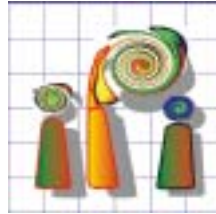


Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen  
Universität Hannover



## **Diplomarbeit**

# **Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Erstellung von Oberflächenmodellen für Bodenerosionsversuche**

vorgelegt von

**Folke Santel**

Hannover 2001

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
1 Einführung.....	1
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Konzept .....	3
2 Boden.....	6
2.1 Bodenerosion.....	7
2.2 Relieftypen .....	9
3 Digitale Geländemodelle.....	10
3.1 Vektor- und Netzmodelle .....	10
3.2 Erzeugung digitaler Geländemodelle .....	11
3.3 Folgeprodukte.....	12
3.4 Digitales Oberflächenmodell.....	13
4 Digitale Bildzuordnung .....	14
4.1 Bildpyramiden .....	15
4.2 Bildzuordnung auf der Basis von Grauwerten .....	17
4.2.1 Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate .....	18
4.2.1.1 Epipolargeometrie .....	22
4.2.1.2 Weitere Bildzuordnungsverfahren .....	23
4.3 Merkmalsgestützte Bildzuordnung.....	26
4.4 Relationale Bildzuordnung.....	27
5 Voraussetzungen .....	28
5.1 Versuchsparzelle .....	28
5.2 Camden Soil .....	30

---

5.3	Laserscanner.....	30
5.3.1	Kalibrierung.....	33
5.3.2	Aufnahmekonfiguration .....	33
5.4	Digitale Kamera .....	34
5.4.1	Kalibrierung.....	36
5.4.1.1	Laborkalibrierung.....	36
5.4.1.2	Projektbegleitende Kalibrierung.....	36
5.4.1.3	Simultan- und Selbstkalibrierung.....	37
5.4.2	Testfeldkalibrierung .....	37
5.4.2.1	Bündelblockausgleichung .....	39
5.4.2.2	Ergebnisse der Kalibrierung.....	41
5.4.2.3	Geometrisches Auflösungsvermögen.....	43
5.4.2.4	Aufwärmeeffekte.....	45
5.4.3	Aufnahmekonfiguration .....	45
6	Eingesetzte Software .....	49
6.1	DPCOR.....	49
6.2	LISA .....	53
7	Versuchsdurchführung .....	55
7.1	Passpunkte.....	55
7.1.1	Anordnung der Passpunkte und Bestimmung der Koordinaten .....	56
7.1.2	Gründe für Differenzen .....	58
8	Auswertung .....	60
8.1	Laserscannertriangulation .....	60
8.1.1	Oberflächenrekonstruktion.....	60
8.1.2	Abweichungen im Überlappungsbereich .....	62
8.1.3	Probleme im Bereich von Rillen .....	63

---

8.2	Stereophotogrammetrie .....	64
8.2.1	Anwendung des Matching-Algorithmus .....	64
8.2.1.1	Probleme im Bereich von Rillen .....	66
8.2.1.2	Verifikation .....	68
8.2.2	Oberflächenrekonstruktion .....	69
8.2.2.1	Transferpunkte.....	71
8.2.3	Abweichungen im Überlappungsbereich .....	71
8.3	Rillenentwicklung .....	72
8.4	Abtrag und Sedimentation.....	75
8.4.1	Sedimentproben.....	76
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	79
9.1	Zusammenfassung.....	79
9.2	Ausblick .....	81
10	Literaturverzeichnis.....	82
11	Anhang .....	88

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Korngröße [Richter 1992, S. 65] .....	7
Abbildung 4.1: Verwendung von Bildpyramiden [Kraus 1996, S. 400] .....	16
Abbildung 4.2: Prinzip der digitalen Bildkorrelation: die Mustermatrix M wird innerhalb der Suchmatrix S verschoben [nach Claus 1983, S. 24] .....	17
Abbildung 4.3: Digitale Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate [Heipke 1990, S. 16] .....	19
Abbildung 4.4: Konvergenzverhalten in Abhängigkeit von den Grauwertgradienten und Ortsfrequenzen [Kraus 1996, S. 397] .....	21
Abbildung 4.5: Epipolargeometrie für den Stereonormalfall [Claus 1983, S. 29] .....	22
Abbildung 4.6: Korrelatorprinzip [Linder 2000b, S. 4] .....	24
Abbildung 5.1: Versuchsparzelle .....	28
Abbildung 5.2: Füllung der Box .....	29
Abbildung 5.3: Prinzip der Laserpunkttriangulation .....	31
Abbildung 5.4: Flächenhaft arbeitender Laserscanner .....	31
Abbildung 5.5: Eingesetzter Zeilenlaserscanner .....	32
Abbildung 5.6: Photogrammetrisches Aufnahme- und Auswertesystem .....	35
Abbildung 5.7: Testfeldaufnahme mit DCS 1m und 19 mm-Objektiv .....	38
Abbildung 5.8: Aufnahmeanordnung zur Testfeldkalibrierung .....	39
Abbildung 5.9: Auswirkung systematischer Bildfehler .....	42
Abbildung 5.10: Verzeichnungskurve .....	43
Abbildung 5.11: Siemensstern [Dirk Rieke-Zapp, NSERL] .....	44
Abbildung 5.12: Prinzip der Stereophotogrammetrie .....	46
Abbildung 6.1: Definition des Pixelkoordinatensystems .....	50

---

Abbildung 6.2:	Ablauf von DPCOR [IPI 2000a, S. 4].....	52
Abbildung 7.1:	Verwendete Messmarke mit Punktnummer.....	56
Abbildung 7.2:	Übersicht über die Anordnung der Passpunkte.....	57
Abbildung 7.3:	Differenzbild der Passpunktkoordinaten vom 08.06.2000 und 13.06.2000.....	58
Abbildung 7.4:	Quellung von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit [Schäffler et al. 1991, S. 59] .....	59
Abbildung 8.1:	Oberflächenmodellierung unter ArcView.....	61
Abbildung 8.2:	Überlappungsbereich der Streifen 2 und 3 (entzerrt).....	62
Abbildung 8.3:	Probleme der Laserscannermessung im Rillenbereich .....	63
Abbildung 8.4:	Ausschnitte aus einem Stereobildpaar .....	66
Abbildung 8.5:	Differenzbild der Stereomodelle 34 und 43.....	68
Abbildung 8.6:	Oberflächenmodell erzeugt mit LISA Basis .....	70
Abbildung 8.7:	Überlappungsbereich der Stereomodelle 34 und 45 .....	72
Abbildung 8.8:	Rillendefinition .....	73
Abbildung 8.9:	Rillennetzwerk vom 13.06.2000 und 08.06.2000.....	74
Abbildung 8.10:	Bodenoberfläche mit grünem Farbtracer .....	75
Abbildung 8.11:	Abtrags- und Sedimentationsgebiete .....	76
Abbildung 8.12:	Sedimentertragskurve vom 13.06.2000 .....	76
Abbildung 8.13:	Wassergehaltskurve vom 13.06.2000 .....	77
Abbildung 9.1:	Photogrammetrische Aufnahme von Beregnungsversuchen im Feld....	81

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2.1: Definition der Relieftypen [Helming 1992, S. 3] .....	9
Tabelle 5.1: Innere Orientierung und Standardabweichungen .....	41
Tabelle 5.2: Aufnahmeplanung.....	47
Tabelle 7.1: Ablauf der Beregnungsversuche.....	55
Tabelle 8.1: ausgewählte Matching-Parameter.....	65

# 1 Einführung

Bodenerosion ist ein globales Problem mit ökologischen und ökonomischen Folgen. Der natürliche Prozess der Bodenzerstörung wird weltweit durch die Nutzung der Böden verstärkt oder ausgelöst. Das Ausmaß der Zerstörung und die Auswirkung auf die Ertragsfähigkeit von Böden können in weiten Grenzen variieren.

Die Umlagerung von Bodenmaterial und die Ausbildung von Rillen führt zu einer Verminderung der Ertragsfähigkeit von Agrarflächen. Neben der Bildung von Abtragungs- und Ablagerungsbereichen kann es zu einem Austrag von Bodenmaterial aus den betroffenen Gebieten kommen. Boden kann in Ackerrandgräben gespült werden, von dort in Bäche, Flüsse sowie Seen gelangen und sich ablagern. In neuerer Zeit konzentriert sich das Augenmerk der Forschung besonders auf die mit dem erodierten Boden verlagerten Agrarchemikalien, die Oberflächengewässer belasten.

Die Bodenerosionsforschung beschäftigt sich mit der Sammlung von Erosionsdaten, der Quantifizierung von Bodenerosionsprozessen und der Aufstellung von Bodenerosionsmodellen. Diese können als Planungsmittel für den Einzelnen oder auch für die Legislative eingesetzt werden. Physikalisch basierte Modelle sollen die Vorhersage von Erosion und die Planung von Gegenmaßnahmen unterstützen. Weiter können sie zum Verständnis und Veranschaulichung verwendet werden, um Prioritäten für zukünftige Forschungsvorhaben zu definieren [Nearing et al. 1994, S. 127]. Digitale Modelle von Bodenoberflächen werden zur Visualisierung und Quantifizierung von Bodenerosionsprozessen benötigt.

Ein Oberflächenmodell des Bodens kann auf unterschiedliche Weise erfasst werden.

Bei der „Pin-Drop-Methode“ werden gleich lange Stahlnadeln bzw. Drähte auf die Bodenoberfläche heruntergelassen. Die Drähte befinden sich zwischen zwei Metallschienen, die mit Flügelschrauben fixiert werden können. Nach dem Absenken der einzelnen „Pins“ kann die Pinreihe nachgezeichnet werden. Es entsteht ein Negativbild des Oberflächenquerschnitts. Weiterentwicklungen und Automation der Technik führten zu photographischer Erfassung und anschließender Digitalisierung der Nadelposition sowie Bestimmung der zurückgelegten Strecke der Nadeln bzw. einzelner Sonden mit Potentiometern. Der Einbau mehrerer Pinreihen in einen Rahmen ermöglicht nicht nur die profilweise, sondern



auch flächenhafte Erfassung der Oberfläche [Elliot et al. 1997], [Radke et al. 1981], [Currence und Lovely 1970].

Der Vorteil der Methode liegt in der schnellen und einfachen Übertragung. Der Kontakt mit dem Boden führt zu Störungen der Bodenoberfläche. Die Genauigkeit der Oberflächenbestimmung liegt im Millimeterbereich. Aufgrund ihrer einfachen Konstruktion und Handhabung sowie den geringen Herstellungskosten wird die "Pin-Drop-Methode" heute noch eingesetzt.

Die Verwendung der Laserscannertriangulation oder der Einsatz der Photogrammetrie bieten den Vorteil der punkt- bzw. flächenhaften und berührungslosen Messung. Bei der Laserscannererfassung werden unter hohem Zeitaufwand rasterförmig angeordnete Punktkoordinaten gewonnen. Neben Sensorik und Messprinzip charakterisiert die mechanische Anordnung der Messeinheit die Laserscannertriangulation. Grundsätzlich ist diese auf einer Schiene an einem Rahmen montiert und wird mittels Schrittmotoren über die Fläche bewegt [Huang et al. 1988]. Zeilenscanner gestatten die Abmessung separater Streifen. Lediglich einzelne Laserscanner ermöglichen die Abmessung ganzer Flächen. Diese sind meist auf eine transportable Rahmengröße beschränkt. Nur wenige Geräte sind im Labor und unter Feldbedingungen einsetzbar [Huang und Bradford 1990], [Römkens et al. 1988]. Die Datengewinnung für Erosionsmodelle in größeren Untersuchungsgebieten verlangt aus diesem Grund nach einer praktikablen und genauen Meßmethode. Dies ist durch Laserscannermessungen kaum noch möglich.

Die photogrammetrische Methode ermöglicht eine schnelle und einfache Aufnahme der Oberfläche. Zur automatisierten Erfassung bedient sie sich der digitalen Bildzuordnung. Die Verarbeitung analoger Bilder erfordert einen hohen manuellen und rechnerischen Aufwand. Seriell durchgeführte Oberflächenmessungen sind kaum verarbeitbar [Jeschke 1990], [Welch et al. 1984], [Welch und Jordan 1983]. Die Verbreitung digitaler Sensoren bewirkte die Verkürzung der Auswertzeiten und denkbare Anwendungen in Echtzeit. Die Entwicklungen im Bereich der Rechnertechnologie ermöglichen die Speicherung und Verarbeitung großer Datenmengen. Ein schneller und stetiger Datenfluss von der Aufnahme bis zur Auswertung ist möglich. Ziel ist die automatisierte Auswertung digitaler Bilder. Bodenerosionsprozesse können effizient erfasst und dokumentiert werden [Stojic et al. 1998]. Hochauflösende digitale Aufnahmesysteme, die Zuverlässigkeit der

Matching-Algorithmen, sowie der hohe Automatisierungsgrad ermöglichen den wirtschaftlichen Einsatz der Photogrammetrie auch für größere Modellgebiete.

## **1.1 Problemstellung**

Zur Betrachtung von Bodenerosionsprozessen muss die Entwicklung einer Oberfläche unter erosiven Bedingungen beschrieben werden. Die Veränderungen des Bodenreliefs bzw. der -rauigkeit und die Dokumentation der Rillenentwicklung sind von entscheidender Bedeutung. Dies beinhaltet auch die Bestimmung des Abtrags der Gesamtfläche, sowie die Analyse durch Zeitreihen. Digitale Oberflächenmodelle mit bis zu 1 mm Grundauflösung werden benötigt.

Der Einsatz der Photogrammetrie scheint hinsichtlich der schnellen, berührungslosen Datenerfassung und der flexiblen Aufnahmekonfiguration, eine praktikable und effiziente Methode zu sein. Das Potential der automatischen, digitalen Bildzuordnung zur Bestimmung von Bodenoberflächen soll untersucht werden.

Alle Abtragsversuche wurden im Labor durchgeführt. Die Bodenerosion durch Wasser wurde mit einem Laborregensimulator unter konstanten und kontrollierten Bedingungen simuliert. Das Untersuchungsgebiet wurde mittels Laserscannermessungen sowie photogrammetrisch erfasst. Ein Verfahren zur photogrammetrischen Bestimmung der Bodenoberflächen soll entwickelt werden. Die Ergebnisse der Oberflächenerstellung mittels Photogrammetrie und Laserscanner werden analysiert, verglichen und präsentiert.

Zur photogrammetrischen Datengewinnung wurde die digitale Kamera Kodak DCS 1m eingesetzt. Die Ableitung der Höhendaten erfolgt mit den Programmsystemen DPLX zur Messung von Bildkoordinaten, DPCOR zur digitalen Bildzuordnung, sowie BLUH zur Bündelblockausgleichung und LISA zur Oberflächeninterpolation und -darstellung.

## **1.2 Konzept**

Die Bodenerosionsversuche erfolgten im National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) im Mittleren Westen der USA. Dieses wurde 1982 an der Purdue University in West Lafayette eingerichtet. Die hauptsächliche Forschung liegt im Bereich der Bodenerosion durch Wasser und der Rillenentwicklung. Ziel ist die Entwicklung von Technolo-

gien zur Vorhersage sowie wirksamer bzw. wirtschaftlicher Methoden zur Eindämmung von Bodenerosion.

Eine Versuchsreihe bestand in diesem Fall aus sechs Regensimulationen und den dazugehörigen Aufnahmen. Eine 2,24 m breite und 4,18 m lange Box wurde gefüllt mit Boden. Die Oberfläche besitzt ein Gefälle von 31% und wurde in Abständen von zwei Tagen beregnet. Während der Versuche wurden Proben zur Bestimmung der Sedimentkonzentration im Abfluss genommen und nach kurzer Trocknungszeit die Bodenoberfläche mit Laserscanner und digitaler Kamera erfasst.

Das vorliegende Datenmaterial ist sehr umfangreich. Aus diesem Grund wird mit exemplarisch ausgewählten Datensätzen gearbeitet. Im Vordergrund steht die Entwicklung von Lösungsansätzen sowie Auswerteverfahren, die sich auf ähnliche Problemstellungen übertragen lassen bzw. die Gegenüberstellung von Laserscannertriangulation und dem Einsatz der Photogrammetrie.

Beginnend mit den Grundlagen wird in Kapitel 2 ein Einblick in die Zusammensetzung und Eigenschaften von Böden gegeben. Zum besseren Verständnis der Problemstellung wird auf die Definition von Relieftypen, sowie die Faktoren und das Ausmaß der Bodenerosion im Detail eingegangen.

In Kapitel 3 erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Erzeugung und Visualisierung digitaler Geländemodelle. Ein Oberflächenmodell wird für die Bearbeitung der Versuchsparzelle definiert.

Die Theorie der digitalen Bildzuordnung wird in Kapitel 4 aufgezeigt. Es wird zwischen Bildzuordnung auf der Basis von Grauwerten, sowie merkmalsgestützter und relationaler Zuordnung unterschieden. Ausführlich wird das Verfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate behandelt.

Unter der Überschrift Voraussetzungen werden in Kapitel 5 die Versuchsparzelle und die eingesetzten Aufnahmesysteme Laserscanner bzw. digitale Kamera DCS 1m beschrieben. Die Kalibrierung der Systeme wird dargelegt, insbesondere die Wahl des Kalibrierungsverfahrens der digitalen Kamera. Die jeweilige Aufnahmeconfiguration und die Anforderungen an die Messung des Oberflächenreliefs werden erläutert.

In Kapitel 6 wird die eingesetzte Software zur digitalen Bildzuordnung und Interpolation vorgestellt.

Neben der Versuchsdurchführung wird in Kapitel 7 auf die Probleme der Passpunktbestimmung eingegangen. Beispielhaft werden die Differenzen in den Passpunktkoordinaten einzelner Berechnungen veranschaulicht. Mögliche Gründe für die Widersprüche werden aufgeführt.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit der Auswertung der Daten. Aus den gewonnenen Daten der Laserscannermessung und der Stereophotogrammetrie werden unabhängig voneinander Oberflächenmodelle generiert. Auf die Probleme und Schwierigkeiten wird hingewiesen. Differenzmodelle werden gebildet, um Abtrags- und Sedimentationsgebiete aufzuzeigen. Diese werden mit den gemessenen Daten aus dem Abfluss verglichen. Aus den photogrammetrischen Oberflächenmodellen kann die Rillenentwicklung abgeleitet werden. Die zeitlichen Rillenveränderungen werden dargestellt.

Die abschließende Zusammenfassung in Kapitel 9 beinhaltet einen Ausblick auf die Möglichkeit der Übertragung der jetzigen Laboruntersuchungen in die Feldpraxis.

## 2 Boden

Boden ist die oberste, belebte und verwittrte Schicht der Erdkruste. Physikalische und chemische Bodenbildungsprozesse führen zur Verwitterung des Ausgangssubstrats und zur Bildung des Bodenkörpers. Boden entsteht an der Oberfläche der Erdkruste. Nach unten ist er durch festes oder lockeres Gestein, nach oben durch die Vegetationsdecke bzw. Atmosphäre begrenzt, und zur Seite geht er gleitend in benachbarte Böden über. Ein Boden besteht aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe sowie organischen Stoffen. Die Bodenart ist eine charakteristische Kenngröße des Feinbodens. Die Korngröße hängt im Wesentlichen vom Ausgangsmaterial und vom Verwitterungsprozess ab. Das Bodenskelett besteht aus Gesteinsbruchmaterial. Sogenannte Grobböden mit einem Korndurchmesser über 2 mm sind mager, trocken, leicht, nicht bindig, schlecht aggregiert und haben geringe Wassergehalteigenschaften. Feinböden überwiegend aus Sand, Schluff und Ton mit einem Korndurchmesser unter 2 mm sind bindig, fett, nass, schwer, besser aggregiert, weisen ein stabiles Bodengefüge auf und können mehr pflanzenverfügbares Wasser gegen die Schwerkraft halten.

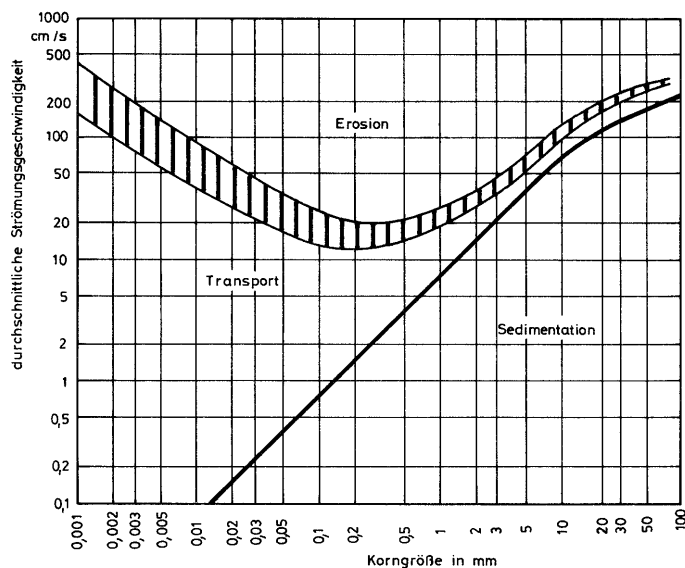
Minerale und Humus bilden miteinander ein Bodengefüge mit einem bestimmten Hohlräumssystem. Dieses besteht aus Poren unterschiedlicher Größe und Form, die mit Bodenlösung, d.h. Wasser mit gelösten Salzen und Gasen, und Bodenluft gefüllt sind. Böden mit vorwiegend kleinen Korngrößen haben große Porenvolumina. Die feinen Poren halten das Wasser durch Kapillar-Wirkung gut fest, während sie die Bodenluft schlecht durchlassen. Die größeren Poren fördern die Durchlüftung, lassen aber das Wasser schneller abfließen.

Ein Mineralboden weist Horizonte auf, die oben streuähnlich sind und nach unten gesteinsähnlicher werden. Horizonte bilden das vertikale Bodenprofil welches charakteristisch für einzelne Bodentypen ist [Richter 1992, S. 58-62], [Scheffer und Schachtschabel 1989, S. 1, 21-25].

## 2.1 Bodenerosion

Die Bodenerosion ist ein Prozess der Bodenzerstörung (Erosion, lat. erodere: „zerfressen“, „abnagen“). Bodenmaterial wird entlang der Oberfläche durch Wasser und Wind verlagert.

Die Bodenerosion durch Wasser besteht aus zwei Teilschritten. Im ersten werden die Bodenaggregate durch die kinetische Energie der aufprallenden Regentropfen zerschlagen (Planschwirkung, *splash*). Das gebildete Feinmaterial wird in einem zweiten Schritt durch das Oberflächenwasser zusammen mit bereits vorhandenem Lockermaterial weiterverfrachtet. Das fließende Wasser kann weitere Teilchen abscheren. Bei nachlassender Schleppkraft, d.h. bei Überschreitung der Transportkapazität wird der größte Teil als Kolluvium abgelagert.



**Abbildung 2.1:** Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Korngröße [Richter 1992, S. 65]

Die Eigenschaften des fließenden Wasser sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Sie zeigt eine deutliche Zunahme der Erosion im Feinsand-Bereich auf. Nicht nur grobkörniges Material sondern auch sehr feinkörniges ist relativ schlecht erodierbar. Die aufprallenden Regentropfen bewirken nicht nur eine Lockerung des Materials, sondern auch eine Versiegelung der obersten Millimeter des Bodens. Bei feinkörnigem Boden wandern Ton- und Schluffteilchen in die Poren und verstopfen diese teilweise. Die Infiltrationsrate sinkt und der Oberflächenabfluss beginnt, bevor tieferliegende Bodenhorizonte durchfeuchtet wer-

den. Das Erosionsoptimum liegt im Feinsand-Bereich, da Korngewicht und Haftfestigkeit hier gering sind. Die Höhe des Bodenabtrags ist abhängig von der Energie des Regens (Sturmcharakteristik), den Bodeneigenschaften (Bodenart, Humusgehalt, Erodibilität, Aggregatstabilität), der Hangneigung (Gefälle) und –länge, der Bedeckung der Oberfläche z.B. durch Wald, Grünland oder eine geschlossene Grasnarbe sowie Bodenschutzmaßnahmen.

Die Abtragsformen durch Bodenerosion sind unterschiedlich. Auf vorwiegend ackerbaulich genutzten Flächen erfolgt ein gleichmäßiger Abtrag auf der ganzen Fläche durch Flächenerosion (Denudation, *sheet erosion*) oder konzentriert durch Rillenerosion (*rill erosion*). Bei zunehmender Konzentration des Oberflächenwassers entlang einzelner, linearer Fließbahnen kommt es zur Grabenerosion (*gully erosion*). Unterirdische Erosion oder Tunnelerosion kann aufgrund von besonders erosionsanfälligen tiefer liegenden Bodenhorizonten auftreten [Helming 1992, S. 1f.], [Richter 1992, S. 65-81], [Scheffer und Schachtschabel 1989, S. 468-472].

Zur Vorhersage des Bodenabtrags durch Wasser wurde aus langjährigen Messungen die Universal Soil Loss Equation (USLE) von Wischmeier und Smith entwickelt [Renard et al. 1997, S. 15], die als Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) auf Bayerische Verhältnisse übertragen wurde. Der langfristige mittlere jährliche Abtrag wird durch Multiplikation derjenigen Faktoren, die im Wesentlichen den Abtrag bestimmen, errechnet.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

- A durchschnittlicher jährlicher Abtrag in t/ha
- R Regenfaktor, variiert global
- K Bodenerodibilitätsfaktor, variiert lokal oder aus Bodenkarte
- L Hanglängenfaktor
- S Hangneigungsfaktor
- C Bewirtschaftungsfaktor
- P Erosionsschutzfaktor

Zur Bodenerosion durch Wind (Deflation) sei auf die Literatur verwiesen [Scheffer und Schachtschabel 1989, S. 472-474].

## 2.2 Relieftypen

Entscheidend für die verschlammungsbedingten Bodenerosionsprozesse ist die Reliefausformung, das von der Bodenbearbeitung geprägte Relief ohne Berücksichtigung der gerichteten Reliefelemente wie Saatrillen und Pflugrichtung. Die Reliefausformung wird nach Helming (1992, S. 3) durch vier Typen beschrieben, die sich hinsichtlich ihres Maßstabs, Entstehung und Wirkung unterscheiden.

Definition	Größenbereich	Reliefelement	Entstehung
Rauhigkeit	0-2 mm	Partikel, kleine Aggregate	Bodeneigenschaften
Mikrorelief	2-100 mm	Bröckel, große Aggregate	Bearbeitung, ungerichtet
Mesorelief	100-300 mm	Rillen, Furchen	Bearbeitung, gerichtet
Makrorelief	>300 mm	Hangausformung	Geomorphologie

**Tabelle 2.1:** Definition der Relieftypen [Helming 1992, S. 3]

Die vier Relieftypen können hinsichtlich ihrer Eigenschaften nicht klar voneinander abgegrenzt werden. Eine Unterscheidung ist aufgrund ihrer spezifischen Wirkung auf die Erosionsprozesse möglich.



### 3 Digitale Geländemodelle

In der Topographie wird die digitale Modellierung eines Geländereiefs durch diskrete punktförmige (z.B. Muldenpunkte) und linienförmige Objekte (z.B. Gerippelinien) sowie die durch einen Oberflächengraphen gebildeten Maschen als Kontinua beschrieben. Für eine geometrisch genaue und morphologisch richtige Beschreibung des Reliefs sind die diskreten Objekte und Kontinua durch räumliche Koordinaten und Angaben zur Punktart zu erfassen [Hake und Grünreich 1994, S. 136].

#### 3.1 Vektor- und Netzmodelle

Bei den geometrischen Datenmodellen unterscheidet man zwischen Vektor- (*vector models*) und Netzmodellen (*tesselation models*) [Hake und Grünreich 1994, S. 80f.], [Kraak und Ormeling 1996, S. 68-76].

Die Linie ist die zugrunde liegende geometrische Einheit bei der Darstellung in Vektorform. Die räumliche Struktur wird durch eine Folge von Stützpunkten und verbindenden Linienelementen beschrieben. Anfangs- und Endpunkte der Vektoren werden in einem zwei- oder dreidimensionalen Koordinatensystem bereitgehalten. Ein Punkt wird aus einem Nullvektor und eine Fläche aus einem geschlossenen Linienzug gebildet. Zusätzlich können topologische Daten gespeichert werden.

Die flächenhafte Betrachtungsweise der Netzmodelle basiert auf der Grundlage regelmäßiger oder unregelmäßiger Polygone (Maschen, Zellen, Kacheln). Die Lage eines Flächenelements stützt sich auf die Indizes der Bildmatrix. Ein Rasterelement entspricht im Sinne der digitalen Bildverarbeitung einem Pixel. Die Pixelwerte sind Grau- bzw. Farbwerte. Bei Rasterdaten speichert man in der Regel keine explizite topologische Information.

Vektordaten haben unter anderem den Vorteil der hohen Genauigkeit, Rasterdaten den der einfachen Verarbeitung. Eine hybride Datenstruktur enthält Vektor- und Rasterdaten.

### 3.2 Erzeugung digitaler Geländemodelle

Ein gemessenes Geländemodell besteht aus überwiegend unregelmäßig verteilten Punkten. Die für die Berechnung eines digitalen Geländemodells (DGM, *digital terrain model DTM*) erfassten Reliefinformationen liegen in geometrischer Hinsicht als dreidimensionaler Punkthaufen mit Lagekoordinaten und Höheninformation vor. Im Falle der topographischen Aufnahme werden zusätzliche Angaben zur Punktart erfasst, die für die morphologisch richtige Reliefmodellierung notwendig sind (z.B. Bruchkanten, Tal- und Rückenlinien, markante Punkte, Aussparungsflächen und Umringslinien). Durch Triangulation der originär erfassten Reliefpunkte oder aus flächenhaft interpolierten Punkten in gitterförmiger Anordnung kann ein gerechnetes DGM abgeleitet werden. Die Kombination eines gitterförmigen DGM und lokaler Dreiecksvermaschung im Bereich von Strukturlinien wird als hybrides DGM bezeichnet. Eine vereinfachte digitale Beschreibung des Reliefs ist das digitale Höhenmodell (DHM, *digital elevation model DEM*). Die Anordnung der dreidimensionalen Koordinaten ist gitterförmig [Hake und Grünreich 1994, S. 136].

Die Datenerfassung kann durch terrestrische Vermessung, Digitalisierung von Karten oder photogrammetrische Methoden erfolgen. Im Weiteren werden nur die photogrammetrischen Verfahren betrachtet.

Die konventionellen photogrammetrischen Arbeitsweisen stützen sich auf die stereoskopische analoge Auswertung, z.B. am analytischen Auswertegerät. In Abhängigkeit von den gewünschten Ergebnissen und der Geländeform sind Einzelpunkt-, Raumlinien- oder Höhenlinienmessungen möglich [Kraus 1997, S. 204ff.].

Neue Möglichkeiten zur automatisierten Generierung digitaler Geländemodelle bietet die Bildverarbeitung. Ein Schwerpunkt der konzeptionellen Entwicklung konzentriert sich auf die Algorithmen zur digitalen Bildzuordnung [Gülch 1994, S. 10ff.]. Rasterdaten bilden die Grundlage der digitalen Bildverarbeitung. Die Verfahren der digitalen Bildzuordnung werden zur Punktmessung eingesetzt. Bei Berücksichtigung von Geländekanten und anderen geomorphologischen Formelementen sollten diese vor der Ableitung der Geländeoberfläche interaktiv gemessen werden.

Die Oberflächenmodellierung erfolgt durch Approximation des Reliefs in vorwiegend gitterförmiger Punktanordnung oder durch Triangulation (*triangulated irregular network*

*TIN*) der erfassten Reliefpunkte [Hake und Grünreich 1994, S. 323f.], [Kraak und Ormeling 1996, S. 103f.].

Im ersten Fall können die Gitterpunkte durch Interpolation zwischen den ursprünglichen Messpunkten bestimmt werden. Die Maschenweite ist abhängig von der Genauigkeit der Geländeapproximation, dem vertretbaren Rechenaufwand und Speicherbedarf. Beim Ansatz eines Flächenpolynoms wird das Relief in jedem Gitterpunkt approximiert. Die Koeffizienten werden durch Ausgleichung der Stützpunkte in der Nachbarschaft des Gitterpunkts geschätzt. Die Höhe eines Gitterpunkts wird als Abstand des approximierenden Flächenpolynoms zur Höhenbezugsfläche ermittelt. Weitere Ansätze sind der Literatur zu entnehmen [Kraus 2000, S. 131-180], [Kraus 1973, S. 227-237].

Eine andere Möglichkeit der Geländebeschreibung ist die Dreiecksvermaschung. Unter den vielfältigen Ansätzen zur Dreiecksvermaschung hat sich die Triangulation nach Delaunay durchgesetzt. Zu einer gegebenen Dreiecksseite wird derjenige Punkt aus der Menge der Stützpunkte ausgewählt, der den größten Scheitelwinkel mit der vorgegebenen Basis bildet. Die originären Daten werden in der Regel nicht um zusätzliche interpolierte Punkte erweitert.

### **3.3 Folgeprodukte**

Aus dem interpolierten Geländemodell können graphisch und quantitativ vielfältige Folgeprodukte erzeugt werden. Am häufigsten werden aus den Originalmessungen Höhenlinien und generalisierte Höhenlinien in verschiedenen Maßstäben abgeleitet. Im Weiteren können aus dem gerechneten Höhenmodell Profile, Querschnitte und Volumenbestimmungen erstellt werden.

Zur Festlegung von Flusseinzugsgebieten oder Abflussmodellierung kann die digitale Reliefanalyse genutzt werden. Die Veränderung der Geländeoberfläche kann durch die Bildung digitaler Differenzmodelle beschrieben werden.

Bei Rasterbildern besteht die Möglichkeit, die Oberflächentextur und -farbe direkt abzuleiten und in das Geländemodell zu übernehmen. Unter Rekonstruktion des Aufnahme-strahlengangs als Projektion des Originalbilds auf ein Geländemodell (differentielle Entzerrung) entstehen Orthophotos. Als weiteres Folgeprodukte ergibt sich die Möglichkeit der animierten Darstellung [Kraak und Ormeling 1996, S. 104-108].

### **3.4 Digitales Oberflächenmodell**

Als digitales Oberflächenmodell wird ein dreidimensionaler Punkthaufen bezeichnet, dessen Punktabstand (Gitterweite) hinreichend klein ist, um den Oberflächenverlauf vergleichbar mit dem eines digitalen Geländemodells darstellen zu können [Luhmann 2000, S. 95]. Aufgrund der hohen Punktdichte kann auf die Erfassung von Reliefinformationen verzichtet werden. Das Punktraster kann regelmäßig oder unregelmäßig aufgebaut sein.

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Geländere relief wird durch eine hohe Punktdichte beschrieben. Es werden keine expliziten topologischen Informationen erfasst. Vegetation und Bebauung sind nicht vorhanden. Aus diesem Grund wird es als digitales Oberflächenmodell definiert.

Der Begriff wird im Folgenden für ein regelmäßiges oder unregelmäßiges Punktgitter ohne beschreibende Attribute verwendet.

## 4 Digitale Bildzuordnung

Das Problem der automatischen Zuordnung korrespondierender Bildmerkmale ist eine der ältesten und aktuellsten Fragestellungen des Bildverstehens (*image understanding*). Ziel ist die automatische Auswertung der Bilder ohne menschlichen Eingriff.

Die Aufgabe der digitalen Bildzuordnung (*digital image matching* oder *correspondence problem*) besteht in der Bestimmung von Bildkoordinaten homologer Punkte aus den Grauwerten von mindestens zwei digitalen Bildern oder digitalen Bildern und einem synthetisch erzeugtem Muster (*template*). Synthetisch erzeugte Muster können zur Lokalisierung von vorgegebenen Signalen in Bildern genutzt werden. In dieser Arbeit wird ausschließlich auf die Verwendung von zwei oder mehreren Bildern eingegangen.

Bilder können direkt mit digitalen Sensoren (z.B. CCD-Sensoren, Charge Coupled Device) in der Bildebene einer Kamera aufgenommen oder durch Abtastung einer analogen Filmvorlage gewonnen werden. Anwendung finden die Bildzuordnungsverfahren in unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. zur Oberflächenrekonstruktion (Ableitung digitaler Oberflächen- oder Geländemodelle), der Bildorientierung (Bestimmung der inneren, relativen und absoluten Orientierung von Stereobildpaaren) oder der Bildsequenzanalyse.

Bei der Zuordnung von Bildern werden gleichartige Abbildungsbedingungen zugrunde gelegt. Zur weiteren Vereinfachung wird das Objekt als unbeweglich angenommen.

Eine Voraussetzung für das Verstehen räumlicher Bildszenen ist die Korrespondenzanalyse. Sie bildet die Grundlage für die automatische Zuordnung homologer Bildmerkmale. Das allgemeine Korrespondenzproblem basiert auf der eindeutigen Zuordnung zweier oder mehrerer unterschiedlicher Objektbeschreibungen oder Objektraumszenen. Eine Bildzuordnung ist in diesem Sinne erfolgreich, wenn sich die Strahlen, ausgehend von den jeweiligen Projektionszentren, durch die gefundenen korrespondierenden Punkte in einem Punkt der Geländeoberfläche schneiden. Trotz intensiver Forschungsarbeiten gehört die Korrespondenzanalyse zu der Gruppe der „schlecht gestellten Probleme“ (*ill posed problems*). Es ist nicht gewährleistet, dass eine Lösung existiert und diese eindeutig und robust gegenüber Änderungen in den Eingangsdaten ist. Schwierigkeiten können bei Verdeckungen, mehrdeutigen Objektstrukturen oder durchsichtigen Oberflächen, sowie in texturarmen Regionen auftreten [Luhmann 2000, S. 417].

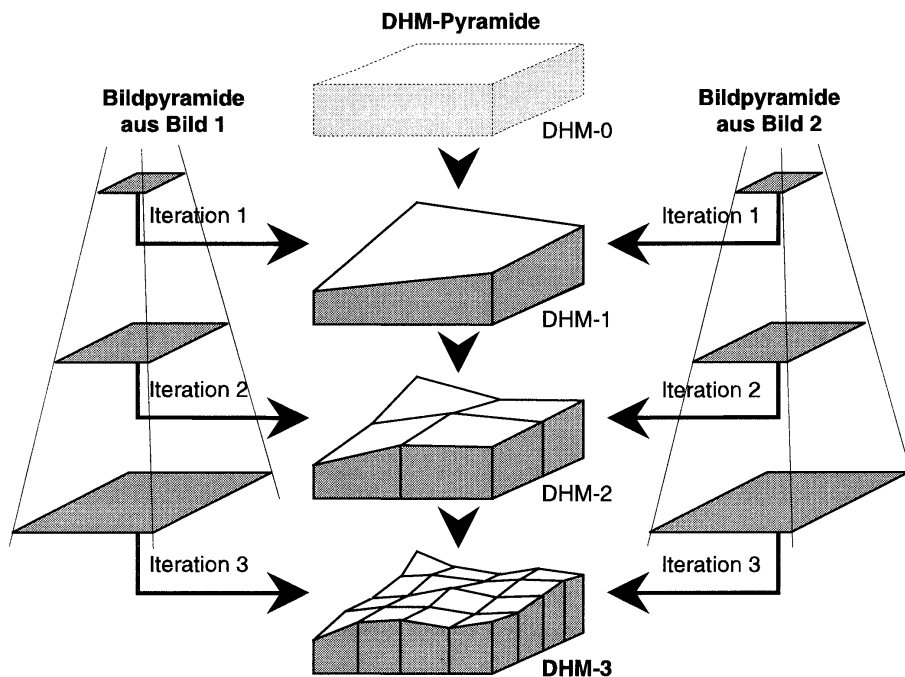
Die verschiedenen digitalen Bildzuordnungsverfahren lassen sich nach der Art der zur Bildanalyse verwendeten Bildinformation in drei Gruppen unterteilen [Heipke 1990, S. 13]:

- Bildzuordnung auf der Basis von Grauwerten (*area based matching*),
- merkmalsgestützte Bildzuordnung oder Merkmalszuordnung (*feature based matching*),
- relationale Bildzuordnung (*relational matching*).

In den Abschnitten 4.2, 4.3 und 4.4 wird ausführlicher auf die drei Gruppen der digitalen Bildzuordnungsverfahren eingegangen.

## 4.1 Bildpyramiden

In der Bildzuordnung werden bei fast allen Methoden zur Beschaffung von Näherungswerten für die genaue Lokalisierung homologer Bildinformation hierarchische Verfahren eingesetzt [Ackermann und Hahn 1991, S. 44-52]. Die verwendeten Bildpyramiden enthalten die Informationen in unterschiedlichen Auflösungsstufen (Pixelgrößen). Eine Bildpyramide wird durch die Zusammenfassung benachbarter Bildelemente erzeugt. Ausgehend vom Originalbild in der untersten Ebene wird das Bild in nicht überlappende Nachbarschaften gleicher Form und Größe unterteilt (siehe Abbildung 4.1). Diesen meist quadratischen Nachbarschaften wird der mittlere Grauwert aller beteiligten Bildelemente zugeordnet. In jeder Pyramidenstufe verschwinden mit abnehmender Bildauflösung kleine Bildstrukturen und der Informationsgehalt sinkt mit zunehmender Verkleinerung. Markante Strukturen sind leichter zu detektieren, aber weniger genau zu lokalisieren. Eine Bildpyramide, z.B. Gauß-Pyramide kann ebenfalls durch die Anwendung eines Tiefpassfilters (Glättungsfiler) gebildet werden. Die Schwierigkeit besteht in der Wahl geeigneter Filtergrößen. Bei ungeeigneter Filterwahl können virtuelle Strukturen erzeugt werden, die im Bild nicht vorkommen, sondern allein durch das Filter bedingt sind. Zur Erzeugung von Bildpyramiden können auch Kombinationen beider Verfahren angewendet werden.

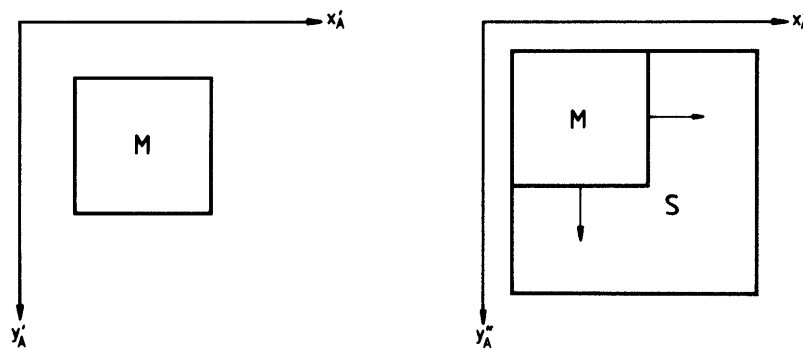


**Abbildung 4.1:** Verwendung von Bildpyramiden [Kraus 1996, S. 400]

Bildpyramiden erlauben die schrittweise Verfeinerung des Oberflächenmodells. Auf dem Ergebnis der Zuordnung in der Ebene der geringsten Auflösung basiert das Oberflächenmodell für die Bildzuordnung in der jeweils besseren Auflösungsstufe. Die Ergebnisse müssen zuverlässig und genau bis zum Originalbild übertragen werden. Wegen der Eigenschaften der Pyramidenstruktur können Merkmale bei der Übertragung zwischen zwei Stufen nicht eindeutig sein. Ein Merkmal einer bestimmten Pyramidenebene kann ein Indikator für ein gutes Merkmal, eine Repräsentation mehrerer Merkmale oder für ein Pseudo-Merkmal sein, das auf einer unteren Ebene nicht mehr auftritt [Heipke 1995, S. 41f.], [Wang 1994, S. 65f.]. Wegen der unsicheren Lokalisierbarkeit von Merkmalen in höheren Ebenen, wird jedes Paar homologer Punkte auf die nächstuntere Pyramidenebene projiziert. Um beide neu entstandenen Punkte wird je ein Suchfenster definiert (Fensterverfolgung). In diesen Fenstern wird eine Merkmalsextraktion und -zuordnung durchgeführt (siehe Kapitel 4.3). Die Verfolgung von Bildfenstern über mehrere Ebenen der Bildpyramide erhöht die Stabilität der Ergebnisse und die Schnelligkeit des Algorithmus. Der Suchbereich für die Punktzuordnung wird eingeschränkt. Der Zweck liegt vor allem in der automatischen Beschaffung von Näherungswerten für die genaue Bestimmung der Lage von Punkten auf der höchsten Auflösungsstufe (siehe Kapitel 4.2.1).

## 4.2 Bildzuordnung auf der Basis von Grauwerten

Ein häufig verwendetes Verfahren der Bildzuordnung auf der Basis von Grauwerten, also rasterorientierter Information, ist die digitale Bildkorrelation (*digital image correlation*). Die Zuordnung arbeitet mit den originären Grauwerten. Eine Mustermatrix wird, wie in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt, pixelweise über eine größere Suchmatrix eines zweiten Bilds geschoben.



**Abbildung 4.2:** Prinzip der digitalen Bildkorrelation: die Mustermatrix M wird innerhalb der Suchmatrix S verschoben [nach Claus 1983, S. 24]

Die Matrizen bestehen aus  $r$  Zeilen (*row*) und  $c$  Spalten (*column*). Ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Muster ist der Kreuzkorrelationskoeffizient  $\rho$ . Dieser wird in jeder Position für alle gemeinsamen Bildelemente beider Matrizen aus den Standardabweichungen und der Kovarianz der Grauwerte berechnet [Heipke 1995, S. 30].

$$\rho = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g(r,c)' - \bar{g}') (g(r,c)'' - \bar{g}'')}{\sqrt{\left( \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g(r,c)' - \bar{g}')^2 \right) \left( \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g(r,c)'' - \bar{g}'')^2 \right)}} \quad ; -1 \leq \rho \leq 1 \quad (4.1)$$

$g(r,c)'$  einzelne Grauwerte der Mustermatrix

$\bar{g}'$  mittlerer Grauwert der Mustermatrix

$g(r,c)''$  einzelne Grauwerte der Suchmatrix

$\bar{g}''$  mittlerer Grauwert der Suchmatrix

Der maximale Betrag des Kreuzkorrelationskoeffizienten  $\rho$  entspricht der besten Lageübereinstimmung von Muster- und Suchmatrix. Der Wert  $\rho$  kann zwischen -1 und +1



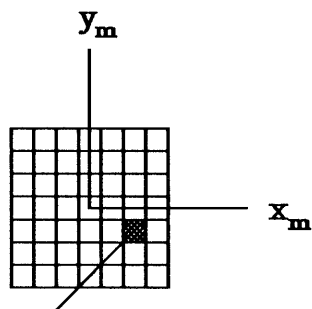
variieren. Sowohl bei -1 als auch bei +1 ist totale Korrelation erreicht. Nimmt  $\rho$  den Wert -1 an wird eine negative Entsprechung der Suchmatrix gefunden, bei +1 eine positive. Für eine gute Zuordnung liegt  $\rho$  zwischen 0,7 und 1,0.

Die Kreuzkorrelation ist ein robustes, flächenhaftes und kontrastunabhängiges Verfahren mit hohem Rechenaufwand. Die Struktur der Mustermatrix ist beliebig. Maßstabsunterschiede, Rotationen und Verzerrungen zwischen Muster- und Suchmatrix werden nicht berücksichtigt und führen zu einem geringeren Ähnlichkeitsmaß [Luhmann 2000, S. 402]. In Gebieten mit schwachem Informationsgehalt, z.B. durch homogene Oberflächen ist eine sichere Zuordnung nicht möglich. Fehlzuordnungen bei sich wiederholenden Mustern sind nicht auszuschließen.

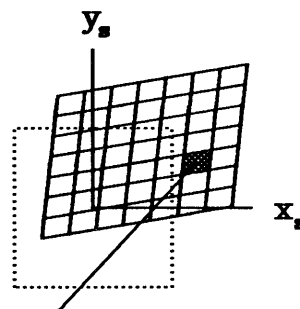
Zur Vereinfachung der Bildzuordnung kann eine Musterprojektion eingesetzt werden. Durch die Projektion von Mustern auf texturarme oder texturlose Oberflächen wird eine Struktur erzeugt. Die Oberflächenbestimmung wird möglich. Bei einigen Verfahren kann die Zuordnung homologer Bildstellen erleichtert werden. Die unterschiedlichen Verfahren der Musterprojektion sind der Literatur zu entnehmen [Kraus 1996, S. 426-440], [Schewe 1988, S. 18-23].

#### **4.2.1 Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate**

Der ursprüngliche Ansatz der digitalen Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate beruht auf der Erweiterung der Maximierung des Kreuzkorrelationskoeffizienten  $\rho$  [Förstner 1982, S. 176-181]. Bei der Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate (*least squares matching LSM*) werden die Beziehungen zwischen den Grauwerten der Muster- und Suchmatrix als nichtlineare Verbesserungsgleichungen in einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen formuliert (siehe Abbildung 4.3). Aufgrund der Nichtlinearität der Verbesserungsgleichungen sind Näherungswerte der unbekannten geometrischen und radiometrischen Parameter zu deren Bestimmung notwendig.

**Mustermatrix**

**Bildelement mit dem  
Intensitätswert  $g'$**

**Suchmatrix**

**Bildelement mit dem  
Intensitätswert  $g''$**

**Abbildung 4.3:** Digitale Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate [Heipke 1990, S. 16]

Die Grauwerte der beiden Bildausschnitte gehen als Beobachtungen in die Ausgleichung ein. Die Intensitätswerte der Muster- und Suchmatrix werden mit  $g'(r_m, c_m)$  und  $g''(r_s, c_s)$  bezeichnet. Unter Vernachlässigung systematischer geometrischer und radiometrischer Einflüsse gilt folgende Gleichung für jedes Paar von Bildelementen aus Muster- und Suchmatrix [Heipke 1995, S. 31f.], [Heipke 1990, S. 15f.].

$$g'(r_m, c_m) = g''(r_s, c_s) \quad (4.2)$$

Radiometrische Helligkeits- und Kontrastunterschiede können durch eine lineare Erweiterung der Gleichung (4.2) mit den Parametern  $r_1$  zur Helligkeits- und  $r_2$  zur Kontrastanpassung berücksichtigt werden.

$$g'(r_m, c_m) = r_1 + r_2 \cdot g''(r_s, c_s) \quad (4.3)$$

Die geometrische Anpassung der Muster- auf die Suchmatrix wird durch eine weitere Transformation beschrieben. Die Abbildung kann beispielsweise bei Einhaltung der Zentralperspektive durch die Projektivtransformation oder für genügend kleine Bildausschnitte durch eine ebene Affintransformation bestimmt werden. Zur geometrischen Transformation wurde die Affintransformation (6-Parameter-Transformation) gewählt.

$$\begin{aligned} r_s &= a_0 + a_1 r_m + a_2 c_m \\ c_s &= b_0 + b_1 r_m + b_2 c_m \end{aligned} \quad (4.4)$$

Die Translationsparameter  $a_0$  und  $b_0$  geben die relative Verschiebung zwischen Muster- und Suchmatrix an. Die Parameter  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  und  $b_2$  lassen einerseits beliebige Maßstäbe in beiden Koordinatenrichtungen und andererseits Dreh- und Scherungswinkel zwischen den Koordinatenachsen zu. Die Koordinaten  $r_s$  und  $c_s$  sind meistens keine ganzzahligen Werte. Die zugehörigen Grauwerte  $g''(r_s, c_s)$  müssen in geeigneter Weise interpoliert werden. Vorwiegend wird eine bilineare Interpolation angewendet. Der interpolierte Grauwert entsteht aus dem gewichteten Mittel der benachbarten Grauwerte.

Aus den Gleichungen (4.2) und (4.3) kann die Beobachtungsgleichung abgeleitet werden.

$$\Delta g = r_1 + r_2 \cdot g''(r_s, c_s) - g'(r_m, c_m) \quad (4.5)$$

Aufgrund der Nichtlinearität der Bildfunktion  $g''(r_s, c_s)$  muss die Gleichung im Rahmen einer vermittelnden Ausgleichung linearisiert werden. Zusammengefasst ergeben sich die in einer Taylorreihe linearisierten Verbesserungsgleichungen. Die Verbesserungen  $v(r_m, c_m)$  berechnen sich nach Gleichung (4.6). Die Linearisierung nach Taylor wird nach dem ersten Glied abgebrochen.

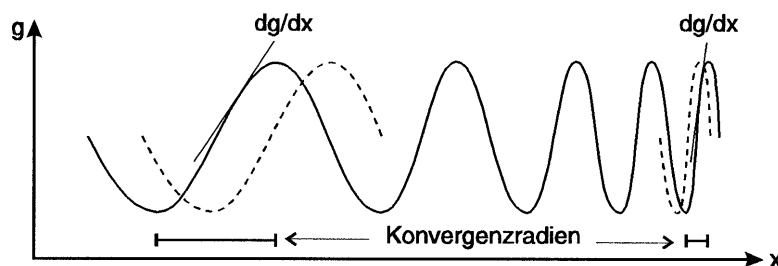
$$v(r_m, c_m) = r_1 + r_2 \cdot g''(a_0 + a_1 r_m + a_2 c_m, b_0 + b_1 r_m + b_2 c_m) - g'(r_m, c_m) \quad (4.6)$$

Die geometrischen Unbekannten  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  und  $b_2$  sowie die radiometrischen Unbekannten  $r_1$  und  $r_2$  werden im Rahmen der Ausgleichung mitbestimmt. Bedingt durch die Linearisierung der Beobachtungsgleichung muss die Lösung iterativ erfolgen.

Das entscheidende Merkmal für eine erfolgreiche Zuordnung ist die Grauwertverteilung. Die lokale Änderung der Grauwerte in benachbarten Bildelementen wird durch den Grauwertgradienten beschrieben. Die Grauwertgradienten ergeben sich aus der Linearisierung der Grauwerte der Bildausschnitte nach Taylor. Sie bilden die Normalgleichungsmatrix. Gebiete mit schwacher Oberflächentextur werden durch kleine Grauwertgradienten gekennzeichnet.

Die Bestimmung der Unbekannten in den Verbesserungsgleichungen erfolgt iterativ. Für die Anwendung sind der Konvergenzradius und die Konvergenzgeschwindigkeit ent-

scheidend. Der Konvergenzradius ist die maximale Abweichung der Unbekannten vom wahren Wert. Die Konvergenzgeschwindigkeit gibt die Anzahl der Iterationen bis zur Erreichung des Abbruchkriteriums wieder. Der Konvergenzradius eines iterativen Verfahrens sollte so groß und die Konvergenzgeschwindigkeit so hoch wie möglich sein [Heipke 1990, S. 19]. Bei der digitalen Bildzuordnung liegt der Konvergenzradius im Bereich von 1-3 Pixel. Er ist von der Textur der Bilder abhängig und kann durch die Verwendung von Bildpyramiden vergrößert werden [Heipke 1990, S. 21].



**Abbildung 4.4:** Konvergenzverhalten in Abhängigkeit von den Grauwertgradienten und Ortsfrequenzen [Kraus 1996, S. 397]

Die Grauwertverteilung eines Bildes kann als eindimensionale kontinuierliche und periodische Funktion dargestellt werden (Abbildung 4.4). Der Konvergenzradius ist von der Ortsfrequenz der Oberflächentextur abhängig. Eine eindeutige Zuordnung kann nur innerhalb der halben Wellenlänge der Ortsfunktion erfolgen. Andererseits wird mit abnehmender Wellenlänge bei gleicher Amplitude der Grauwertgradient kleiner [Bösemann 1994, S. 27f.]. Große Grauwertgradienten erhöhen die Genauigkeit und verringern den Konvergenzradius. Geringe Grauwertgradienten erhöhen den Konvergenzradius und verringern die Genauigkeit [Kraus 1996, S. 396f.].

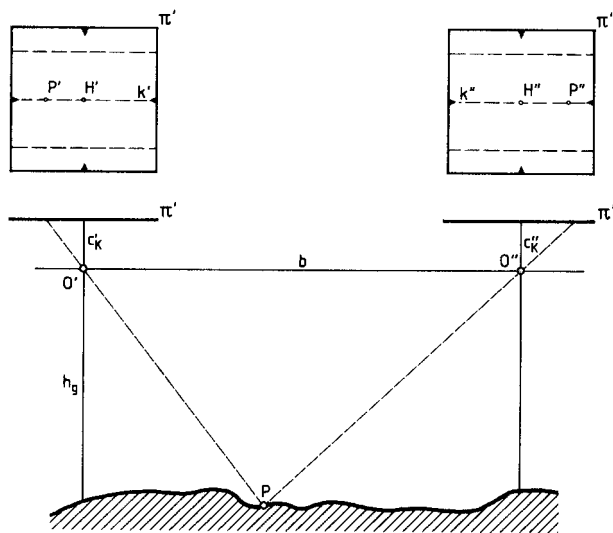
Die Vorteile der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate sind das hohe Genauigkeitspotential und die Zuverlässigkeit. Das Ausgleichungssystem ist in der Regel hochredundant, da für die zu bestimmenden geometrischen und radiometrischen Parameter alle Grauwerte eines Bildausschnitts als Beobachtungen vorliegen. Aus der Kovarianzmatrix lassen sich Genauigkeitsmaße für die ermittelten Unbekannten schätzen. Diese internen Qualitätskriterien können für statistische Ausreißertests, eine Ergebnisanalyse und zur Weiterverarbeitung genutzt werden [Luhmann 2000, S. 404]. Die erreichbare innere Genauigkeit der Korrelation nach der Methode der kleinsten Quadrate liegt bei 1/10 der Pixelgröße [Kraus 1996, S. 190]. Von Nachteil ist die Notwendigkeit guter Nä-

herungswerte für die unbekannt Parameter zur Konvergenz. Diese können aus bekannten geometrischen Objektparametern und Orientierungsdaten abgeleitet werden. Schlechte Näherungswerte können zu extrem vielen Iterationen und zu grob falschen Ergebnissen führen. Näherungswerte für den Zuordnungsalgorithmus können durch manuelle Messung von Startwerten oder aus der Verwendung von Bildpyramiden (siehe Kapitel 4.1) gewonnen werden.

Des Weiteren kann die Genauigkeit nicht durch Vergrößerung der Muster- und Suchmatrix beliebig gesteigert werden. Bei zu großer Pixelanzahl ist das Modell einer ebenen Affintransformation zwischen den Bildern nicht mehr ausreichend genau.

#### 4.2.1.1 Epipolargeometrie

Verfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate sind relativ langsam, da bei umfangreichen Auswertungen der Rechenaufwand entsprechend hoch ist. Möglichkeiten zur Einschränkung des Suchbereichs können genutzt werden. Dazu gehört die Suche entlang von Kern- oder Epipolarlinien in den orientierten Bildpaaren.



**Abbildung 4.5:** Epipolargeometrie für den Stereonormalfall [Claus 1983, S. 29]

Sind die Parameter der relativen Orientierung zweier Bilder bekannt, so kann mit ihrer Hilfe jedes Bild in ein Normalbild transformiert werden. Im Normalfall sind die Aufnahmeachsen zueinander parallel und senkrecht zur Basis b angeordnet (siehe Abbildung 4.5). Die Abbildungsstrahlen vom jeweiligen Projektionszentrum O' bzw. O'' zum Objektpunkt P spannen zusammen mit der Basis die sogenannte Kern- oder Epipolarebene

auf. Diese Ebene schneidet die Bildebenen in den Schnittgeraden  $k'$  und  $k''$ , die als Kern- oder Epipolarlinien bezeichnet werden. Im Normalbildfall verlaufen die Kernlinien in den Bildern  $\pi'$  und  $\pi''$  parallel. Die Bilder sind  $y$ -parallaxefrei. Für die Höhenbestimmung brauchen nur die Koordinaten eines Punkts im linken Bild und die  $x$ -Parallaxe (Horizontalparallaxe) zum korrespondierenden Punkt im rechten Bild gemessen zu werden. Mit Hilfe der Epipolargeometrie wird die Suche nach einem zugeordneten Punkt auf eine Dimension beschränkt, d.h. die Suchmatrix muss nur noch in Richtung der  $x$ -Koordinate verschoben werden [Luhmann 2000, S. 239f.], [Kraus 1997, S. 358-362], [Kraus 1996, S. 408-412]. Bei Mehrfachbildern gilt die Epipolarbedingung immer nur paarweise.

Die Kernstrahlbedingung kann auch zur Eliminierung falscher Zuordnungen verwendet werden.

Aufgrund von Orientierungsunsicherheiten wird häufig ein Suchbereich links und rechts von der Epipolarlinie eingerichtet. Die Bestimmung korrespondierender Punkte wird entlang der Kernlinie und im Suchbereich durchgeführt.

#### 4.2.1.2 Weitere Bildzuordnungsverfahren

Das eingeführte Verfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate für zwei Bildausschnitte (Muster- und Suchmatrix) kann um funktionale Merkmale erweitert werden. Im Folgenden wird exemplarisch auf drei Erweiterungen der Methode der kleinsten Quadrate kurz eingegangen.

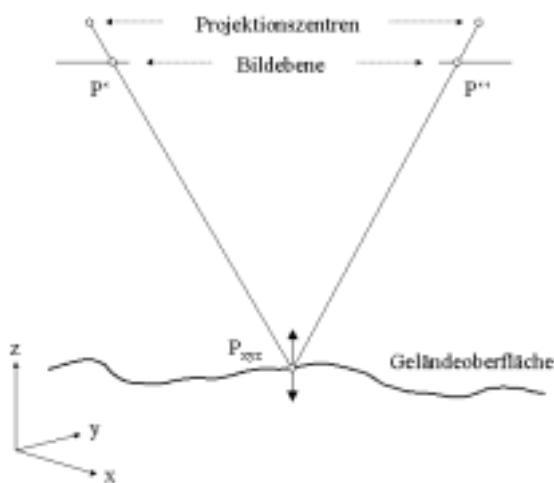
Bei der Mehrpunktzuordnung (*multi-point matching*) werden mehrere Punkte innerhalb eines Fensters gleichzeitig bestimmt [Rosenholm 1986, S. 575-579]. Der Bildraum wird in ein Gitter unterteilt. Für jedes Bildelement eines Gitters wird die Verschiebung der Mustermatrix relativ zur Suchmatrix als eine Funktion der Verschiebung in den Gitterpunkten formuliert. Statt einer Affintransformation werden in einem Ausgleichungsschritt für jedes Gitterelement die unbekanntes Verschiebungen (Gitterpunktparallaxen) simultan bestimmt [Heipke 1990, S. 17].

Die geometrische Objektrauminformation findet Berücksichtigung im Adaptiven Kleinsten Quadrate Algorithmus (*multi-image geometrically constrained matching*) [Grün und Baltsavias 1988, S. 285-287], [Grün und Baltsavias 1986, S. 633-636]. Durch die Einbeziehung von geometrischen Bedingungen können die digitale Bildzuordnung und photo-

grammetrische Punktbestimmung simultan in einem gemeinsamen Modell durchgeführt werden. Der Zusammenhang zwischen den Verschiebungen der Bildelemente und den Änderungen der Objektkoordinaten wird durch die Kollinearitätsgleichungen hergestellt. Aufgrund der Schnittbedingung homologer Strahlen in einem Objektpunkt werden für die Muster- und Suchmatrix je zwei Bedingungsgleichungen formuliert. Die Koordinaten des jeweiligen Objektpunkts werden als zusätzliche Unbekannte in der Ausgleichung mitbestimmt. Unbekannte Bildorientierungen können auf gleiche Weise ermittelt werden. Ferner besteht zur Erhöhung der Zuverlässigkeit die Möglichkeit der simultanen Verarbeitung von mehr als zwei Bildern [Heipke 1990, S. 18].

Eine weitere Verallgemeinerung, basierend auf der geometrischen Beziehung zwischen mehreren Bildern, stellt die Verbindung der Mehrpunktzuordnung mit dem Adaptiven Kleinste Quadrate Algorithmus dar. Ziel ist die dreidimensionale Oberflächenrekonstruktion durch die simultane Bestimmung der Orientierungsparameter, der Objektpunktkoordinaten und der Parameter zur Oberflächenbeschreibung im Objektkoordinatensystem. Bei der Bildzuordnung im Objektraum (*object-space matching*) werden die Grauwerte aller vorliegenden Bilder eines Objekts mit den gesuchten Größen zur Objektrekonstruktion verknüpft [Bösemann 1994, S. 22-27], [Heipke 1990, S. 23-33], [Ebner et al. 1987, S. 196-199].

Das einfachste diesbezügliche Zuordnungsverfahren ist das Korrelatorprinzip (siehe Abbildung 4.6). In der Literatur wird dieses auch als VLL-Zuordnung (Vertical Line Locus) bezeichnet.



**Abbildung 4.6:** Korrelatorprinzip [Linder 2000b, S. 4]

Entlang der Lotlinie eines Objektpunkts  $P$  wird eine Serie gleichabständiger  $Z$ -Koordinaten definiert. Die Höhenwerte werden mittels bekannter Orientierungsparameter in die beiden Bilder transformiert. Aus den Intensitätswerten der jeweils zu einem Punkt der Lotlinie gehörenden Bildausschnitte wird der Korrelationskoeffizient  $\rho$  berechnet. Durch Veränderung der Höhe verschieben sich die zu korrelierenden Bildausschnitte. Das Maximum des Korrelationswerts legt die gesuchte Höhe des Objektpunkts fest. Die Begriffe Muster- und Suchmatrix verlieren hier ihre eigentliche Bedeutung, da die beiden Bildausschnitte gleichberechtigt sind [Luhmann 2000, S. 317], [Kraus, 1997 S. 371f.].

Bei dem Verfahren der Epipolargeometrie werden die homologen Punkte eines Bilds direkt im anderen aufgesucht. Es kann ein regelmäßiges Gitter im Bildraum erzeugt werden. Das Korrelatorprinzip ist von Vorteil bei der Erstellung eines gitterförmigen Oberflächenmodells, da das regelmäßige Gitter direkt im Objektraum vorgegeben werden kann.

Gleichzeitig kann ein Orthobild abgeleitet werden. Zur Formulierung der Beziehungen zwischen Bild- und Objektgrauwert werden ein geometrisches und ein radiometrisches Modell eingeführt. Für die geometrische Beschreibung wird in der Objektebene ein gleichmäßiges Gitter definiert. Die Gitterweite richtet sich nach der Gestalt der Oberfläche. Im radiometrischen Modell wird jede Gittermasche in gleich große Oberflächenelemente unterteilt. Der zugeordnete Grauwert kann als Grauwert des Orthobilds ausgelegt werden.

Ausgehend von der Wahl des Ansatzes kann die Oberfläche statt in regelmäßig angeordnete Höhenstützpunkte in drei- oder viereckige Maschen (Facetten) unterteilt werden, in denen linear, bzw. bilinear interpoliert wird [Schlüter und Wrobel 1999, S. 23-25], [Wrobel 1987, S. 94-100]. Die Höhe eines Oberflächenelements kann durch einen konstanten Wert oder die Modellierung einer Tangentialebene beschrieben werden. Bei der Methode der finiten Elemente wird diese aus den umliegenden Gitterpunkthöhen interpoliert. Durch die Kollinearitätsgleichungen wird die Beziehung zwischen den beiden Modellen und den Grauwerten der aufgenommenen Bilder hergestellt. Die Bildkoordinaten des Oberflächenelements können berechnet werden. Der zum Oberflächenelement gehörende Grauwert wird aus den umliegenden Werten interpoliert. Für jedes Oberflächenelement kann in jedem Bild eine Beobachtung abgeleitet werden. Die Quadratsumme der



entsprechenden Abweichungen kann in einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate als Funktion der unbekanntten Höhe minimiert werden.

### 4.3 Merkmalsgestützte Bildzuordnung

Bei der Merkmalszuordnung werden in einem ersten Schritt geeignete Merkmale wie markante Punkte, Kanten und Flächen aus den Bildern unabhängig voneinander extrahiert. Neben der genauen geometrischen Lage werden dabei auch die das Merkmal beschreibenden Attribute ermittelt. Für Punkte können das z.B. der minimale und maximale Grauwertgradient in unterschiedlichen Richtungen, für Kanten deren Länge oder Krümmung und für Flächen die Größe, Form, der mittlere Grauwert oder die Varianz der Grauwerte innerhalb der Fläche sein. In der Regel werden diese Attribute für lokale Bereiche bestimmt. Aufgrund von vorgegebenen oder automatisch ermittelten Schwellwerten wird festgelegt, ob es sich um ein Merkmal handelt oder nicht. Voraussetzungen an die Merkmale für eine effiziente Zuordnung sind Deutlichkeit, Invarianz gegenüber geometrischen sowie radiometrischen Verzerrungen, Stabilität, Seltenheit, und Interpretierbarkeit [Förstner 1991, S. 41f.]. Punkten ist die geometrische und radiometrische Invarianz eigen. Die Interpretierbarkeit ist dagegen gering. Aus diesen Gründen eignen sich Punkte besonders für die Aufgaben innerhalb der digitalen Bildzuordnung. Kanten und Flächen werden vor allem zur Objekterkennung verwendet. Zur Merkmalsextraktion können Interest- oder Kanten-Operatoren eingesetzt werden. Einige wichtige Interest-Operatoren zur automatischen Extraktion markanter Punkte sind der Moravec-, Dreschler- und Förstner-Operator. Bei diesen wird versucht, die Grauwertunterschiede in möglichst vielen Richtungen rund um den markanten Punkt zu maximieren. Weiterführende Beschreibungen sind der Literatur zu entnehmen [Luhmann 2000, S. 419-424], [Heipke 1995, S. 24-29].

In der folgenden merkmalsbasierten Zuordnung werden die korrespondierenden Merkmale in den Bildern ermittelt. Im einfachsten Fall wird für jedes Merkmal eines Bilds untersucht, wie gut es mit jedem der anderen Bilder übereinstimmt. Aufbauend auf den Attributen der Merkmale wird ein Ähnlichkeitsmaß definiert. Vorhandene Informationen über die Bilder und die abgebildete Objektraumszene können zusätzlich verwendet werden um den Suchraum einzugrenzen, Fehlzuordnungen zu minimieren und den Rechenaufwand zu reduzieren. Das Ergebnis der Zuordnung ist eine unstrukturierte Liste mögli-

cher homologer Punkte mit der Angabe eines aus dem Ähnlichkeitsmaß abgeleiteten Qualitätswerts für jede Zuordnung. Die tatsächlichen homologen Punkte werden bestimmt aufgrund von Kompatibilität, Eindeutigkeit und Kontinuität [Heipke 1995, S. 31]. Diese Bedingungen können durch die Einführung einer Transformation vom Objektraum in die Bildebene und eines Objektmodells erfüllt werden.

Im Gegensatz zur Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate sind keine sehr genauen Näherungen für die vermutete Lage homologer Punkte erforderlich, da die Punktverteilung untersucht wird. Die Genauigkeit ist hingegen geringer. In Gebieten mit ausgeprägter Textur können Näherungswerte für die Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate durch die Merkmalszuordnung zur Verfügung gestellt werden. Einen ausführlichen Vergleich der beiden Methoden gibt Gülch [Gülch 1994, S. 22-24, 49, 55].

#### **4.4 Relationale Bildzuordnung**

Die relationale Bildzuordnung verwendet neben den Attributen zusätzlich Relationen zwischen den Merkmalen. Die Relationen enthalten in der Regel vergleichende Informationen wie „rechts von“, „über“, „parallel zu“, „schneidet“, „enthält“. Diese werden für jedes Bild separat aufgestellt und anschließend in die anderen Bilder transformiert [Heipke 1995, S. 31].

Relationale Zuordnungsverfahren stellen ein Bindeglied zum Bildverstehen dar. Sie werden hauptsächlich zur Lösung des allgemeinen Korrespondenzproblems (Objekterkennung) und Szenenbeschreibung verwendet [Kraus 1996, S. 418-422]. Das auch als Strukturzuordnung bezeichnete Verfahren wird nicht weiter behandelt.

## 5 Voraussetzungen

Die Vorbereitung sowie Durchführung der Erosionsversuche und die Erstellung der zugehörigen Aufnahmen der Bodenoberflächen erfolgten am National Soil Erosion Research Laboratory. An einem Aufbau für Bodenerosionsversuche konnten parallel zu den laufenden Berechnungen photogrammetrische Oberflächenermittlungen angestellt werden. Zu jeder Berechnung sind die mittels Zeilenlaserscanner gewonnenen Oberflächendaten und die Ergebnisse von Abflussproben verfügbar. Für die photogrammetrischen Aufnahmen wurde die digitale Kamera Kodak DCS 1m bereitgestellt. Zur Auswertung der gewonnenen Daten wurde Software zur digitalen Bildzuordnung und Interpolation eingesetzt.

### 5.1 Versuchsparzelle

Zur Oberflächenbestimmung stand eine sogenannte Box von 4,18 m Länge, 2,24 m Breite und 1,30 m Höhe zur Verfügung (siehe Abbildung 5.1). Diese wurde unter dem Aspekt einer möglichst naturgetreuen Nachbildung mit Boden verfüllt.

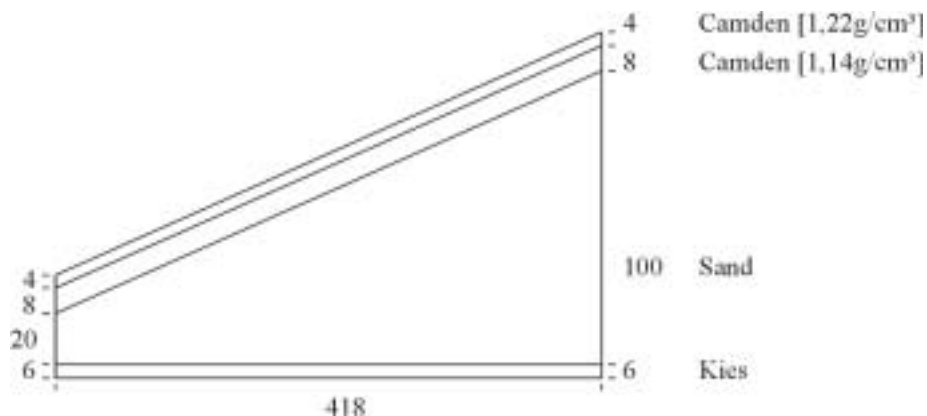


**Abbildung 5.1:** Versuchsparzelle

Die Box besteht aus 2 cm starken sechs-lagigen Spanplatten aus Fichte. Diese werden an den Längsseiten von jeweils fünf und an der Rückseite von drei 9 cm x 9 cm starken

Balken vertikal gestützt. Weitere Balken werden oben und unten über die gesamte Länge und Breite der Box als Rahmen zur Verstärkung genutzt. Auf halber Breite der Längsseiten ist jeweils eine Metallschiene zur Steigerung der Stabilität angebracht. Die Box ist an der Vorderseite offen. Zur Entnahme von Abflussproben ist an der Unterkante ein Auslauf angebracht. Von innen ist die Box mit Teerfarbe gestrichen, der obere Rand ist gelb lackiert.

Vorrichtungen für den Laserscanner wurden montiert. Auf der hinteren Rahmenseite wurde in einer Höhe von 100 cm eine Führungsschiene aus Aluminium auf zwei Metallstreben befestigt. An den Längsseiten wurde ebenfalls vorne je ein Metallwinkel angebracht, auf dem die zweite Führungsschiene des Laserscanners verschraubt werden kann.



**Abbildung 5.2:** Füllung der Box. Angaben in [cm]

In mehreren Lagen wurde der Boden in die Box gefüllt (siehe Abbildung 5.2). Zum besseren Abfluss wurde die Unterseite der Box mit einer 6 cm dicken Schicht aus Kies bedeckt. Mit Sand wurde ein Gefälle von 31% angelegt. Der erste Oberboden Camden Soil ist 8 cm mächtig. Der Boden wurde zuvor luftgetrocknet und durch ein 3 mm Sieb geführt. Anschließend erfolgte die Verdichtung der Bodenschicht mit einer Rolle bekannten Gewichts.

Vor der ersten Beregnung wurde der Boden mit Geotextil (wasserdurchlässige Plastikfolie) abgedeckt, um die durch den Regen entstehende Erosion zu senken, den Abtrag zu verringern und einer Bodenversiegelung vorzubeugen. Der Vorregen von der Dauer einer Stunde erfolgte mit einer Intensität von 30 mm/h. Nach dem Trocknen der Bodenoberfläche wurden die Trocknungsrisse verfüllt und die Fläche erneut geebnet. Nachträglich

wurden 4 cm Camden Soil aufgetragen. Abschließend fand eine weitere Beregnung der mit Geotextil bedeckten Oberfläche von einer Stunde mit 15 mm/h statt.

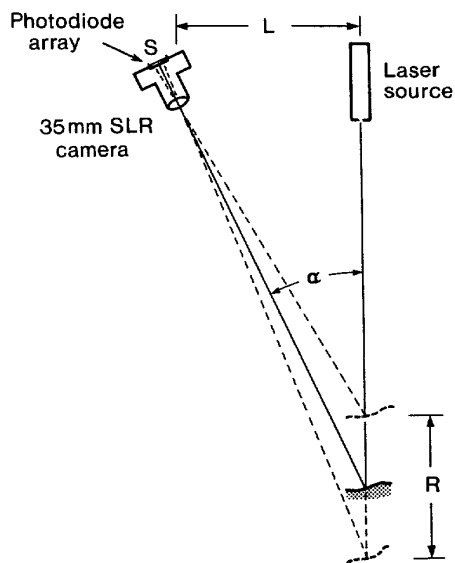
Zur Bestimmung des mittleren Wassergehalts wurden acht Paar Messstäbe in den Boden eingebracht. Die benutzten Stäbe zur TDR-Messung (Time Domain Reflectometry) haben eine Länge von 15 cm, d.h. der durchschnittliche volumetrische Wassergehalt von 0-15 cm Bodentiefe wurde ermittelt.

## 5.2 Camden Soil

Der für die obersten Schichten verwendete Camden Soil ist ein „Typic Hapludalfs“ nach amerikanischer Klassifizierung. Nach deutscher Klassifikation entspricht dies einer Parabraunerde. Diese bildete sich aus dem Löß der Wisconsin Kaltzeit. Das Bodenmaterial entstammt dem B<sub>t</sub>-Horizont, der eine Tiefe von 0,5–1,0 m aufweist. Die Korngröße entspricht einem schluffigen Lehm. Die Zusammensetzung des Feinbodens besteht aus 2,3% Sand, 86,4% Schluff und 11,3% Ton. Camden Soil zeichnet sich durch eine hohe Erodibilität aus. Die Farbe des Bodenmaterials ist hell gelblich braun [USDA & NRCS 2001], [USDA & NRCS 1998, S. 319].

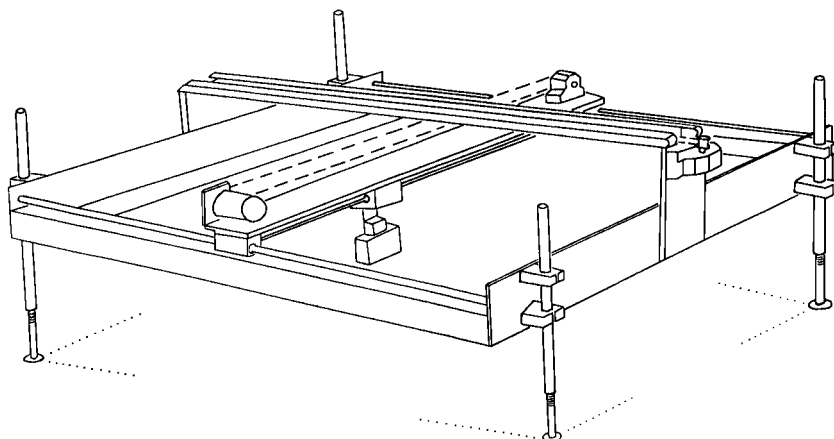
## 5.3 Laserscanner

Die verwendete Messmethode zur Bestimmung der Bodenoberfläche ist das Lasertriangulationsverfahren. Bei der Triangulation wird ein vom Laserstrahl erzeugter Lichtfleck auf der Bodenoberfläche von einer Optik aufgenommen und auf einem Sensor S abgebildet (siehe Abbildung 5.3). Die Optik steht in einem festen Winkel  $\alpha$  und konstanten Abstand L zur Laserquelle. Eine unterschiedliche Höhe der Bodenoberfläche entspricht einer veränderten Abbildungsposition des Lichtflecks auf dem Sensor. Der Messbereich R in der Höhe und die Auflösung des Laserreliefmeters werden gesteuert durch den Abstand und Winkel zwischen Optik und Laser, der Brennweite der Optik, der Größe des Sensors sowie der Anzahl der Sensorelemente [Huang et al. 1988, S. 350f.]. Die Wahl der Brennweite ist abhängig vom Relief und dem Abstand der Kamera zur Bodenoberfläche [Bertuzzi et al. 1990, S. 177].



**Abbildung 5.3:** Prinzip der Laserpunkttriangulation  
[nach Huang et al. 1988, S. 351]

Die Messeinheit, bestehend aus Laserquelle und Sensor ist auf einer Traverse montiert und wird mittels Schrittmotoren über die Fläche bewegt. Die Schrittweite ist variabel. Die erfassten Daten können analog oder digital gespeichert werden. Fehlmessungen oder fehlende Werte werden mit -9999 markiert. Durch Anbringen einer Kalibrierungsformel werden die Rohdaten weiterverarbeitet. Die Reliefdaten liegen direkt auswertbar als relative Höhenwerte vor.



**Abbildung 5.4:** Flächenhaft arbeitender Laserscanner  
[nach Helming 1992, S. 38]

Zur flächenhaften Abmessung wird die Messeinheit meanderförmig über die gesamte Fläche bewegt. Abbildung 5.4 zeigt die Aufnahmekonfiguration. Die Traverse ist auf ei-

nen Rahmen montiert. Die horizontale Ausrichtung erfolgt durch die Höhenverstellung der vier Füße des Rahmens. Für die Abmessung einer 1 m x 1 m großen Fläche mit einem Messpunktabstand von 1 mm werden mindestens sieben Stunden benötigt [Helming 1992, S. 12]. Multitemporale Messungen in Verbindung mit Beregnungsversuchen sind so nur schwer zu realisieren.

Das verwendete Laserreliefmeter ist eine Weiterentwicklung des von Huang et al. (1988) beschriebenen Laserscanners. Huang ersetzte die punktförmige Laserquelle durch zwei 40 cm breite Helium-Neon-Zeilenlaser. Aufgrund von Überlappung erzeugen diese zusammen eine 60 cm breite Laserlinie (siehe Abbildung 5.5).



**Abbildung 5.5:** Eingesetzter Zeilenlaserscanner

Die Messeinheit ist auf eine 4 m lange Schiene aus Aluminium montiert. Die Traverse ist auf zwei jeweils an den Breitseiten der Box angebrachten Führungsschienen parallel zur Bodenoberfläche gelagert. Nach der Erfassung eines Streifens wird das Laserreliefmeter parallel zur Längsseite der Box um einen konstanten Betrag verschoben. Während der Durchführung der Beregnungsversuche muss der Laserscanner entfernt werden.

Zur Steuerung des Schrittmotors und Datenaufnahme ist ein Prozessor mit der internen Elektronik des Laserreliefmeters verbunden. Eine relative Referenz wird vor jeder Messung eines Streifens definiert. Alle Koordinaten der Fläche beziehen sich auf diesen Nullpunkt.

Der Sensor hat eine Größe von 1280 Pixel x 1024 Pixel und die Optik eine Brennweite von 35 mm. Die maximal genutzte Streifenbreite beträgt 60 cm. Bei einer Breite der Laserlinie von 1 mm liegt die Standardabweichung bei etwa 1,5 mm. Die Messgeschwindigkeit für einen Streifen von ca. 4 m Länge und einer Gitterweite von 1,5 mm liegt im Bereich von einer halben Stunde.

### **5.3.1 Kalibrierung**

Die zur Weiterverarbeitung an die Laserscannerdaten angebrachten Korrekturwerte, sind einer im voraus erfolgten Kalibrierung zu entnehmen. Die Notwendigkeit einer neuen Kalibrierung besteht nach Huang und Bradford (1990, S. 1406) nur nach einer Veränderung der Geometrie von Laser und Sensor.

Bei der Kalibrierung des verwendeten Zeilenlaserscanners wird zwischen Sensor und Laser in der Ebene der Laserlinie ein Metallrahmen eingebaut. In den Metallrahmen sind in vertikaler Ausrichtung in einem Abstand von 2,5 cm 20 Kerben eingelassen. Ein Balken mit zehn roten Leuchtdioden wird in die Kerben eingesetzt. Die Abstände der Kerben auf dem Balken sind bekannt. Durch Verschiebung des Balkens werden Kontrollpunkte erzeugt, die auf der gesamten Sensorfläche abgebildet werden.

Für das Kalibrierungsprofil wird je ein Polynom vierter Ordnung für Zeile und Spalte berechnet. Mit der ermittelten Korrekturfunktion kann jeder gemessene Wert in relative Höhen- und Lagekoordinaten umgerechnet werden.

Die Kalibrierung erfolgt ohne Berücksichtigung der Verschiebung des Laserscanners auf der Traverse. Die Verwendung eines geometrisch anschaulichen Modells, sowie der statistische Test auf Signifikanz der einzelnen Parameter werden dabei vernachlässigt.

### **5.3.2 Aufnahmekonfiguration**

Bedingt durch die Bauart des Zeilenlaserscanners und des Versuchsaufbaus erfolgte die Ausrichtung der Achse Kamera-Laser parallel zum Gefälle des Bodens bzw. zur Längsseite der Box. Für das Scanraster wurde eine Gitterweite von 1,5 mm x 1,5 mm gewählt um eine Höhenauflösung von 1 mm zu erreichen. Eine Aufnahmeplanung für das zu erwartende Genauigkeitspotential konnte aufgrund fehlender Angaben über Basislänge zwischen Laser und Sensor sowie Höhe über Grund nicht durchgeführt werden.



Bei der vorgegebenen Streifenbreite von 60 cm und einer Streifenlänge von ca. 4 m ergeben sich pro Scan ungefähr 1 Mio. Punkte. Für die Erfassung der gesamten Bodenoberfläche sind sechs einander überlappende Streifen notwendig. Der Laserscanner wurde aus diesem Grund nach jedem durchgeführten Scan um ca. 25 cm versetzt.

Einmalig vor Beginn der Versuchsreihe fand eine Kalibrierung des Laserscanners statt, d.h. es wird von einem stabilen Verhalten des Laserscanners über einen längeren Zeitraum ausgegangen. Das Anbringen der Korrekturwerte und die folgende Auswertung der jeweiligen Daten eines Streifens erfolgte mit eigens am NSERL erstellten Programmen.

## 5.4 Digitale Kamera

Die eingesetzte digitale Kamera Kodak DCS 1m gehört zur Familie der hochauflösenden Still-Video-Kameras [Eastman Kodak Company 1995]. Das Gehäuse der Canon EOS 1n Spiegelreflexkamera wurde mit einer digitalen Rückwand von Kodak versehen. In der Abbildungsebene der Kamerarückwand wurde der 18,4 mm x 27,6 mm große, flächenhafte CCD-Sensor KAF-6303 mit einer geometrischen Auflösung von 3060 Pixel x 2036 Pixel und einer radiometrischen Auflösung von maximal 1024 Helligkeitsstufen pro Bildelement eingesetzt. Die Pixelgröße beträgt 9  $\mu\text{m}$  x 9  $\mu\text{m}$ . Wegen der Bewegung des Chips wurde dieser nachträglich am Gehäuse der EOS 1n fixiert.

Das Bildformat der DCS 1m ist im Vergleich zum gängigen Kleinbildformat 24 mm x 36 mm um den Faktor 1,3 kleiner, d.h. dass die DCS 1m die Öffnungswinkel der verschiedenen Objektive um den Faktor 0,77 reduziert. Bei der Kamera handelt es sich um die monochrome (m) Version. Die Empfindlichkeit der Sensoren entspricht einer Filmempfindlichkeit von 200 ISO.

Die Datenspeicherung beträgt bei einer Quantisierung mit 256 Graustufen (8 Bit) 6 MByte pro Bild. Die zunächst analogen Bildsignale werden in der Kamera digitalisiert und in einem DRAM (Dynamic Random Access Memory) abgelegt. Aufgrund der Größe des DRAM von 16 MByte können dort maximal zwei Bilder gespeichert werden. Für eine längerfristige Speicherung der Bilder steht eine kamerainterne austauschbare PCMCIA-Karte (Personal Computer Memory Card International Association) zur Verfügung. Eine Wechselplatte von 260 MB (Typ III) ist ausreichend für die unkomprimierte Speicherung

von 43 Bildern. Die Bilder können mit der PCMCIA-Karte offline in den Computer übertragen werden. Für die online Übertragung der Bilddateien zum PC oder Laptop ist die Kamera mit einer SCSI-Schnittstelle ausgerüstet. Die Bildfolgezeit, d.h. die Zeit von der Belichtung bis zur Abspeicherung, beträgt 8 sek. Mit Hilfe eines eingebauten bzw. externen Akkus kann die Kamera netzunabhängig betrieben werden. Das Gewicht von ca. 2,2 kg inklusive Objektiv und Speicherkarte erlaubt noch freihändige Aufnahmen ohne Stativ.



**Abbildung 5.6:** Photogrammetrisches Aufnahme- und Auswertesystem

Die Verwendung eines handelsüblichen Kameragehäuses bietet Vorteile für den photogrammetrischen Einsatz. So kann z.B. die Belichtungsmessung automatisch durch die Kamera erfolgen, Belichtungszeit und Blende manuell eingestellt sowie gängiges Canon-Zubehör, wie Objektive, Blitzgerät und Fernauslöser verwendet werden.

Gemeinsam mit der Kamera wird ein Laptop mit PCMCIA-Steckplatz benutzt (siehe Abbildung 5.6). Neben der Erweiterung der Aufnahmekapazität besteht die Möglichkeit die Aufnahmen vor Ort hinsichtlich ihrer Qualität zu überprüfen.

Zur Weiterverarbeitung liefert Kodak ein Plug-In Modul für Bildverarbeitungsprogramme, wie z.B. Adobe Photoshop. Die Bilddaten können mit dem Bildverarbeitungsprogramm eingelesen und dort im RAW-Format abgespeichert werden. Hierbei werden nur die Grauwerte eines Bilds unkomprimiert in einer Datei abgelegt. Informationen über die Größe des Originalbilds müssen separat gesichert oder bereitgestellt werden, da RAW-Daten sonst fehlerhaft bzw. gar nicht eingelesen werden können.

Folgende Objektive standen zur Verfügung: Leica Elmarit R 2,8/19 mm und Schneider PC (Perspective Correction; wurde entfernt und durch einen Tubus ersetzt) Super Angulon 2,8/28 mm, beide umgebaut auf Canon EF-Anschluss, sowie Canon EF 2,5/50 mm Makro. Zum Erhalt der inneren Orientierung wurden die 19 mm- und 28 mm-Objektive mit Fokussierungsrasten ausgestattet.

### **5.4.1 Kalibrierung**

Bei der Kalibrierung von Aufnahmesystemen werden die Parameter der inneren Orientierung, d.h. die Kammerkonstante  $c$ , die Lage des Bildhauptpunkts  $x_0$ ,  $y_0$  und zusätzliche Parameter bestimmt. Durch diese Parameter werden beispielsweise Scherung, Affinität, verbleibende systematische Bildfehler und tangentielle Fehler sowie radialsymmetrische Verzeichnungen abgedeckt. Es wird zwischen den Verfahren der Labor-, projektbegleitenden und Simultan- bzw. Selbstkalibrierung unterschieden. Diese lassen sich durch das Referenzobjekt sowie durch Ort und Zeit der Kalibrierung charakterisieren [Luhmann 2000, S. 490-501], [Kraus 1996, S. 462-467].

#### **5.4.1.1 Laborkalibrierung**

Bei der Laborkalibrierung werden die Parameter der inneren Orientierung vom Hersteller mit Kollimatoren oder Goniometern ermittelt. Richtungen oder Winkel der Bildstrahlen werden durch das Objektiv der Kamera hindurch gemessen. Die Ergebnisse werden im Kalibrierungszertifikat niedergelegt.

Dieses Verfahren eignet sich nur für Systeme mit stabiler Mechanik, wie z.B. bei Luftbildkameras.

#### **5.4.1.2 Projektbegleitende Kalibrierung**

Bei Aufnahmesystemen mit instabiler bzw. variabler innerer Orientierung, z.B. beim Einsatz von Amateurkameras, sind Kalibrierung und Objektaufnahme zeitlich zusammenzulegen oder zeitlich geringfügig gegeneinander versetzt vorzunehmen.

Die Testfeldkalibrierung wird an einem signalisierten Objektpunktfeld mit bekannten Koordinaten oder Strecken durchgeführt. Von mehreren Standpunkten aus wird das Testfeld formatfüllend und mit ausreichender Strahlenschnittgeometrie aufgenommen. Das

Testfeld muss über eine genügend große Anzahl an bekannten und entsprechend genauen Koordinatenpunkten mit ausreichender Tiefenausdehnung verfügen. Testfelder können transportabel oder fest an einem Objekt angebracht sein. Der Zeitraum zwischen den Aufnahmen zur Kalibrierung und Objektaufnahme sollte möglichst gering gehalten werden. Auf eine unveränderte Fokussierung ist zu achten.

Mit dem Begriff „on-the-job calibration“ verbindet man die Kombination einer Testfeldkalibrierung mit der eigentlichen Objektaufnahme. Das Testfeld kann im einfachsten Fall aus einem Rahmen mit mehreren räumlich angeordneten Maßstäben bestehen. Dieser wird mit dem Objekt zusammen aufgenommen. Zwischen den einzelnen Aufnahmen darf sich die gegenseitige Positionierung von Objekt und Passpunktrahmen nicht verändern. Das lokale Koordinatensystem des Testfelds kann gleichzeitig zur Datumsfestlegung des Objektkoordinatensystems verwendet werden. Weitere Passpunkte sind daher nicht erforderlich.

#### **5.4.1.3 Simultan- und Selbstkalibrierung**

Im Gegensatz zu den vorherigen Verfahren muss bei der Simultankalibrierung der Aufnahmegegenstand kein Testfeld mit einer großen Anzahl bekannter Passpunkte, sondern kann auch das zu vermessende Objekt selbst sein. Es sind keine zusätzlichen Kalibrierungsaufnahmen notwendig. Passpunkte dienen lediglich zur Festlegung des absoluten Datums. Für Maßstabsinformationen ist es ausreichend eine bekannte Strecke im Objekt-raum zu erfassen. Die innere Orientierung wird exakt für den Zeitpunkt der Objektaufnahme bestimmt und erlaubt höchste Genauigkeiten bei der Objektauswertung.

Wird die Simultankalibrierung nur mit photogrammetrischen Beobachtungen ausgeführt, spricht man von Selbstkalibrierung.

#### **5.4.2 Testfeldkalibrierung**

Die Kalibrierung des 19 mm-Objektivs wurde unmittelbar vor der Aufnahme der Bodenoberfläche durchgeführt. Aufgrund der am Objektiv angebrachten Fokussierungsrasten wird während des Zeitraums der Bilderfassung von konstanten Parametern der inneren Orientierung ausgegangen.

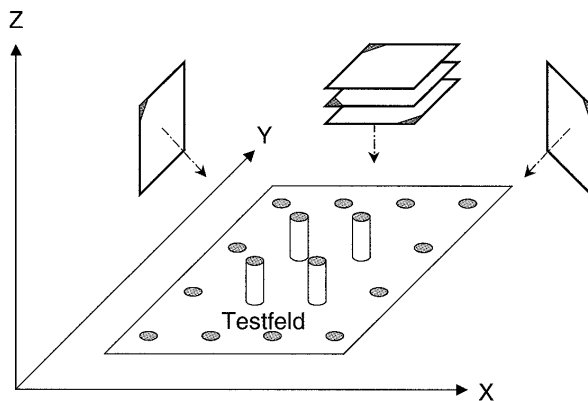
Zur Kalibrierung wurde ein dreidimensionales Testfeld benutzt (siehe Abbildung 5.7). Dieses hat die Ausmaße von 2,10 m in der Höhe, 2,62 m in der Breite und 0,52 m in der Tiefe. Der Rahmen wird durch Querstreben versteift und lässt sich für den Transport zerlegen. Das Testfeld besteht aus 161 räumlich gut verteilten, signalisierten Punkten, deren Koordinaten bekannt sind.

Die Sollkoordinaten des Testfelds wurden aus Theodolitmessungen abgeleitet. Die Genauigkeit der Koordinaten beträgt 0,3 mm.



**Abbildung 5.7:** Testfeldaufnahme mit DCS 1m und 19 mm-Objektiv

Das Testfeld wurde von zwei Standpunkten mit einem Konvergenzwinkel von ca. 60 gon aufgenommen (siehe Abbildung 5.8). Auf einem dritten 3 m frontal vom Testfeld entfernten Standpunkt erfolgten Aufnahmen in Normalstellung und je um 100 gon nach links bzw. rechts gewälzt. Insgesamt ergaben sich pro Kalibrierung fünf Aufnahmen. Das gesamte Bildformat wurde dabei möglichst formatfüllend ausgenutzt.



**Abbildung 5.8:** Aufnahmeanordnung zur Testfeldkalibrierung  
[nach Luhmann 2000, S. 491]

#### 5.4.2.1 Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung gilt allgemein als die strengste und flexibelste Methode der Blockausgleichung. Das mathematische Modell basiert auf den Kollinearitätsgleichungen. Als Beobachtungen können Bild-, bzw. Passpunktkoordinaten und gegebenenfalls die Koordinaten der Projektionszentren eingeführt werden. Durch eine Ausgleichung wird der Zusammenhang zwischen Objekt- und Bildkoordinaten hergestellt. Diese erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate, d.h. der Minimierung der gewichteten Summe der Verbesserungsquadrate. Im funktionalen Modell wird der Zusammenhang zwischen Unbekannten und Beobachtungen beschrieben. Das stochastische Modell enthält die zufälligen Fehler der Beobachtungen. Zwischen den Unbekannten und dem Erwartungswert der Beobachtungen werden im Ausgleichungsmodell lineare Zusammenhänge vorausgesetzt. Aufgrund der Nichtlinearität der Kollinearitätsgleichungen erfolgt eine Entwicklung nach Taylor unter Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung. Das Ausgleichungsergebnis wird iterativ bestimmt. Als Ergebnis liefert die Bündelblockausgleichung die dreidimensionalen Objektpunktkoordinaten, die Orientierungs- und weitere Modellparameter, sowie Angaben zur jeweiligen Genauigkeit und Zuverlässigkeit [Luhmann 2000, S. 255-298], [Kraus 1997, S. 268-284].

Zur Berechnung der inneren Orientierung aus den beobachteten Bildkoordinaten einer Kalibrierungsreihe wurde eine Ausgleichung der Beobachtungen mit Selbstkalibrierung und zusätzlichen Parametern vorgenommen. Die Auswertung erfolgte mit dem Programmsystem BLUH.

Zur Vorbereitung der Bündelblockausgleichung wurde mit dem Programm DPLX die Pixelkoordinatenmessung der Passpunkte des Testfelds durchgeführt (siehe Kapitel 6.1).

Mit dem Modul BLPRE aus dem System BLUH wurden die Pixelkoordinaten für die innere Orientierung über Skalierung und Verschiebung in das gewünschte Bildkoordinatensystem überführt. Näherungsorientierungen für die Projektionszentren der einzelnen Aufnahmen der Kalibrierungsreihe wurden durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt mit dem Modul RESEC des Programmsystems bestimmt. Durch Data-Snooping werden Ausreißer in den Daten prognostiziert, die manuell aus der Ausgleichung eliminiert werden können [Luhmann 2000, S. 67]. Eine erste Bündelblockausgleichung wurde mit den gemessenen Bildkoordinaten, den Näherungsorientierungen und den Passpunktkoordinaten des Testfelds gerechnet.

Die wichtigsten Module für die Bündelblockausgleichung sind BLAPP, BLIM und BLUH. Das Programm BLAPP sortiert die Bildkoordinaten und bringt sie in die von BLUH benötigte Reihenfolge. Die Steuerdatei für das Modul BLUH wird in BLIM erzeugt. Im Hauptprogramm BLUH wird ohne Dialog die Bündelblockausgleichung nach den in BLIM eingegebenen Steuerdaten berechnet. Nach einer ersten Analyse können in BLAPP fehlerbehaftete Daten vermerkt werden, die in eine erneute Ausgleichung nicht mit einbezogen werden sollen. Eine abschließende Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern kann nach mehrmaliger, iterativer Verbesserung der Ergebnisse und Durchlaufen der Programme BLAPP, BLIM und BLUH durchgeführt werden.

Im Programmsystem BLUH stehen insgesamt 28 Parameter zur Verfügung, von denen für die Selbstkalibrierung von gewöhnlichen Kameras die Parameter 1–15 verwendet werden. Diese Parameter modellieren die Abweichungen zwischen dem mathematischen Modell der Zentralprojektion und der tatsächlichen Bildgeometrie. Der Parameter 1 bestimmt die Scherung des Systems. Die Affinität wird durch den Parameter 2 abgedeckt. Die Parameter 3–6 und 12 kompensieren die verbleibenden systematischen Bildfehler. Parameter 7 und 8 stellen die tangentialen Fehler des Systems dar. Die radialsymmetrischen Verzerrungen werden durch die Parameter 9–11 angegeben. Die Parameter 13–15 sind zur Bestimmung der inneren Orientierung vorgesehen; Parameter 13 für die Kammerkonstante, 14 und 15 für die Lage des Bildhauptpunkts. Die zusätzlichen Parameter werden durch statistische Tests auf Bestimmbarkeit und starke Korrelation überprüft. Nicht signifikante Parameter werden aus dem Ausgleichungssystem eliminiert.

Das Ergebnis der Bündelblockausgleichung umfasst die innere und äußere Orientierung, die ausgeglichenen Objektkoordinaten sowie die zugehörigen Standardabweichungen und Korrelationen. Die Daten werden im Modul BLUH automatisch in einer Datei-Liste „bluh.lst“ gespeichert. Eine gekürzte BLUH-Liste für die Kalibrierung des 19 mm-Objektivs vom 13.06.2000 befindet sich im Anhang A. In der Datei „system1.dat“ werden die Werte der Korrekturmatrix für die Parameter 1–12 abgelegt.

Weitere Programme für die Analyse und Nachbearbeitung sowie für die Behandlung von Sonderfällen sind im Programmsystem BLUH implementiert. Eine detaillierte Programmbeschreibung des Systems BLUH ist der Literatur zu entnehmen [Jacobsen 2000]. Zur ausführlichen Kalibrierung und geometrischen Untersuchung digitaler Aufnahmesysteme sei auf folgende Arbeiten verwiesen: [Huke 1999], [Hoof 1998] und [Störy 1994].

#### 5.4.2.2 Ergebnisse der Kalibrierung

Aus den durchgeführten Kalibrierungen der DCS 1m mit dem 19 mm-Objektiv wurden drei exemplarisch ausgewählt. Die Auswertungen vom 07.06.2000, 08.06.2000 und 13.06.2000 beziehen sich auf die in Kapitel 8.2.2 folgende Ermittlung der Bodenoberfläche. In diesem Abschnitt werden die erzielten Ergebnisse dargestellt.

Die in der Bündelblockausgleichung berechneten Werte für Kammerkonstante und Lage des Bildhauptpunkts sowie ihre Standardabweichungen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Datum	Kammerkonstante		Lage des Bildhauptpunkts				Sigma
	c [mm]	s <sub>c</sub> [mm]	x <sub>0</sub> [mm]	s <sub>x</sub> [mm]	y <sub>0</sub> [mm]	s <sub>y</sub> [mm]	S <sub>0</sub> [μm]
07.06.2000	18,884	0,003	-0,271	0,002	-0,279	0,002	1,75
08.06.2000	18,862	0,003	-0,279	0,002	-0,265	0,002	1,94
13.06.2000	18,852	0,003	-0,292	0,002	-0,290	0,002	1,99

**Tabelle 5.1:** Innere Orientierung und Standardabweichungen

Die Kalibrierungen wurden jeweils vom Stativ mit der Fokussierungsraste 1,50 m, einer Blende von 5,6 und einer Belichtungszeit von einer 1/4 sek durchgeführt. Die Aufwärmzeit der Kamera lag bei ca. 1½ Stunden. Das Objektiv wurde zwischen den Kalibrierun-



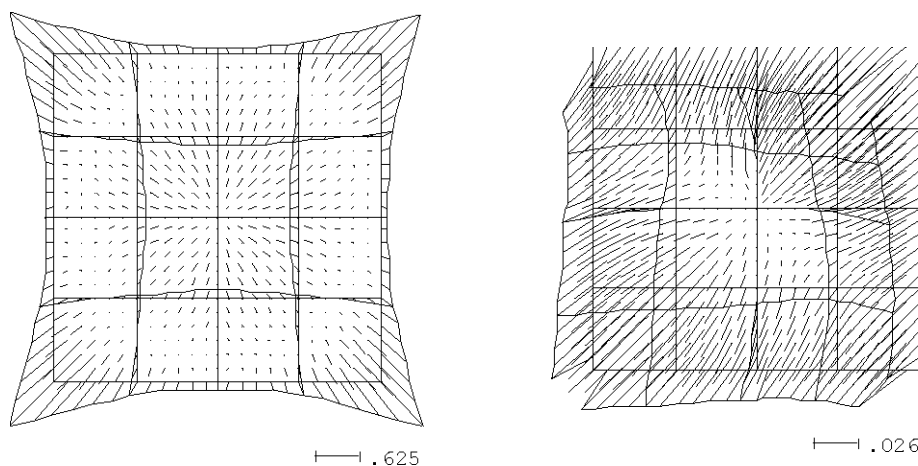
gen bzw. den Aufnahmen der Bodenoberfläche nicht abgenommen und die Einstellung der Fokussierungsraste nicht verändert.

Trotz einer Chipfixierung treten während einer längeren Aufnahmeserie mechanische Veränderungen auf. Diese können durch die Kippung der Kamera zur Oberflächenerfassung und die teilweise ruckartige Bewegung am Träger hervorgerufen werden. Der Flächensensor wurde am Kameragehäuse fixiert. Die Verbindung der Kamera zum Objektiv ist nicht besonders stabil. Aus diesem Grund ist auf eine sorgsame Handhabung der Kamera zu achten.

Nach Möglichkeit ist eine projektbegleitende Simultankalibrierung vorzunehmen. Diese war aufgrund der Aufnahmesituation, bzw. der Einschränkung durch die räumlichen Gegebenheiten nicht durchführbar.

Die Module PLOGG und DISTOP des Programmsystems BLUH wurden zur graphischen Darstellung der Ergebnisse genutzt.

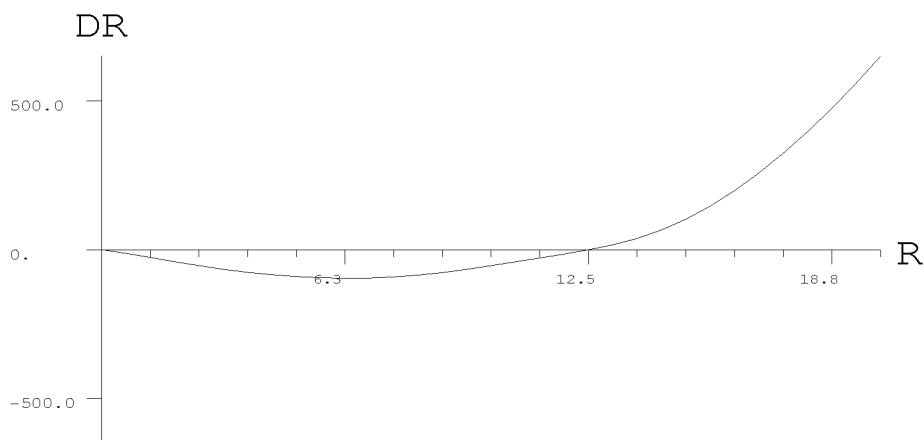
In der Abbildung 5.9 ist die Auswirkung der systematischen Bildfehler mit und ohne radialsymmetrische Verzeichnung beispielhaft für den 13.06.2000 veranschaulicht. Es sind keine nennenswerten Unterschiede in den Abbildungsfehlern zu den Kalibrierungen vom 07.06.2000 und 08.06.2000 zu erkennen.



**Abbildung 5.9:** Auswirkung systematischer Bildfehler. Links: mit radialsymmetrischer Verzeichnung. Rechts: ohne radialsymmetrische Verzeichnung. Maßstäbe der Pfeillänge in [mm]

Den Hauptanteil an den systematischen Bildfehlern stellt die radialsymmetrische Komponente dar. Die nicht radialsymmetrischen Anteile der systematischen Bildfehler haben eine geringere Auswirkung.

Die radialsymmetrische Verzeichnung entsteht überwiegend durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs und ist sowohl von der aktuellen Fokussierung als auch von der Objektentfernung bei konstanter Fokussierung abhängig [Luhmann 2000, S. 119ff.]. Abbildung 5.10 zeigt den Effekt der radialsymmetrischen Verzeichnung DR in Abhängigkeit vom Bildradius R.



**Abbildung 5.10:** Verzeichnungskurve. Einheiten: radialsymmetrische Verzeichnung DR in [ $\mu\text{m}$ ], radialer Abstand R in [mm]

Das Polynom der radialsymmetrischen Verzeichnung hat bei einem Radius R von 12,5 mm einen Nulldurchgang. Im Maximum bezogen auf die Chipgröße erreicht die radialsymmetrische Verzeichnung einen Wert von ungefähr 250  $\mu\text{m}$ .

Durch Anbringen der Korrekturmatrix „sysim1.dat“ an die Bildkoordinaten kann die Auswirkung der Verzeichnung des Objektivs rechnerisch eliminiert werden.

Im Bereich der Pixelkoordinaten (2320; 1030) ist ein matter Fleck auf den Bildern zu erkennen. Dieser kann durch ein Staubkorn auf dem CCD-Sensor verursacht worden sein und lässt sich nicht entfernen.

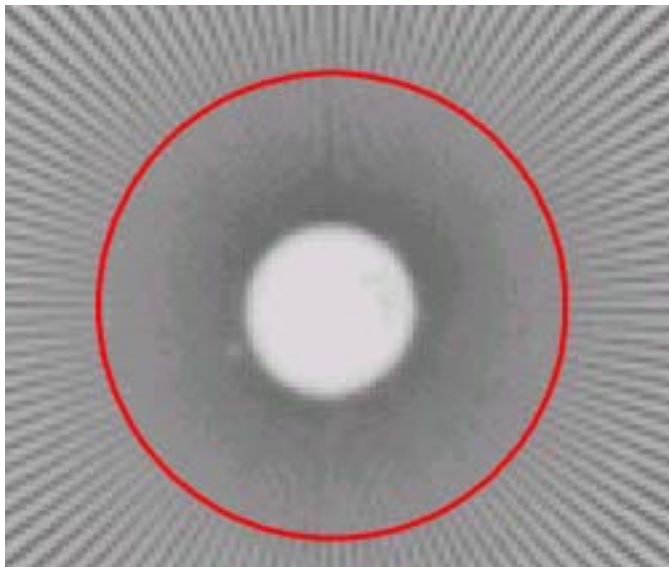
#### 5.4.2.3 Geometrisches Auflösungsvermögen

Ein für die photogrammetrische Auswertung entscheidendes Qualitätsmerkmal ist die theoretisch mögliche Messgenauigkeit. Die dafür ausschlaggebende geometrische Auflö-

sung des digitalen Bilds entspricht bei einer hinreichend scharfen Abbildung der Auflösung des Sensors.

Die geometrische Auflösung kennzeichnet die Fähigkeit eines Sensorsystems, Signale von benachbarten Objektstrukturen getrennt zu erfassen.

Die experimentelle Feststellung des Auflösungsvermögens erfolgte über die Abbildung eines Testmusters. Ein Siemensstern mit einem Durchmesser  $d$  von 6 cm mit 240 Sektoren (120 Sektorpaaren) wurde aufgenommen.



**Abbildung 5.11:** Siemensstern [Dirk Rieke-Zapp, NSERL]

Das maximale Auflösungsvermögen ergibt sich aus der Anzahl der Sektoren bezogen auf den Umfang des inneren, nicht mehr aufgelösten Unschärfekreises [Luhmann 2000, S. 133].

$$AV[\text{Lp/mm}] = \frac{120}{\pi \cdot d[\text{mm}]} \quad (5.1)$$

Nach Gleichung (5.1) liegt die maximal theoretische Auflösung  $AV_{\max}$  bei 56 Lp/mm. Aufgrund dieser Annahme müsste bei einem minimalen Durchmesser  $d_{\min}$  von 76 Pixel eine Identifizierung einzelner Sektoren gerade noch möglich sein.

Der rote Kreis aus Abbildung 5.11 markiert den minimalen Durchmesser  $d_{\min}$  bzw. die maximale Auflösung  $AV_{\max}$ . Eine gute Auflösung des Sensors ist demnach im Bereich des maximalen Auflösungsvermögens  $AV_{\max}$  von 56 Lp/mm feststellbar.

Die Verwendung eines Siemenssterns ist eine einfache Möglichkeit das Auflösungsvermögen zu bestimmen. Eine aufwendigere Untersuchung ist unter Laborbedingungen möglich. Dort werden MTF-Funktionen (Modulationsübertragungsfunktionen) für das Aufnahmesystem erstellt [Kraus 1997, S. 70-76].

#### **5.4.2.4 Aufwärmefekte**

Temperaturänderungen haben Einfluss auf die elektronischen Bauteile des digitalen Aufnahmesystems. Diese bewirken eine Veränderung der Aufnahmegeometrie. Die stärksten Temperaturänderungen treten direkt nach dem Einschalten des Systems auf. Dies kann durch die Selbsterwärmung der Elektronik der Kamera aufgrund der Stromaufnahme begründet werden.

Auch sind die äußeren Temperaturveränderungen nicht vernachlässigbar. Bei Temperaturänderung von 1°C ist eine Positionsänderung von ca. 0,1 Pixel zu erwarten [Vögtle 1998, S. 57-59].

Zur Schaffung gleichbleibender Aufnahmebedingungen wurde eine Aufwärmzeit von ca. 1½ Stunden gewährleistet. Die Labortemperatur unter der die Kalibrierung und Objekterfassung durchgeführt wurden, war aufgrund der Klimaanlage konstant.

#### **5.4.3 Aufnahmekonfiguration**

Die Anforderungen an die Aufnahmekonfiguration ergeben sich aus den Ansprüchen an das digitale Oberflächenmodell. Eine Grundauflösung von 1 mm wurde angestrebt. Die erreichbare Genauigkeit bestimmt in weitem Maß die Auswahl des Kamerasystems und der Aufnahmekonfiguration.

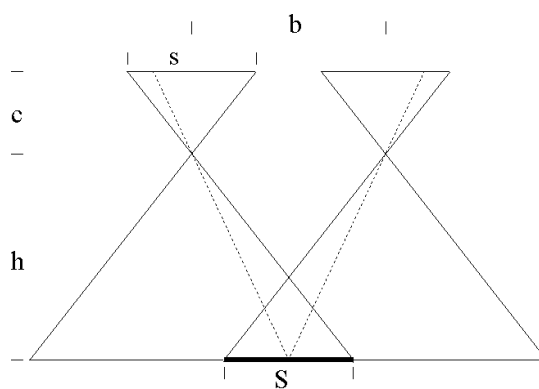
Zur Weiterverarbeitung der Daten mittels digitaler Bildzuordnung sollten folgende Voraussetzungen an Objekt und Bildaufnahme weitestgehend erfüllt werden.

Die Objektoberfläche sollte opak, stückweise glatt und formstabil für den Zeitraum der Bildaufnahme sein. Bekannte Näherungswerte für die innere und äußere Orientierung sollten gegeben sein.

Von Vorteil ist eine Aufnahmekonfiguration mit gleichbleibenden Bedingungen, wie konstante Beleuchtungsverhältnisse, keine divergierenden Aufnahmerichtungen und keine

großen Entfernungsunterschiede. Bei konvergenten Aufnahmen können Probleme an punktförmigen Strukturen entstehen. Diese sind in der Regel kein geeignetes Mittel zur Zuordnung. Weiter können zahlreiche markante Bildstellen an nicht korrespondierenden Merkmalen auftreten [Luhmann 2000, S. 417].

Zur Objektbeschreibung und Erfassung der räumlichen Struktur sind überlappende Aufnahmen von verschiedenen Standpunkten notwendig. Die stereophotogrammetrische Methode wurde auf den Reliefbereich übertragen. Das Prinzip der Stereophotogrammetrie geht aus der Abbildung 5.12 hervor. Die Objektkoordinaten ergeben sich im Überlappungsbereich des Stereobildpaars aus der Basislänge  $b$ , dem vertikalen Abstand  $h$  der Aufnahmeeinheiten von der Bodenoberfläche und der Kammerkonstante  $c$  [Luhmann 2000, S. 102-109], [Kraus 1997, S. 87-93].



**Abbildung 5.12:** Prinzip der Stereophotogrammetrie

Ein Aluminiumrahmen diente zur Befestigung der Kamera (siehe Abbildung 5.1). Der Träger hat eine Länge von 5,27 m und ist höhenverstellbar. Die Kamera wird an einem Schlitten befestigt, der manuell mit einem Seil in die gewünschte, am Träger markierte Position verschoben werden kann.

Die Aufnahmeplanung, bzw. Aufnahme wurde stark von den äußeren Bedingungen beeinflusst, wie z.B. der Zugänglichkeit des Modells und Hindernisse für die Aufstellung des Rahmens für die Kamera. Aus diesem Grund erfolgte die photogrammetrische Erfassung in einem Streifen parallel zur Längsseite der Box im Querformat.

Um Aufnahmen mit konstantem Maßstab zu erhalten müssen Bild- und Objektebene zueinander parallel verlaufen. Die räumliche Tiefe des Oberflächenmodells durch das Ge-

fälle von 31% wurde durch eine unterschiedliche Höhe des Aufnahmegestells berücksichtigt.

Konstante Lichtverhältnisse wurden durch das vorhandene Laborlicht und zwei zusätzliche 500 Watt-Strahler geschaffen. Die Aufnahmen erfolgten mit Spiegelvorauslösung um Vibrationen der Kamera zu minimieren. Es wurde ein Kabelfernauslöser verwendet. Besser wäre hier der Einsatz eines Infrarotauslösers.

Die Formeln zur Berechnung der Aufnahmeplanung, sowie die Ergebnisse für das 28 mm- und das 19 mm-Objektiv sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt [Kraus 1997, S. 108f.].

	28 mm-Objektiv	19 mm-Objektiv
Kammerkonstante $c$	28 mm	19 mm
Grundauflösung	1 mm	0,8 mm
Bildseite im Gelände $S$	3,00 m	2,42 m
Bildseite $s$ (Querformat)	2,75 cm	2,75 cm
Bildmaßstabszahl $m_b = \frac{S}{s}$	109	88
Höhe über Grund $h = m_b \cdot c$	3,05 m	1,67 m
Überdeckung $l$	60%	60%
Basislänge $b = S \cdot (1 - \frac{l}{100})$	0,80 m	0,57 m
Anzahl der Bilder $n$	7	7
Höhen-Basis-Verhältnis $\frac{h}{b}$	3,8	2,9

**Tabelle 5.2:** Aufnahmeplanung

Die ersten Aufnahmen erfolgten mit der DCS 1m und dem 28 mm-Objektiv. Aufgrund der Höhe, bzw. der Höhendifferenz, von ca. 3,30 m und 4,60 m verhielt sich der Träger äußerst instabil. Die Bilder waren teilweise verwackelt. Die Schärfentiefe der Bilder war gering. Die Nähe zum Regensimulator in 4,70 m Höhe hätte zu weiteren technischen Problemen führen können.

Günstigere Aufnahmeverhältnisse ergaben sich für das 19 mm-Objektiv. Neben einer besseren Grundauflösung und einer verringerten Aufnahmeentfernung konnte das Höhen-Basis-Verhältnis erheblich verkleinert werden.

Das 19 mm-Objektiv wurde zur Oberflächenbestimmung der Versuchsreihe eingesetzt. Es wurde mit einer Fokussierungsraste von 1,50 m, der Blende 5,6 und einer Belichtungszeit von 1/6 sek gearbeitet.

## 6 Eingesetzte Software

In den nachstehenden Kapiteln wird die verwendete Software zur digitalen Bildzuordnung und Interpolation des Oberflächenmodells vorgestellt. Auf weitere, benutzte Software wird im jeweiligen Kontext eingegangen.

### 6.1 DPCOR

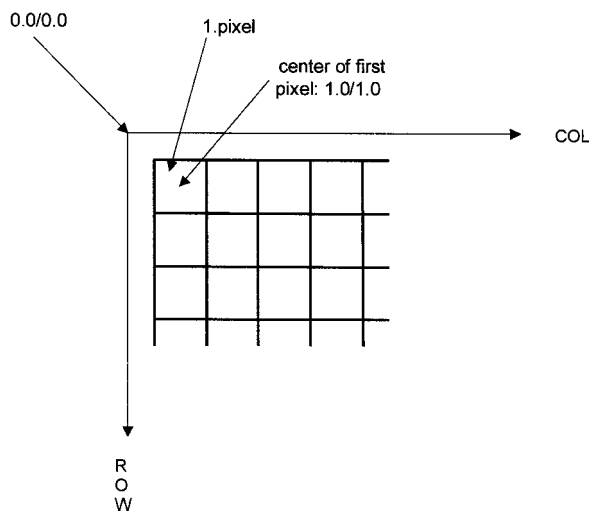
Das Matching-Programm DPCOR ist integriert in die Software DPLX. Diese wurden am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI) entwickelt bzw. weiterentwickelt. DPCOR basiert auf dem Programm PROGRESS von Prof. Dr. Christian Heipke. Es wurde zur Auswertung von Fernerkundungsdaten des Satelliten SPOT eingesetzt. Aufgrund nicht vorhandener äußerer Orientierung der Bilddaten wurden die Vorteile der Epipolargeometrie nicht berücksichtigt [Heipke und Kornus 1993, S. 92].

DPLX wird zur genauen Bestimmung von Pixelkoordinaten in digitalen Bildern eingesetzt. Als Eingangsdaten können bei Benutzung des Programms DPCOR nur Bilder im RAW-Format verarbeitet werden. Zur besseren Handhabung der Daten werden die Originalbilder in Teilbilder (*sub-images*) zerlegt, in denen die Messung der Pixelkoordinaten stattfindet. Die Koordinatenbestimmung kann wahlweise im Mono- oder Stereomodus erfolgen. Bildnummer sowie x- und y-Koordinaten werden in einer Koordinatenliste ausgegeben.

Punkte können manuell oder automatisch gemessen werden. Die automatische Registrierung für Passpunkte beruht auf der Punktbestimmung mittels Schwerpunkt-Operator. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei manueller Erfassung in der Größenordnung von 1/3 Pixel und bei automatischer von 1/10 Pixel.

Das zugrunde liegende bildschirmorientierte, linkshändige Pixelkoordinatensystem (siehe Abbildung 6.1) wird durch Zeilen (*row*) und Spalten (*column*) definiert. Der Ursprung des Systems liegt oben links. Der Mittelpunkt des ersten Bildelements besitzt die Zeilen- und Spaltenkoordinaten (1,0; 1,0). Die linke obere Ecke des Pixels hat die Koordinaten (0,5; 0,5).





**Abbildung 6.1:** Definition des Pixelkoordinatensystems  
[IPI 2000a, S. 3]

Pixelkoordinaten können mit der Funktion BLUH-Export und vorhandener innerer Orientierung in das Bildkoordinatensystem transformiert werden. Das Programm BLPRE aus dem System BLUH wird ausgeführt. BLUH-Export bewirkt die Konvertierung der Bildkoordinaten in das BLUH-Format.

Grundlage für das Programm DPCOR bildet die flächenbasierte digitale Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Kapitel 4.2.1). Die Verarbeitung von zwei digitalen Stereobildern ist realisiert. Voraussetzung ist eine Datei mit Steuerparametern (*control file*) sowie eine Datei mit Koordinaten homologer Startpunkte (*seed points*) im BLUH-Format. Letztere kann mit DPLX erzeugt werden. Die Ausgabe besteht aus einer Pixelkoordinatendatei der homologen Punkte (*conj.pix*, mit weiteren Angaben: *conj.out*) und einer Datei mit zusätzlichen Informationen (*LOG-file*).

Durch die Zuordnung von Muster- und Suchmatrix in der Umgebung eines Startwerts werden die exakten Koordinaten und die zugehörigen geometrischen und radiometrischen Transformationsparameter berechnet. Ferner werden der Korrelationskoeffizient  $r$  der beiden Matrizen und die Unterschiede zu den Näherungswerten bestimmt.

Das linke Bild (*first scene*) wird in DPCOR als Muster- und das rechte als Suchmatrix (*second scene*) definiert. In der Steuerdatei (*control file*) wird die Größe der Fenster (*actual window size*) angegeben. Der zu betrachtende bzw. zu testende Punkt liegt im Zentrum des Fensters. Die Abbildung des Fenstermittelpunkts vom linken in das rechte

Pixelkoordinatensystem wird durch eine Affintransformation (siehe Gleichung (4.4)) beschrieben.

$$\begin{aligned} \text{row}_{\text{right}} &= a_0 + a_1 \cdot \text{row}_{\text{left}} + a_2 \cdot \text{col}_{\text{left}} \\ \text{col}_{\text{right}} &= b_0 + b_1 \cdot \text{row}_{\text{left}} + b_2 \cdot \text{col}_{\text{left}} \end{aligned} \tag{6.1}$$

Die Pixelkoordinaten  $(\text{row}, \text{col})_{\text{left}}$  und  $(\text{row}, \text{col})_{\text{right}}$  sind aus der Startpunktdatei bekannt. Die Transformationsparameter  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  und  $b_2$  werden aus den gegebenen homologen Punkten durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

Bei der Ausbreitung des Algorithmus (*Region-Growing*) wird die Mustermatrix jeweils um konstante Beträge nach rechts, oben, links und unten verschoben (siehe Abbildung 6.2). Die Schrittweite (*rowstep, colstep*) wird in der Steuerdatei angegeben. Hat der Startpunkt als Pixelkoordinaten Zahlen mit Nachkommastellen wird der nächstgelegene ganzzahlige Wert verwendet. Die Näherungswerte der Suchmatrix werden aus den Koordinaten der Mustermatrix und den Transformationsparametern des räumlich nächsten homologen Punkts berechnet. Die Bildzuordnung wird in diesen Punkten wiederholt.

Die Ergebnisse der Ausgleichung (Transformationsparameter der Affintransformation und Korrelationskoeffizient) werden mit den vorgegebenen Grenzwerten in der Steuerdatei (*min./max. bound for scale-parameter  $a_1, b_2$  und min./max. bound for shear-parameter  $a_2, b_1$* ) verglichen. Liegen alle Parameter innerhalb der angegebenen Grenzen, d.h. ist der Korrelationskoeffizient größer als ein Schwellwert, sind die Anzahl der Iterationen, Größe der Fehlerellipse und die maximale Differenz zu den Näherungskordinaten nicht überschritten, werden die Ergebnisse akzeptiert. Der Mittelpunkt des linken Fensters wird mit den Transformationsparametern in das rechte Bild transformiert und als identisch mit dem Mittelpunkt des linken Fensters betrachtet. Die homologen Pixelkoordinaten werden zusammen mit einer berechneten Punktnummer in einer Ausgabedatei als neue Startwerte gespeichert (siehe Anhang C). Von diesen breitet sich der Region-Growing Algorithmus schrittweise über die gesamte Szene flächenhaft aus [Otto und Chau 1989, S. 84-87]. Als nächster Startpunkt wird jeweils der Punkt mit dem größten Korrelationskoeffizienten gewählt. DPCOR wird beendet, wenn alle Nachbarn von ge-

matchten Punkten entweder ihrerseits gematcht oder aber nicht zuzuordnen sind bzw. das gesamte Bild abgedeckt ist.

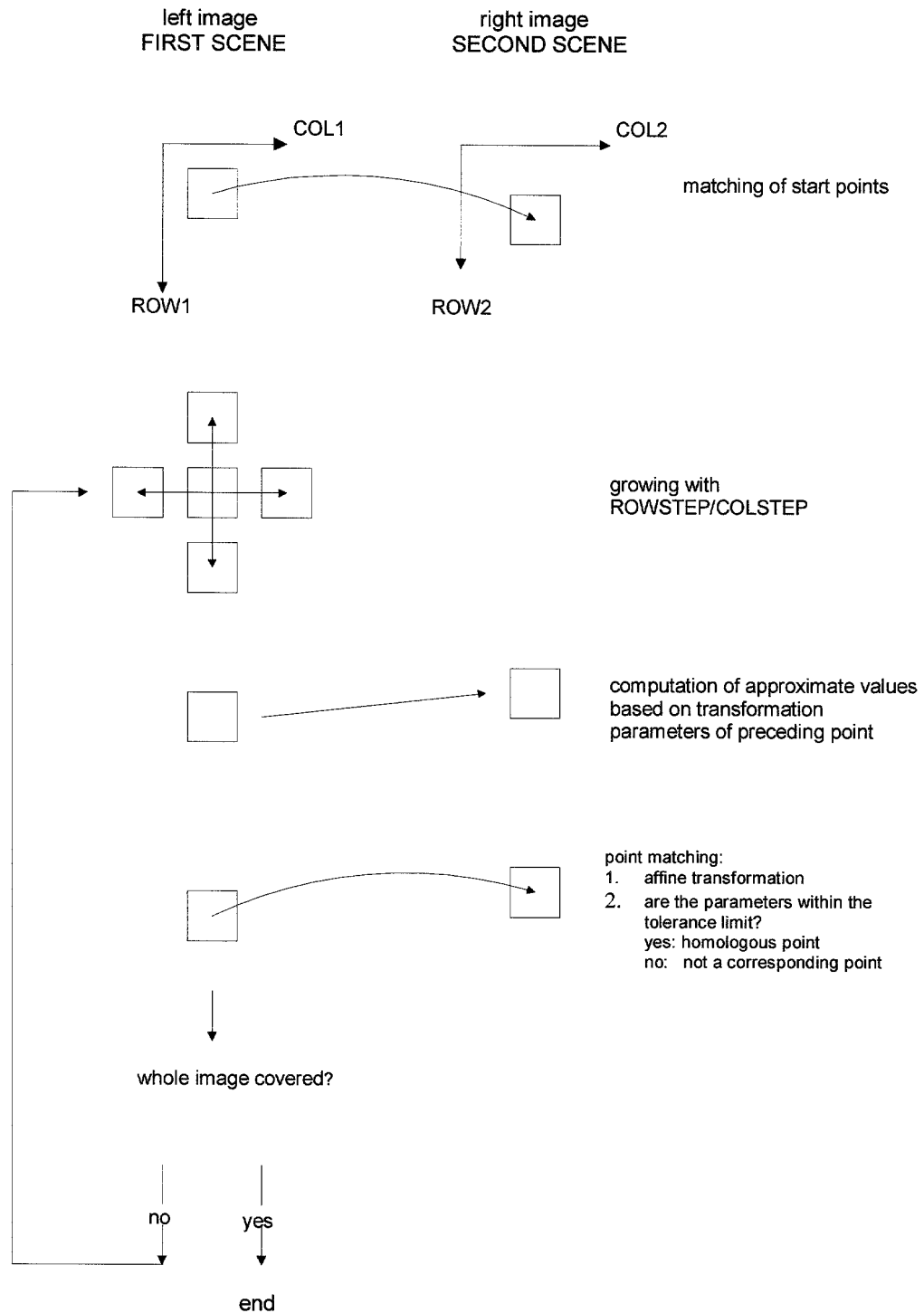


Abbildung 6.2: Ablauf von DPCOR [IPI 2000a, S. 4]

Die richtige Auswahl der Kriterien der Steuerdatei ist entscheidend für die Robustheit des Algorithmus. In der Steuerdatei ist außerdem die Festlegung des Auswertebereichs bzw., Stereobereichs zur Reduktion der Datenverwaltung und -verarbeitung möglich.

Die Objektrekonstruktion kann durch anschließenden räumlichen Vorwärtsschnitt mit BLINT aus dem Programmsystem BLUH erfolgen.

Das Beispiel eines LOG-Files und der Auszug aus einer Ausgabedatei „conj.out“ sind im Anhang B und C aufgeführt. Auf weitere Programmfunktionen wird nicht näher eingegangen. Für eine ausführlichere Beschreibung sei auf die Literatur verwiesen [IPI 2000a] und [IPI 2000b].

## **6.2 LISA**

Das Programmpaket LISA von Dr. Dr. Wilfried Linder (Universität Düsseldorf, Geographisches Institut) besteht aus den drei Komponenten LISA Basis, LISA Foto und LISA GIDB.

Der Schwerpunkt des Moduls BASIS liegt in der digitalen Bildverarbeitung und Generierung digitaler Geländemodelle. Die Verarbeitung der Bilddaten erfolgt rasterorientiert. Das Modul Foto ermöglicht die photogrammetrische Auswertung digitaler Bilder nach dem Korrelatorprinzip. Zur Verwaltung großer Datenmengen in einer Bilddatenbank kann das Modul GIDB herangezogen werden. Auf diese zwei Funktionen wird im Weiteren nicht näher eingegangen.

In einem ersten Schritt müssen die Eingabeinformationen dem System verfügbar gemacht werden. Die Daten liegen in diesem Fall als dreidimensionale Koordinaten vor. Zur Aufbereitung der Rohdaten muss eine Vektor-Raster-Wandlung durchgeführt werden. Die Bilddimensionen (Anzahl der Bildzeilen und -spalten) sowie die Bildgeometrie (Eckpunktkoordinaten und Bildelementgröße) werden festgelegt. Die Abspeicherung des errechneten Rasterbilds erfolgt als Bytemap im LISA-Format in einer Datei mit der Endung „.ima“.

Nach Festlegung der Bilddimensionen und der Geometrie kann eine Interpolation gestartet werden. Diese kann wahlweise nach gleitendem Mittelwert, gleitenden Flächen oder

Dreiecksvermaschung erfolgen. Für genauere Angaben zum Ablauf der Interpolation im Rasterbild siehe Linder (1994, S. 14-25).

Die Höhenauflösung  $A$  ergibt sich laut Gleichung (6.2) in Abhängigkeit von der Bildgröße, d.h. der Anzahl der Graustufen.

$$\begin{aligned} 8 \text{ Bit: } \quad A_{8\text{Bit}} &= \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{255} \\ 16 \text{ Bit: } \quad A_{16\text{Bit}} &= \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{32767} \end{aligned} \tag{6.2}$$

Die Geländehöhen werden in Form von Grauwerten wiedergegeben. Die Zuordnung zwischen Geländehöhe und Grauwert ist bis auf quantisierungsbedingte Ungenauigkeiten umgekehrt eindeutig.

Die Genauigkeit der Interpolation, das Maß der Übereinstimmung von tatsächlichen zu interpolierten Höhen ist im Wesentlichen abhängig von der Stützpunktdichte und -verteilung, der Berücksichtigung morphologischer Informationen, der Geländeform, dem Interpolationsverfahren sowie der Genauigkeit der Primärdaten [Linder 1994, S. 30]. Die Qualität des Ergebnisses ist in Gebieten ohne Ausgangsdaten kritisch zu bewerten. In Stützpunktfreien Gebieten, die nicht von Eingabedaten umgeben sind, kann anstelle einer Interpolation nur noch eine Extrapolation stattfinden.

Ein Vorzug des Rasterbildverfahrens liegt in der Ableitung graphischer Folgeprodukte und der Integration in Geo-Informationssysteme (GIS). Ausgabemöglichkeiten der flächenhaften Höheninformation sind Profile, Grundrisse und Blockbilder. Einige Abbildungen dienen nur der Visualisierung, wie z.B. Höhenlinien, Schummerung, Profile oder dreidimensionale Ansichten. Auch quantitative Folgeprodukte wie Flächeninhalte oder Volumenberechnungen können erstellt werden.

Die Beschreibung weiterer Programmfunktionen ist der Literatur zu entnehmen [Linder 2000a], [Linder 1999].

## 7 Versuchsdurchführung

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Versuchsreihe besteht aus sechs Beregnungen inklusive des Vorregens zur Vorbereitung der Box mit Boden. Die Durchführung der Versuche erfolgte in einem Abstand von zwei Tagen (siehe Tabelle 7.1). Die Regendauer betrug jedes Mal eine Stunde. Während der letzten beiden Beregnungen wurde die Intensität von 45 mm/h auf 60 mm/h erhöht. Die Laserscannermessungen fanden jeweils nach einer kurzen Trocknungszeit der Bodenoberfläche statt. Der Zeitpunkt der photogrammetrischen Relieferfassung war abhängig von der Zugänglichkeit des Modells. Hieraus resultieren die variierenden Aufnahmeabstände.

Versuch		Niederschlag	Datenerfassung	
Nr.	Datum		Laserscanner	Photogrammetrie
s1a		Vorregen: 30 mm/h, 1 h und 15 mm/h, 1 h	07.06.2000	07.06.2000
s1b	07.06.2000	18 h nach Vorregen 45 mm/h, 1 h	07.06.2000	08.06.2000
s1c	09.06.2000	45 mm/h, 1 h	09.06.2000	11.06.2000
s1d	12.06.2000	45 mm/h, 1 h	12.06.2000	13.06.2000
s1e	14.06.2000	60 mm/h, 1 h	14.06.2000	16.06.2000
s1f	16.06.2000	60 mm/h, 1 h	16.06.2000	17.06.2000

**Tabelle 7.1:** Ablauf der Beregnungsversuche

Während der Versuche wurden in dreiminütigen Intervallen Proben zur Bestimmung der Sedimentkonzentration im Abfluss genommen. Zur Kontrolle der Regenintensität wurden Messungen der Niederschlagsmenge durchgeführt.

Die Wassergehaltsmessungen mit Hilfe einer TDR-Sonde ergaben eine Sättigung des Bodens von 21–27 Vol.% eine Stunde nach Beendigung der Versuche.

### 7.1 Passpunkte

Die Signalisierung der Passpunkte erfolgte durch eine kreisförmige Messmarke und zugehörige Punktnummer. Aufgrund der dauerhaften Anbringung an der Box musste die

Wasserfestigkeit garantiert sein. Die Messmarken inklusive Nummer wurden in durchsichtiges Plastik eingeschweißt. Ein Beispiel zeigt Abbildung 7.1.

**Abbildung 7.1:** Verwendete Messmarke mit Punktnummer

### **7.1.1 Anordnung der Passpunkte und Bestimmung der Koordinaten**

Die Passpunkte 1000–1060 wurden für die geplanten, aber nicht durchgeführten Aufnahmen mit dem 28 mm-Objektiv angebracht. Ein Großteil der Passpunkte wurde in gleichmäßigem Abstand auf dem Boxrand befestigt, sowie weitere mit Winkeln in unterschiedlicher Höhe an der Außenseite der Box. Jeweils ein Passpunkt wurde auf dem linken (Passpunkt 1059) und rechten (Passpunkt 1060) Metallwinkel zur Auflage der Führungsschiene des Laserscanners angebracht. Die Passpunkte 1059 und 1060 erwiesen sich als instabil. In der Mitte des Auslaufs wurden in unterschiedlicher Höhe die Passpunkte 1011 und 1012 auf Metallwinkeln an der Boxunterkante fixiert.

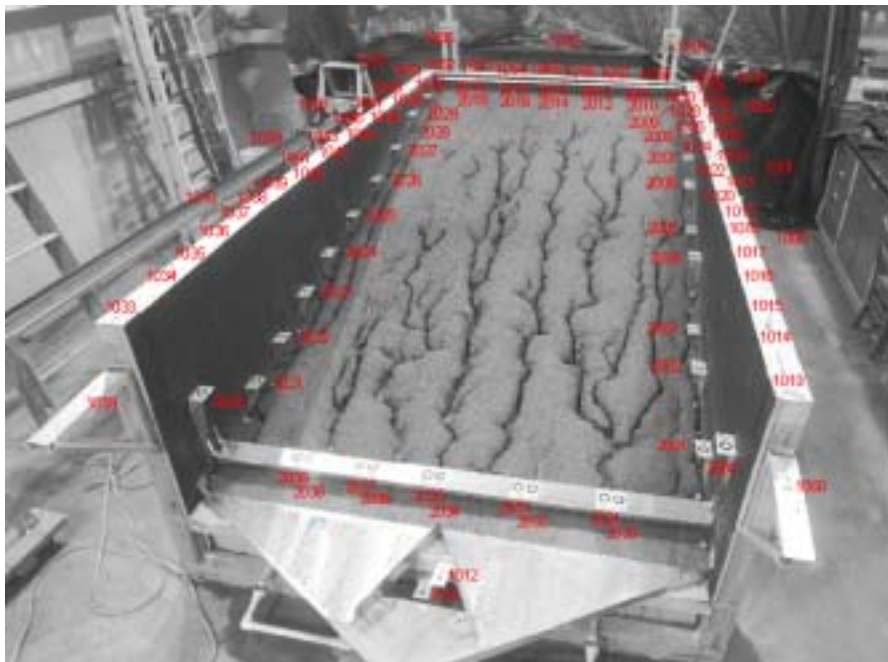
Am 11.05.2000 wurden die Passpunkte 1000-1060 mit dem Tachymeter Topcon GTS-303 eingemessen. Die Genauigkeit in der Lage beträgt 0,2 mm und in der Höhe 0,5 mm. Der maximale Durchmesser der Messmarke ist 2,2 cm.

Für den Einsatz des 19 mm-Objektivs wurden am 02.06.2000 vor dem Vorregen weitere Passpunkte befestigt. Diese haben einen maximalen Durchmesser von 4,2 cm. Durch den veränderten Radius ist eine Identifizierung in den Laserscanneraufnahmen möglich.

Diese Messmarken wurden an den Längsseiten, innerhalb der Box in regelmäßigen Abständen auf Winkeln in unterschiedlicher Höhe montiert. Weitere Passpunkte wurden auf Metallschienen an den beiden Querseiten innerhalb der Box angebracht. Eine geodätische Einmessung der Passpunkte war aufgrund der Vorbereitungen der Berechnungsversuche

nicht möglich. Zur nachträglichen Koordinatenbestimmung der Passpunkte 2000–2039 wurden am 28.06.2000 von verschiedenen Standpunkten elf Bilder von der Box aufgenommen.

Eine Übersicht über die Anordnung der Passpunkte gibt Abbildung 7.2.



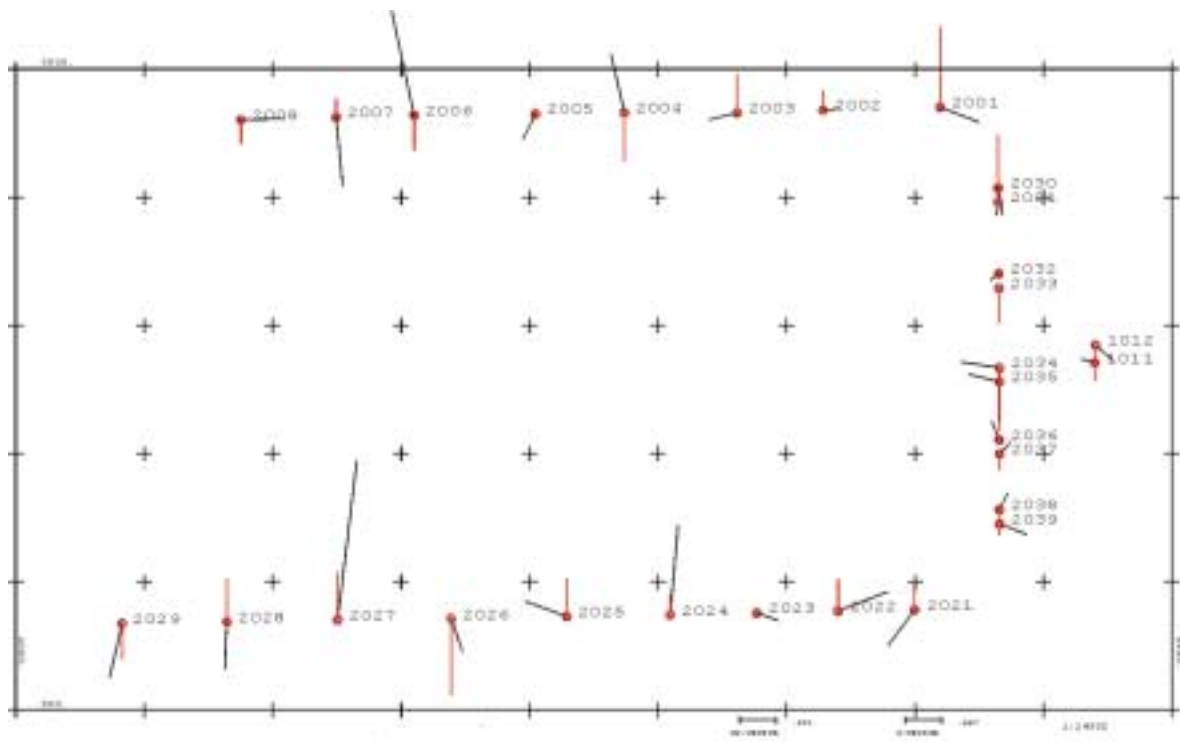
**Abbildung 7.2:** Übersicht über die Anordnung der Passpunkte

Die Koordinaten sämtlicher Passpunkte wurden durch eine Bündelblockausgleichung mit den Passpunkten 2000-2039 als Unbekannte ermittelt. Die Berechnung der Näherungskordinaten wurde über räumlichen Rückwärtsschnitt mit dem Modul RESEC des Programmsystems BLUH durchgeführt. Die innere Orientierung ist aus der Kamerakalibrierung vom 28.06.2000 bekannt.

Die Koordinatenliste mit den Passpunkten 1000–1058 und 2000–2039 wird im Weiteren Verlauf der Auswertung zur Bestimmung des Oberflächenmodells verwendet (siehe Kapitel 8.2.2). Das abschließende Ergebnis der Oberflächenrekonstruktion beinhaltet die äußeren Orientierungen der photogrammetrischen Aufnahmen, sowie die ausgeglichenen Objektkoordinaten inklusive der der Passpunkte.

Für jede Versuchsdurchführung liegt somit eine spezifische Liste mit Passpunktkoordinaten vor. Ein Vergleich der Passpunktkoordinaten innerhalb der Versuchsreihe erfolgte mit dem Programm BLAN des Systems BLUH.





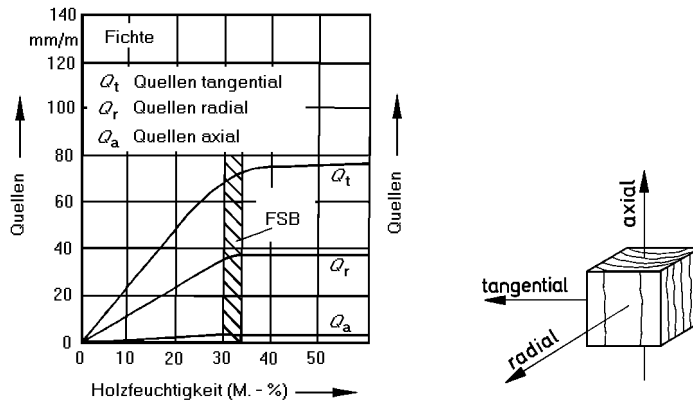
**Abbildung 7.3:** Differenzbild der Passpunktkoordinaten vom 08.06.2000 und 13.06.2000; Maßstab in [mm]

Das gebildete Differenzmodell, beispielhaft für den 08.06.2000 und 13.06.2000, lässt eine deutliche Veränderung innerhalb der Passpunktkoordinaten erkennen (siehe Abbildung 7.3). Die maximalen Abweichungen liegen im Bereich von 2,2 mm.

### 7.1.2 Gründe für Differenzen

Die Differenzen in den Datensätzen der Passpunktkoordinaten können durch die Instabilität der Box gerechtfertigt werden. Die Quellung des Holzes durch Wasseraufnahme hat eine Verlängerung der Abmessungen zur Folge [Wendehorst 1998, S. 624-641]. Oberhalb des Fasersättigungspunkts, der bei einer Feuchtigkeit von über 30% liegt, bleibt die Veränderung relativ konstant. Aus Abbildung 7.4 ist ersichtlich, dass bei einer Holzfeuchtigkeit von 40% die Ausdehnung in tangentialer Achsrichtung 80 mm/m, in radialer 40 mm/m und axialer 5 mm/m beträgt. Das entspricht in diesem Fall einer maximalen tangentialen Ausdehnung von 7,2 mm, einer radialen von 3,6 mm und einer axialen von 0,5 mm bei einer Holzfeuchtigkeit von 40%. Die tangentiale Achsrichtung verläuft parallel zur Stammachse und quer zu den Holzstrahlen, die radiale parallel zur Stammachse und parallel zu den Holzstrahlen, die axiale rechtwinklig zur Stammachse (siehe

Abbildung 7.4). Verzerrungen treten ebenso bei der Trocknung des Holzes durch Schwinden infolge von Wasserabgabe auf. Es erfolgt eine Volumenkontraktion.



**Abbildung 7.4:** Quellung von Fichtenholz in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit [Schäffler et al. 1991, S. 59]

Mögliche Erklärungen sind ebenfalls in der Volumenveränderung des Bodens durch Schrumpfung und Quellung aufgrund Veränderungen des Wassergehalts zu suchen. Ein Indiz ist die Bildung von Trocknungs- und Schrumpfrissen an der Bodenoberfläche. Das Ausmaß der Volumenänderung, d.h. der Schrumpfung und Quellung ist um so größer, je höher der Tonanteil des Bodens ist.

Durch den in tieferen Bodenschichten entstehenden Quellungsdruck ist eine Anhebung der darüber liegenden Schichten möglich. Der Entwässerungszustand des Bodens ist abhängig von der Bodenart und dem Zeitpunkt der Messung [Scheffer und Schachtschabel 1989, S. 150-156].

Im Weiteren müssen auch die durch den Ein- und Ausbau des Laserscanners verursachten Erschütterungen an der Box berücksichtigt werden.

Zur Vermeidung dieser Probleme sollte zukünftig mit einem stabilen Passpunktrahmen oder einem Maßstab gearbeitet werden.

## **8 Auswertung**

Ziel der durchgeführten Laserscannermessungen und photogrammetrischen Aufnahmen ist die Ableitung digitaler Oberflächenmodelle aus den gewonnenen Daten. Aus diesen können Differenzmodelle zur Bestimmung von Sedimentation und Abtrag, bzw. Darstellungen der Rillentwicklung gewonnen werden.

Die Überprüfung der Oberflächenmodelle erfolgt visuell. Vergleiche mit manuellen Kontrollmessungen konnten aus zeitlichen Gründen nicht vorgenommen werden. Über die abschließend erreichte Genauigkeit können aufgrund der Unstetigkeit der Passpunktkoordinaten, sowie der fehlenden Datumsdefinition der Laserscannermessungen keine Aussagen getroffen werden. Ein Vergleich der Daten in Überlappungsbereichen ist möglich. Die relative Genauigkeit kann dort bestimmt werden.

Zur Auswertung wurde aus der großen Datenmenge eine repräsentative Auswahl herangezogen.

### **8.1 Laserscannertriangulation**

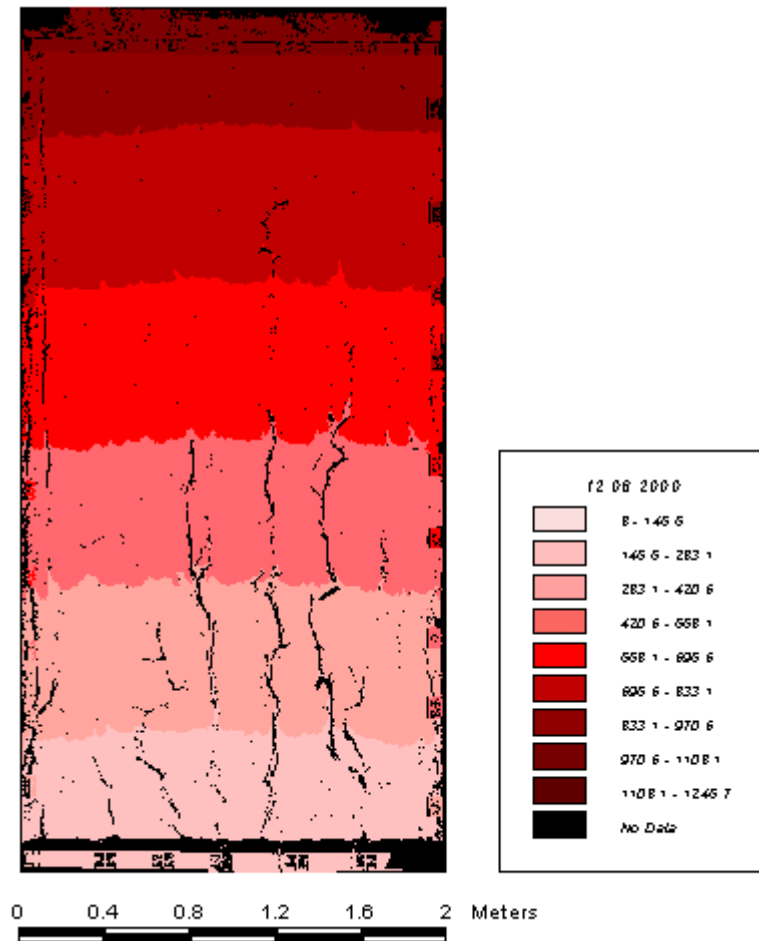
Die Daten der Laserscannermessung liegen im ASCII-Datenformat vor. Für jeden Versuch wurden sechs sich überlappende Streifen in Rillenrichtung aufgenommen. Das ausgegebene Scanraster hat eine Größe von 1,5 mm x 1,5 mm. Die Höhenwerte in Millimeter sind relative Angaben.

#### **8.1.1 Oberflächenrekonstruktion**

Die Oberflächenrekonstruktion des gesamten Bodenmodells aus den einzelnen Streifen erweist sich als schwierig. Die gescannten Streifen liegen nicht in einem einheitlichen Datum vor. Weitere Probleme ergeben sich bei der genauen Identifizierung und Messung der Passpunkte. Versuche zur Oberflächengenerierung wurden mit dem Geographischen Informationssystem ArcView GIS Version 3.2 von ESRI (Environmental System Research Institute) unternommen.

In ArcView wurden die einzelnen Streifen zu einem Mosaik zusammengefügt. Vom ersten Streifen ausgehend wurde nur die neue Information des folgenden bzw. anschließenden

den Streifen genutzt. Die Streifen wurden über Passpunktinformationen sowie markante Geländestrukturen aneinandergesetzt. Eine Anpassung oder Angleichung der Daten im Überlappungsbereich erfolgte nicht. In Abbildung 8.1 ist die mit ArcView erzielte Oberflächenrekonstruktion der Laserscannermessung vom 12.06.2000 dargestellt. Die Höhenangaben in der Legende sind in Millimeter.



**Abbildung 8.1:** Oberflächenmodellierung unter ArcView

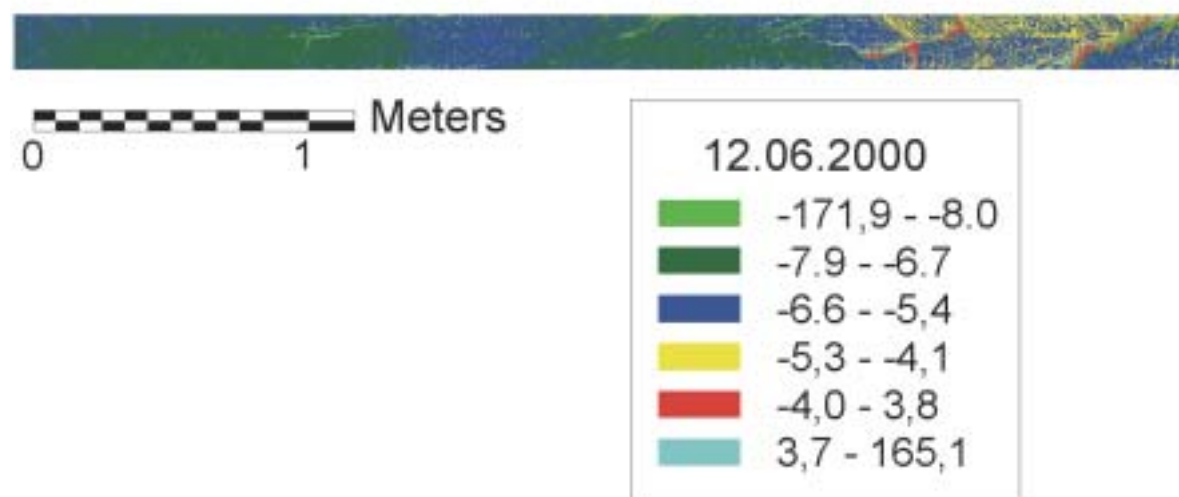
Schwachpunkte dieses Verfahrens werden beim visuellen Vergleich mehrerer erzeugter Oberflächenmodelle deutlich. Zwischen den jeweiligen Modellen ist eine variierende Größe der Box und eine Lageverschiebung der Passpunkte erkennbar, bedingt durch die Art des Zusammenfügens.

### 8.1.2 Abweichungen im Überlappungsbereich

Die Differenzen im Überlappungsbereich werden im Folgenden beispielhaft für die Streifen 2 und 3 der Laserscannermessung vom 12.06.2000 dargestellt. Um beide Dateien miteinander vergleichen zu können, müssen diese georeferenziert bzw. entzerrt werden.

Zur Weiterverarbeitung sowie zur Visualisierung werden die Streifen Daten in Erdas Imagine Version 8.3.1 in Rasterbilder umgewandelt. Über vier in beiden Bildern gemessene Passpunktkoordinaten wird der Streifen 3 auf 2 entzerrt. Streifen 2 dient als Referenz. Als mathematischer Ansatz wird eine 6-Parameter-Affintransformation gewählt. Aufgrund von Überbestimmung erfolgt eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die Residuen in Bewegungsrichtung des Laserscanners liegen in einer Größenordnung von 0,3 mm, die in Streifenbreite von 0,4 mm.

Auf der Basis des existierenden Rasterbilds 3 wird durch Referenzierung ein neues Bild 3 erzeugt. Die Differenz zwischen Bild 2 und dem bilinear resampelten Bild 3 wird gebildet. Für das gesamte Differenzbild ergibt sich eine Standardabweichung von 33,28 mm. Der maximale Wert liegt bei 166,4 mm, der minimale bei -171,9 mm. Der Überlappungsbereich der beiden Streifen ist in Abbildung 8.2 wiedergegeben. Die Angaben in der Legende sind in Millimeter.



**Abbildung 8.2:** Überlappungsbereich der Streifen 2 und 3 (entzerrt)

Aufgrund von Fehlmessungen im Rillenbereich (siehe Kapitel 8.1.3) und Nichtinterpolation dieser Bereiche ist die Differenz in diesen Gebieten Null. Im Übergangsbereich der Rillen sind die Abweichungen am größten. Sie liegen bei einer Größenordnung von

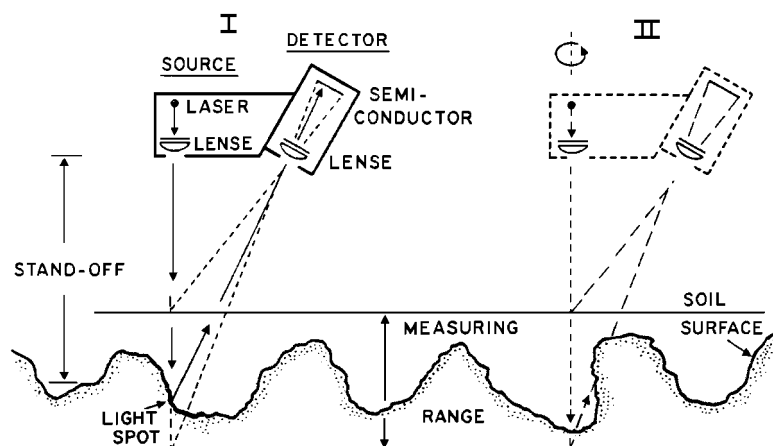
$\pm 109$  mm und größer. Dies kann durch Fehlmessungen in beiden Bildern erklärt werden. Der gesamte Überlappungsbereich ist von einer flächenhaften mittleren Abweichung von  $-5,5$  mm überzogen.

Mögliche Fehlerquellen können durch die Genauigkeit der Laserscannermessung begründet werden. Trotz der Erschütterungen des Laserscanners durch Ein- und Ausbau während der Berechnungen wurde dieser nur einmalig vor Beginn der Versuchsreihe und nur unter statischen Bedingungen kalibriert.

Maßstabsänderungen innerhalb des Streifens können durch die Entzerrung nicht abgefangen werden. Weitere Genauigkeitseinbußen entstehen durch die Punktmessung in Verbindung mit dem Problem der Punktidentifikation.

### 8.1.3 Probleme im Bereich von Rillen

Bei unregelmäßigem Gelände, z.B. in tiefen schmalen Rillen und hinter größeren Brocken, ist teilweise der Laserpunkt für die Kamera nicht mehr sichtbar. Es kommt zu Fehlmessungen („No Data“). Durch Verkleinerung des Winkel  $\alpha$  zwischen optischer Achse des Objektivs und Laserstrahl (siehe Abbildung 5.3) kann dieser Fehler minimiert werden. Bei zu kleiner Wahl von  $\alpha$  nimmt die relative Genauigkeit der Methode ab.



**Abbildung 8.3:** Probleme der Laserscannermessung im Rillenbereich  
[Römken et al. 1988, S. 409]

In Abbildung 8.3 ist eine Möglichkeit zur Eliminierung der Fehlmessung dargestellt. Die Oberfläche wird zweimal erfasst. Vor der erneuten Abmessung der Oberfläche wird die

Scaneinheit um 180° gedreht [Römken et al. 1988, S. 412]. Bertuzzi et al. (1990) beschreiben eine Veränderung des Laserreliefmeters zur Problembeseitigung.

## 8.2 Stereophotogrammetrie

Durch einen Vorverarbeitungsprozess werden besondere Eigenschaften eines Bilds hervorgehoben. Beispielsweise kann eine Kontrastverstärkung oder eine Histogrammspreizung vorgenommen werden. Andere Vorverarbeitungsverfahren unterdrücken unerwünschte Störungen. Durch Glättungsfilter kann das Rauschen vermindert werden. Bildvorverarbeitung bedeutet Manipulation der originalen Information.

Auf die Bildvorverarbeitung wie Glättung, Kantenverstärkung und Bildverbesserung wurde verzichtet. Die Aufnahmen erfolgten unter guten Beleuchtungsverhältnissen und einem konstanten Abstand zur Bodenoberfläche.

Die Bodenoberfläche wurde durch sieben überlappende Aufnahmen erfasst. An die Bestimmung homologer Punkte in zwei Bildern schließt die Objektrekonstruktion an. Bedingt durch die digitale Bildzuordnung werden aus den sieben Bildern sechs Dateien identischer Punkte erzeugt. Die Transformation der Bildkoordinaten erfolgt modellweise für jedes gebildete Stereopaar durch räumlichen Vorwärtsschnitt in den Objektraum. Durch Interpolation der sich ebenfalls überlagernden Oberflächenbereiche wird die gesamte Bodenoberfläche ermittelt.

Die Genauigkeit der Bildzuordnung und daraus abgeleitete Größen sind abhängig von der Eingangsinformation. Diese können durch die Verwendung von vorverarbeiteten Bildern an Stelle der Originalbilder verfälscht werden.

### 8.2.1 Anwendung des Matching-Algorithmus

Die richtige Auswahl der Startparameter in DPCOR ist entscheidend für die Robustheit des Matching-Algorithmus.

Als Startwerte werden die mit DPLX interaktiv auf der Bodenoberfläche bestimmten Pixelkoordinaten benutzt. Die maximal mögliche Anzahl von Startpunkten ist programmintern auf 49 beschränkt.

Wahl und Anzahl der Startpunkte sind abhängig von der Oberfläche. Ein selektierter Startpunkt sollte sich von allen anderen Merkmalen in einer gewissen Nachbarschaft unterscheiden. Die ausgewählten Elemente sollten global möglichst einzigartig bzw. selten und gut flächenhaft verteilt sein.

Die zu benutzende Fenstergröße ist abhängig von der Rauigkeit der Oberfläche und der Grundauflösung. Die Ausdehnung der Matrix wird in Pixel angegeben. Aus geometrischen Gründen ist eine ungerade Pixelanzahl zu bevorzugen. Der Mittelpunkt des Suchfensters kann eindeutig festgelegt werden. Wie sich das Programm bei einer geraden Fenstergröße in Pixel verhält ist nicht bekannt. Ferner ist für einen zu großen Suchbereich die Gefahr von Fehlern durch Nebenmaxima gegeben. Bei zu kleiner Fenstergröße können keine zuverlässigen Aussagen über die Werte des Korrelationskoeffizienten getroffen werden.

Die Wahl eines geeigneten Schwellwerts für den Korrelationskoeffizienten ist im Wesentlichen vom Bildinhalt abhängig. Bei kontrastreichen Bildern mit homogenem Hintergrund hat sich ein Schwellwert von 0,7 bewährt [Kraus 1996, S. 192].

Ein üblicher Wert für die maximal zugelassene Anzahl an Iterationen ist zehn [IPI 2000a, S. 11].

Durch die Schrittweite wird der Gitterabstand im linken Bild bestimmt. Wird die Mustermatrix in größeren Schrittweiten über das Bild geschoben, kann effektiv Bildinformation nicht verarbeitet werden. Die Ausmaße des Fensters und Schrittweite müssen aufeinander abgestimmt sein.

Tabelle 8.1 enthält die benutzten Matching-Parameter. Für die weiteren Parameter wurden die Standardeinstellungen [siehe IPI 2000a, S. 6-12] beibehalten.

Fenstergröße	7
Korrelationskoeffizient	0,7
Anzahl Iterationen	10
Schrittweite	2

**Tabelle 8.1:** ausgewählte Matching-Parameter

Der Zeitaufwand zur Berechnung der homologen Punkte ist abhängig von der eingesetzten Hardware.

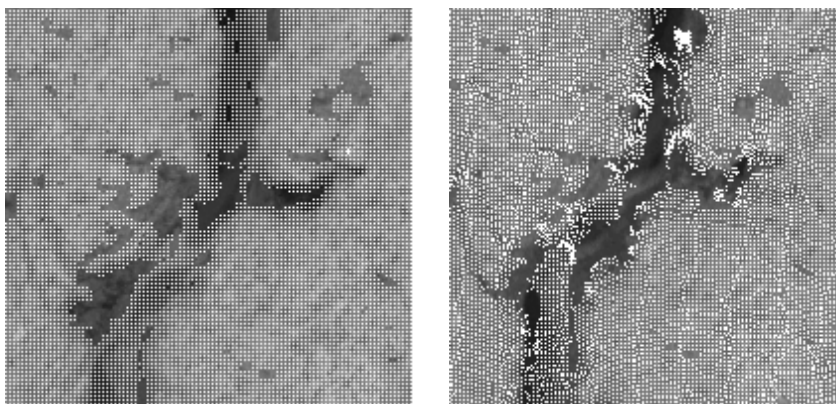


Eine absolute Bestimmung der Korrelationsgenauigkeit ist nicht möglich. Die zu erwartende Art und Genauigkeit der Bildzuordnung wird durch die der verwendeten Information theoretisch festgelegt. Für die Zuverlässigkeit ist von entscheidender Bedeutung, wie groß die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlzusammenordnung bzw. für eine fehlende Zuordnung ist.

Zur Beurteilung der digitalen Bildzuordnung mit DPCOR können die statistischen Angaben der Ausgabedatei (*LOG-file*, siehe Anhang B) herangezogen werden. Die Anzahl der korrekt zugeordneten Punkte ist im Allgemeinen sehr hoch. Sie liegt im Bereich von ca. 89%. „Korrekt“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Ergebnisse der Ausgleichung innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte liegen. Es können keine Aussagen über die Richtigkeit bezüglich der Lage zur Objektoberfläche getroffen werden. Aufgrund guter Näherungswerte ist die Anzahl der durchschnittlich benötigten Iterationen gering [Heipke und Kornus 1993, S. 93f.].

### 8.2.1.1 Probleme im Bereich von Rillen

Bei erfolgreicher Ausbreitung des Matching-Algorithmus wird der gesamte Stereobereich mit Sub-Pixel Genauigkeit erfasst. Unstetigkeiten im Gelände und/oder kontrastarme Bildbereiche können zu Fehlzusammenordnungen bzw. fehlenden Zusammenordnungen führen. Besonders im Bereich von Rillen ist keine eindeutige Grauwertzuordnung möglich. Abbildung 8.4 zeigt jeweils einen Ausschnitt aus dem linken und rechten Bild eines Stereopaars. Deutlich zu erkennen ist die fehlende Information homologer Punkte innerhalb der Rille.



**Abbildung 8.4:** Ausschnitte aus einem Stereobildpaar

Durch Belichtungsreihen mit variierender Verschlusszeit wurde versucht, den Kontrastumfang des CCD-Sensors voll auszuschöpfen. Trotz zusätzlicher Beleuchtung kam es gerade in den Rillenbereichen zu unvermeidlichen Unterbelichtungen. Bei den Bemühungen die vorhandene Information mit einer nur auf die dunklen Rillenbereiche abgestimmten Belichtungsreihe herauszuarbeiten, konnte im Ergebnis die Anzahl homologer Punkte in den Problemzonen nicht wesentlich verbessert werden.

Bei der Verwendung von nur zwei Bildern können lokale Widersprüche infolge von Verdeckungen und schlechter oder sich wiederholender Textur zu einer geringeren Zuverlässigkeit der Ergebnisse führen. Die Robustheit gegenüber lokalen Fehlern kann durch die simultane Verarbeitung von mehr als zwei Bildern erhöht werden. Verdeckungen und Abschattungen können erkannt werden, wenn ein fehlender Bereich durch ein weiteres Bild bestimmt wird. Eine größere Sicherheit beim Erkennen von Fehlzuordnungen durch die geometrischen Bedingungen eines Bündelblocks kann erreicht werden. Die Oberflächenableitung wird zuverlässiger.

Bei der Mehrbildverarbeitung wird parallel die Blockstabilität verbessert. Das Verfahren reagiert weniger empfindlich auf schlechte Näherungen in den Startwerten, d.h. die Toleranz für den Konvergenzradius wird vergrößert [Kraus 1996, S. 411f.].

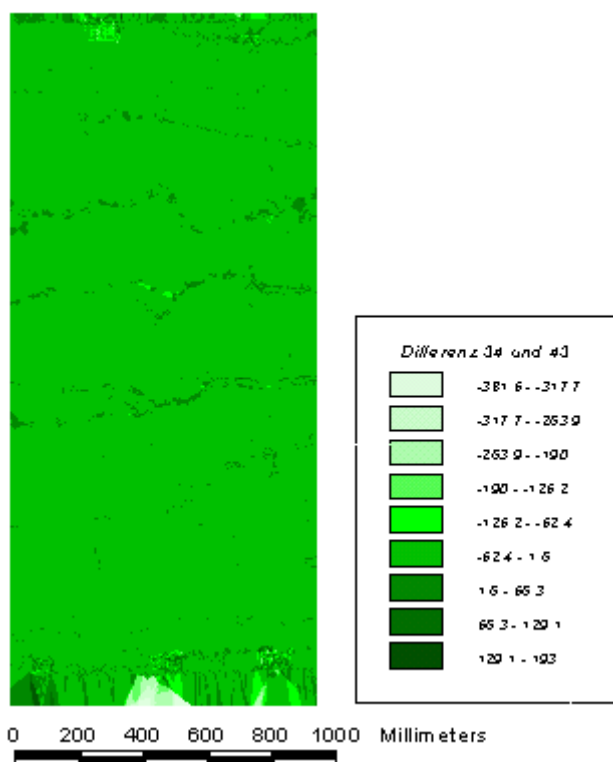
Auch die Anwendung der Epipolarometrie kann bei bekannter innerer Orientierung zu einer größeren Zuverlässigkeit der Ergebnisse und einer beschleunigten Oberflächenableitung führen. Durch die Beschränkung des Suchraums kann die Zuordnung in den y-parallaxefreien Bildern entlang der Epipolarlinien erfolgen. Ferner könnte der Einsatz von Bildpyramiden im Bereich von Rillen die Auswertung vereinfachen.

Die Fenstergröße bewirkt durch die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate einen Tiefpassfiltereffekt auf die abgeleitete Oberfläche. Je größer die Matrix ist, desto weniger genau werden die Geländekanten erfasst. Sie werden abgerundet. Umgekehrt nimmt bei kleineren Matrizen die Zuverlässigkeit und Genauigkeit rasch ab. Die Folge sind Fehlanswertungen. Eine Fenstergröße, die global für den gesamten Bildbereich einsetzbar ist, existiert selten. Ansätze mit adaptiven Matrizengrößen bieten eine flexible Lösung. Die Ausmaße des Fensters können anhand des Inhalts des jeweiligen Bildausschnitts oder des Iterationsverhaltens bestimmt werden [Kraus 1996, S. 396-398].

### 8.2.1.2 Verifikation

Durch eine einfach durchzuführende Verifikation kann die Gleichförmigkeit des Matching-Algorithmus in Bezug auf die Wiederholbarkeit getestet werden.

Nach erfolgreicher Korrelation des rechten zum linken Bild werden linkes und rechtes Bild gegeneinander vertauscht. Eine neue Bildzuordnung wird durchgeführt. Beide in den Objektraum transformierten Modelle beschreiben die gleiche Bodenoberfläche. Ein Differenzmodell wird gebildet.



**Abbildung 8.5:** Differenzbild der Stereomodelle 34 und 43

Abbildung 8.5 zeigt das Differenzbild der Stereomodelle 34 und 43 vom 13.06.2000. Deutlich zu erkennen sind die Abweichungen im waagrecht verlaufenden Rillenbereich. Sie liegen bei einer Größenordnung von bis zu 65 mm. In der Nähe des Boxrands, am oberen und unteren Rand der Abbildung 8.5 werden Differenzen von maximal 193 mm erreicht.

## 8.2.2 Oberflächenrekonstruktion

Zur Oberflächenrekonstruktion müssen die Pixelkoordinaten der homologen Punkte in das Objektkoordinatensystem überführt werden. Unter Berücksichtigung der inneren Orientierung erfolgt zunächst mit dem Modul BLPRE des Programmsystems BLUH die Transformation in das Bildkoordinatensystem. Über einen räumlichen Rückwärtsschnitt mit dem Modul RESEC werden die genäherten äußeren Orientierungen der Bilder berechnet. Zur Stützung des Bildverbands können Verknüpfungspunkte eingeführt werden. Die Lage der Verknüpfungspunkte sollte eine geeignete geometrische Verteilung aufweisen. Bei Verwendung der sogenannten Gruber-Punkte werden die Verknüpfungspunkte in den Ecken und Mitten des Modellbereichs angeordnet [Luhmann 2000, S. 249].

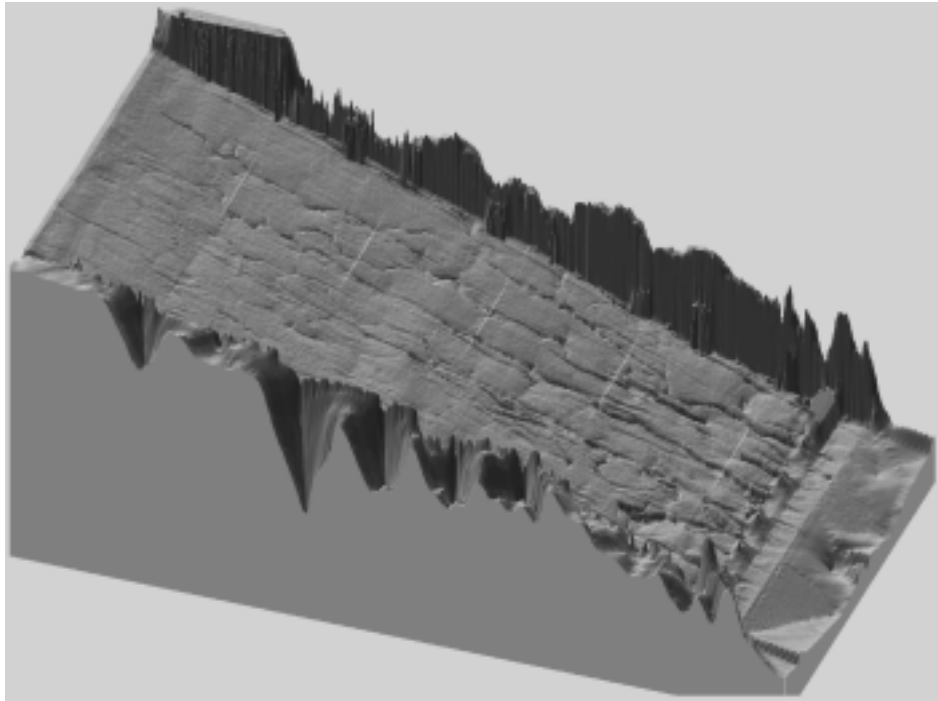
Im Rahmen der folgenden Ausgleichung zur Nachkalibrierung für verbesserte Genauigkeiten mit den Modulen BLAPP, BLIM und BLUH werden die Pass- und Verknüpfungspunkte simultan mit den Werten der äußeren Orientierung und den Parametern 1-12 geschätzt. Als Eingabedaten dienen die Bildkoordinaten der Pass- bzw. Verknüpfungspunkte, sowie die Koordinatenliste der Passpunkte 1000-1058 und 2000-2039 (siehe Kapitel 7.1). Die Standardabweichungen der Punkte können der Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten entnommen werden und sind ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Aufnahmekonfiguration und der Schnittbedingungen. Die Parameter der äußeren Orientierung werden für jedes Bild bestimmt.

Durch räumlichen Vorwärtsschnitt mit dem Modul BLINTS werden die Objektkoordinaten der homologen Punkte aus der Bildzuordnung bestimmt. In die Berechnungen gehen die Bildkoordinaten der Pass-, Verknüpfungs- und homologen Punkte, die innere Orientierung aus der Kamerakalibrierung sowie die ermittelten äußeren Orientierungen aller Aufnahmen ein.

Aufgrund der schrittweisen Ausbreitung des Matching-Algorithmus muss die Anordnung der korrelierten Punkte nicht der geländeformabhängigen Verteilung entsprechen. Durch Interpolation wird ein gleichmäßiges, gitterförmiges Oberflächenmodell erzeugt und fehlende Information im Oberflächenverlauf ermittelt.

Exemplarisch wurde das Oberflächenmodell für den 13.06.2000 (siehe Abbildung 8.6) mit dem Programm LISA Basis durch eine Interpolation mit gleitendem Mittelwert und

einer Maschengröße von 2 mm generiert. Die Überhöhung ist zweifach. Durch die hohe Dichte von 4,3 Mio. Punkten wird Speicherplatz von ca. 246 MByte benötigt.



**Abbildung 8.6:** Oberflächenmodell erzeugt mit LISA Basis

Die Qualität eines photogrammetrisch erzeugten Oberflächenmodells kann durch die Genauigkeit der Bildzuordnung abgeschätzt werden. Dabei muss der Einfluss der Interpolation berücksichtigt werden.

Weitere Möglichkeiten der Darstellung sind aufgrund der vorhandenen Orientierungsparameter sowie der Oberflächenbeschreibung durch die photogrammetrischen Aufnahmen gegeben. Die einzelnen Bilder können differentiell entzerrt, bzw. Orthophotos erzeugt werden. Durch Mosaiking können die Orthobilder unter Eliminierung von Kontrast- und Helligkeitsunterschieden zu einem Gesamtbild der Bodenoberfläche aneinander gefügt werden. Zur weiteren Veranschaulichung kann eine Animation erzeugt werden. In der Vorführung kann so ein realistischer Eindruck von der Bodenoberfläche vermittelt werden.

### 8.2.2.1 Transferpunkte

Durch den Einsatz von Transferpunkten ist es möglich eine Punktübertragung durchzuführen und die Auswertung zu vereinfachen. Ein Transfermechanismus überträgt die als homolog bestimmten Punkte eines Bildpaars in weitere Bilder [Zeitler 1995, S. 16-18].

Ausgehend von den Bildkoordinaten homologer Punkte können die des rechten oder linken Bilds als Transferpunkte verwendet werden. Die digitale Bildzuordnung mit dem ausgewählten, jetzt linken und einem Folgebild wird durchgeführt. Nach der Ausbreitung des Region-Growing Algorithmus muss überprüft werden, ob in der Nachbarschaft des zu matchenden Punkts in einem definierten Umkreis ein Transferpunkt vorhanden ist. Tritt dieser Fall ein, wird im linken Bild der Verschiebungsvektor zwischen dem ursprünglich zu matchenden Punkt und dem Transferpunkt berechnet. Dieser wird durch die ermittelten Transformationsparameter ins rechte Bild übertragen. Die Näherungskordinaten des Transferpunkts im rechten Bild können bestimmt und die Bildzuordnung fortgeführt werden. Bei Auffinden des homologen Punkts im rechten Bild, erhält dieser die Punktnummer des Transferpunkts.

Bei einer Implementierung eines Transfermechanismus könnten die Verknüpfungs- als Transferpunkte genutzt werden.

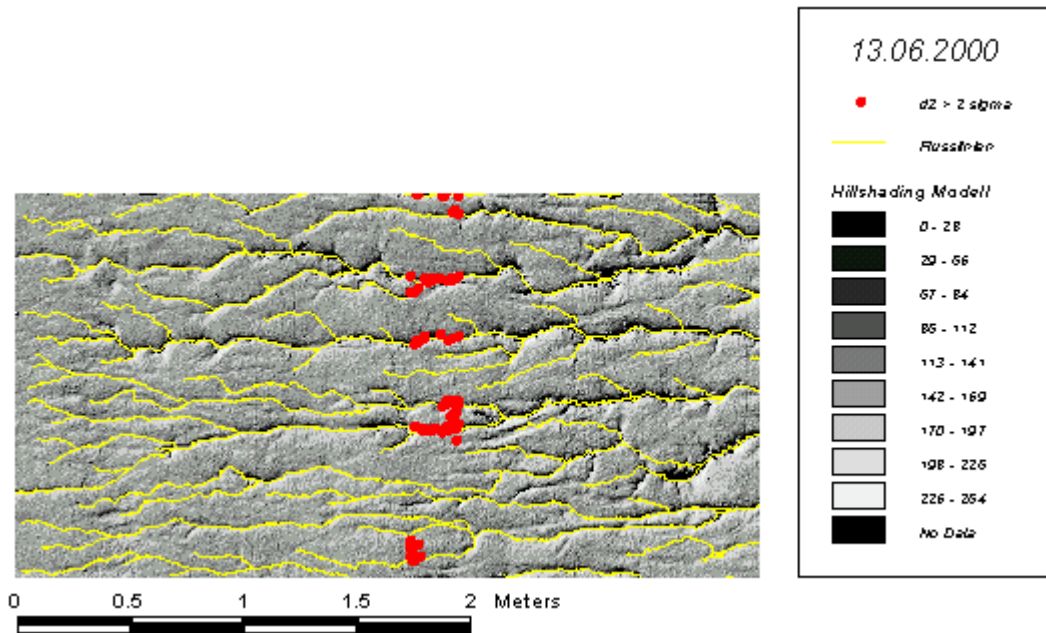
### 8.2.3 Abweichungen im Überlappungsbereich

Die Gegenüberstellung der berechneten Objektkordinaten im Überlappungsbereich benachbarter Stereomodelle für den 13.06.2000 erfolgte mit dem Modul PIDENT aus dem Programmsystem BLUH.

Mit PIDENT können zwei Koordinatendateien anhand der Lagekoordinaten über einen Suchradius miteinander verglichen werden. Über den Suchradius wird der Abstand für die maximale Entfernung eines Punkts der ersten Eingabedatei zu einem in der zweiten Eingabedatei festgelegt. Liegen mehrere Punkte der zweiten Datei innerhalb dieses Bereichs wird der dem vorgegebenen Punkt am nächsten gelegene als identisch bestimmt. Die Zuordnung von mehr als einem Punkt ist optional möglich.

Zur Ermittlung der identischen Punkte im Überlappungsbereich der Stereomodelle 34 und 45 wurde für PIDENT ein Abstand von 0,4 mm für den Suchradius gewählt. Es wurden 31787 identische Punkte gefunden. Die Standardabweichung beträgt 1,93 mm.

Die Abbildung 8.7 zeigt das Beleuchtungsmodell der zentralen Bodenoberfläche vom 13.06.2000. Mit PIDENT bestimmte identische Punkte, die mehr als zwei Standardabweichungen voneinander abweichen sind rot markiert. Insgesamt sind dies 663 Punkte. In gelb sind die berechneten Abflusslinien dargestellt (siehe Kapitel 8.3). Die Höhenangaben in der Legende sind in Millimeter.



**Abbildung 8.7:** Überlappungsbereich der Stereomodelle 34 und 45

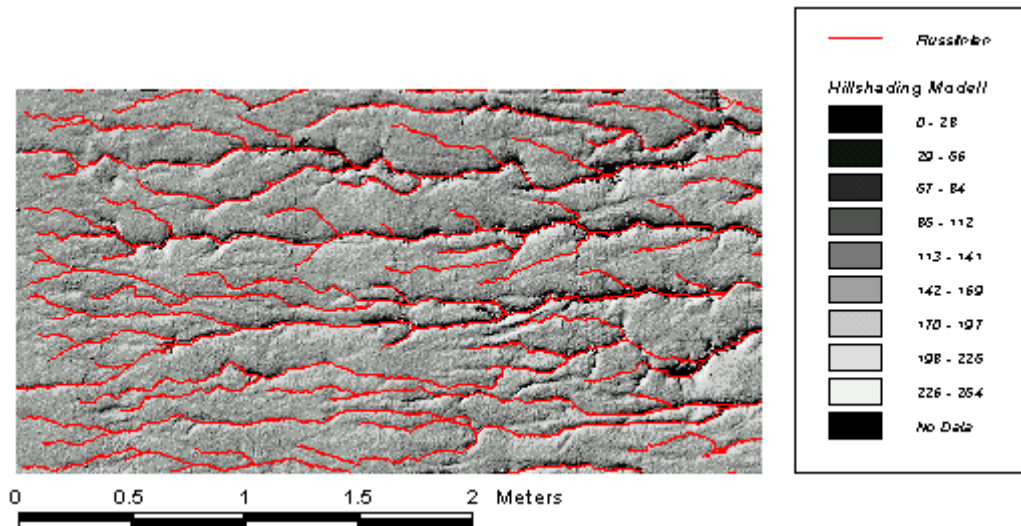
Extreme Abweichungen im Randbereich der Bodenoberfläche bzw. nahe am Boxrand werden in Abbildung 8.7 nicht dargestellt. Für den abgebildeten Bereich liegt der Mittelwert der mit PIDENT ermittelten Punkte bei  $-0,19$  mm. Die maximale Abweichung beträgt  $27,6$  mm und die minimale  $-22,7$  mm.

### 8.3 Rillentwicklung

In ArcView GIS Version 3.2 besteht die Möglichkeit, Abflusslinien aus einem Oberflächenmodell zu generieren.

Für die durchgeführte Analyse wurde die GIS Hydro'99 Extension von ESRI verwendet. In einem ersten Verarbeitungsschritt werden im ursprünglichen Oberflächenmodell abflusslose Senken eliminiert. Lokale Vertiefungen können so nicht zu einer Unterbrechung des Abflusses führen. Dem folgend wird die Hangneigungsrichtung bzw. Abflussrichtung

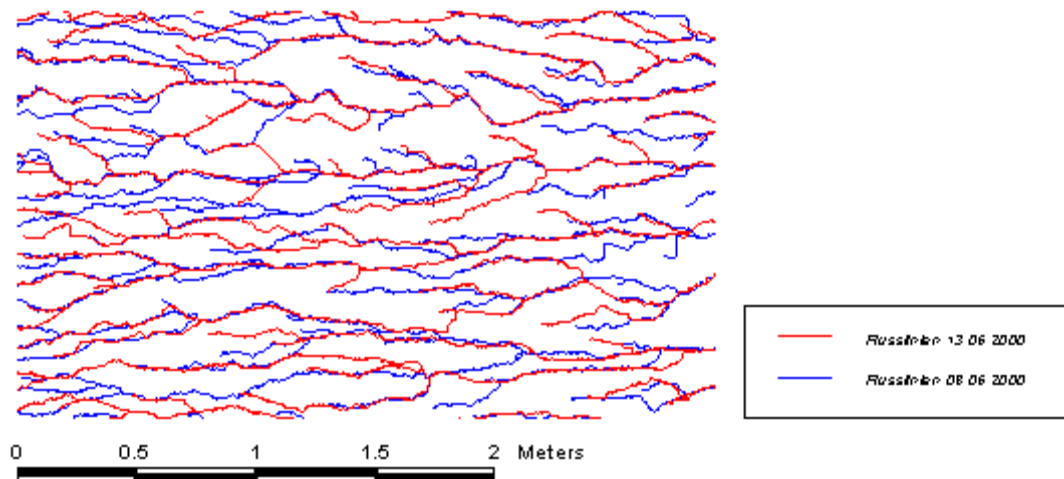
jeder einzelnen Zelle ermittelt. Der Abfluss ist in Richtung der acht benachbarten Zellen möglich. Der gesamte Abfluss einer Zelle wird einer dieser Richtungen zugeschlagen. Anschließend wird ein Gitter berechnet, das die Flussakkumulation in jeder Rasterzelle darstellt. Die Werte entsprechen der kumulativen Anzahl an Zellen von denen Wasser in tiefer liegende Zellen fließt. Die Wahl eines Grenzwerts für die Definition einer Rille über die Anzahl von Zellen des akkumulierten Abflusses erfolgt iterativ durch den Anwender. In Abbildung 8.8 wurde für den 13.06.2000 ein Grenzwert von 5000 Zellen zur Rillendefinition verwendet. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Vektordaten mit dem zugehörigen Beleuchtungsmodell hinterlegt.



**Abbildung 8.8:** Rillendefinition

Aufgrund der vorausgegangenen Dokumentation können Aussagen über die Rillennetzwirkungen und -veränderungen getroffen werden. Das Rillennetzwerk kann analysiert werden. Eine mögliche Darstellung der Veränderungen von Rillen ist in Abbildung 8.9 dargestellt.





**Abbildung 8.9:** Rillennetzwerk vom 13.06.2000 und 08.06.2000

In Abbildung 8.9 ist deutlich die Kontinuität sowie die Neubildung von Rillen erkennbar. Die Rillen- bzw. Reliefausformung wird durch den Beginn des Oberflächenabflusses und des Bodenabtrags beeinflusst. Bei gleicher Niederschlagsintensität setzt der Oberflächenabfluss um so früher ein, je feiner das Relief ist. Abgesehen von der Wirkung der Verschlammung und Muldenspeicherkapazität besitzt das Mikorelief zusätzlich einen direkten Einfluss auf den Verlauf des Oberflächenabflusses. Je gröber das Mikorelief ist, um so mehr Bröckel auf der Oberfläche können dem Abfluss als Hindernis entgegenstehen. Die Geschwindigkeit des abfließenden Wassers wird reduziert und das Wasser muss seine Fließrichtung ändern. Dadurch werden die Abflussgeschwindigkeit, die Länge der Fließstrecke im Verhältnis zur Gesamtfläche und der Anteil der überströmten Fläche an der Gesamtfläche verändert [Helming 1992, S. 9f.].

Zur Messung der Fließgeschwindigkeit in den Rillen wurde das Wasser während der Beregnung alle zehn Minuten mit einem grünen Farbtracer eingefärbt und fotografiert (siehe Abbildung 8.10). Auf dieser Grundlage kann auch das Rillennetzwerk studiert werden.

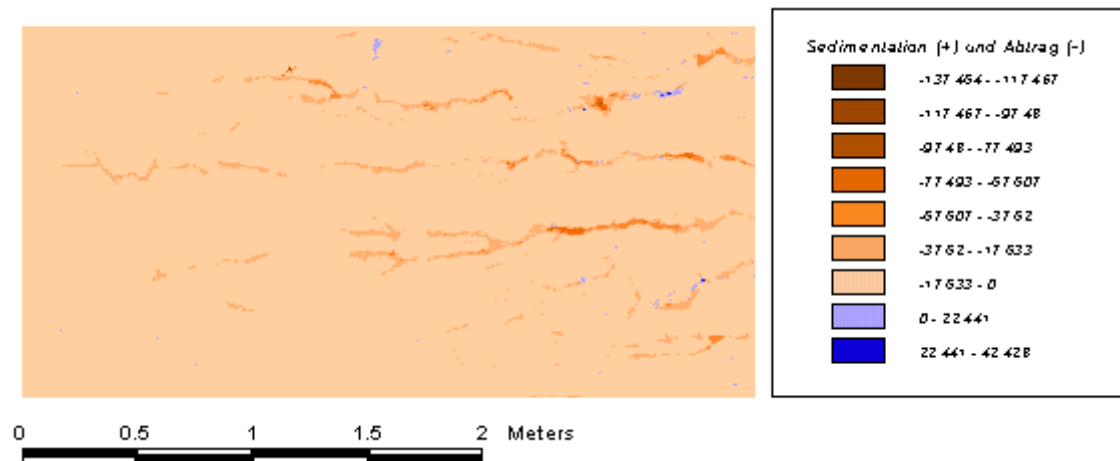


**Abbildung 8.10:** Bodenoberfläche mit grünem Farbtracer

#### **8.4 Abtrag und Sedimentation**

Die Veränderungen der Bodenoberfläche in Abhängigkeit von der Zeit können auch durch die Bildung von Differenzmodellen beschrieben werden. Abtrags- und Sedimentationsgebiete können visualisiert werden.

Voraussetzung für die Differenzbildung unter ArcView sind zwei georeferenzierte Oberflächenraster. Zur Veranschaulichung wurde das Differenzbild vom 08.06.2000 und 13.06.2000 gebildet (Abbildung 8.11). Die Bereiche, in denen Abtrag stattgefunden hat, sind deutlich zu erkennen. An wenigen hier in Blau hervorgehobenen Gebieten wurde Sediment abgelagert. Die Angaben sind in Millimeter.

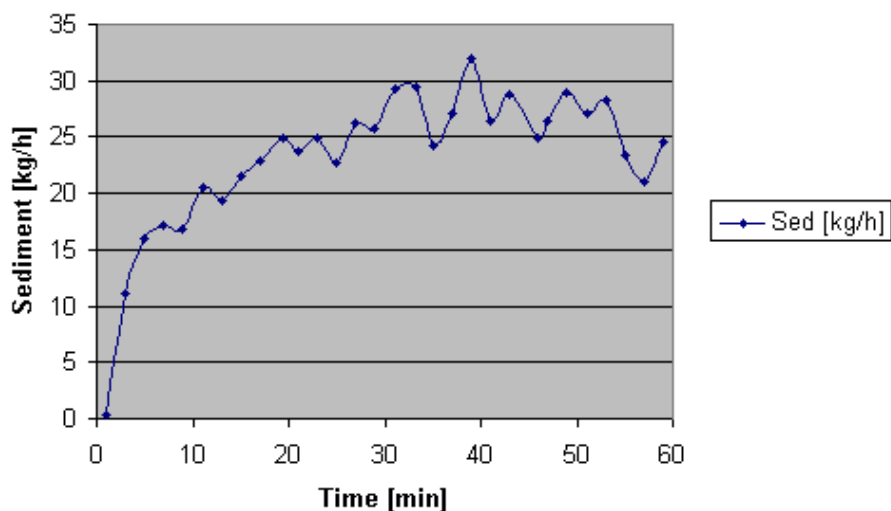


**Abbildung 8.11:** Abtrags- und Sedimentationsgebiete

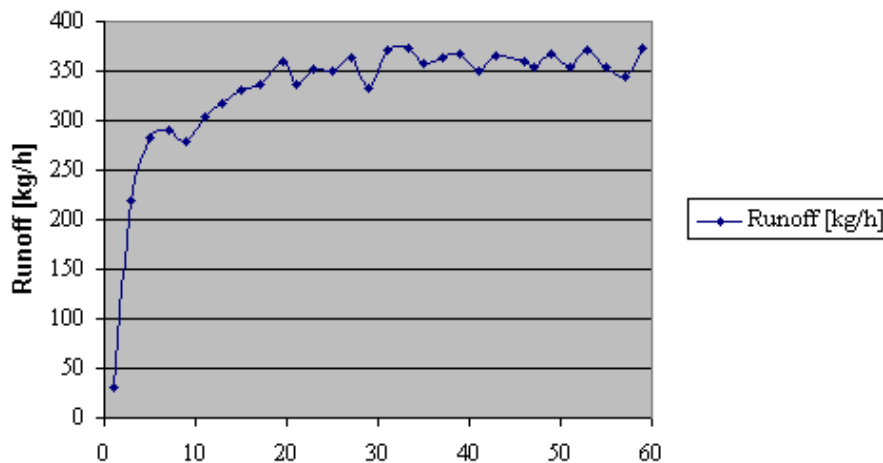
Bei genauer Bestimmung von Abtrag und Sedimentation muss der Grad der Einebnung durch den Niederschlag berücksichtigt werden. Reliefeinebnung entsteht vornehmlich über die Zerstörung der Aggregate und Bröckel durch den Regentropfenaufprall und das abfließende Wasser. Die Lagerungsdichte des Bodens sollte für Vergleiche bekannt sein.

#### 8.4.1 Sedimentproben

Während der Versuchsdurchführung wurden in dreiminütigen Abständen Abflussproben genommen. Sowohl der Sediment- als auch der Wassergehalt wurden ermittelt. Daher ist für jeden Versuch eine Sedimentertragskurve vorhanden. Aus dieser kann die Abtragsmenge einer Berechnung abgeleitet werden.



**Abbildung 8.12:** Sedimentertragskurve vom 13.06.2000



**Abbildung 8.13:** Wassergehaltskurve vom 13.06.2000

Übersteigt die Niederschlagsrate die Infiltrationsrate, sammelt sich das überschüssige Wasser in den Mikrodepressionen des Reliefs. Anhand der Abflussmessungen wird deutlich, dass Oberflächenabfluss erst einsetzt, wenn die Mulden gefüllt sind. Je größer also die Speicherkapazität für Wasser auf der Bodenoberfläche ist, um so länger kann der Abfluss verzögert werden [Helming 1992, S. 7]. Das in den Mikrodepressionen auf der Fläche stehende Wasser beeinflusst außerdem die Energiewirkung der Niederschlagstropfen und die Sedimentation des gelösten Bodenmaterials [Helming 1992, S. 8]. Wird die Tiefe des Wassers doppelt so groß wie der Tropfendurchmesser, wird die Einwirkung des auf den Boden auftreffenden Regens unbedeutend.

Der aus den Sedimentertragskurven vom 09.06.2000 und 12.06.2000 bestimmte Volumenverlust beläuft sich auf 48,0 kg. Dies entspricht einem Abtrag von  $0,5 \text{ g/cm}^2$  unter Berücksichtigung der Gesamtfläche der Box in diesem Zeitraum.

Auch aus den Differenzen von jeweils zwei generierten Oberflächenmodellen kann die Ab- bzw. Zunahme des Volumens ermittelt werden. Die Volumenbestimmung basiert auf den interpolierten Oberflächenmodellen.

Aus dem Mittel der Abweichungen zweier Differenzmodelle, der Anzahl von Zeilen und Spalten sowie der Gitterweite kann unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte der Abtrag, bzw. die Sedimentation ermittelt werden. Zwischen dem 08.06.2000 und dem 13.06.2000 wurde ein Volumen von 53,4 kg abgetragen. Es wird eine konstante Lagerungsdichte von  $1,3 \text{ g/cm}^3$  angenommen. Bezogen auf die Ausmaße des verwendeten

Ausschnitts aus dem Oberflächenmodell liegt der Abtrag in der Größenordnung von  $1,0 \text{ g/cm}^2$ .

Die Differenz von  $0,5 \text{ g/cm}^2$  zwischen dem gemessenen und dem photogrammetrisch bestimmten Abtrag liegt im Bereich der Messungenauigkeit. Das Ausmaß der Schrumpfung des Bodens durch Trocknung wurde bei der Bildung der Volumendifferenz nicht berücksichtigt. Die photogrammetrischen Aufnahmen erfolgten jeweils ein bzw. zwei Tage nach der Beregnung. Für genaue Volumenangaben sind auch die Setzungen des Bodenmaterials zu beachten. Zudem sind die für die Veränderung des Bodenvolumens bedeutenden Rillenbereiche nicht vollständig erfasst, bzw. durch die Interpolation geglättet worden.

Da auch nicht von einer konstanten Position der Passpunkte ausgegangen werden kann, ist ein absoluter Vergleich nur näherungsweise möglich.

## **9 Zusammenfassung und Ausblick**

### **9.1 Zusammenfassung**

Bodenerosion ist ein allgegenwärtiges Problem. Zur Visualisierung der Prozesse werden Oberflächenmodelle mit einer Grundauflösung bis zu 1 mm benötigt.

In Zusammenarbeit des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Universität Hannover mit dem National Soil Erosion Research Laboratory erfolgte die Erfassung von Bodenoberflächen mit den Verfahren der Laserscannertriangulation und der Stereophotogrammetrie. Versuchsgrundlage war eine 4,18 m lange und 2,24 m breite mit Boden verfüllte Box. Mittels fünf durchgeführter Berechnungen wurde Erosion durch Wasser simuliert.

Im Vergleich zur Photogrammetrie besitzt das Laserreliefmeter den großen Vorteil, dass die Messdaten direkt und ohne Nachbearbeitung zur Auswertung vorliegen. Die Messungen können sowohl im Feld als auch im Labor durchgeführt werden. Ein Nachteil besteht im beschränkten Messbereich durch die Notwendigkeit eines Rahmens. Aufgrund der Transportfähigkeit sind die Größenausmaße des Rahmens beschränkt. Auch ist der hohe Zeitaufwand für die Erfassung eines Oberflächenmodells nicht zu vernachlässigen. In der Regel muss die Versuchsdurchführung für mehrere Stunden unterbrochen werden. Die einmalig durchgeführte Kalibrierung ist unzureichend für die Genauigkeitsanforderungen. Bei der Weiterverarbeitung der gemessenen relativen Höhenwerte entstanden Schwierigkeiten bei der Transformation der Streifendaten in ein gesamtes Oberflächenmodell, da kein einheitliches Datum vorlag.

Durch den Einsatz einer digitalen Kamera ergeben sich neue Möglichkeiten zur Anwendung photogrammetrischer Methoden im Hinblick auf einen digitalen Datenfluss und einen hohen Automationsgrad. Zur photogrammetrischen Oberflächenerfassung wurde die digitale Kamera Kodak DCS 1m verwendet.

Die Vorteile der Photogrammetrie liegen in der schnellen Verfügbarkeit der Bilder bzw. einer kurzen Versuchsunterbrechung. Zusätzlich ist durch die photogrammetrischen Aufnahmen eine Überprüfung und Dokumentation der Berechnungsversuche möglich. In einer zeitaufwendigeren Nachbearbeitung wurde durch Anwendung digitaler Bildzuordnung

nach der Methode der kleinsten Quadrate und anschließender Interpolation die Oberfläche generiert.

Die Photogrammetrie liefert im relativen Vergleich zur Laserscannertriangulation die besseren Ergebnisse. Durch den Einsatz der Photogrammetrie sind neue Analysen möglich und Voraussetzungen für neue Experimente im Bereich der Bodenerosionsforschung geschaffen. Die Erfassung größerer Flächen mit einer höheren Auflösung ist realisierbar. Aufgrund der kurzen Aufnahmezeit können genauere Zeitreihenanalysen durchgeführt werden.

Eine Aussage über die absolute Genauigkeit der beiden Aufnahmesysteme ist in diesem Fall nicht möglich.

Zur Erhöhung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Matching-Algorithmus sollten Verfahren der Mehrbildverarbeitung, Bildpyramiden und die Epipolargeometrie eingesetzt werden. Bei der Wahl der Fenstergröße wäre eine adaptive Bestimmung sinnvoll, und die Verwendung von Transferpunkten würde die weitere Auswertung vereinfachen.

Eine Möglichkeit der Verifizierung des Matching-Algorithmus ist durch Vertauschen der Eingangsbilder und anschließende Differenzbildung gegeben.

Bei zukünftigen Aufnahmeplanungen und –konfiguration sollte wegen möglicher Instabilität der inneren Orientierung der Kamera eine Simultankalibrierung vorgenommen werden. Des Weiteren sollte als Referenz ein Maßstab oder Passpunktrahmen eingesetzt werden, um Veränderungen aufgrund des Einflusses des Niederschlags und von Bewegungen des Bodens zu vermeiden.

Zur Abschätzung der relativen Genauigkeit wurden für beide Verfahren Differenzmodelle im Überlappungsbereich einzelner Streifen bzw. Stereomodelle gebildet. Die Abweichungen der Photogrammetrie sind deutlich geringer als die der Laserscannermessungen. Probleme entstanden bei beiden Methoden im Bereich von Rillen und durch Verdeckung durch größere Bodenbröckel.

Gebiete von Abtrag und Sedimentation wurden durch Differenzbildung der photogrammetrisch generierten Oberflächenmodelle visualisiert. Rillenenwicklung und -veränderungen wurden so dokumentiert und mit den durchgeführten Abflussmessung verglichen.

## 9.2 Ausblick

Der Einsatz der digitalen Photogrammetrie im Bereich der Erzeugung digitaler Oberflächenmodelle zur Untersuchung von Bodenerosion ist aufgrund der fortschreitenden Entwicklung digitaler Aufnahme- und Auswertesysteme gegeben. Die zeitaufwendige Nachbearbeitung kann durch weitere Automatisierung erleichtert werden.

Aufgrund der guten Ergebnisse und der flexiblen Handhabung des photogrammetrischen Aufnahmesystems ist es möglich die jetzigen Laboruntersuchungen in die Feldpraxis zu übertragen.



**Abbildung 9.1:** Photogrammetrische Aufnahme von Beregnungsversuchen im Feld

Erste Testaufnahmen von Feldversuchen erfolgten mit der digitalen Kamera DCS 1m von einem Hebewagen. Eine erste Auswertung eines Stereobildpaars zeigte ein sinnvolles Resultat.

Bei der Aufnahmeplanung müssen die Gegebenheiten des Geländes und der Regensimulatoren besonders berücksichtigt werden. Aussagen über die erzielbare Genauigkeit sind zum momentanen Zeitpunkt nicht möglich.



## 10 Literaturverzeichnis

Abkürzungen im Literaturverzeichnis

ASAE	American Society of Agricultural Engineers
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BuL	Bildmessung und Luftwesen
DGK-C	Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C
DGPF	Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung
DVW	Deutscher Verein für Vermessungswesen
IAPRS	Internation Archives for Photogrammetry and Remote Sensing
J. Soil and Water Cons.	Journal of Soil and Water Conservation
PE&RS	Photogrammetric Engineering and Remote Sensing
Soil. Sci. Soc. Am. J.	Soil Science Journal Society of America
USDA	United States Department of Agriculture

Ackermann F., Hahn M., 1991: *Image Pyramids for Digital Photogrammetry*; in: Digital Photogrammetric Systems, Ebner H., Fritsch D., Heipke C. (Eds.), S. 43-58, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1991.

Albertz J., Kreiling W., 1989: *Photogrammetrisches Taschenbuch*, 4. Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1989.

Bertuzzi P., Caussignac J. M., Stengel P., Morel G., Lorendeau J. Y., Pelloux G., 1990: *An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ*, Soil Science (149) 3, S. 169-178.

Bethel J., 1997: *Least Squares Matching for CE604*, Purdue University.

Bösemann W., 1994: Ein photogrammetrisches Verfahren zur modellgestützten Objektrekonstruktion, DGK-C 422.

Bosselmann H., 1999: *Untersuchung der automatischen Bestimmung von Sandoberflächen mit DPCOR*, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.

Claus M. 1983: *Korrelationsrechnung in Stereobildpaaren zur automatischen Gewinnung von digitalen Geländemodellen, Orthophotos und Höhenlinienplänen*, DGK-C 283.

Currence H. D., Lovely W. G., 1970: *The Analysis of Soil Surface Roughness*, Transactions of the ASAE (13) 6, S. 710-714.

Eastman Kodak Company, 1995: *User's Manual: EOS DCS 1*, Eastman Kodak, Rochester NY.

- Ebner H., Fritsch D., Gillessen W., Heipke C., 1987: *Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie*, BuL (55) 5, S. 194-203.
- Elliot W., Laflen J., Thomas A., Kohl K., 1997: *Photogrammetric And Rillmeter Techniques For Hydraulic Measurements*, Transactions of the ASAE; 40 (1), S 157-165.
- Förstner W., 1991: *Statistische Verfahren für die automatische Bildanalyse und ihre Bewertung bei der Objekterkennung und -vermessung*, DGK-C 370.
- Förstner W., 1982: *On the Geometric Precision of Digital Correlation*, IAPRS, Symposium Helsinki, Commission III, (24) 3/3, S. 176-189.
- Forkert G., Stanek H., 1999: *Der Einsatz der Kodak DCS 460 für digitale Photogrammetrie*, <http://geodaesie.uibk.ac.at/vortrag/forkert.html>, 03.1999.
- Grün A., Baltsavias E., 1988: *Geometrically constrained multiphoto matching*, PE&RS (54) 5, S. 633-641.
- Grün A., Baltsavias E., 1986: *High Precision Image Matching for Digital Terrain Model Generation*, IAPRS, Symposium Rovaniemi, Commission III, (26) 3/2, S. 284-296.
- Gülch E., 1994: *Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung*, DGK-C 418.
- Hake G., Grünreich D., 1994: *Kartographie*, 7. Auflage, de Gruyter, Berlin, 1994.
- Heipke C., 1996a: *Digitale Photogrammetrie – Grundlagen und Anwendungsbeispiele*; in: *Mitteilungsblatt DVW-Bayern 2/1996, Teil 1, S. 271-300, und 3/1996, Teil 2, S. 423-452.*
- Heipke C., 1996b: *Overview of Image Matching Techniques*; in: *OEEPE - Workshop on Application of Digital Photogrammetric Workstations*, Kölbl O. (Ed.), *Proceedings, Lausanne, Switzerland, March 4-6, 1996, Off. Publ. No. 33, S. 173-191.*
- Heipke C., 1995: *Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen*, DGK-C 450.
- Heipke C., 1990: *Integration von Bildzuordnung, Punktbestimmung; Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*, DKG-C 366.
- Heipke C., Kornus W., 1993: *Nicht-semantische photogrammetrische Auswertung digitaler Bilddaten – praktische Durchführung am Beispiel einer SPOT Stereoszene*, ZPF (61) 3, S. 122-130.
- Heipke C., Kornus W., 1991: *Nonsemantic Photogrammetric Processing of Digital Imagery – The Example of SPOT Stereo Scenes*; in: *Digital Photogrammetric Systems*, Ebner H., Fritsch D., Heipke C. (Eds.), S. 86-102, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1991.
- Helming K., 1992: *Die Bedeutung des Mikroreliefs für die Regentropfenerosion*; in *Bodenökologie und Bodengenese*, Heft 7, Bork H.-R., Renger M., Alaily F., Roth C., Wessolek G. (Hrsg.), Selbstverlag, Berlin, 1992.

- Hoof A., 1998: *Kalibrierung und geometrische Untersuchung digitaler Kammern*, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.
- Huang C., Bradford J. M., 1992: *Applications of a Laser Scanner to Quantify Soil Microtopography*, Soil. Sci. Soc. Am. J. (56), S. 14-21.
- Huang C., Bradford J. M. 1990: *Portable Laser Scanner for Measuring Soil Surface Roughness*, Soil. Sci. Soc. Am. J. (54), S. 1402-1406.
- Huang C., White I., Thwaite E. G., Bendeli A., 1988: *A Noncontact Laser System for Measuring Soil Surface Topography*, Soil. Sci. Soc. Am. J. (52), S. 350-355.
- Huke M., 1999: *Geometrische Untersuchung der Rolleimetric Q16*, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.
- Hutchinson S., Daniel L., 1997: *INSIDE ArcView GIS*, Second Edition, OnWord Press, Santa Fe, USA, 1997.
- IPI, 2000a: *DPCOR MANUAL*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.
- IPI, 2000b: *DPLX – computer supported Digital Photogrammetric determination of image coordinates*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.
- Jacobsen K., 2000: *User Manual Programmsystem BLUH: BundLeblock Adjustment University Hannover*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Univeristät Hannover.
- Jeschke W., 1990: *Digital close-range photogrammetry for surface measurement*, IAPRS, Symposium Zürich, Commission III, (28) 5, S. 1058-1065.
- Kahmen H., 1993: *Vermessungskunde*, 18. Auflage, de Gruyter, Berlin, 1993.
- Kornus W., Ebner H., Heipke C., 1995: *Photogrammetric point determination using MOMS-02/D2 imagery*; in: *From Digital Images to Spatial Objects, Research and Development Topics in Digital Photogrammetry*, Heipke C. (Ed.), S. 17-27, Report No. 433, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, 1995.
- Kraak M. J., Ormeling F. J., 1996: *Cartography: Visualization of Spatial Data*, Addison Wesley Longman, Singapore, 1996.
- Kraus K., 2000: *Photogrammetrie Band 3: Topographische Informationssysteme*, Ferd. Dümmlers Verlag, Köln, 2000.
- Kraus K., 1997: *Photogrammetrie Band 1: Grundlagen und Standardverfahren*, 6. Auflage, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1997.
- Kraus K., 1996: *Photogrammetrie Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen*, 3. Auflage, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1996.
- Kraus K., 1973: *Ein allgemeines digitales Geländemodell*; in: *Numerische Photogrammetrie: Gegenwärtiger Stand und Weiterentwicklung*, Buchreihe Band 5, Ackermann F. (Hrsg.), S. 225-253, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1973.

- Linder W., 2000a: *Programmbeschreibung LISA, Modul BASIS, Version 2.0*, Universität Düsseldorf, Geographisches Institut.
- Linder W., 2000b: *Programmbeschreibung LISA, Modul FOTO, Version 2.0*, Universität Düsseldorf, Geographisches Institut.
- Linder W., 1999: *Geo-Informationssysteme: Ein Studien- und Arbeitsbuch*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1999.
- Linder W., 1994: *Interpolation und Auswertung digitaler Geländemodelle mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 198.
- Luhmann, T., 2000: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- Merel A. P., Farres P. J., 1998: *The Monitoring of Soil Surface Development using Analytical Photogrammetry*, Photogrammetric Record 16 (92), S. 331-345.
- Ormsby T., Alvi J., 1999: *Extending ArcView GIS*, ESRI Press, California, USA, 1999.
- Otto G. P., Chau T. K. W., 1989: *'Region-growing' algorithm for matching of terrain images*, Image and Vision Computing (7) 2, S. 83-94.
- Pelzer H., 1985: *Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung*; in: *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*, Pelzer H. (Hrsg.), S. 3-120, Konrad Wittwer, Stuttgart 1985.
- Piechel J., 1991: *Anwendungen in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*; in: *Digitale Bildverarbeitung*, Bähr H.-P., Vögtle T. (Hrsg.), S. 97-136, 2. Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1991.
- Radke J. K., Otterby M. A., Young R. A., Onstad C. A., 1981: *A Microprocessor Automated Rillmeter*, Transactions of the ASAE (24) 2, S. 401-408.
- Renard K. R., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C., 1997: *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook Nr. 703.
- Richter D., 1992: *Allgemeine Geologie*, 4. Auflage, de Gruyter, Berlin, 1992.
- Römken M. J. M., Wang J. Y., Darden R. W., 1988: *A Laser Microreliefmeter*, Transactions of the ASAE (31) 2, S. 408-4013.
- Rosenholm D., 1986: *Accuracy improvement of digital image matching for evaluation of digital terrain models*, IAPRS, Symposium Rovaniemi, Commission III, (26) 3/2, S. 573-587.
- Schäffler H., Bruy E., Schelling G., 1991: *Baustoffkunde*, 5. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1991.
- Scheffer F., Schachtschabel P., 1989: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 12. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Berlin, 1989.
- Schewe H., 1988: *Automatische photogrammetrische Karosserie-Vermessung*, BuL (56) 1, S. 16-24.

- Schlüter M., 1999: *Automatische Oberflächenrekonstruktion durch Mehrbildzuordnung mit dem Facetten-Stereosehen*; in: *Automatische Oberflächenrekonstruktion durch digitale Bildzuordnung*, Schlüter M. (Hrsg.), S. 7-21, Mitteilungen des BKG, Band 4, Verlag des BKG, Frankfurt am Main, 1999.
- Schlüter M., Wrobel B. P., 1999: *Photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion durch Mehrbildzuordnung mit Facetten-Stereosehen*; in: *Automatische Oberflächenrekonstruktion durch digitale Bildzuordnung*, Schlüter M. (Hrsg.), S. 23-38, Mitteilungen des BKG, Band 4, Verlag des BKG, Frankfurt am Main, 1999.
- Schwertmann U., Vogl W., Kainz M., 1987: *Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*, 2. Auflage, Ulmer, Stuttgart, 1987.
- Störy J., 1994: *Untersuchung der Eignung von Still-Video-Kameras für den photogrammetrischen Einsatz*, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover.
- Stojic M., Chandler J., Ashmore P., Luce J., 1998: *Assessment of Sediment Transport Rates by Automated Digital Photogrammetry*, PE&RS (64) 5, S. 387-395.
- Vögtle T., 1998: *Bildqualität – ausgewählte Maße und deren Bestimmung*, in: *Digitale Bildverarbeitung*, Bähr H.-P., Vögtle T. (Hrsg.), S. 47-65, 3. Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1998.
- Wang Y., 1994: *Strukturzuordnung zur automatischen Oberflächenrekonstruktion*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 207.
- Wegmann H., Rieke-Zapp D., Santel F., 2001: *Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Erstellung von Oberflächenmodellen für Bodenerosionsversuche*, 20. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Band 9, im Druck.
- Welch R., Jordan T. R., Thomas A. W., 1984: *A photogrammetric technique for measuring soil erosion*, J. Soil and Water Cons. (39) 3, S. 191-194.
- Welch R., Jordan T. R., 1983: *Analytical Non-Metric Close-Range Photogrammetry for Monitoring Stream Channel Erosion*, PE&RS (49) 3, S. 367-374.
- Wendehorst R., 1998: *Baustoffkunde*, Vollenschaar D. (Hrsg.), 25. Auflage, Vincentz, Hannover, 1998.
- Wolf K., Förstner W., 2000: *Exploiting the multi view geometry for automatic surfaces reconstruction using feature based matching in multi media photogrammetry*, IAPRS Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam 2000.
- Wrobel B. P., 1987: *Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen*, BuL (55) 3, S. 93-101.
- United States Department of Agriculture & National Resource Conservation Service USDA & NRCS, 2001: <http://www.statlab.iastate.edu/cgi-bin/osd/osdname.cgi> (Official Soil Series Descriptions), 01.2001.
- United States Department of Agriculture & National Resource Conservation Service USDA & NRCS, 1998: *Soil Survey of Tippecanoe County, Indiana*, U.S. Government Printing Office.

Zeitler W., 1995: *PROGRESS MANUAL*, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München.

## **11 Anhang**

**Anhang A:** gekürzte BLUH-Liste für das 19 mm-Objektiv vom 13.06.2000

**Anhang B:** Beispiel eines LOG-Files

**Anhang C:** Auszug aus einer Ausgabe-Datei „conj.out“

```

=====
PROGRAM  BLUH      UNIVERSITY OF HANNOVER          JUN 2000
      -----  BUNDLE BLOCK ADJUSTMENT  -----
      INSTITUTE FOR PHOTOGRAMMETRY AND ENGINEERING SURVEYS

DATE:  02.01.2001   09:38:37
=====

Kalibrierung 13.06.2000

=====

DAXYZ
daxyz.dat

DAPOR
dapor2.dat

BLUINF
bluinf.dat

DABLUH
dabluh.dat

NUMBER OF PHOTOS      GPS      GPSWXY      GPSWZ      GPS ANTENNA OFFSET
                      5        0        .300      .300      .000      .000      .000      3.

CALIBRATED FOCAL LENGTH
18.884

MAXI  IW      GW(1)      GW(2)      GW(3) IB      FEG REC.SCALE ABIT IOUT APPR IFR
  10   1      .304      .363      2.0  0      20.0      0.  .00      2   0   0

      FROM PT      TO POINT      WEIGHT      AD PAR      WARNING      OUTSIDE
      0          0          1.000      2          50. 9999999999999999

. SYSIM
0      0

AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C  AP C
  1 0   2 0   3 0   4 0   5 0   6 0   7 0   8 0   9 0  10 0  11 0  12 0
 13 0  14 0  15 0

      REA      REB      REC      REC2      IMAR      IMA2
      .050      5.00      4.40      3.00      0          0

APRIORI STANDARD DEVIATIONS: CONTROL POINTS SX = SY =      .304
                                      SZ =      .363
                                      PHOTO COORDINATES Sy = Sx =      2.0

      IPPP      IPU      IFILT      NGPSIT      NGPSHI      IEROUT      ISTAR
      5          161      7          0          0          0          2

PHOTO NUMBER LIST
  101  1      102  1      103  1      104  1      105  1

ERROR CORRECTION LIST

      POINT      PHOTO
      0          0

CONTROL POINTS

      POINT      X          Y          Z      FSP      FSZ
      105      2500.481      2377.211      5170.063  1.00  1.00
      106      2500.119      2247.263      5201.286  1.00  1.00
      107      2500.064      2120.709      5232.194  1.00  1.00

```



---

108	2499.234	1986.728	5265.734	1.00	1.00
109	2497.985	1870.782	5294.824	1.00	1.00
110	2498.541	1754.188	5324.074	1.00	1.00
111	2497.544	1631.541	5354.591	1.00	1.00
112	2497.574	1511.673	5384.053	1.00	1.00
113	2497.392	1385.469	5415.837	1.00	1.00
114	2497.313	1261.018	5447.218	1.00	1.00
116	2496.968	1006.229	5509.532	1.00	1.00
119	2492.711	603.514	5611.917	1.00	1.00
200	1477.550	3020.803	4978.985	1.00	1.00
201	1452.663	2892.661	5010.198	1.00	1.00
202	1476.527	2763.894	5041.753	1.00	1.00
203	1451.359	2628.244	5074.825	1.00	1.00
204	1475.865	2507.810	5105.171	1.00	1.00
205	1450.850	2383.214	5135.185	1.00	1.00
206	1474.751	2273.593	5163.332	1.00	1.00
207	1450.699	2156.576	5191.291	1.00	1.00
208	1472.839	1485.113	5359.611	1.00	1.00
209	1447.265	1367.031	5387.646	1.00	1.00
210	1471.451	1248.117	5418.075	1.00	1.00
211	1446.212	1118.170	5449.762	1.00	1.00
212	1471.163	991.717	5482.769	1.00	1.00
213	1444.922	853.493	5516.476	1.00	1.00
214	1469.749	730.050	5548.261	1.00	1.00
215	1443.550	597.744	5580.973	1.00	1.00
300	426.623	3019.910	4950.123	1.00	1.00
301	426.108	2897.193	4980.858	1.00	1.00
302	425.226	2772.879	5010.775	1.00	1.00
303	425.492	2644.755	5041.982	1.00	1.00
304	424.233	2514.356	5074.723	1.00	1.00
305	424.650	2383.913	5105.681	1.00	1.00
306	424.326	2251.861	5138.140	1.00	1.00
307	423.771	2119.007	5171.467	1.00	1.00
308	423.501	1988.559	5203.963	1.00	1.00
309	423.613	1865.704	5234.681	1.00	1.00
310	423.828	1748.995	5263.157	1.00	1.00
311	423.300	1624.976	5293.397	1.00	1.00
312	423.284	1501.723	5323.488	1.00	1.00
313	421.992	1375.761	5354.601	1.00	1.00
314	421.938	1248.756	5386.265	1.00	1.00
315	421.233	1122.419	5417.901	1.00	1.00
316	421.287	993.588	5449.914	1.00	1.00
317	420.345	855.279	5483.946	1.00	1.00
318	420.139	722.892	5517.868	1.00	1.00
319	419.655	597.083	5550.640	1.00	1.00
400	455.824	3047.928	4943.972	1.00	1.00
401	589.103	3047.844	4947.618	1.00	1.00
402	721.163	3048.304	4951.299	1.00	1.00
403	857.798	3049.978	4954.486	1.00	1.00
404	990.588	3049.255	4958.372	1.00	1.00
405	1129.161	3049.394	4962.884	1.00	1.00
406	1266.665	3048.920	4966.321	1.00	1.00
407	1391.317	3050.234	4970.163	1.00	1.00
408	1509.111	3049.632	4972.392	1.00	1.00
409	1648.815	3051.147	4976.484	1.00	1.00
410	1786.920	3050.924	4980.296	1.00	1.00
411	1923.403	3051.433	4983.900	1.00	1.00
412	2043.833	3052.134	4987.259	1.00	1.00
413	2184.875	3052.544	4991.202	1.00	1.00
414	2310.734	3052.440	4994.896	1.00	1.00
415	2441.376	3052.485	4998.817	1.00	1.00
500	454.141	1804.392	5250.484	1.00	1.00
501	584.069	1777.184	5260.646	1.00	1.00
502	716.596	1804.188	5258.245	1.00	1.00
503	844.628	1777.200	5267.582	1.00	1.00
504	974.472	1804.717	5264.685	1.00	1.00
505	1104.964	1778.226	5275.108	1.00	1.00
506	1748.361	1806.097	5287.087	1.00	1.00
507	1881.188	1780.087	5297.766	1.00	1.00
508	2016.486	1807.602	5295.192	1.00	1.00
509	2157.618	1781.297	5306.253	1.00	1.00
510	2296.109	1808.718	5304.108	1.00	1.00
511	2431.759	1782.158	5314.415	1.00	1.00
600	449.252	536.243	5566.033	1.00	1.00

601	583.484	534.075	5569.696	1.00	1.00
602	720.251	534.429	5573.598	1.00	1.00
603	854.202	533.892	5578.008	1.00	1.00
604	990.021	533.785	5582.811	1.00	1.00
605	1124.628	535.127	5586.688	1.00	1.00
606	1260.377	535.498	5590.893	1.00	1.00
607	1383.058	536.457	5594.520	1.00	1.00
608	1499.383	536.221	5598.365	1.00	1.00
609	1632.011	536.644	5601.785	1.00	1.00
610	1767.531	536.627	5605.244	1.00	1.00
611	1899.770	537.175	5609.524	1.00	1.00
612	2034.558	537.565	5613.063	1.00	1.00
613	2169.082	538.693	5616.717	1.00	1.00
614	2302.717	539.537	5620.733	1.00	1.00
615	2431.812	541.034	5624.920	1.00	1.00
700	475.847	2420.425	5071.911	1.00	1.00
701	598.273	2420.910	5075.321	1.00	1.00
702	722.416	2420.321	5079.224	1.00	1.00
703	852.313	2420.036	5083.122	1.00	1.00
704	976.897	2420.801	5086.367	1.00	1.00
705	1105.589	2421.019	5090.387	1.00	1.00
706	1232.493	2421.086	5093.581	1.00	1.00
707	1369.253	2421.090	5097.265	1.00	1.00
708	1526.199	2421.796	5101.577	1.00	1.00
709	1652.134	2422.236	5105.711	1.00	1.00
710	1782.128	2422.654	5109.619	1.00	1.00
711	1909.577	2422.651	5113.503	1.00	1.00
712	2036.789	2423.884	5117.227	1.00	1.00
713	2169.049	2423.816	5121.022	1.00	1.00
714	2296.637	2423.798	5124.621	1.00	1.00
715	2420.538	2424.500	5128.575	1.00	1.00
800	468.964	1150.232	5385.877	1.00	1.00
801	593.183	1150.575	5389.771	1.00	1.00
802	719.483	1150.466	5393.585	1.00	1.00
803	844.583	1151.807	5397.157	1.00	1.00
804	972.373	1152.214	5400.895	1.00	1.00
805	1099.972	1152.777	5404.595	1.00	1.00
806	1223.257	1153.079	5408.793	1.00	1.00
807	1365.031	1152.116	5413.111	1.00	1.00
808	1521.652	1153.344	5417.514	1.00	1.00
809	1645.853	1153.739	5421.467	1.00	1.00
810	1776.027	1153.663	5425.923	1.00	1.00
811	1902.192	1153.122	5429.198	1.00	1.00
812	2028.576	1154.006	5432.400	1.00	1.00
813	2157.563	1154.177	5436.277	1.00	1.00
814	2289.235	1153.950	5440.135	1.00	1.00
815	2413.855	1154.774	5444.578	1.00	1.00
900	1558.997	1933.055	5776.497	1.00	1.00
901	1334.053	1931.679	5769.732	1.00	1.00
902	1439.637	2025.331	5755.110	1.00	1.00
903	1444.116	1807.119	5809.518	1.00	1.00
904	1462.721	1789.774	5289.009	1.00	1.00
905	1618.620	1794.431	5292.680	1.00	1.00
906	1460.841	1952.450	5248.808	1.00	1.00
907	1293.906	1791.555	5283.204	1.00	1.00
908	1460.858	1652.895	5322.980	1.00	1.00
909	1673.370	1796.006	5301.223	1.00	1.00
910	1462.364	2001.185	5244.167	1.00	1.00
911	1249.272	1794.892	5288.855	1.00	1.00
912	1460.243	1589.568	5346.341	1.00	1.00

## RANGE OF PHOTO COORDINATES

X MINIMUM = -12.693 X MAXIMUM = 13.092  
 Y MINIMUM = -8.981 Y MAXIMUM = 9.071  
 R MAXIMUM = 15.927 FACTOR = 10.20891

UP TO 159 POINTS / PHOTO

137 X,Y-CONTROL: 30.480 24.575 137 Z-CONTROL: 27.905

NO. ITER	MS CORR X	MS CORR Y [ground unit]	MS CORR Z	SIGMA 0 (ITER) [microns]	TIME
----------	-----------	----------------------------	-----------	-----------------------------	------

```

=====
0      .227287E+02      .213771E+02      .263364E+02      268.4      09:38:37

137 X,Y-CONTROL:  3.780  4.858 137 Z-CONTROL:  3.569
1      .240034E+02      .227474E+02      .278961E+02      20.1      09:38:37

          MEAN HEIGHT
CAMERA PROJECTION CENTER TERRAIN PHOTO SCALE
1          7222.      5297.      101949. FOR [ft]: 31074. 2590. inch/ft

MAIN KAPPA FOR DATA SET 1 : 299.661      3      5

137 X,Y-CONTROL:  .364  .487 137 Z-CONTROL:  .437
2      .334407E+01      .449810E+01      .505634E+01      2.9      09:38:38

NUMBER AND VALUES OF ADDITIONAL PARAMETERS
100 -.152060E-04 200 .230432E-05 300 .565710E-05 400 .224019E-05
500 -.123405E-03 600 -.151757E-03 700 .435961E-04 800 -.458874E-03
900 .123701E-01 1000 -.198718E-03 1100 -.276714E-04 1200 .113653E-05
1300 .128609E-03 1400 -.298384E+00 1500 -.299449E+00

TOTAL CORRELATION
.50 .41 .47 .50 .83 .83 .44 .49 .27 .28 .17 .01
.18 .77 .80

ADDITIONAL PARAMETERS
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200
1300 1400 1500

STUDENT TEST
8.93 1.47 2.14 1.00 13.96 16.48 19.33 14.84217.12 79.37 15.66 .46
+++ +
5.65101.43 89.56
+++ +++

FOCAL LENGTH FOR CAMERA 1 CHANGED FROM 18.884 TO 18.859 +/- .004
ADDITIONAL PARAMETER 14 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT X -.298 +/- .003
ADDITIONAL PARAMETER 15 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT Y -.299 +/- .003

NO REDUCTION OF ADDITIONAL PARAMETERS BECAUSE OF STRONG CHANGE OF SIGMA0

137 X,Y-CONTROL:  .232  .340 137 Z-CONTROL:  .352
3      .249370E+00      .260698E+00      .251074E+00      2.0      09:38:38

NUMBER AND VALUES OF ADDITIONAL PARAMETERS
100 -.639914E-05 200 .155515E-05 300 .594629E-05 400 .123470E-05
500 -.110489E-03 600 -.131707E-03 700 .472701E-04 800 -.501168E-03
900 .123075E-01 1000 -.193893E-03 1100 -.279437E-04 1200 .167262E-05
1300 .386231E-04 1400 -.292514E+00 1500 -.290652E+00

TOTAL CORRELATION
.50 .41 .47 .50 .82 .82 .43 .48 .28 .27 .17 .01
.20 .75 .78

ADDITIONAL PARAMETERS
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200
1300 1400 1500

STUDENT TEST
5.36 1.41 3.22 .79 18.46 21.22 30.06 23.28308.97111.34 22.63 .98
+++ ++
2.43146.25128.08
+ +++

FOCAL LENGTH FOR CAMERA 1 CHANGED FROM 18.859 TO 18.852 +/- .003
ADDITIONAL PARAMETER 14 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT X -.293 +/- .002
ADDITIONAL PARAMETER 15 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT Y -.291 +/- .002

NO REDUCTION OF ADDITIONAL PARAMETERS BECAUSE OF STRONG CHANGE OF SIGMA0

137 X,Y-CONTROL:  .234  .343 137 Z-CONTROL:  .356

```

```

4      .222850E-01      .209068E-01      .243722E-01      2.0      09:38:38

NUMBER AND VALUES OF ADDITIONAL PARAMETERS
100 -.636734E-05  200 .154494E-05  300 .592623E-05  400 .123989E-05
500 -.110434E-03  600 -.131750E-03  700 .471960E-04  800 -.500582E-03
900 .122914E-01  1000 -.193630E-03  1100 -.279019E-04  1200 .167402E-05
1300 -.992892E-07  1400 -.292186E+00  1500 -.290382E+00

TOTAL CORRELATION
      .50  .41  .47  .50  .82  .82  .43  .48  .28  .27  .17  .01
      .20  .75  .78

ADDITIONAL PARAMETERS
      100  200  300  400  500  600  700  800  900  1000  1100  1200
      1300  1400  1500

STUDENT TEST
5.41  1.42  3.25  .80  18.72  21.54  30.45  23.59312.99112.80  22.92  .99
+++      ++      +++  +++  +++  +++  +++  +++  +++  +++
.01148.43129.99
      +++  +++

FOCAL LENGTH FOR CAMERA 1 CHANGED FROM 18.852 TO 18.852 +/- .003
ADDITIONAL PARAMETER 14 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT X -.292 +/- .002
ADDITIONAL PARAMETER 15 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT Y -.290 +/- .002

```

FOLLOWING ADDITIONAL PARAMETERS SHALL BE REMOVED:  
400 1200 1300

```

137 X,Y-CONTROL: .236 .344 137 Z-CONTROL: .363
5      .107787E-01      .131737E-01      .193406E-01      2.0      09:38:39

```

```

NUMBER AND VALUES OF ADDITIONAL PARAMETERS
100 -.636473E-05  200 .154471E-05  300 .592394E-05  500 -.110394E-03
600 -.131706E-03  700 .471777E-04  800 -.500382E-03  900 .122865E-01
1000 -.193554E-03  1100 -.278909E-04  1400 -.292072E+00  1500 -.290269E+00

TOTAL CORRELATION
      .02  .33  .46  .81  .82  .43  .48  .25  .26  .17  .75  .78

ADDITIONAL PARAMETERS
      100  200  300  500  600  700  800  900  1000  1100  1400  1500

STUDENT TEST
7.59  1.52  3.30  18.76  21.59  30.48  23.62319.05113.33  22.94148.84130.45
+++      ++      +++  +++  +++  +++  +++  +++  +++  +++  +++
ADDITIONAL PARAMETER 14 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT X -.292 +/- .002
ADDITIONAL PARAMETER 15 1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT Y -.290 +/- .002

```

NO ADDITIONAL PARAMETER SHALL BE REMOVED

```

PHOTO ORIENTATION [GRADS] SEQUENCE OF ROTATION: PHI, OMEGA, KAPPA
=====
PHOTO      PHI      OMEGA      KAPPA      EASTING      NORTHING      HEIGHT
101      -.6658  -16.3111  -101.1443  1481.236     2413.433     7577.187
102      -.0741  -14.0619  198.6782   1388.868     2117.549     6914.496
103      .0756  -18.8959  .9448      1379.681     2357.388     6924.171
104     -1.4131  -47.7425  -100.2467  1479.612     3894.204     7071.567
105     -.8792  15.2946  -101.2708  1483.088     899.697      7680.519

```

ORIENTATION DATA STORED IN dapor2.dat

=====

ADJUSTED COORDINATES      ERROR LIMIT FOR LISTING RESIDUALS    20.00 MICRONS

=====

POINT NAME	EASTING	NORTHING	HEIGHT	PHOTOS/POINT
D.I.:      IMAGE	Dx [microns]	Dy	P ROB.E.    Dx EAST	Dy NORTH
DCP: DIFFERENCE AT OBJECT COORDS. OF CONTROL POINTS    SWEIGHT				
-----				
100	2502.429	3024.575	5008.696	3
101	2502.033	2898.797	5039.753	3
102	2501.988	2771.261	5070.823	3
103	2501.727	2630.331	5105.781	3
104	2501.902	2504.434	5140.519	5
105	2500.594	2377.186	5170.041	5
DCPXY	-.113	.025		CP    105
DCPZ			.022	CZ    105
106	2500.146	2247.329	5201.308	5
DCPXY	-.027	-.066		CP    106
DCPZ			-.022	CZ    106
107	2500.145	2120.789	5232.403	5
DCPXY	-.081	-.080		CP    107
DCPZ			-.209	CZ    107
108	2499.205	1986.646	5265.945	5
DCPXY	.029	.082		CP    108
DCPZ			-.211	CZ    108
109	2498.277	1870.771	5294.488	5
DCPXY	-.292	.011		CP    109
DCPZ			.336	CZ    109
110	2498.961	1754.044	5323.636	5
DCPXY	-.420	.144		CP    110
DCPZ			.438	CZ    110
111	2497.994	1631.434	5354.032	5
DCPXY	-.450	.107		CP    111
DCPZ			.559	CZ    111
112	2497.859	1511.579	5383.795	5
DCPXY	-.285	.094		CP    112
DCPZ			.258	CZ    112
113	2497.859	1385.253	5415.493	5
DCPXY	-.467	.216		CP    113
DCPZ			.344	CZ    113
114	2497.762	1260.792	5446.960	5
DCPXY	-.449	.226		CP    114
DCPZ			.258	CZ    114
115	2497.305	1134.515	5479.626	5
116	2497.299	1005.982	5509.722	3
DCPXY	-.331	.247		CP    116
DCPZ			-.190	CZ    116
117	2496.767	872.650	5543.205	2
118	2494.784	736.257	5577.625	2

119	2493.781	601.985	5612.256	2
DCPXY	-1.070	1.529	CP	119
DCPZ			-.339 CZ	119
200	1477.554	3020.617	4979.208	3
DCPXY	-.004	.186	CP	200
DCPZ			-.223 CZ	200
201	1452.455	2892.840	5010.293	3
DCPXY	.208	-.179	CP	201
DCPZ			-.095 CZ	201
202	1476.545	2763.850	5041.893	3
DCPXY	-.018	.044	CP	202
DCPZ			-.140 CZ	202
203	1451.338	2628.406	5075.048	3
DCPXY	.021	-.162	CP	203
DCPZ			-.223 CZ	203
204	1475.810	2507.690	5105.323	5
DCPXY	.055	.120	CP	204
DCPZ			-.152 CZ	204
205	1450.772	2383.179	5134.804	4
DCPXY	.078	.035	CP	205
DCPZ			.381 CZ	205
206	1474.712	2273.546	5163.382	5
DCPXY	.039	.047	CP	206
DCPZ			-.050 CZ	206
207	1450.652	2156.673	5191.843	5
DCPXY	.047	-.097	CP	207
DCPZ			-.552 CZ	207
208	1472.945	1484.968	5358.709	4
DCPXY	-.107	.145	CP	208
DCPZ			.902 CZ	208
209	1447.373	1366.965	5387.486	5
DCPXY	-.108	.066	CP	209
DCPZ			.160 CZ	209
210	1471.401	1248.273	5417.988	5
DCPXY	.050	-.156	CP	210
DCPZ			.087 CZ	210
211	1446.168	1118.447	5449.983	5
DCPXY	.044	-.278	CP	211
DCPZ			-.221 CZ	211
212	1471.022	991.497	5482.555	3
DCPXY	.141	.220	CP	212
DCPZ			.214 CZ	212
213	1445.060	853.463	5516.409	3
DCPXY	-.138	.030	CP	213
DCPZ			.067 CZ	213

214	1469.669	729.995	5548.790	3
DCPXY	.080	.055	CP	214
DCPZ			-.529 CZ	214
215	1443.369	597.512	5581.040	3
DCPXY	.181	.232	CP	215
DCPZ			-.067 CZ	215
300	427.493	3018.570	4950.329	2
DCPXY	-.870	1.340	CP	300
DCPZ			-.207 CZ	300
301	426.239	2897.269	4979.535	2
DCPXY	-.131	-.076	CP	301
DCPZ			1.323 CZ	301
302	425.145	2772.752	5009.827	3
DCPXY	.081	.127	CP	302
DCPZ			.948 CZ	302
303	425.355	2644.636	5041.371	3
DCPXY	.137	.119	CP	303
DCPZ			.611 CZ	303
304	424.113	2514.148	5073.716	5
DCPXY	.120	.208	CP	304
DCPZ			1.007 CZ	304
305	424.803	2383.892	5105.596	5
DCPXY	-.153	.021	CP	305
DCPZ			.085 CZ	305
306	424.207	2251.895	5137.953	5
DCPXY	.118	-.034	CP	306
DCPZ			.187 CZ	306
307	423.588	2119.011	5171.317	5
DCPXY	.183	-.004	CP	307
DCPZ			.150 CZ	307
308	423.323	1988.599	5203.714	5
DCPXY	.178	-.040	CP	308
DCPZ			.249 CZ	308
309	423.429	1865.823	5234.571	5
DCPXY	.184	-.119	CP	309
DCPZ			.110 CZ	309
310	423.715	1749.099	5262.927	5
DCPXY	.113	-.104	CP	310
DCPZ			.230 CZ	310
311	423.179	1624.979	5293.289	5
DCPXY	.121	-.003	CP	311
DCPZ			.108 CZ	311
312	423.259	1501.851	5323.680	5
DCPXY	.025	-.128	CP	312

	DCPZ			-.192 CZ	312
313	422.066	1375.956	5354.668		5
	DCPXY	-.075	-.195	CP	313
	DCPZ			-.067 CZ	313
314	422.139	1248.901	5386.219		5
	DCPXY	-.202	-.145	CP	314
	DCPZ			.046 CZ	314
315	421.350	1122.509	5417.555		5
	DCPXY	-.117	-.090	CP	315
	DCPZ			.346 CZ	315
316	421.545	993.871	5449.872		3
	DCPXY	-.258	-.283	CP	316
	DCPZ			.041 CZ	316
317	421.109	856.329	5484.788		2
	DCPXY	-.764	-1.050	CP	317
	DCPZ			-.842 CZ	317
318	420.460	723.376	5518.355		2
	DCPXY	-.322	-.484	CP	318
	DCPZ			-.487 CZ	318
319	419.496	597.740	5551.101		2
	DCPXY	.159	-.658	CP	319
	DCPZ			-.461 CZ	319
400	456.344	3046.819	4944.034		2
	DCPXY	-.520	1.109	CP	400
	DCPZ			-.062 CZ	400
401	589.188	3047.540	4946.835		3
	DCPXY	-.085	.304	CP	401
	DCPZ			.783 CZ	401
402	721.068	3048.065	4950.657		3
	DCPXY	.095	.239	CP	402
	DCPZ			.642 CZ	402
403	857.670	3049.516	4954.425		3
	DCPXY	.128	.463	CP	403
	DCPZ			.061 CZ	403
404	990.571	3049.025	4958.422		3
	DCPXY	.016	.230	CP	404
	DCPZ			-.050 CZ	404
405	1128.998	3048.998	4962.577		3
	DCPXY	.163	.396	CP	405
	DCPZ			.307 CZ	405
406	1266.900	3048.722	4966.743		3
	DCPXY	-.236	.198	CP	406
	DCPZ			-.422 CZ	406
407	1391.090	3049.883	4969.979		3
	DCPXY	.227	.352	CP	407



	DCPZ		.184	CZ	407
408	1508.711	3049.421	4972.898		3
	DCPXY	.400	.211	CP	408
	DCPZ		-.506	CZ	408
409	1648.722	3050.941	4976.535		3
	DCPXY	.093	.206	CP	409
	DCPZ		-.051	CZ	409
410	1786.377	3050.732	4980.884		3
	DCPXY	.543	.192	CP	410
	DCPZ		-.588	CZ	410
411	1923.517	3051.213	4984.549		3
	DCPXY	-.114	.221	CP	411
	DCPZ		-.648	CZ	411
412	2043.550	3051.898	4987.944		3
	DCPXY	.283	.236	CP	412
	DCPZ		-.685	CZ	412
413	2184.482	3052.450	4992.111		3
	DCPXY	.393	.094	CP	413
	DCPZ		-.909	CZ	413
414	2310.508	3052.677	4995.898		3
	DCPXY	.226	-.237	CP	414
	DCPZ		-1.002	CZ	414
415	2441.154	3052.919	4999.749		3
	DCPXY	.222	-.434	CP	415
	DCPZ		-.932	CZ	415
500	454.218	1804.469	5250.498		4
	DCPXY	-.077	-.077	CP	500
	DCPZ		-.014	CZ	500
501	583.985	1777.127	5260.327		5
	DCPXY	.084	.057	CP	501
	DCPZ		.319	CZ	501
502	716.323	1804.136	5257.873		5
	DCPXY	.273	.052	CP	502
	DCPZ		.372	CZ	502
503	844.634	1777.300	5267.444		5
	DCPXY	-.006	-.100	CP	503
	DCPZ		.138	CZ	503
504	974.540	1804.940	5264.681		5
	DCPXY	-.068	-.223	CP	504
	DCPZ		.004	CZ	504
505	1104.888	1778.182	5274.842		5
	DCPXY	.076	.044	CP	505
	DCPZ		.266	CZ	505
506	1748.289	1806.251	5287.201		5

	DCPXY	.072	-.154	CP	506
	DCPZ			-.114 CZ	506
507	1881.165	1779.959	5297.557		5
	DCPXY	.023	.128	CP	507
	DCPZ			.209 CZ	507
508	2016.399	1807.670	5295.234		5
	DCPXY	.087	-.068	CP	508
	DCPZ			-.042 CZ	508
509	2157.605	1781.333	5306.259		5
	DCPXY	.013	-.036	CP	509
	DCPZ			-.006 CZ	509
510	2296.317	1808.722	5304.006		5
	DCPXY	-.208	-.004	CP	510
	DCPZ			.102 CZ	510
511	2431.833	1782.143	5314.570		5
	DCPXY	-.074	.015	CP	511
	DCPZ			-.155 CZ	511
600	449.191	536.738	5566.238		2
	DCPXY	.061	-.495	CP	600
	DCPZ			-.205 CZ	600
601	583.626	534.996	5570.092		3
	DCPXY	-.142	-.921	CP	601
	DCPZ			-.396 CZ	601
602	720.380	535.304	5574.014		3
	DCPXY	-.129	-.875	CP	602
	DCPZ			-.416 CZ	602
603	854.260	534.426	5578.537		3
	DCPXY	-.059	-.534	CP	603
	DCPZ			-.529 CZ	603
604	989.747	533.780	5582.815		3
	DCPXY	.274	.005	CP	604
	DCPZ			-.004 CZ	604
605	1124.252	534.867	5586.220		3
	DCPXY	.376	.260	CP	605
	DCPZ			.468 CZ	605
606	1260.117	535.423	5590.960		3
	DCPXY	.260	.075	CP	606
	DCPZ			-.067 CZ	606
607	1382.837	536.198	5594.625		3
	DCPXY	.221	.259	CP	607
	DCPZ			-.106 CZ	607
608	1499.104	535.768	5598.201		3
	DCPXY	.279	.453	CP	608
	DCPZ			.165 CZ	608

609	1631.910	536.140	5601.835	3
DCPXY	.101	.504	CP	609
DCPZ			-.050 CZ	609
610	1767.483	536.236	5605.635	3
DCPXY	.048	.391	CP	610
DCPZ			-.391 CZ	610
611	1899.794	536.505	5609.389	3
DCPXY	-.024	.670	CP	611
DCPZ			.135 CZ	611
612	2034.589	536.896	5612.980	3
DCPXY	-.031	.669	CP	612
DCPZ			.083 CZ	612
613	2169.077	537.878	5616.848	3
DCPXY	.005	.815	CP	613
DCPZ			-.131 CZ	613
614	2303.189	538.683	5620.959	3
DCPXY	-.472	.854	CP	614
DCPZ			-.226 CZ	614
615	2432.419	540.152	5625.280	2
DCPXY	-.607	.882	CP	615
DCPZ			-.360 CZ	615
700	476.132	2420.368	5072.207	4
DCPXY	-.285	.057	CP	700
DCPZ			-.296 CZ	700
701	598.129	2420.944	5075.370	5
DCPXY	.144	-.034	CP	701
DCPZ			-.049 CZ	701
702	722.547	2420.319	5079.281	5
DCPXY	-.131	.002	CP	702
DCPZ			-.057 CZ	702
703	852.451	2419.981	5083.302	5
DCPXY	-.138	.055	CP	703
DCPZ			-.180 CZ	703
704	977.009	2420.813	5086.617	5
DCPXY	-.113	-.012	CP	704
DCPZ			-.250 CZ	704
705	1105.428	2421.084	5090.192	5
DCPXY	.161	-.065	CP	705
DCPZ			.195 CZ	705
706	1232.502	2421.118	5093.678	5
DCPXY	-.009	-.032	CP	706
DCPZ			-.097 CZ	706
707	1369.287	2421.100	5097.250	4
DCPXY	-.034	-.010	CP	707
DCPZ			.015 CZ	707

708	1526.124	2421.829	5101.833	4
DCPXY	.075	-.033	CP	708
DCPZ			-.256 CZ	708
709	1652.109	2422.192	5105.872	5
DCPXY	.025	.044	CP	709
DCPZ			-.161 CZ	709
710	1782.249	2422.610	5109.702	5
DCPXY	-.121	.044	CP	710
DCPZ			-.083 CZ	710
711	1909.549	2422.662	5113.482	5
DCPXY	.028	-.011	CP	711
DCPZ			.021 CZ	711
712	2036.857	2423.850	5117.416	5
DCPXY	-.068	.034	CP	712
DCPZ			-.189 CZ	712
713	2168.988	2423.904	5121.237	5
DCPXY	.061	-.088	CP	713
DCPZ			-.215 CZ	713
714	2296.548	2423.778	5124.672	5
DCPXY	.089	.020	CP	714
DCPZ			-.051 CZ	714
715	2420.434	2424.512	5128.781	5
DCPXY	.104	-.012	CP	715
DCPZ			-.206 CZ	715
800	469.020	1150.520	5385.877	5
DCPXY	-.057	-.288	CP	800
DCPZ			.000 CZ	800
801	593.136	1150.789	5389.883	5
DCPXY	.047	-.215	CP	801
DCPZ			-.112 CZ	801
802	719.561	1150.717	5393.752	5
DCPXY	-.078	-.251	CP	802
DCPZ			-.167 CZ	802
803	844.615	1151.982	5397.222	5
DCPXY	-.032	-.175	CP	803
DCPZ			-.065 CZ	803
804	972.366	1152.174	5400.724	5
DCPXY	.007	.040	CP	804
DCPZ			.171 CZ	804
805	1100.245	1152.990	5404.695	5
DCPXY	-.273	-.213	CP	805
DCPZ			-.100 CZ	805
806	1223.439	1153.086	5408.576	5
DCPXY	-.182	-.007	CP	806

	DCPZ		.217 CZ	806
807	1365.046	1152.245	5413.122	4
	DCPXY	-.015	CP	807
	DCPZ		-.011 CZ	807
808	1521.647	1153.642	5417.615	4
	DCPXY	.005	CP	808
	DCPZ		-.101 CZ	808
809	1645.869	1153.903	5421.533	5
	DCPXY	-.016	CP	809
	DCPZ		-.066 CZ	809
810	1776.119	1153.648	5425.616	5
	DCPXY	-.093	CP	810
	DCPZ		.307 CZ	810
811	1902.306	1153.110	5428.982	5
	DCPXY	-.114	CP	811
	DCPZ		.216 CZ	811
812	2028.533	1154.092	5432.545	5
	DCPXY	.043	CP	812
	DCPZ		-.145 CZ	812
813	2157.733	1153.941	5435.816	5
	DCPXY	-.170	CP	813
	DCPZ		.461 CZ	813
814	2289.500	1153.689	5439.776	5
	DCPXY	-.266	CP	814
	DCPZ		.359 CZ	814
815	2414.390	1154.434	5444.254	5
	DCPXY	-.535	CP	815
	DCPZ		.324 CZ	815
816	452.575	1362.908	5364.275	5
817	586.396	1363.250	5367.982	5
818	717.749	1363.040	5371.704	5
819	848.406	1363.909	5375.531	5
820	981.353	1364.031	5379.248	5
821	1113.684	1363.622	5383.468	5
822	1246.038	1363.847	5387.079	5
823	1385.410	1363.886	5391.512	5
824	451.608	949.686	5466.800	3
825	589.539	950.934	5470.757	3
826	723.818	951.189	5474.715	3
827	855.803	951.212	5478.850	3
828	989.325	951.152	5482.847	3
829	1120.616	951.686	5486.940	3
830	1247.554	951.814	5490.971	3
831	1382.980	952.344	5494.765	3
900	1559.052	1932.987	5776.187	5
	DCPXY	-.055	CP	900
	DCPZ		.310 CZ	900
901	1334.094	1931.658	5769.965	5
	DCPXY	-.041	CP	901
	DCPZ		-.233 CZ	901
902	1439.800	2025.348	5755.100	5

	DCPXY	-.164	-.017	CP	902
	DCPZ			.010 CZ	902
903	1444.237	1807.253	5809.582		5
	DCPXY	-.121	-.134	CP	903
	DCPZ			-.064 CZ	903
904	1462.751	1789.943	5289.139		5
	DCPXY	-.030	-.169	CP	904
	DCPZ			-.131 CZ	904
905	1618.732	1794.629	5292.580		3
	DCPXY	-.112	-.198	CP	905
	DCPZ			.100 CZ	905
906	1460.938	1952.433	5248.963		5
	DCPXY	-.097	.017	CP	906
	DCPZ			-.155 CZ	906
909	1673.427	1795.954	5301.144		5
	DCPXY	-.057	.052	CP	909
	DCPZ			.079 CZ	909
910	1462.420	2001.408	5244.384		4
	DCPXY	-.056	-.223	CP	910
	DCPZ			-.217 CZ	910
911	1249.358	1794.929	5289.029		5
	DCPXY	-.086	-.037	CP	911
	DCPZ			-.174 CZ	911
912	1460.235	1589.644	5346.232		4
	DCPXY	.008	-.076	CP	912
	DCPZ			.109 CZ	912
907	1293.833	1791.559	5283.713		3
	DCPXY	.073	-.004	CP	907
	DCPZ			-.509 CZ	907
908	1460.979	1652.964	5323.265		3
	DCPXY	-.121	-.069	CP	908
	DCPZ			-.285 CZ	908

=====

ROOT MEAN SQUARE OF DIFFERENCES AT CONTROL POINTS FOR UNIT WEIGHT  
 137 HORIZONTAL CONTROL POINTS RMSE X = +/- .236 +/- .236  
 RMSE Y = +/- .345 +/- .345  
 137 VERTICAL CONTROL POINTS RMSE Z = +/- .363 +/- .363  
 [ground units]

MEAN DIFFERENCE AT CONTROL POINTS:  
 X: .000 Y: .000 Z: .000 [ground units]

MEAN SQUARE ERRORS				[microns]	
POINT CODE	NO IN GROUP	NO PHOT PTS	INT MSE X	INT MSE Y	
CPZ	1	137	560	1.75	1.55
CPXY	2	137	560	1.66	1.49
ADJUS	4	161	650	1.90	1.79

```

MEAN                                1.78          1.63

MEAN SQUARE CORRECTIONS OF LAST ITERATION
X:   .1491   Y:   .2071   Z:   .3066 [ground units]

OBSERVATIONS      UNKNOWNNS      REDUNDANCE      SIGMA 0
                    1711            525            1186            =====
                                                1.99          09:38:39
                                                [microns]

APRIORI STANDARD DEVIATIONS WITHIN TOLERANCE LIMIT

NUMBER AND VALUE OF ADDITIONAL PARAMETERS
100 -.567E-05 200 .155E-05 300 .591E-05 500 -.111E-03 600 -.132E-03
700 .472E-04 800 -.500E-03 900 .123E-01 1000 -.194E-03 1100 -.279E-04
1400 -.292E+00 1500 -.290E+00

TOTAL CORRELATION
      .02   .33   .46   .81   .82   .43   .48   .25   .26   .17   .75   .78

ADDITIONAL PARAMETERS
      100   200   300   500   600   700   800   900  1000  1100  1400  1500

STUDENT TEST
      6.74  1.52  3.29 18.73 21.61 30.43 23.53318.38113.07 22.87148.51130.28
      +++      ++   +++   +++   +++   +++   +++   +++   +++   +++   +++   +++

ADDITIONAL PARAMETER 14  1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT X   -.292 +/-   .002
ADDITIONAL PARAMETER 15  1 -> SHIFT TO PRINCIPLE POINT Y   -.290 +/-   .002

MEAN VALUES OF RESIDUALS AND MSE IN RADIAL COMPONENTS
1ST LINE  RADIUS          [CM]
2ND LINE  MEAN RADIAL     [MICRONS]
3RD LINE  MSE RADIAL      [MICRONS]
4TH LINE  MSE TANGENTIAL  [MICRONS]
5TH LINE  NUMBER OF POINTS IN GROUP

DATA SET  1
      .0   .1   .2   .3   .4   .5   .6   .7   .8   .9  1.0  1.1  1.2  1.3  1.4
      .0  -.1   .0   .0   .0   .0   .0   .0   .0   .0   .0   .0   .1   .2  -.1
      .1   .2   .2   .2   .1   .1   .1   .1   .2   .2   .2   .2   .2   .2   .2
      .2   .1   .2   .1   .1   .1   .1   .1   .1   .1   .1   .1   .1   .1   .1
      6   61  67  97  82 100 158 159 262 252 134 138  80  67  42

MSE (RADIAL) = +/-   .2          MSE (TANGENTIAL) = +/-   .1          1712 PHOTO POINTS

MEAN SQUARE NADIR ANGLE :          24.8

MEAN PHOTO SCALE = 1:          111047.2          5 PHOTOS
FOR [ft]: 1:          33847.          =          2821. in/ft

ADJUSTED COORDINATES      COMPUTED : DATE:  2.01.2001  09:38:39
=====

```

---

POINT NAME	EASTING	NORTHING	HEIGHT PH/P
100	2502.429	3024.575	5008.696 3
101	2502.033	2898.797	5039.753 3
102	2501.988	2771.261	5070.823 3
103	2501.727	2630.331	5105.781 3

---

104	2501.902	2504.434	5140.519	5
105	2500.594	2377.186	5170.041	5
106	2500.146	2247.329	5201.308	5
107	2500.145	2120.789	5232.403	5
108	2499.205	1986.646	5265.945	5
109	2498.277	1870.771	5294.488	5
110	2498.961	1754.044	5323.636	5
111	2497.994	1631.434	5354.032	5
112	2497.859	1511.579	5383.795	5
113	2497.859	1385.253	5415.493	5
114	2497.762	1260.792	5446.960	5
115	2497.305	1134.515	5479.626	5
116	2497.299	1005.982	5509.722	3
117	2496.767	872.650	5543.205	2
118	2494.784	736.257	5577.625	2
119	2493.781	601.985	5612.256	2
200	1477.554	3020.617	4979.208	3
201	1452.455	2892.840	5010.293	3
202	1476.545	2763.850	5041.893	3
203	1451.338	2628.406	5075.048	3
204	1475.810	2507.690	5105.323	5
205	1450.772	2383.179	5134.804	4
206	1474.712	2273.546	5163.382	5
207	1450.652	2156.673	5191.843	5
208	1472.945	1484.968	5358.709	4
209	1447.373	1366.965	5387.486	5
210	1471.401	1248.273	5417.988	5
211	1446.168	1118.447	5449.983	5
212	1471.022	991.497	5482.555	3
213	1445.060	853.463	5516.409	3
214	1469.669	729.995	5548.790	3
215	1443.369	597.512	5581.040	3
300	427.493	3018.570	4950.329	2
301	426.239	2897.269	4979.535	2
302	425.145	2772.752	5009.827	3
303	425.355	2644.636	5041.371	3
304	424.113	2514.148	5073.716	5
305	424.803	2383.892	5105.596	5
306	424.207	2251.895	5137.953	5
307	423.588	2119.011	5171.317	5
308	423.323	1988.599	5203.714	5
309	423.429	1865.823	5234.571	5
310	423.715	1749.099	5262.927	5
311	423.179	1624.979	5293.289	5
312	423.259	1501.851	5323.680	5
313	422.066	1375.956	5354.668	5
314	422.139	1248.901	5386.219	5
315	421.350	1122.509	5417.555	5
316	421.545	993.871	5449.872	3
317	421.109	856.329	5484.788	2
318	420.460	723.376	5518.355	2
319	419.496	597.740	5551.101	2
400	456.344	3046.819	4944.034	2
401	589.188	3047.540	4946.835	3
402	721.068	3048.065	4950.657	3
403	857.670	3049.516	4954.425	3
404	990.571	3049.025	4958.422	3
405	1128.998	3048.998	4962.577	3
406	1266.900	3048.722	4966.743	3
407	1391.090	3049.883	4969.979	3
408	1508.711	3049.421	4972.898	3
409	1648.722	3050.941	4976.535	3
410	1786.377	3050.732	4980.884	3
411	1923.517	3051.213	4984.549	3
412	2043.550	3051.898	4987.944	3
413	2184.482	3052.450	4992.111	3
414	2310.508	3052.677	4995.898	3
415	2441.154	3052.919	4999.749	3
500	454.218	1804.469	5250.498	4
501	583.985	1777.127	5260.327	5
502	716.323	1804.136	5257.873	5
503	844.634	1777.300	5267.444	5
504	974.540	1804.940	5264.681	5
505	1104.888	1778.182	5274.842	5



---

506	1748.289	1806.251	5287.201	5
507	1881.165	1779.959	5297.557	5
508	2016.399	1807.670	5295.234	5
509	2157.605	1781.333	5306.259	5
510	2296.317	1808.722	5304.006	5
511	2431.833	1782.143	5314.570	5
600	449.191	536.738	5566.238	2
601	583.626	534.996	5570.092	3
602	720.380	535.304	5574.014	3
603	854.260	534.426	5578.537	3
604	989.747	533.780	5582.815	3
605	1124.252	534.867	5586.220	3
606	1260.117	535.423	5590.960	3
607	1382.837	536.198	5594.625	3
608	1499.104	535.768	5598.201	3
609	1631.910	536.140	5601.835	3
610	1767.483	536.236	5605.635	3
611	1899.794	536.505	5609.389	3
612	2034.589	536.896	5612.980	3
613	2169.077	537.878	5616.848	3
614	2303.189	538.683	5620.959	3
615	2432.419	540.152	5625.280	2
700	476.132	2420.368	5072.207	4
701	598.129	2420.944	5075.370	5
702	722.547	2420.319	5079.281	5
703	852.451	2419.981	5083.302	5
704	977.009	2420.813	5086.617	5
705	1105.428	2421.084	5090.192	5
706	1232.502	2421.118	5093.678	5
707	1369.287	2421.100	5097.250	4
708	1526.124	2421.829	5101.833	4
709	1652.109	2422.192	5105.872	5
710	1782.249	2422.610	5109.702	5
711	1909.549	2422.662	5113.482	5
712	2036.857	2423.850	5117.416	5
713	2168.988	2423.904	5121.237	5
714	2296.548	2423.778	5124.672	5
715	2420.434	2424.512	5128.781	5
800	469.020	1150.520	5385.877	5
801	593.136	1150.789	5389.883	5
802	719.561	1150.717	5393.752	5
803	844.615	1151.982	5397.222	5
804	972.366	1152.174	5400.724	5
805	1100.245	1152.990	5404.695	5
806	1223.439	1153.086	5408.576	5
807	1365.046	1152.245	5413.122	4
808	1521.647	1153.642	5417.615	4
809	1645.869	1153.903	5421.533	5
810	1776.119	1153.648	5425.616	5
811	1902.306	1153.110	5428.982	5
812	2028.533	1154.092	5432.545	5
813	2157.733	1153.941	5435.816	5
814	2289.500	1153.689	5439.776	5
815	2414.390	1154.434	5444.254	5
816	452.575	1362.908	5364.275	5
817	586.396	1363.250	5367.982	5
818	717.749	1363.040	5371.704	5
819	848.406	1363.909	5375.531	5
820	981.353	1364.031	5379.248	5
821	1113.684	1363.622	5383.468	5
822	1246.038	1363.847	5387.079	5
823	1385.410	1363.886	5391.512	5
824	451.608	949.686	5466.800	3
825	589.539	950.934	5470.757	3
826	723.818	951.189	5474.715	3
827	855.803	951.212	5478.850	3
828	989.325	951.152	5482.847	3
829	1120.616	951.686	5486.940	3
830	1247.554	951.814	5490.971	3
831	1382.980	952.344	5494.765	3
900	1559.052	1932.987	5776.187	5
901	1334.094	1931.658	5769.965	5
902	1439.800	2025.348	5755.100	5
903	1444.237	1807.253	5809.582	5



MAXIMAL VALUE OF SYSTEMATIC IMAGE ERRORS = 118. MICRONS

END OF BLUH DATE: 02.01.2001 09:38:39

\*\*\*\*\* LARGE SIZE OF SYSTEMATIC IMAGE ERRORS MAX = 118. MICRONS \*\*\*\*\*

```

CONTROL FILE : C:\pic23\test.prj
LOG-File : C:\pic23\test.log
TITLE : 19 mm, bild2 und bild3, 13.06.2000
SUBTITLE : Jose's dritter Versuch, pic23
CODE OF MATCHING : 1
NAME OF FIRST SCENE : C:\pic23\s_bild2.raw
NUMBER OF FIRST SCENE : 102
SCENE ORIENTATION (DEGREES.DECIMALS): 0.000
ANGLE OF INCIDENCE (DEGREES.DECIMALS): 0.000
ROW, COL OF FIRST SCENE : 1500 3000
UPPER LEFT CORNER OF FIRST SCENE : 1.0000 27.0000
NAME OF SECOND SCENE : C:\pic23\s_bild3.raw
NUMBER OF SECOND SCENE : 103
SCENE ORIENTATION (DEGREES.DECIMALS): 0.000
ANGLE OF INCIDENCE (DEGREES.DECIMALS): 0.000
ROW, COL OF SECOND SCENE : 1500 3000
UPPER LEFT CORNER OF SECOND SCENE : 537.0000 34.0000
SCALE PARAMETER IN X AND STAND. DEV. : 1.0000 0.0000
SHEAR PARAMETER IN X AND STAND. DEV. : 0.0000 999999984306749440.00
SCALE PARAMETER IN Y AND STAND. DEV. : 1.0000 0.0000
SHEAR PARAMETER IN Y AND STAND. DEV. : 0.0000 999999984306749440.00
FILE WITH CONJUGATE POINTS (INPUT) : C:\pic23\stereo23.dat
FILE WITH MATCHED CONJUGATE POINTS : C:\pic23\conj.out
FILE WITH MATCHED DTM POINTS : C:\pic23\conj.pix
ACTUAL WINDOW SIZE : 7
MAX. NUMBER OF ITERATIONS : 10
ROWSTEP, COLSTEP : 2 2
PERCENTAGE FOR RADIOM. NORMALIZATION : 10.000
SHIFT BOUND FOR CHANGES OF UNKNOWNNS : 0.050
SCALE BOUND FOR CHANGES OF UNKNOWNNS : 0.010
SHEAR BOUND FOR CHANGES OF UNKNOWNNS : 0.010
ACCEPTANCE BOUND CORREL. COEF. : 0.700
ACCEPTANCE BOUND FOR ERROR ELLIPSE : 5.000
MAX. DIFFERENCE TO INITIAL VALUES : 20.000
UPPER BOUND FOR CORREL. COEFF. : 1.100
MIN / MAX BOUND FOR SCALE-PARA. A1 : 0.3000 3.0000
MIN / MAX BOUND FOR SCALE-PARA. B2 : 0.3000 3.0000
MIN / MAX BOUND FOR SHEARE-PARA. A2 : -1.0000 1.0000
MIN / MAX BOUND FOR SHEARE-PARA. B1 : -1.0000 1.0000
RADIOMETRIC NORMALIZATION (Y/N) : Y
REGION GROWING DESIRED (Y/N) : Y
TRANSFER POINTS AVAILABLE (Y/N) : N

CURRENT DATE : 19.06.2000
CURRENT TIME : 12:41:41

```

## SEED POINTS IN THE GLOBAL IMAGE SYSTEM

```

-----
PNR      ROW_L    COL_L    ROW_R    COL_R
2023     75.53    182.97   1050.50   221.17
2021    939.53    279.07   1828.57   321.64
2022    537.53    244.13   1461.64   283.64
2001   1061.61   2843.46   1954.50   2793.08
2002    441.67   2862.26   1383.33   2817.26
2003     1.86   2832.00    946.46   2793.04
3001   1034.40    421.60   1858.40    459.40
3002    506.40    374.60   1373.40    405.40
3004    422.40    450.40   1297.20    478.40
3005    469.60    415.40   1337.40    445.20
3006    201.60    354.40   1090.40    383.60
3009    903.60    824.40   1724.40    848.40
3010    949.40    824.40   1770.40    848.40
3011   1135.40    872.40   1952.40    897.60
3012    481.40    992.60   1357.40   1005.40
3013    427.60    756.60   1299.60    775.40
3014    697.40    793.60   1556.40    815.40
3016    176.40   1115.60   1075.60   1121.40
3017    141.40    913.40   1043.40    923.40
3018    328.40   1227.40   1211.60   1232.40
3019    302.40   1393.60   1171.40   1394.60
3020    363.40   1455.40   1249.40   1454.40
3021     88.20   1387.60    966.40   1386.60
3022    822.00   1414.40   1657.40   1417.00

```

3023	813.60	1452.60	1659.60	1453.60
3026	575.60	1436.40	1429.40	1437.40
3027	826.60	1151.60	1670.40	1163.80
3028	883.60	1120.40	1724.40	1134.60
3029	1130.40	1449.60	1950.60	1451.60
3031	1135.40	1199.40	1952.60	1211.40
3032	178.60	1751.40	1051.40	1744.60
3034	214.40	1790.40	1089.60	1781.60
3035	445.20	1802.40	1299.40	1792.60
3037	286.40	2080.40	1148.40	2065.40
3039	316.40	2051.40	1182.40	2036.60
3040	44.40	2035.60	943.40	2022.60
3041	74.60	1891.60	981.40	1881.60
3042	536.60	2198.60	1406.40	2176.60
3043	873.40	2433.60	1705.40	2400.40
3045	801.60	2290.40	1650.40	2261.40
3046	640.60	2114.40	1474.40	2094.40
3047	781.60	2028.60	1634.60	2008.60
3049	926.40	2310.60	1759.60	2279.60
3050	852.60	1762.60	1692.60	1750.60
3051	891.20	1739.40	1728.20	1729.40
3052	1159.60	1965.40	1972.60	1945.40
3053	1122.40	2668.60	1941.20	2626.40
3054	1146.40	2325.40	1961.40	2292.60
3055	130.40	2568.40	1030.60	2540.80

## SEED POINTS IN THE LOCAL IMAGE SYSTEM

PNR	ROW_L	COL_L	ROW_R	COL_R
2023	75.53	156.97	514.50	188.17
2021	939.53	253.07	1292.57	288.64
2022	537.53	218.13	925.64	250.64
2001	1061.61	2817.46	1418.50	2760.08
2002	441.67	2836.26	847.33	2784.26
2003	1.86	2806.00	410.46	2760.04
3001	1034.40	395.60	1322.40	426.40
3002	506.40	348.60	837.40	372.40
3004	422.40	424.40	761.20	445.40
3005	469.60	389.40	801.40	412.20
3006	201.60	328.40	554.40	350.60
3009	903.60	798.40	1188.40	815.40
3010	949.40	798.40	1234.40	815.40
3011	1135.40	846.40	1416.40	864.60
3012	481.40	966.60	821.40	972.40
3013	427.60	730.60	763.60	742.40
3014	697.40	767.60	1020.40	782.40
3016	176.40	1089.60	539.60	1088.40
3017	141.40	887.40	507.40	890.40
3018	328.40	1201.40	675.60	1199.40
3019	302.40	1367.60	635.40	1361.60
3020	363.40	1429.40	713.40	1421.40
3021	88.20	1361.60	430.40	1353.60
3022	822.00	1388.40	1121.40	1384.00
3023	813.60	1426.60	1123.60	1420.60
3026	575.60	1410.40	893.40	1404.40
3027	826.60	1125.60	1134.40	1130.80
3028	883.60	1094.40	1188.40	1101.60
3029	1130.40	1423.60	1414.60	1418.60
3031	1135.40	1173.40	1416.60	1178.40
3032	178.60	1725.40	515.40	1711.60
3034	214.40	1764.40	553.60	1748.60
3035	445.20	1776.40	763.40	1759.60
3037	286.40	2054.40	612.40	2032.40
3039	316.40	2025.40	646.40	2003.60
3040	44.40	2009.60	407.40	1989.60
3041	74.60	1865.60	445.40	1848.60
3042	536.60	2172.60	870.40	2143.60
3043	873.40	2407.60	1169.40	2367.40
3045	801.60	2264.40	1114.40	2228.40
3046	640.60	2088.40	938.40	2061.40
3047	781.60	2002.60	1098.60	1975.60
3049	926.40	2284.60	1223.60	2246.60
3050	852.60	1736.60	1156.60	1717.60
3051	891.20	1713.40	1192.20	1696.40

3052	1159.60	1939.40	1436.60	1912.40
3053	1122.40	2642.60	1405.20	2593.40
3054	1146.40	2299.40	1425.40	2259.60
3055	130.40	2542.40	494.60	2507.80

```

SEED POINT NO.      2003 OUT OF IMAGE NO.  1
SEEDPOINT NO.      3005 COULD NOT BE MATCHED
SEEDPOINT NO.      3019 COULD NOT BE MATCHED
SEEDPOINT NO.      3034 WAS MATCHED INCORRECTLY

```

```

NO MORE POINTS WITH SUFFICIENT RHO
MAX. RHO =  -1.500000

```

```

MATCHING PROCEDURE STOPPED

```

```

-----
*                               *
*   O V E R A L L   R E S U L T S   *
*                               *
-----

```

```

19 mm, bild2 und bild3, 13.06.2000
Jose's dritter Versuch, pic23

```

```

NO. OF SEED POINTS AVAILABLE      :      49
NO. OF TRANSFER POINTS AVAILABLE  :      0
TRANSFER PTS. OVERRIDDEN BY SEED PTS. :      0
NO. OF POINTS ATTEMPTED TO MATCH : 415474
NO. OF POINTS, THAT CONVERGED     : 390612
NO. OF POINTS MATCHED CORRECTLY   : 348810
NO. OF ERRORS (NO OR INCORRECT MATCH) : 66664

NO. OF POINTS NOT MATCHED        : 24862
NO. OF SEED POINTS OUT OF SCENE 1 :      1
NO. OF SEED POINTS OUT OF SCENE 2 :      0
TRANSFER POINT OUT OF SCENE 2    :      0
BOUNDARY PROBLEMS IN ADJ. ITERATIONS :      81
INITIAL VALUE OF RHO TOO SMALL   :      0
SINGULARITY PROBLEMS IN ADJUSTMENT :      0
MAX. NUMBER OF ITERATIONS EXCEEDED : 24780

NO. OF POINTS MATCHED INCORRECTLY : 41802
ERROR 1: RHO TOO SMALL            : 39730
ERROR 2: AX OF ERROR ELLIPSE TOO LARGE :      0
ERROR 3: DIFF. TO INIIAL VAL. TOO LARGE:      0
ERROR 4: A1 TOO SMALL             :      0
ERROR 5: A1 TOO LARGE             :      0
ERROR 6: B2 TOO SMALL             : 1706
ERROR 7: B2 TOO LARGE             :      4
ERROR 8: A2 TOO SMALL             : 724
ERROR 9: A2 TOO LARGE             : 971
ERROR10: B1 TOO SMALL             :      0
ERROR11: B1 TOO LARGE            :      0
ERROR 1 ONLY                      : 39730
ERROR 2 ONLY                      :      0
ERROR 3 ONLY                      :      0
ERROR 1 AND 2                     :      0
ERROR 1 AND 3                     :      0
ERROR 2 AND 3                     :      0
ERROR 1, 2 AND 3                  :      0

```

```

CONVERGENCE CRITERIA
-----

```

```

CRIT  1: ALL UNKNOWNNS < BOUNDARY : 352570
CRIT  2: SWINGING RESULTS          : 38042
CRIT  3: RHO > RHO-BOUNDARY      :      0

```

```

CRIT   4: LTL > VTV           :           0
CRIT   5: VTV(OLD) < VTV      :           0
CRIT   6: MAX. NO. OF ITER. EXCEEDED :    24780

```

HISTOGRAMS OF ALL POINTS, THAT CONVERGED

-----

```

NUMBER OF POINTS IN EACH HISTOGRAM      :    390612

```

CORRELATION COEFFICIENT

```

NO. OF POINTS WITH      RHO > 0.95 :    46818
NO. OF POINTS WITH 0.90 < RHO < 0.95 :   128030
NO. OF POINTS WITH 0.85 < RHO < 0.90 :   89576
NO. OF POINTS WITH 0.80 < RHO < 0.85 :   46875
NO. OF POINTS WITH 0.75 < RHO < 0.80 :   24365
NO. OF POINTS WITH 0.70 < RHO < 0.75 :   15218
NO. OF POINTS WITH 0.65 < RHO < 0.70 :   13998
NO. OF POINTS WITH 0.60 < RHO < 0.65 :    8832
NO. OF POINTS WITH 0.55 < RHO < 0.60 :    5353
NO. OF POINTS WITH 0.50 < RHO < 0.55 :    3410
NO. OF POINTS WITH 0.45 < RHO < 0.50 :    2334
NO. OF POINTS WITH 0.40 < RHO < 0.45 :    1618
NO. OF POINTS WITH 0.35 < RHO < 0.40 :    1199
NO. OF POINTS WITH 0.30 < RHO < 0.35 :     859
NO. OF POINTS WITH 0.25 < RHO < 0.30 :     570
NO. OF POINTS WITH 0.20 < RHO < 0.25 :     452
NO. OF POINTS WITH 0.15 < RHO < 0.20 :     333
NO. OF POINTS WITH 0.10 < RHO < 0.15 :     213
NO. OF POINTS WITH 0.05 < RHO < 0.10 :     165
NO. OF POINTS WITH 0.00 < RHO < 0.05 :     114
NO. OF POINTS WITH      RHO < 0.00 :     280

```

LARGE EIGENVALUE OF INVERTED NGL MATRIX

```

NO. OF POINTS WITH      EV < 0.01 :   388117
NO. OF POINTS WITH 0.01 < EV < 0.02 :    1545
NO. OF POINTS WITH 0.02 < EV < 0.03 :     458
NO. OF POINTS WITH 0.03 < EV < 0.04 :     191
NO. OF POINTS WITH 0.04 < EV < 0.05 :     109
NO. OF POINTS WITH 0.05 < EV < 0.06 :      60
NO. OF POINTS WITH 0.06 < EV < 0.07 :      34
NO. OF POINTS WITH 0.07 < EV < 0.08 :      27
NO. OF POINTS WITH 0.08 < EV < 0.09 :      18
NO. OF POINTS WITH 0.09 < EV < 0.10 :       9
NO. OF POINTS WITH      EV > 0.10 :      44

```

DIFFERENCE TO INITIAL VALUES

```

NO. OF POINTS WITH      DIF < 0.05 :   26976
NO. OF POINTS WITH 0.05 < DIF < 0.10 :   54668
NO. OF POINTS WITH 0.10 < DIF < 0.20 :  117245
NO. OF POINTS WITH 0.20 < DIF < 0.30 :   78722
NO. OF POINTS WITH 0.30 < DIF < 0.40 :   44795
NO. OF POINTS WITH 0.40 < DIF < 0.50 :   25220
NO. OF POINTS WITH 0.50 < DIF < 0.60 :   14793
NO. OF POINTS WITH 0.60 < DIF < 0.70 :    8986
NO. OF POINTS WITH 0.70 < DIF < 0.80 :    5597
NO. OF POINTS WITH 0.80 < DIF < 0.90 :    3687
NO. OF POINTS WITH 0.90 < DIF < 1.00 :    2545
NO. OF POINTS WITH 1.00 < DIF < 1.50 :    5210
NO. OF POINTS WITH 1.50 < DIF < 2.00 :    1349
NO. OF POINTS WITH 2.00 < DIF < 3.00 :     654
NO. OF POINTS WITH      DIF > 3.00 :     165

```

SIGN OF DIFF. TO INITIAL VALUES, ROW

```

NO. OF POINTS WITH NEG. ROWDIF      :   188095
NO. OF POINTS WITH ROWDIF EQ. ZERO   :        77
NO. OF POINTS WITH POS. ROWDIF      :   202440

```

SIGN OF DIFF. TO INITIAL VALUES, COL

```

NO. OF POINTS WITH NEG. COLDIF      :   194998
NO. OF POINTS WITH COLDIF EQ. ZERO   :        201
NO. OF POINTS WITH POS. COLDIF      :   195413

```

ITERATIONS

NO. OF POINTS WITH	1 ITERATION	:	4263
NO. OF POINTS WITH	2 ITERATIONS	:	108677
NO. OF POINTS WITH	3 ITERATIONS	:	131619
NO. OF POINTS WITH	4 ITERATIONS	:	71397
NO. OF POINTS WITH	5 ITERATIONS	:	34250
NO. OF POINTS WITH	6 ITERATIONS	:	19839
NO. OF POINTS WITH	7 ITERATIONS	:	10099
NO. OF POINTS WITH	8 ITERATIONS	:	5477
NO. OF POINTS WITH	9 ITERATIONS	:	3138
NO. OF POINTS WITH	10 ITERATIONS	:	1853
AVERAGE NUMBER OF ITERATIONS		:	3.5

SIGMA0				
0.00	SIGMA0	< 0.50	:	1
0.50	SIGMA0	< 1.00	:	366
1.00	SIGMA0	< 1.50	:	1058
1.50	SIGMA0	< 2.00	:	11884
2.00	SIGMA0	< 2.50	:	32819
2.50	SIGMA0	< 3.00	:	41420
3.00	SIGMA0	< 5.00	:	203594
5.00	SIGMA0	< 10.00	:	95206
SIGMA0		> 10.00	:	4264

## TRANSFORMATION PARAMETERS

DELROW, DELCOL				
DELROW, DELCOL	< -2.00		221	72
-2.00	DELROW, DELCOL	< -1.50	389	152
-1.50	DELROW, DELCOL	< -1.00	1514	679
-1.00	DELROW, DELCOL	< -0.50	11725	4401
-0.50	DELROW, DELCOL	< -0.30	22851	10928
-0.30	DELROW, DELCOL	< -0.20	26905	18180
-0.20	DELROW, DELCOL	< -0.10	47869	49047
-0.10	DELROW, DELCOL	< -0.05	34523	47229
-0.05	DELROW, DELCOL	< 0.05	85255	128714
0.05	DELROW, DELCOL	< 0.10	35900	46840
0.10	DELROW, DELCOL	< 0.20	51596	49230
0.20	DELROW, DELCOL	< 0.30	29956	18517
0.30	DELROW, DELCOL	< 0.50	26092	11153
0.50	DELROW, DELCOL	< 1.00	13256	4539
1.00	DELROW, DELCOL	< 1.50	1807	650
1.50	DELROW, DELCOL	< 2.00	475	185
DELROW, DELCOL	> 2.00		278	96

A1, B2				
A1, B2	< 0.10		0	594
0.10	< A1, B2	< 0.30	0	1112
0.30	< A1, B2	< 0.50	0	2768
0.50	< A1, B2	< 0.70	0	6714
0.70	< A1, B2	< 0.90	0	65009
0.90	< A1, B2	< 1.10	390612	300586
1.10	< A1, B2	< 1.30	0	11317
1.30	< A1, B2	< 1.50	0	1643
1.50	< A1, B2	< 1.70	0	521
1.70	< A1, B2	< 1.90	0	189
1.90	< A1, B2	< 2.10	0	93
A1, B2	> 2.10		0	66

A2, B1				
A2, B1	< -0.90		1290	0
-0.90	< A2, B1	< -0.70	3505	0
-0.70	< A2, B1	< -0.50	9944	0
-0.50	< A2, B1	< -0.30	9571	0
-0.30	< A2, B1	< -0.10	49762	0
-0.10	< A2, B1	< 0.10	229249	390612
0.10	< A2, B1	< 0.30	49606	0
0.30	< A2, B1	< 0.50	12580	0
0.50	< A2, B1	< 0.70	17187	0
0.70	< A2, B1	< 0.90	6012	0
0.90	< A2, B1	< 1.10	1539	0
A2, B1	< 1.10		367	0



## HISTOGRAMS OF ALL CORRECTLY MATCHED POINTS

-----  
 NUMBER OF POINTS IN EACH HISTOGRAM : 348810

## CORRELATION COEFFICIENT

NO. OF POINTS WITH	RHO > 0.95 :	46353
NO. OF POINTS WITH	0.90 < RHO < 0.95 :	127631
NO. OF POINTS WITH	0.85 < RHO < 0.90 :	89247
NO. OF POINTS WITH	0.80 < RHO < 0.85 :	46541
NO. OF POINTS WITH	0.75 < RHO < 0.80 :	24062
NO. OF POINTS WITH	0.70 < RHO < 0.75 :	14976
NO. OF POINTS WITH	0.65 < RHO < 0.70 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.60 < RHO < 0.65 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.55 < RHO < 0.60 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.50 < RHO < 0.55 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.45 < RHO < 0.50 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.40 < RHO < 0.45 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.35 < RHO < 0.40 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.30 < RHO < 0.35 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.25 < RHO < 0.30 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.20 < RHO < 0.25 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.15 < RHO < 0.20 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.10 < RHO < 0.15 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.05 < RHO < 0.10 :	0
NO. OF POINTS WITH	0.00 < RHO < 0.05 :	0
NO. OF POINTS WITH	RHO < 0.00 :	0

## LARGE EIGENVALUE OF INVERTED NGL MATRIX

NO. OF POINTS WITH	EV < 0.01 :	347302
NO. OF POINTS WITH	0.01 < EV < 0.02 :	921
NO. OF POINTS WITH	0.02 < EV < 0.03 :	291
NO. OF POINTS WITH	0.03 < EV < 0.04 :	117
NO. OF POINTS WITH	0.04 < EV < 0.05 :	68
NO. OF POINTS WITH	0.05 < EV < 0.06 :	34
NO. OF POINTS WITH	0.06 < EV < 0.07 :	20
NO. OF POINTS WITH	0.07 < EV < 0.08 :	17
NO. OF POINTS WITH	0.08 < EV < 0.09 :	9
NO. OF POINTS WITH	0.09 < EV < 0.10 :	5
NO. OF POINTS WITH	EV > 0.10 :	26

## DIFFERENCE TO INITIAL VALUES

NO. OF POINTS WITH	DIF < 0.05 :	24820
NO. OF POINTS WITH	0.05 < DIF < 0.10 :	50629
NO. OF POINTS WITH	0.10 < DIF < 0.20 :	107597
NO. OF POINTS WITH	0.20 < DIF < 0.30 :	70777
NO. OF POINTS WITH	0.30 < DIF < 0.40 :	39601
NO. OF POINTS WITH	0.40 < DIF < 0.50 :	21744
NO. OF POINTS WITH	0.50 < DIF < 0.60 :	12480
NO. OF POINTS WITH	0.60 < DIF < 0.70 :	7314
NO. OF POINTS WITH	0.70 < DIF < 0.80 :	4360
NO. OF POINTS WITH	0.80 < DIF < 0.90 :	2730
NO. OF POINTS WITH	0.90 < DIF < 1.00 :	1846
NO. OF POINTS WITH	1.00 < DIF < 1.50 :	3557
NO. OF POINTS WITH	1.50 < DIF < 2.00 :	894
NO. OF POINTS WITH	2.00 < DIF < 3.00 :	398
NO. OF POINTS WITH	DIF > 3.00 :	63

## SIGN OF DIFF. TO INITIAL VALUES, ROW

NO. OF POINTS WITH NEG. ROWDIF	:	167561
NO. OF POINTS WITH ROWDIF EQ. ZERO	:	72
NO. OF POINTS WITH POS. ROWDIF	:	181177

## SIGN OF DIFF. TO INITIAL VALUES, COL

NO. OF POINTS WITH NEG. COLDIF	:	174199
NO. OF POINTS WITH COLDIF EQ. ZERO	:	184
NO. OF POINTS WITH POS. COLDIF	:	174427

## ITERATIONS

NO. OF POINTS WITH	1 ITERATION	:	3838
NO. OF POINTS WITH	2 ITERATIONS	:	102270
NO. OF POINTS WITH	3 ITERATIONS	:	119624
NO. OF POINTS WITH	4 ITERATIONS	:	62630
NO. OF POINTS WITH	5 ITERATIONS	:	28804

NO. OF POINTS WITH	6 ITERATIONS	:	16298
NO. OF POINTS WITH	7 ITERATIONS	:	7875
NO. OF POINTS WITH	8 ITERATIONS	:	4089
NO. OF POINTS WITH	9 ITERATIONS	:	2165
NO. OF POINTS WITH	10 ITERATIONS	:	1217
AVERAGE NUMBER OF ITERATIONS		:	3.4

SIGMA0			
0.00	SIGMA0	< 0.50	: 0
0.50	SIGMA0	< 1.00	: 235
1.00	SIGMA0	< 1.50	: 768
1.50	SIGMA0	< 2.00	: 9080
2.00	SIGMA0	< 2.50	: 27096
2.50	SIGMA0	< 3.00	: 37417
3.00	SIGMA0	< 5.00	: 192541
5.00	SIGMA0	< 10.00	: 79802
SIGMA0		> 10.00	: 1871

## TRANSFORMATION PARAMETERS

DELROW, DELCOL			
DELROW, DELCOL	< -2.00	121	34
-2.00	DELROW, DELCOL	< -1.50	257 93
-1.50	DELROW, DELCOL	< -1.00	1090 417
-1.00	DELROW, DELCOL	< -0.50	9445 3156
-0.50	DELROW, DELCOL	< -0.30	20018 8845
-0.30	DELROW, DELCOL	< -0.20	24009 15587
-0.20	DELROW, DELCOL	< -0.10	43148 43726
-0.10	DELROW, DELCOL	< -0.05	31267 43146
-0.05	DELROW, DELCOL	< 0.05	77326 118549
0.05	DELROW, DELCOL	< 0.10	32618 42802
0.10	DELROW, DELCOL	< 0.20	46764 43892
0.20	DELROW, DELCOL	< 0.30	27089 15805
0.30	DELROW, DELCOL	< 0.50	23121 8965
0.50	DELROW, DELCOL	< 1.00	10856 3183
1.00	DELROW, DELCOL	< 1.50	1223 445
1.50	DELROW, DELCOL	< 2.00	301 113
DELROW, DELCOL	> 2.00	157	52

A1, B2			
A1, B2	< 0.10	0	0
0.10	< A1, B2	< 0.30	0 0
0.30	< A1, B2	< 0.50	0 1587
0.50	< A1, B2	< 0.70	0 4104
0.70	< A1, B2	< 0.90	0 54941
0.90	< A1, B2	< 1.10	348810 277912
1.10	< A1, B2	< 1.30	0 8683
1.30	< A1, B2	< 1.50	0 1053
1.50	< A1, B2	< 1.70	0 316
1.70	< A1, B2	< 1.90	0 116
1.90	< A1, B2	< 2.10	0 60
A1, B2	> 2.10	0	38

A2, B1			
A2, B1	< -0.90	364	0
-0.90	< A2, B1	< -0.70	2392 0
-0.70	< A2, B1	< -0.50	7307 0
-0.50	< A2, B1	< -0.30	7332 0
-0.30	< A2, B1	< -0.10	44955 0
-0.10	< A2, B1	< 0.10	214912 348810
0.10	< A2, B1	< 0.30	44482 0
0.30	< A2, B1	< 0.50	9365 0
0.50	< A2, B1	< 0.70	12973 0
0.70	< A2, B1	< 0.90	4131 0
0.90	< A2, B1	< 1.10	597 0
A2, B1	< 1.10	0	0

## STATISTICS OF OUTLIS

MAX. NUMBER OF POINTS ON OUTLIS	:	64830
NO. OF POINTS CANCELLED FROM OUTLIS	:	348765

CURRENT DATE : 19.06.2000  
CURRENT TIME : 13:26:18

\*\*\* SUCCESSFUL PROGRAM TERMINATION \*\*\*

**Auszug aus der Ausgabe-Datei „conj.out“**

Bedeutung der Zahlenwerte pro Zeile: Pkt.Nr., Code,  $row_{links}$ ,  $col_{links}$ ,  $row_{rechts}$ ,  $col_{rechts}$ ,  
Korrelationskoeffizient,  $\Sigma_x$ ,  $\Sigma_y$ ,  $\Sigma_{xy}$ , Eigenwert, Matching-Code

Die Pkt.Nr. eines homologen Punktes wird automatisch berechnet durch:

$$(\text{Matching} - \text{Code} \cdot 10000000) + (row_{links} \cdot 10000) + col_{links} \cdot$$

Der Matching-Code beschreibt die Punktart:

Code 0 normal gematchter Punkt

Code 2 Startpunkt.

2023	2	75.53	182.97	1050.49	221.56	0.990	0.037	0.036	0.000	0.000	1
100750185	0	75.00	185.00	1050.06	223.44	0.985	0.036	0.032	0.000	0.000	1
100720182	0	72.00	182.00	1047.08	220.77	0.998	0.027	0.047	0.000	0.000	1
100750179	0	75.00	179.00	1049.92	217.81	0.998	0.044	0.018	0.000	0.000	1
100780182	0	78.00	182.00	1052.82	220.71	0.987	0.034	0.026	0.000	0.000	1
2021	2	939.53	279.07	1828.59	321.71	0.995	0.022	0.020	0.000	0.000	1
109390281	0	939.00	281.00	1828.17	323.50	0.987	0.041	0.038	0.000	0.000	1
109360278	0	936.00	278.00	1824.94	320.75	0.999	0.050	0.074	-0.001	0.000	1
109390275	0	939.00	275.00	1827.85	317.70	0.998	0.090	0.030	0.000	0.000	1
109420278	0	942.00	278.00	1830.89	320.70	0.991	0.035	0.028	0.000	0.000	1
2022	2	537.53	244.13	1461.55	283.57	0.993	0.021	0.020	0.000	0.000	1
105370248	0	537.00	248.00	1461.28	287.20	0.994	0.032	0.025	0.000	0.000	1
105340245	0	534.00	245.00	1458.14	284.22	0.998	0.022	0.068	0.000	0.000	1
105370242	0	537.00	242.00	1460.98	281.55	0.996	0.039	0.024	0.000	0.000	1
105400245	0	540.00	245.00	1463.97	284.41	0.988	0.028	0.029	0.000	0.000	1
2001	2	1061.61	2843.46	1954.49	2793.36	0.987	0.034	0.035	0.000	0.000	1
110622846	0	1062.00	2846.00	1954.79	2795.69	0.987	0.037	0.033	0.000	0.000	1
110592843	0	1059.00	2843.00	1951.99	2792.91	0.995	0.030	0.040	0.000	0.000	1
110622840	0	1062.00	2840.00	1955.03	2789.96	0.996	0.053	0.025	0.000	0.000	1
110652843	0	1065.00	2843.00	1957.67	2792.91	0.980	0.048	0.058	0.000	0.000	1
2002	2	441.67	2862.26	1383.75	2817.23	0.994	0.023	0.024	0.000	0.000	1
104412864	0	441.00	2864.00	1383.07	2818.91	0.993	0.023	0.022	0.000	0.000	1
104382861	0	438.00	2861.00	1380.36	2815.97	0.997	0.051	0.067	0.000	0.000	1
104412858	0	441.00	2858.00	1383.29	2813.18	0.998	0.072	0.021	0.000	0.000	1
104442861	0	444.00	2861.00	1386.07	2816.02	0.996	0.020	0.018	0.000	0.000	1
3001	2	1034.40	421.60	1859.82	459.00	0.713	0.138	0.285	0.002	0.003	1
110350419	0	1035.00	419.00	1859.18	453.67	0.756	0.174	0.335	0.002	0.001	1
3002	2	506.40	374.60	1373.65	405.94	0.862	0.089	0.091	0.000	0.001	1
105070377	0	507.00	377.00	1374.08	408.51	0.923	0.076	0.074	0.000	0.001	1
105040374	0	504.00	374.00	1371.50	405.78	0.957	0.052	0.065	0.000	0.001	1
105070371	0	507.00	371.00	1374.30	402.97	0.892	0.074	0.097	0.001	0.001	1
105100374	0	510.00	374.00	1377.15	405.69	0.952	0.077	0.092	0.001	0.001	1
3004	2	422.40	450.40	1298.65	478.50	0.904	0.173	0.100	-0.002	0.001	1
104230452	0	423.00	452.00	1298.23	480.11	0.950	0.122	0.069	0.000	0.001	1
104260449	0	426.00	449.00	1302.73	477.14	0.793	0.229	0.170	-0.003	0.001	1
104680416	0	468.00	416.00	1336.01	446.34	0.932	0.104	0.182	-0.002	0.001	1
104710413	0	471.00	413.00	1339.36	442.71	0.953	0.092	0.134	-0.001	0.001	1
3006	2	201.60	354.40	1090.42	383.51	0.952	0.121	0.071	0.002	0.002	1
102010356	0	201.00	356.00	1089.76	385.18	0.907	0.146	0.085	0.001	0.001	1
101980353	0	198.00	353.00	1086.64	382.30	0.951	0.209	0.120	0.004	0.003	1
3009	2	903.60	824.40	1724.96	848.02	0.972	0.095	0.055	0.000	0.004	1
109030827	0	903.00	827.00	1725.40	850.24	0.794	0.206	0.150	0.000	0.006	1
109000824	0	900.00	824.00	1721.32	847.97	0.895	0.157	0.087	0.002	0.003	1
109060824	0	906.00	824.00	1726.97	847.55	0.900	0.184	0.090	0.000	0.007	1
3010	2	949.40	824.40	1770.32	848.61	0.904	0.105	0.086	0.000	0.001	1
109480827	0	948.00	827.00	1768.42	851.28	0.920	0.071	0.061	0.000	0.000	1
109450824	0	945.00	824.00	1765.49	848.04	0.955	0.093	0.096	0.000	0.001	1
109480821	0	948.00	821.00	1770.06	845.07	0.853	0.189	0.140	0.000	0.001	1
109510824	0	951.00	824.00	1771.91	848.19	0.870	0.173	0.115	0.001	0.001	1
3011	2	1135.40	872.40	1952.17	897.34	0.980	0.061	0.095	0.000	0.001	1
111310872	0	1131.00	872.00	1947.82	897.28	0.903	0.116	0.093	0.000	0.001	1
111340869	0	1134.00	869.00	1950.65	894.03	0.960	0.086	0.123	0.001	0.001	1

111370872	0	1137.00	872.00	1953.39	897.08	0.951	0.077	0.126	0.000	0.001	1
3012	2	481.40	992.60	1356.72	1005.14	0.971	0.090	0.091	0.001	0.001	1
104800995	0	480.00	995.00	1356.29	1008.25	0.956	0.093	0.170	0.001	0.001	1
104770992	0	477.00	992.00	1352.78	1005.39	0.874	0.242	0.183	0.001	0.001	1
104830992	0	483.00	992.00	1357.62	1004.09	0.887	0.123	0.185	0.002	0.001	1
3013	2	427.60	756.60	1299.47	775.43	0.984	0.043	0.046	0.000	0.001	1
104290761	0	429.00	761.00	1300.32	779.88	0.882	0.169	0.114	0.000	0.001	1
104260758	0	426.00	758.00	1297.73	776.67	0.905	0.096	0.077	0.000	0.000	1
104290755	0	429.00	755.00	1301.11	773.87	0.942	0.095	0.076	0.000	0.001	1
3014	2	697.40	793.60	1556.44	815.03	0.833	0.149	0.105	-0.001	0.000	1
106960797	0	696.00	797.00	1555.76	816.82	0.765	0.145	0.106	-0.001	0.000	1
106960791	0	696.00	791.00	1553.15	813.37	0.835	0.137	0.170	0.000	0.001	1
106990794	0	699.00	794.00	1557.45	815.57	0.737	0.198	0.115	-0.001	0.000	1
3016	2	176.40	1115.60	1075.53	1122.41	0.801	0.195	0.098	0.000	0.000	1
101771118	0	177.00	1118.00	1075.81	1123.84	0.866	0.113	0.113	0.000	0.000	1
101801115	0	180.00	1115.00	1080.07	1122.46	0.898	0.146	0.064	0.000	0.000	1
3017	2	141.40	913.40	1043.56	923.83	0.978	0.052	0.049	-0.001	0.001	1
101410917	0	141.00	917.00	1043.22	927.38	0.969	0.084	0.056	0.000	0.000	1
101380914	0	138.00	914.00	1040.11	924.40	0.962	0.105	0.071	-0.001	0.001	1
101410911	0	141.00	911.00	1043.24	921.40	0.978	0.058	0.055	-0.001	0.000	1
101440914	0	144.00	914.00	1046.06	924.57	0.953	0.073	0.056	0.000	0.000	1
3018	2	328.40	1227.40	1211.75	1232.27	0.868	0.103	0.090	0.000	0.000	1
103271229	0	327.00	1229.00	1210.90	1233.67	0.920	0.093	0.076	0.000	0.000	1
103031397	0	303.00	1397.00	1172.66	1397.53	0.971	0.112	0.068	0.002	0.001	1
103001394	0	300.00	1394.00	1169.60	1393.99	0.966	0.117	0.125	0.003	0.002	1
103031391	0	303.00	1391.00	1172.37	1391.40	0.975	0.077	0.131	0.002	0.001	1
103061394	0	306.00	1394.00	1175.39	1394.58	0.979	0.081	0.070	0.000	0.001	1
3020	2	363.40	1455.40	1249.78	1454.66	0.979	0.052	0.039	0.000	0.000	1
103631457	0	363.00	1457.00	1249.33	1456.29	0.966	0.081	0.066	-0.001	0.000	1
103601454	0	360.00	1454.00	1246.87	1453.22	0.964	0.042	0.037	0.000	0.000	1
103631451	0	363.00	1451.00	1249.73	1450.42	0.885	0.059	0.066	0.000	0.000	1
103661454	0	366.00	1454.00	1252.13	1453.30	0.957	0.071	0.045	0.000	0.000	1
3021	2	88.20	1387.60	966.24	1386.75	0.928	0.068	0.093	0.000	0.001	1
100871391	0	87.00	1391.00	964.74	1389.91	0.902	0.109	0.158	0.002	0.002	1
100841388	0	84.00	1388.00	962.00	1387.41	0.709	0.118	0.114	0.001	0.003	1
100871385	0	87.00	1385.00	965.07	1384.38	0.917	0.103	0.100	0.000	0.002	1
100901388	0	90.00	1388.00	968.00	1387.42	0.862	0.099	0.108	0.000	0.001	1
3022	2	822.00	1414.40	1657.37	1416.60	0.990	0.054	0.060	0.000	0.001	1
108221418	0	822.00	1418.00	1657.80	1420.28	0.985	0.084	0.067	0.000	0.001	1
108191415	0	819.00	1415.00	1654.14	1417.32	0.989	0.131	0.046	0.000	0.002	1
108221412	0	822.00	1412.00	1657.26	1414.37	0.973	0.079	0.082	0.001	0.001	1
108251415	0	825.00	1415.00	1660.36	1417.33	0.992	0.061	0.057	-0.001	0.001	1
3023	2	813.60	1452.60	1659.48	1453.51	0.967	0.077	0.037	0.000	0.000	1
108131457	0	813.00	1457.00	1660.57	1457.68	0.879	0.097	0.053	0.000	0.000	1
108101454	0	810.00	1454.00	1655.40	1454.75	0.904	0.178	0.114	-0.001	0.000	1
108131451	0	813.00	1451.00	1659.31	1451.84	0.950	0.125	0.089	0.000	0.000	1
108161454	0	816.00	1454.00	1662.37	1454.97	0.938	0.109	0.074	0.000	0.000	1
3026	2	575.60	1436.40	1429.78	1437.20	0.870	0.094	0.061	0.000	0.000	1
105761439	0	576.00	1439.00	1430.67	1440.08	0.832	0.110	0.078	0.000	0.000	1
105731436	0	573.00	1436.00	1427.20	1436.63	0.929	0.086	0.052	0.000	0.000	1
105761433	0	576.00	1433.00	1430.22	1433.63	0.985	0.103	0.038	0.000	0.001	1
3027	2	826.60	1151.60	1670.41	1163.64	0.983	0.056	0.039	0.000	0.000	1
108281154	0	828.00	1154.00	1671.95	1166.05	0.989	0.093	0.047	0.000	0.000	1
108251151	0	825.00	1151.00	1668.98	1163.17	0.942	0.080	0.061	0.000	0.000	1
108281148	0	828.00	1148.00	1671.70	1160.05	0.963	0.068	0.060	0.000	0.000	1
108311151	0	831.00	1151.00	1674.65	1163.02	0.945	0.069	0.061	0.000	0.000	1
3028	2	883.60	1120.40	1724.26	1134.52	0.983	0.162	0.055	0.000	0.001	1
108851124	0	885.00	1124.00	1726.21	1137.72	0.970	0.145	0.074	0.001	0.000	1
108821121	0	882.00	1121.00	1722.48	1134.73	0.987	0.130	0.081	0.000	0.001	1
108851118	0	885.00	1118.00	1726.18	1132.41	0.924	0.168	0.056	0.000	0.000	1
3029	2	1130.40	1449.60	1949.84	1451.61	0.905	0.105	0.164	0.000	0.001	1
111311454	0	1131.00	1454.00	1951.35	1456.02	0.983	0.080	0.072	0.000	0.000	1
111341451	0	1134.00	1451.00	1952.94	1452.64	0.964	0.163	0.111	0.000	0.000	1
3031	2	1135.40	1199.40	1952.30	1211.52	0.980	0.060	0.131	0.000	0.001	1
111341202	0	1134.00	1202.00	1951.49	1214.25	0.960	0.087	0.150	-0.001	0.001	1
111311199	0	1131.00	1199.00	1949.18	1211.49	0.790	0.129	0.120	0.000	0.001	1
111341196	0	1134.00	1196.00	1951.06	1208.50	0.929	0.082	0.212	0.001	0.001	1
111371199	0	1137.00	1199.00	1953.54	1211.38	0.942	0.110	0.250	0.000	0.000	1
3032	2	178.60	1751.40	1050.68	1744.22	0.926	0.068	0.079	0.000	0.001	1
101801754	0	180.00	1754.00	1052.23	1746.82	0.946	0.065	0.095	0.000	0.001	1
101771751	0	177.00	1751.00	1049.28	1743.75	0.908	0.101	0.080	0.000	0.001	1
101801748	0	180.00	1748.00	1051.99	1740.77	0.964	0.107	0.088	-0.001	0.001	1
101831751	0	183.00	1751.00	1055.26	1743.68	0.948	0.083	0.085	0.000	0.001	1
102161790	0	216.00	1790.00	1090.77	1780.29	0.812	0.130	0.128	-0.001	0.000	1

3035	2	445.20	1802.40	1299.47	1792.68	0.963	0.090	0.070	0.000	0.001	1
104441805	0	444.00	1805.00	1298.42	1795.47	0.922	0.086	0.077	-0.001	0.000	1
104411802	0	441.00	1802.00	1295.66	1792.39	0.881	0.076	0.066	-0.001	0.001	1
104441799	0	444.00	1799.00	1298.30	1789.43	0.952	0.108	0.104	0.001	0.001	1
104471802	0	447.00	1802.00	1301.28	1792.21	0.969	0.105	0.082	0.001	0.001	1
3037	2	286.40	2080.40	1149.09	2065.75	0.935	0.082	0.116	0.001	0.001	1
102852084	0	285.00	2084.00	1148.02	2069.33	0.894	0.091	0.146	0.001	0.001	1
102822081	0	282.00	2081.00	1145.38	2066.38	0.923	0.139	0.169	-0.005	0.004	1
102852078	0	285.00	2078.00	1147.51	2063.56	0.872	0.110	0.161	0.000	0.002	1
102882081	0	288.00	2081.00	1150.51	2065.93	0.956	0.077	0.095	0.001	0.001	1
3039	2	316.40	2051.40	1182.18	2036.52	0.858	0.107	0.101	0.000	0.000	1
103152054	0	315.00	2054.00	1181.93	2039.31	0.837	0.108	0.104	0.000	0.000	1
103122051	0	312.00	2051.00	1179.03	2035.42	0.761	0.141	0.143	0.000	0.000	1
103182051	0	318.00	2051.00	1183.61	2036.35	0.742	0.105	0.100	0.000	0.000	1
3040	2	44.40	2035.60	943.45	2022.80	0.979	0.073	0.087	0.001	0.001	1
100452039	0	45.00	2039.00	944.46	2025.98	0.960	0.091	0.094	0.001	0.000	1
100422036	0	42.00	2036.00	941.51	2023.23	0.958	0.119	0.128	0.002	0.001	1
100482036	0	48.00	2036.00	946.66	2023.61	0.872	0.223	0.219	0.009	0.006	1
3041	2	74.60	1891.60	980.89	1881.56	0.963	0.050	0.050	0.000	0.000	1
100751895	0	75.00	1895.00	981.82	1885.06	0.961	0.065	0.061	0.000	0.000	1
100721892	0	72.00	1892.00	978.30	1881.85	0.950	0.049	0.064	0.000	0.000	1
100751889	0	75.00	1889.00	981.28	1879.11	0.963	0.044	0.053	0.000	0.000	1
100781892	0	78.00	1892.00	984.67	1881.98	0.968	0.064	0.042	0.000	0.000	1
3042	2	536.60	2198.60	1406.77	2176.39	0.985	0.062	0.042	0.000	0.000	1
105372201	0	537.00	2201.00	1408.02	2178.76	0.970	0.150	0.056	0.000	0.001	1
105342198	0	534.00	2198.00	1404.43	2175.79	0.965	0.094	0.106	0.000	0.000	1
105402198	0	540.00	2198.00	1410.14	2175.68	0.980	0.084	0.094	-0.001	0.000	1
3043	2	873.40	2433.60	1705.10	2400.36	0.978	0.056	0.069	0.000	0.000	1
108702435	0	870.00	2435.00	1703.93	2401.40	0.764	0.186	0.265	0.001	0.002	1
108732432	0	873.00	2432.00	1704.54	2398.46	0.984	0.042	0.057	0.000	0.000	1
108762435	0	876.00	2435.00	1707.52	2401.57	0.941	0.056	0.076	0.000	0.001	1
3045	2	801.60	2290.40	1650.62	2261.69	0.984	0.058	0.052	0.000	0.000	1
108012294	0	801.00	2294.00	1650.31	2265.41	0.987	0.167	0.111	0.000	0.002	1
107982291	0	798.00	2291.00	1646.68	2262.27	0.967	0.150	0.072	0.000	0.000	1
108012288	0	801.00	2288.00	1649.76	2259.48	0.817	0.124	0.173	0.001	0.000	1
108042291	0	804.00	2291.00	1653.03	2262.10	0.979	0.109	0.099	-0.001	0.000	1
3046	2	640.60	2114.40	1474.69	2094.38	0.995	0.069	0.037	0.002	0.002	1
106422117	0	642.00	2117.00	1476.65	2096.75	0.895	0.176	0.099	0.001	0.001	1
106392114	0	639.00	2114.00	1473.43	2094.05	0.990	0.102	0.047	0.002	0.001	1
106422111	0	642.00	2111.00	1476.13	2091.19	0.939	0.094	0.073	0.000	0.002	1
106452114	0	645.00	2114.00	1479.28	2093.67	0.963	0.120	0.113	-0.002	0.004	1
3047	2	781.60	2028.60	1634.45	2008.75	0.973	0.041	0.037	0.000	0.000	1
107832033	0	783.00	2033.00	1635.47	2013.11	0.962	0.085	0.089	0.000	0.000	1
107802030	0	780.00	2030.00	1632.84	2010.18	0.929	0.064	0.054	0.000	0.000	1
107832027	0	783.00	2027.00	1635.78	2007.36	0.944	0.067	0.042	0.000	0.000	1
107862030	0	786.00	2030.00	1638.68	2010.17	0.942	0.051	0.043	0.000	0.000	1
3049	2	926.40	2310.60	1759.26	2279.80	0.924	0.166	0.102	0.001	0.001	1
109242312	0	924.00	2312.00	1757.37	2281.41	0.964	0.146	0.072	0.001	0.001	1
109272309	0	927.00	2309.00	1759.76	2278.27	0.807	0.260	0.160	0.001	0.001	1
109302312	0	930.00	2312.00	1763.14	2281.36	0.892	0.161	0.088	0.000	0.001	1
3050	2	852.60	1762.60	1691.92	1750.64	0.959	0.089	0.097	0.000	0.000	1
108521766	0	852.00	1766.00	1690.14	1754.11	0.879	0.149	0.168	-0.002	0.000	1
108491763	0	849.00	1763.00	1685.16	1751.54	0.944	0.181	0.092	-0.001	0.001	1
108521760	0	852.00	1760.00	1691.27	1749.31	0.959	0.050	0.117	0.000	0.000	1
108551763	0	855.00	1763.00	1693.70	1751.52	0.941	0.132	0.138	0.000	0.000	1
3051	2	891.20	1739.40	1727.61	1729.80	0.985	0.057	0.053	0.000	0.000	1
108911742	0	891.00	1742.00	1727.46	1731.57	0.968	0.077	0.071	0.000	0.000	1
108881739	0	888.00	1739.00	1724.57	1729.48	0.890	0.124	0.210	0.003	0.001	1
108911736	0	891.00	1736.00	1727.08	1727.55	0.977	0.073	0.105	0.001	0.000	1
108941739	0	894.00	1739.00	1730.55	1729.60	0.962	0.086	0.071	0.000	0.000	1
3052	2	1159.60	1965.40	1972.42	1945.52	0.909	0.084	0.069	0.000	0.000	1
111611967	0	1161.00	1967.00	1973.58	1947.10	0.903	0.099	0.075	0.000	0.000	1
111581964	0	1158.00	1964.00	1970.73	1944.37	0.864	0.115	0.111	0.000	0.000	1
111611961	0	1161.00	1961.00	1973.15	1941.36	0.932	0.175	0.129	-0.001	0.001	1
111641964	0	1164.00	1964.00	1975.93	1944.31	0.931	0.098	0.065	0.000	0.000	1
3053	2	1122.40	2668.60	1941.04	2626.14	0.978	0.060	0.045	0.000	0.001	1
111222672	0	1122.00	2672.00	1941.25	2629.43	0.947	0.146	0.072	0.000	0.002	1
111192669	0	1119.00	2669.00	1937.67	2626.51	0.780	0.136	0.149	0.001	0.001	1
111222666	0	1122.00	2666.00	1940.17	2623.24	0.926	0.114	0.092	0.000	0.001	1
111252669	0	1125.00	2669.00	1943.47	2626.49	0.941	0.087	0.064	0.000	0.000	1
3054	2	1146.40	2325.40	1961.70	2292.36	0.988	0.083	0.045	0.000	0.001	1
111462327	0	1146.00	2327.00	1961.42	2293.93	0.944	0.103	0.081	0.000	0.000	1
111432324	0	1143.00	2324.00	1958.58	2291.16	0.934	0.113	0.070	0.000	0.000	1
111492324	0	1149.00	2324.00	1964.44	2290.82	0.971	0.132	0.111	0.000	0.001	1