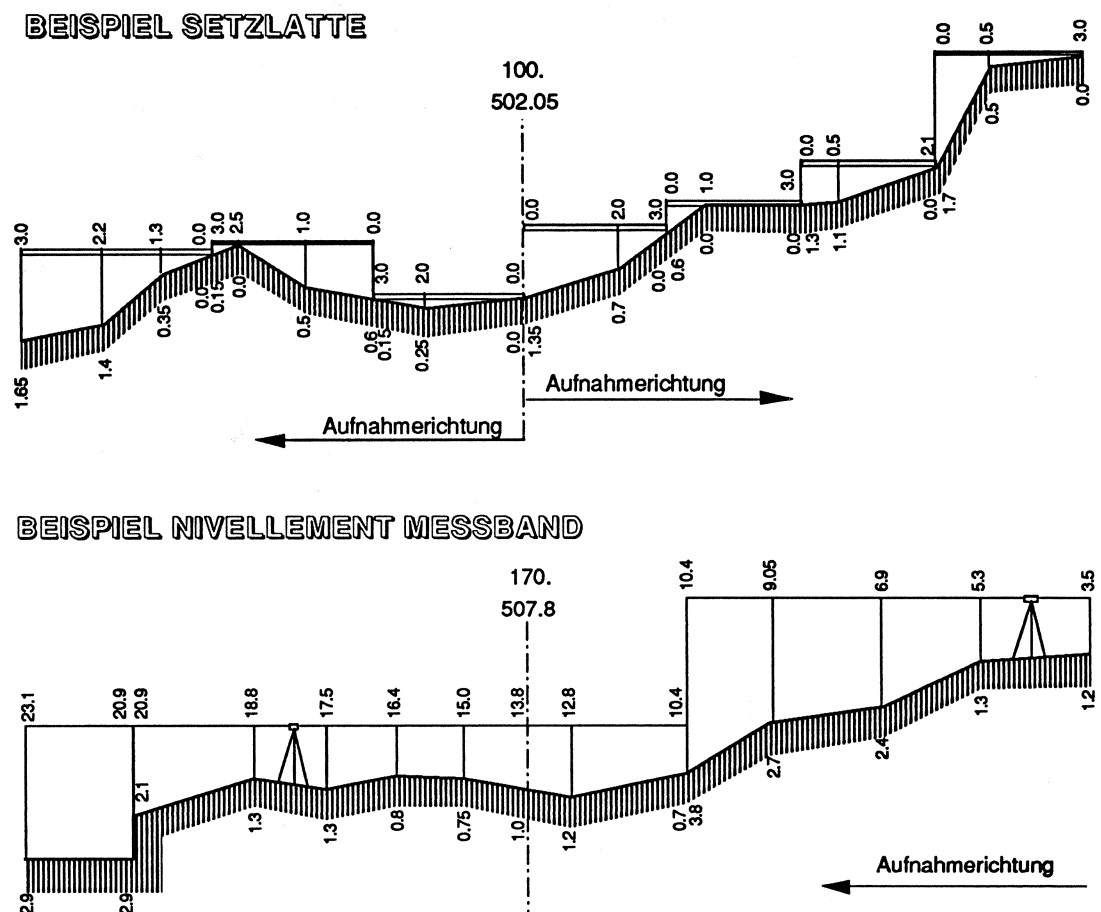
1.2.1 Bisherige Methoden zur Erfassung der Geländedaten

Der folgende Teil gibt eine kurze Uebersicht über die heute noch verbreiteten Methoden zur Bestimmung der Geländedaten, wie zum Beispiel die Profilaufnahmen mit Setzlatte oder Nivelliergerät. Moderne Geräte haben zwar die unten dargestellten Aufnahmemethoden weitgehend verdrängt oder verbessert. Feldaufnahmen werden automatisch registriert (automatische Feldbuchführung) und anschliessend direkt dem Computer zugeführt.

Bestimmte Anwendungen prägen die Methoden. Querprofile werden auch in Zukunft nach den bisherigen Methoden immer dort aufgenommen, wo die Genauigkeit in Lage und Höhe von Bedeutung ist, oder sich DTM-Anwendungen nicht lohnen, was nicht bedeutet, dass auch diese Geländedaten lassen sich jederzeit in bestehende Geländemodelle integrieren lassen.

Die grossen Nachteile der bisherigen Verfahren liegen in der Unbeweglichkeit der Aufnahme. Sie sind ortsgebunden und können bei Projektänderungen nicht oder nur innerhalb enger Grenzen verschoben und gedreht werden. Aus diesem Grund ist diese Methode schwerfällig und bedingt bei Projektänderungen meistens weitere Datenerhebungen im Feld.

Figur 6-7: Bisherige Geländeprofilaufnahmen



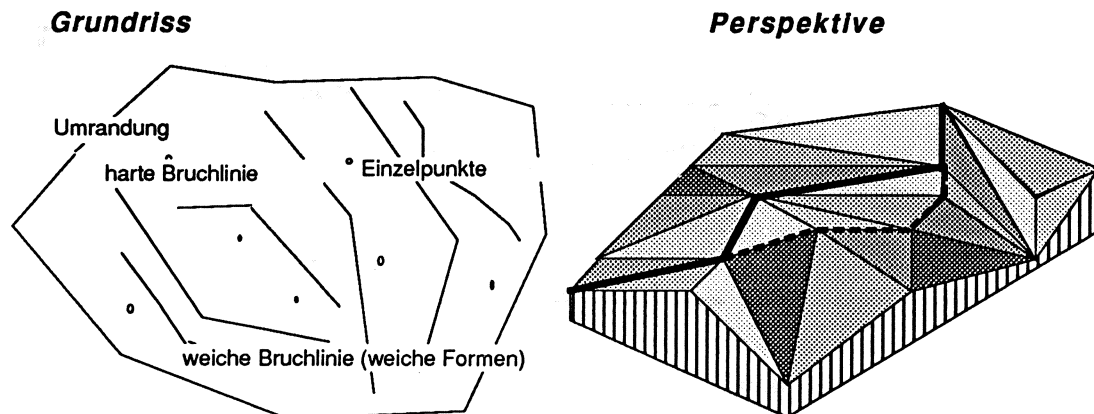
1.2.2 Die Geländemodellierung

Das Geländemodell bietet einen neuen Ansatz zur Profilbestimmung. Anstelle der Profilaufnahme treten Geländeaufnahme und Geländemodellierung. Dies lohnt sich in allen Fällen, wo Profile an verschiedensten Orten und für verschiedenste Zwecke benötigt werden.

Mit der weitgehend automatisierten Datenerhebung (Luftbilder, elektronische Messausrüstungen) können Geländedaten rationell erfasst und anschliessend mit Computerprogrammen ausgewertet werden. Man registriert nicht wie früher projektbezogene Profile, sondern Flächenteile, welche unter Umständen durch Kanten gebrochen werden. Die Profile werden genau dort gerechnet, wo man sie braucht. Damit wird die Projektierung flexibler.

Der Schritt zum Geländemodell scheint also sehr logisch. Zur ortsgebundenen Querprofilbestimmung sind zwei Verfahren kurz beschrieben worden. Bei Geländemodellen betreten die meisten Anwender Neuland. Das Grundwissen ist bescheiden und bleibt meistens den Spezialisten vorenthalten. Nach der Definition des DTM wird die Geländeoberfläche digital im Koordinatensystem y, x und h beschrieben. Je mehr Punkte vorhanden sind, umso besser ist die Abbildung. Wer nach diesem Leitsatz Gelände modelliert, arbeitet höchst unwirtschaftlich und nicht unbedingt fachgerecht. Zum Ziel der Geländemodellierung gehört die Bestimmung einer **minimalen Punktezahl** im Gelände, mit denen ein optimal angepasstes Modell gerechnet werden kann. Die Schwierigkeit besteht dabei in der Auswahl markanter Geländedetails, welche für spätere Geländemodellberechnungen repräsentativ sind. Ein Geländegerüst aus harten Bruchkanten (z.B. Ränder von Kunstbauten) und sanften Strukturlinien (z.B. weiche Böschungskanten) kann das Gelände wahrheitsgetreu darstellen. Zu viele Daten belasten das System und die Verarbeitungszeit, zu wenig und falsch erfasste Daten verfälschen die resultierende Geländedarstellung. Ausreisser sind schwer kontrollierbar.

Figur 8: Von der Geländestruktur zur dreiecksvermaschten Geländeform



1.2.3 Begriffe:

- | | | |
|-----------|--------------------------------|--|
| • | Digitales Terrainmodell | DTM |
| oder auch | • | Digitales Geländemodell oder kurz "Geländemodell" |
| • | Dreiecksvermaschung | (Figuren 1 und 2) |
| • | Rastermethode (Grid) | (Figuren 3 und 4) |
| • | Einzelpunkt | Y, X und H eines Geländepunktes |

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Geländelinie | Verbindung von Einzelpunkten
Bei der Geländelinie werden zwei verschiedene Typen unterschieden: |
| <ul style="list-style-type: none"> • Harte Bruchkanten | bei Kunstbauten, Böschungen usw.
(Höhenkurven werden gebrochen) |
| <ul style="list-style-type: none"> • weiche Strukturlinien | abgerundete Geländebrüche
(Höhenkurven werden bei Geländebrüchen ausgerundet) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Höhenkurve | Schnitt Horizontalebene mit Gel.modell |
| <ul style="list-style-type: none"> • Geländeprofil | Schnitt Vertikalebene mit Gel.modell |

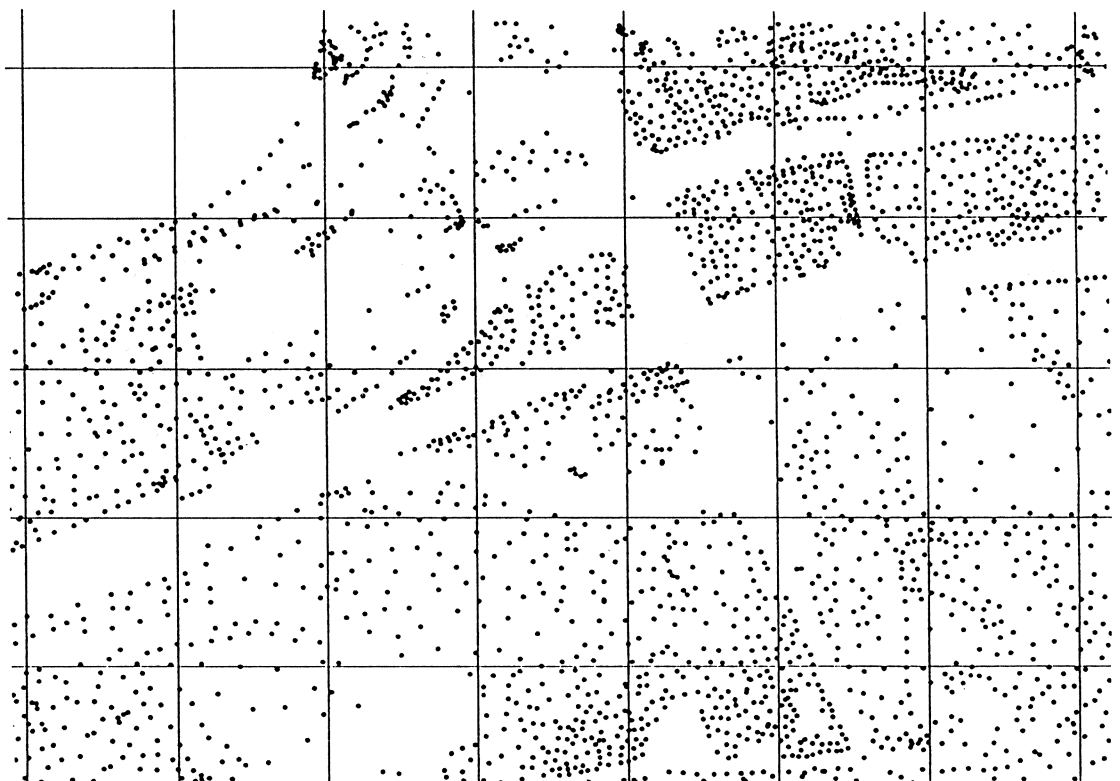
1.3 Die einzelnen Elemente und Resultate

Die Nachbildung (Modellierung) der Geländeoberfläche kann mit verschiedenen Elementen (Punkte und Flächen) erfolgen. Damit lassen sich Oberflächen sowohl in der Ebene als auch räumlich darstellen. Die Aussagekraft und Interpretierbarkeit sind dabei sehr unterschiedlich. Diese Möglichkeiten sind nachfolgend dargestellt.

1.3.1 Einzelpunkte

Die Einzelpunkte bilden die Grundlage der Dreiecksvermaschung. Die Dichte ist vom Geländecharakter abhängig. Im unruhigen und welligen Gelände sind viel Punkte notwendig. Im ebenem Gelände müssen nur die Umrisspunkte der Ebene vorhanden sein. Im folgenden Bild sind ebene und unruhige Zonen klar ersichtlich.

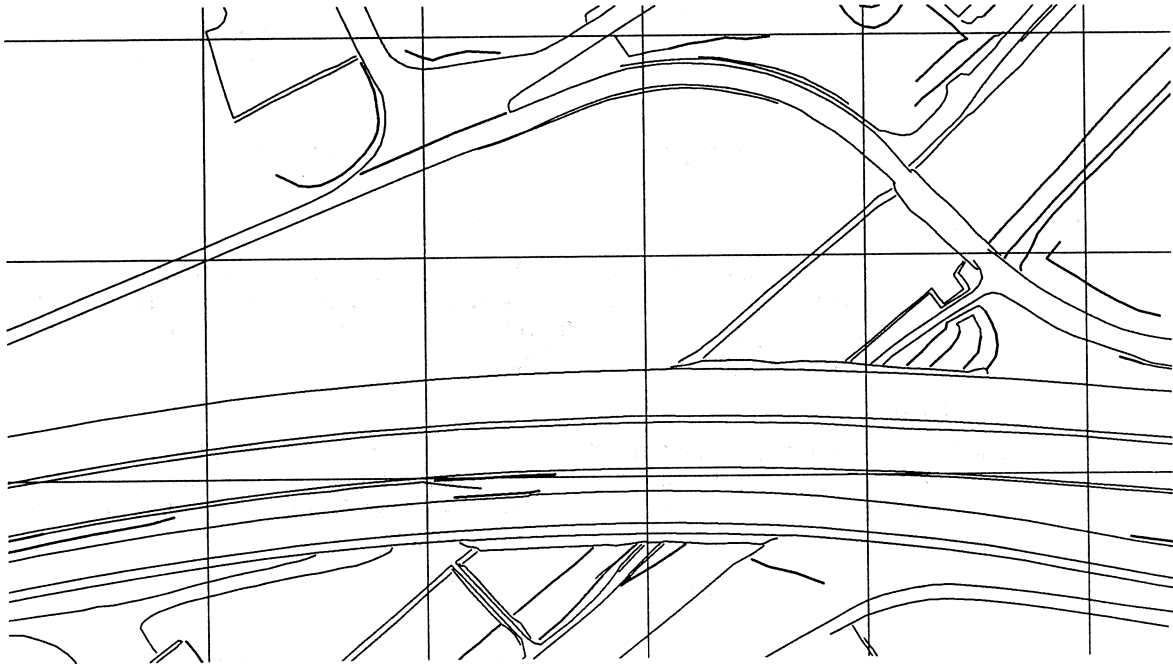
Figur 9: Einzelpunkte sind für die Formgebung verantwortlich



1.3.2 Harte Bruchkanten und weiche Strukturlinien

Harte Bruchkanten und weiche Strukturlinien begrenzen die Ebenen. Sie sind das eigentliche Gerippe des Geländemodells.

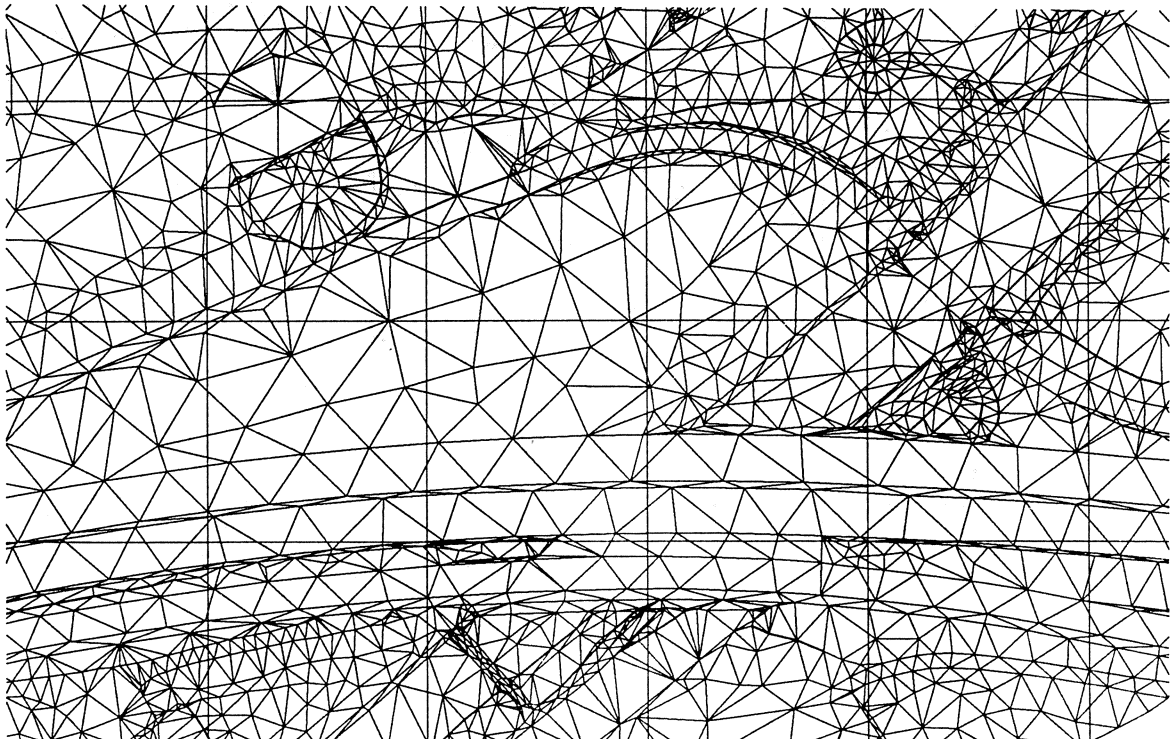
Figur 10: Bruchkanten und Strukturlinien



1.3.3 Dreiecksflächen

Die feingegliederten Dreiecksflächen bilden die Geländeoberfläche modellhaft nach.

Figur 11: Dreiecksflächen



1.3.4 Höhenkurven :

Höhenkurven sind gerundete Schnittlinien zwischen dem verdichteten Dreiecksgerüst und den Niveauebenen.

Figur 12: Höhenkurven

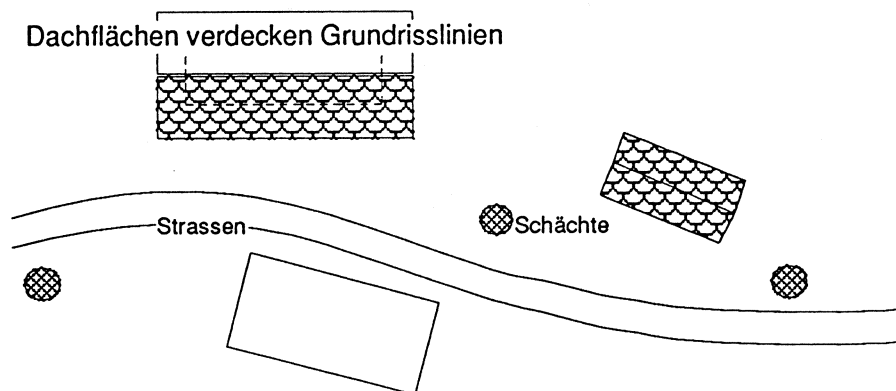


1.4 Automatisierte Datenerfassung aufgrund von Stereobildpaaren

Der Weg zum Geländemodell führt über den Feldoperator oder den Photogrammeter. Beide müssen das digitale Geländemodell entweder direkt im Feld oder am Autographen modellieren. Die Automation dieses Schrittes ist beschränkt. Rasterdaten lassen sich zwar automatisch erzeugen, der Einbezug der Situation bietet hingegen grosse Probleme, da die einzelnen Linienpunkte in einem Stereobildpaar nicht genau identifizierbar sind und deshalb nicht räumlich gerechnet werden können (Mustererkennung). Dies gilt nicht für genau identifizierbare Umrisslinien (z.B. Kunstbauten). Diese können schon heute automatisch erfasst werden. Damit entfallen wesentliche manuelle Arbeiten, speziell in überbauten Gebieten.

Gut identifizierbare Strukturlinien

Dachflächen verdecken Grundrisslinien



1.5 Die Datenerfassung als Fundament der Geländemodellierung

Dieser Arbeitsgang ist wahrscheinlich der entscheidendste und verlangt ein sehr systematisches Vorgehen und eine genaue Buchführung über bearbeitete Gebietsteile. Der Operateur kann den Fortschritt seiner Arbeit am Display überprüfen, zusätzliche Punkte aufnehmen und fehlerhafte Punkte löschen.

Die Messtischaufnahmen früherer Jahre lassen sich mit den modernen Aufnahmemethoden von heute vergleichen. Das Gelände wurde im Feld modelliert und an Ort und Stelle verifiziert. Die Differenzen zu heute sind:

Messtischaufnahme

Messtisch
Messtischblatt
Aufnahme von Situation und Höhenkurven

Resultat: Ebener Plan

Verifikation während der Feldaufnahme

Aufnahme eines Geländemodells

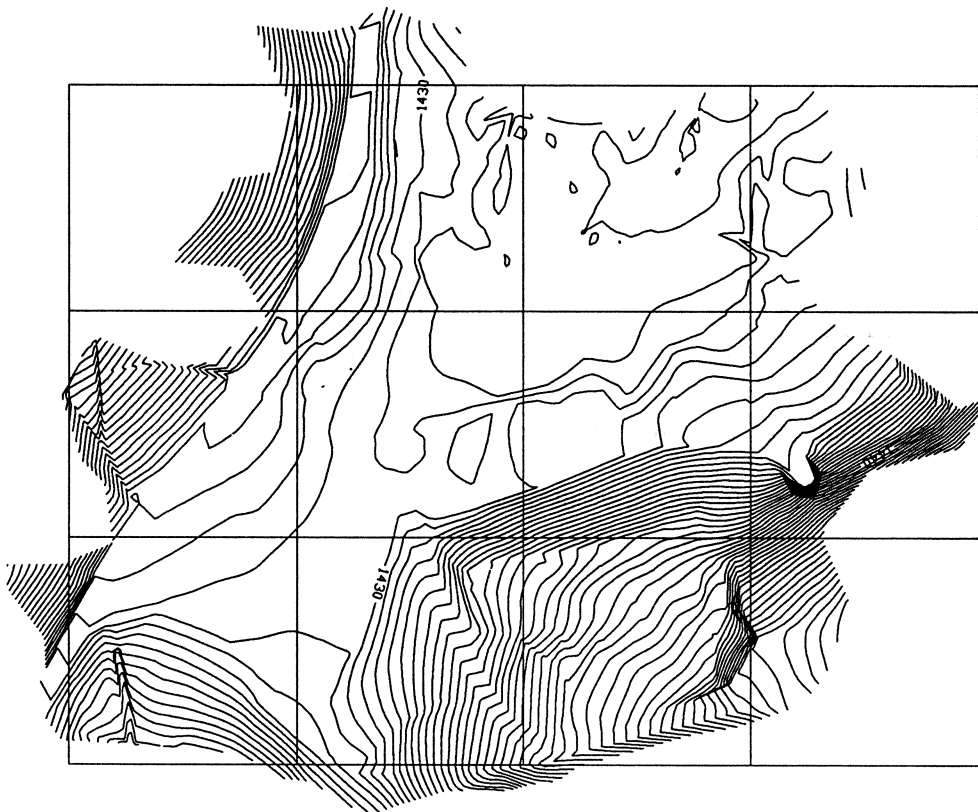
Registriertachymeter
Notebook-Computer
Aufnahme von Situation und Strukturen

Resultat: Räumliches Modell

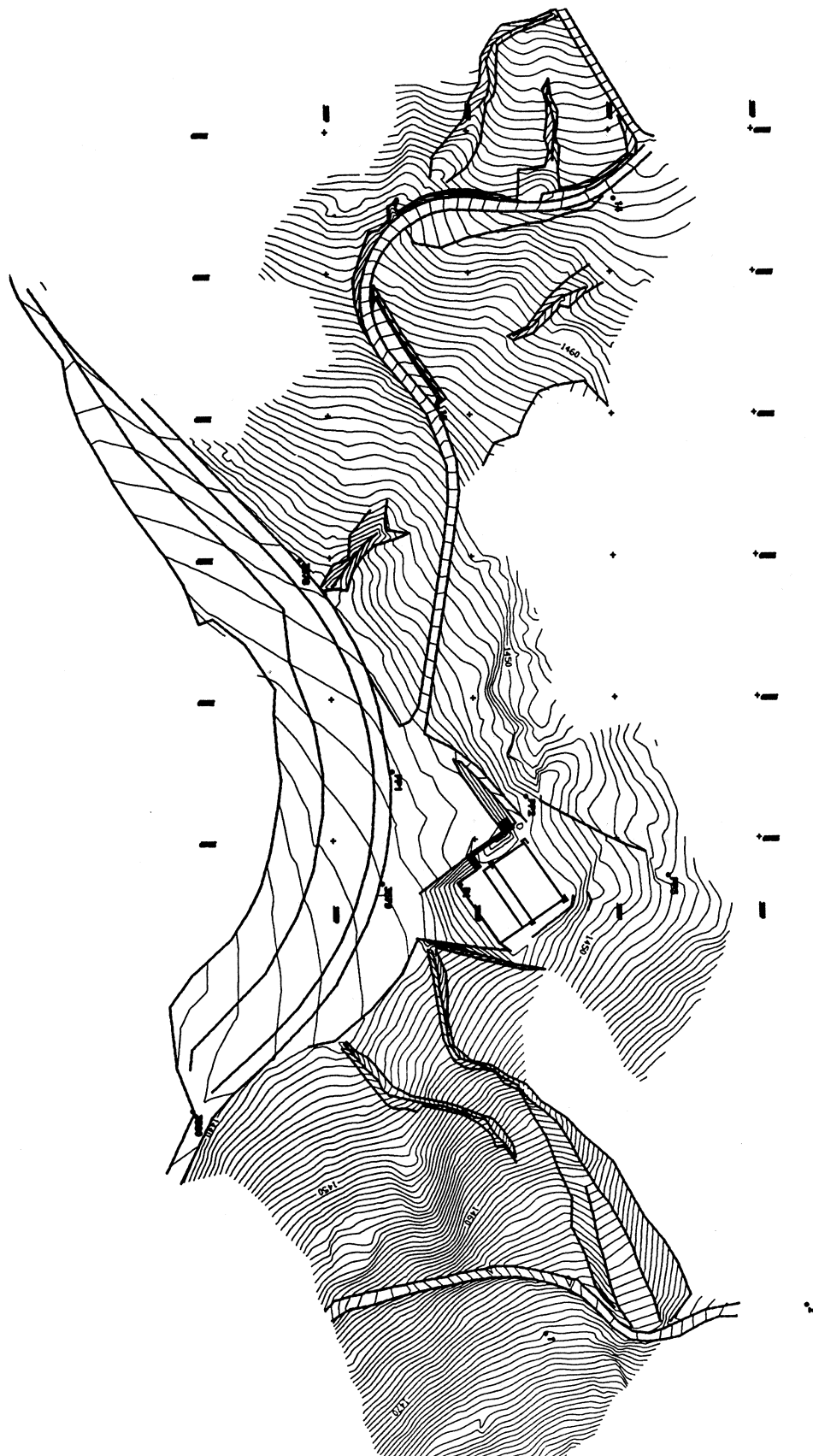
Verifikation im Feld mit gerechnetem Modell

1.6 Die Geländemodelle der vorliegenden Untersuchungen

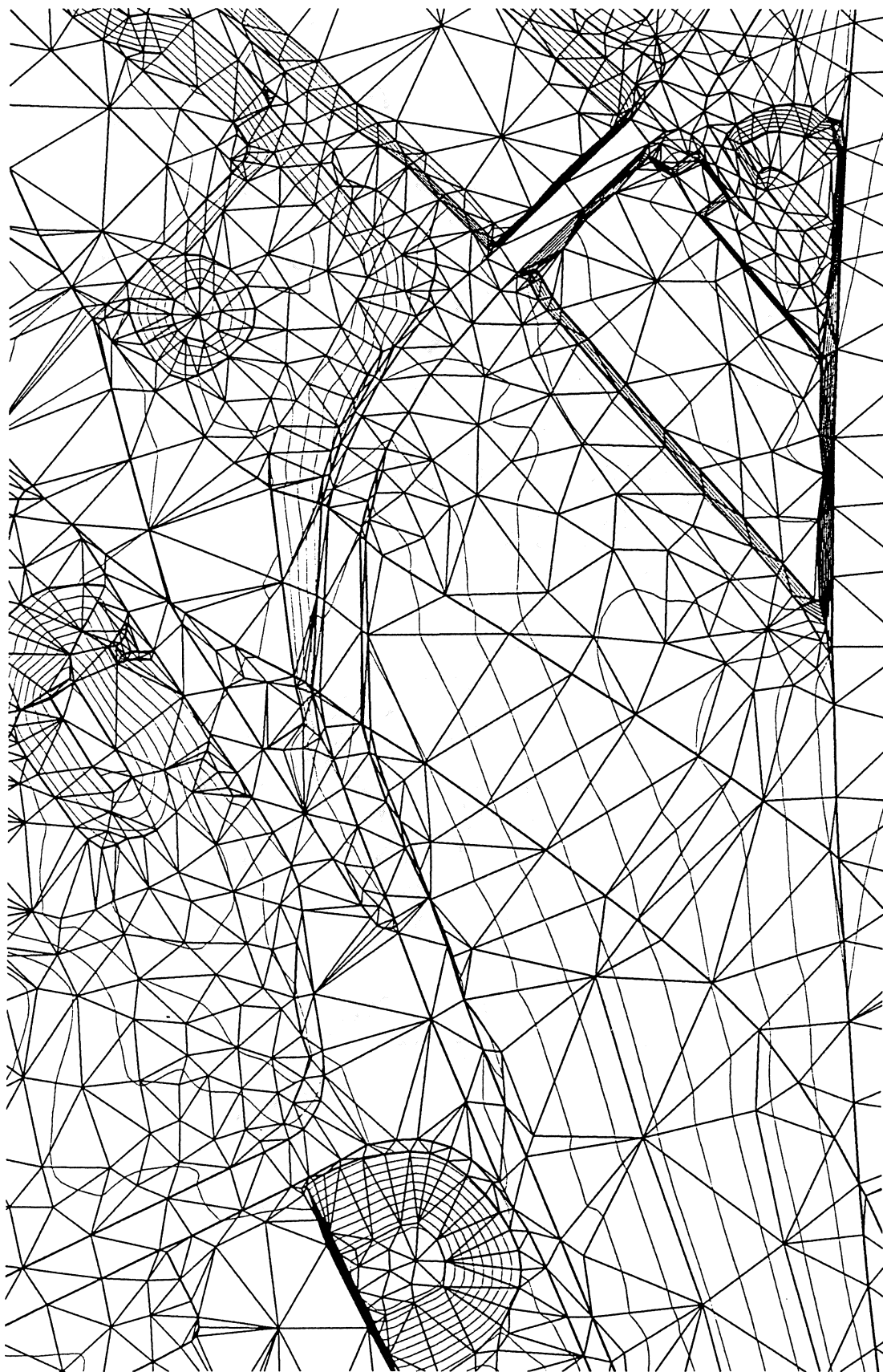
Figur 13: Modell Glaubenberg Passhöhe: Höhenkurven



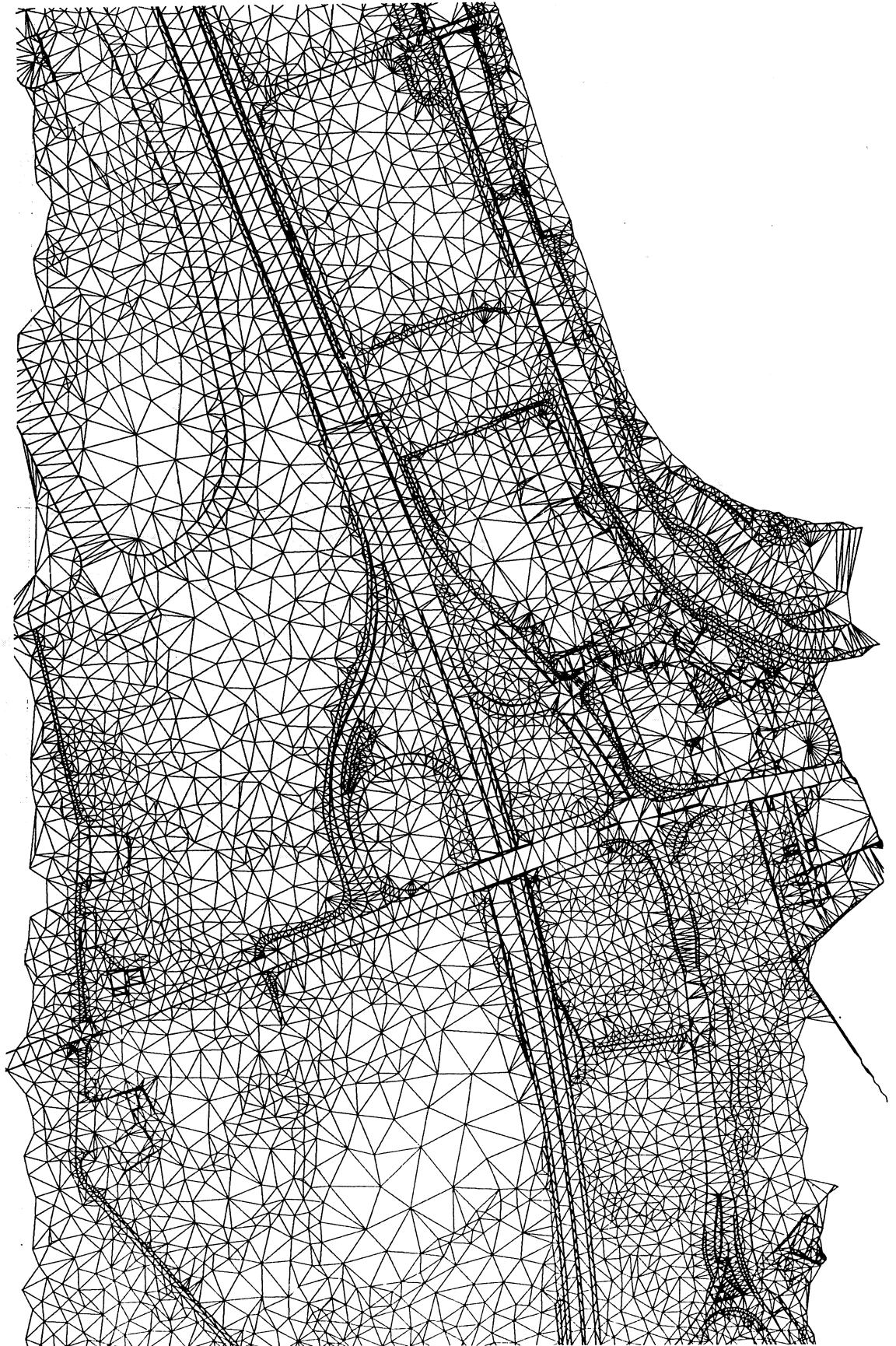
Figur 14: Modell Glaubenberg Langis: Bruchkanten+ Höhenkurven



Figur 15: Fadenbrücke: Bruchkanten, Strukturlinien, Vermaschung und Höhenkurven



Figur 16: Modell Kreuzstrasse: Dreiecksflächen



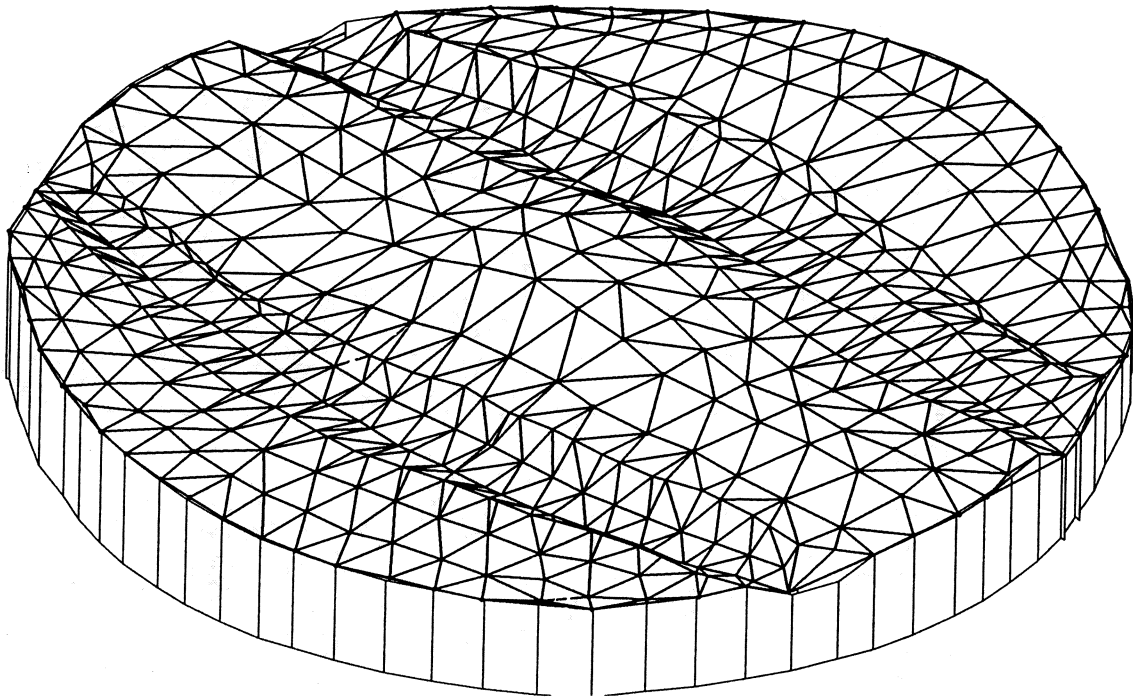
An simulierten Geländemodellen sind im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verschiedene Versuche durchgeführt worden:

Beispiele:

Fehlerfortpflanzung
Delaunay-Kriterium
Digitalisierung von Höhenkurven
Massenberechnungen
Vergleiche zwischen Dreiecks-
und Rastermethode

Einflussbereich eines Fehlers
Art der Vermaschung
Technische Anweisungen
Fehlertheoretische Ueberlegungen
Vor- und Nachteile der Methoden

Figur 17: Beispiel einer Geländesimulation

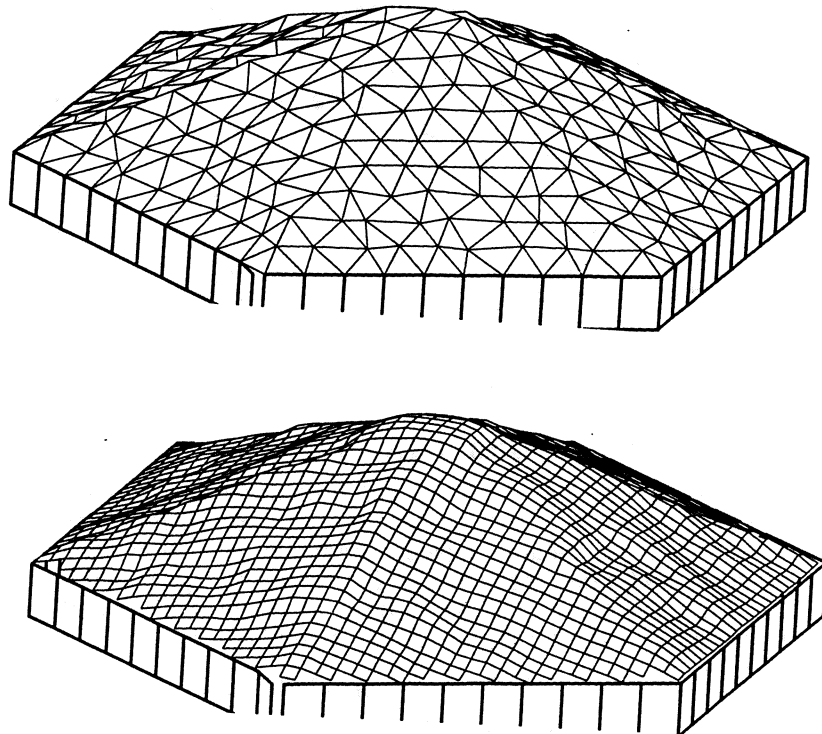


2 Theorie über die Geländemodelle

Das allgemeine Modell besteht entweder aus einem Quadratraster oder aus den zu einem Dreiecksnetz vermaschten Punkten der Primärdaten mit Zusatzinformationen z.B. Punktverbindungen, Flächenkoeffizienten. Es hat sich im Laufe der Untersuchungen gezeigt, dass weniger Berechnungs- und Interpolationsformeln eine Rolle spielen, als viel mehr die Zuverlässigkeit der Daten sowie die richtige Anwendung der Programme. Die Theorie wird daher nur soweit behandelt, als diese zum Verständnis der späteren Anwendung notwendig ist.

2.1 Dreiecksvermaschung versus Rasterinterpolation

Figur 1: Vermaschungsmethoden



Die Dreiecksvermaschung ist die natürliche, fast logische Methode und damit für den Laien leicht nachvollziehbar. Die Anpassungsfähigkeit ist optimal. Alle Stützpunkte, einschliesslich der Kanten und Strukturlinien werden in die Vermaschung integriert, wobei Kanten- und Strukturlinien als Dreiecksseiten verwendet werden. Aus den Dreiecken werden die Höheninformationen für alle weiteren Anwendungen abgeleitet. Grossmassstäbliche Anwendungen basieren auf der Dreiecksmethode.

Die Rastermethode mag aus der Sicht der Verarbeitung einfacher sein. Die Datenerfassung könnte durch automatische Profilregistrierung automatisiert werden. Zusätzliche Rasterdaten (z.B. gerastertes Bildmaterial) lassen sich einfacher integrieren. Der wesentlichste Nachteil dieser Datenstruktur liegt in der Tatsache, dass sich "spitze" Geländeformen kaum darstellen lassen. Dieser Nachteil kann mit einer selektiven Verdichtung (z.B. Berücksichtigung von Geländebrüchen) reduziert werden.

Bei der Datenerfassung spricht vieles für die Dreiecksvermaschung. Es gibt keine rasterorientierte Geländeaufnahme mit konventionellen Geräten (elektronische Tachymeter). Auch für den Photogrammeter ist das Nachziehen von Geländelinien logischer. Das Digitalisieren von Höhenkurven ist nicht rasterorientiert. Es scheint, dass die Grundlagen der DTM ganz eindeutig über den Weg der Dreiecksvermaschung führt. Dies ist keine Absage an die Rastermethode. Da der Informationsgehalt der Dreiecksstruktur vollständig ist, - im Gegensatz zur Rasterstruktur -, lassen sich die Rasterdaten jederzeit rechnerisch bestimmen.

2.2 Erfassung der topographischen Form

Die Primärdaten sind die wichtigsten Grundlagen eines digitalen Geländemodells. Je mehr geeignete Punkte erfasst werden, desto genauer passt sich das digitale Geländemodell der realen Oberfläche an. Da Geländemodelle Produkte aus Daten und Programmen darstellen, muss auch die Funktionsweise der Programme bekannt sein, wobei die folgenden Fragen geklärt werden müssen:

- Wie entsteht die analytische Definition der Geländeoberfläche?
- Wie gross ist der lokale Wirkungskreis der Interpolation?
- Wie wird interpoliert ?
- Werden Gewichte eingeführt?
- Wie wirken sich Anomalien (Geländelinien) auf die Umgebung aus?
- Stimmt die automatische Geländemodellierung (Vermaschung) oder ergeben sich daraus schwerwiegende Fehler?

Die Kunst der Geländemodellierung besteht einerseits in der Erfassung der absolut notwendigen Geländedaten sowie in der Verdichtung dieser Geländedaten mit zusätzlichen Punkten, welche dem Gelände die exakte Form verpassen können.

2.3 Die Rechtecksvermaschung (GRID)

Die Rechtecksvermaschung hat im Bau- und Verkehrsingenieurwesen bei DTM's eine grosse Verbreitung und ist vor allem im topographisch für Strassenbauten üblichen, eher flachen bis leicht coupierten Gelände beliebt. Durch die Gleichmässigkeit der Modellierung mit Rastern entsteht ein für das menschliche Empfinden "ruhiges" Bild der Geländeoberfläche, was Vorteile hat. Dafür treten tatsächliche Geländespitzen und Geländelinien weniger deutlich in Erscheinung, was zu örtlichen Modellungenauigkeiten führt.

2.3.1 Rastervermaschung verschiedener Programme

Die Rastervermaschung und somit die Höhenbestimmung der Rasterpunkte erfolgt in den DTM-Programmen unterschiedlich. Oft führen erst verschiedene Zwischenberechnungen zum Resultat.

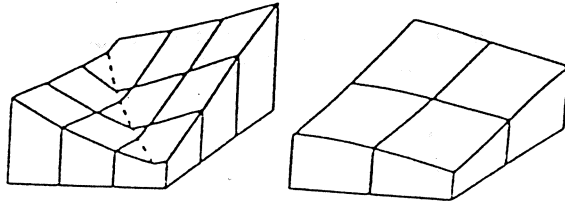
2.3.2 Prinzip der Rastervermaschung

Während in den Anfängen der digitalen Geländemodelle meistens aus digitalisierten Höhenkurven die Höhen der Rasterpunkte mit einfachen Näherungsformeln gerechnet wurden, wird heute stufenweise vorgegangen.

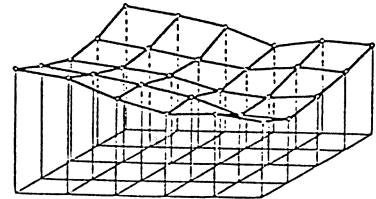
Zuerst werden aus den einzelnen Höhenpunkten die Höhen der Rasterpunkte bestimmt (verschiedene Verfahren). Dann werden je nach der Charakteristik der Geländeoberfläche bilineare oder bikubische Einzelrasterflächen gebildet.

Ist die Geländeoberfläche coupiert, können mit bilinearen Flächen Geländelinien berücksichtigt werden. Im Bereich der wenig coupierten Oberfläche ohne Geländelinien werden als Normalfall bikubische Rasterflächen zu Grunde gelegt.

Figur 2: Bilineares und kubisches finites Element
Quelle: Ebner und Reiss (1984, s.178)



Figur 3: Geländemodellelementflächen

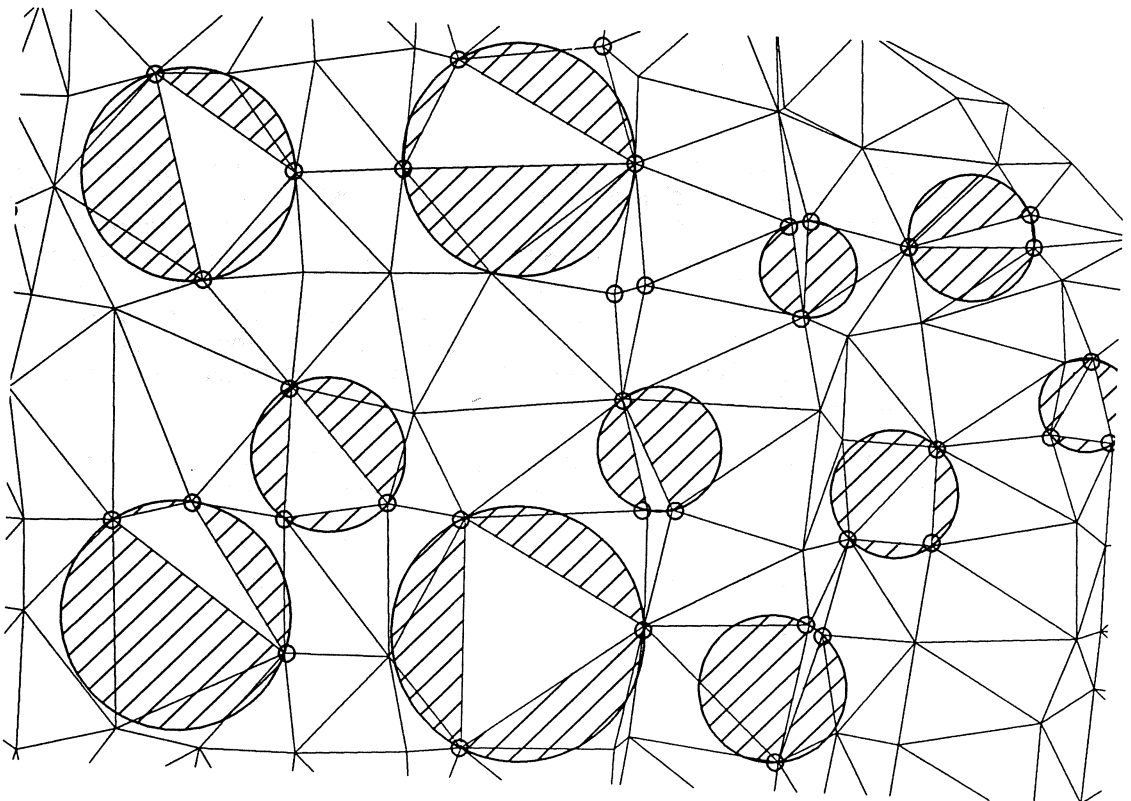


Bei der Zusammensetzung der einzelnen Rasterflächen zur Modelloberfläche werden die Methoden der kleinsten gewichteten Quadrate der Unterschiede der Rasterpunkte benützt sowie die dem betreffenden Rasterpunkt benachbarten Höhen der nächstgelegenen Rasterpunkte mitberücksichtigt.

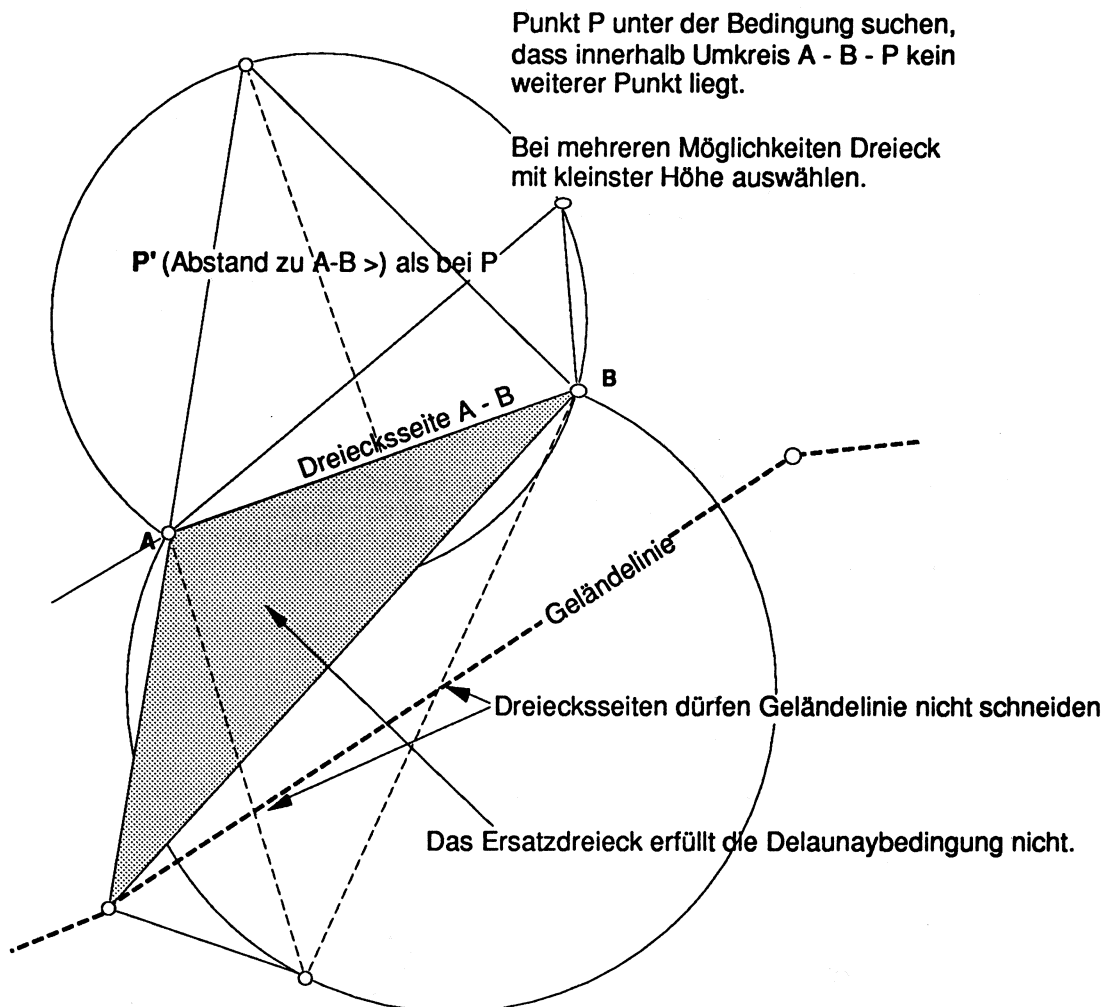
2.4 Die Dreiecksvermaschung

2.4.1 Prinzip der Dreiecksvermaschung:

Figur 4: Delaunay-Kreise



Figur 5: Dreiecksbedingungen für korrekte Vermaschung



Ein Dreieck wird nach dem Prinzip von Delaunay dann aufgebaut, wenn der Kreis, der die drei Dreieckspunkte einschliesst, keine weiteren Punkte mehr beinhaltet. Ein Teil der Programme arbeitet streng nach Delaunay, bei anderen Programme kann die Vermaschung beeinflusst werden. Diese Möglichkeit (Vermaschung nach Delaunay mit Bedingungen) bringt grosse Vorteile gegenüber der reinen Methode, indem Unstetigkeitslinien (Geländelinien) definiert werden können. **Ohne diese Erweiterung sind Modellprogramme unbrauchbar**, es sei denn, dass über künstliche Bedingungen die automatische Vermaschung nach Delaunay derart beeinflusst wird, dass sie die Dreiecksseiten an vorbestimmten Orten legen muss.

In den Anfängen wurde die Dreiecksvermaschung von Hand ausgeführt. Heute ist sie mehrheitlich automatisch, sie muss hingegen, wie oben erwähnt, beeinflussbar sein.

Die automatische Vermaschung grosser Netze ist sehr rechenintensiv. Früher war dies ein Grund zur Bevorzugung der Rasternetze. Heute trifft dies nicht mehr zu. Einerseits vergrössern sich Rechen- und Speicherkapazitäten andauernd, andererseits sind Mechanismen vorhanden, welche aus einem grossen Datenhaufen nur die absolut notwendigsten aussortieren. Im Kapitel Teilmodelle wird gezeigt, wie Daten reduziert werden können, ohne dabei

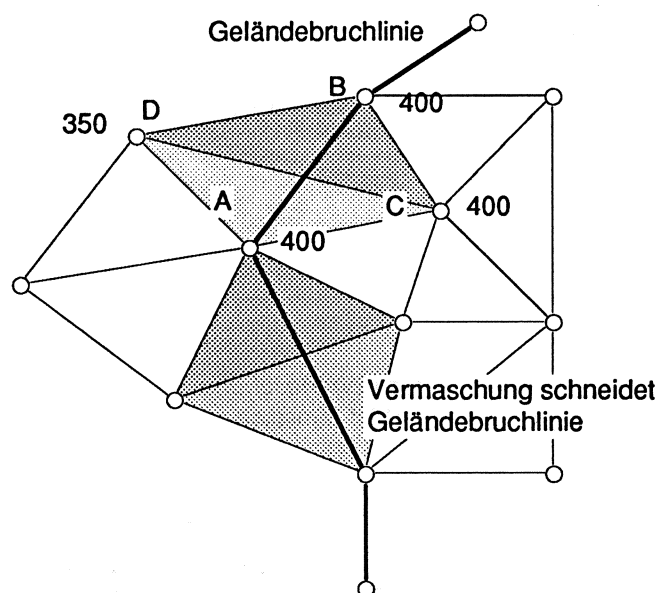
den Charakter des Geländemodells zu zerstören. Die notwendige Voraussetzung dazu besteht in identischen Verschnittzonen vor und nach der Datenreduktion.

Es gibt ganz praktische Gründe, die Datenberge nie zu gross werden zu lassen. Grosse Datenmengen bringen grosse Bearbeitungsprobleme. Die Verifikation und die Verarbeitung grosser Datenfiles werden zunehmend schwieriger.

2.4.2 Dreiecksvermaschung verschiedener Programme

Es sind verschiedene Geländemodelle mit den hier eingesetzten Programmen unter gleichen Bedingungen getestet worden. Von den 4 geprüften DTM-Programmen liefern alle beinahe identische Vermaschungsmuster in Gebieten ohne definierte Geländelinien (Vermaschung nach Delaunay). In Gebieten mit Geländelinien können Fehler auftreten, da die DTM-Programme ohne Definitionsmöglichkeit für Linien keinen Vermaschungszwang ausüben. Das bedeutet, dass Geländelinien von Dreiecksseiten geschnitten werden können.

Figur 6: Fehlerhafte Vermaschung



Das Beispiel verdeutlicht die fehlerhafte Vermaschung. Der Grund liegt entweder bei einer fehlenden oder falschen Liniendefinition oder bei strikter Vermaschung nach Delaunay.

Im obigen Beispiel unterteilt die Geländelinie A - B das Gelände in zwei Dreiecke:

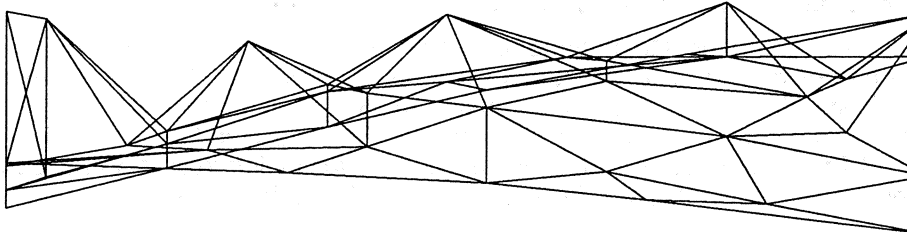
- | | |
|--------------------|---|
| Dreieck: A - B - C | : ebene Fläche mit der Meereshöhe 400 m) |
| Dreieck: A - B - D | : schiefe Ebene mit horizontaler Geländelinie von A nach B) |

Die zweite Vermaschungsmöglichkeit liefert ein falsches Gelände. Der Grat von A nach B wird ersetzt durch ein Tal von D nach C mit den Höhen 350 m bei D und 400 m bei C. Das resultierende Geländemodell wird falsch. Wie später gezeigt wird, kann dieser Fehler durch geschickte Punktverdichtung auf den Bruchlinienzügen praktisch eliminiert werden.

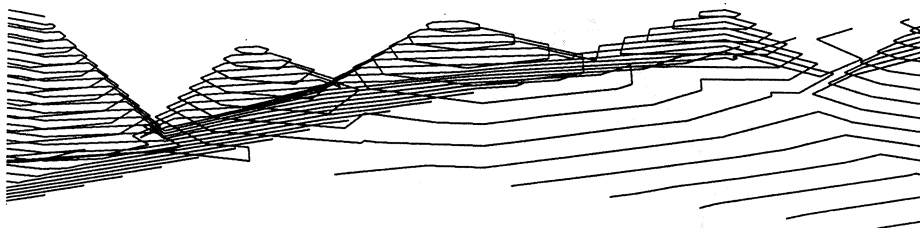
Das folgende Beispiel zeigt, wie heikel der Umgang mit Geländemodellen ist. Eine einzige falsche Vermaschung bewirkt einen groben, möglicherweise unerkannten Fehler.

Figur 7: Istgelände mit fehlerhafter Vermnaschung

Die Bergspitzen sollten eigentlich durch einen Grat verbunden werden.

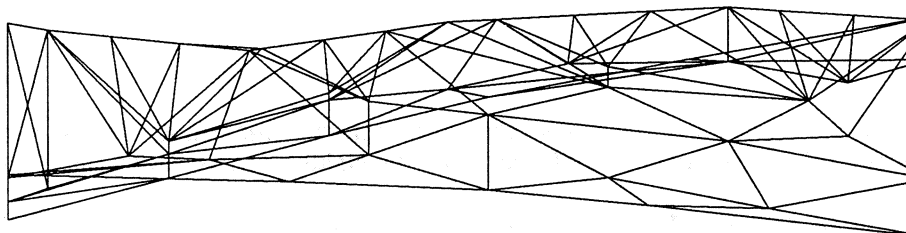


Figur 8: Höhenkurven zeigen Bergspitzen anstatt durchgehenden Grat.

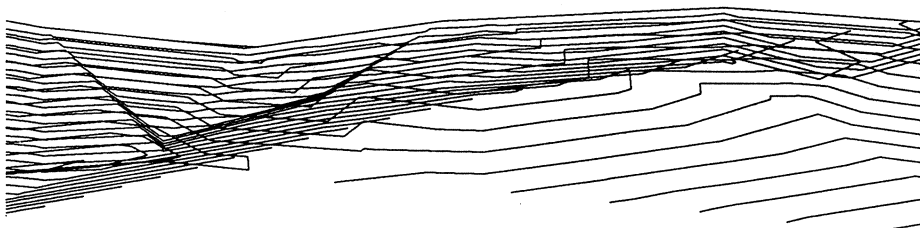


Figur 9: Sollgelände mit künstlich verdichteter Vermnaschung

Die Verbindung zwischen den Bergspitzen (Grat) ist künstlich.



Figur 10: Das Höhenkurvenbild zeigt die naturgetreue Abbildung des Grates



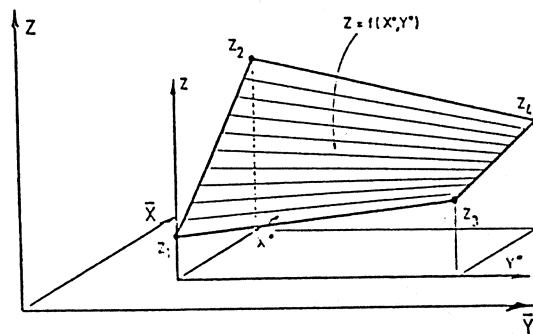
2.5 Höheninterpolation für beliebige Punkte (y,x)

2.5.1 Höheninterpolation beliebiger Punkte im Rasterverfahren

Auf der Geländeoberfläche interessieren die Höhen von beliebigen Lagekoordinaten. Bei Strassenprojekten sind das zum Beispiel die Geländepunkte einer Strassenaxe, Parallelen zur Strassenaxe (Ränder) und Querprofile. Es sind also die Höhen von durch Lagekoordinaten gegebenen Punkte zu bestimmen.

Die Interpolation erfolgt über die Berechnung mit bilinearen bzw. bikubischen Flächen, welche durch ihre Polynome definiert sind.

Figur 11: Interpolation von lagemässig bekannten Punkten



z_i sind die Geländehöhen in den Rasterpunkten

Die Interpolation basiert auf dem Dreiecksnetz, in welchem die Stützpunkte die Knoten bilden. Vor der Berechnung werden die zur Bestimmung der Oberfläche notwendigen Punkte zusammengestellt. Die Literatur zeigt verschiedenste Interpolationsmöglichkeiten auf. Sie stammen jedoch meistens aus geografischen Anwendungen.

(Oberflächeninterpolation aus Höhenkurven, Martin Brändli, Universität Zürich, 1991)

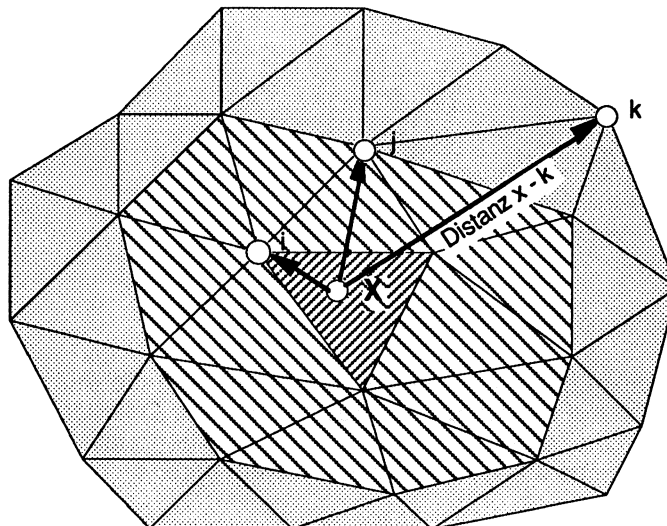
2.5.2 Höheninterpolation beliebiger Punkte bei der Dreiecksvermaschung

In Bereichen ausserhalb harter Geländelinien ist der Einflussbereich ungestört. Er umfasst das Dreieck und das umschliessende Dreiecksband. Der Einfluss ist von der Distanz abhängig (Figur 12).

Figur 12: Auswahl der Punkte zur Bestimmung der Oberfläche

Einflussbereich für die Höheninterpolation eines Punktes (x)

-  Maximaler Einflussbereich (innerhalb Dreieck)
-  stark reduzierter Einflussbereich (nähere Umgebung)
-  praktisch ohne Einfluss (weitere Umgebung)



Der Einflussbereich ist von der Distanz abhängig.

Bereichen von Geländelinien wird Einflussbereich einer Interpolation stark eingeschränkt (siehe Figur 13).

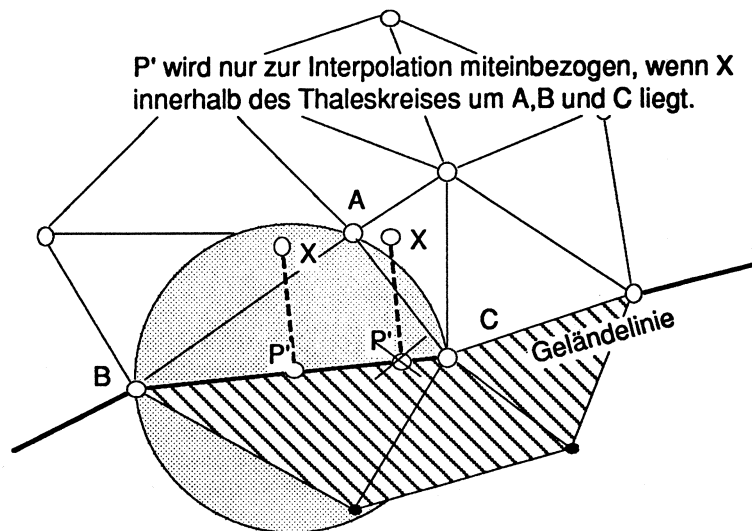
Geometrische Definition einer Geländelinie:

Geländelinien sind definiert durch eine Punktfolge, die einen räumlichen Polygonzug darstellt. Die Punktfolge auf der Geländelinie muss so dicht sein, dass zwischen zwei Punkten eine Gerade angenommen werden kann. Bei Neigungswechseln oder Krümmungen im Grundriss einer Geländelinie sind die Punkte entsprechend enger zu wählen. Diese Bedingung ermöglicht auch die spätere künstliche Verdichtung, sodass die gewünschte Delaunaytriangulation erzwungen werden kann.

Liegen in der Nachbarschaft eines zu interpolierenden Punktes Geländelinien, so wird jeder zur Interpolation mögliche Punkt überprüft, ob er vor oder hinter einer Geländelinie liegt, und gegebenenfalls eliminiert.

Liegt ein zu interpolierender Punkt X innerhalb des Thaleskreises über einem durch zwei Punkte gegebenen Geländelinienstück, so wird der Lotfußpunkt P' auf die Geländelinie lagemässig berechnet und dessen Höhe Zi zwischen den beiden Geländelinienpunkte linear interpoliert. Der Punkt P' trägt dann ebenso wie die gemessenen Punkte zur Bestimmung der ausgleichenden Fläche bei. Es wird dadurch ein exaktes Anschmiegen der Geländefläche an die Geländelinie erreicht.

Figur 13: Reduktion des Einflussbereichs im Bereich von Geländelinien



Aus dem vorhin definierten Punkthaufen kann nun die Oberfläche nach bestimmten Interpolationsverfahren gerechnet werden.

Beispiele: Die Punkthöhe Zi ist im allgemeinen eine Funktion der Koordinaten (y,x).

Horizontalebene (Fläche 0. Grades)

$$Z_i = a_1$$

Zur Bestimmung von a_1 muss die Höhe eines Punktes bekannt sein.

Schrägebene (Fläche 1. Grades)

$$Z_i = (a_1 + a_2 y_i + a_3 x_i) \cdot p_i$$

Zur Bestimmung von a_1, a_2 und a_3 sind 3 bekannte Punkte notwendig.

Hyperbolische Fläche (Fläche 2. Grades)

$$Z_i = (a_1 + a_2 y_i + a_3 x_i + a_4 y_i^2 + a_5 x_i^2 + a_6 x_i y_i) \cdot p_i$$

Zur Bestimmung von a_1 - a_6 sind 6 bekannte Punkte notwendig.

Bikubische Interpolation (Fläche 3. Grades)

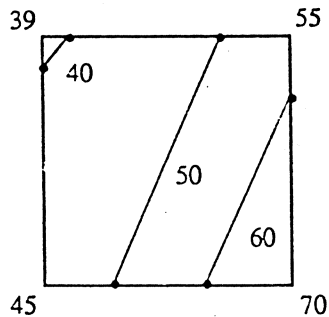
$$Z_i = (a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i + a_4 x_i^2 + a_5 x_i y_i + a_6 y_i^2 + a_7 x_i^3 + a_8 x_i^2 y_i + a_9 x_i y_i^2 + a_{10} y_i^3) \cdot p_i$$

p ist das Gewicht des Punktes i . Mit abnehmender Distanz zum gesuchten Punkt (x) wird dieses Gewicht kleiner, zum Beispiel $1 / \text{Distanz}$ oder $1 / \text{Distanz}^2$. Damit eine Fläche im Raum bestimmt werden kann, müssen bekannte Stützpunkte vorhanden sein. Die Anzahl entspricht der Anzahl der unbekannten Koeffizienten a . Bei Ueberbestimmungen wird ein Ausgleichsverfahren notwendig (kleinste Quadrate).

2.6 Interpolation der Höhenkurven

2.6.1 Interpolation der Höhenkurven bei Rasternetzen

Figur 14: Interpolation von Höhenkurven



Aus den bekannten Höhen aller Rasterpunkte lassen sich die Höhenkurven in den Rasterzellen durch einfache, lineare Interpolation entlang der Rastereinheit ermitteln.

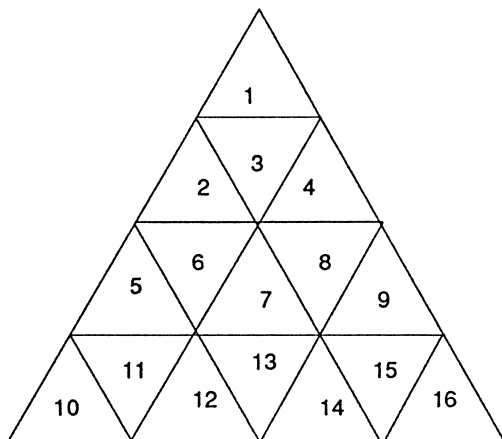
Nebst diesem einfachsten Fall, wo aufgrund der Höhen der Rasterpunkte eine eindeutige Lösung vorliegt, gibt es eine grosse Zahl von komplizierten Fällen mit oft mehrfachen Interpretationsmöglichkeiten. Zur Klärung solcher Fälle müssen die benachbarten Zellen mitberücksichtigt werden.

Das Zusammenfügen der Höhenkurvensegmente führt zu Polygonen die dann z.B. mit Splineverfahren geglättet werden.

2.6.2 Interpolation der Höhenkurven bei der Dreiecksvermaschung

Um die Isolinien abzuleiten, wird bei den Programmen CIP und DEMPAC jedes Dreieck in 16 Subdreiecke unterteilt. Die Höhen der neuen Punkte werden nach den beschriebenen Interpolationsformeln bestimmt. Innerhalb eines Dreiecks wird die Fläche eines Subdreiecks durch eine Ebene angenähert. Das so erhaltene Netz von Subdreiecken repräsentiert eine enge Näherung an die Oberfläche im Sinne der FINITEN ELEMENTE. Es garantiert auch den korrekten Verlauf der Isolinien innerhalb des räumlichen Hauptdreiecks. Diese Feinvermaschung findet auch bei Massenermittlungen statt.

Figur 15: Aufteilung in 16 Subdreiecke



2.7 Einführen von zusätzlichen Gewichten und Bedingungen

Mit Gewichten und Bedingungen lässt sich der Interpolationsanteil bestimmter Punkte vergrössern oder verkleinern. Dies könnte dann zur Anwendung kommen, wenn Punkte von eindeutig verschiedener Aufnahmequalität gleichzeitig verwendet werden.

Dieser Ansatz ist an und für sich zu begrüßen, hat aber den Nachteil, dass er meistens global, d.h. für alle Geländeteile gilt. Richtig müssten Gewichte diskret pro Punkt oder Linie ein

Bedingungen sind nur bei Ausgleichsverfahren (zu viele Stützpunkte) sinnvoll. Sie führen zur vermittelnden Ausgleichung mit Bedingungsgleichungen (z.B. exakte Höhen für gewisse Punkte).

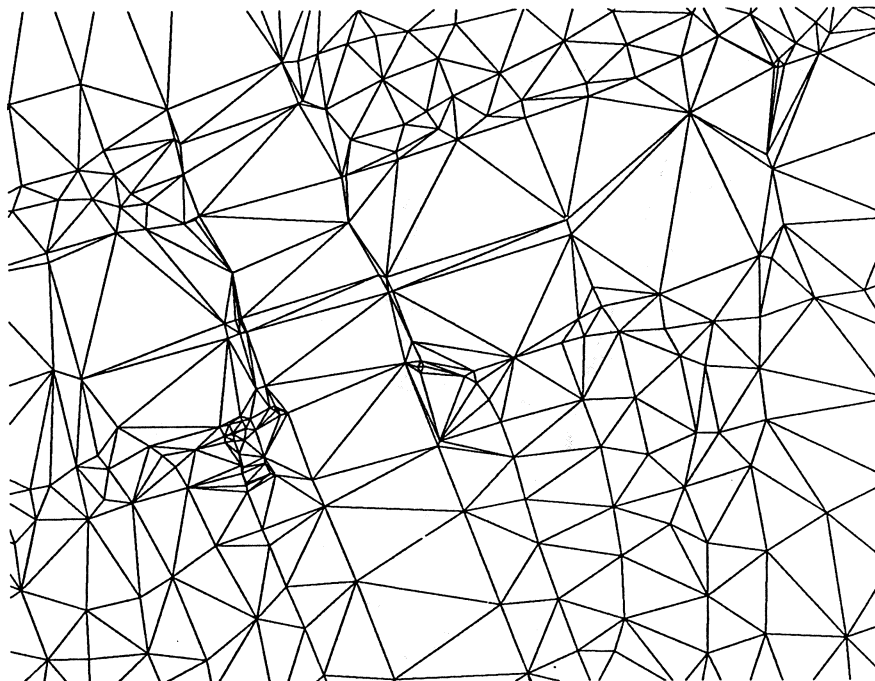
Dieser Ansatz ist an und für sich zu begrüßen, hat aber den Nachteil, dass er meistens global, d.h. für alle Geländeteile gilt. Richtig müssten Gewichte diskret pro Punkt oder Linie eingeführt werden können.

Gewichte können aber auch den Einflussbereich von Fehlern vergrössern. Dies dürfte sich eher nachteilig auf die Genauigkeit des Modells auswirken.

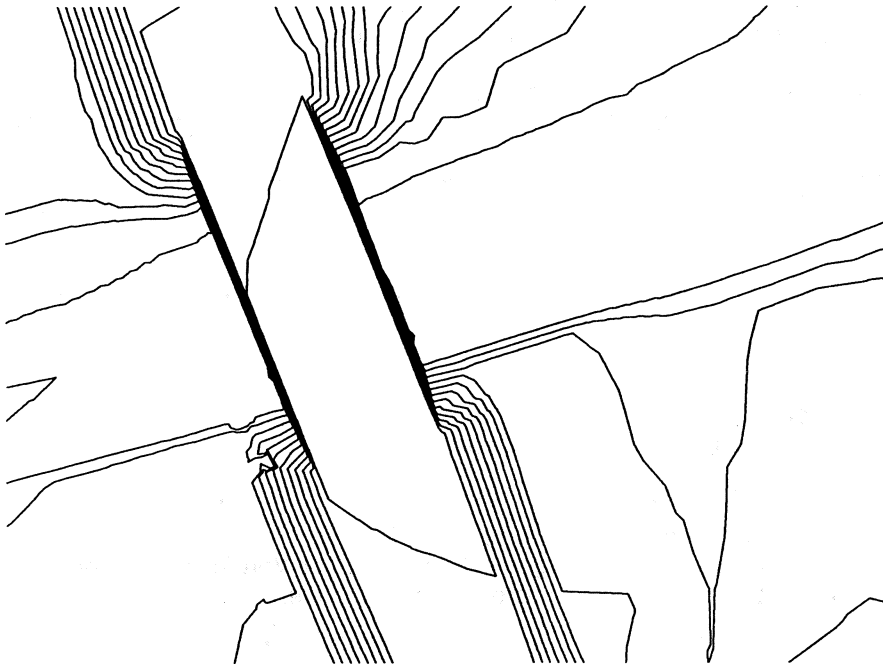
2.8 Beispiele fehlerhafter und richtiger Vermaschungen

Das folgende Beispiel zeigt den Einfluss einer falsche Vermaschung. Der Strassenrand müsste in (Figur 16) als Gerade dargestellt werden. Der Vergleich der Höhenkurvenbilder (Figuren 17-18) deutet auf einen sehr grossen Modellfehler.

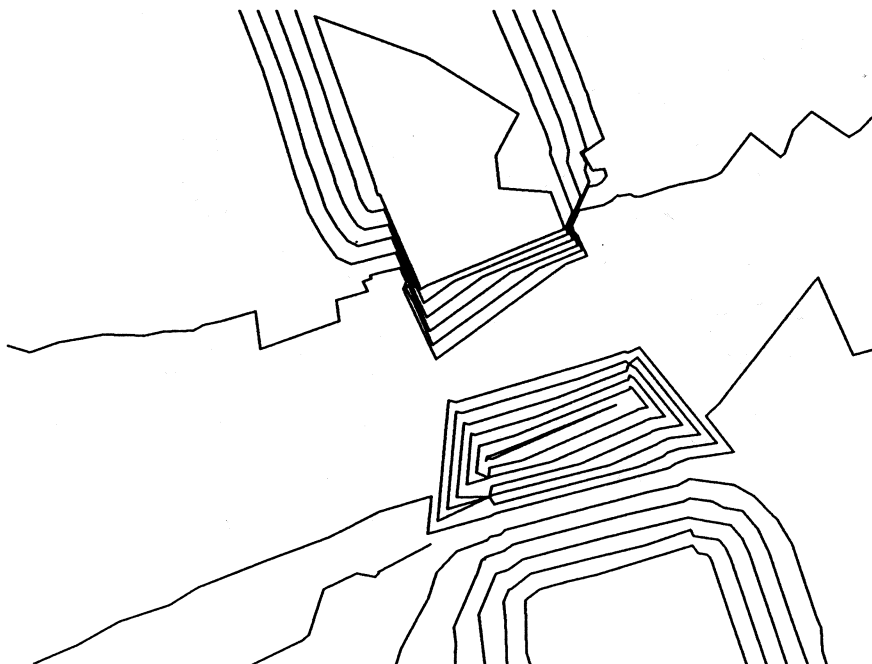
Figur 16: Falsche Vermaschung im Bereich von Geländelinien



Figur 17: Soll-Höhenkurven



Figur 18: stark verfälschtes Höhenkurvenbild

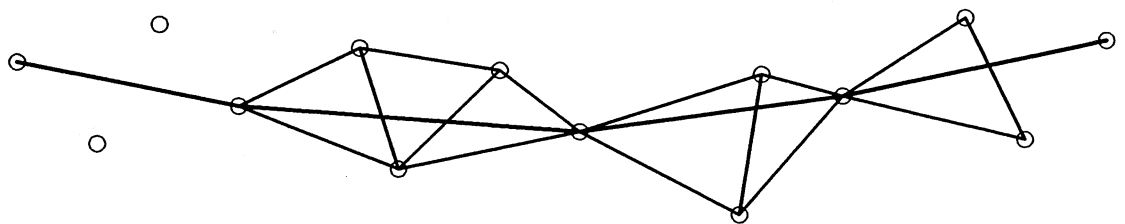


2.9 Hinweis zu Programmen ohne Definitionsmöglichkeit für Linien

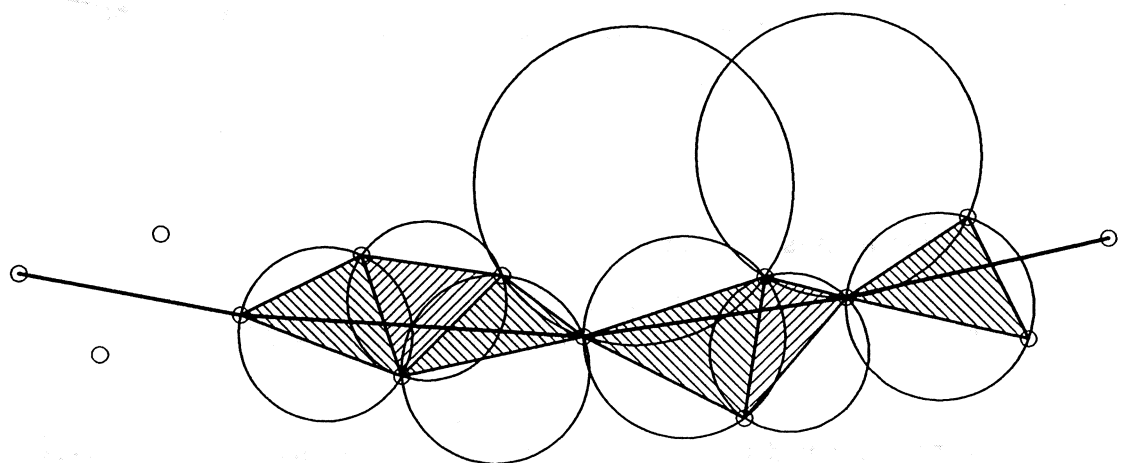
Bei Programmen, welche keine Möglichkeit der Liniendefinition aufweisen, kann die fehlerhafte Vermaschung durch folgendes Vorgehen stark reduziert werden.

Die Lösung besteht darin, dass Geländelinien mit der Originalvermaschung nach Delaunay geschnitten werden. Die Schnittpunkte werden anschliessend als Zusatzpunkte integriert und verhindern bei der nächsten Durchrechnung die fehlerhafte Vermaschung. Die Punktverdichtung ist davon abhängig, dass jedes Linienelement eine Gerade zwischen zwei Punkten darstellt. Dies darf als eine Voraussetzung bei der Geländemodellierung angenommen werden.

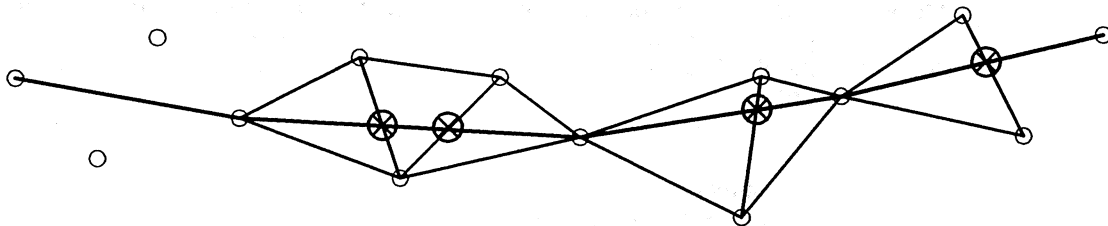
Figur 19: Vermaschung nach Delaunay
Die Dreiecksseiten schneiden die Bruchlinien.



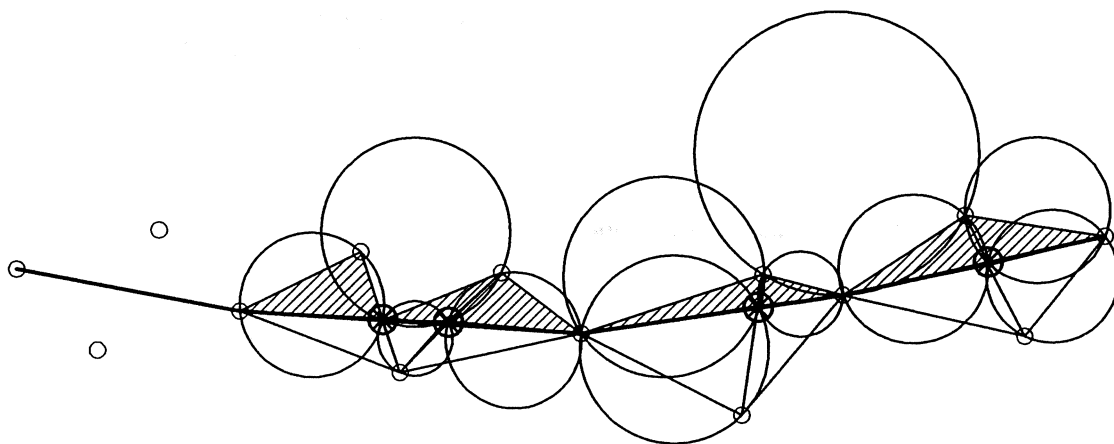
Figur 20: Kreise nach Delaunay



Figur 21: Bestimmen der Schnittpunkte von Dreiecksseiten mit dem Linienzug
Die neuen Punkte werden linear in die bestehende Verbindung eingerechnet.



Figur 22: Neue Vermaschung:
Dreiecke liegen rechts oder links des Linienzuges



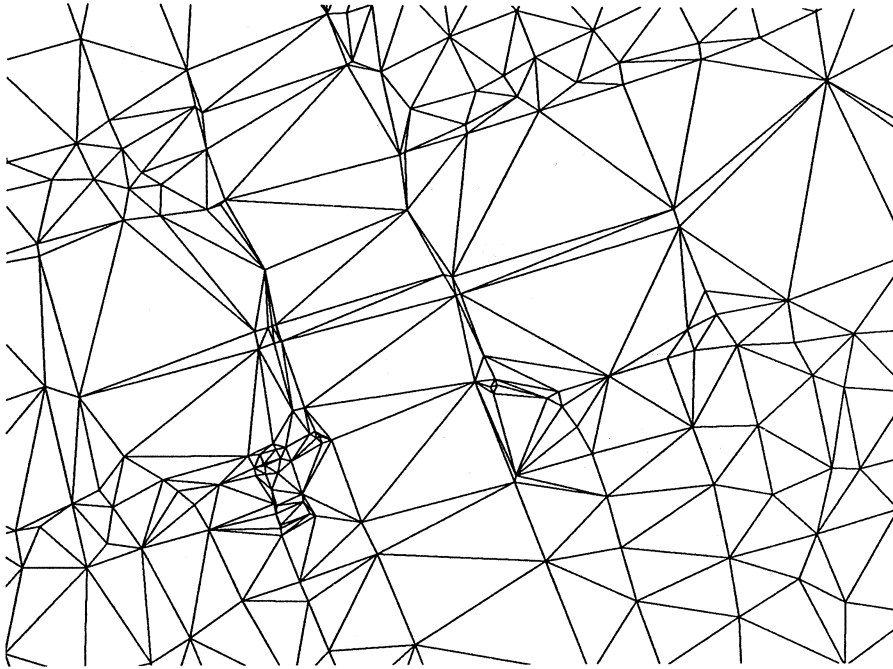
Vereinfachtes Verfahren

Einzelpunkte wie bei anderen Programmen

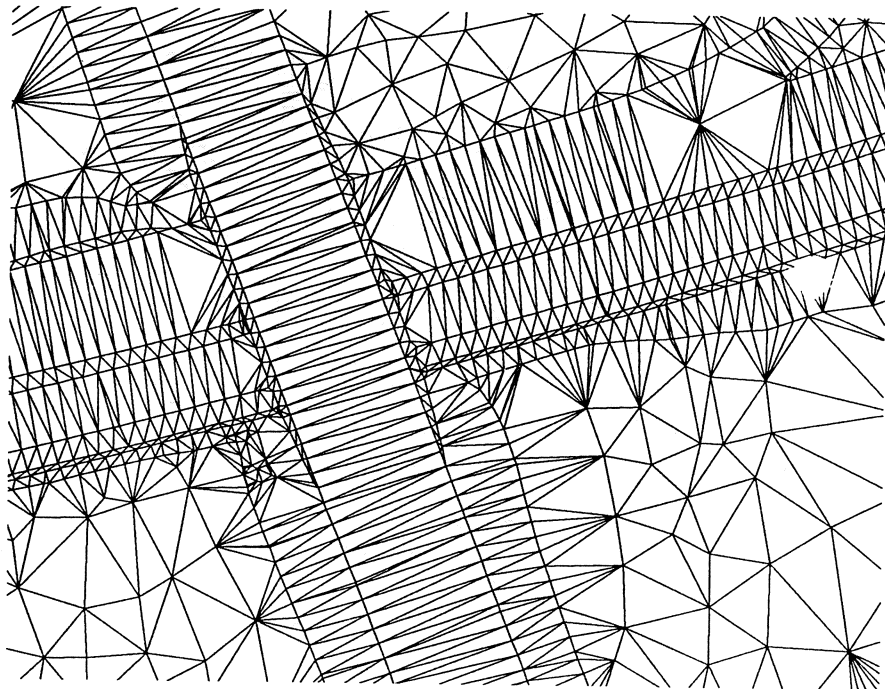
Bei Linien Punktzahl stark erhöhen (Abstand im Beispiel = 2.0 m)

Mit diesem Vorgehen lässt sich eine korrekte Vermaschung praktisch erzwingen. Da der Abstand zwischen den Linienpunkten sehr klein ist, werden diese Verbindungen im Normalfall als Dreiecksseiten eingeführt.

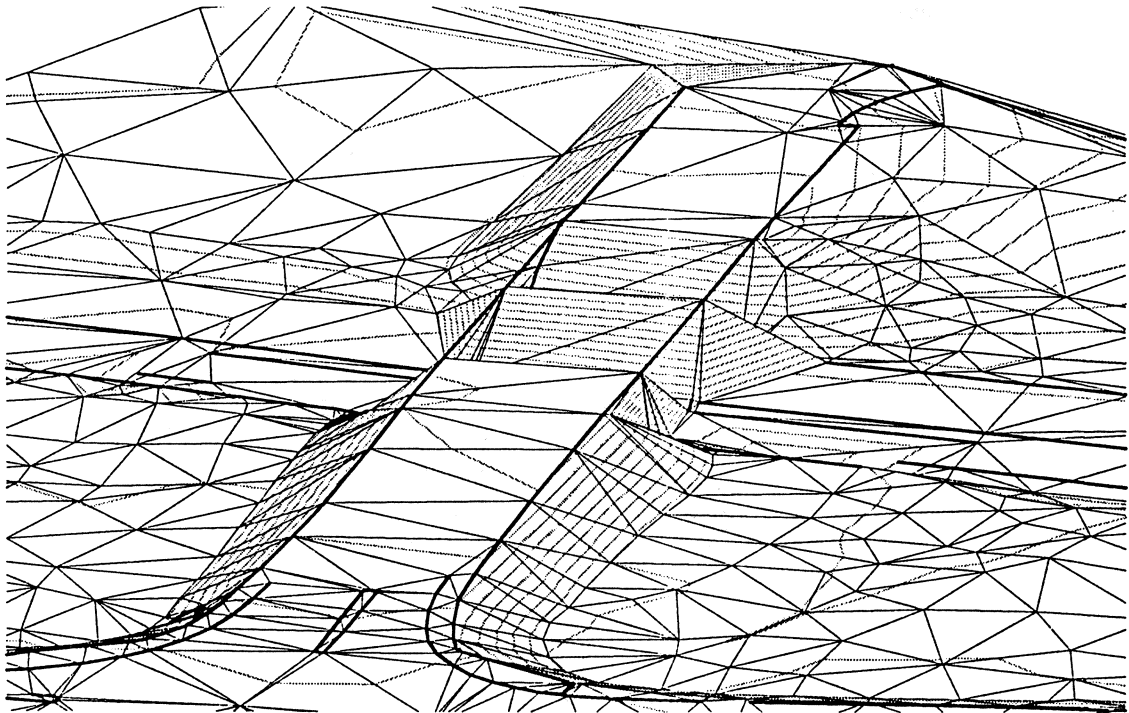
Figur 23: *Vermaschung ohne vorherige Punktverdichtung*
Strassenrand wird als geknickter Linienzug dargestellt.



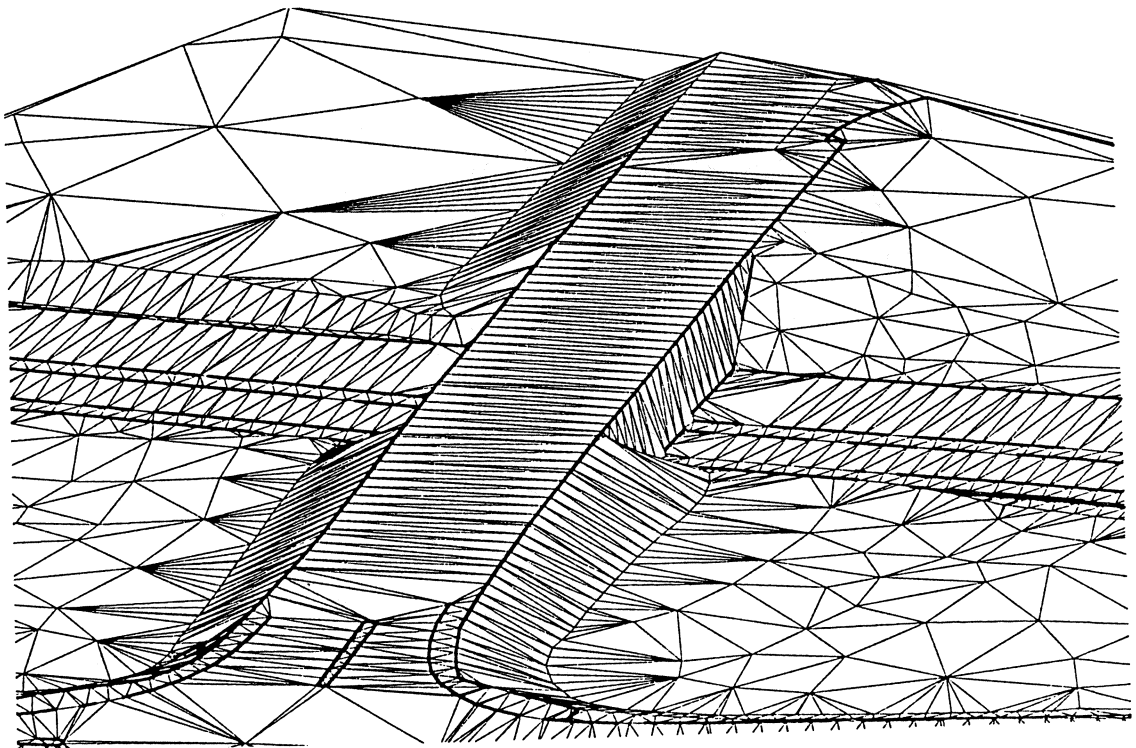
Figur 24: *Vermaschung nach Punktverdichtung*
Strassenrand erscheint als durchgezogene Gerade.



Figur 25: Perspektive Ansicht bei falscher Vermaschung

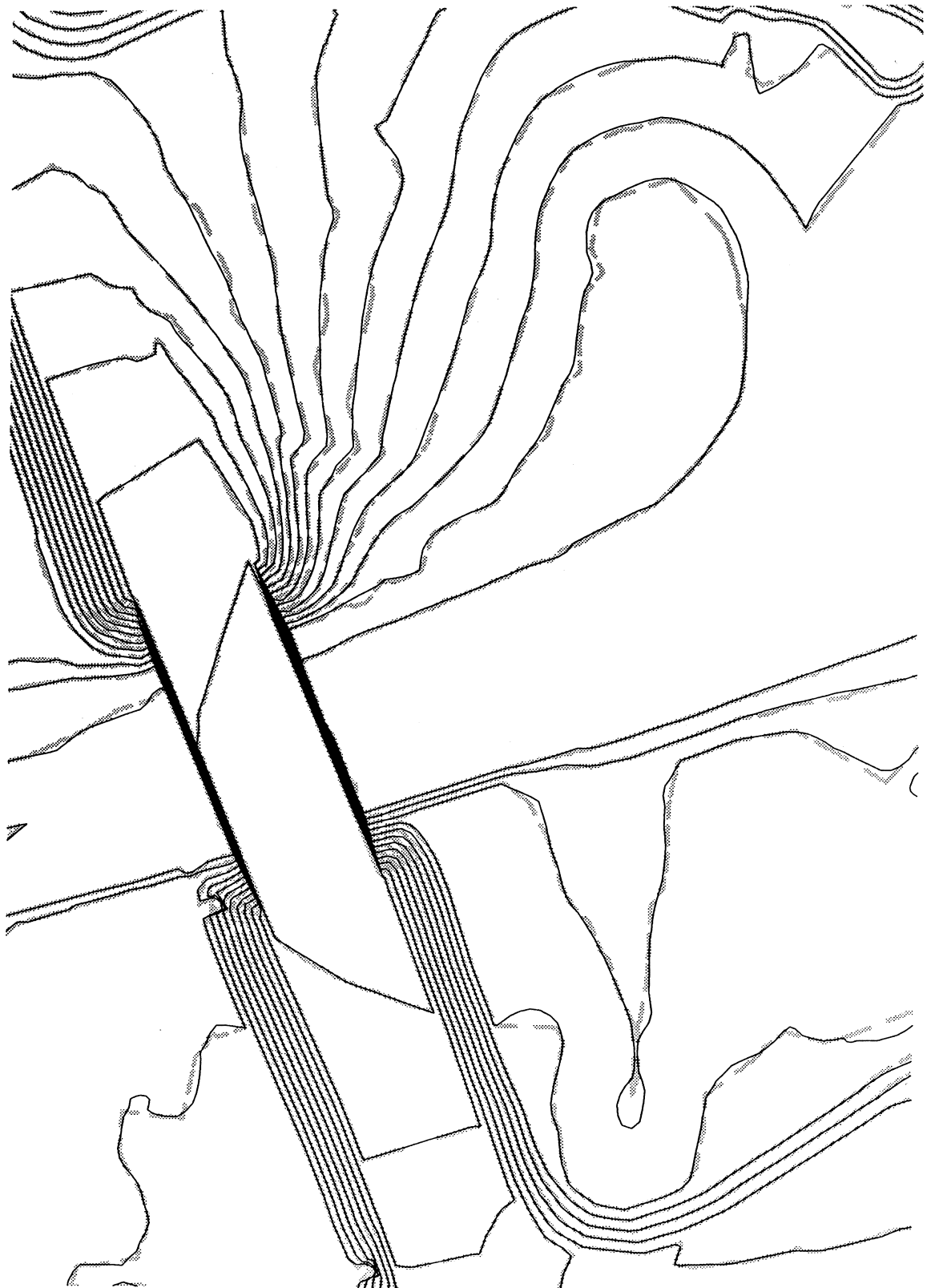


Figur 26: Perspektive Ansicht bei korrekter Vermaschung



Figur 27: Vergleich von Höhenkurven:

Dicke Linien : Modell mit Geländelinien (Programm DEMPAC)
dünne Linien: Modell ohne Geländelinien, dafür mit Punktverdichtung
(Programm Quicksurf)



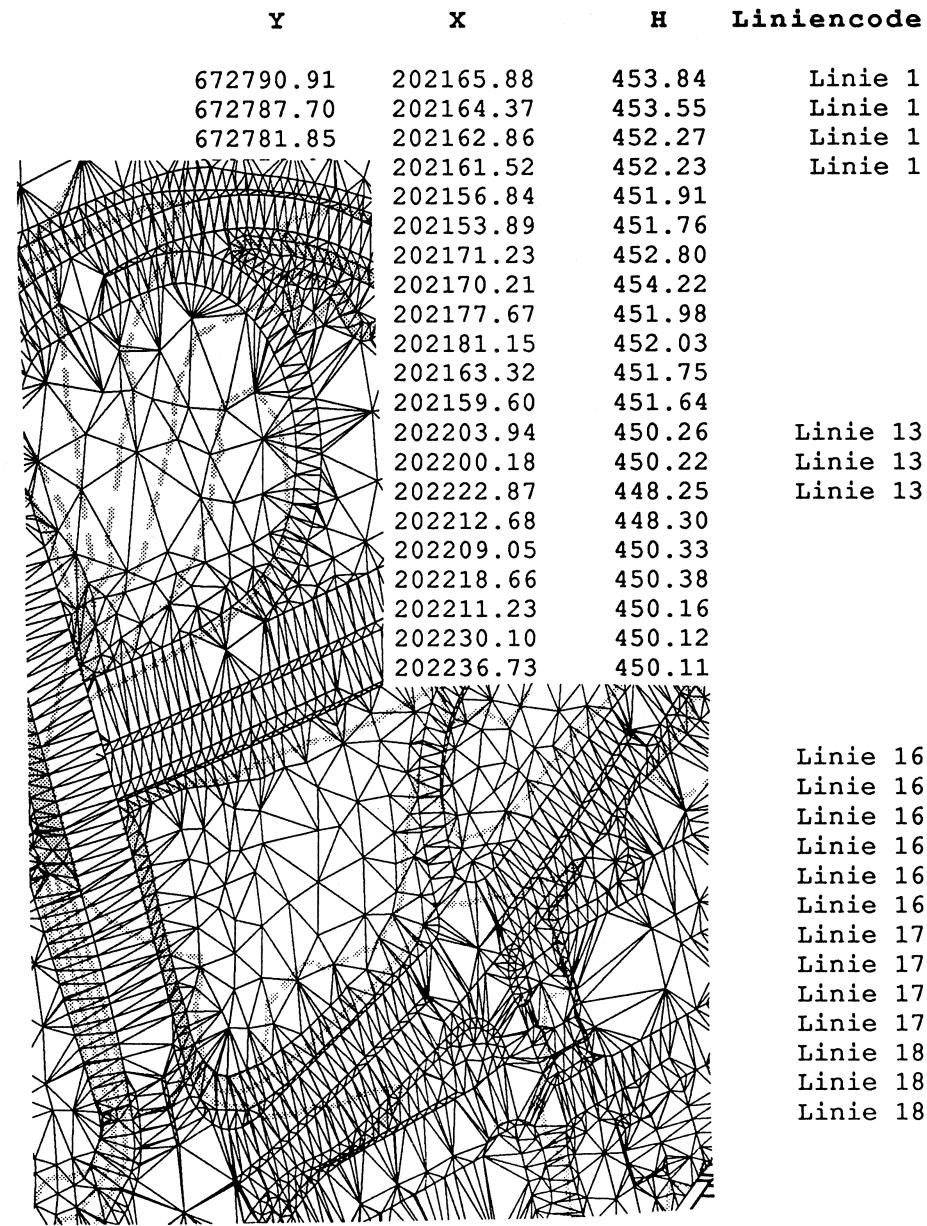
3 Bestimmung der Geländedaten

3.1 Allgemeines

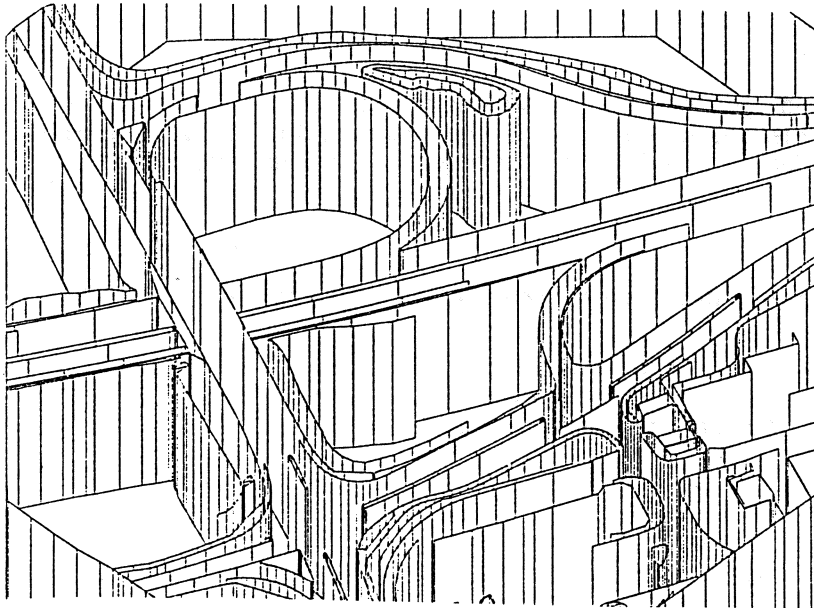
Zu den Grundlagen digitaler Terraindemodelle gehören Geländedaten. Das digitale Terrainmodell ist das Ergebnis aus Geländedaten und DTM-Software. Entscheidend sind immer die Geländedaten. Ein feinmaschiges Netz von Einzelpunkten und Linien prägt das Modell, welches aus kleinen und kleinsten Dreiecksflächen die Geländeoberfläche annähern soll.

Figur 1: Das Koordinatenverzeichnis als Grundlage des Geländemodells

Das umligende Geländemodell ist das Resultat der Auswertung der im Koordinatenverzeichnis zusammengefassten Geländedaten..



Figur 2: Strukturprofile Nationalstrassenanschluss

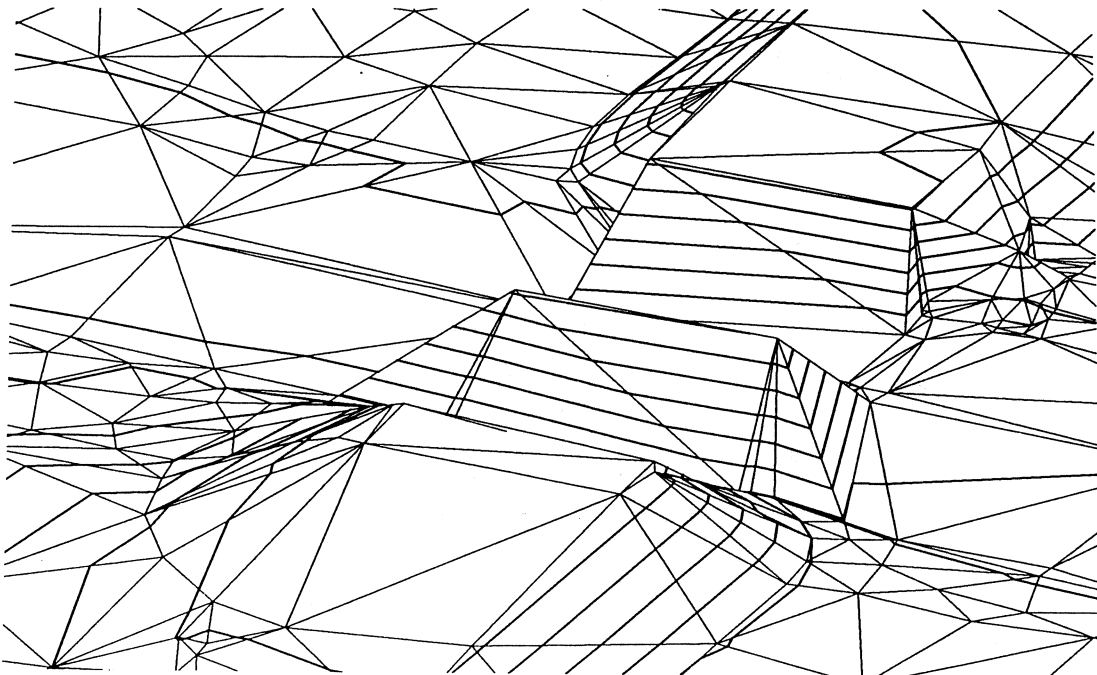


Diese Art der Darstellung eignet sich insbesondere zur besseren Visualisierung der Geländelinien und kann daher zu Kontrollzwecken verwendet werden. In Figur 2 sind die Geländelinien als räumliche Profile perspektiv dargestellt.

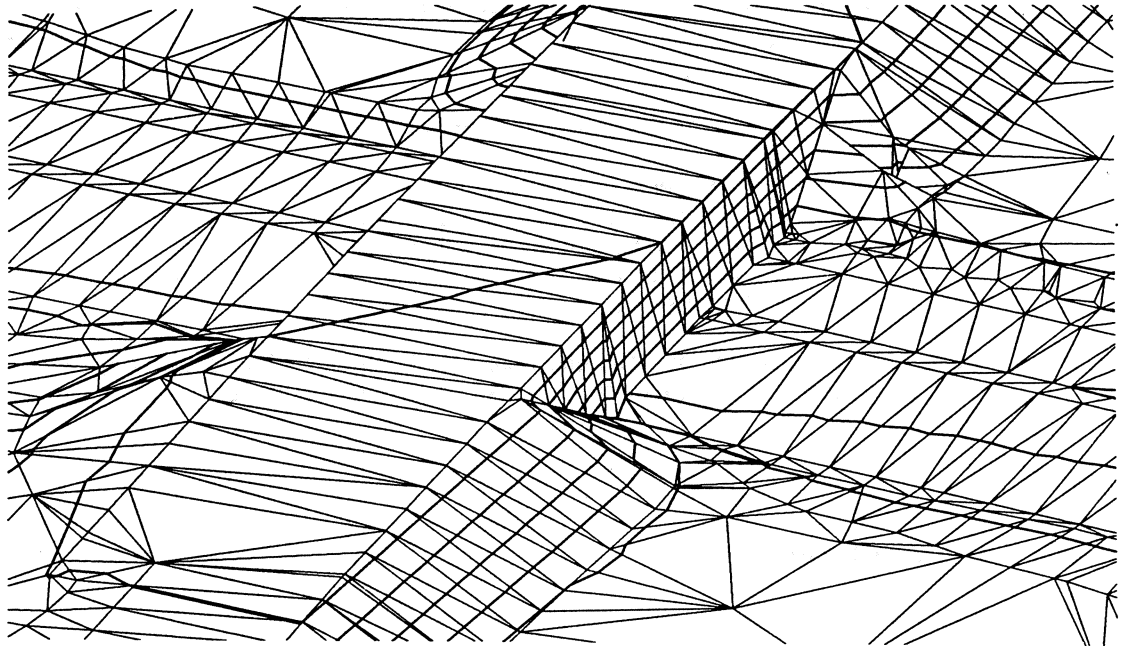
3.2 Datenbeschaffung

Der Feldoperateur misst Punkte und Linien ein, der "Computerspezialist" sorgt für die Berechnung, wobei er sich auf die fachgerechte Datenerfassung verlassen muss. Die Punktaufnahmen sowie die Definition von Linienelementen müssen fehlerlos sein. Die einfachste Lösung besteht in der geschickten Numerierung und Codierung der Punkte. Linienelemente müssen der Reihe nach eingemessen werden. **Ein einziges falsches oder unterlassenes Linienelement kann zu groben Fehlern im Modell führen.**

Figur 3: Falsche automatische Vermaschung bedingt einen Dammunterbruch



Figur 4: Bereinigte und rechnerisch ergänzte Ausgangsdaten führen zum richtigen Modell



Ein Linienelement vom Böschungsfuss der linken Strassenseite zum Bankettrand der rechten Strassenseite unterbricht eine Dammschüttung. Je grösser die Punktmenge ist, desto grösser ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich derartige Fehler einschleichen können. Da fehlerhafte Modelle alle Folgeberechnungen (Massenberechnung, Querprofilsbestimmung...) beeinflussen und verfälschen, lohnt es sich, wenn man die Zuverlässigkeit der Modelldaten überprüft und falls notwendig durch geschicktes und fachgerechtes Vorgehen verbessert. Eine Möglichkeit dazu bietet die visuelle Kontrolle von Teilmodellen. Für diesen Fall müssen zusätzlich Attribute registriert werden.

Attribute sind z.B:

- Strassenränder
- Häuser
- Böschungskanten
- spezielle Einzelpunkte
- (siehe Datenkatalog amtl. Vermessung)

Bei der Visualisierung können bestimmte Teile der Original- und Korrekturauswertung ausgeblendet werden. Das Resultat der Veränderung kann z.B. am Bildschirm verifiziert werden (alter und neuer Zustand in verschiedenen Farben).

3.3 Datenverwaltung

Wird der Originaldatensatz vor der Modellberechnung bereinigt, so wird jede spätere Berechnung über den Grunddatensatz durchgeführt. Existiert ein Originaldatensatz als Grundlage einer programminternen Datenverwaltung, so dürfen Korrekturen nur über die interne Datenverwaltung vorgenommen werden. Der Originaldatensatz wird bei der ersten internen Korrektur wertlos und darf nicht mehr verwendet werden. Aus programmintern verwalteten Daten müssen jederzeit aktuelle Datensätze in lesbarer Form exportiert werden können (Datenaustausch in Form von ASCII-Files). Solche Kopien sollten aus Sicherheitsgründen erstellt werden. Es ist nämlich ohne weiteres möglich, dass aufgrund von Fehlmanipulationen die interne Datenspeicherung durcheinandergerät und unbrauchbar wird.

3.4 Anwender

Die Anwendung von DTM-Programmen ist Fachleuten vorbehalten. Das trifft auch zu für den Feldoperator, der schliesslich im Feld modelliert und dafür besorgt sein muss, dass zwischen Feld und Berechnung enge Koinzidenz geschaffen wird.

Vor dem Einsatz von DTM-Programmen sind deshalb die folgenden Fragen zu klären:

- Wie arbeitet die Software?
- Was ist zu beachten bei der Datenerhebung?
- Wie kann das Gelände modelliert werden?
- Wie können die Ausgangsdaten ergänzt werden, damit die Software richtig arbeitet?

Diese Forschungsarbeit soll mithelfen die Fachkompetenz im Bereich digitaler Geländemodelle zu verbessern und bestehende Unsicherheiten abzubauen.

3.5 Herkunft der Daten

3.5.1 Photogrammetrische Bestimmung von Geländedaten

Das Gelände wird photogrammetrisch ausgewertet. Resultate dieser Auswertung sind nicht etwa Höhenkurvenpläne, sondern ein Datenträger aus Einzelpunkten und Linien. Höhenkurven können gerechnet und dem Situationsplan überlagert werden.

Es liegt auf der Hand, dass für grössere Gelände sehr viel Punkte und Linien notwendig sind. Die folgenden kleineren Beispiele zeigen die Dimensionen.

Modell Fadenbrücke zwischen Stans und Buochs (siehe Figur)

Grösse Modell : ca 0.42 km²

Anzahl Einzelpunkte: 2386

Anzahl Bruchkantenpunkte: 4000

Anzahl Weiche Konturlinienpunkte: 1501

Total 7887

ca. 188 Punkte / ha

Modell Kreuzstrasse zwischen Stans und Buochs (siehe Figur)

Grösse Modell : 0.52 km²

Anzahl Einzelpunkte: 3293

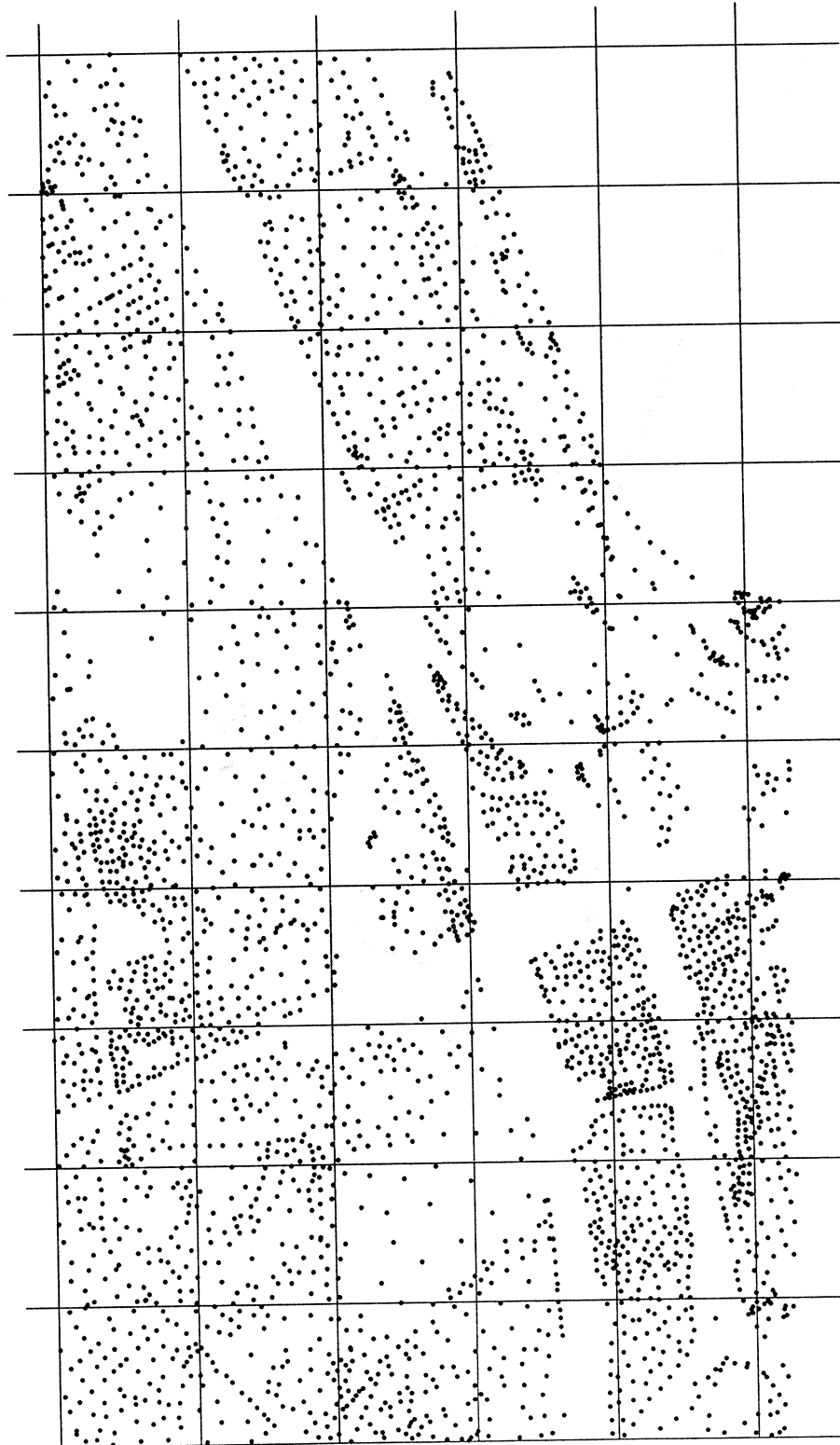
Anzahl Bruchkantenpunkte: 5271

Anzahl Weiche Konturlinienpunkte: 1568

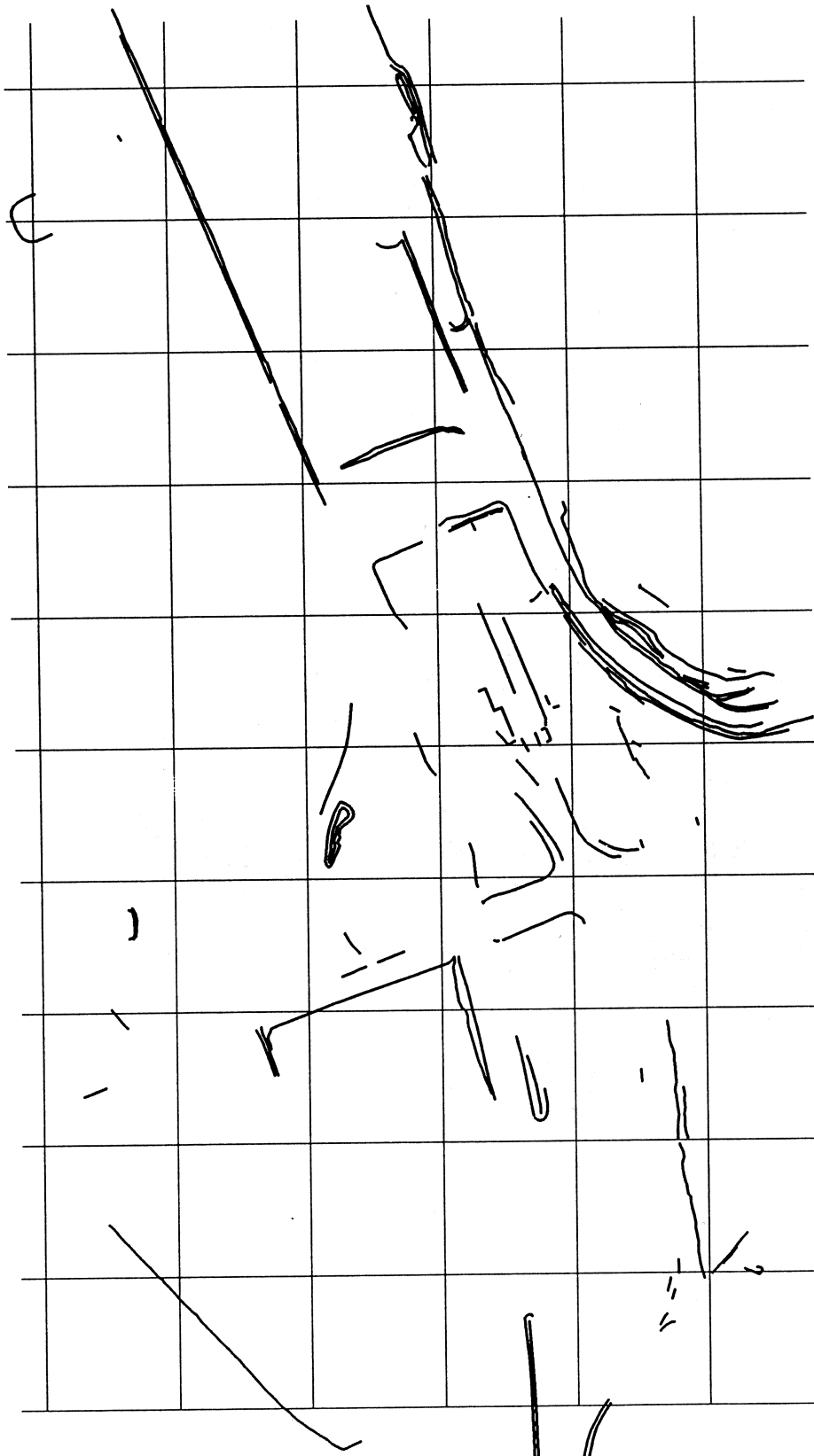
Total 10132

ca. 194 Punkte / ha

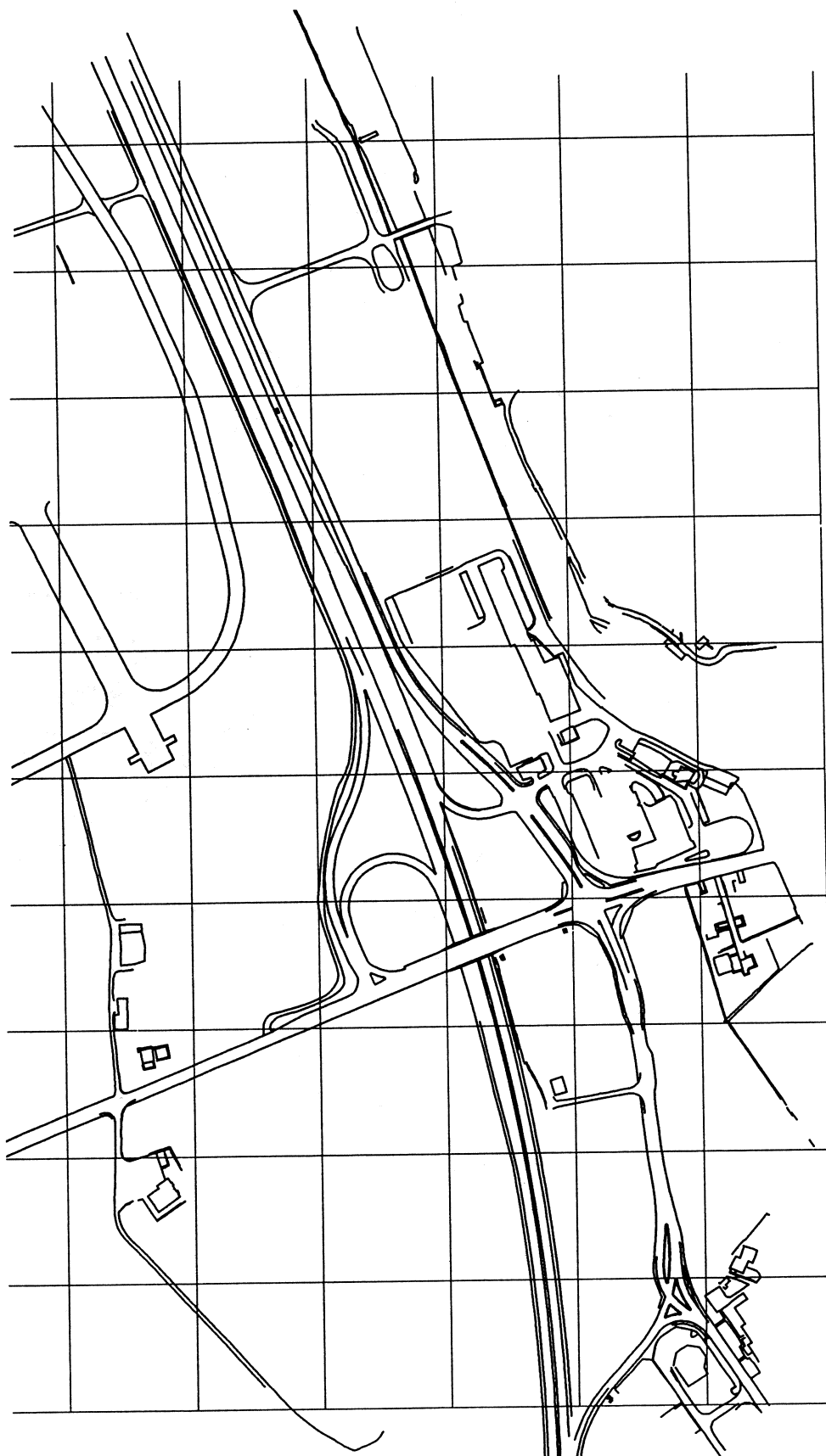
Figur 5: Einzelpunkte Modell Kreuzstrasse



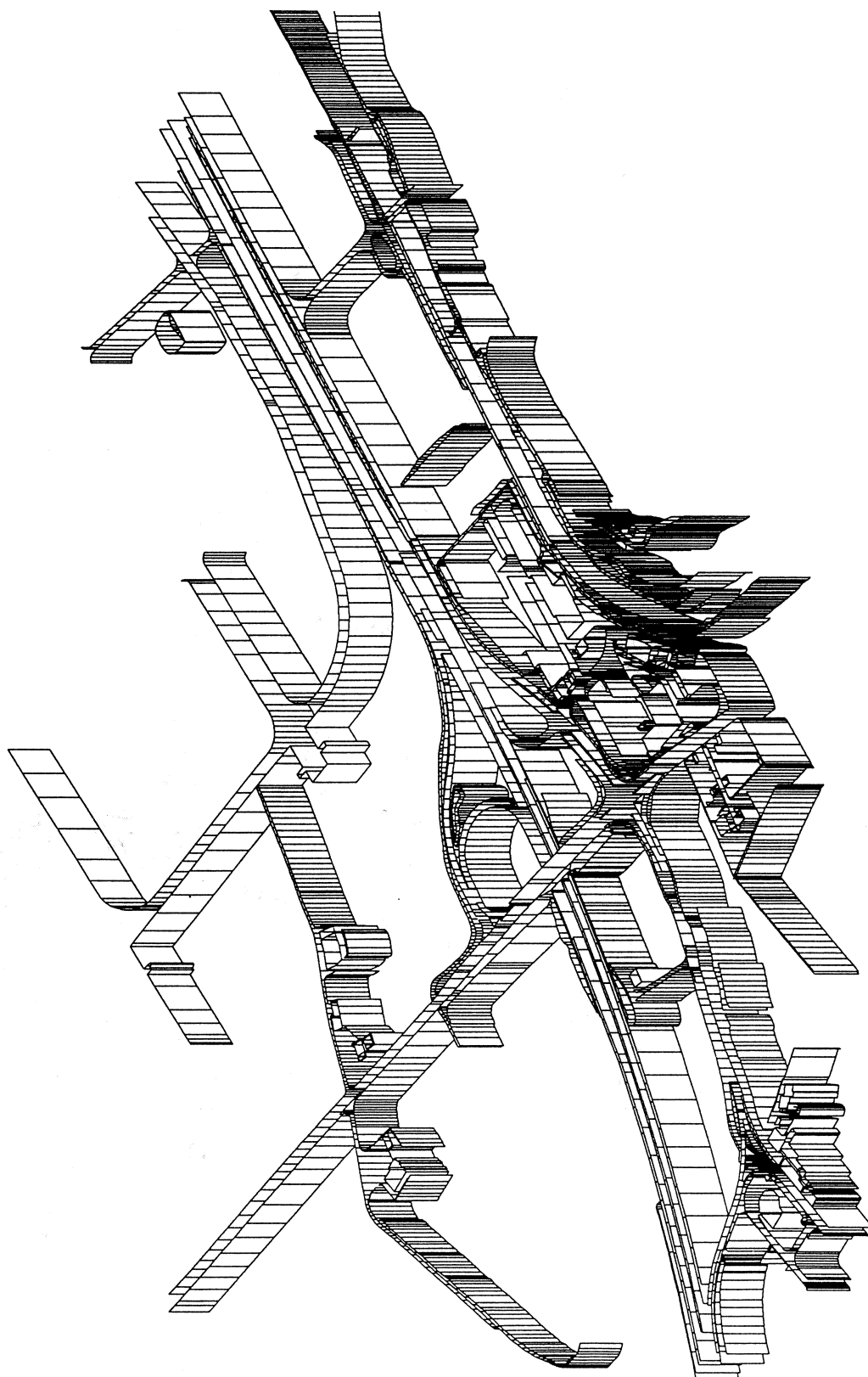
Figur 6: Harte Bruchkanten Modell Kreuzstrasse



Figur 7: Strukturlinien Modell Kreuzstrasse



Figur 8: *Modell Kreuzstrasse: Längenprofile der Geländelinien in perspektiver Ansicht*
Mit dieser Darstellung wird das Hauptgerüst aus Geländelinien zu Kontrollzwecken visualisiert.

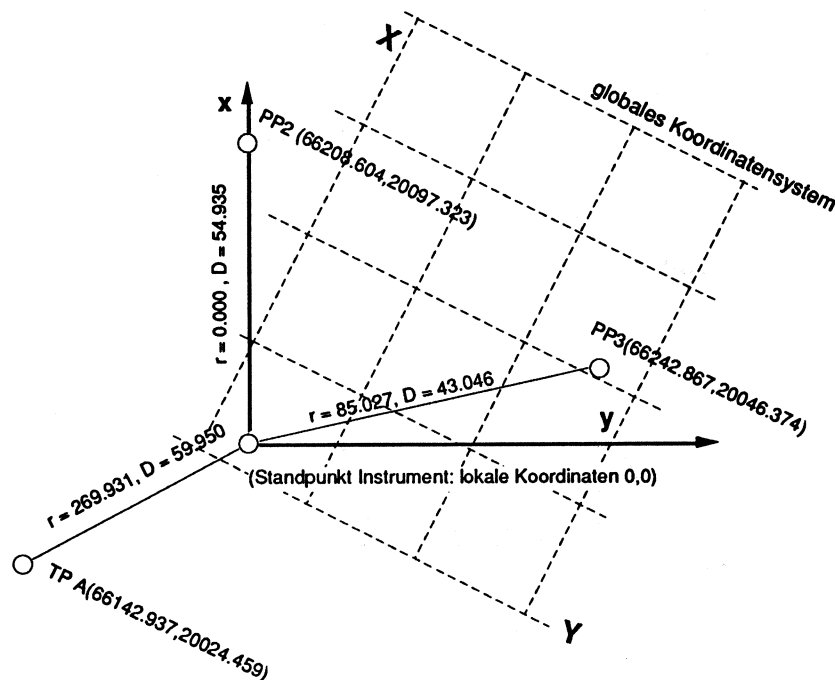


3.5.2 Terrestrische Bestimmung und Berechnung der Geländedaten

Notwendig sind elektronische Ausrüstungen (z.B. TC1600).

Grundlage jeder Vermessung ist das bestehende oder vorgängig zu beschaffende Fixpunktnetz. Instrumentenstandpunkte, Anschlusspunkte müssen eingemessen und berechnet werden. Polygonzug und "Freie Stationierung" sind die gängigen Fixpunktbestimmungsmethoden. Je nachdem Fixpunkte vorhanden sind, können Punkte im Landeskoordinatensystem, anderfalls in einem lokalen System bestimmt werden.

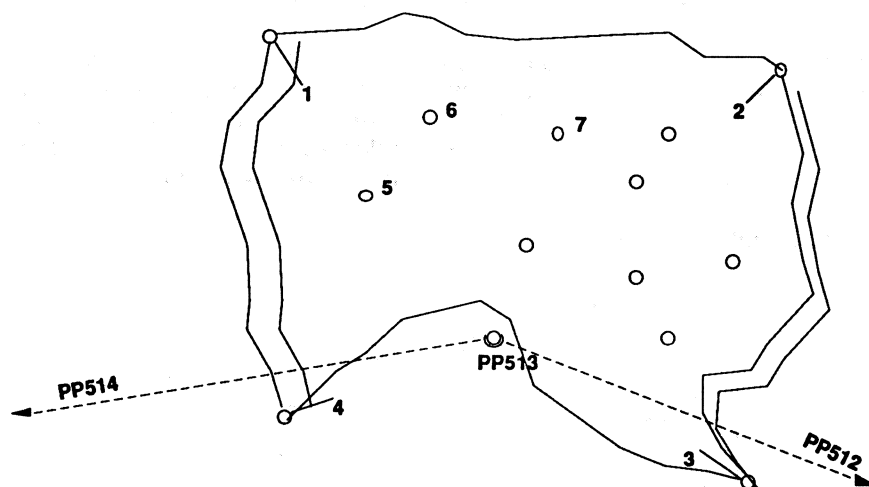
Figur 9: Freie Stationierung



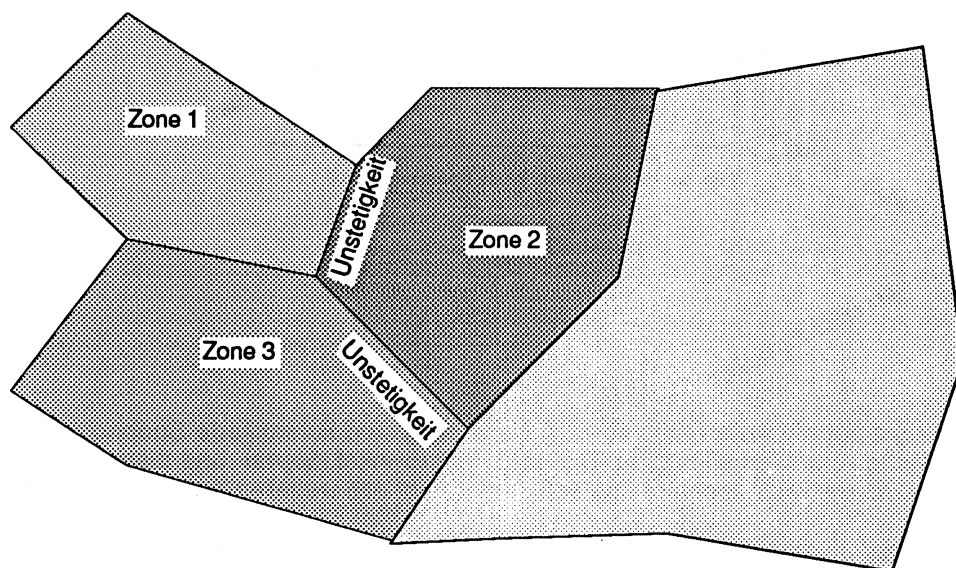
Figur 9 zeigt die freie Stationierung. Notwendig sind kontrollierte Beobachtungen nach drei bekannten Punkten (Richtung, Distanz, Höhenwinkel, Signal- und Instrumentenhöhen). Ein Fehler an der Instrumentenhöhe senkt oder hebt alle weiteren Aufnahmen der Station.

Nach der Fixpunktbestimmung werden Einzelpunkte und Linien im Polarverfahren registriert. Können die registrierten Geländepunkte nicht sofort kartiert werden, - in der Photogrammetrie ist dies ein Nebenprodukt -, so muss unbedingt ein exakter Handrissplan geführt werden. Dieser soll Auskunft geben über den Stand der Aufnahme, über mögliche Lücken, über nummerierte Linien und Einzelpunkte sowie eine mögliche Zonenunterteilung. Das Punktnetz soll möglichst homogen sein. Man misst zum Beispiel in einem ersten Arbeitsgang markante Geländelinien (harte Bruchkanten und weiche Strukturlinien) ein und registriert anschliessend flächendeckend Einzelpunkte und zwar nach einem vorgängig festgelegten Rezept für abgegrenzte Zonen. Zonen können Flächen sein, welche in sich stetig sind. Sofern der Zonenrand als Linie registriert wird, kann das Gebiet innerhalb der Umrandung als von aussen unabhängige Fläche betrachtet werden. Die Nummer soll auch die Zone berücksichtigen. Je exakter die zusätzlichen Feldinformationen sind (Attribute, Zonennummer), desto einfacher und zuverlässiger wird die Auswertung.

Figur 10: Aufnahme von Linien und Einzelpunkten ab bestehendem Polygonzug



Figur 11: Zoneneinteilung



Beispiel:

Feldaufnahmen: Modell Glaubenberg : ca. 200 Pte. / ha

Anzahl registrierte Punkte: ca. 2'500

Feldblatt der registrierten Daten

Programm TC1600 Copyright ZTL Luzern
Feldblatt Station Nr : 312

6048 Horw Seite 1
Instr.hoehe : 1.460

Bemerkungen:

Temperatur 12.0 Druck 1440.0 M.Ho

Zielpunkt	Richtung	Distanz	Z-Distanz	Sig	L.Code
324	45.072	137.837	295.4615	1.460	
313	200.072	212.621	295.4615	1.460	
11 1 17	18.490	166.999	296.9437	1.460	2412
11 2 17	16.919	156.417	296.8993	1.460	2412
11 3 17	15.360	147.807	296.8250	1.460	2412
11 4 17	12.840	137.725	296.6101	1.460	2412
11 5 17	10.143	129.755	296.3007	1.460	2412
11 6 17	6.503	121.827	295.9685	1.460	2412
11 7 17	3.068	116.318	295.6763	1.460	2412
11 8 17	98.873	111.433	295.3957	1.460	2412
11 9 17	93.598	107.055	295.0442	1.460	1412

Zusatzinformationen:

Zielpunktspalte: 11 Liniennummer
 1-9 Laufnummer innerhalb Liniennummer
 17 Zonennummer

L.Code: Spalte 1 2 Liniencode
 Spalte 2 4 Harte Bruchlinie
 Spalten 3-4 12 Nummer Attribut (Z.B. Strasse)

Auswertungen elektronisch registrierter Beobachtungen verlaufen im allgemeinen vollautomatisch und zwar von der Feldaufnahme bis zu Dateien mit Einzelpunkten und harten und weichen Bruchlinien (z.B. Programm GEOTRI).

Da vor allem falsche Liniendefinitionen zu groben Fehlern führen, werden Liniennummer und Liniencode als redundante Eingaben mitgeliefert. Sie ermöglichen eine erste Kontrolle der Eingangsdaten.

Viele zusätzliche Informationen erleichtern den spätern Umgang mit diesen wichtigen Geländedaten. Eine übersichtliche Feldskizze ist unerlässlich, es sei denn, dass die Daten direkt im Feld mit einem Laptop ausgewertet werden.

Am Modell Glaubenpasshöhe werden zwei verschiedene Aufnahmearten gegenübergestellt. In Modell 1 wird das Gelände modelliert, in Modell 2 werden längs vordefinierter Richtungen Einzelpunkte registriert.

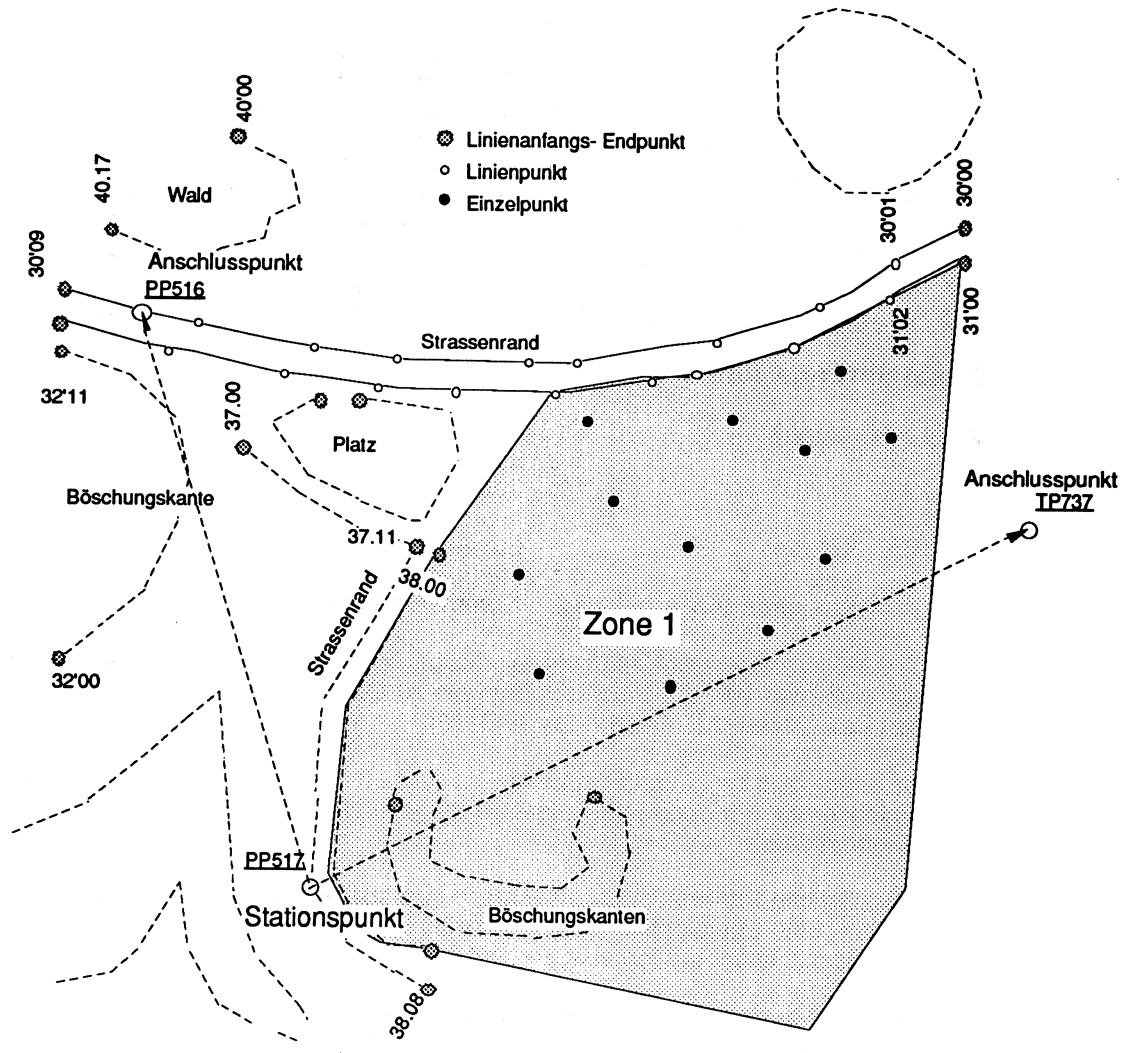
Es sind gesamthaft ca. 900 Punkte mit dem TC1600 eingemessen worden. Die Numerierung ist in der Feldskizze ersichtlich.

Aufnahmeverfahren:

Geländedaten:

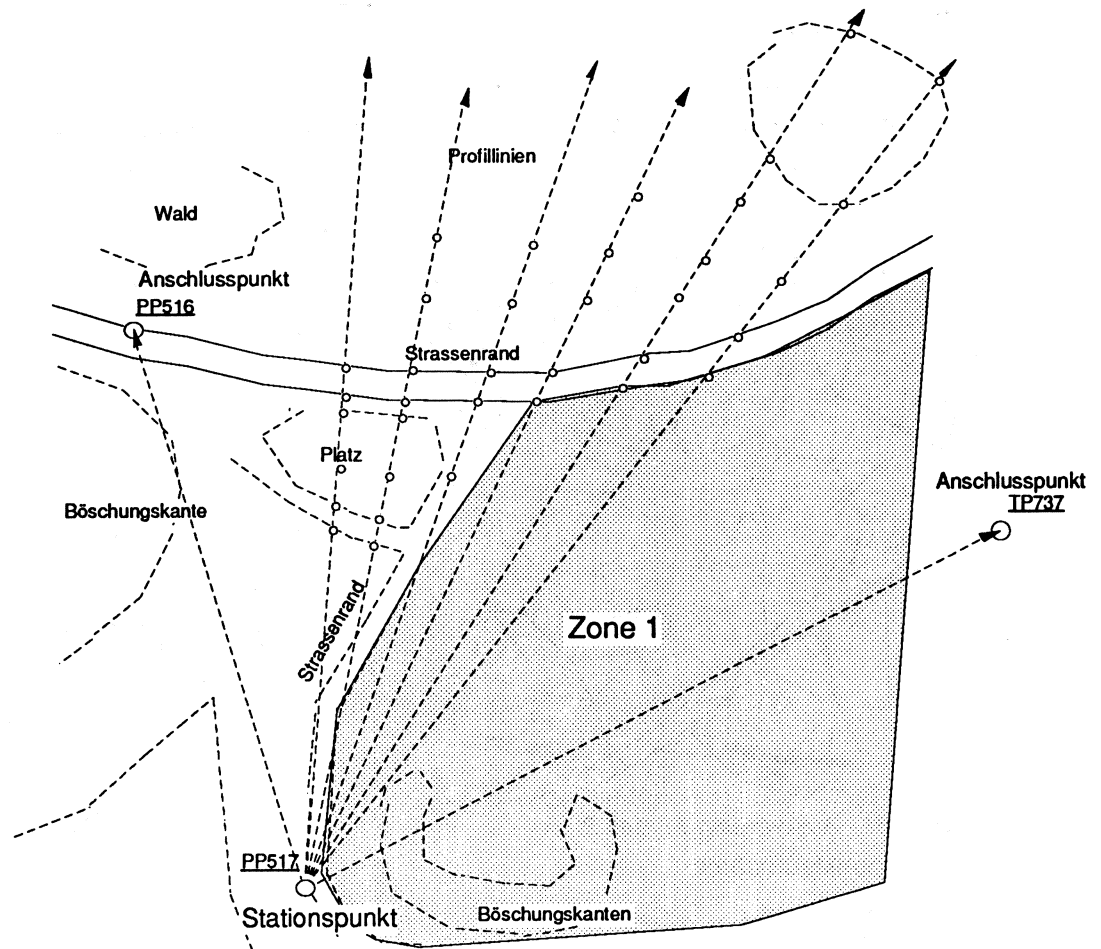
Modell 1:	Strukturlinien +Einzelpunkte
Modell 2:	Einzelpunkte in Profilrichtungen

Figur 12: Feldprotokoll: Modell 1



Die Geländemodell auf der Glaubenbergpasshöhe sind von den Studenten der Bauingenieurabteilung des ZTL aufgenommen worden.

Figur 13: Feldprotokoll: Modell 2



Figuren 14 und 15 decken die Mängel des zweiten Aufnahmeverfahrens auf. Das Gelände lässt sich nie in ein Schema einordnen, weder in Raster noch in ausgezeichnete Profilrichtungen. Die beste Methode liegt in der stufenweise Modellierung im Feld, zuerst Strukturen, dann Einzelpunkte.

Die einzigen Fehler die auftreten können sind:

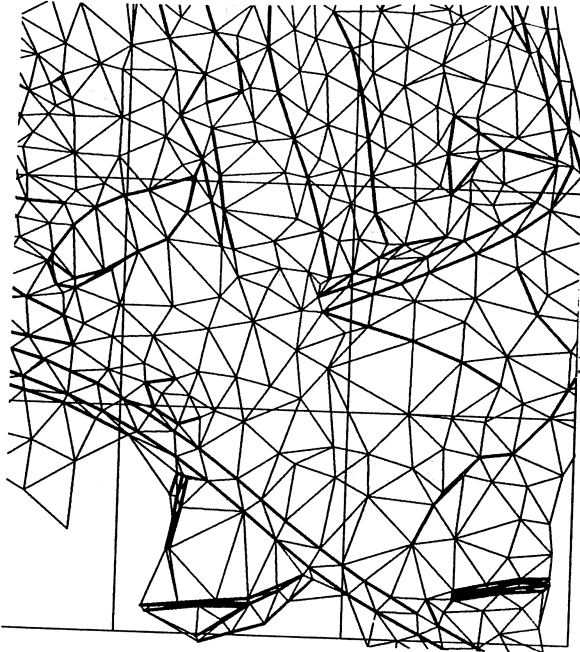
- Instrumenten- und Signalhöhen
- Kommunikationsschwierigkeiten
- Liniendefinitionen
- falsche Ausgangspunkte

Datenregistrierung und Auswertung sind vollautomatisch. Es gibt keine zusätzlichen Manipulationen. Dies bedeutet, dass die Modelldaten von grosser Zuverlässigkeit sind.

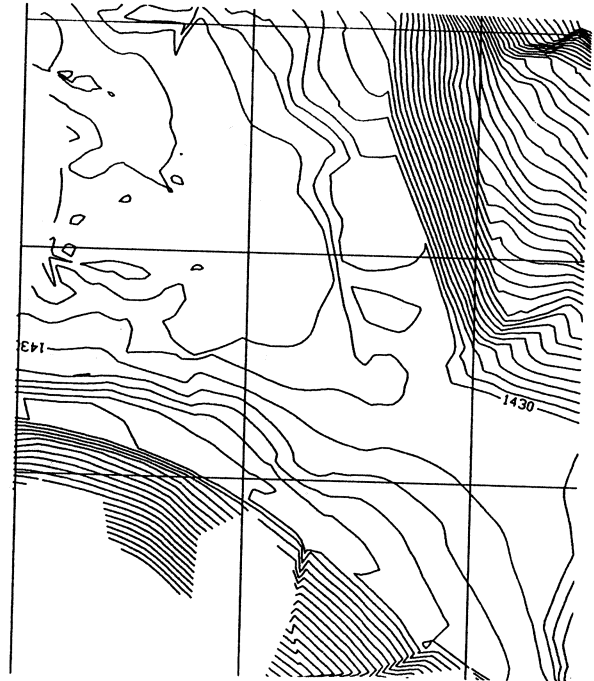
Die Figuren 14 und 15 zeigen die Auswertungen der Modelle aus Figur 12 und 13. Das Modell 1 ist fachmännisch erfasst worden (Punkte und Geländelinien). Bei Modell 2 sind Einzelpunkte im Sektorverfahren registriert worden. Der Höhenkurvenverlauf der beiden Modelle zeigt die Unterschiede.

Figur 14: Auswertung Modell 1 Homogenes Netz

• Phase 1: Aufnahme der Linien

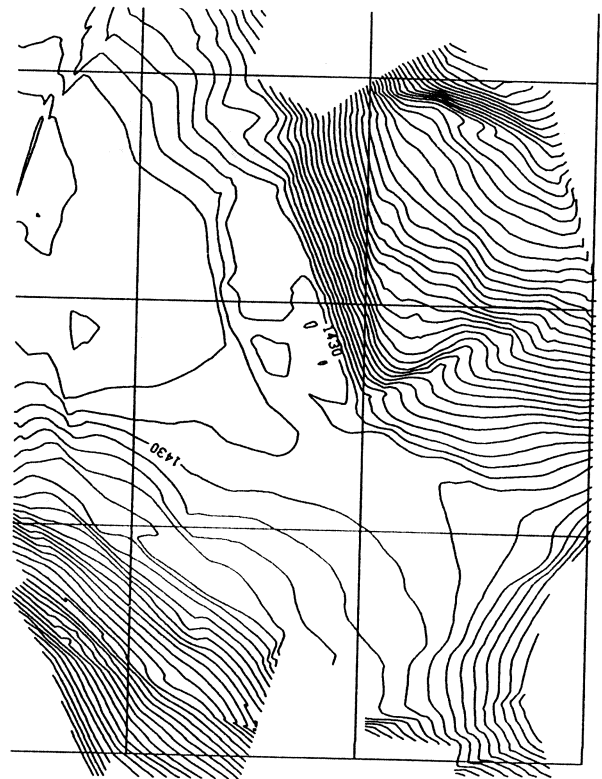
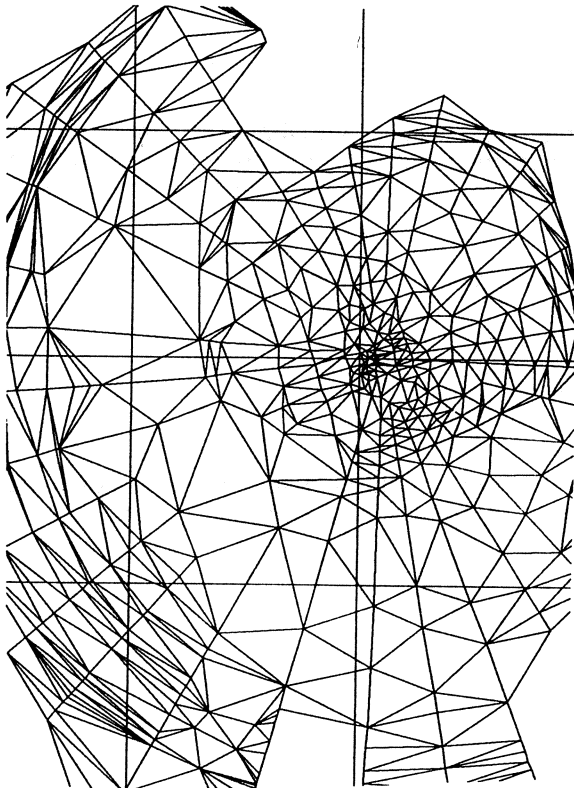


• Phase 2: Einzelpunktverdichtung



Figur 15: Auswertung Modell 2

• Einzelpunktaufnahme

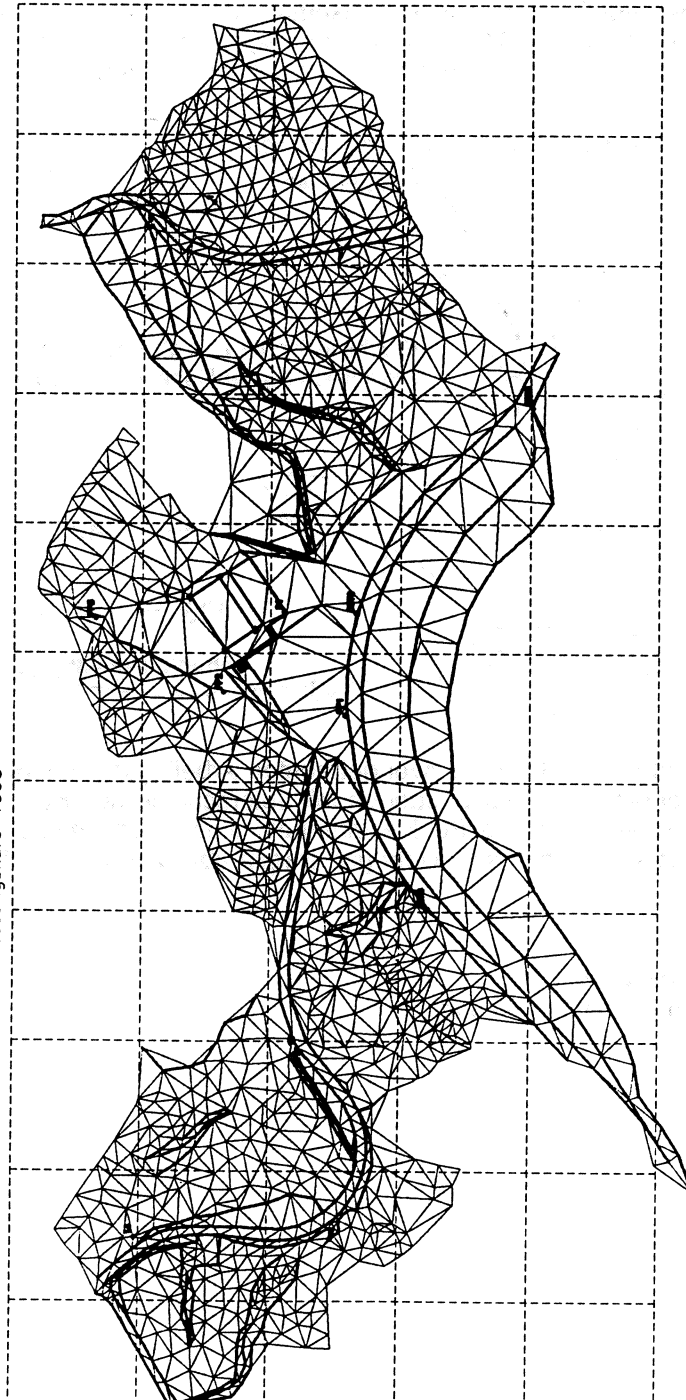


Figur 16: Geländemodell Glaubenbegr Langis: ca. 1500 Punkte

Die Geländeaufnahmen (Geländelinien und Einzelpunkte) dauerten drei Tage.

Registriergerät:	TC1600 der Firma Leica.
Koordinatenberechnungen:	Programm GEOTRI
Geländemodell:	Programm DEMPAC

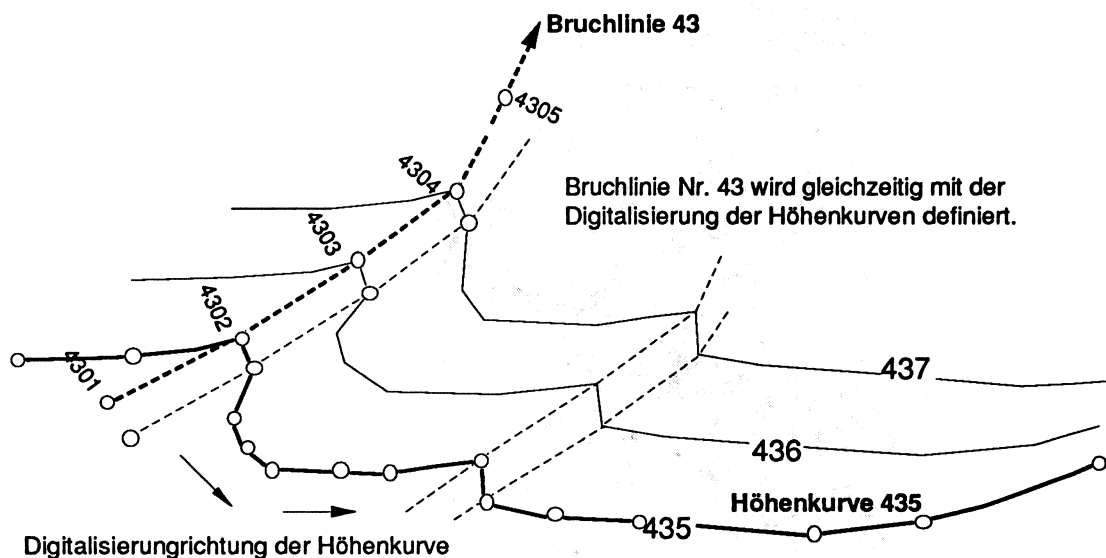
Geländemodell: Langis
Vermessungskurs 1993



3.5.3 Digitalisierung von Geländedaten

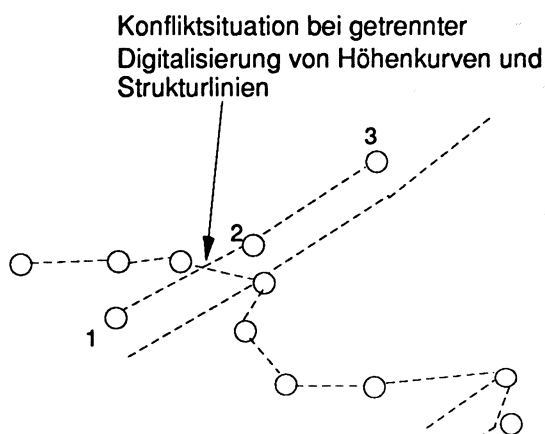
Bei der Digitalisierung kann nur die Punktlage direkt erfasst werden. Höhen müssen mittels Tastatur eingegeben werden. Man kann nur Punkte digitalisieren, die in der Höhenlage bekannt sind. Im allgemeinen sind dies Höhenkurven und Koten von Einzelpunkten. Die Technik der Digitalisierung ist vom Geländemodellprogramm abhängig (siehe Kapitel Geländemodellierung über Höhenkurven). Bei der Digitalisierung gelten sonst gleiche Grundsätze wie bei der Geländemodellierung im Feld. Es sind nicht nur digitalisierte Einzelpunkte, welche verantwortlich zeichnen für das Geländemodell, es sind zusätzlich die Bruchkanten und die Strukturlinien, welche dem Gelände das ihm zukommende Gerüst verpassen. Schnittpunkt zwischen Höhenkurven und Strukturlinien müssen digitalisiert und derart codiert werden, dass sich aus den digitalisierten Einzelpunkten automatisch Strukturlinien definieren lassen.

Figur 17: Digitalisierung von Höhenkurven und Strukturlinien



Werden Höhenkurven und Strukturlinien in zwei getrennten Arbeitsgängen digitalisiert, resultieren für den Schnittpunkt zwei Registrierungen mit unterschiedlichen Koordinaten. Einige DTM-Programme vereinigen diese Punkte innerhalb einer vordefinierten Toleranzgrenze. Diese internen Bereinigungen sind wohl gut, tragen aber zur Verunsicherung des Anwenders bei.

Figur 18: Konfliktsituation



Damit diese Konflikte ausgeschlossen werden können, sollten identische Punkte nur einmal digitalisiert werden. Beim Schnittpunkt einer Höhenkurve mit einer Bruchlinie muss deshalb über eine Codeangabe (z.B. Liniennummer + Laufindex innerhalb dieser Nummer) eine spätere automatische Liniendefinition ermöglicht werden. Im Beispiel (Figur 17) kann in einem weiteren Arbeitsgang die Bruchlinie 43 über bereits digitalisierte Höhenkurvenpunkte automatisch generiert werden.

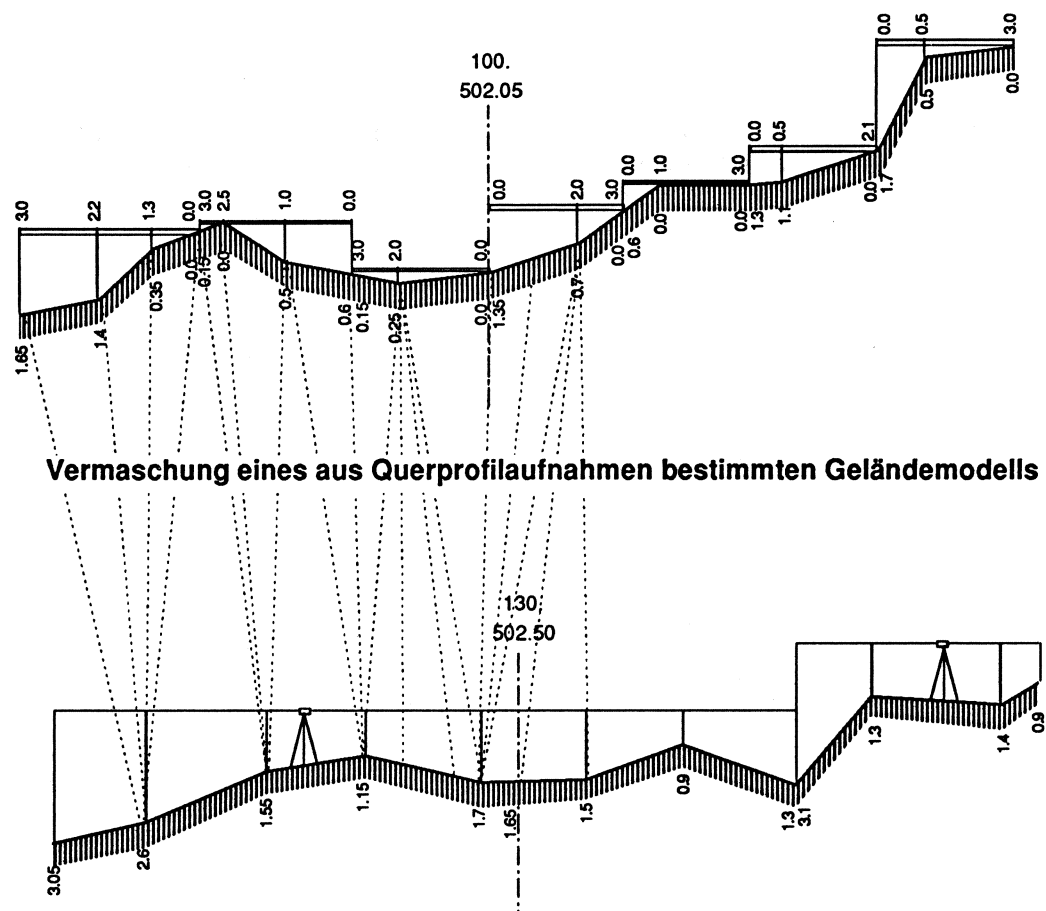
3.5.4 Geländedaten für Strassenbauprojekte

Bei der Strassenprojektierung ohne DTM werden Längs- und Querprofile nach bekannter Methode eingemessen. Wie eingangs erwähnt, sind diese Aufnahmen sehr stark ortsgebunden. Das muss nicht unbedingt als Nachteil empfunden werden. Jeder im Feld registrierte Punkte ist nach Lage und Höhe bekannt und kann somit zur Definition eines Geländemodells verwendet werden.

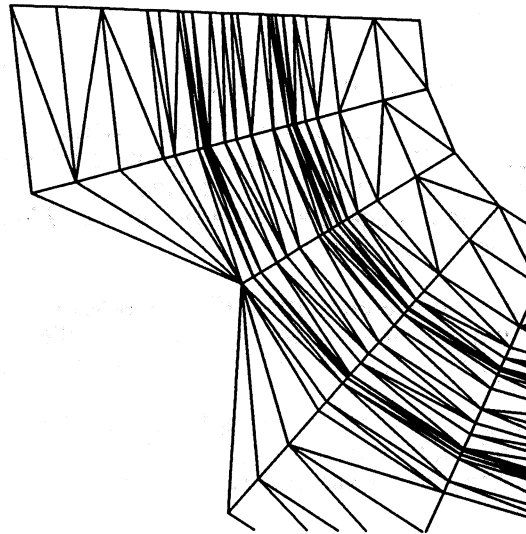
Zusätzlich dieser Querprofildaten können die Lagekoordinaten von Strukturlinien aus der amtlichen Vermessung (Situation) verwendet werden. Sie müssen mit der Höheninformation ergänzt werden und können dann in die DTM-Berechnung miteinbezogen werden.

Besser wäre die gesamte Aufnahmeart auf die DTM-Methode auszurichten, was einer Ergänzung der amtlichen Vermessung mit den notwendigen Höheninformationen gleichkäme und möglicherweise wirtschaftlicher ist, als die herkömmlichen Methoden.

Figur 19: Geländemodell aus Setzlattenbeobachtungen



Figur 19: Vermaschung eines aus Querprofilaufnahmen bestimmten Geländemodell

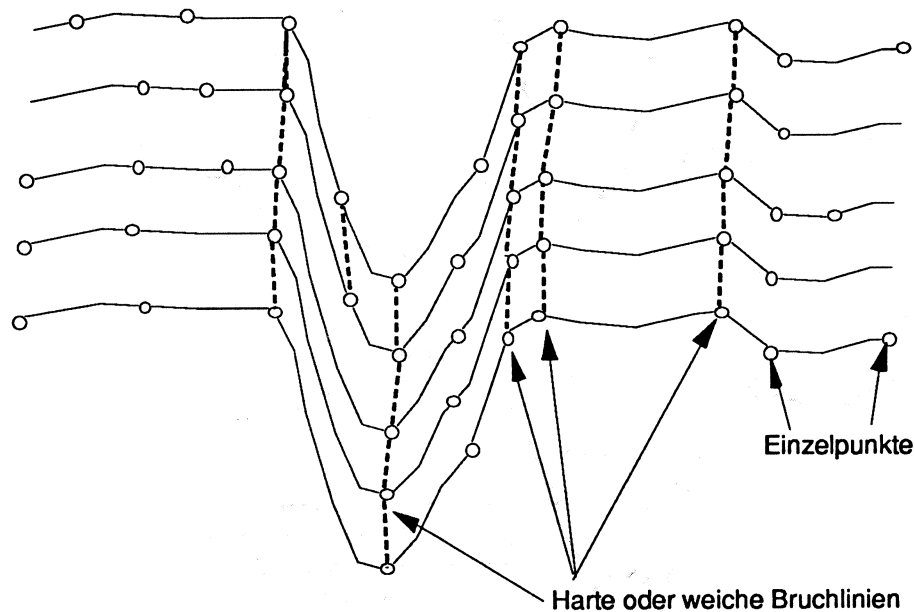


Das Bild zeigt ein sehr unhomogenes Netz. Das Resultat solcher Auswertungen kann benutzt werden, wenn wegen Projektänderungen kleinere Profilverschiebungen notwendig werden.

4 Geländemodellierung über Höhenkurven

Die Digitalisierung ergibt nur bei stetigen Flächen ein gutes Geländemodell. Knickpunkte der Höhenkurven weisen auf Unstetigkeiten der Geländeoberflächen hin, welche unter Umständen die korrekte Vermaschung verhindern können. Es ist ohne weiteres möglich, dass eine Dreiecksseite über eine Schlucht geschlagen wird, richtig wäre die Verbindung zur Talsohle.

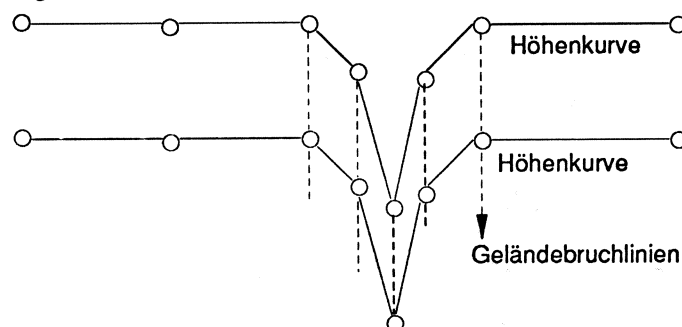
Figur 1: Höhenkurven und Geländebruchlinien im Bereich einer Talsohle



4.1 Beispiele:

Im folgenden werden einige typische Fälle von Geländemodellierungen über Höhenkurven untersucht. Die Eingabedaten (Koordinaten und Höhen) sind immer dieselben. Unterschiede bestehen in der Modellierung. Es werden vier verschiedene Fälle dargestellt. Alle basieren auf folgendem gegebenen Modelldaten.

Figur 2: Höhenkurven + Geländebruchlinien

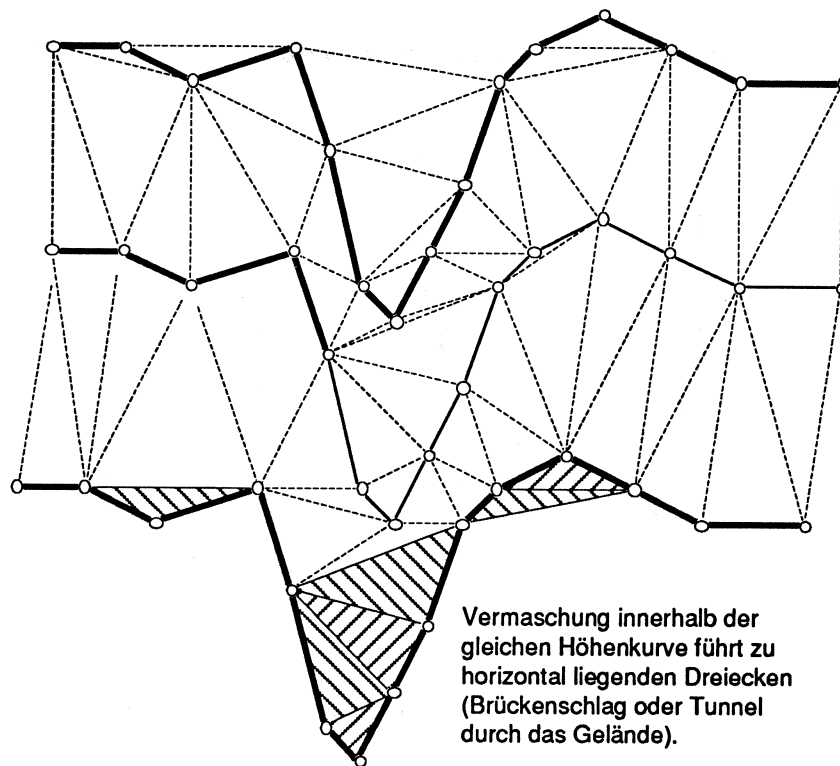


Höhenkurven können als Linien oder Einzelpunkte verwendet werden. Zur Strukturierung des Geländes können zusätzliche Linien (Harte Geländebruchlinien oder weiche Strukturlinien) verwendet werden. Die Punkte auf diesen zusätzlichen Linien sind Schnitte der Höhenkurven mit Situationslinien (Mauern, Flusslauf, Böschungskanten usw.).

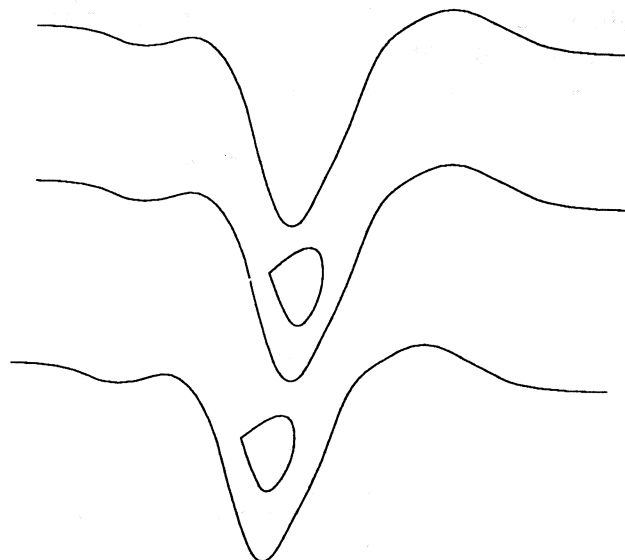
4.1.1 Modell 1 :Digitalisierung von Einzelpunkten

Höhenkurven sind als einzelne Punkte digitalisiert worden. Die Modellierung ist zwangsfrei und führt dazu, dass quer über das Tal vermascht wird. Folge davon sind kleine Erhebungen in der Talsohle.

Figur 3:



Figur 4: Gerechnete Höhenkurven zum Modell aus Einzelpunkten



Die Dreiecksvermaschung löst eine falsche Geländemodellierung aus. Alle davon abgeleiteten Resultate sind unbrauchbar. Die Höhenkurven in Figur 4 haben nichts gemeinsam mit dem korrekten Höhenkurvenverlauf. In der Talsohle (Bergkamm) sind virtuelle Erhebungen (Senkungen) möglich.

4.1.2 Modell 2 : Harte Bruchlinien

Höhenkurven werden als Bruchlinien eingeführt. Auch diese Modellierung führt zu falscher Vermaschung mit fehlerhaften Höhenkurven.

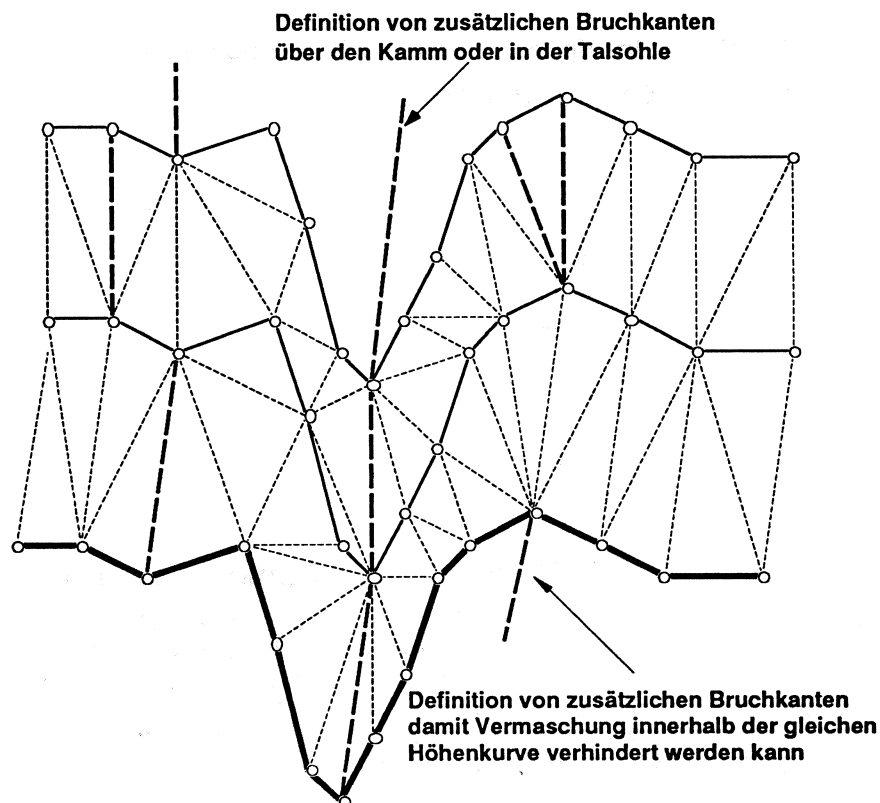
4.1.3 Modell 3 : Harte Bruchlinien und Geländebruchlinien

Mit Hilfe zusätzlich definierter Bruchkanten und Strukturlinien werden fehlerhafte Vermaschungen verunmöglicht.

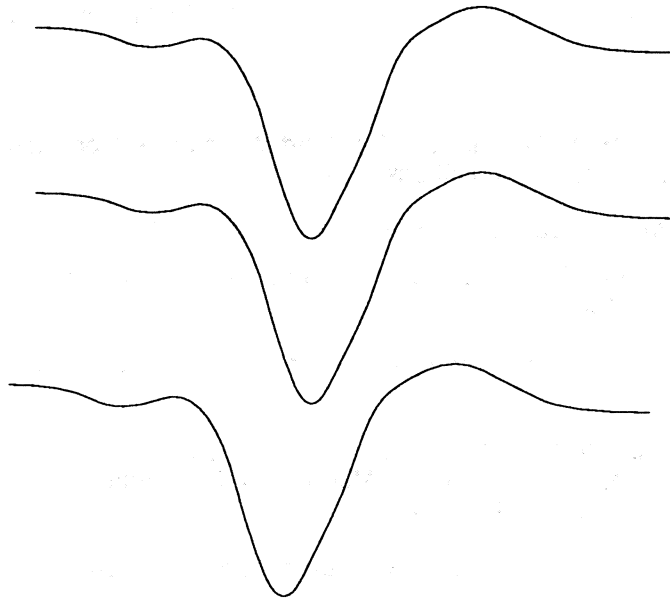
Zusätzliche Bruchkanten oder Strukturlinien sind an folgenden Orten notwendig:

- Talsohle und Bergkamm
- Schnitt der Höhenkurve mit Geländebrüchen
- An allen Stellen, wo die Möglichkeit der Vermaschung innerhalb einer Höhenkurve besteht.

Figur 5: Als Bruchkanten definierte Geländeformen erzwingen korrekte Vermaschung

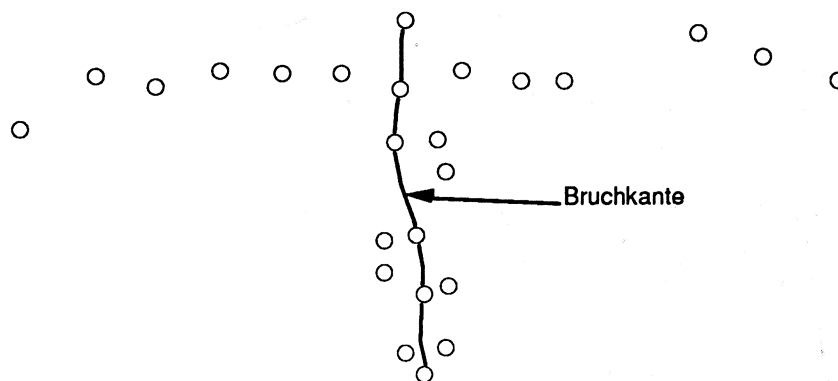


Figur 6: *Gerechnete Höhenkurven zum Modell aus Einzelpunkten*



4.1.4 Modell 4: Modell 1 Einzelpunkte und Geländebruchlinien

Figur 7: *Einzelpunkte + Geländebruchlinien*



4.2 Unterschiede zwischen Modellen aus Punkten oder Linien

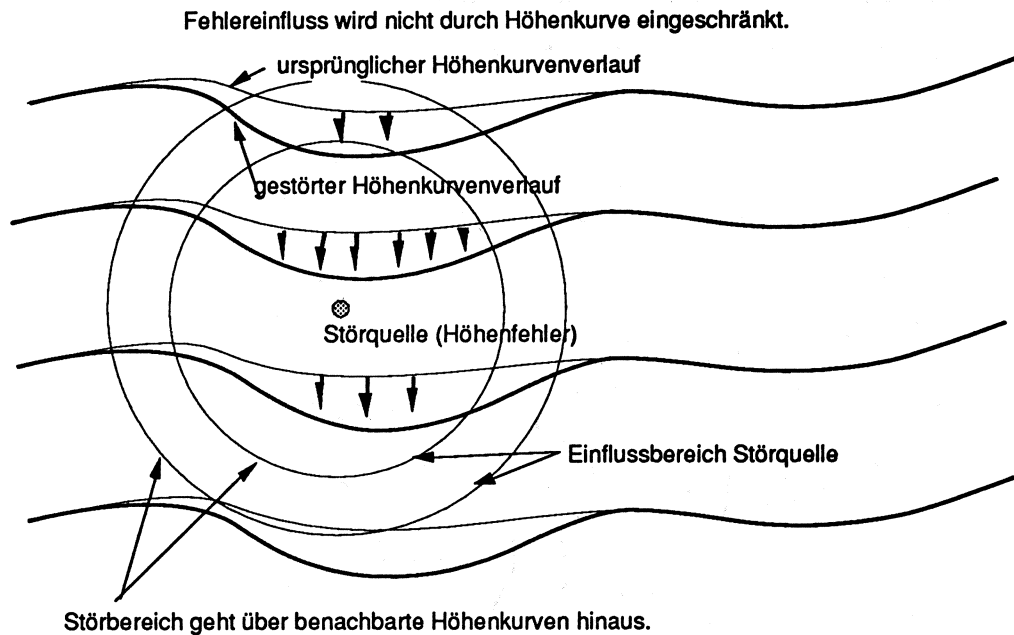
Grundsätzlich könnten die Höhenkurven als Linien (Modell 3) erfasst werden. Es zeigt sich aber, dass die Geländeformen dabei terrassenförmig modelliert werden. Die Interpolation geht im Gegensatz zur Einzelpunkterfassung nicht über die Höhenkurven hinaus. Das Rezept mit Einzelpunkten und Strukturlinien liefert weichere Geländeformen. Demgegenüber muss aber festgehalten werden, dass mit der Digitalisierung der Linien der Einfluss grober Fehler auf die umliegende Nachbarschaft begrenzt werden kann.

4.3 Auswirkung grober Fehler bei Modellen aus Höhenkurven

Figur 14 liefert den Höhenkurververlauf innerhalb zweier Modelle, wovon eines durch einen groben Fehler verfälscht wird. Das Terrainmodell wird aufgrund der Eingabedaten aus Einzelpunkten und Geländebruchlinien bestimmt. Der Fehler ändert den Verlauf der benachbarten Höhenkurven.

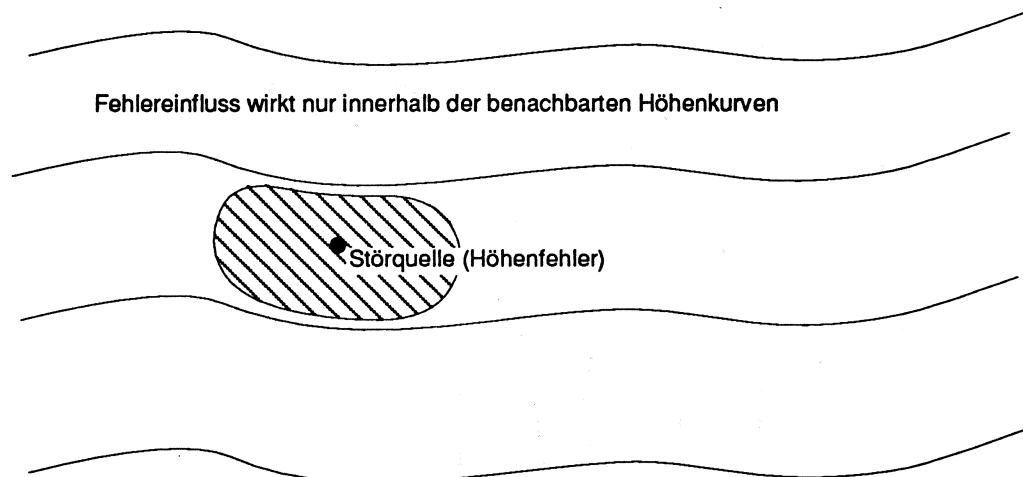
Ein grober Fehler breitet sich bei der Digitalisierung über die benachbarten Höhenkurven aus. Der Bereich ist von der Vermaschung abhängig (Kapitel Fehlerausbreitung). Die Haupteinflusszone bleibt innerhalb der benachbarten Höhenkurven.

Figur 8: Störquelle wirkt sich über benachbarte Höhenkurven aus.



In Figur 9 wird das Terrainmodell aufgrund der Eingabedaten aus Höhenlinien und Geländebruchlinien bestimmt. Der Fehler ändert den Verlauf der benachbarten Höhenkurven nicht. Auch innerhalb der betroffenen Höhenlinien ist der Einfluss stark eingeschränkt.

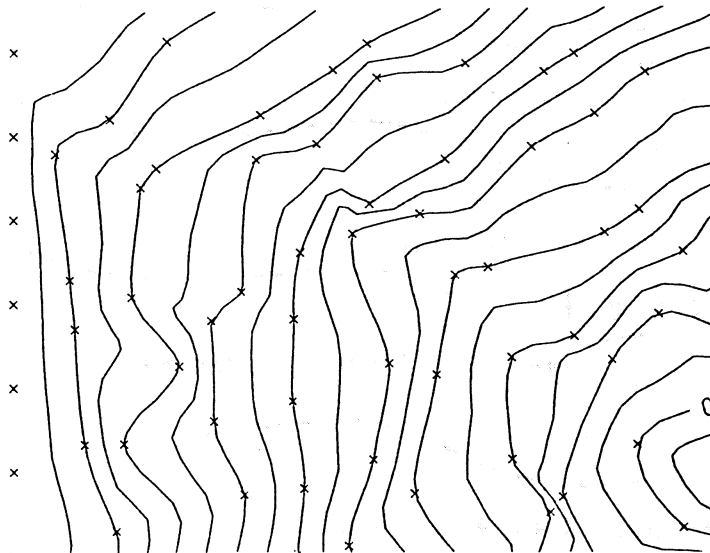
Figur 9: Benachbarte Höhenkurven grenzen Störbereich ab.



4.4 Einzelpunktmodelle mit weichen Geländeformen

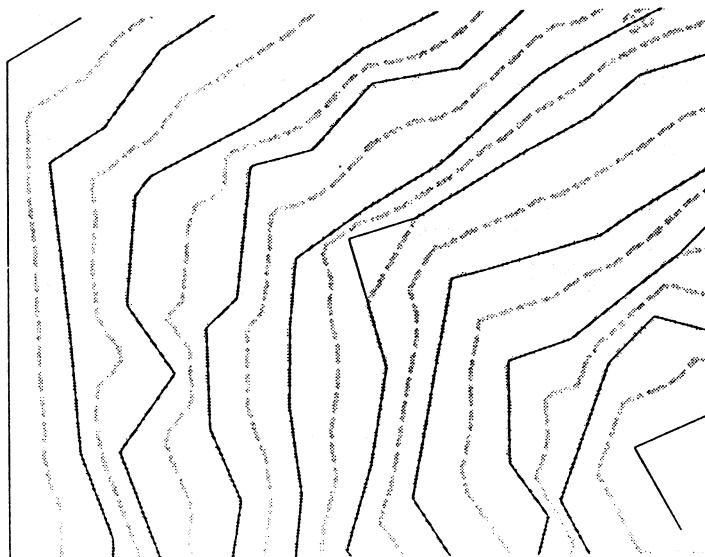
Modelle aus Einzelpunkten haben weiche Geländeformen. Modelle aus Höhenkurven sind zackig und weisen eine terrassenförmige Struktur auf. Linien grenzen den Interpolationsbereich zu streng (geradlinig von Linienpunkt zu Linienpunkt) ab. Die Uebergänge zu den benachbarten Kurvenbänder sind dadurch unstetig.

Figur 10 Terrainmodell aus Einzelpunkten



Figur 11: Terrainmodell aus digitalisierten Höhenkurven

dünne Linien = digitalisierte Höhenkurven
 schwach gestrichelte Linien = gerechnete Höhenkurven



4.5 Folgerung

Die Beispiele zeigen, wie aufgrund bestehender Höhenkurvenpläne digitalisiert werden kann und mit welchen Fehlern gerechnet werden muss. Es muss klar festgehalten werden, dass nebst den Höhenkurven auch Geländebruchlinien (Bruchkanten und Strukturlinien) digitalisiert werden müssen.

Vorgehen:

Erfassen der groben Geländeform:

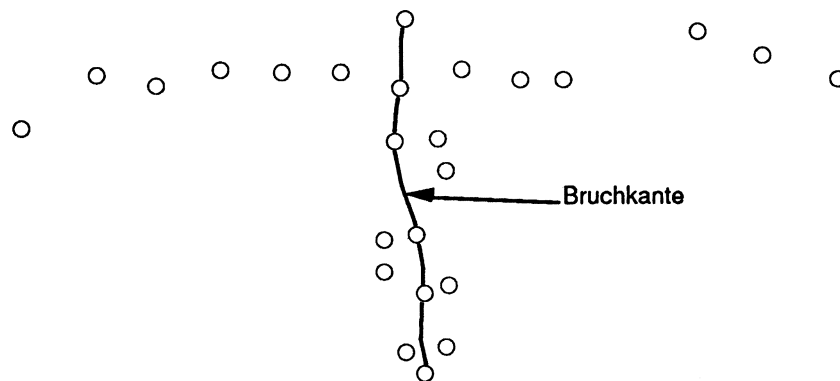
- Digitalisierung der Höhenkurven als Linien oder Einzelpunkte

Einzelpunkte ergeben weichere Geländeformen.

Erfassen der feinen Geländestrukturen:

- Digitalisierung der Geländebruchlinien (im allgemeinen sind dies auch die Knickpunkte der Höhenkurven)

Figur 12: Einzelpunkte + Geländebruchlinien





5 Zuverlässigkeit bei der Datenerfassung, Genauigkeit und Fehlerausbreitung

Definitionen: Zuverlässigkeit Wahrscheinlichkeit nach der ein Geländepunkt fehlerlos ins Geländemodell übertragen wurde. (Die Wahrscheinlichkeit für eine unkontrollierte Punktbestimmung ist 0 %.)

Genauigkeit: Genauigkeit der Punktbestimmung (Messmethode) (siehe nächstes Unterkapitel)

5.1 Die Zuverlässigkeit der Datenerfassung

In den Anfangszeiten der Computertechnik legte man sehr grossen Wert auf die Prüfung der Eingabewerte. Gestanzte Lochkarten wurden über die Prüfbohrung kontrolliert. Die Fehlerquote war dementsprechend gering. Vergleicht man dieses Verfahren mit heutigen Methoden, so scheint eine gewisse Grosszügigkeit überhand zu nehmen. Es stellt sich die Frage, wie ein Punkthaufen von Tausenden von Punkten überhaupt kontrollierbar ist. Natürlich lassen sich aufgrund dieser Daten Geländemodelle erzeugen, welche bei der Feldverifikation auf "grobe" Fehler überprüft werden können. Mehr ist nicht möglich. Trotzdem stellt sich die Frage nach der Zuverlässigkeit von Geländemodellen.

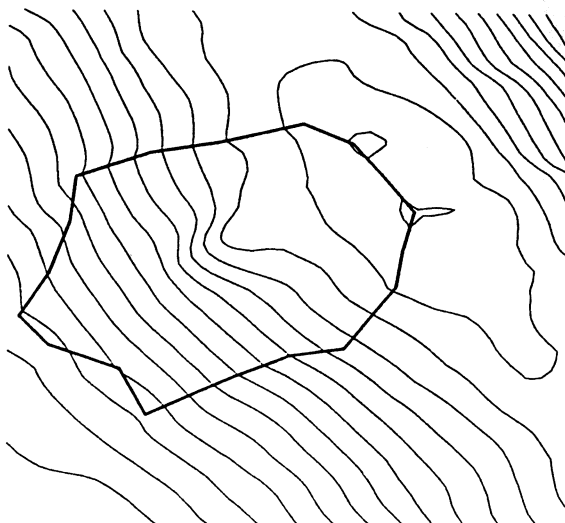
5.1.1 Zuverlässigkeitskontrollen bei einer Massenberechnung

Die Zuverlässigkeit einer Massenberechnung ist direkt mit der Zuverlässigkeit von Geländemodelldaten und Arbeitsprozess verbunden. Da die Massenberechnung ein Resultat aus mehreren Teilaufgaben ist, muss jede davon fehlerlos gelöst werden. Dies gilt für:

- Einzonung des Baugeländes
- Beschaffung der Ursprungsmodelldaten
- Beschaffung der Projektmodelldaten
- Vermaschung beider Modelle
- Massenberechnung mit dem Ursprungsmodell im eingezonten Bereich (1)
- Massenberechnung mit dem Projektmodell im eingezonten Bereich (2)
- Aushub / Schüttung = Differenz der beiden Massenberechnungen

Figur 1: Höhenkurvenplan über das Baugelände

Innerhalb der unveränderlichen Zone des Baugeländes wird ein Umriss festgelegt. Dieser soll nach Möglichkeit als harte Bruchkante definiert werden. Auf diese Art lässt sich das eigentliche Baugelände als selbständiges Modell behandeln.

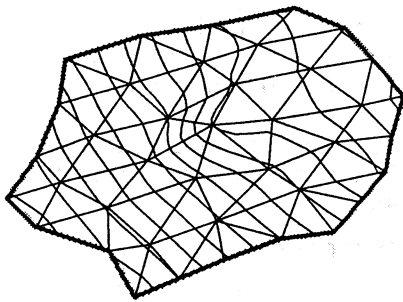


In Figur 2 wird das betroffene Baugelände als vollständiges Geländemodell dargestellt (siehe Kapitel Teilmodelle). Der Höhenkurvenanschluss zwischen der äusseren und inneren Zone ist nahtlos (Figur 4), die Dreiecksvermaschung schneidet die Zonengrenze nicht.

Die erste Massenberechnung basiert auf dem Ursprungsmodell. Im nächsten Arbeitsgang wird das Ursprungsmodell durch das Projektmodell ersetzt. Die Differenz der beiden Massenberechnungen, dem Ursprungsmodell (1) und dem Projektmodell (2), liefert die Aushubkubatur.

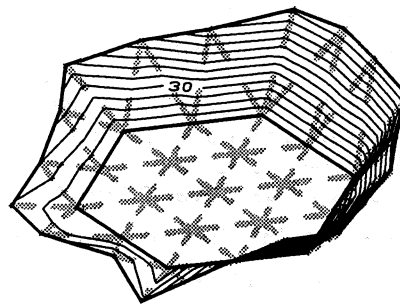
Figur 2:

Höhenkurven und Vermaschung
Ursprungsmodell

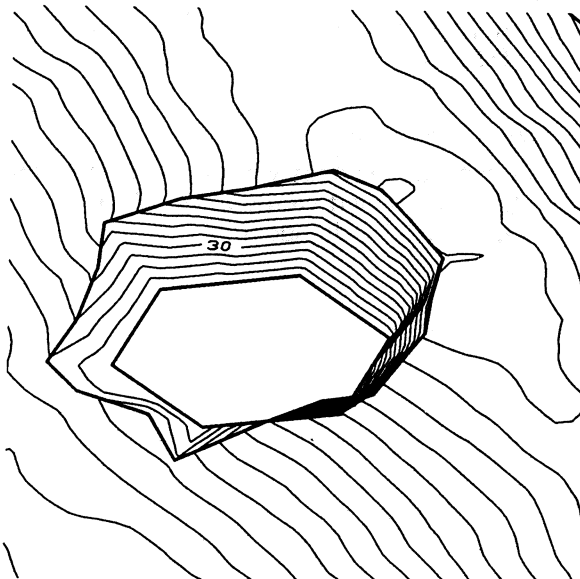


Figur 3:

Höhenkurven und Vermaschung
Projektmodell



Figur 4: Höhenkurvenplan mit Berücksichtigung des Bauprojekts



5.1.2 Massnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit

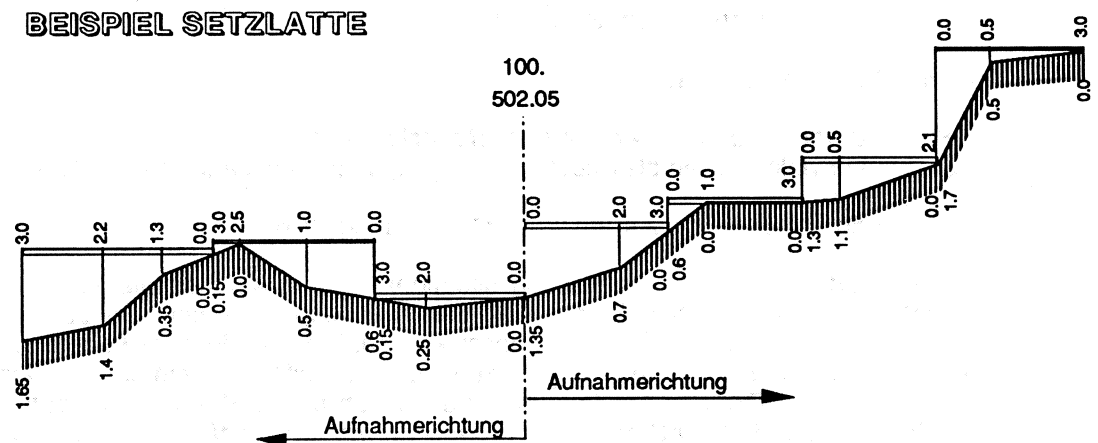
Die Zuverlässigkeit lässt sich im Fall der Massenberechnung durch folgende Massnahmen verbessern:

- Verzicht auf alle Geländedaten ausserhalb der Bauzone
- Abgrenzung der Bauzone durch eine harte Bruchkante (Feldaufnahme)
- Aufnahme der wichtigsten Einzelpunkte und Bruchkanten innerhalb des eingezonten Gebietes
- Kontrolle der wichtigsten Punkte
- Ueberschlagsmässige Handrechnung
- Rechnerische Bestimmung der Projektmodelldaten
- Kontrolle der Vermaschung
- Perspektive Darstellung
- Ueberprüfung der Schnittzonen der Geländemodelle (1) und (2)

5.1.3 Weitere Methoden zur Verbesserung der Zuverlässigkeit

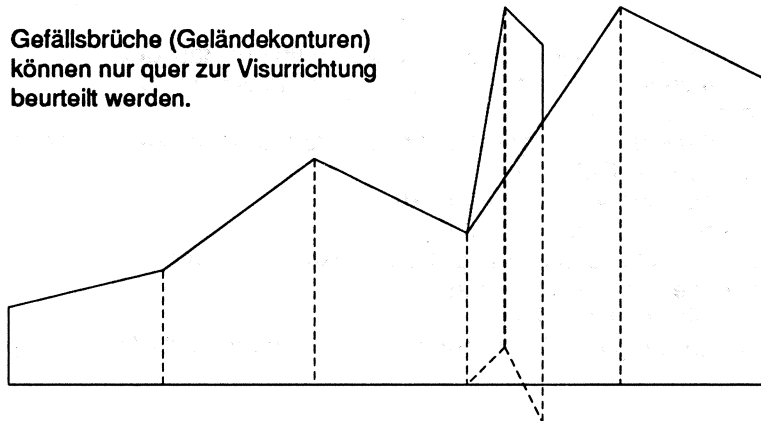
Bei der bisherigen Profilbestimmungsmethode sind die visuellen Kontrollen im Feld besser als bei der Erfassung von Geländemodelldaten. Grobe Fehler können bei fachmännischer Feldarbeit vermieden werden (grafischer Auftrag).

Figur 5: Konventionell aufgenommenes Querprofil: Blick des Beobachters (bzw. Handrissführer) ist meistens senkrecht zur Aufnahmeebene.



Falls die Blickrichtung nicht senkrecht zur Aufnahmerichtung ist, wird die direkte Beurteilung auf grobe Fehler sehr schwierig.

Figur 6: Bei der Geländemodellaufnahme wird eine räumliche Linie erfasst.



Aufgrund dieser Ueberlegung stellt sich die Frage, nach welchen Methoden eine erhöhte Sicherheit erreicht werden kann. Genügt eine engmaschige Punktverdichtung? Muss doppelt eingemessen werden? Müssen Kontrollprofile bestimmt werden? In der Vermessung lautet die Devise: Eine Messung ist keine Messung, vor allem dann, wenn mit dieser Messung Auflagen verbunden sind, wie zum Beispiel bei der Absteckung eines Bauwerks.

Bei Absteckungen werden abgesteckte Punkte kontrolliert (Kontrollmasse, Doppelbestimmung, usw.). Solche Kontrollen sind bei Geländeaufnahmen unmöglich. Die Punkte werden nur einmal erfasst. Kontrollen sind nicht möglich, da die erfassten Punkte im Feld nicht versichert und dementsprechend kein zweites Mal eingemessen werden können.

Damit trotzdem brauchbare Resultate erzielt werden können, seien einige **praktische Typs** und Vorsichtsmassnahmen erwähnt.

Kontrolle von Linien:

- Sie sind **im Feld meistens eindeutig erkennbar**.
- Sie sind in vielen Fällen als Situationslinien lagemässig bekannt (Pläne der Grundbuchvermessung).
- Sie tragen entscheidend zur Form des Geländemodells bei.

Heute liefert die amtliche Vermessung Situationspläne, in welchen alle harten Bruchkanten eingetragen, in vielen Fällen bereits elektronisch abgespeichert sind. Bei der Feldaufnahme müssen diese Situationslinien neu erfasst werden. Die resultierende Lageredundanz kann und muss zu Kontrollzwecken ausgenützt werden. Sie hilft vor allem bei der Verifikation der Vermaschung. **Dreiecksseiten der Vermaschung sollten bestehende Situationslinien aus der amtlichen Vermessung im allgemeinen nicht schneiden.**

Die Verifikation besteht aus der gleichzeitigen Abbildung zwischen bekannten und neu registrierten Situationslinien.

Einmessen von Zonengrenzen:

Das Gebiet soll vor Arbeitsbeginn in Zonen aufgeteilt werden, wobei die Zonengrenzen immer als räumliche Linien aufzunehmen sind. Dieses Vorgehen ermöglicht es, dass eine Zone nach der andern sauber bearbeitet werden kann. Fehler innerhalb der Zonen beeinflussen andere Zonen nicht.

5.2 Genauigkeit und Fehlerausbreitung

Die Frage der Genauigkeit kann nicht leicht beantwortet werden. Sie ist von verschiedensten Faktoren abhängig. Die wichtigsten seien kurz erwähnt.

- **Modellierung im Feld:**
Der Maximalfehler ist der Abstand des Punktes von der ebenen Dreiecksfläche, welche das Gelände annähert. Stimmt der Interpolationsansatz, so sind kleine Fehler zu erwarten.
- **Aufnahmegenauigkeit der Punkte:**
Sie resultiert aus der Aufnahmemethode, dem Geländecharakter und unter Umständen auch dem Bewuchs (Photogrammetrie).
- **Programmsysteme:**
Auswertungen mit verschiedensten Programmen führen auf fast identische Resultate. Das Problem von grösseren Differenzen liegt meistens bei der korrekten Anwendung.

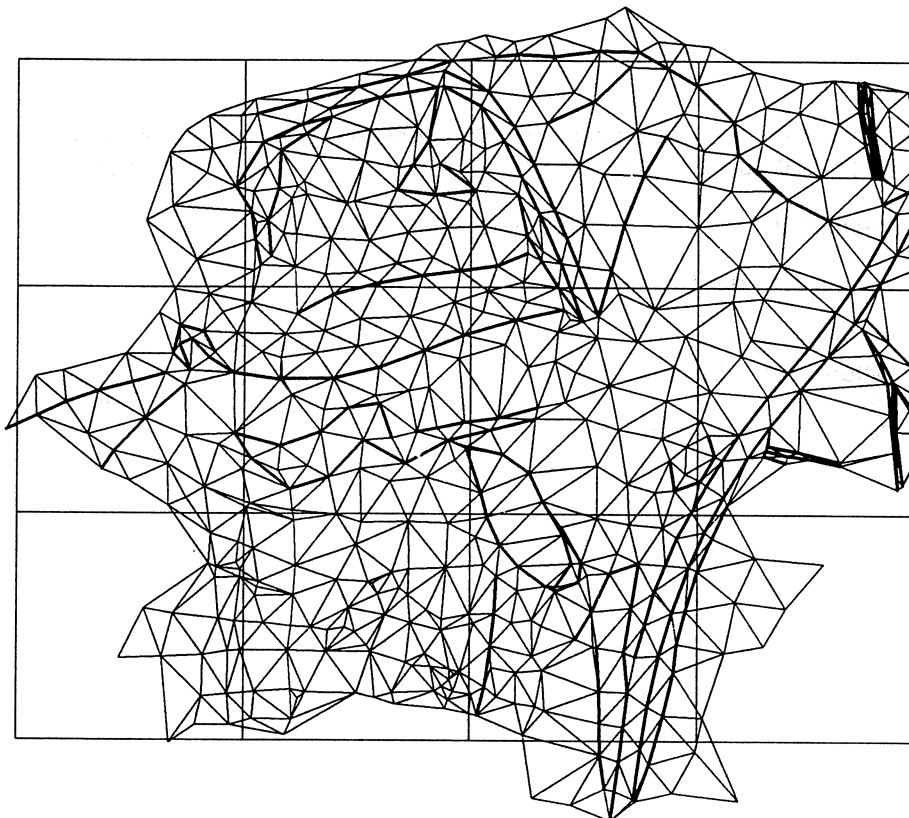
Die Testversuche auf der Glaubenbergpasshöhe und beim Hotel Langis geben Auskunft über die zu erwartende Genauigkeit.

5.2.1 Versuch Glaubenberg Passhöhe

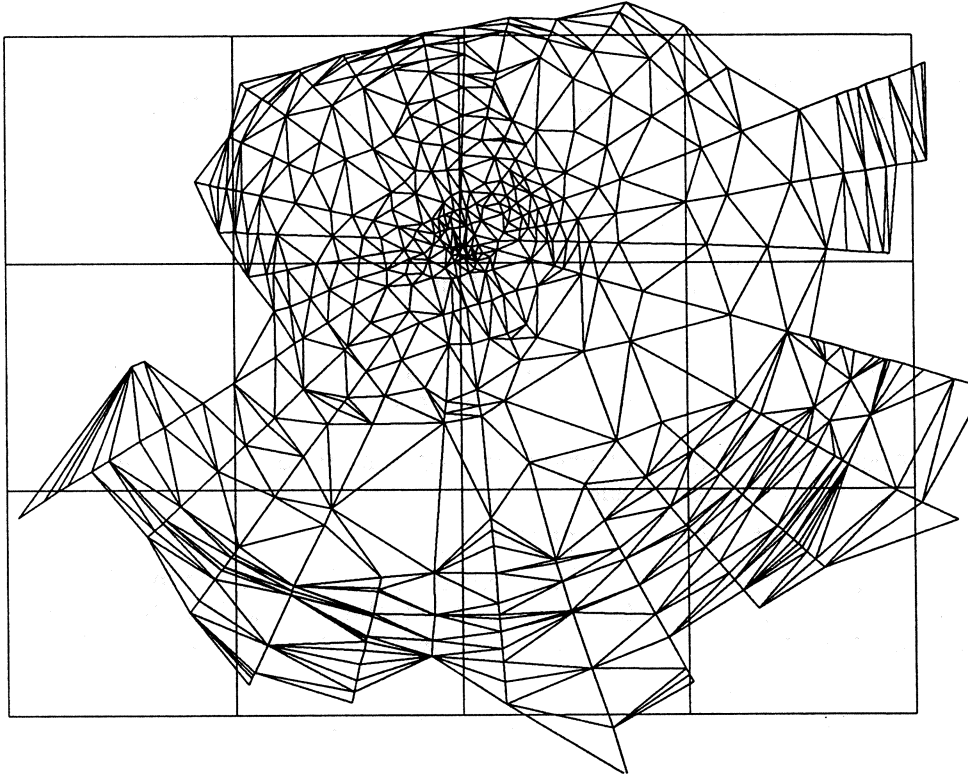
Im Versuch werden aus Geländemolldaten gerechnete Punkte mit eingemessenen Punkten verglichen. Zu diesem Zweck sind zwei unabhängige Geländemodelle mit einer elektronischen Messausrüstung eingemessen worden. Die Modelle werden im folgenden kurz beschrieben:

2 Geländemodelle: ca. 150 x 200 m je 400 Punkte

Figur 7: Modell 1 Einzelpunkten + Strukturlinie



Figur 8: Profilaufnahmen mit Einzelpunkten

**Auswertung 1**

Modellberechnung aus Einzelpunkten + Strukturlinien
 Vergleichspunkte aus Profilaufnahmen

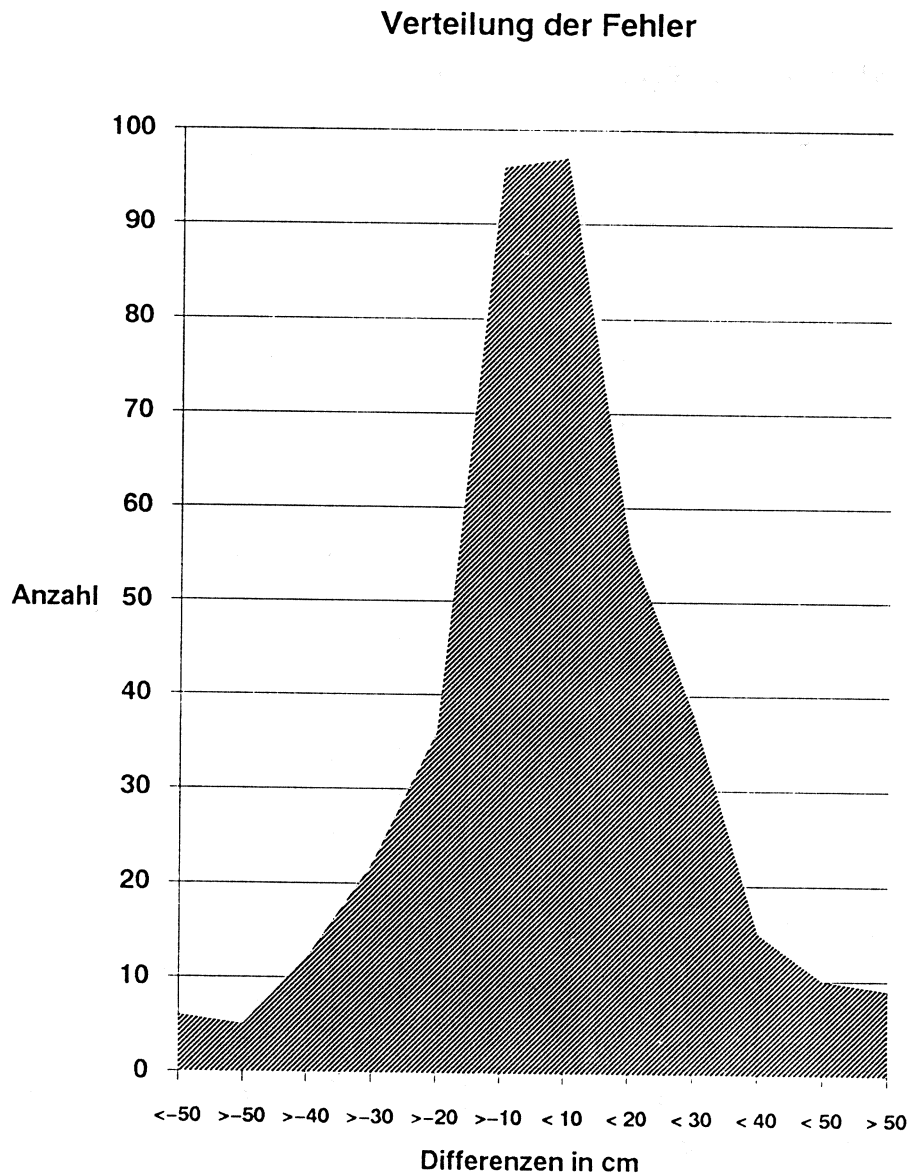
(Modell 1)
 (Modell 2)

Geländecharakter: sehr unruhige Oberfläche

Zusammenfassung der Resultate:

Anzahl Vergleichspunkte:	402	mittlerer Fehler	21 cm
Anzahl Differenzen < 50 cm	388	mittlerer Fehler	18 cm
Mittelwert			3 cm
Anzahl negative Differenzen	177		
Anzahl positive Differenzen	225		

Figur 9: Verteilungskurve



Es sind 48 weniger negative als positive Differenzen vorhanden, was nicht unbedingt auf normalverteilte Fehler hinweist. Es ist allerdings möglich, dass die Abweichung durch den Einfluss grösserer Geländemodellfehler entstanden ist.

Die Klasseneinteilung hat die Kurve an den Enden insofern verfälscht, als alle Fehler > 50 einer einzigen Klasse zugeteilt wurden. Dies sind aufgrund der Statistik immerhin 14 Differenzen.

Der mittlere Fehler von 18 cm ist dem stark coupierten Gelände zuzuschreiben. In der Ebene treten solche Fehler nicht auf.

Tabelle 1: *Auszug aus der Differenzberechnung*

[illegible]

Auswertung 2

Modellberechnung aus Profilaufnahmen mit Einzelpunkten (Modell 2)
Vergleichspunkte aus Profilaufnahmen mit Strukturlinien (Modell 1)

Geländecharakter: sehr unruhige Oberfläche

Zusammenfassung der Resultate:

Anzahl Vergleichspunkte:	402	mittlerer Fehler	32 cm
Anzahl Differenzen < 50 cm	362	mittlerer Fehler	18 cm
Mittelwert			0 cm
Anzahl negative Differenzen	202		
Anzahl positive Differenzen	200		

Die Fehler sind erstaunlich gut normalverteilt. Der Mittelwert beträgt 0, es sind gleich viele positive wie negative Differenzen.

Figur 10: Verteilungskurve

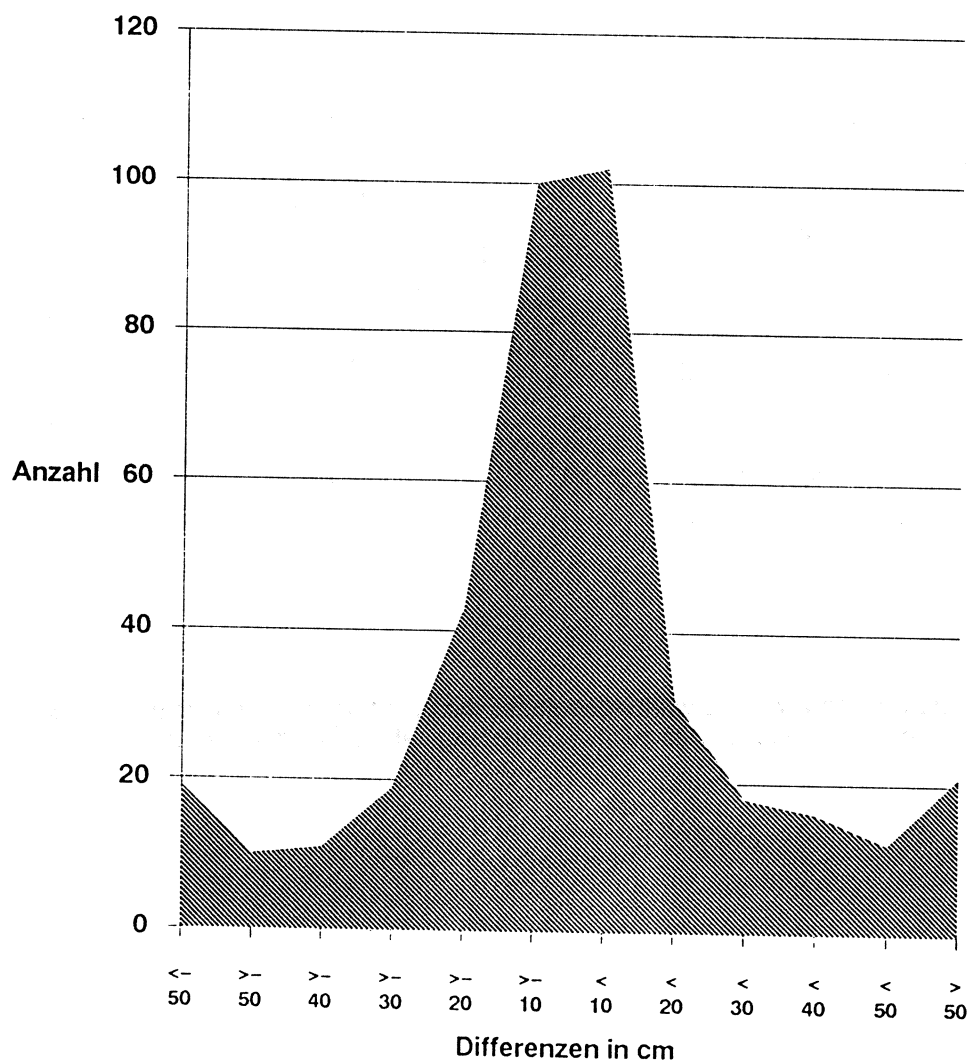
Verteilung der Fehler

Tabelle 2: Auszug aus der Differenzberechnung

Vergleich von gerechneten DTM-Punkten mit elektronisch eingemessenen Punkten															
DTM Modell:		Einzelpunkte (in Profilen registriert)													
Vergleichspunkte		Einzelpunkte + Strukturlinien													
Anzahl Messungen (alle)		402		Anzahl											
Mittlerer Fehler		32 cm		Diff		Diff									
Anzahl Messungen (Fehler < 50 cm)		362		< 0		> 0									
Mittlerer Fehler		18 cm													
Mittel		0 cm		202		200									
				<-50	>-50	>-40	>-30	>-20	>-10	< 10	< 20	< 30	< 40	< 50	> 50
Nr	Hoehe	DTM	Diff.	19	10	11	19	43	100	102	31	18	16	12	21
102	1432.67	1432.99	-0.31			1									
105	1432.11	1432.47	-0.36			1									
106	1431.95	1431.96	-0.01						1						
107	1431.68	1431.84	-0.16					1							
108	1431.59	1432.01	-0.42		1										
115	1429.62	1429.72	-0.10					1							
201	1429.38	1428.96	0.42											1	
202	1429.90	1429.90	0.00						1						
203	1429.87	1429.60	0.27									1			
251	1425.56	1426.01	-0.44		1										
263	1426.17	1426.62	-0.45		1										

Die Auswertung 2 weist erwartungsgemäss die grössere Zahl von Differenzen > 50 cm auf.
Die Fehler sind im Gegensatz zur 1. Auswertung sehr gut normalverteilt.

5.2.2 Versuch Langlis

**Geländemodell:
registriert mit dem
Geländecharakter:**

1556 Einzel- + Linienpunkte
TC1600 des ZTL (Vermessungskurs 1993)
ruhig, leicht gewellt, ohne flachen Zonen

In diesem Versuch sind herkömmliche Profilbestimmungen mit DTM-Profilen verglichen worden. Die Anwendung ist auf die Probleme des Strassenbaus ausgerichtet. Die Axpunkte der Strasse sind einnivelliert worden. Die Querprofile wurden mit der Setzlatte eingemessen.

Die gerechnete Strassenaxe ist mit dem Geländemodell verschnitten worden. Die Resultate sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Figur 11: Uebersichtsplan

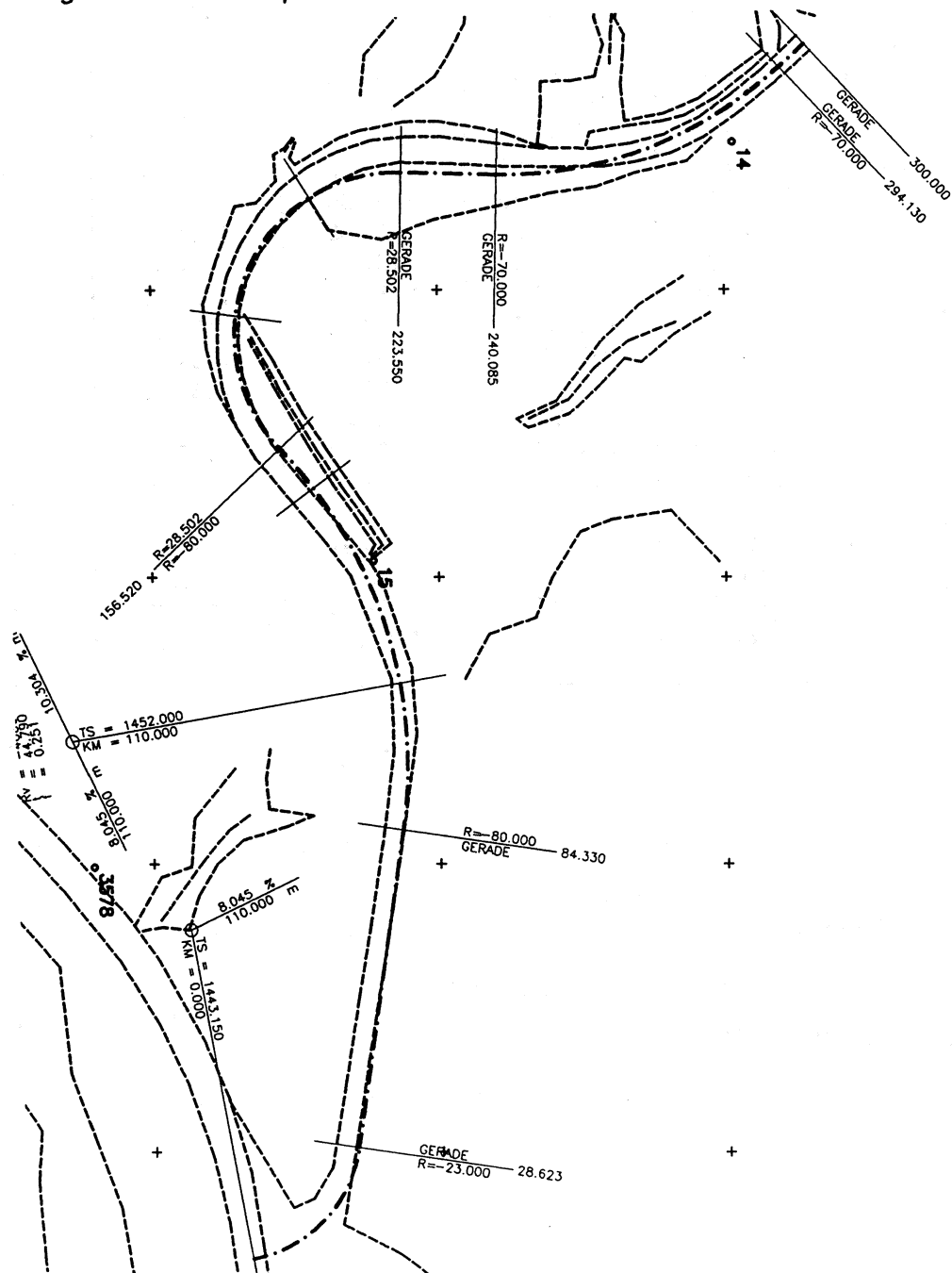


Tabelle 3: Vergleich nivellierter Höhen mit gerechneten Höhen aus dem Geländemodell.

Vergleich nivellierter Höhen mit gerechneten Höhen aus dem DTM					
Beispiel aus der Strassenprojektierung					
Profil	y	x	h(DTM)	h(Niv)	Diff
0	652368.52	193766.81	1442.82	1442.75	-0.08
7	652366.17	193773.53	1443.25	1443.12	-0.13
14	652361.87	193779.22	1443.72	1443.76	0.04
21	652356.04	193783.31	1444.43	1444.50	0.08
28	652349.23	193785.43	1445.21	1445.06	-0.15
42	652335.45	193787.45	1446.20	1446.17	-0.03
56	652321.67	193789.46	1447.28	1447.23	-0.05
70	652307.89	193791.48	1448.42	1448.47	0.05
84	652294.11	193793.50	1449.60	1449.64	0.04
93	652285.13	193794.30	1450.30	1450.31	0.01
102	652276.11	193794.09	1451.02	1451.15	0.14
111	652267.18	193792.86	1451.76	1451.92	0.17
120	652258.44	193790.64	1452.70	1452.72	0.02
129	652250.00	193787.44	1453.69	1453.59	-0.09
138	652241.98	193783.32	1454.70	1454.81	0.11
147	652234.48	193778.32	1455.65	1455.61	-0.04
156	652227.58	193772.51	1456.42	1456.29	-0.13
164	652220.74	193767.72	1457.20	1457.26	0.06
173	652212.80	193765.13	1458.12	1458.15	0.03
181	652204.46	193764.95	1459.02	1459.10	0.08
190	652196.41	193767.19	1459.91	1460.00	0.09
198	652189.37	193771.67	1460.90	1460.95	0.06
206	652183.92	193777.99	1461.75	1461.81	0.05
215	652180.54	193785.63	1462.75	1462.62	-0.13
Mittlerer Fehler					0.09

Der mittlere Fehler beträgt 9 cm, ist somit halb so gross wie beim Versuch Glaubenberg Passhöhe.

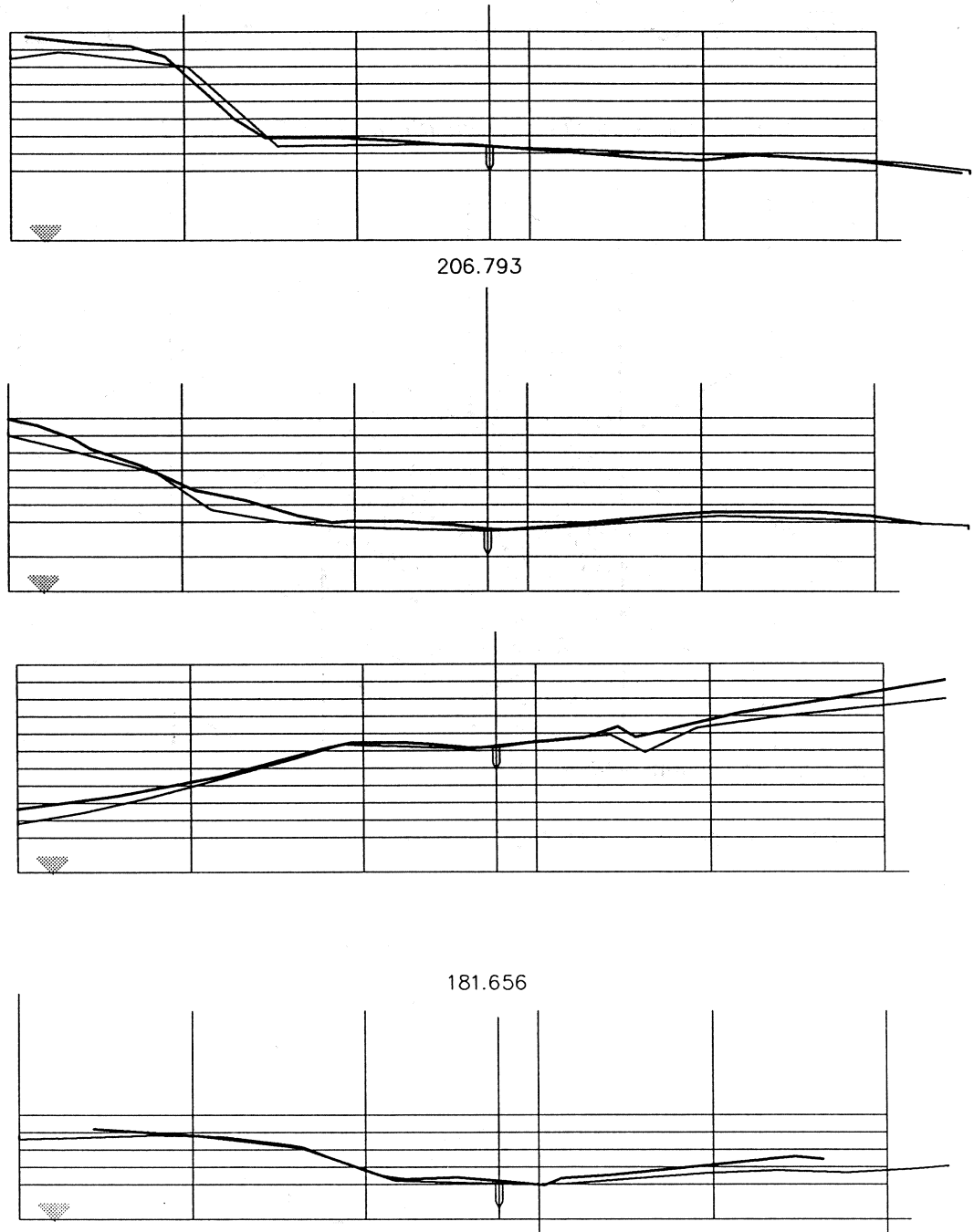
Die Differenzen zwischen Querprofilaufnahmen mit der Setzlatte und Geländemodellhöhen sind in Figur 12 dargestellt.

Die folgende Auswertung zeigt einen Vergleich zwischen Querprofilaufnahmen (Setzlatte) und gerechneten Querprofilen.

Im Bereich der Strassenoberfläche sind die Differenzen gering, auf dem gewachsenen Gelände liegen sie im Bereich zwischen 10 und 20 cm.

Figur 12: Vergleich von Profilen

Rasterwerte: Quer: 5.00 m
 Höhe: 0.50 m

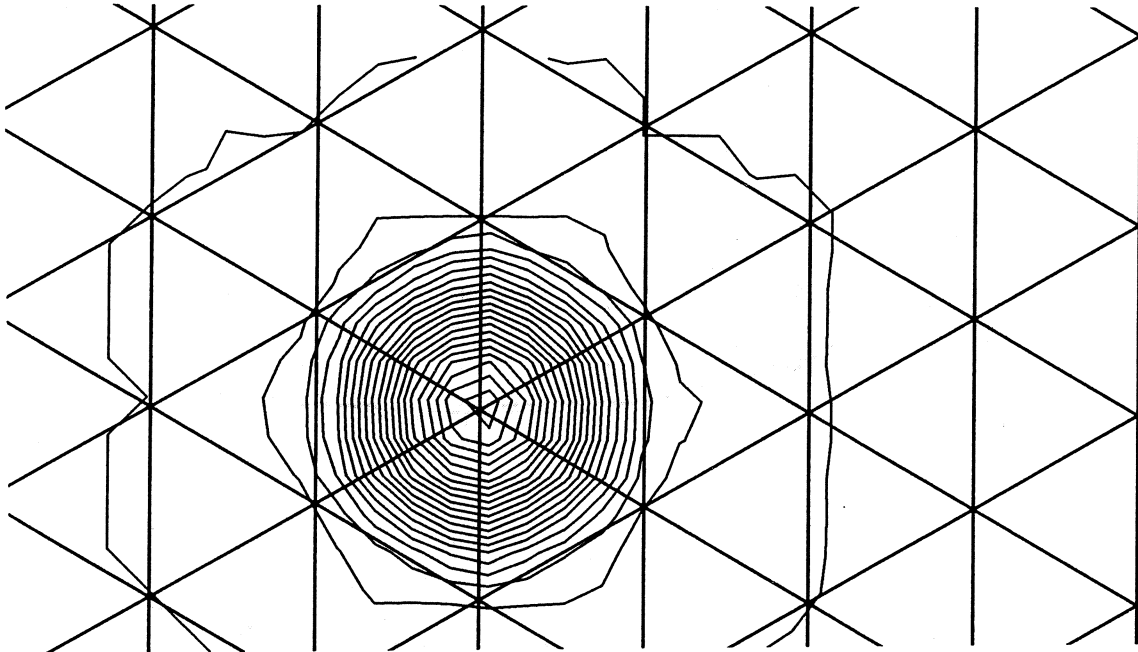


Direkte Profilaufnahmen sind aus der Sicht der Genauigkeit bestimmt besser. Sie sind aber nur lokal gültig und geben keine Auskunft über die Zwischenstrecke, was vor allem bei Massenberechnungen zu grösseren Differenzen führen kann. Im Gegensatz dazu sind Massenberechnungen aus Geländemodellaten eher besser, da auch die Geländeteile zwischen den Profilen miteinbezogen werden.

5.2.3 Die Ausbreitung eines groben Fehlers

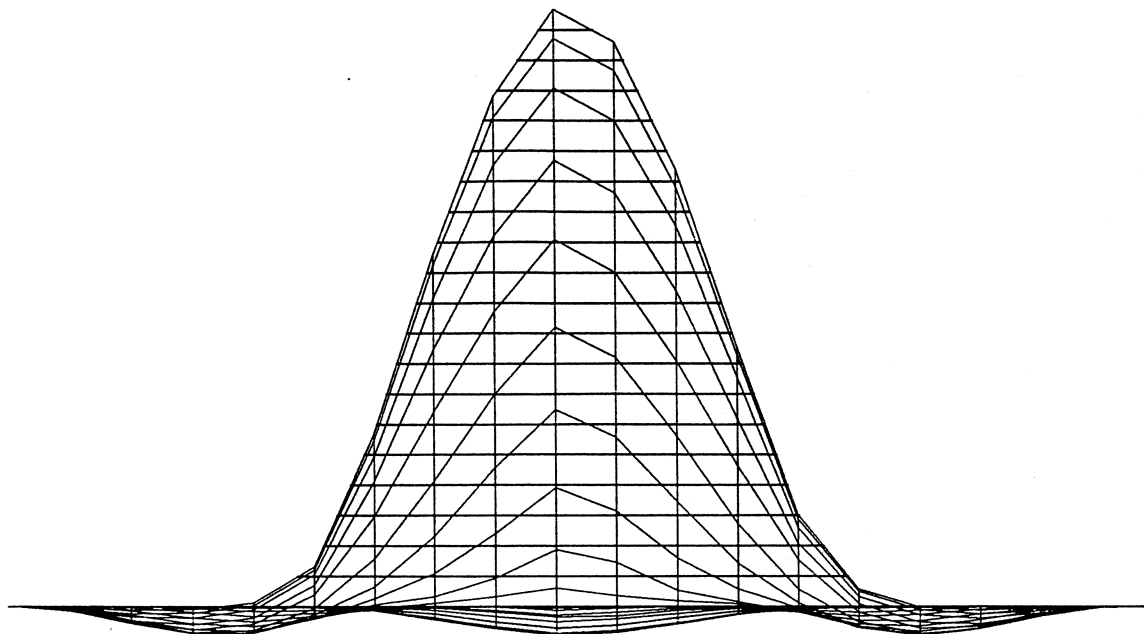
Grobe Fehler sind bei der grossenteils automatisierten Datenbeschaffung eher selten. Trotzdem scheint es wichtig, näher auf die Ausbreitung von Fehlern einzugehen. Die Geländedaten, die den nachfolgend beschriebenen Versuchen zugrunde liegen, sind simuliert. Das Sollwert-Geländemodell ist somit bekannt. Entstehende Anomalien sind leicht erkennbar.

Figur 13: Einflussbereich eines Fehlers (Seitenlänge Dreieck : 10 m)

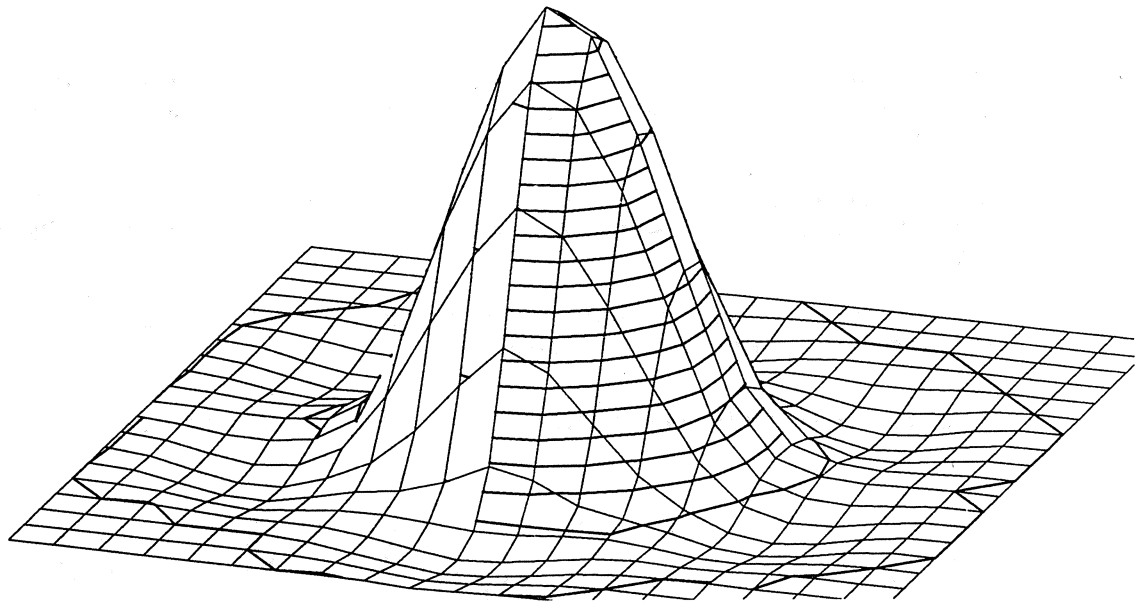


Der Fehler im Zentrum beträgt 2 m

Figur 14: Seitenansicht des Ausbreitungsbereichs



Figur 15: Perspektive Ansicht der Ausbreitung eines groben Fehlers:
 Grösster Wirkungsbereich in den direkt betroffenen Dreiecken
 Gegenwirkung (Vertiefung) im äusseren Ring (Figuren 13 und 14)



Die Figuren 13 - 15 zeigen, dass der betroffene Bereich in den direkt vom Zentrum ausgehenden Dreiecken liegt. Die Höhenkurve 0 verläuft durch die Punkte des 6-Ecks und reicht in die Zone der angrenzenden Dreiecke hinein. Hier ist der Einfluss der Punkte auf dem zweiten 6-Eck-Ring bemerkbar (siehe Einflussbereich im Kapitel Theorie von Geländemodellen)

Die leichte Mulde in Figur 14 ist eine Folge des Interpolationsverfahrens. Die Tiefe beträgt $1/20$ des Punktlagefehlers. Bei kleineren Fehlern verschwindet der Einfluss ausserhalb der direkt betroffenen Dreiecke.

Sind weitere Punkte fehlerhaft, so addieren sich deren Fehler nach dem Superpositionsgesetz, was im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

5.2.4 Der Einfluss von Höhenfehlern am Höhenkurvenverlauf

Der folgenden Versuch basiert auf zwei simulierten Geländemodellen, welche nach den gleichen Ansätzen gerechnet wurden (Modell 1 : Höhen = Funktionswerte, Modell 2: Höhen = Funktionswerte + eine Streuung von 10 cm).

Modell 1: (schwarz-weiss Muster in Figur 16)

Kleine Geländeneigung

Höhen sind Funktionen der Lagekoordinaten y, x .

Aequidistanz der Höhenkurven : 20 cm (Gerade Werte: 0,20,40,... cm)

Höhenkurven: Abgrenzungen der schraffierten Bereiche

Schraffierte Bereiche: Einflusszonen von 20 cm

Mit zunehmender Neigung werden die Einflusszonen schmaler, mit abnehmender Neigung hingegen immer breiter (Figur 16).

Modell 2: (geknickte Einzelkurven in Figur 16)

Kleine Geländeneigung

Höhen sind Funktionen der Lagekoordinaten y, x +- Streuung von 10 cm

Aequidistanz der Höhenkurven 20 cm (ungerade Werte: 10,30,50 ,... cm)

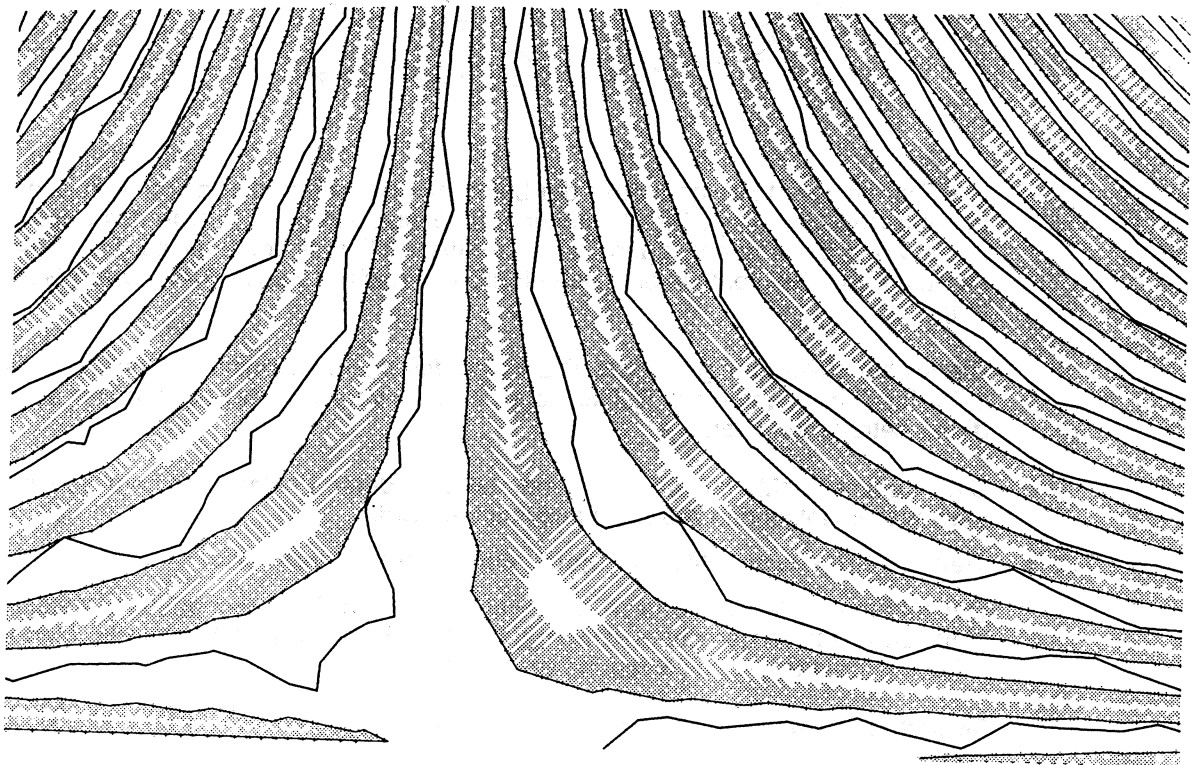
Höhenkurven: Zickzacklinien innerhalb der schraffierten Bereiche

Die Höhenkurven bewegen sich in der aus Modell 1 definierten schraffierten Zone. Der Streubereich wächst mit abnehmender Neigung und wird schliesslich im flachen Gelände unendlich.

Wichtig scheint hier die Feststellung, dass Höhenkurven im flachen Gebiet sehr unsicher sind. Auch die Formgebung scheint sehr willkürlich zu werden.

Die Lage der Höhenkurve ist sehr unsicher, was aber keinen Einfluss auf Berechnungen mit Hilfe von Geländemodellprogrammen hat.

Figur 16: Gestörter Höhenkurvenverlauf als Folge von 10 cm Höhenfehlern



5.2.5 Fehler am Volumen als Folge der Fehler am Geländemodell

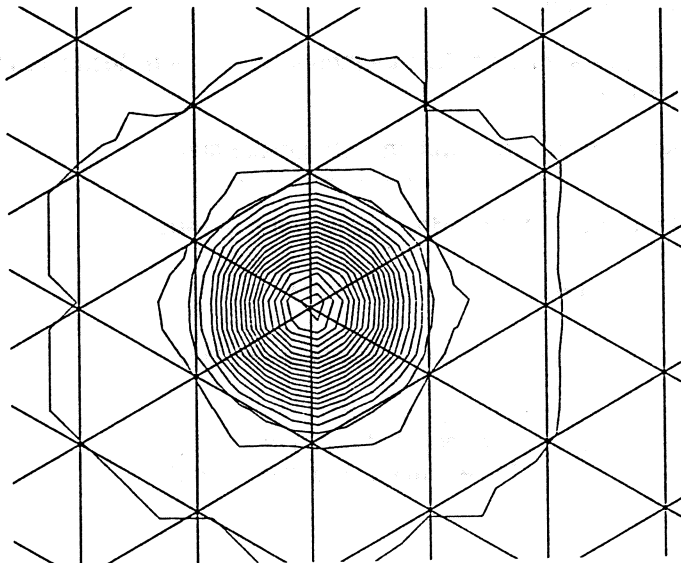
Höhenfehler wirken sich direkt auf alle Folgeberechnungen aus. Der folgende Versuche zeigen den Einfluss von Höhenfehlern auf Volumenberechnungen.

Versuchsanordnung der Fehlermodelle:

Gelände- charakter	Dreiecks- seite	Anzahl zufällige Fehler	Fehler in cm	
eben	10			Originalgelände
eben	10	1	10	Fehlergelände
eben	10	3	10	Fehlergelände
eben	10	8	10	Fehlergelände
eben	5	1	10	Fehlergelände
eben	5	8	10	Fehlergelände
eben	5	1	50	Fehlergelände
kupiert	10	8	10	Fehlergelände
kupiert	10	8	5	Fehlergelände

Die Volumenfehler ergeben sich als Differenzen zweier Berechnungen, Berechnung mit Originalgelände und Berechnung mit Fehlergelände.

Figur 17: Testgelände



Resultate der Auswertung:

Anzahl Fehler	Fehler cm	Dreiecksseite m	Fläche m ²	Volumenfehler m ³
---------------	--------------	--------------------	--------------------------	---------------------------------

flaches Gelände:

1	10	10	6495	8.66
3	10	10	6495	25.98
8	10	10	6495	77.94
1	10	5	1623	2.16
8	10	5	1623	17.32
8	50	5	1623	86.60

stark kupiertes Gelände (simuliert)

8	0	10	6495	-26'866.55	Sollvol.
8	10	10	6495	-26'955.83	Istvol.
8	10	10	6495	69.28	Diff.
8	5	10	6495	-26'921.19	Istvol.
8	10	10	6495	34.64	Diff.

Folgerungen:

- Die Fehler beeinflussen sich gegenseitig kaum. Das Superpositionsgesetz darf somit angewendet werden.
- Die Resultate aus stark kupierten Geländemodellen sind den Resultaten im flachen Gelände ähnlich.
- Kleinere Vermaschungsabstände wirken sich günstig aus.

Aus den Resultaten lässt sich folgende Formel herleiten:

mVol(m³)	=	0.866 · Distanz² · mH
0.866	=	cos (60°) (Dreieckswinkel)
mVol	=	Fehler am Volumen in m
Distanz	=	Vermaschungsabstand in m
mH	=	Höhenfehler am Geländemodell in m

5.2.6 Fehlerfortpflanzung nach dem Gausschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$mVol(m^3) = 0.866 \cdot Distanz^2 \cdot mH \cdot n^{1/2}$$

Die Formel hat keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Einerseits fehlt der Einfluss der Lagefehler und andererseits ist die Versuchsanordnung stark idealisiert.

Beispiele:

Fläche	Anzahl Punkte	Distanz	mH	mVol
m ²	ca.	m	m	m ³
1000	18	10	0.1	36
5000	74	10	0.1	74
10000	140	10	0.1	102
1000	56	5	0.1	17
5000	259	5	0.1	35
10000	509	5	0.1	49

Ein möglicher allgemeiner Ansatz zur Fehlerabschätzung wäre:

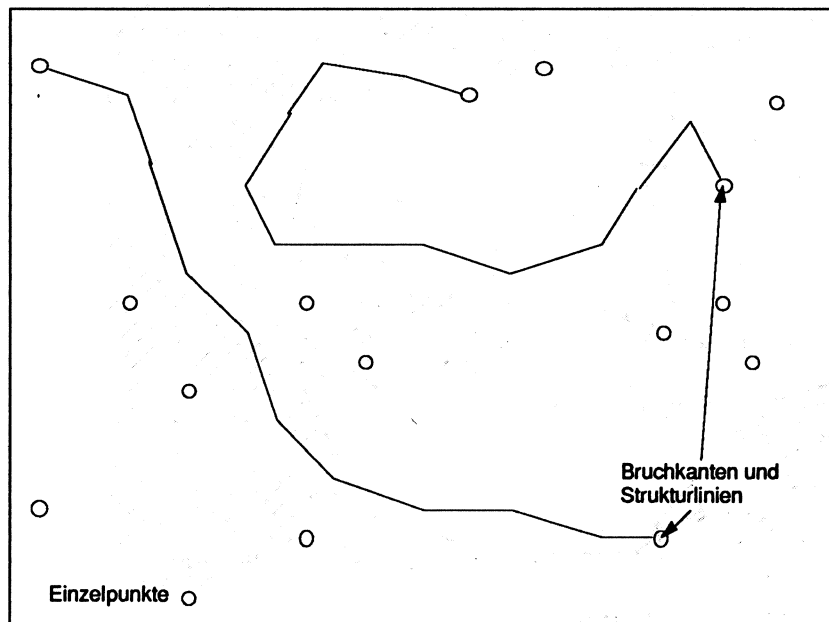
$$mVol(m^3) = k1 \cdot fn(\alpha, \beta, \gamma) \cdot k2 \cdot (Distanz)^2 \cdot k3 \cdot (Fläche)^{1/2}$$

k1, k2, k3 = Koeffizienten
 α, β, γ = Dreiecksform
 Distanz = mittlerer Vermaschungsabstand
 Fläche = Fläche des Einzugsgebietes

6 Bestimmen von Teilmodellen

Hinter Geländemodellen verbergen sich im allgemeinen sehr grosse Datenberge. Die Verarbeitungszeiten sind dementsprechend beträchtlich, die Uebersicht geht verloren. Es lohnt sich deshalb, wenn man losgelöste Teilbereiche bearbeitet. Am Ende dieser Arbeiten muss ein neuer Originaldatensatz erstellt werden.

Figur 1: Ursprungsmodell vor der Bearbeitung



6.1 Definition und Berechnung der Umrisslinie des Teilbereichs

Die Umrisslinie ist das Längenprofil längs der Bereichsgrenze und beinhaltet:

- Einzelne Profilpunkte mit konstantem Profilabstand
- Schnittpunkte mit bestehenden Bruchkanten und Strukturlinien

Der Profilabstand richtet sich nach der Geländecharakteristik. Er soll so gross gewählt werden, dass die einzelnen Profilabschnitte auf dem Gelände aufliegen.

Die Berechnungen sind Teile von DTM-Programmen.

6.2 Aufteilen in Teilmodelle

Bruchkanten und Strukturlinien werden beim Schnittpunkt mit einer Umrisslinie aufgebrochen. Der Schnittpunkt ist Linienendpunkt beider Linien und zugleich Profilpunkt der Umrisslinie.

Aufteilen des Ursprungsmodells in zwei Modelle mit folgendem Inhalt:

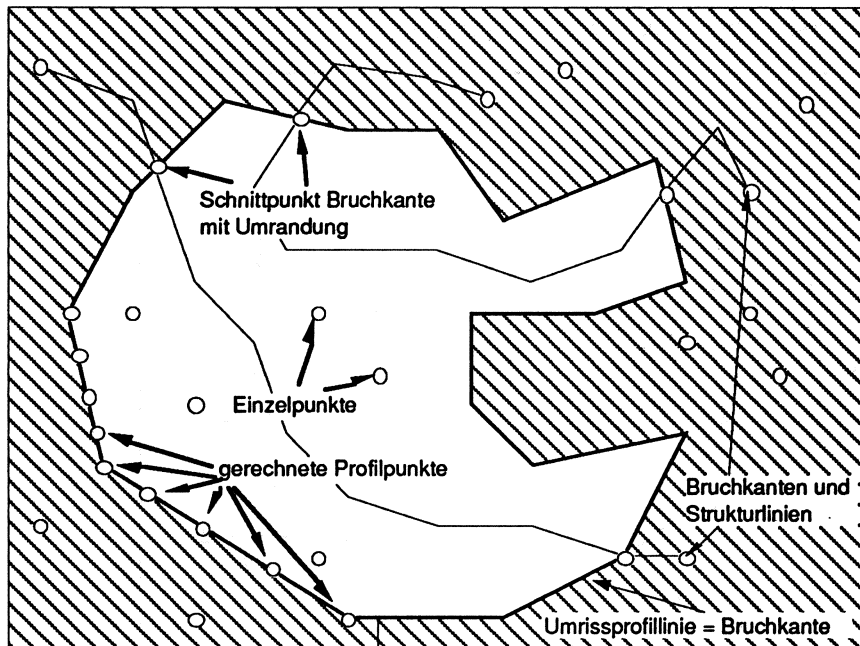
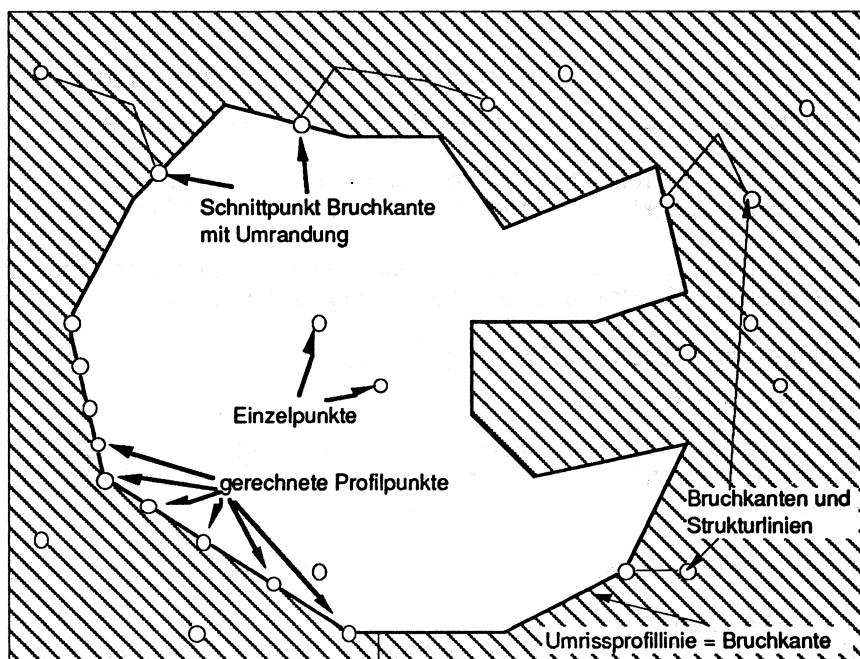
Aeusseres Teilmodell :

Bruchkanten + Einzelpunkte ausserhalb der Schnittnlinie + Schnittnlinie

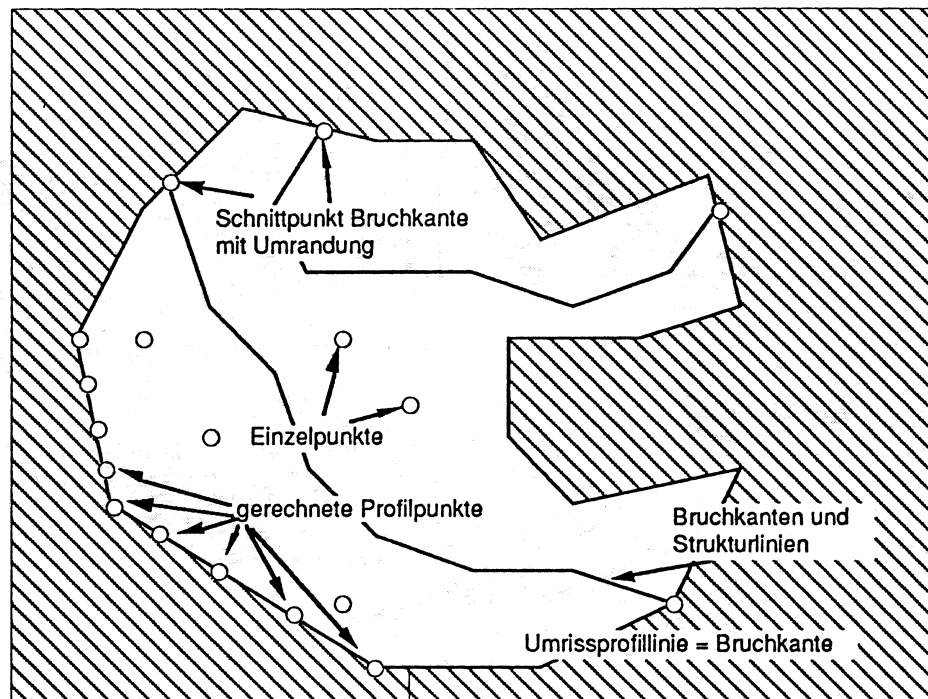
Inneres Teilmodell :

Bruchkanten + Einzelpunkte innerhalb der Schnittlinie + Schnittlinie

Falls diese Auftrennung richtig durchgeführt wird, so kann jedes Teilmodell für sich allein bearbeitet werden. Es muss nur darauf geachtet werden, dass die Umrisslinie nicht verändert wird. Innerhalb und ausserhalb der Umrisslinie können beliebige Veränderungen vorgenommen werden.

Figur 2: Definition der Umrisslinie des Teilbereichs.**Figur 3:** Aeusseres Teilmodell

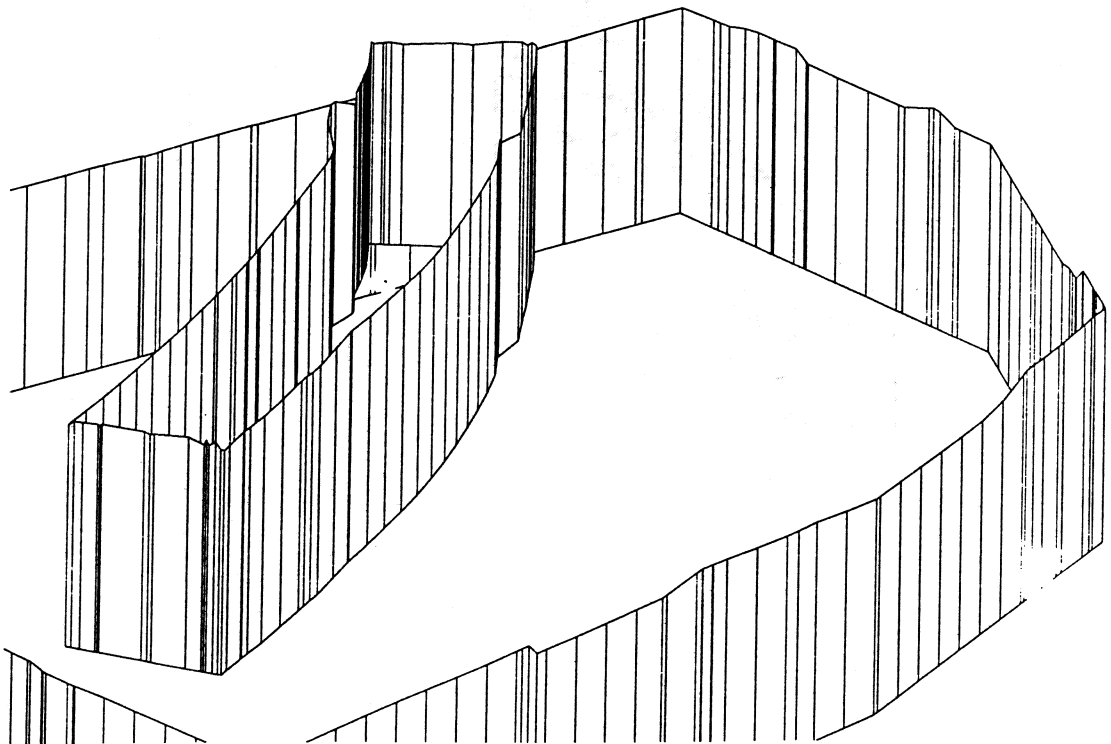
Figur 4: Inneres Teilmodelle



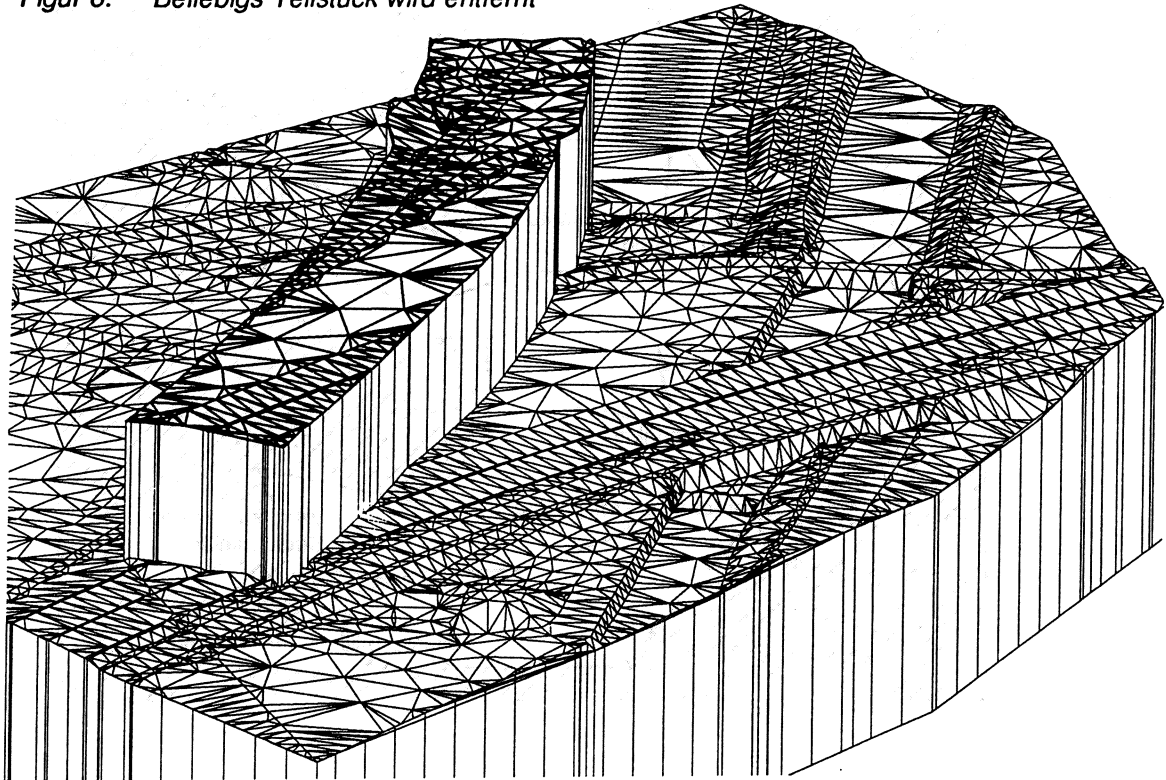
6.3 Beispiel 1: Modell Fadenbrücke

Aus dem Modell Fadenbrücke ist ein beliebiges Teilmodell herausgeschnitten worden. Der innere, wie auch der äussere Teil sind aus unabhängigen Datensätzen bestimmt worden. Die folgenden Figuren zeigen die einzelnen Bearbeitungsschritte.

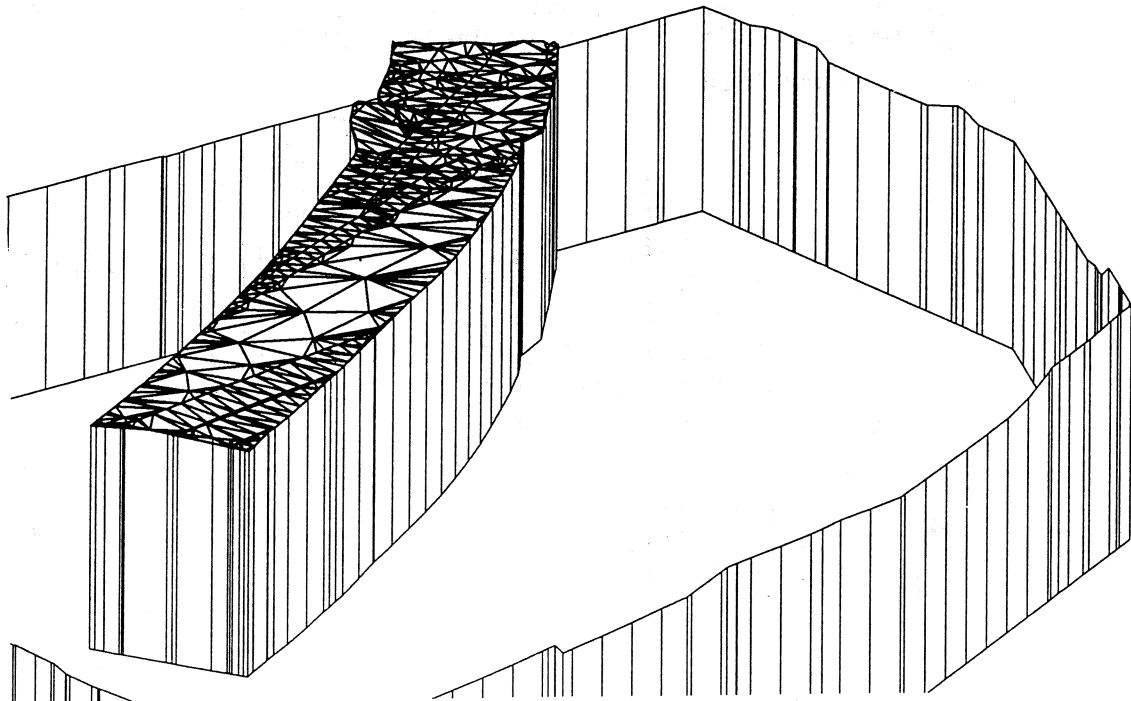
Figur 5: Umrisslinien



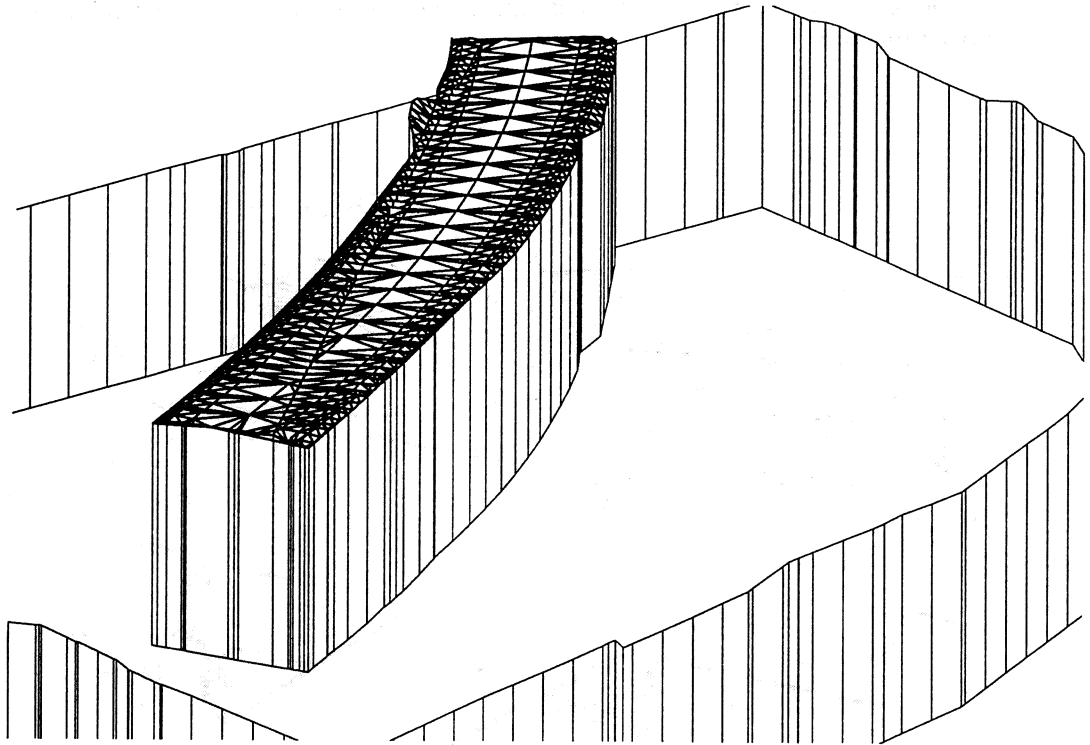
Figur 6: Beliebigs Teilstück wird entfernt



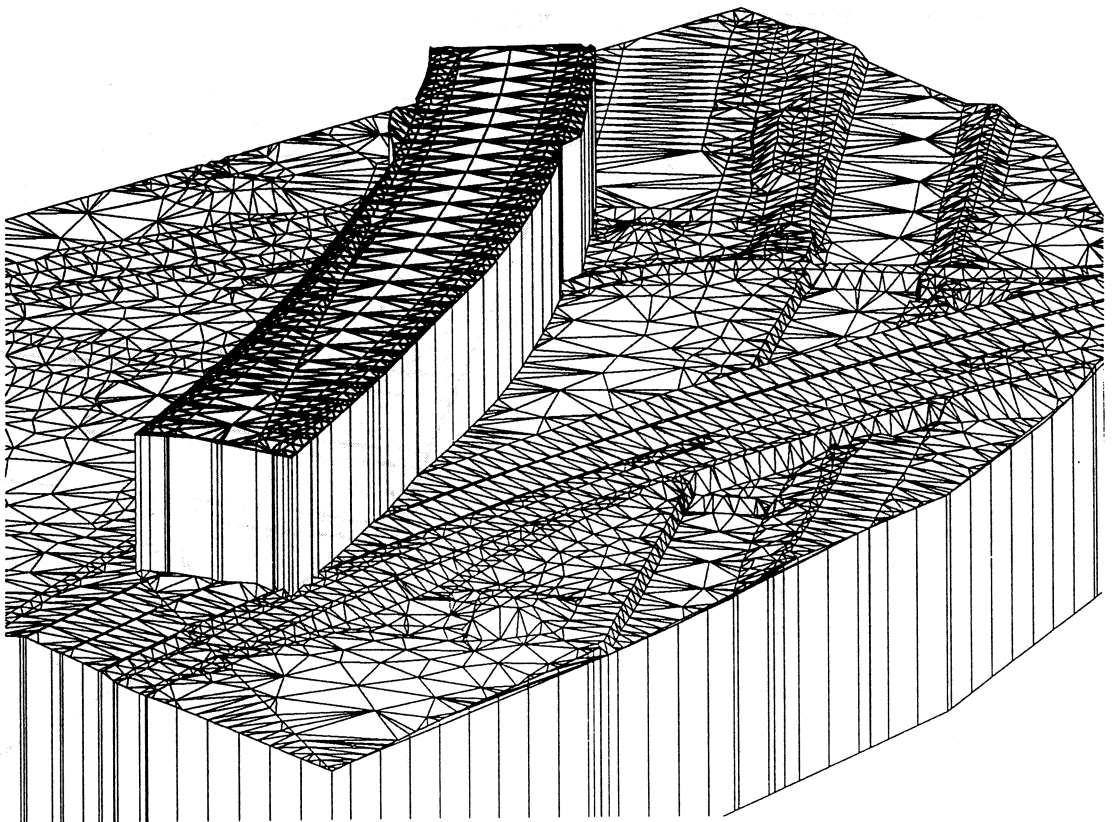
Figur 7: Das entfernte Teilstück als eigenständiges Geländemodell



Figur 8: Neues Strassenprojekt im Teilmodell

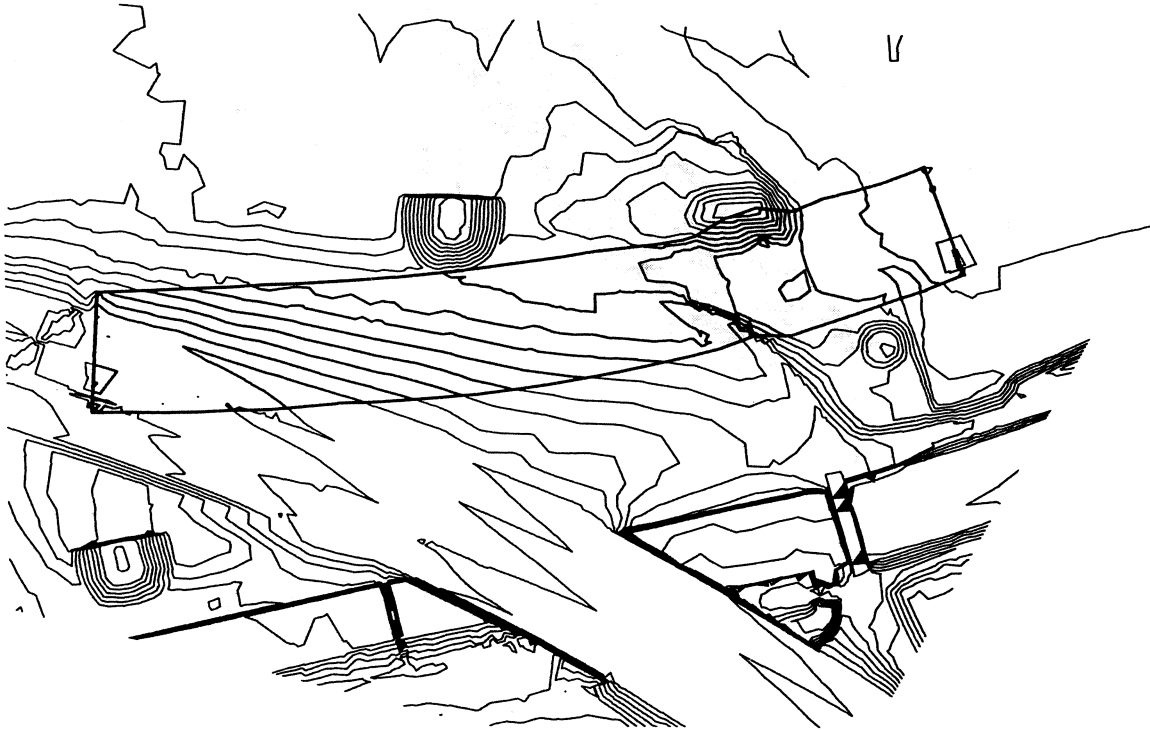


Figur 9: Integration des neuen Teilmodells

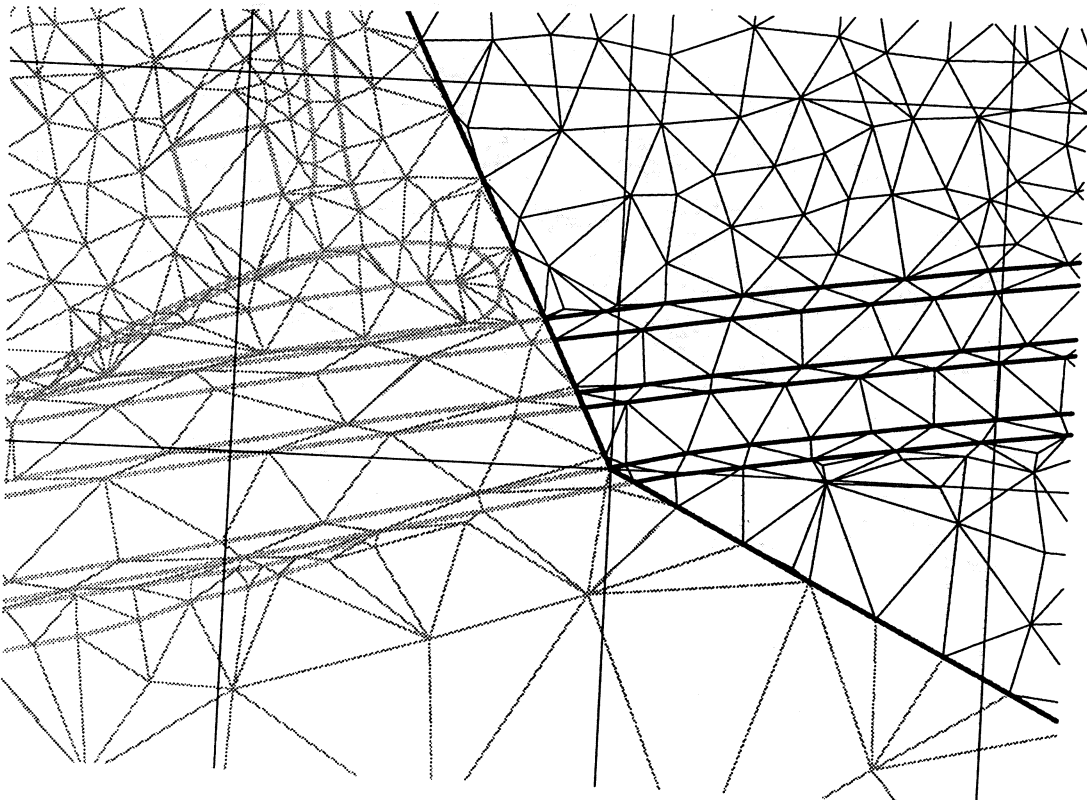


Figur 10: Höhenkurvenverlauf im äusseren und inneren Teilmodell

Die Höhenkurven des äusseren Teilmodells fliessen nahtlos in die Höhenkurven des inneren Teilmodells.



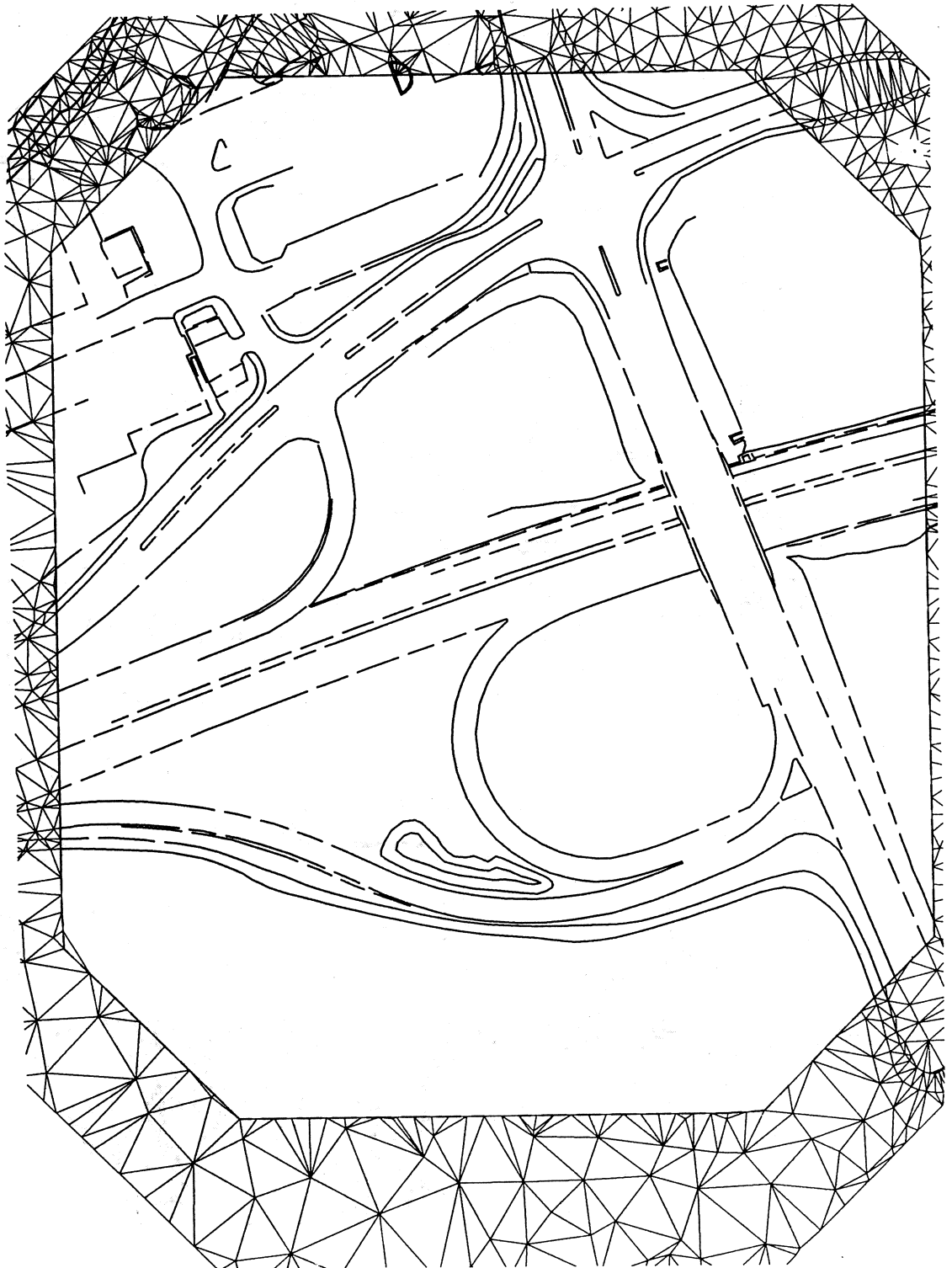
Figur 9: Vergrößerung einer Schnittzone



6.4 Beispiel 2: Modell N2-Anschluss Stans-Süd

Figur 11: Schnitt durch den N2-Autobahnanschluss Kreuzstrasse

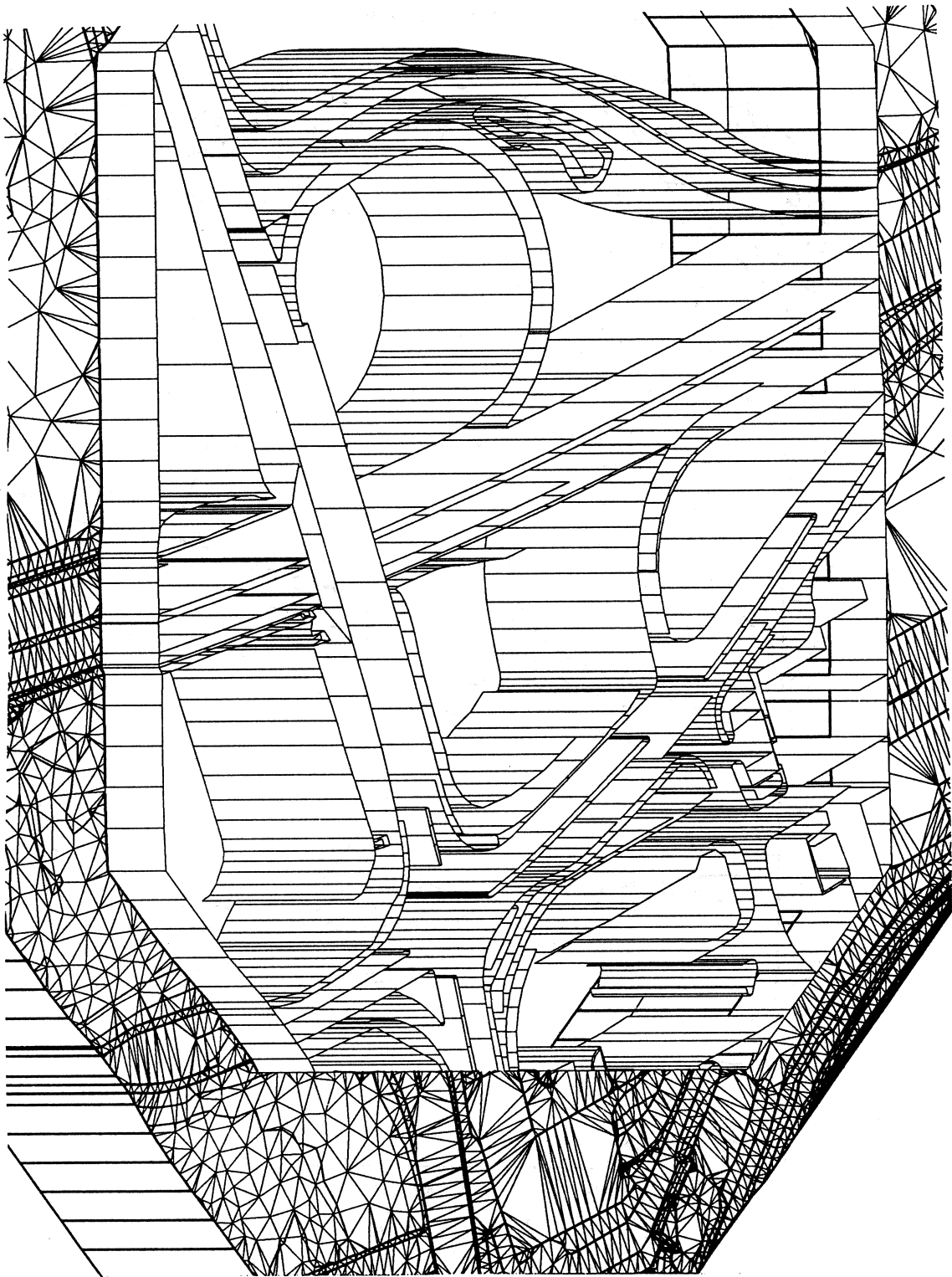
äusserer Teil: Dreiecksvermaschung
innerer Teil: Bruchkanten + Strukturlinien



Figur 12: Schnitt durch den N2-Autobahnanschluss Kreuzstrasse

äusserer Teil: Dreiecksvermaschung

innerer Teil: Profile der Bruchkanten + Strukturlinien



7 Schlussfolgerungen

7.1 Allgemeines

Die folgenden Aussagen, Empfehlungen, Feststellungen und Massnahmen haben sich aus den umfangreichen Arbeiten mit Geländemodellierungsprogrammen und Geländemolldaten ergeben. Es ist anzunehmen, dass die modernen Verfahren zur Bestimmung von Digitalen Terrainmodellen (DTM) ständig verbessert und erweitert werden. Dem Anwender stehen fast unbeschränkte Möglichkeiten zur Verfügung.

Ein grosses Problem ist und bleibt der Umgang mit den zum Teil riesigen Datenbergen, die es zu verarbeiten und zu verwalten gilt. Man stelle sich vor, dass jeder Punkt und jede Linie zum Resultat beitragen muss. Es ist somit verständlich, dass das Schwergewicht bei den Daten und nicht bei der Hard- und Software liegen muss.

7.2 Rechtecksvermaschung versus Dreiecksvermaschung

Rechtecksvermaschung:

Durch die Gleichmässigkeit der Modellierung mit Rastern entsteht ein für das menschliche Empfinden "ruhiges" Bild der Geländeoberfläche, was Vorteile hat. Dafür treten tatsächliche Geländespitzen und Geländelinien weniger deutlich in Erscheinung, was zu örtlichen Modellungenauigkeiten führt.

Dreiecksvermaschung:

Die Dreiecksvermaschung ist die natürliche, fast logische Methode und damit für den Laien leicht nachvollziehbar. Die Anpassungsfähigkeit ist optimal. Alle Stützpunkte, einschliesslich der Kanten und Strukturlinien werden in die Vermaschung integriert, wobei Kanten- und Strukturlinien als Dreiecksseiten verwendet werden.

7.3 Hard- und Software

7.3.1 Funktionstüchtigkeit von Hard- und Software

Da meisten Programme sind aus der PC-Welt. Die getesteten Programme sind deshalb ausschliesslich PC-Programme. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit wirkt sich kaum hemmend aus. Die Verarbeitungszeit für Punktmengen zwischen 100 und 10'000 bewegt sich zwischen einigen Sekunden bis ca. 8 Minuten. Alle Resultate sind mit Auto-CAD weiterbearbeitet worden.

7.3.2 Vergleich der Auswerteergebnisse

Da alle Programme die Dreiecke nach dem Kriterium von Delaunay vermaschen, sind keine Differenzen festzustellen. Unterschiede resultieren nur, falls die Vermaschung zwangshalber verändert wird (Definition von harten Bruchkanten und weichen Strukturlinien). DEMPAC und CIP ermöglichen diesen Schritt, Quicksurf und Quadrangle kennen die Zwangsvermaschung nicht. Die angekündigte neue Version von Quicksurf kennt erstmals auch Bruchkanten. Die Bruchkanten müssen hier über AutoCAD definiert werden.

Man darf annehmen, dass in naher Zukunft alle Programme mit gleichen Vermaschungsmöglichkeiten ausgerüstet sein werden.

7.3.3 Möglichkeiten der einzelnen Programmsysteme

Es können alle wichtigen Aufgaben im Zusammenhang mit Geländemodellen (Quer- und Längenprofilberechnung, Massenberechnung, Höhenkurven, perspektive Darstellungen) gelöst werden. Während Quicksurf und Quadrangle auf AutoCAD angewiesen sind, können bei DEMPAC und CIP alle Berechnungen direkt, d.h. ohne Zusatzprogramme, ausgeführt werden.

7.3.4 Vermaschungsmethode

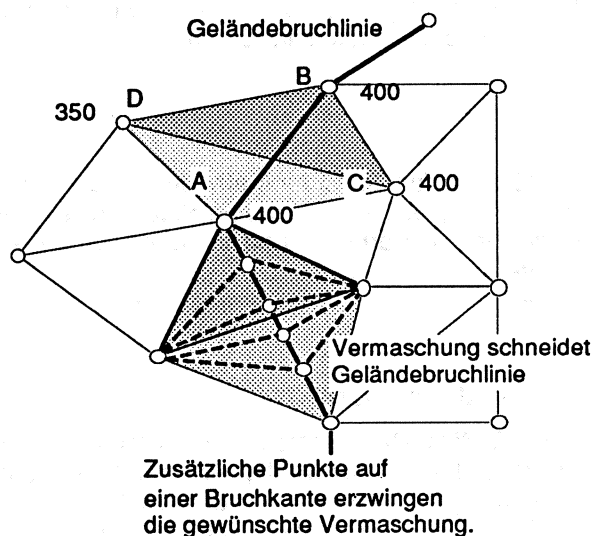
Die Dreiecksvermaschung richtet sich wie oben erwähnt bei allen Programmen nach dem Kriterium von Delaunay (siehe Theorie Geländemodelle). Bei einzelnen Programmen kann eine den tatsächlichen Geländeformen angepasste Vermaschung (in Figur 1: Linie von A nach B) erzwungen werden.

7.3.5 Bedingung an die Programmsysteme:

Bedingungen an Programme:

Vermaschung nach Delaunay mit der Möglichkeit der Zwangsdefinition bestimmter Dreiecksseiten.

Figur 1: Erzwungene Vermaschung



Massnahmen

Falls kein Zwang auf die Vermaschung ausgeübt werden kann, so müssen die Punkte auf den Bruchkanten und Strukturlinien verdichtet werden.

Folgen bei fehlerhafter Vermaschung

Grobe Verfälschung des Geländemodells

7.3.6 Interpolation

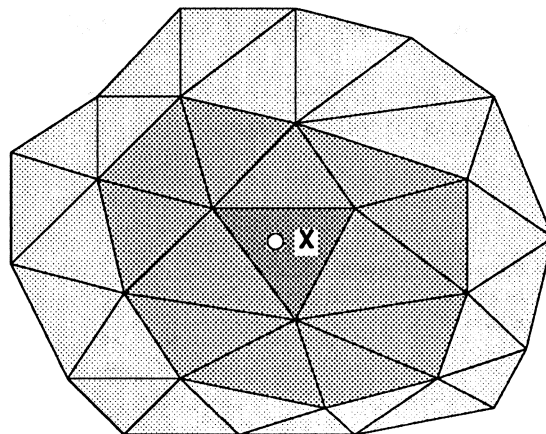
Interpolation von Höhen:

Bei der Berechnung der Höhe eines Punktes haben die Höhen der umschliessenden Dreieckspunkte das grösste Gewicht. Der Einfluss der zweiten Punktreihe ist bereits sehr klein.

Figur 2: Einflussbereich bei Interpolation eines Punktes

Einflussbereich für die Höheninterpolation eines Punktes X:

-  Maximaler Einflussbereich (innerhalb Dreieck)
-  stark reduzierter Einflussbereich (nähere Umgebung)
-  praktisch ohne Einfluss (weitere Umgebung)



7.4 Datenerfassung

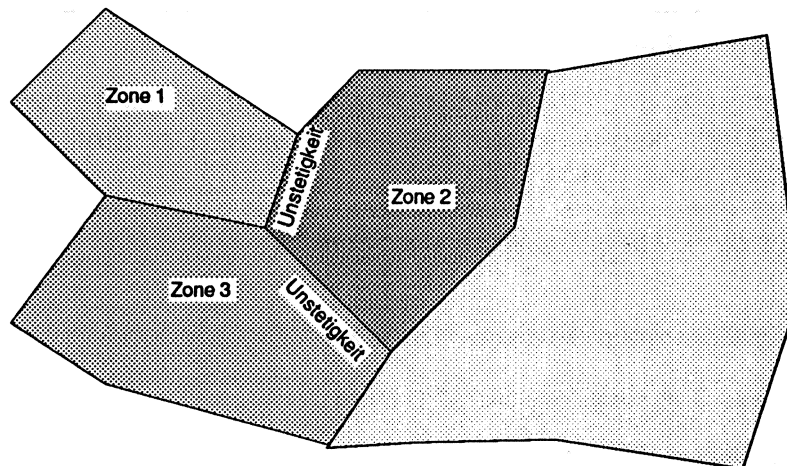
Das Gelände lässt sich weder in ein Schema noch in einen Raster einordnen. Die Aufnahmeverfahren richten sich nach den Geländeformen. Der Geländecharakter wirkt sich auf die Punktzahl aus. Im coupierten Gelände sind mehr Punkte aufzunehmen als in ebenem Gelände.

7.4.1 Massnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Geländeaufnahmen

Datenkontrollen

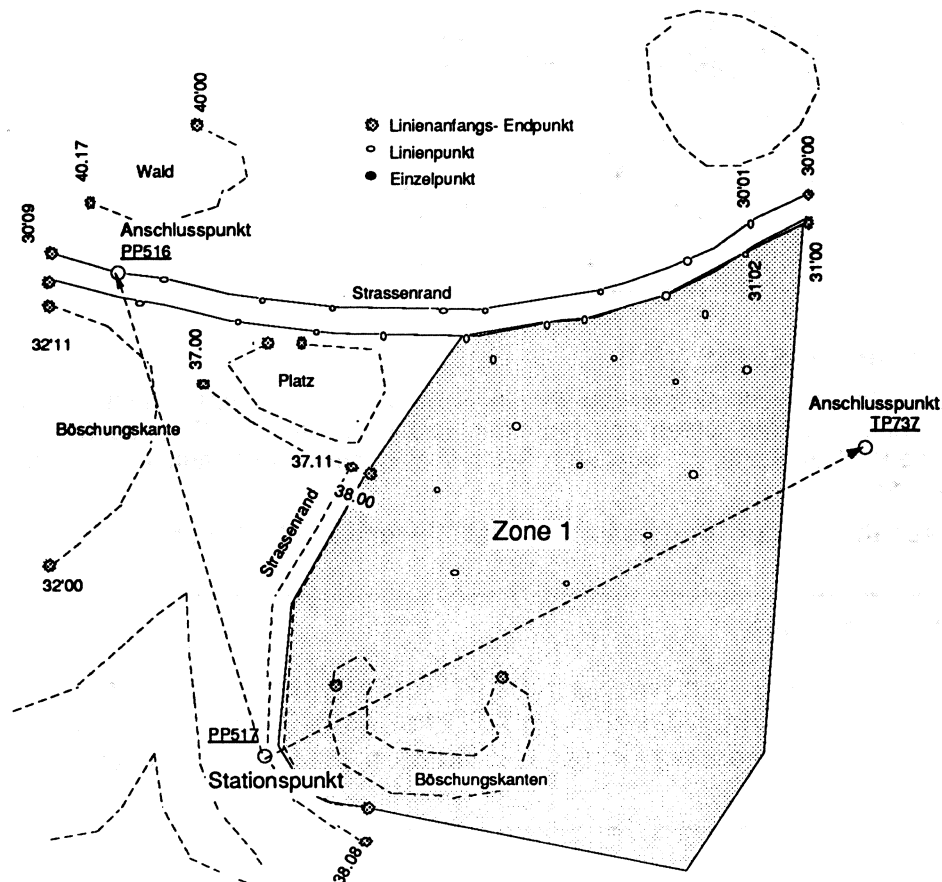
Datenkontrollen sind einfacher, falls Geländedaten zonenweise erfasst werden. Zonen können als unabhängige Modelle bearbeitet werden, sofern die Zonengrenzen als harte Bruchkanten erfassbar sind (Strassenränder, Bachränder usw).

Figur 3: Einteilung in Zonen

**Feldskizze**

Eine saubere und vollständige Skizze ist der Schlüssel zur erfolgreichen Auswertung.

Figur 4: Skizze mit Numerierung und Zoneneinteilung



Aufnahmefolge

Zuerst Bruchkanten,
dann Einzelpunkte.

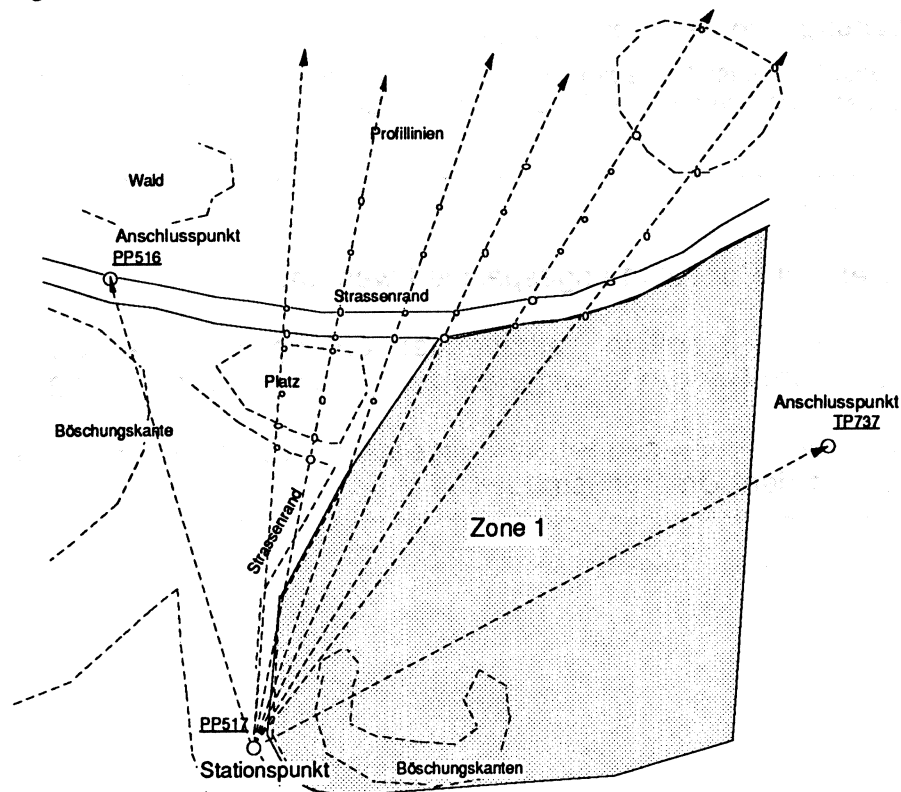
Numerierung der Bruchkanten

Redundante Eingabe von Liniencode und indexierter Liniennummern.

Keine Mustereinteilung nach der Raster- oder Sektormethode

Das Gelände lässt sich nicht in ein geordnetes Muster pressen.

Figur 5: Das Gelände lässt sich nicht in ein vorgegebenes Muster einordnen.



7.4.2 Kontrolle der Linien

Linien (harte Bruchkanten und weiche Strukturlinien) tragen entscheidend zur Form des Geländemodells bei. Ihnen gehört eine spezielle Aufmerksamkeit.

Linien sind im Feld eindeutig erkennbar und in vielen Fällen als Situationslinien bereits lagemässig bekannt. Dies sollte sowohl bei der Erfassung der Geländedaten als auch bei der folgenden Kontrolle berücksichtigt werden.

Bruchkanten und Strukturlinien können gemeinsame Schnittpunkte haben. Sie dürfen sich hingegen unter keinen Umständen schneiden.

Massnahmen

Kontrolle auf unerlaubte Linienschnitte mit Zusatzprogrammen.
Vergleich mit Linien der gleichen Grundrissform (amtliche Vermessung).
Kontrollierte Erfassung wichtiger Linienpunkte.

7.4.3 Bearbeitung grosser Datenmengen

Geländemodelle entstehen aus Programmen und Daten. Je grösser die Datenmengen sind, desto grösser werden auch die Probleme der Verarbeitung.

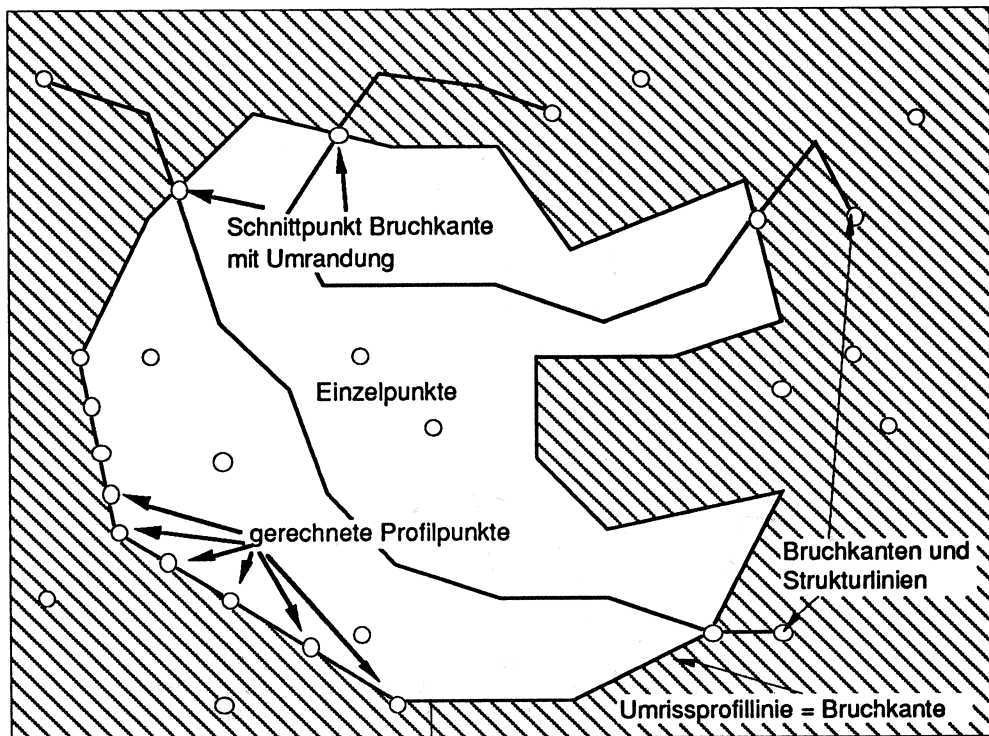
Empfehlungen

Es sollten nur Rohdaten abgespeichert werden.

Die Bearbeitung soll in Teilmodellen durchgeführt werden, wobei die "unbrauchbare Randzone" ungefähr zwei Dreiecksseiten beträgt.

Werden Teilmodelle sauber herausgeschnitten, so entsprechen auch die Randzonen dem Ursprungsmodell.

Figur 6: Teilmodell mit gut definierter Randzone



7.4.4 Digitalisierung von Höhenkurven

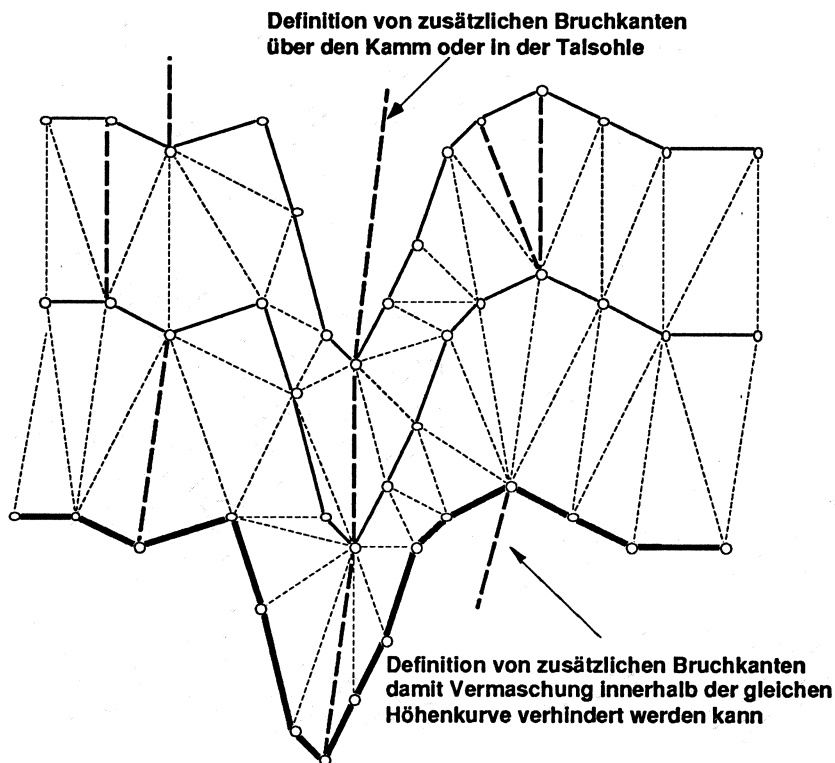
Keine horizontalen, künstlichen Terrassen

Es muss verhindert werden, dass Dreiecke aus Punkten der gleichen Höhenkurve gebildet werden können.

Massnahmen

Digitalisierung von zusätzlichen Bruchkanten zur Steuerung der Dreiecksvermaschung.

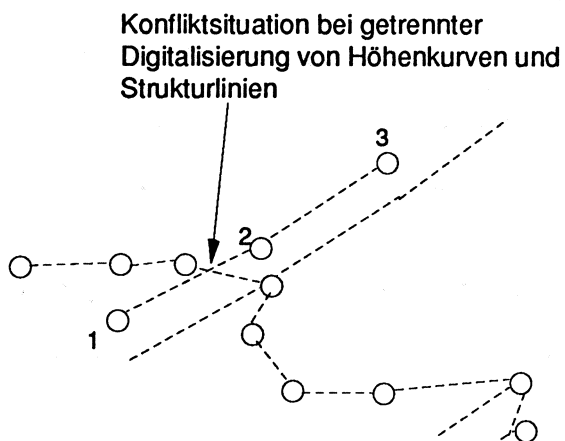
Figur 7: Definition zusätzlicher Bruchkanten (Talsole, Bergkante, Geländebrüche)



Massnahmen

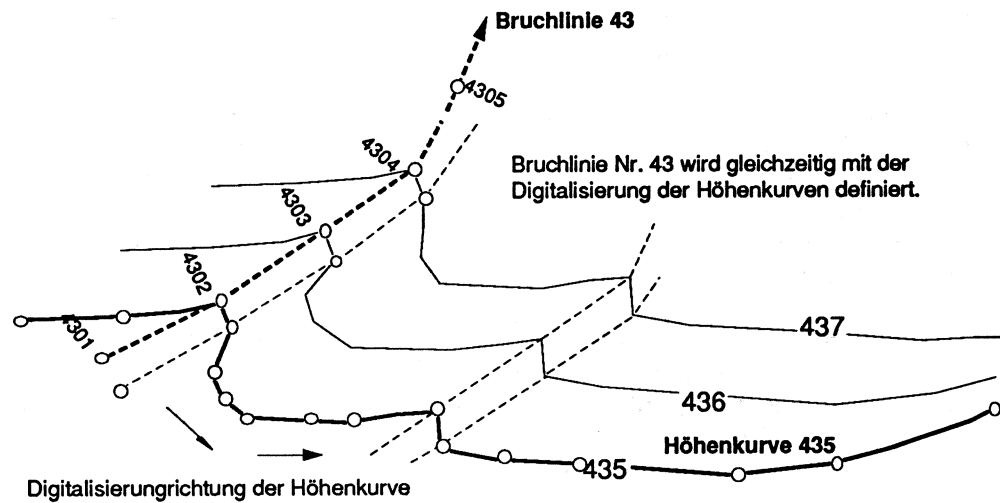
Höhenkurven digitalisieren. Beim Schnittpunkt der Höhenkurve mit einem Geländebruch Code einführen, der die automatische Definition von Geländebruchlinien aufgrund der bereits digitalisierten Höhenkurvenpunkte erleichtert.

Figur 8: Konflikte ausschalten



Das folgende Bild zeigt ein mögliches Vorgehen bei der Digitalisierung von Höhenkurvenplänen.

Figur 9: Codierungsmöglichkeit

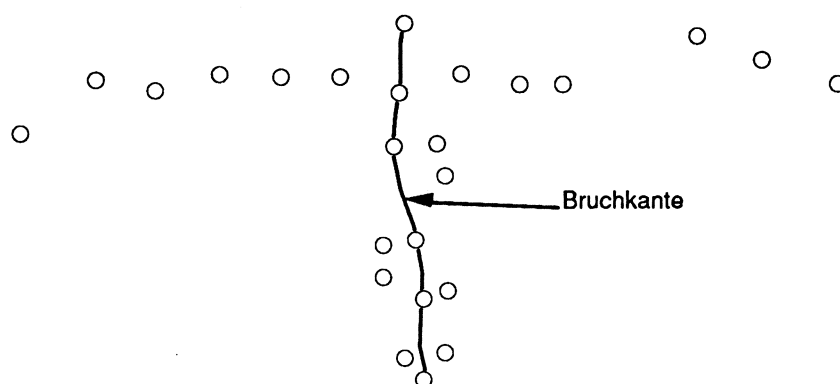


Werden Höhenkurven als harte Bruchkanten definiert, so entstehen eher terrassenförmige Geländeformen.

Empfehlung

Bei der Digitalisierung bestehender Höhenkurvenpläne sind die Höhenkurven als Einzelpunkte zu erfassen. Zur Bestimmung der Geländeform müssen harte Bruchkanten und weiche Strukturlinien miteinbezogen werden (siehe Figur 10).

Figur 10: Vorschlag zur Digitalisierung von Höhenkurven



7.5 Berechnungen

7.5.1 Koordinatenberechnungen

Berechnungsprogramme

Die Koordinatenberechnung soll mit Standardvermessungsprogrammen durchgeführt werden.

7.5.2 Massenberechnungen

Massnahmen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit

Verzicht auf alle Geländedaten ausserhalb der Bauzone.
Abgrenzung der Bauzone durch eine harte Bruchkante (Feldaufnahme).
Aufnahme der wichtigsten Einzelpunkte und Bruchkanten innerhalb
des eingezonten Gebietes.
Kontrolle der wichtigsten Punkte.
Ueberschlagsmässige Handrechnung.
Rechnerische Bestimmung der Projektmodelldaten.
Kontrolle der Vermaschung.
Perspektive Darstellung.
Ueberprüfung der Schnitzzonen der Geländemodelle.

7.6 Höhenkurvendarstellung

Lagegenauigkeit

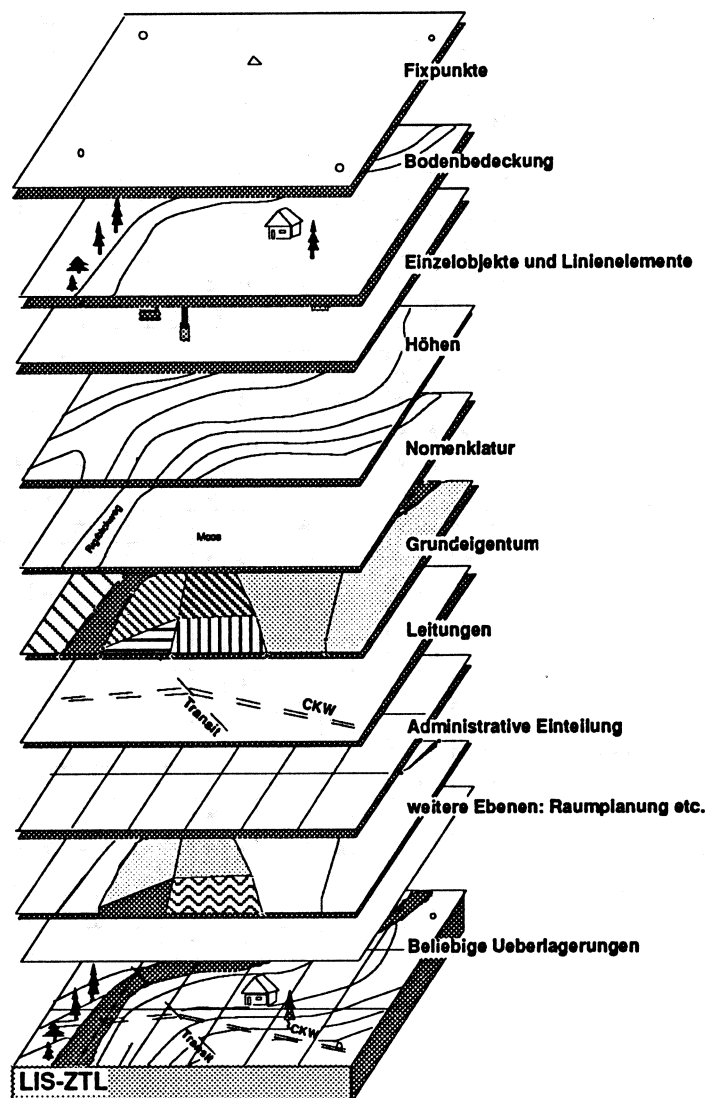
Die Lagegenauigkeit nimmt mit abnehmender Steigung ab. Die Formgebung der Höhenkurven ist in flachem Gelände sehr unsicher.

7.7 Zukunftsperspektiven

Mit dem Umbruch in der Amtlichen Vermessung eröffnet sich für die Geländemodelle eine grosse Chance, die unbedingt wahrgenommen werden soll. Für die Höhen ist in der neuen amtlichen Vermessung eine unabhängige Ebene (Layer, Coverage..) reserviert worden. Es wird eine Zukunftsaufgabe sein, die Datenebene mit den Höhen so zu definieren und sukzessive mit Geländemolldaten aufzufüllen, dass sie allgemein genutzt werden kann. Der Aufgabenbereich möglicher Nutzungen ist beinahe unbeschränkt (siehe Figur 12).

Zur Zeit sind einige Unsicherheiten vorhanden. Die Datenberge sind gewaltig, die Nachführung schwierig, der Detaillierungsgrad nicht festgelegt. Es lohnt sich aber trotzdem, die Datenebene mit den Höhen mit brauchbarem Material aufzufüllen. Dazu gehören bestimmt alle schon heute bekannten Höhenpunkte. Es lassen sich zusätzlich alle neuen Punkte aus Projekten integrieren, deren Lage als langfristig gesichert betrachtet werden kann.

Figur 11: Einteilung der neuen amtlichen Vermessung



Figur 12: Anwendungsmöglichkeiten

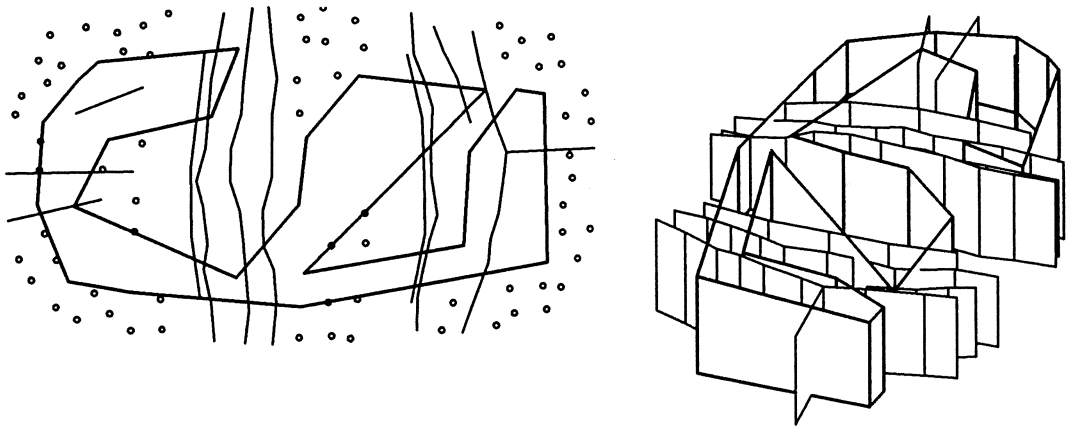
	Plan für das Grundbuch	Basisplan für alle Benutzer in beliebigem Masstab	Uebersichtsplan	Leitungskataster	Werkleitungsplan	Perspektive Geländedarstellung	Höhenkurvenplan	Zonenplan	Plan/Tabelle und Baulandreserven	Plan der Schutzgebiete / Schutzobjekte	Zivilschutzplan	Forstwirtschaftsplan	Meliorationsplan	Plan der lärmempfindlichen Gebiete	Plan der Grund- und Quellwasserschutzzonen	Plan der Fruchtfolgeflächen	Stadt- / Tourismusplan	Arealstatistik Bodenbedeckung	Arealstatistik Bodennutzung	Parzellen- / Grundeigentümerverzeichnis	Verzeichnis der Steuerwerte von Liegenschaften
Grundbuch	*			*														*		*	
Raumplanung		*	*	*		*	*	*	*	*				*		*		*	*	*	
Zivilschutz		*	*	*							*										
Militär	*	*	*	*		*	*			*				*		*					
Umweltschutz		*	*	*		*	*	*		*				*	*			*	*		
Strassenbau	*	*	*	*		*	*							*	*					*	
Bahnen	*	*	*	*		*	*		*	*				*	*	*			*	*	
Landwirtschaft		*	*	*			*	*	*				*		*	*		*	*		
Forstwirtschaft		*	*				*					*						*	*	*	
Denkmalpflege		*	*						*									*			
Statistik		*						*								*		*	*		
Ver / Entsorgung	*	*	*	*	*		*	*							*			*	*		
Meliorationswesen	*	*	*	*			*	*	*						*	*				*	
Steuerwesen	*							*												*	*
Tourismus		*	*						*								*				
Bauverwaltung	*	*	*	*		*	*	*	*	*				*	*	*	*	*	*	*	
Gemeindeverwaltung	*	*	*	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Feuerwehr		*	*	*																	
Ingenieure, Architekten	*	*	*		*	*	*		*				*	*			*	*			

A Fortran, AWK-Programme + UNIX-Scripts

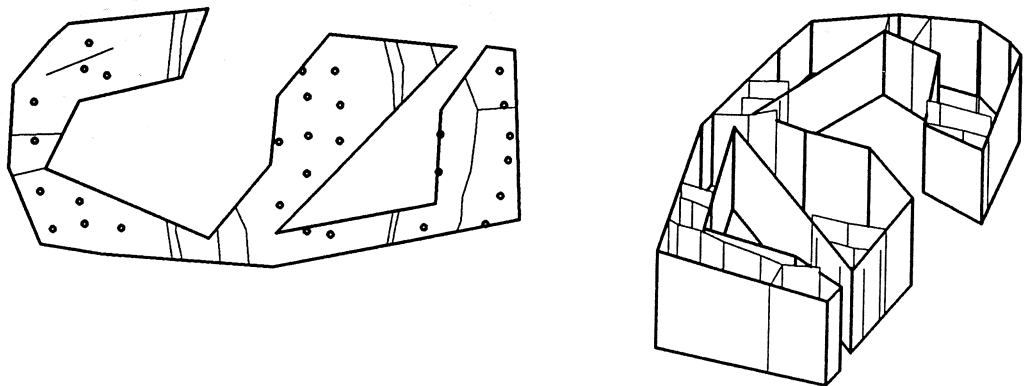
A.1 Extraktion von Teilmodellen mit Programm OVERMO

OVERMO schneidet aus einem bestehenden Geländemodell beliebige Teilstücke aus. Die Teilstücke haben die gleiche Form wie das entsprechende Teilstück des Gesamtmodells.

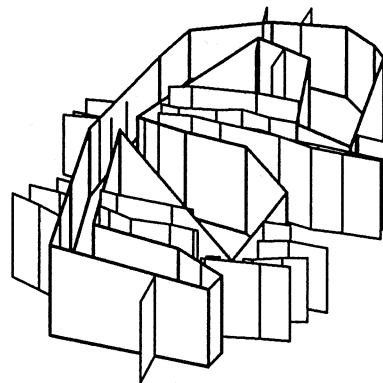
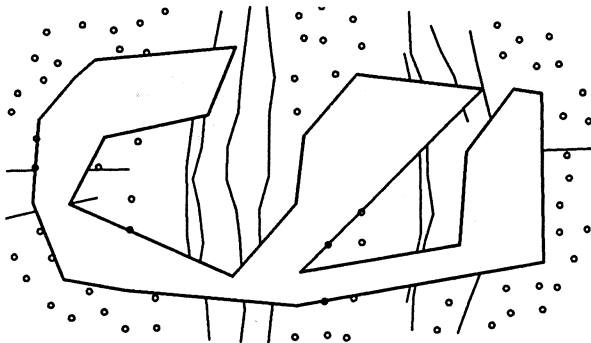
Figur 1: Gesamtmodell mit eingezeichnetem Grenzverlauf mit Perspektive



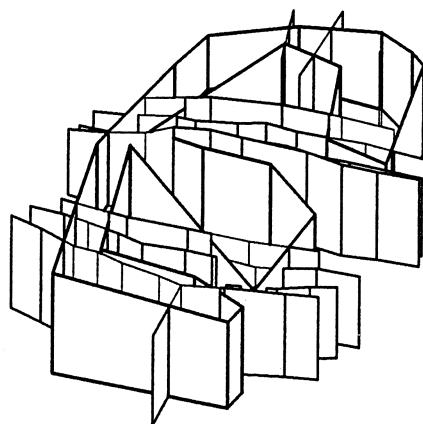
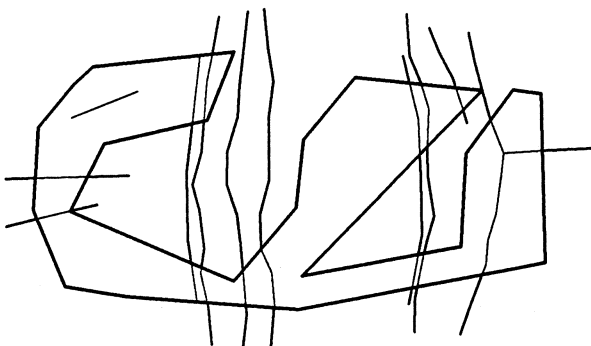
Figur 2: Ausgeschiedenes inneres Teilstück mit Perspektive



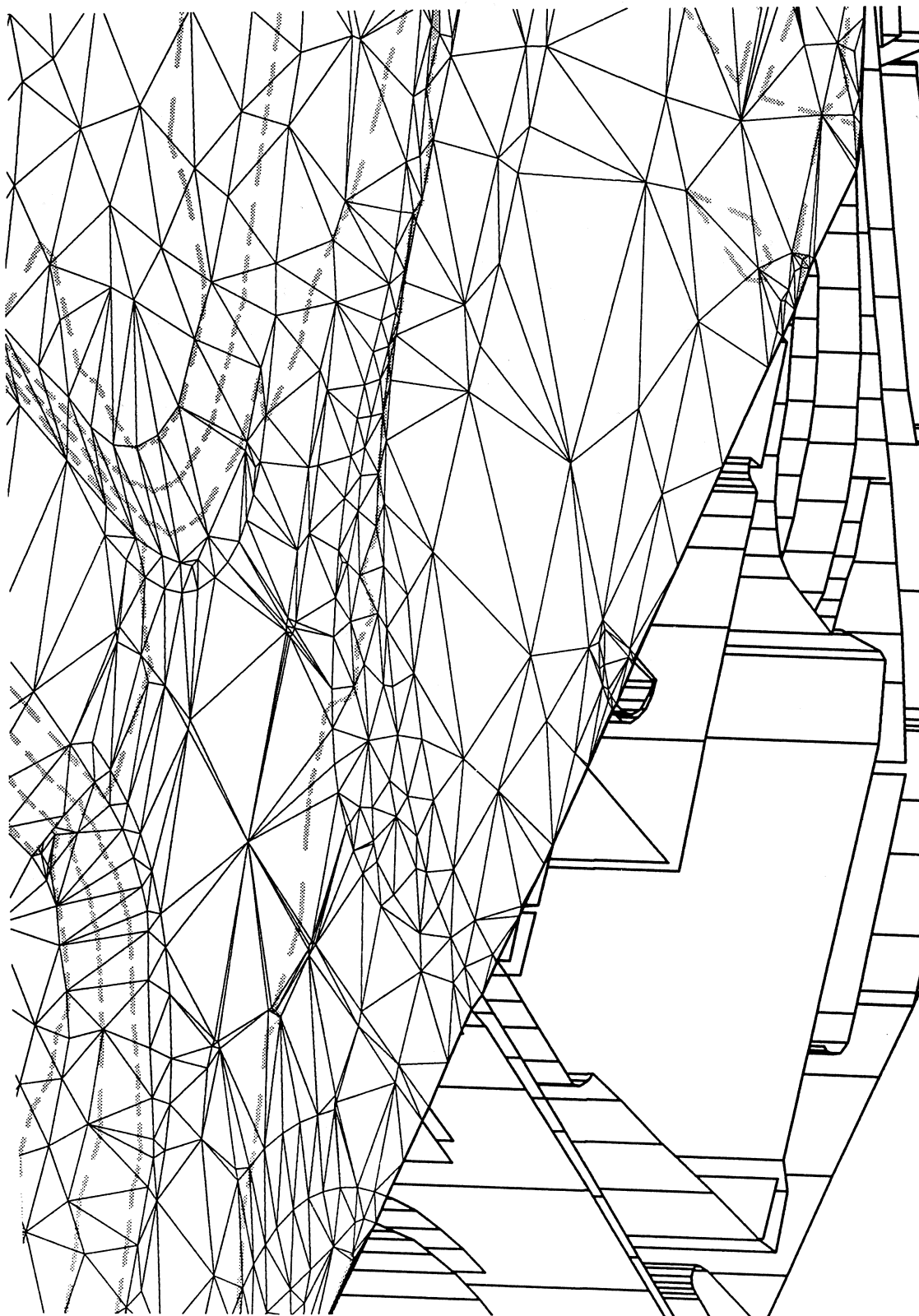
Figur 3: Ausgeschiedenes äusseres Teilstück mit Perspektive



Figur 4: Zusammengesetztes Modell mit Perspektive

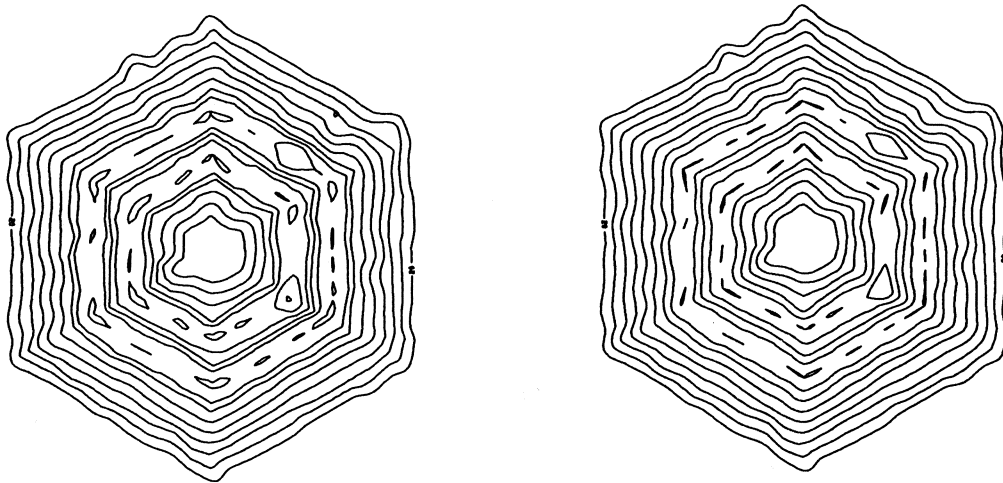


Figur 5: Modellzusammenschluss (links Vermaschung, rechts Profile)

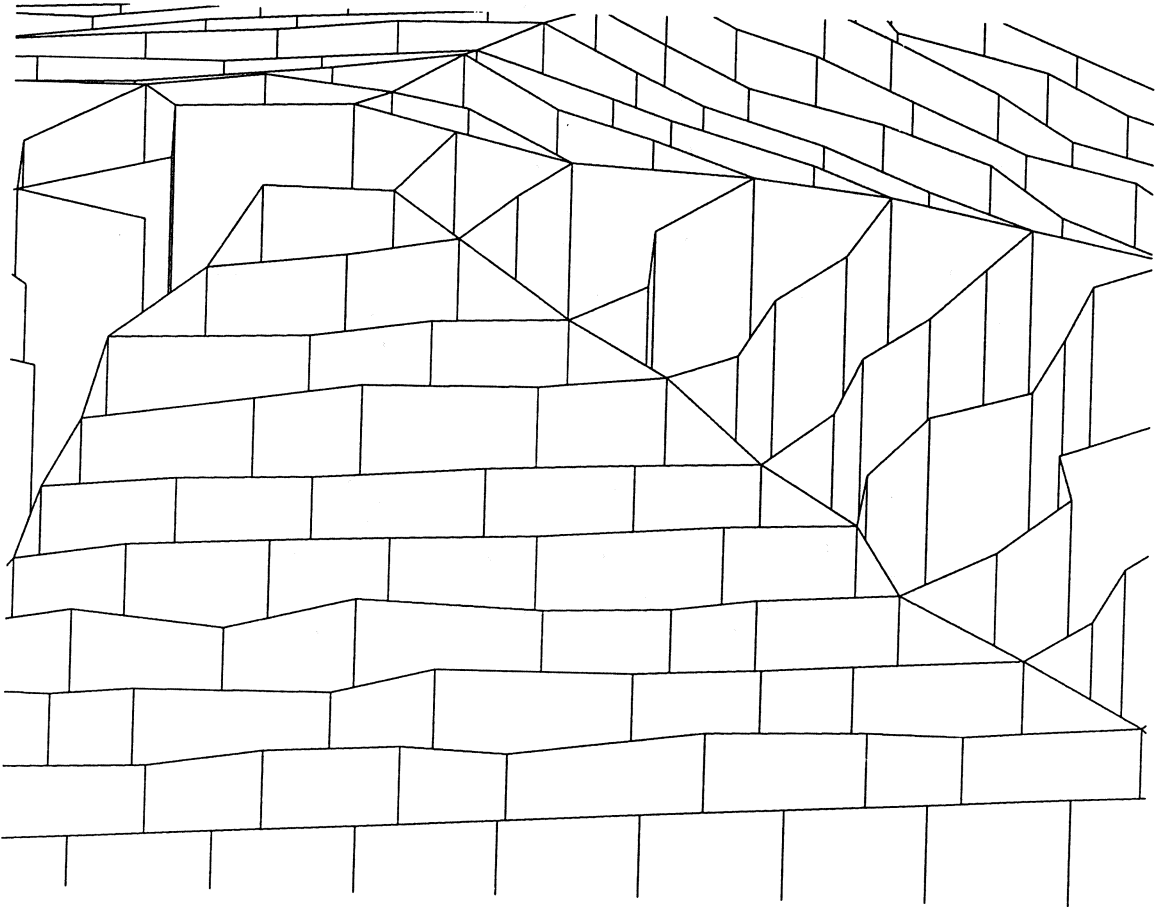


A.2 Programme zur Simulation von Geländemodellen

Figur 6: Simulation von Höhenkurven



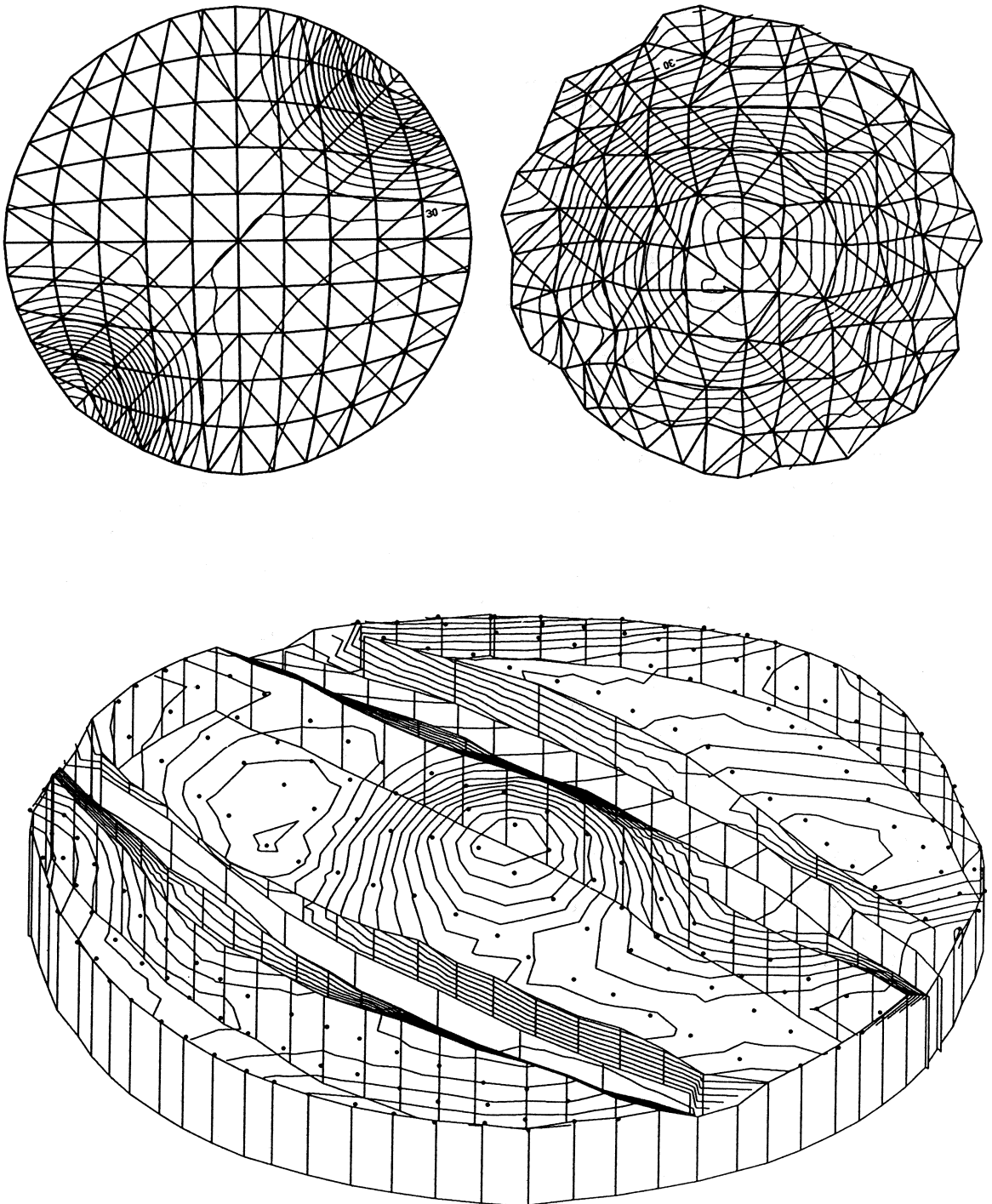
Figur 7: Profile der Höhenkurven + -Geländebrüche



Figur 8: Kreisförmige Netze

Koordinaten und Höhen können über Zufallsgeneratoren verändert werden. Die Höhen werden mittels Ueberlagerung verschiedener mathematischer Funktionen (Lineare, trigonometrische Funktionen sowie Gaussche Glockenkurve) bestimmt.

Einzelne Linienzüge lassen sich als künstliche und natürliche Bruchkanten definieren.



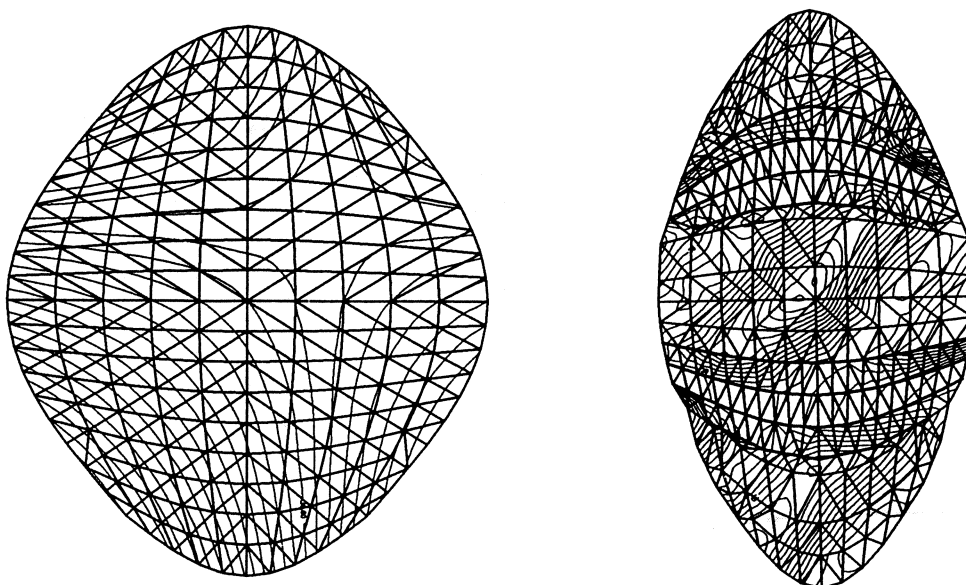
A.3 SIMULATION Geländemodelle (Rechtecke und Ovale)

A.3.1 Muster zur Parametersteuerung

```

19      Anzahl Felder in y - Richtung
11      Anzahl Felder in x - Richtung
 20.0   Randamplitude y - Richtung
 10.0   Randamplitude x - Richtung
10.0    Berechnungsintervall Y
10.0    Berechnungsintervall X
 2.0    Streufaktor y
 2.0    Streufaktor x
10.0000 Amplitue Gauss Mitte
 5.0000 Amplitue Gauss links unten
 5.0000 Amplitue Gauss links oben
10.0000 Amplitue Gauss rechts oben
 5.0000 Amplitue Gauss rechts unten
 1.00   Streufaktor Hoehen
100.0   Berechnungsperiode Gauss Y
100.0   Berechnungsperiode Gauss X
400.0   Wellenlaenge Welle 1 in Y
400.0   Wellenlaenge Welle 1 in X
 05.0   Amplitude 1
100.0   Wellenlaenge Welle 2 in Y
100.0   Wellenlaenge Welle 2 in X
 0.0    Amplitude 2
10.0    Steigung in y in %
10.0    Steigung in x in %
111 000.00 0.00 1 Code 1 : 1 = Punkt, 2 = Linie
111 000.00 0.00 2 Code 2 : 2 = künstliche Linie
111 000.00 0.00 3 Code 3 : 2 = nur jeden 2. Punkt rechnen
211 000.00 0.00 4 Code 4 : Verschiebung in y - Richtung
221 000.00 -2.00 5 Code 5 : Verschiebung in der Höhe
221 00.00 -2.00 6 Beispiel: 2 1 2 -6.0 0.0
212 -6.00 0.00 7 Linie 1 - 20 (Parallelele zur x-Axe )
111 000.00 0.00 8
111 000.00 0.00 9
111 000.00 0.00 10
111 000.00 0.00 11
111 000.00 0.00 12
111 000.00 0.00 13
211 000.00 0.00 14
221 000.00 0.00 15
221 00.00 0.00 16
212 -8.00 0.00 17
111 000.00 0.00 18
111 000.00 0.00 19
111 000.00 0.00 20

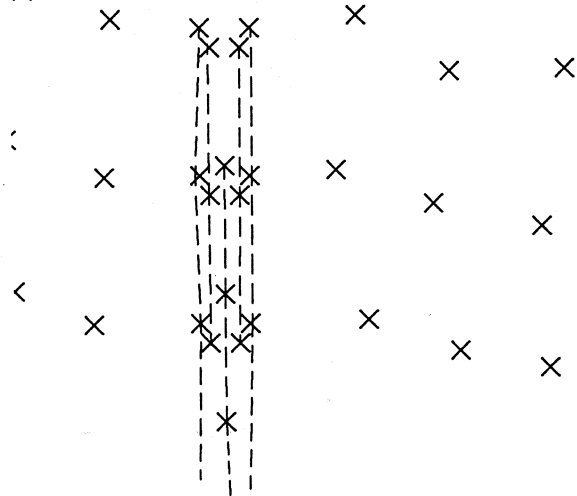
```


Figur 9: Rechtecksimulation*Figur 10: Simulation von Ovalen*

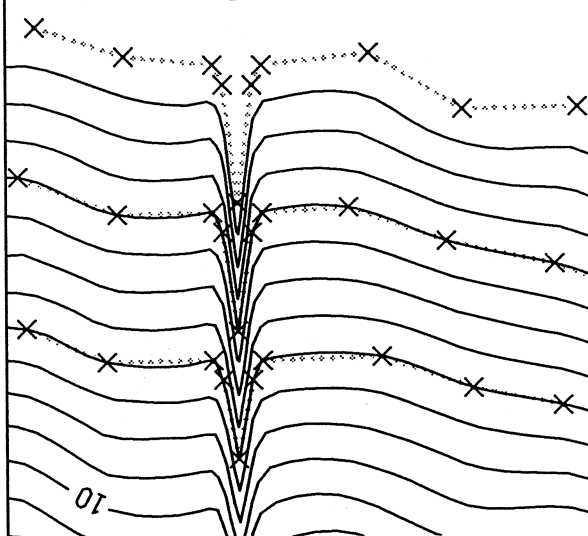
A.4 SIMULATION Höhenkurven

Figur 11: Höhenkurvensimulation

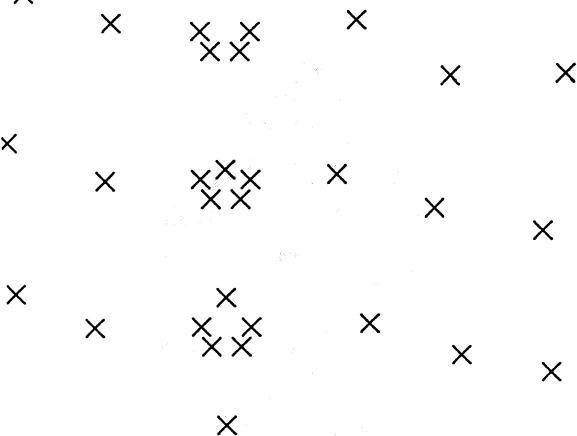
Harte Geländebruchlinien
Höhenkurven = Einzelpunkte



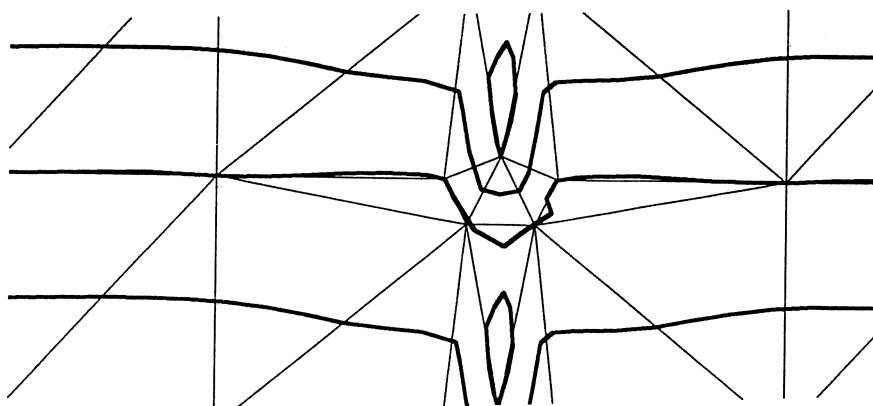
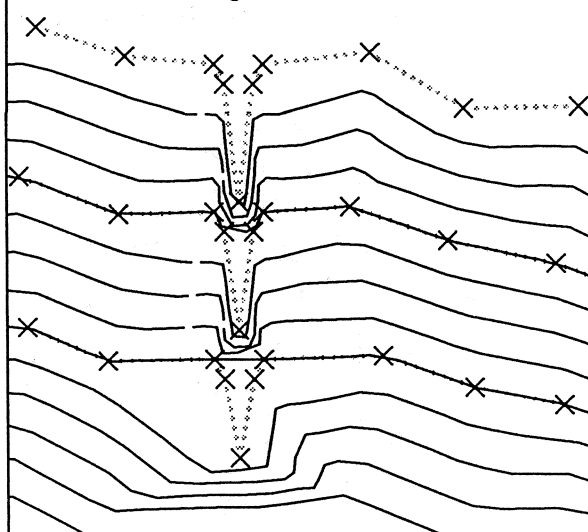
Darstellung der Höhenkurven



Einzelpunkte:
Höhenkurven

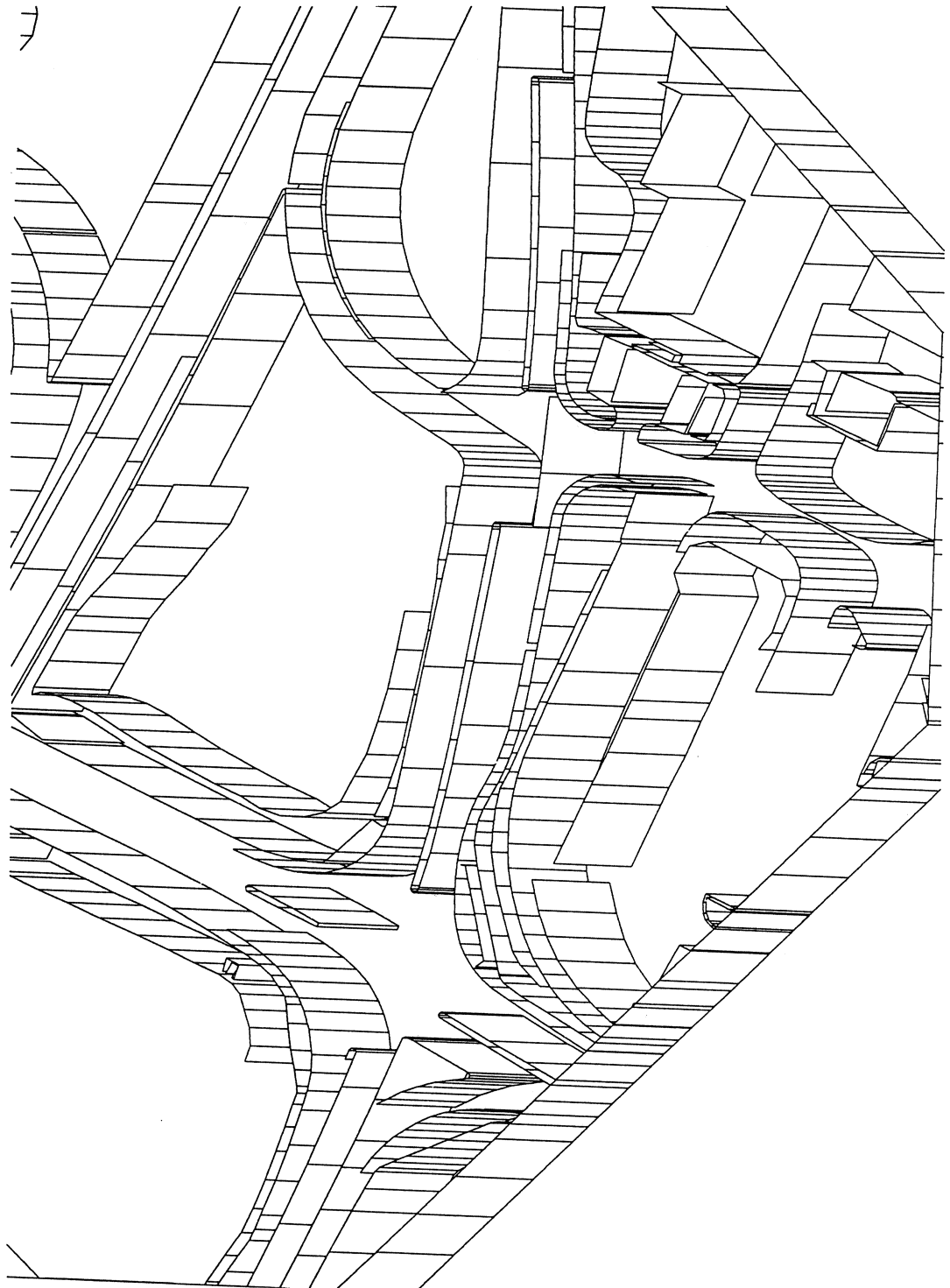


Darstellung der Höhenkurven



A.5 3-D-Darstellungen

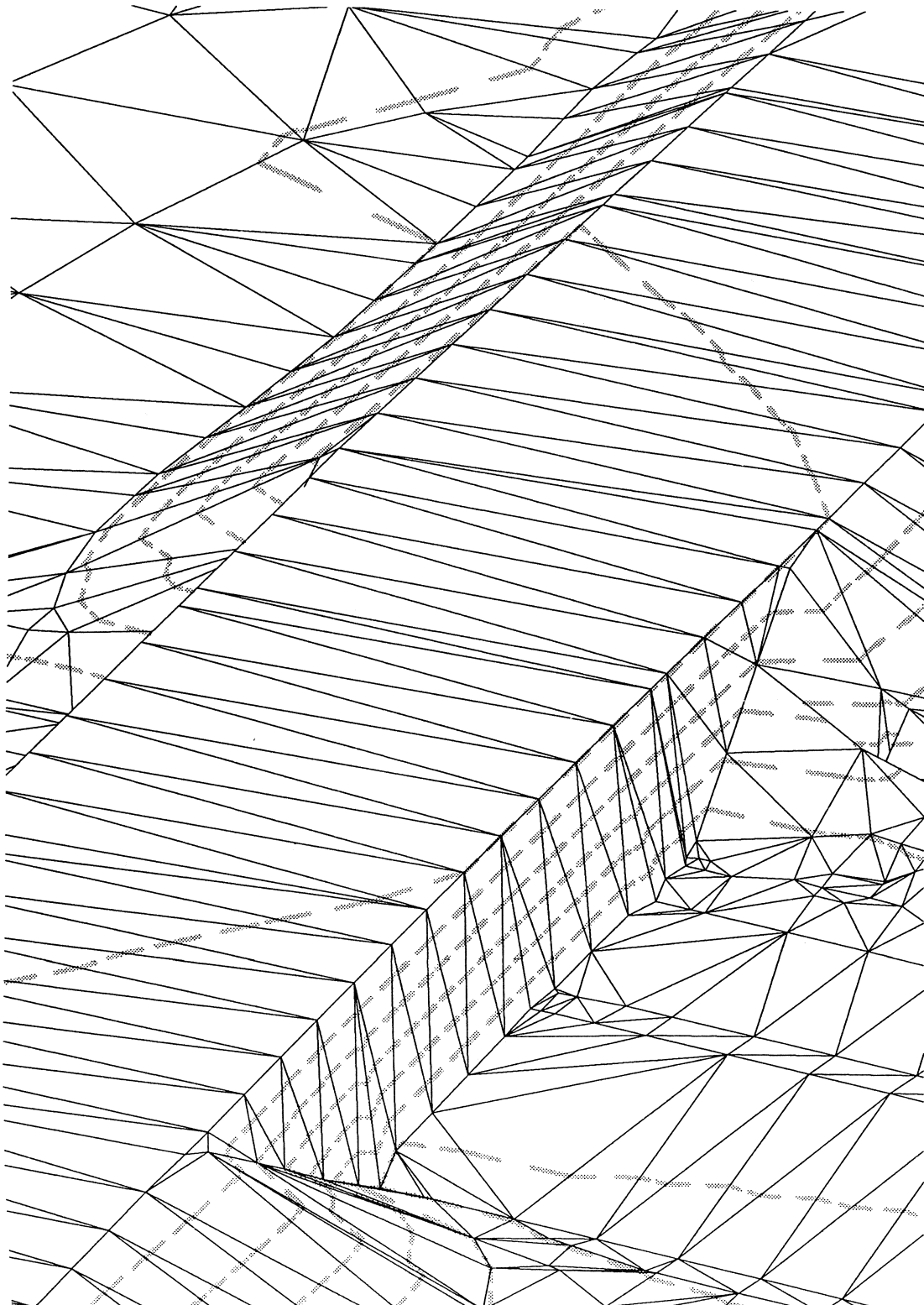
Figur 12: 3-D-Darstellungen



A.6 Verdichtung von Punkten auf Bruchkanten und Strukturlinien

Die Punktverdichtung (2m Intervall) ist im folgenden Beispiel deutlich erkennbar.

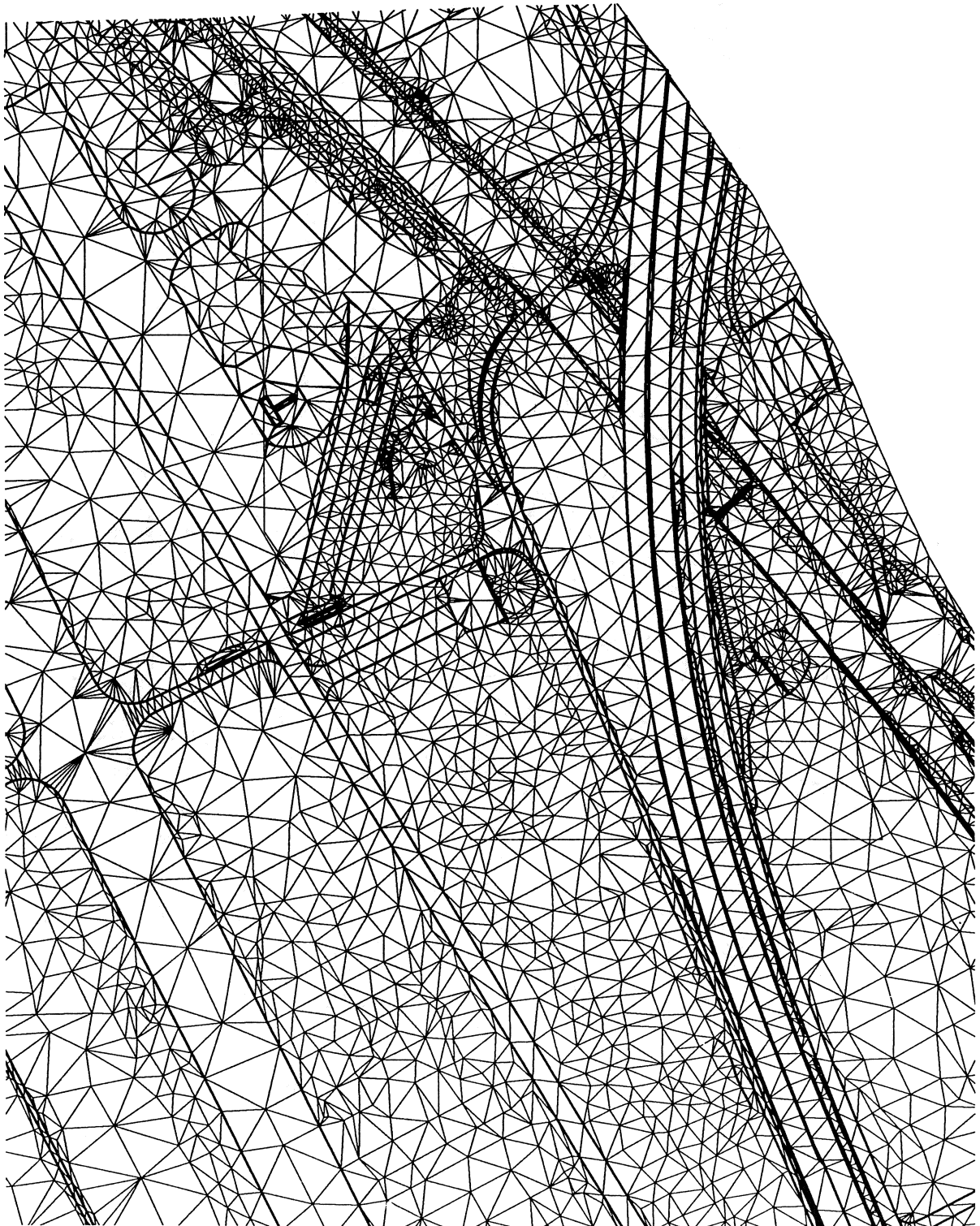
Figur 13: Verdichtung von Punkten



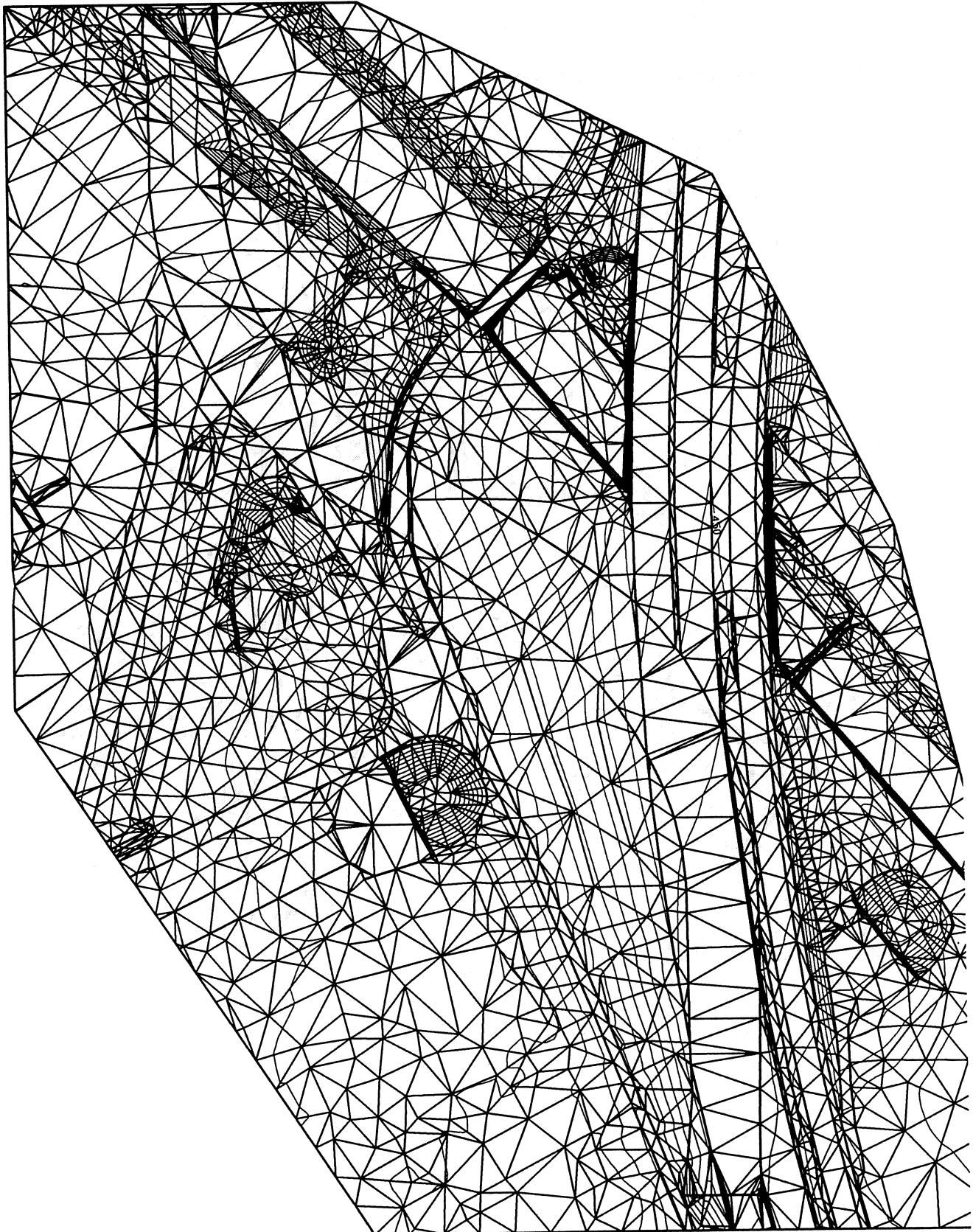
A.7 Vom Uebersichtsplan zur Vergrösserung

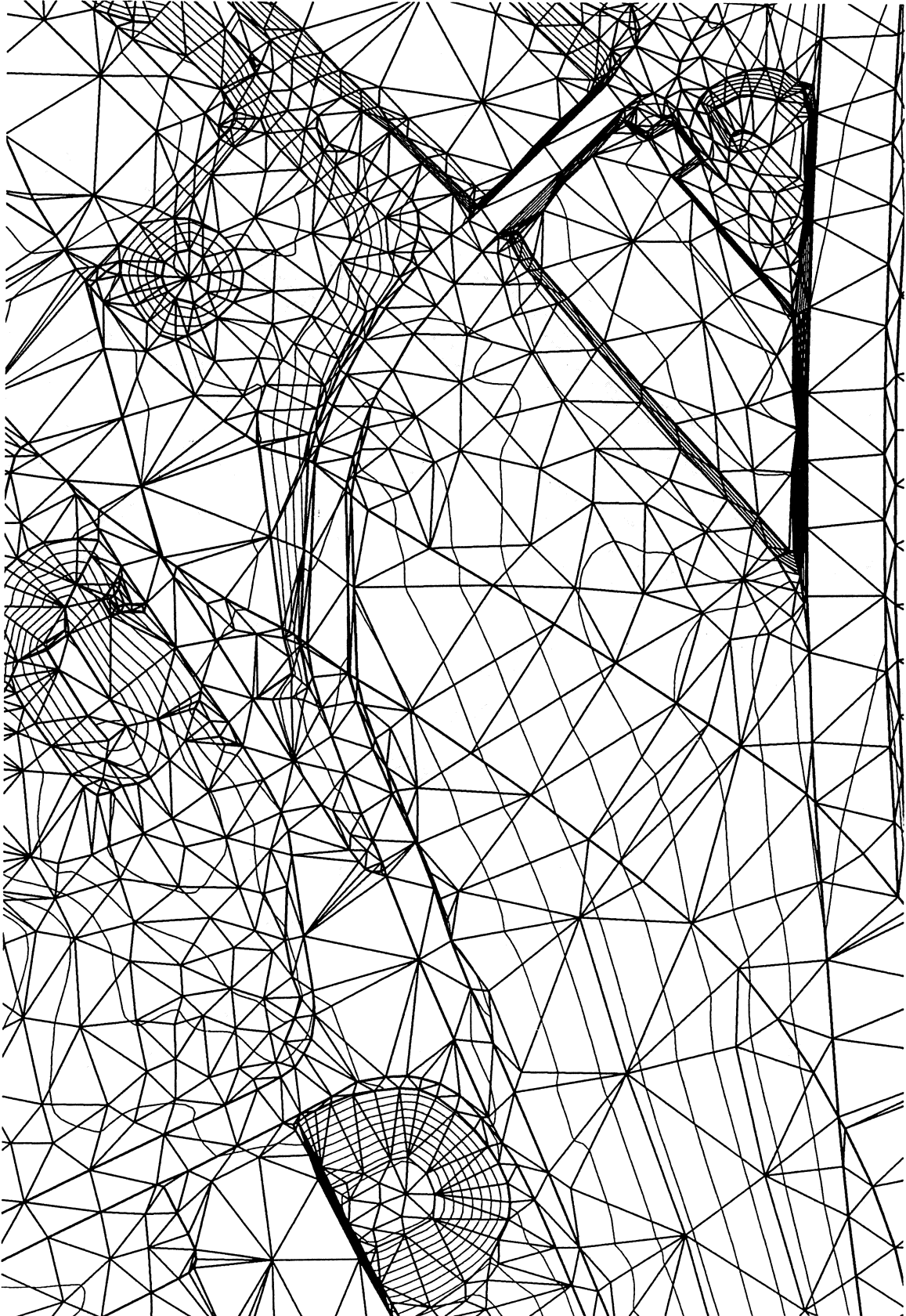
Die Figuren des Forschungsberichts sind grossenteils mit Auto-CAD gezeichnet worden. Auto-CAD ist sehr flexibel und ermöglicht im Layerverfahren den Vergleich verschiedener Geländemodellprogramme.

A.7.1 Uebersicht über Gesamtmodell



A.7.2 Teilmodell



A.7.3 Vergrößerung 1 Teilmodell

A.7.4 Vergrößerung 2 Teilmodell

