

# Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe  
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

**Fünfundvierzigster Band**

## **DREIDIMENSIONALES TESTNETZ TURTMANN 1985 - 1990**

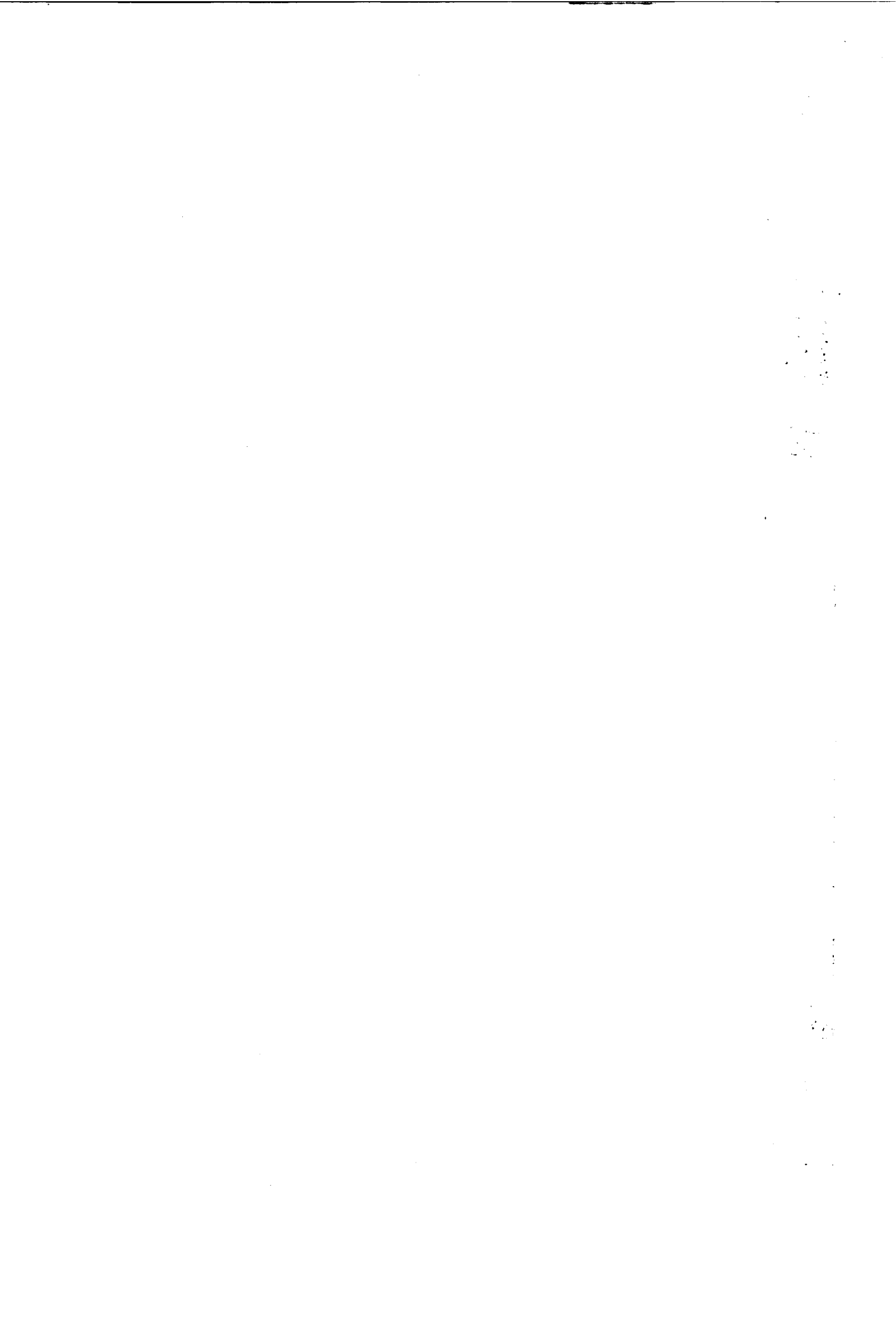
### **Teil I**

**F. Jeanrichard (Herausgeber)**

**Autoren:**

**Alain Geiger  
Hans-Gert Kahle  
Richard Köchle  
Dieter Meier  
Bruno Neiningger  
Dieter Schneider  
Bruno Wirth**

**1992**



# Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz

(Fortsetzung der Publikationsreihe  
«Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz»)

herausgegeben von der

Schweizerischen Geodätischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

**Fünfundvierzigster Band**

## **DREIDIMENSIONALES TESTNETZ TURTMANN 1985 - 1990**

**Teil I**

**F. Jeanrichard (Herausgeber)**

**Autoren:**

**Alain Geiger**

**Hans-Gert Kahle**

**Richard Köchle**

**Dieter Meier**

**Bruno Neininger**

**Dieter Schneider**

**Bruno Wirth**

**1992**

**Adresse der Schweizerischen Geodätischen Kommission:**

**Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
Eidg. Technische Hochschule Zürich  
ETH-Hönggerberg  
CH-8093 Zürich**

**Redaktion des 45. Bandes:**

**Dr. B. Bürki**

**F. Jeanrichard**

**Dr. D. Schneider**

**Druck: OWADRUCK, 3173 Oberwangen**



# INHALTSVERZEICHNIS

## Vorwort

<b>1</b>	<b>Netzaufbau</b> (Autoren: <i>D. Schneider, A. Geiger, H.G. Kahle</i> )	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Geologische und Tektonische Situation</b>	<b>3</b>
1.3.1	Zur Plattentektonik und geologischen Entstehungsgeschichte	3
1.3.2	Einige Hinweise auf tektonische Bewegungsmöglichkeiten	7
1.3.3	Geologische Skizzen und Modellbildungen im Messgebiet	10
1.3.4	Geodynamische Modellierungen	19
1.3.5	Zusammenfassung	28
	Literatur	29
<b>1.4</b>	<b>Entwurf und Präanalyse des terrestrischen Netzes</b>	<b>32</b>
1.4.1	Idealnetz-Design	32
1.4.2	Rekognoszierung	33
1.4.3	Lage der Kontrollpunkte	35
1.4.4	Entwurf des Beobachtungsplanes	36
1.4.5	3D-Präanalyse	36
<b>1.5</b>	<b>Materialisierung der Kontrollpunkte</b>	<b>40</b>
1.5.1	Grundsätzliches	40
1.5.2	Verwendetes Versicherungsmaterial	40
1.5.3	Lokale Rückversicherung und exzentrische Stationspunkte	46
1.5.4	Versicherungsarbeiten	46
1.5.5	Dokumentation der Versicherung	46
	Literatur	59
<b>2</b>	<b>Arbeiten der L+T 1985 - 87</b> (Autoren: <i>D. Schneider, D. Meier</i> )	<b>60</b>
<b>2.1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>60</b>
<b>2.2</b>	<b>Höhenwinkelmessungen</b>	<b>60</b>
2.2.1	Konzept der simultan gegenseitigen Höhenwinkelmessung	60
2.2.2	Messkampagne vom 10. - 13.9.1985	61
2.2.3	Refraktionsschätzung mittels Kollokation	64
2.2.4	Beurteilung der Resultate	64

<b>2.3</b>	<b>Richtungsmessungen</b>	<b>65</b>
2.3.1	Richtungsmessung mit elektronischen Präzisionstheodoliten	65
2.3.2	Messkampagne vom 21. - 25.4.1986	66
2.3.3	Auswertung der Richtungsmessungen	68
2.3.3.1	Berücksichtigung der Stehachsenschiefe	68
2.3.3.2	Getrennte Stationsausgleichungen KERN E2 / WILD T2000S	68
2.3.3.3	Vereinigung der Richtungssätze	68
2.3.4	Beurteilung der Resultate	69
<b>2.4</b>	<b>Astronomische Azimute</b>	<b>70</b>
2.4.1	Messung und Online-Erfassung von Polaris-Azimuten	70
2.4.2	Messkampagne vom 23. - 27.6.1986	71
2.4.3	Auswertung der Polaris-Beobachtungen	72
2.4.4	Resultate der Polaris-Beobachtungen	73
<b>2.5</b>	<b>Präzisions-Distanzmessungen</b>	<b>74</b>
2.5.1	Methoden der Präzisions-Distanzmessung	74
2.5.1.1	Die Meteo-Erfassung durch simultane Flugmessungen	75
2.5.1.2	Die Zweifarben-EDM oder Dispersionsmethode	75
2.5.2	Funktionsweise des KERN Mekometer ME-5000	77
2.5.3	Mekometer-Messkampagne vom 30.6. - 3.7.1986	78
2.5.4	Aufbereitung der Messdaten des ME-5000	82
2.5.4.1	Atmosphärische Reduktion	82
2.5.4.2	Korrekturen der Grobmessfehler	82
2.5.4.3	Additionskonstanten und Massstabsfaktoren	83
2.5.5	Beurteilung der provisorisch reduzierten Resultate	83
2.5.6	Mehrfarben-Distanzmesser Terrameter LDM2	85
2.5.7	Terrameter-Messkampagne vom 6. - 9.10.1986	86
2.5.8	Auswertung und Beurteilung der Terrameter-Beobachtungen	90
<b>2.6</b>	<b>Präzisionsnivellements</b>	<b>91</b>
2.6.1	Anlage des Nivellementsnetzes	91
2.6.2	Nivellementskampagne vom 23. - 26.9.1985	99
2.6.3	Nivellementskampagne vom 1. - 11.4.1986	99
2.6.4	Auswertung der Nivellements	100
2.6.5	Analyse der wiederholten Messungen der Nord-Süd-Profile	101
<b>2.7</b>	<b>Ergänzungsmessungen</b>	<b>103</b>
2.7.1	Einmessung der Rückversicherungen	103
2.7.2	Anschluss an die offizielle Landesvermessung	103
2.7.3	Netzerweiterung und GPS-Exzentren	103

<b>2.8</b>	<b>Terrestrische 3D-Ausgleichungen</b>	104
2.8.1	Das Modell der 3D-Ausgleichung mit RAUMTRI	104
2.8.2	Geodätisches Datum und Lagerung des Netzes	107
2.8.3	3D-Ausgleichung des Hauptnetzes	108
2.8.4	Beurteilung der Resultate	122
2.8.5	Ausgleichung des erweiterten Netzes mit exzentrischen Stationen	122
2.8.6	Terrestrische Lösung ("ground truth")	126
	Literatur	127
<b>3</b>	<b>Meteo-Erfassung und troposphärische Reduktion der Streckenmessungen</b>	129
	<i>(Autoren: B. Neininger , R. Köchle)</i>	
<b>3.1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	129
<b>3.2</b>	<b>Einführung in die interdisziplinäre Problemstellung</b>	129
3.2.1	Diskussion der Einflussgrößen der atmosphärischen Refraktion	131
3.2.2	Tagesgang der Atmosphäre, Besonderheiten im Gebirge	133
3.2.2.1	Stabile Höhenschicht	133
3.2.2.2	Konvektive trockenadiabatische Schicht, Wärmetief	133
3.2.2.3	Hyperadiabatische, feuchte Bodengrenzschicht	136
3.2.2.4	Tal(boden)inversion und Bodennebel	137
3.2.2.5	Gebirgsinversion, Kältehoch	137
3.2.2.6	Konsequenzen für die Geodäsie	137
<b>3.3</b>	<b>Angewendete Methoden zur atmosphärischen Refraktionskorrektur</b>	138
3.3.1	Flugmessungen in der freien Atmosphäre	138
3.3.1.1	Erfassung der meteorologischen Daten	139
3.3.1.2	Datenaufzeichnung und Erfassung der Position	141
3.3.2	Parallelflüge	143
3.3.2.1	Temperatur 143	
3.3.3	Messung der Meteorologie auf den Stationen	143
3.3.3.1	Messanlage	143
3.3.3.2	Eichung und Vergleich der Sprenger-Sonden	144
3.3.3.3	Vergleich der Meteorologie auf den Masten mit den Werten in Bodennähe	146
3.3.3.4	Vergleich von Sprenger-Sonden auf den Stationen und Psychrometern	147
3.3.4	4-dimensionale Interpolation der unregelmässig verteilten Daten	147
3.3.5	Rekonstruktion des 3-dimensionalen Messstrahlverlaufs	150
3.3.5.1	Iteratives "ray tracing"	150

3.3.5.2	Strahlfolgendes Gitter	150
3.3.5.2	Weitere Details des Gitters	152
3.4	<b>Resultate und Schlussfolgerungen</b>	152
3.5	<b>Ausblick 153</b>	
	Nachtrag	154
	Literatur	155
4	<b>Lokale Schwerefeldbestimmung (Autor: B. Wirth)</b>	158
4.1	<b>Lotabweichungs-Bestimmungen</b>	158
4.2	<b>Schweremessungen</b>	163
4.3	<b>Orthometrische Reduktion des Nivellements</b>	171
4.3.1	Orthometrische Höhen aus Nivellement und Schweremessungen	171
4.3.2	Orthometrische Korrektur aus Lotkrümmungen	175
4.3.3	Helmertsche orthometrische Höhen	177
4.4	<b>Lokale Geoidbestimmung</b>	179
	Literatur	183

## VORWORT

Bereits Mitte der 80-er Jahre hatte die Schweizerische Geodätische Kommission (SGK) der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SANW) in einer Spezial-Arbeitsgruppe des Europarates SATRAPE (Satellite Radio Positioning in Europe) damit begonnen, ihre GPS-Aktivitäten aufzunehmen und eine Reihe von nationalen Projekten anzuregen. Hierzu gehörten insbesondere der Aufbau eines GPS-Hochpräzisionsnetzes bei Turtmann im Rhonetal, Kanton Wallis, sowie ein Projekt zum Nationalen Forschungsprogramm NFP 20 "Geologische Tiefenstruktur der Schweiz". Wir freuen uns nun, den ersten Band der umfangreichen Arbeiten im Turtmann-Netz präsentieren zu können. Ihm liegen folgende drei Teilziele zugrunde:

- (A) Prüfung und Evaluation von GPS-Empfängern
- (B) Prüfung von neuen geodätischen Messgeräten und Vermessungsmethoden
- (C) Detektion von rezenten Krustenbewegungen im alpin-penninischen Raum

Der vorliegende erste Turtmann-Band enthält

1. Eine Beschreibung des Netzaufbaus mit geologischer Situation, eine Präanalyse des terrestrischen Netzes und eine Dokumentation sämtlicher Versicherungsarbeiten
2. Höhenwinkel-, Richtungs-, Präzisions-Distanzmessungen; Astronomische Azimute, Präzisionsnivelements und Resultate der 3D-Ausgleichungen
3. Meteo-Erfassung und troposphärische Reduktion der Streckenmessungen
4. Lotabweichungsbestimmungen, Schweremessungen und lokale Geoidbestimmung

Autoren dieses ersten Bandes sind vor allem Mitarbeiter des Bundesamtes für Landestopographie (L+T), des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP, ETH Zürich), des Laboratoriums für Atmosphärenphysik der ETH Zürich sowie der Fa. Kern & Co (jetzt Leica). Allen Autoren sei an dieser Stelle herzlich für die sorgfältige und detaillierte Dokumentation gedankt. Besonderen Einsatz hat dabei Herr Dr. Dieter Schneider (L+T) als Autor und Redaktor geleistet, der zugleich auch einer der Mit-Initianten des Netzaufbaus gewesen war. Ohne seine fundierten wissenschaftlichen Argumente und seinen persönlichen Einsatz zugunsten eines 3D-Netzes in einem Gebirgstal wäre möglicherweise statt des Turtmann-Netzes eine Rigi-Netz entstanden, das anfänglich Zeit favorisiert worden war. Auch Herr Dipl. Ing. H. Chablais (L+T) und Dr. A. Geiger haben bei der Vorbereitung der Netzanlage und Präanalyse wertvolle Arbeit geleistet. Herr Dipl. Ing. E. Gubler, Chef der Geodäsie-Abteilung an der L+T, gab uns viele kompetente Ratschläge. Seiner tatkräftigen Unterstützung ist die Realisierung des Testnetzes Turtmann zu verdanken. Besonderer Dank gebührt Herrn Direktor F. Jeanrichard (L+T), ohne dessen ständige Unterstützung der Aufbau der Netzpunkte und die Durchführung der vielen terrestrischen Hochpräzisionsmessungen nicht möglich gewesen wären. Gerade die Qualität der terrestrischen "Ground Truth" mit den grossen Höhenunterschieden zwischen Hang- und Talpunkten macht das GPS-Netz zu einem einzigartigen alpin-geodätischen Netz für zukünftige Instrumenten-Tests und Untersuchungen der Geodynamik.

Die Schweizerische Geodätische Kommission dankt ausserdem allen Mitarbeitern im Feld für ihren unermüdlichen Einsatz, allen Institutionen und Firmen, welche Geräte zur Verfügung gestellt haben, sowie den örtlichen Behörden für ihre Unterstützung. Sie alle haben einen wertvollen Beitrag zur Geodäsie und Landesvermessung in der Schweiz geleistet. Von der Schweizerischen Akademie für Naturwissenschaften wurden in Zeiten knapper Mittel ein Teil der Geländekosten sowie die Druckkosten übernommen, wofür die SGK ihren grossen Dank ausspricht.

Der zweite Turtmann-Band ist in Vorbereitung. Er wird vor allem die Auswertung der GPS-Messungen zum Thema haben, an dem zur Zeit das Astronomische Institut der Universität Bern, das IGP und die L+T arbeiten.

Herrn Dr. B. Bürki danken wir für die redaktionelle Überarbeitung und Drucklegung des Manuskripts.

Im Namen der Schweizerischen Geodätischen Kommission:

Direktor F. Jeanrichard  
Bundesamt für Landestopographie  
Vizepräsident der SGK

Prof. Dr. H.-G. Kahle  
IGP - ETH Zürich  
Präsident der SGK

## PRÉFACE

Au milieu des années 80 déjà, la Commission géodésique suisse (CGS) de l'Académie suisse des sciences naturelles (ASSN) a entrepris ses activités dans le domaine GPS et a proposé une série de projets nationaux au sein d'un groupe de travail spécial SATRAPE (Satellite Radio Positioning in Europe) du Conseil de l'Europe. L'un de ces projets était précisément la réalisation d'un réseau GPS de haute précision dans la région de Tourtemagne (VS) dans la vallée du Rhône, ainsi qu'une contribution au programme national de recherche PNR 20 "Exploration du soubassement géologique de la Suisse". Nous avons le plaisir de présenter le premier volume consacré aux nombreux travaux effectués dans le réseau de Tourtemagne. Les trois buts suivants en forment la base:

- (A) Contrôle et évaluation de récepteurs GPS
- (B) Contrôle de nouveaux appareils de mesures géodésiques et de nouvelles méthodes de mensuration
- (C) Détection de mouvements récents de la croûte terrestre dans les unités penniques alpines

Le premier volume consacré au réseau de Tourtemagne comprend

1. Une description de la configuration du réseau avec la situation géologique, une pré-analyse du réseau des mesures terrestres ainsi qu'une documentation de tous les travaux de matérialisation des points
2. Les mesures des angles verticaux, des directions et des distances; les azimuts astronomiques, les nivellements de précision et les résultats des compensations tridimensionnelles
3. Les mesures météorologiques et la réduction troposphérique des mesures de distance
4. Les déterminations de la déviation de la verticale, les mesures gravimétriques et la détermination du géoïde local

Les auteurs de ce premier volume sont avant tout des collaborateurs de l'Office fédéral de topographie (S+T), de l'Institut de géodésie et de photogrammétrie (IGP-EPF Zürich), du Laboratoire de la physique de l'atmosphère de l'EPF-Zürich ainsi que de la maison Kern & Co (aujourd'hui Leica). Que tous ces auteurs soient remerciés ici chaleureusement pour la documentation soignée et détaillée. Nous remercions en particulier Monsieur Dieter Schneider, dr. ès sc. techn., auteur et rédacteur en même temps et co-initiateur de la configuration du réseau. Sans ses arguments fondés scientifiquement et son engagement personnel en faveur d'un réseau tridimensionnel situé dans une vallée alpine, il est possible qu'un projet "Rigi", qui était favori au début, ait été réalisé plutôt que celui de Tourtemagne. Soulignons également le travail précieux de pré-analyse et de préparation du réseau de Monsieur Hubert Chablais (S+T), ing. dipl. EPF et de Monsieur A. Geiger (IGP-EPF Zürich), dr. ès sc. techn. Monsieur E. Gubler, ing. dipl. EPF et chef de la Division des travaux géodésiques du S+T a contribué de façon marquante à la réalisation de ce réseau par ses conseils compétents et par son soutien efficace. Que Monsieur F. Jeanrichard, directeur du S+T, soit remercié particulièrement pour son appui, sans lequel la mise en place du réseau et de l'exécution des nombreuses mesures terrestres de précision n'auraient pas été possibles. Et justement, la qualité de la "Ground Truth" terrestre dans un réseau présentant des différences d'altitudes importantes entre les points situés sur les flancs et ceux situés au fonds de la vallée, fait du réseau de Tourtemagne une oeuvre géodésique unique pour des contrôles futurs d'instruments et des investigations de la géodynamique dans une région alpine.

La Commission géodésique suisse remercie en outre tous les collaborateurs ayant participé aux campagnes de mesures pour leur engagement infatigable ainsi que toutes les organisations et les maisons qui ont mis des instruments à disposition, de même que les autorités locales pour leur appui. Toutes et tous ont contribué précieusement au développement de la géodésie et de la mensuration nationale de la Suisse. Enfin, la Commission géodésique suisse exprime sa gratitude à l'Académie suisse des sciences naturelles qui, en ces temps de restrictions

financières, à pris à sa charge une partie des frais des campagnes de mesures et les frais d'impression.

Le deuxième volume consacré au réseau de Tourtemagne est en préparation. Le thème en sera plus particulièrement l'analyse des mesures GPS, à laquelle l'Institut d'astronomie de l'Université de Berne, l'Institut de géodésie et de photogrammétrie de l'EPF-Zürich et l'Office fédéral de topographie sont en train de travailler.

Nous remercions Monsieur B. Bürki, dr. ès sc. techn. pour le traitement rédactionnel et la préparation pour l'impression du manuscrit.

Au nom de la Commission géodésique suisse:

F. Jeanrichard, directeur,  
Office fédéral de topographie  
Vice-président de la CGS

Prof. Dr. H.-G. Kahle  
IGP-EPF Zürich  
Président de la CGS





# 1 Netzaufbau

(Autoren: D. Schneider, A. Geiger, H.-G. Kahle)

## 1.1 Einleitung

Zu Beginn der Achzigerjahre wurde über erste erfolgreiche Anwendungen des amerikanischen Global Positioning Systems (GPS) für die relative Positionierung in der Geodäsie berichtet [*Counselman et al., 1982*]. Diese ersten Berichte zeigten deutlich, dass die neue satellitengestützte Vermessungstechnik innerhalb weniger Jahre breite Anwendung in Geodäsie und Landesvermessung finden könnte. Unter dem Titel "SATellite RADIO Positioning in Europe, SATRAPE" (Europäische Kooperation in der Radiopositionierung) wurde schon 1984 eine Working Group unter der Obhut des Europarates gegründet. Unter der Leitung ihres Präsidenten, Prof. Dr. H.-G. Kahle, konstituierte sich am 26. Februar 1985 eine Arbeitsgruppe GPS der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK) mit dem Ziel, die verschiedenen Bestrebungen zur Einführung der GPS-Messtechnik in der Schweiz zu fördern. An den Beratungen dieser Gruppe nahmen ursprünglich Vertreter des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich (IGP), des Astronomischen Instituts der Universität Bern (AIUB), des Bundesamtes für Landestopographie (L+T) sowie (als Mitglied der SGK) Herr Dr. F.K. Brunner (Firma WILD Heerbrugg AG) teil. Später wurden weitere Interessenten, wie etwa Vertreter des Institut de géodésie et mensuration der ETH Lausanne (IGM), des Labors für Atmosphärenphysik der ETH Zürich (LAPETH), der Instrumentenfirma KERN & Co. AG, Aarau und WILD Heerbrugg AG (heute Leica Heerbrugg Ltd.) sowie der Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) zur Mitarbeit eingeladen.

Neben dem Gedankenaustausch über die laufende Entwicklung der GPS-Technik wurde beschlossen, als erste praktische Messarbeit eine gemeinsame Testkampagne in einem geeigneten schweizerischen Testnetz durchzuführen. Als Hauptziele dieser Testmessungen wurden die Erprobung der Messmethode und ein objektiver Vergleich der verschiedenen, bereits auf dem Markt vorhandenen Satelliten-Empfänger in Bezug auf ihre Eignung für Anwendungen in Geodäsie und Landesvermessung genannt. Als weitere Frage wurde speziell auch die Brauchbarkeit der Messmethode im Gebirge und die Möglichkeiten ihrer Anwendung für die Höhenmessung formuliert. Deshalb galt es eine Testnetzkonfiguration im Alpen- oder Voralpengebiet zu suchen, welche sowohl ebene wie geneigte Basislinien mit grossen Höhendifferenzen umfasst und die terrestrische Bestimmung sowohl der Distanzen wie auch der ellipsoidischen Höhendifferenzen erlaubt.

Als erster Vorschlag wurde ein kleines Testnetz "RIGI" mit einem Stationspunkt auf Rigikulm und 3 Talpunkten westlich, nördlich und südlich davon studiert und die Realisierung sowie Aufwand und Nutzen diskutiert.

Anlässlich der Sitzung der Arbeitsgruppe GPS vom 5.7.1985 stellte D. Schneider (L+T) einen alternativen Vorschlag für ein Testnetz im Mittelwallis vor. Die Ideenskizze "RARON" sah ein dreidimensionales trigonometrisches Netz mit 2 Stationspunkten im Talboden und je 3 gut zugänglichen Stationspunkten am südlichen und nördlichen Talhang des Wallis vor. In der Folge wurde beschlossen, diese Idee weiterzuverfolgen und einen Netzentwurf mit 3D-Präanalyse vorzunehmen. Mitte Juli 1985 fand mit Beteiligung von A. Geiger (IGP), B. Mattli und D. Schneider eine Rekognoszierung statt, welche schliesslich zum Vorschlag ("3D-TESTNETZ - TURTMANN" [*Schneider, 1985*]) zur Installation und Messung eines dreidimensionalen Testnetzes hoher Präzision in der Nähe des Dorfes Turtmann VS führte.

Das Projekt 3D-Testnetz TURTMANN wurde von allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe von Anfang an mit beispielhaftem Engagement gefördert. Die fruchtbare Zusammenarbeit der verschiedenen Disziplinen war durch gegenseitige Lernprozesse gekennzeichnet, welche zu einem grossen Gewinn an Erkenntnissen und Erfahrungen führten. Durch die unbürokratische Kooperation von Hochschulinstituten, Gerätefirmen und Verwaltungsstellen liessen sich die praktischen Schwierigkeiten sowohl im Feld wie auch bei der Auswertung lösen. Den Initianten des Projekts sei es an dieser Stelle gestattet, allen beteiligten Instituten und ihren Mitarbeitern für ihren Beitrag zum Gelingen des Vorhabens zu danken.

## 1.2 Zielsetzung

Beim Entwerfen des Netzes zeigte sich, dass mit dem Projekt TURTMANN gleichzeitig mehrere Ziele verfolgt werden können (s. Tab.1.2-1). Kurz- und mittelfristig kann das Netz der Erprobung neuer geodätischer Messverfahren dienen, während anhand von Wiederholungsmessungen nach längeren Zeitintervallen Untersuchungen über die Kinematik der obersten Kruste in diesem seismisch aktiven und tektonisch interessanten Gebiet durchgeführt werden können.

Ziele	Zeitraum
1 <b>GPS-Testnetz:</b> Prüfung und Evaluation von GPS-Empfängern sowie der Mess- und Auswerteverfahren	<b>kurzfristig</b> (1-5 Jahre)
2 <b>Terrestrisches 3D-Testnetz:</b> Prüfung von neuen geodätischen Messgeräten und Vermessungsmethoden	<b>mittelfristig</b> (1-20 Jahre)
3 <b>Geodynamisches Kontrollnetz:</b> Untersuchungen der Kinematik der obersten Erdkruste	<b>langfristig</b> (10-50 Jahre)

Tabelle 1.2-1: Zielsetzungen des Projekts Turtmann

**GPS-Testnetz:** Die geplante Netzanlage soll primär der Prüfung und dem Vergleich von GPS-Satellitenempfängern sowie der entsprechenden Mess- und Auswertemethoden dienen. Die Ausdehnung des Netzes soll dem Messbereich ( $< 10\text{ km}$ ) der Einfrequenz-Messmethode (L1) entsprechen, wobei Erweiterungsmöglichkeiten für den Test von Zweifrequenzgeräten (L1/ L2) berücksichtigt werden sollten. Um die Eignung der GPS-Messmethode im Gebirge zu prüfen, soll das Netz eine möglichst grosse vertikale Ausdehnung aufweisen. Die Stationspunkte sollen möglichst jederzeit mit Fahrzeugen zugänglich sein. Die Umgebung der Stationen soll frei von Hindernissen und Funkanlagen sein, welche den Satellitenempfang stören könnten. Zudem sollte die topographische Kulisse nicht oder nur an vereinzelt Stellen über die Elevation (Höhenwinkel) von  $15$  bis  $20^\circ$  hinausragen. Ein terrestrisch bestimmter 3D-Koordinatensatz höchster Genauigkeit ("ground truth") soll zum Vergleich der GPS-Resultate bereitgestellt werden.

**Terrestrisches 3D-Testnetz:** Die Netzanlage soll über längere Zeit für Gerätetests aller Art (neben GPS-Geräten z.B. auch für EDM-Geräte, elektronische oder automatisch messende Theodolite, Inertialmesssysteme etc.) zur Verfügung stehen. Dazu ist eine dauerhafte und zuverlässige Versicherung der Fixpunkte notwendig. Alle Fixpunkte sollen durch Rückversicherungsmarken kontrolliert werden können, sodass allfällige lokale Eigenbewegungen der Stationsmarken aufgedeckt werden können.

**Geodynamisches Kontrollnetz:** Bei wiederholter Anwendung modernster geodätischer Messmethoden (z.B. GPS und Präzisions-EDM) besteht die Möglichkeit, kleinste Relativbewegungen der obersten Erdkruste nachzuweisen. Der grosse Aufwand für die GPS-Tests kann damit einem weiteren Forschungsziel nutzbar gemacht werden. Das Turtmann-Gebiet im mittleren Wallis (s. Kap.1.3) befindet sich in einer der interessantesten Zonen für neotektonische Untersuchungen in der Schweiz. Als Voraussetzung für diese Zielsetzung ist eine sorgfältige Auswahl und Beurteilung der Stationspunkte bezüglich ihrer geologischen Eignung notwendig. Die Kontrollpunkte sollten wo immer möglich im anstehenden und stabilen Fels verankert werden.

## 1.3 Geologische und Tektonische Situation

### 1.3.1 Zur Plattentektonik und geologischen Entstehungsgeschichte

Um die geologische und tektonische Situation, wie wir sie heute im Turtmanngbiet vorfinden, in einen grossräumigen geodynamischen Rahmen zu stellen, sei uns ein kleiner Exkurs zur Plattentektonik erlaubt.

Wohl ist die Erdgeschichte mindestens 4.6 Milliarden Jahre alt, die ältesten bis jetzt gefundenen Gesteine wurden vor fast 4 Milliarden Jahren gebildet. Die globalen Erdkrustenbewegungen sind jedoch heute 'nur' bis ca 570 Mio Jahre einigermaßen zuverlässig rekonstruierbar. In dieser Zeit - dem sogenannten Phanerozoikum - auftretende erdgeschichtliche Ereignisse und Abläufe können anhand von paläomagnetischen Befunden zeitlich eingeordnet und zu einem einheitlichen Entwicklungsbild zusammengefügt werden. Über die Zeit vor dem Phanerozoikum - dem Präkambrium - ist es bedeutend schwieriger, gesicherte Aussagen zu machen, obwohl weite Gebiete der Kontinente durch präkambrische Schilde und Tafeln geformt sind. Sie weisen z. T. ein Alter von über 1.6 Milliarden Jahren auf, einer Zeit also, die in die Vorgeschichte der vermuteten Bildung des frühen (präkambrischen) Superkontinentes fällt.

Dieser Superkontinent musste gegen Ende des Präkambriums aufgebrochen sein; denn zu Beginn des Phanerozoikums (ca. 600 Mio. Jahre) waren isolierte Landmassen in der Äquatorgegend lokalisiert. Bis vor ca. 500 Mio Jahren war der Zerfall in Kontinentalblöcke vollzogen. Vorerst wurden zwei Grosskontinente, Laurasia und Gondwana gebildet. Die fortschreitenden Bewegungen führten dann zum Zusammenschluss der beiden Kontinente zu einem neuen Superkontinent, Pangäa. Die Bildung Pangäas war etwa in der Mitte der Periode des Perms (ca. 250 Mio Jahre) abgeschlossen. Das übrige Gebiet der Erde wurde von einem einzigen Ozean, der Panthalassa überdeckt. Von Osten her drängte sich die Tethys, ein breiter gegen Westen keilförmig zulaufender Golf der Panthalassa, zwischen das zentrale bzw. östliche Eurasien und das östliche Gondwana (östliches Afrika, Arabien, Vorderindien, vielleicht mit Iran und Tibet, Australien). Diese Beschreibung der erdgeschichtlichen Situation, wie sie um die Mitte der Periode des Perms vorgelegen haben dürfte, entspricht auch der für die Alpenbildung massgebenden Ausgangslage. Die in Abb. 1.3-1 computergenerierte Bilderfolge soll den Ablauf der Kontinentaldrift bis zur Gegenwart veranschaulichen (Siever, 1987).

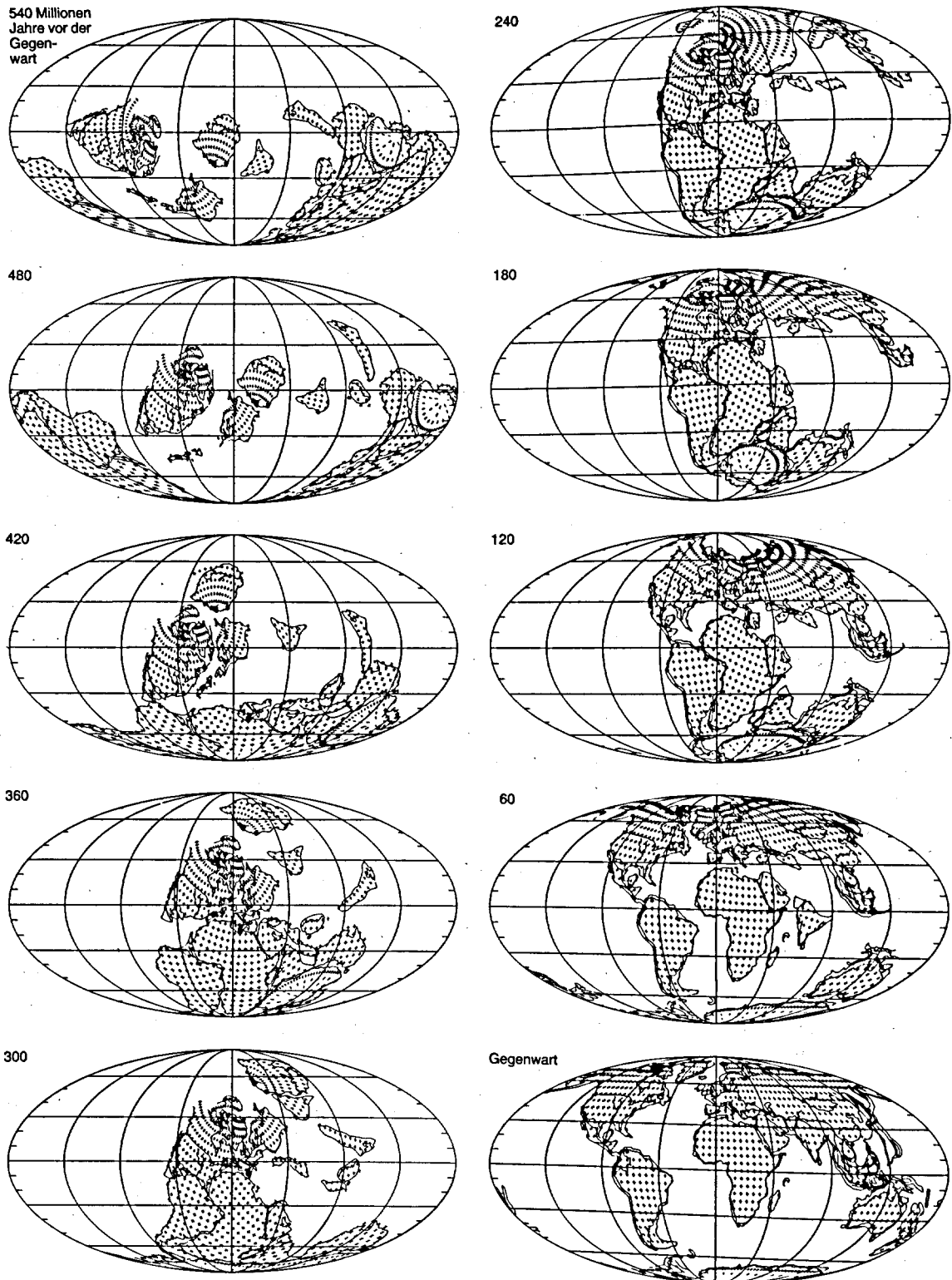
Die Bildung der Alpen erfolgte nun nicht durch einen kontinuierlichen Zusammenschub des eurasischen und afrikanischen Teil Pangäas, sondern durch einen komplizierten Bewegungsablauf, der sowohl durch Dehnungen, seitliche Verzerrungen und auch Kompression in nord-südlicher Richtung charakterisiert ist. Der Bewegungsablauf, wie er sich in den letzten 250 Mio. Jahren (Perm/Trias) vollzogen haben könnte, sei im folgenden kurz umrissen. Dazu vergleiche man Abb. 1.3-2 und Abb. 1.3-3.

Bis zum Anfang des Jura (ca. 200 Mio. Jahre) muss ein kontinuierlicher Zusammenschub vorgeherrscht haben. Im Zusammenhang mit den ersten aufbrechenden Grabenbrüchen im Gebiet des zukünftigen Atlantiks setzte eine Zerrungstektonik ein, die in der ersten Hälfte des Jura die Bildung von Schollen in der westlichen Tethys und die Ausdünnung der kontinentalen Kruste zur Folge hatte.

In der Tethys brach ein Riftsystem auf, das neue ozeanische Kruste bildete, die als Südpenninikum bezeichnet wird. Diese nord-südliche Dehnungsphase des eurasisch-gondwanischen Kollisionsgebietes, die sogenannte ozeanische Phase der Alpenbildung, dauerte von der Mitte Jura bis in die Mitte der Kreide (ca. 100 Mio. Jahre).

Die im Turtmanngbiet massgebenden Zonen können in eine helvetische und eine penninische Zone geteilt werden. Auf den heutigen geologischen Aspekt sei auf später verwiesen. Der Ursprung dieser beiden Zonen, deren geologischen Eigenschaften deutlich zu unterscheiden sind, kann bereits in der oben beschriebenen frühen Phase der Alpenbildung identifiziert werden.

Im Mesozoikum entsprach die helvetische Zone dem europäischen Kontinentalrand. Es wurden hier Flachwassersedimente, also Kalke und Mergel abgelagert. Erst kurz vor der alpinen Faltung wurde das Gebiet tiefer eingesenkt.



**Abbildung 1.3-1:** Computergenerierte Rekonstruktion der globalen Kontinentalverschiebungen, hauptsächlich basierend auf paläomagnetischen Befunden. (Ziegler und Scotese, Projekt Paläographischer Atlas, Universität Chicago, in Siever, 1987)

Dem Penninikum entsprachen während der Jura- und unteren Kreidezeit die ozeanischen Tröge zwischen dem europäischen und dem apulischen Kontinentalrand. Charakteristische Sedimente für diese Tröge waren Tone, Mergel, feinsandige tonige Kalke und grober Detritus, sowie basische Ergussgesteine. Zwischen den Trögen lagen Schwellen, auf denen vorwiegend kalkige Gesteine in seichtem Wasser abgelagert wurden.

Nach dieser ozeanischen Phase mit Dehnungsbeträgen von einigen 100 Kilometern setzte der eigentliche Zusammenschub der Kruste und damit die Falten- und Deckenbildung der Alpen ein. Die Kompressionsbewegung ist ab Mitte Kreide zu erkennen und dauerte bis ins Pliozän. Diese abermalige Umkehr (vergl. Abb. 1.3-2) des Bewegungsablaufs erfolgte zeitlich parallel zur Öffnung des mittleren und später des südlichen Atlantiks, was eine definitive Trennung zwischen Afrika und Südamerika bewirkte. Die abklingende Ostbewegung Afrikas in Bezug auf Europa wurde durch eine starke Süd - Nord Bewegungskomponente Afrikas überlagert. Die relativ grossen Bewegungen während dieser letzten Kompressionsphasen erzeugten entsprechend hohe Drucke, was neben der geometrischen Verformung auch eine mineralogische Umformung des Gesteins nach sich zog. Entsprechend den orogenen Phasen sind unterschiedliche Metamorphosen zu erkennen. Das Penninikum wurde stark überprägt, vor allem seine höchsten Decken. Im Messgebiet Turtmann erreicht die Metamorphose maximal Grünschiefergrad. Die in Abb. 1.3-2 ersichtliche kontinuierliche Kompression ist eher im Sinn einer mittleren Verkürzung zu verstehen, wird doch die erste eigentliche Hauptkompressionsphase, die zum alpinen Deckengebilde führte, im Altertär (65 bis 26 Mio. Jahre, Paläozän, Eozän und Oligozän) vermutet (Laubscher, 1983), während die subalpinen Ketten und der Faltenjura im Laufe einer zweiten Kompressionsphase im Jungtertiär (26 bis 1.8 Mio Jahre, Miozän und Pliozän) aufgefaltet wurden.

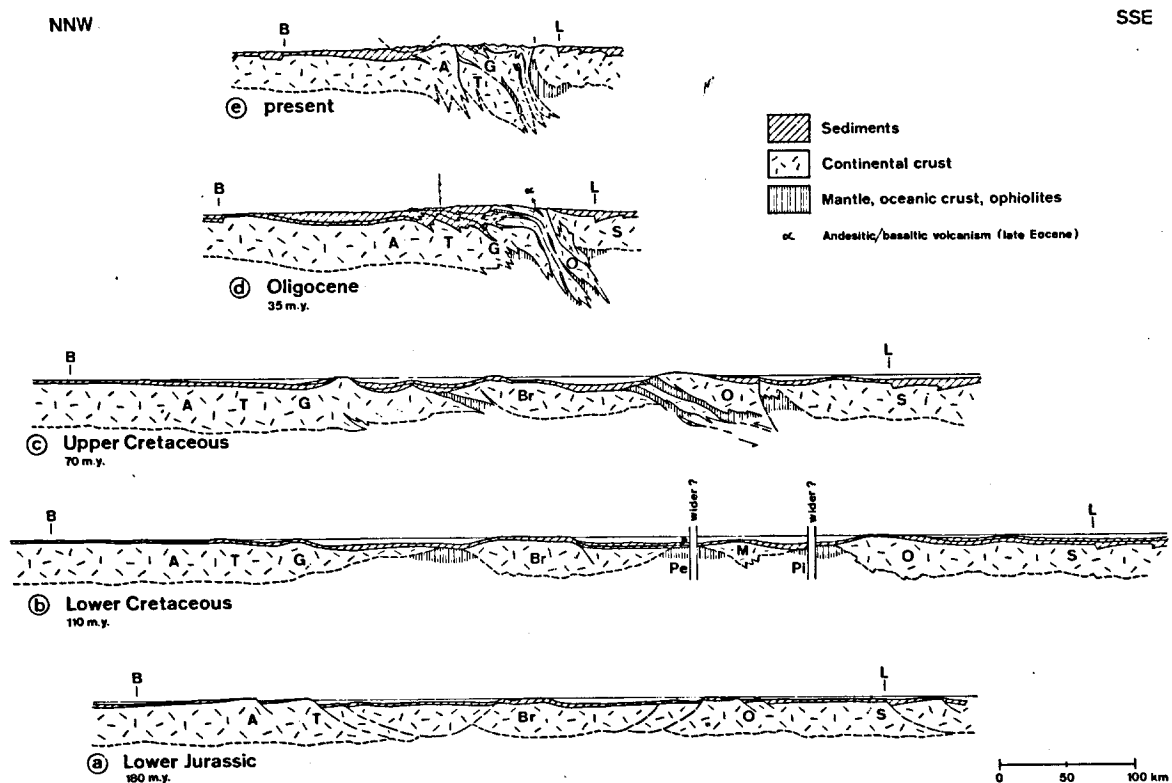


Abbildung 1.3-2: Illustration zur geologischen Entwicklung der Kruste seit dem Lias. Basel - Lugano. nach : U. P. Büchi und R. Trümpy, (1976)

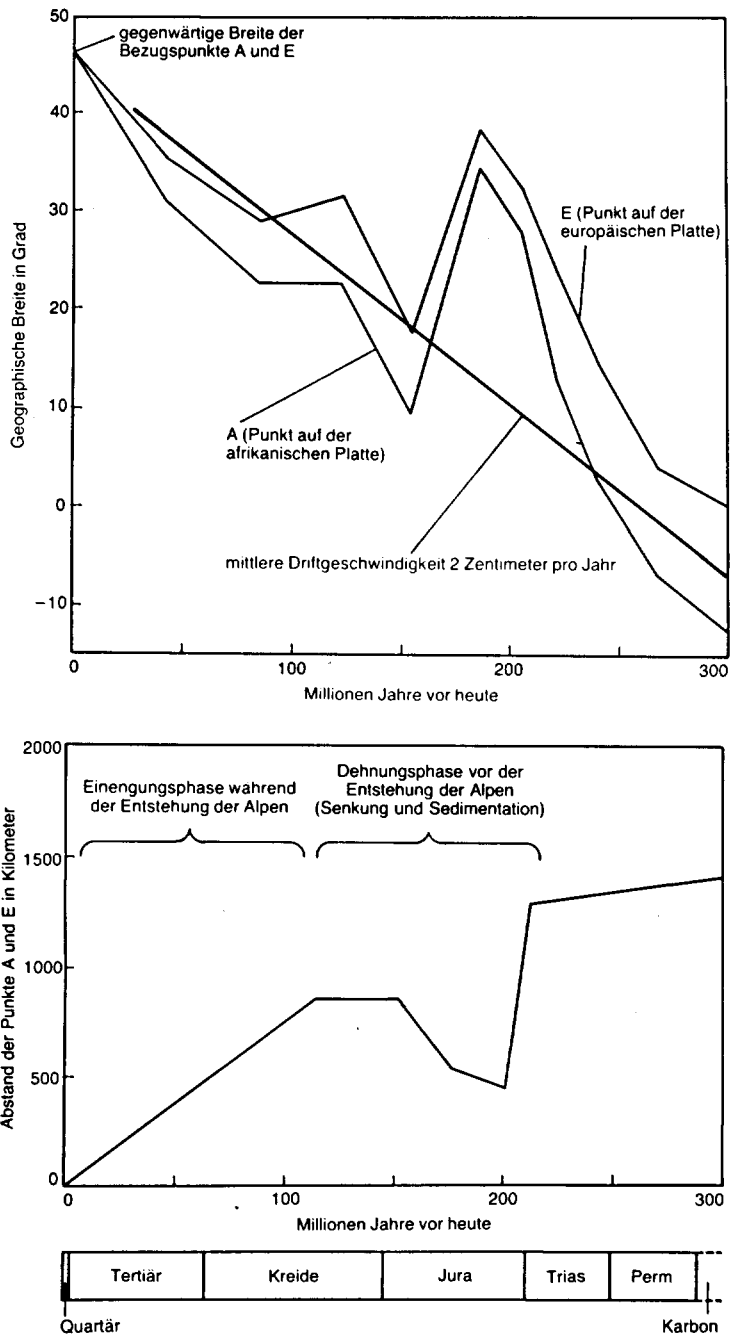


Abbildung 1.3-3: Absolute und relative Bewegung zweier Punkte auf der europäischen und der afrikanischen Platte (aus: Closs, Giese, Jacobshagen, 1987)

### 1.3.2 Einige Hinweise auf tektonische Bewegungsmöglichkeiten

Es stellt sich die Frage, ob die über erdgeschichtliche Zeiträume festgestellten Bewegungsabläufe in die Gegenwart extrapoliert werden können. Welche und wie grosse Bewegungen sind wo zu erwarten? Zudem erhebt sich die Frage nach dem zeitlichen Verhalten tektonischer Bewegungen: Sind sie mehr oder wenig kontinuierlich oder erfolgen sie episodisch? Dabei müsste auch der Begriff Episode genauer definiert werden. Die gebirgsbildenden Kräfte werden im allgemeinen während des Miozäns als abklingend und im Pliozän zum Stillstand kommend angenommen. Allerdings hat Soom (1990) Evidenzen gefunden, die das Postulat einer abklingenden Bewegung vor ca. 10-15 Mio. Jahren in Frage stellen und die eine Verformung bis weit ins Pliozän vermuten lassen. Speziell untersucht Soom die Hebungsraten seit dem Oligozän anhand von K-Ar Datierungen und mit der Spaltspurmethode. Interessanterweise zeigen die Hebungsraten im interessierenden Gebiet um Turtmann eine Beschleunigung in den letzten 2 bis 3 Mio. Jahren. Die Beträge liegen über 1 mm/Jahr während sie im Miozän eher bei 0.3 bis 0.8 mm/Jahr lagen. Diese Befunde decken sich mit den von Gubler (1991) durch Nivellement bestimmten aktuellen Hebungsraten im Bereich Brig von ca. 1.5 mm/Jahr gegenüber Aarburg. Ähnliche Ergebnisse präsentieren Wiget und Gubler (1988) von der im Rahmen des NFP20 neu vermessenen Linie Visp-Zermatt.

In Bezug auf die horizontalen Verschiebungen steht die Region Turtmann im Spannungsfeld einer seit dem oberen Oligozän anhaltenden dextralen Scherbewegung zwischen Eurasien und der adriatischen Mikroplatte. Die Kollisionszone zwischen Eurasien und Afrika und deren Spannungszustand wird in Abb. 1.3-4 schematisch dargestellt (Udias, 1982). Darin ist auch die adriatische Mikroplatte (Ad) zu erkennen. Steck (1990) rekonstruiert aufgrund geologischer Erkenntnisse den Zusammenschub der Adriatischen und der Europäischen Platte im Westalpenbereich (Abb. 1.3-5).

Die Duktilität für Quarzdeformationen haben die hochpenninischen und oberostalpinen Einheiten bereits im Oligozän verloren (Soom, 1990). Dies führte dazu, dass die mit der adriatischen Platte relativ starr verbundenen Decken einen sehr ähnlichen Bewegungsablauf wie die Platte selbst zeigen. Die tektonisch bedingten rezenten Krustenbewegungen in den Schweizer Alpen können demnach als Relativbewegung der adriatischen Mikroplatte gegenüber Eurasien interpretiert werden. Aufgrund der Bewegung der adriatischen Platte muss mit einer gegenwärtigen Krustenverkürzung der Alpen in norwestlicher Richtung gerechnet werden. Überlagert ist eine dextrale Scherbewegung, die sich auch an der Rhone-Simplon-Linie bemerkbar macht. Die horizontale Verscherungsrate dürfte aber 1 mm/Jahr nicht übersteigen (Burkhard, 1991).

Die Bewegungsverhältnisse im Messgebiet werden im nächsten Kapitel etwas genauer beschrieben. Unklar bleiben dabei die zu erwartenden Verschiebungsraten an den östlich anschliessenden Störungszonen, wie zum Bsp. der Centovalli- und der etwas südlicheren Canavese- und Tonale-Linien (siehe Abb. 1.3-5). Aufgrund geologischer Feldbefunde konstruierte Pavoni ein Netz mit Linien der grössten Verkürzung. Die von ihm (1987) abgeleiteten Feldlinien zeigen auch in einem grösseren Gebiet fächerförmige neotektonische Verformungen. Diese Linien decken sich gut mit den aus der Seismik abgeleiteten Einengungsrichtungen (Abb. 1.3-6, Pavoni u. Roth, 1990). Ebenso ergeben Simulationen mit neuen Bewegungsmodellen der Plattenverschiebungen eine nordwestliche Verkürzungsrichtung. Die am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) mit den Modellansätzen von Minster und Jordan (1978) durchgeführten Rechnungen ergaben auf Grund der verwendeten Plattenparameter NUVEL-1 (DeMets et al., 1990) eine Verkürzung von 8 mm/Jahr. Dabei geht man von zwei Punkten auf der eurasischen und der afrikanischen Platte aus. Diese Rate stimmt in etwa mit der Verkürzungsrate überein, wie sie im Mittel während den letzten 100 Mio Jahren (Mitte Kreide) vorgeherrscht haben dürfte (vergl. Abb. 1.3-2). Elmiger (1990) untersuchte die rezenten Bewegungen anhand geodätischer Messungen in der Alpentraverse von der Lägern bis zum Monte Generoso. Für die in Betracht gezogenen Messungen von 1910 bis 1980 zeigen sich tendenziell Dilatationen im Netzteil südlich von Andermatt und Kompressionen im nördlichen Netzteil. Dies stimmt qualitativ gut mit Berechnungsmodellen von Werner (1990/91) überein.

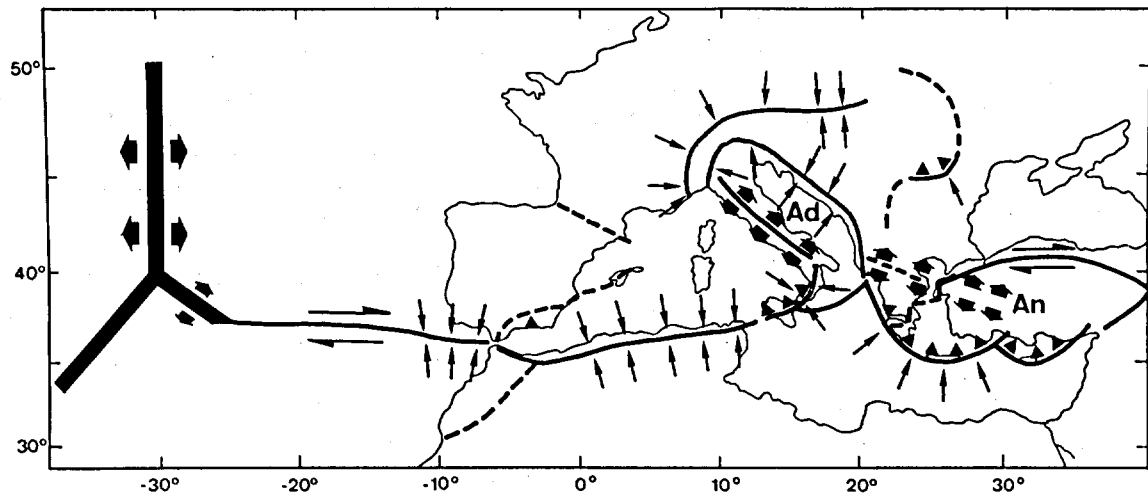


Abbildung 1.3-4: Spannungsverhältnisse im alpinen Raum (Udias, 1982)

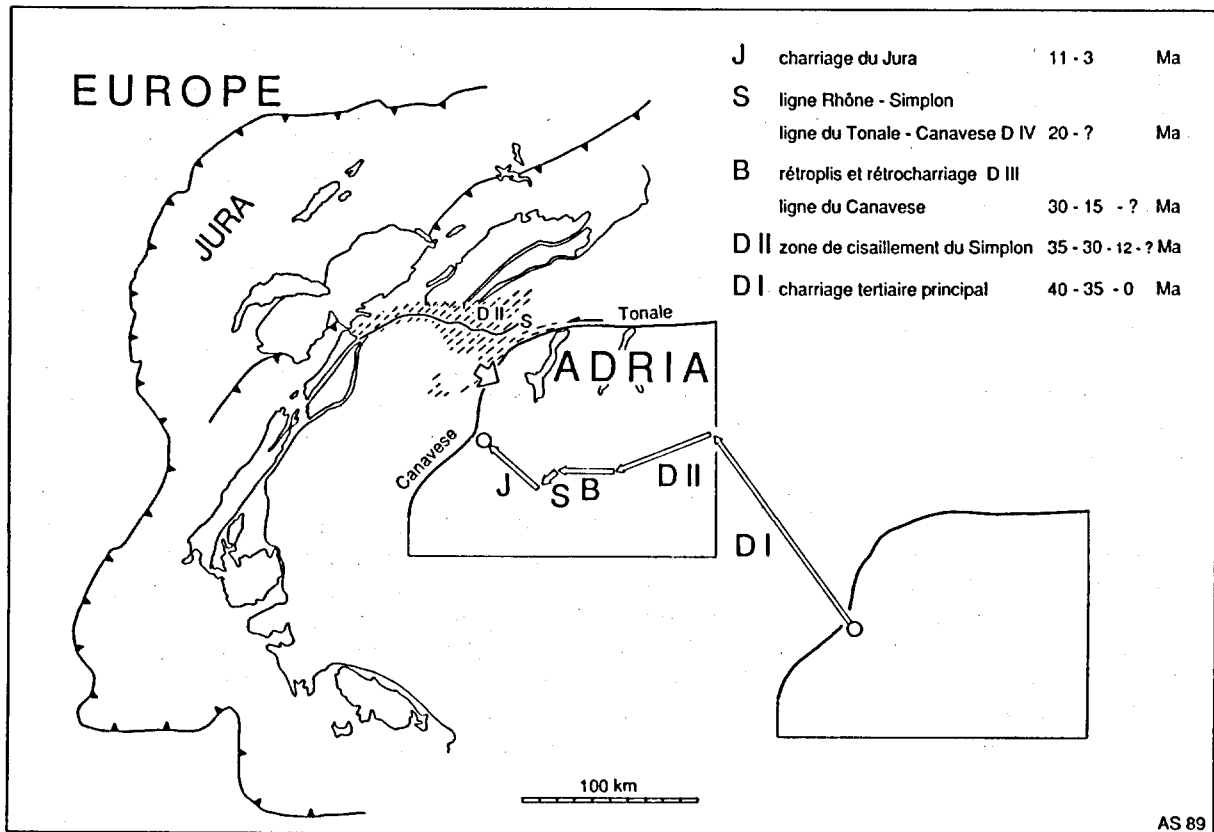


Abbildung 1.3-5: Rekonstruktion der Bewegung der adriatischen Platte (Steck, 1990)





**Abbildung 1.3-6** Neotektonische Deformation im Westalpenbogen (Pavoni, 1986)  
 gestrichelt: Linien maximaler Verkürzung.  
 Balken: Orientierung der Kompressions-Achsen von Erdbebenherdlösungen.

### 1.3.3 Geologische Skizzen und Modellbildungen im Messgebiet

Nach den grossräumigen Bewegungsabläufen, wie sie im vorangegangenen Kapitel geschildert wurden, seien nun deren Auswirkungen auf die gegenwärtigen lokalen geologisch/tektonischen Verhältnisse im Messgebiet beschrieben.

Die frontale penninische Überschiebung unterteilt den Kanton Wallis geologisch in eine nördliche helvetische Zone und in eine südliche penninische Zone. Die Überschiebungslinie läuft quer durch die Schweiz etwa auf der Achse Martigny-Chur. Obergoms, Urserenmulde und Vorderrheintal sind geographischer Ausdruck des während der Alpenbildung zwischen Aar- und Gotthardmassiv subduzierten Krustenteils, dem Tavetscher Zwischenmassiv. Die frontale penninische Überschiebung ist in diesem Bereich als südliche Grenze des Gotthardmassivs anzusehen. Abb. 1.3-7 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Westalpenraumes (Gwinner, 1971). Es ist dort auch erkennbar, dass die penninische Überschiebungslinie die Alpen in externe Strukturen (z.B. Aarmassiv, Helvetikum etc.) und innere (interne) Strukturen (z.B. Penninikum) gliedert. Es ist interessant, festzustellen, dass die Verformung der internen Strukturen früher stattfand als die der externen Strukturen, die Orogenese sich also zeitlich vom Inneren des Alpenbogens nach aussen hin bewegte (Pavoni, 1987). Zur lokalen begrifflichen Orientierung dient die Übersichtskarte in Abb. 1.3-8.

Für die Belange der Modellbildung im Testgebiet 'Turtmann' ist es nun von grosser Bedeutung, dass nicht etwa die Rhein-Rhone-Linie oder die frontale penninische Überschiebung generell als aktuelle aktive Zonen betrachtet werden, sondern die sogenannte Rhone-Simplon-Linie (Steck, 1990, Abb. 1.3-5). Diese Linie entspricht zwar im Westen der penninischen Front, zweigt dann aber, einer älteren Schwächezone über den Simplon folgend, nach Südosten ab. Im Gebiet Domodossola findet diese Linie ihre Fortsetzung in der Centovalli Linie und dann auch in der Randstörung der adriatischen Platte, der Canavese und der Tonale Linie (Insubrische Linie) (Abb. 1.3-8). Auf Grund der im Feld vorgefundenen Lineationen in der duktilen Scherzone rekonstruiert Steck (1990) den zeitlichen und räumlichen Bewegungsablauf der Kollision der adriatischen und der europäischen Platte im westlichen Teil der Zentralalpen (Abb. 1.3-5). Nach seiner Interpretation befindet sich das in Abb. 1.3-8 mit 'Valpelline Depression' bezeichnete Gebiet in einer sog. Transpressionszone. D.h., es tritt eine Kombination von Translation und Kompression auf. So sind deutlich Abschiebungen von einigen Zehntel Millimetern pro Jahr im Bereich der Simplonlinie feststellbar (Soom, 1990, Steck, 1990, Abb. 1.3-9), derweil sich eine dextrale Verschiebung entlang der Rhone-Linie im Bereich des Unterwallis ergibt. Im Gebiet der Aiguilles Rouges und weiter westlich sind dann Aufschiebungen vorherrschend. Burkhard (1988) zeigt ein schematisches Blockmodell des entsprechenden Gebietes. Es verdeutlicht die beschriebenen Bewegungsabläufe (Abb. 1.3-10).



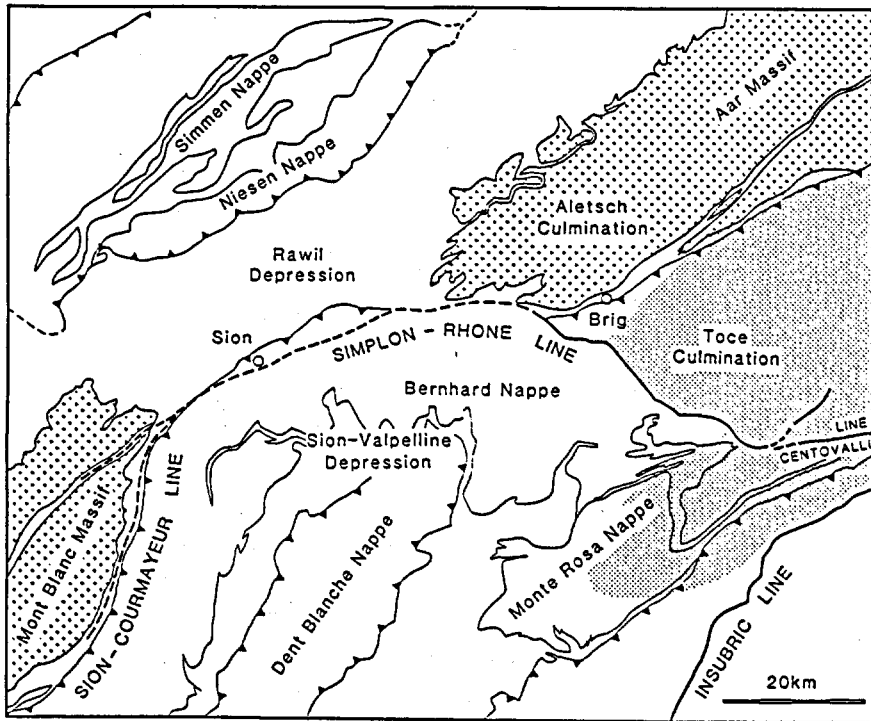


Abbildung 1.3-8: Übersichtskarte der westlichen Zentralalpen.  
 Punktraster = Tertiär amphibolitfazial überprägte Gesteine (Soom, 1990)

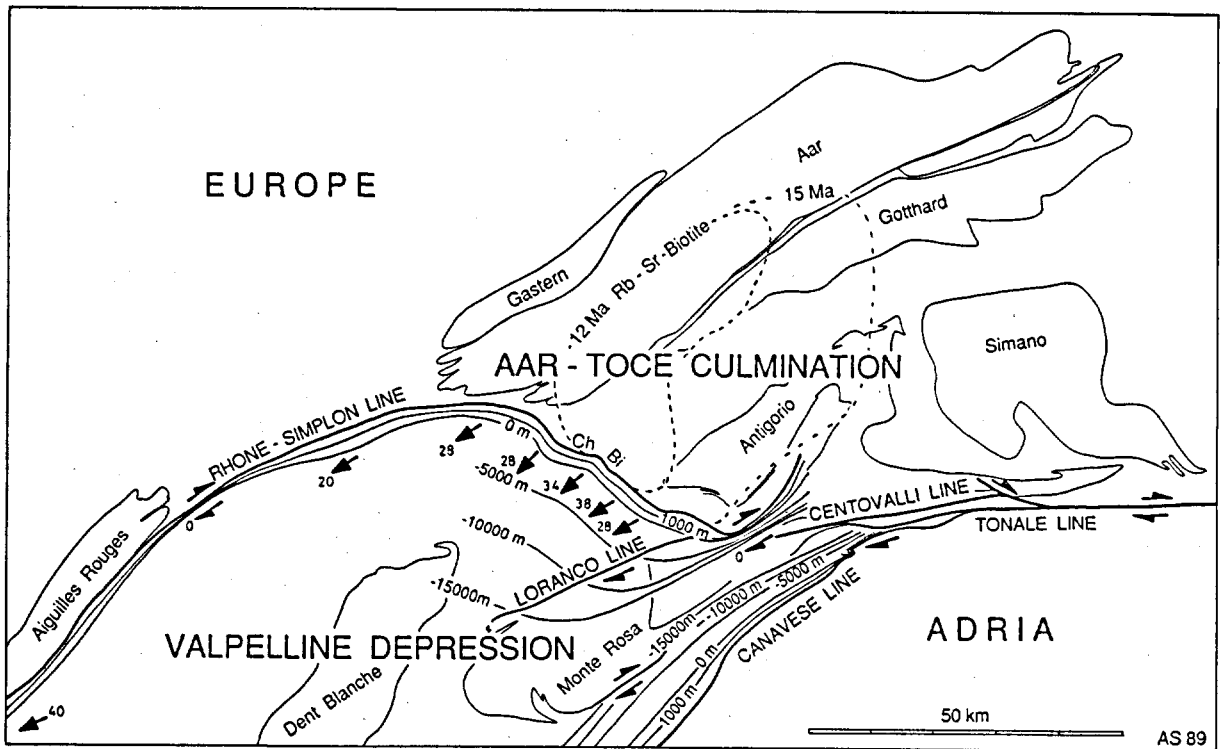


Abbildung 1.3-9: Kollisionszone der Westalpen (Steck, 1990)

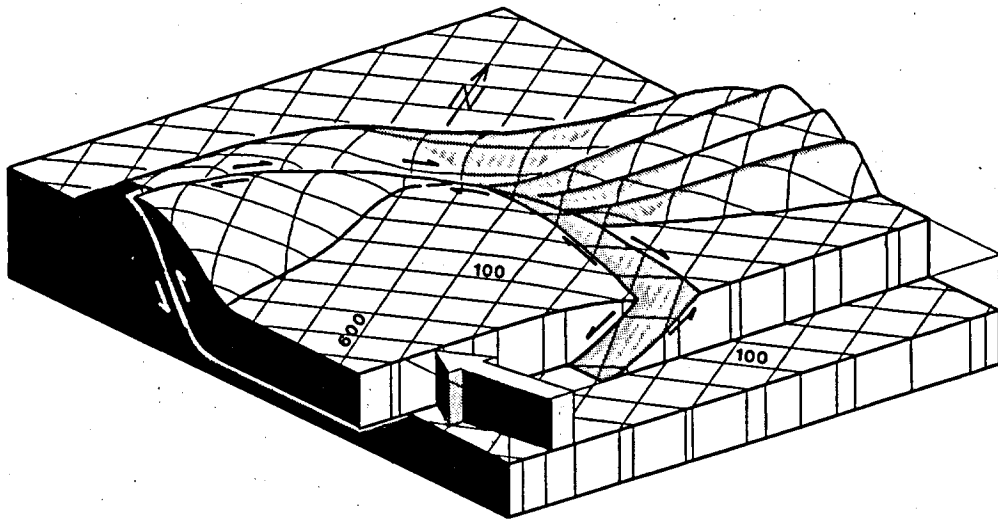


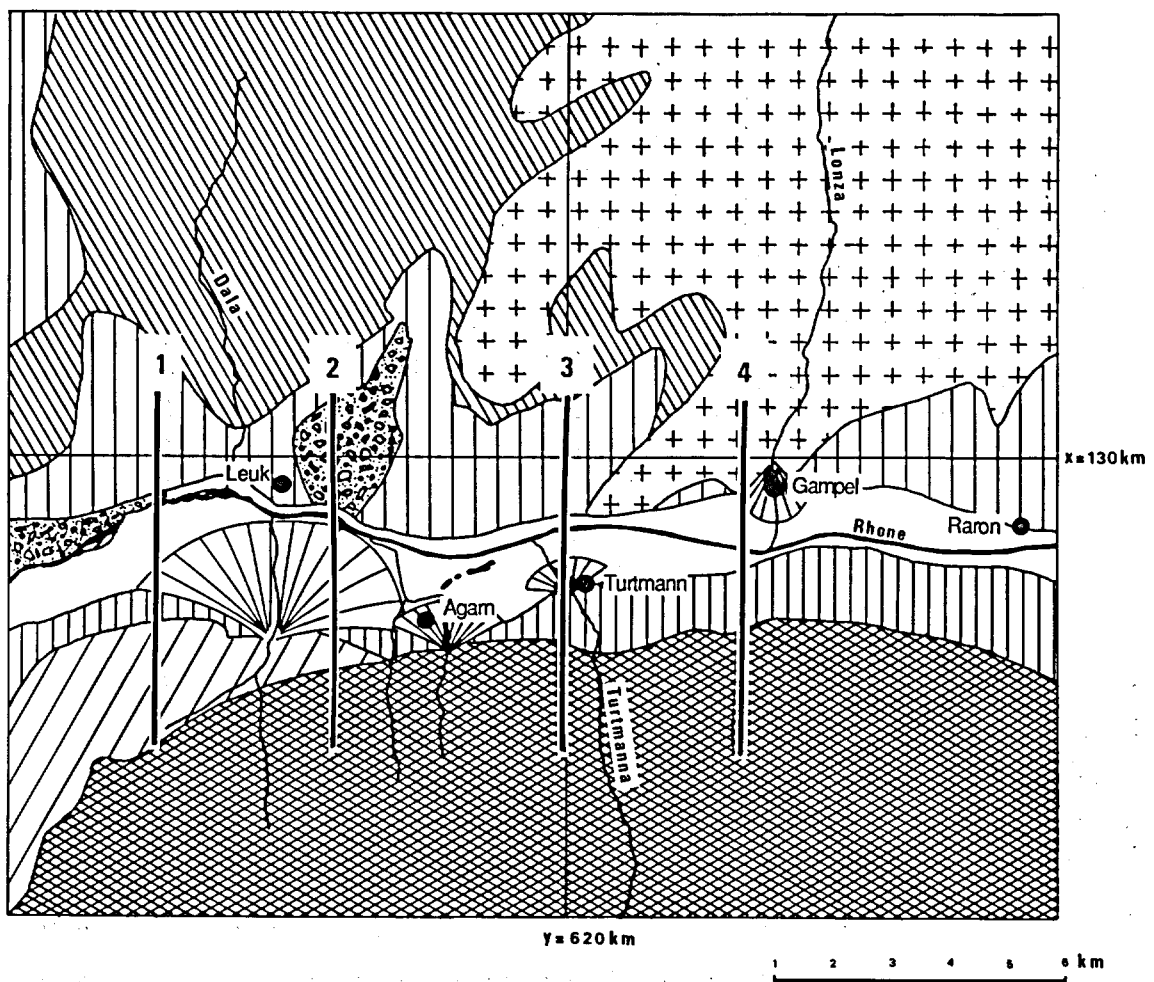
Abbildung 1.3-10: Blockmodell zur Beschreibung der Tektonik im Testgebiet (Burkhard, 1988).

Die lokalen tektonischen Begebenheiten und die eingangs geschilderte erdgeschichtliche Entwicklung prägt auch die geologische Situation im Turtmann-Gebiet.

Im folgenden wird die Geologie des Gebietes etwas detaillierter beschrieben (vergl. Abb. 1.3-8, 1.3-11, 1.3-12).

Im Messgebiet Turtmann gehören zur *helvetischen Zone* das Aarmassiv, sowie seine autochthone bzw. parautochthone Bedeckung, die Malmkalke und die Doldenhorndecke.

Die *penninische Zone* besteht aus verschiedenen Schuppen von Kristallin und Sedimenten. Folgende Unterteilung ist gebräuchlich: Der tiefste penninische Bereich ist die "Zone Sion - Courmayeur". Darüber liegt die "Grosse St. Bernhard - Decke", welche ihrerseits von unten nach oben unterteilbar ist: In eine "Zone Houillère", eine Zone bestehend aus "Pontiskalk", sowie eine "Zone Siviez - Mischabel".



**Abbildung 1.3-11:** Geologische Skizze aus Bernauer, Geiger, 1986 zusammengestellt nach Arbeiten von: M. Burkhard, P.C. Bugnon, E. Dolivo, A. Escher, R. Hantke, R. Jäckli und M. Marthale. Legende s. nächste Seite. 1,2,3,4 Nummern der Profile in Abb. 1.3-12

### Legende zur geologischen Skizze Abb. 1.3-11 und Beschreibung der Gesteine :

Die "Zone Houillère" und die "Zone Sion - Courmayeur" wurden wegen der (dichtemässig) grossen Variation ihrer Gesteine in der geologischen Skizze nicht unterschieden.

Schuttfächer



Bergsturzgebiet



#### Helvetikum



##### **Doldenhorndecke**

Vorwiegend Kalke und Mergel, einige tonige Schiefer, Sandsteine.  
Alter : Jura bis Eocän  
(nach P.C. Bugnon, 1981)



##### **Malmkalk**

Massive Malm - Kalke, Kalke, Sandsteine und Schiefer aus der Dogger - bis Liaszeit, sowie Kalke und Schiefer aus der Kreide.  
(nach P.C. Bugnon, 1981)



##### **Aarmassiv**

Chloritische Gneisse und Amphibolite.  
(nach P.C. Bugnon, 1981)

#### Penninikum



##### **Zone Siviez-Mischabel**

Polymetamorphe Gneisse, Amphibolite und chloritische Schiefer.  
Alter : ante m. Karbon  
permischer Detritus  
Quarzite, Alter : Trias  
(nach M. Marthaler, 1984)



##### **Pontiskalk**

Reine mikritische dolomitische Kalk (- Marmor)  
Alter : Trias  
(nach M. Burkhard , persönl. Mitteilung)



##### **Zone Houillère**

Detritische permo-karbon Gesteine  
Quarzite, Alter : Perm, Trias  
Dolomit und Evaporite, Alter : m. Trias  
(nach M. Marthaler, 1984)

und

##### **Zone Sion - Courmayeur**

Schiefer unbekanntes Alters  
Kalke, Konglomerate, Quarzite, und Schiefer (Flysch) , Alter : Kreide od.  
Trias Karbon - Schiefer, komplexe Trias - Gesteine, Lias - Kalke,  
Konglomerate und Schisto - Quarzite ohne Altersdatierung.

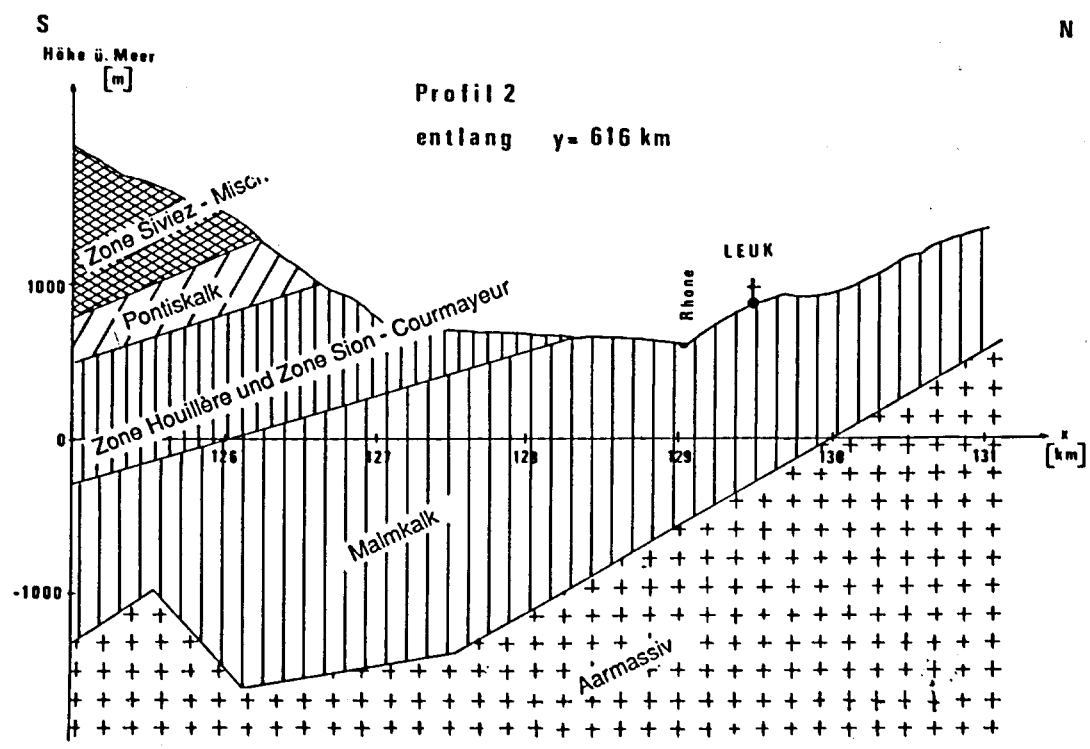
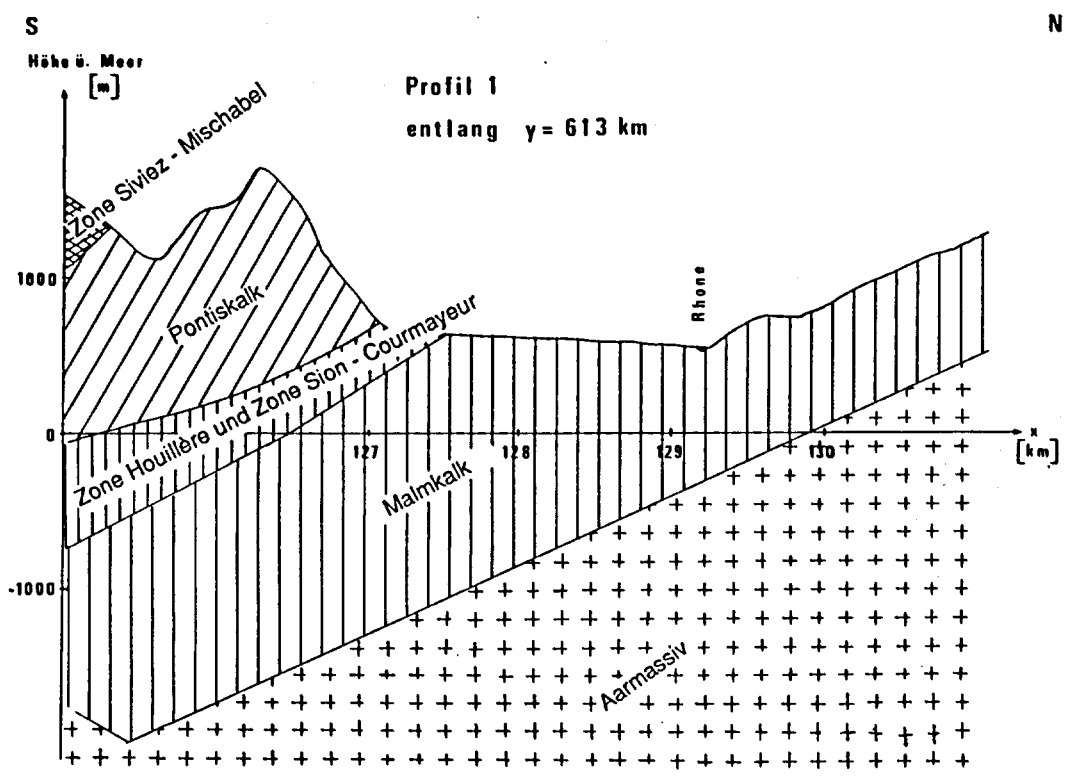


Abbildung 1.3-12a: Stark schematisierte geologische Interpretationen entlang den Profilen 1 und 2 in Abb. 1.3-11. Der Rhone-Sedimenttrog ist nicht eingezeichnet (nach Angaben von M. Burkhard und R. Jäckli).



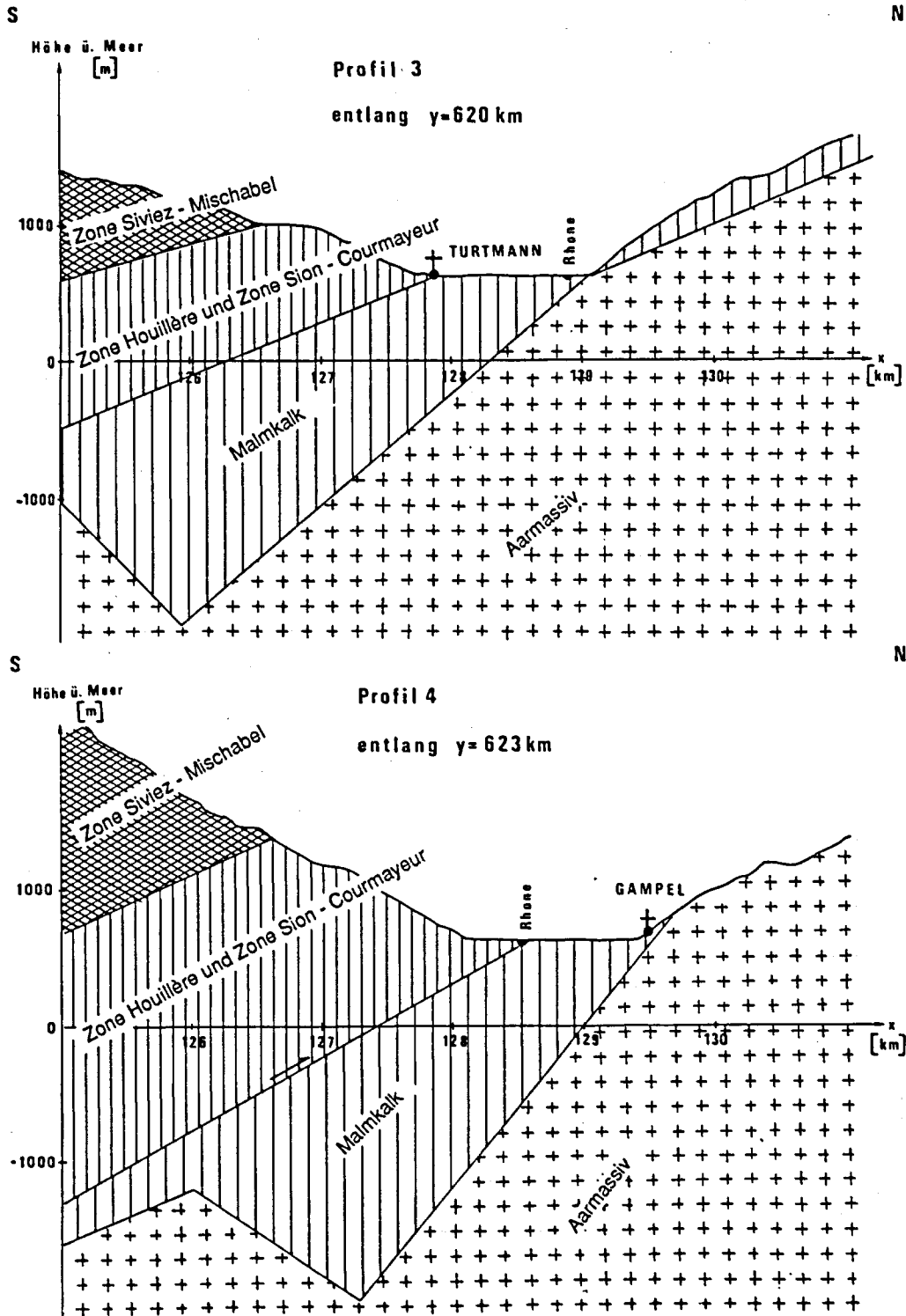
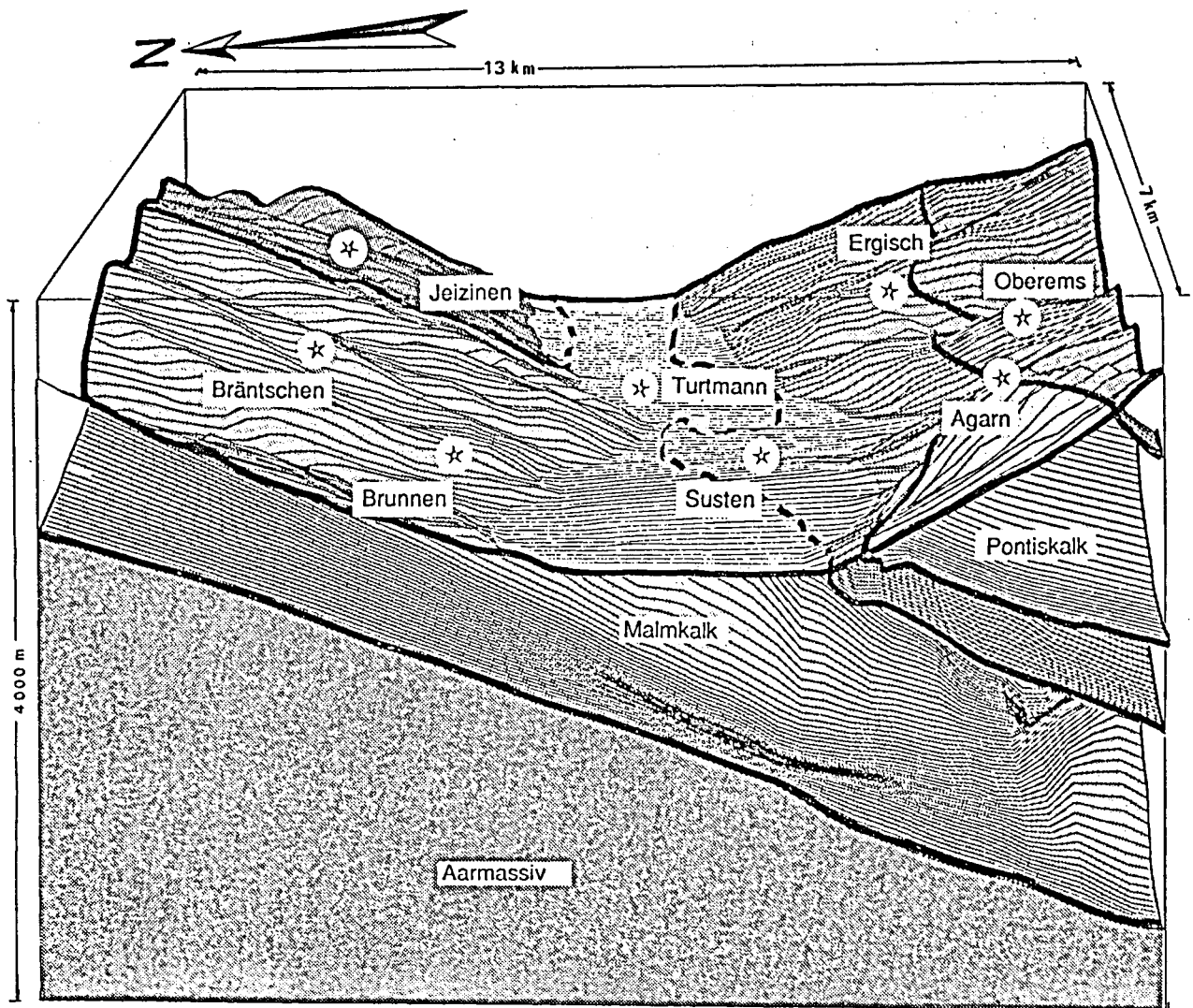


Abbildung 1.3-12b: Stark schematisierte geologische Interpretationen entlang den Profilen 3 und 4 in 1.3-11. Der Rhone-Sedimenttrog ist nicht eingezeichnet (nach Angaben von M. Burkhard und R. Jäckli).

Durch die Interpolation geologischer Informationen und durch das Schneiden der verschiedenen geologisch relevanten Schichtflächen, kann ein dreidimensionales geologisches Modell erzeugt werden (Abb. 1.3-13). Anhand dieses Modells wurden mit strukturspezifischen Gesteinsdichten gravimetrische Reduktionen durchgeführt (Bernauer u. Geiger, 1986). Derartige Modellkonstruktionen können jedoch auch für geologisch-geodynamische Berechnungen und Interpretationen herangezogen werden. Auf Berechnungsmöglichkeiten geodynamischer Art wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.



**Abbildung 1.3-13:** Computergeneriertes 3D-Modell des Testgebietes. Zur Konstruktion wurden geologische Informationen, wie sie in Abb. 1.3-11 und 1.3-12 vorliegen, verwendet (aus Bernauer und Geiger, 1986).

### 1.3.4 Geodynamische Modellierungen

Die vorangegangenen Kapitel hatten zum Ziel, die Fülle an geologischen, tektonischen und seismologischen Indizien zur Beschreibung von krustalen Bewegungsvorgängen anzudeuten. Hinzu kommen die geodätischen Messgrößen, die eine Oberflächenbewegung quantitativ festhalten können. Es ist offensichtlich, dass das Bedürfnis wächst, diese Befunde in einem einzigen erklärenden Modell einzubinden. Das Modell, allerdings, sollte nicht nur die qualitativen und phänomenologischen Befunde richtig wiedergeben, sondern auch quantitative Messungen in befriedigender Masse annähern können. Diese Forderungen machen sowohl intuitive wie auch mathematisch beschreibbare Modellbildungen nötig. Dabei sind zur Gewinnung von quantitativen Aussagen umfangreiche Computerimplementationen von Rechenmodellen unumgänglich. Als wichtiges Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Modellansätze muss die Grösse des Untersuchungsgebietes herangezogen werden. Im Fall der Geodynamik können drei Grössenklassen eingeführt werden:

<i>Global</i>	Untersuchungen des Erdkörpers als Ganzes, globale Plattentektonik, Erdzeiten, Strömungsfelder im Innern der Erde, Dynamoeffekte und ähnliche Problemstellungen.
<i>Regional</i>	Untersuchungen einzelner Orogene, Riftsysteme, Gebirgsketten, Transform-Faults, Grabenstrukturen, Beckenbildungen, postglazialer Rebound
<i>Lokal</i>	Untersuchung lokaler Verwerfungen, Geodynamisch gekoppelte Bau-Deformationen, Rutschzonen, Bergsturzgebiete

Aus der Aufzählung der Beispiele wird klar, dass Generalisierungen neben Verfeinerungen der Modelle entsprechend dem Untersuchungsgegenstand vorgenommen werden müssen. Zur Untersuchung der globalen Plattentektonik ist eine Generalisierung durch einfache Abgrenzungen der Platten zulässig, die Verfeinerung müsste jedoch darin bestehen, das visko-elastische oder plastische Verhalten der Fließbewegung des Erdmantels mitzumodellieren. Dagegen müssen bei der Untersuchung lokaler Verwerfungen, im Sinne einer Verfeinerung, Einflüsse der topographischen Gestalt und die Verästelung der ursprünglich generalisierten Verwerfungslinie in Betracht gezogen werden.

Ein ganz wesentlicher Faktor für die geodynamische Modellbildung ist durch die Zeitspanne, für die dynamische Effekte betrachtet werden, gegeben. Das mechanische Verhalten eines Körpers, ganz besonders des Erdkörpers, hängt von der Dauer und der Grösse der Spannungseinwirkungen ab. Während für kurz dauernde Ereignisse, wie etwa seismische Wellenausbreitung, die typischerweise Perioden unter 60 sec haben, ein elastisches Modell dem Problem gerecht wird, müssen zur Beschreibung langandauernder Vorgänge, wie etwa Lithosphärendeformationen, verursacht durch Mantelströmungen, viskose Modelle herangezogen werden. Scheidegger (Kertz, 1969) klassiert das rheologische Verhalten des Erdkörpers nach drei Periodenintervallen:

Bis 4 Std.	elastisch	Hooke'scher Körper
4 Std. bis 15000 Jahre	viskoelastisch	Kelvin Material
über 15000 Jahre	visko-elastoplastisch	Bingham Material

**Tabelle 1.3-1:** Zuordnung der Zeitintervalle und der entsprechenden Modellkörper  
(aus Kertz, 1969: nach Scheidegger, 1957)

In Tabelle 2 sind einige Modellmaterialien mit den entsprechenden Anwendungsgebieten in der geodynamischen Modellierung aufgelistet. Die Probleme bei der Modellierung ergeben sich nicht nur durch die Berücksichtigung des viskosen Verhaltens des Materials, sondern auch durch unetstetige Ereignisse. So sind viele Bewegungen im lokalen oder regionalen Bereich durch Schwächezonen oder reaktivierte Brüche vorgezeichnet. Vielfach ergeben sich Klüfte oder 'Anschlagflächen', die in Abhängigkeit der Fragestellung nicht immer 'übergangen' werden dürfen. Ebenso ist

I. Grundmaterialien				
Bezeichnung	Mech. Analogon	$\frac{\sigma-\epsilon}{\epsilon-t}$ Diagramm	Relativer Strain $\epsilon$ bei konst. $\sigma$	Beispiele für gewiss. Anwendungen
Euklid – Material			$\epsilon = 0$ für alle $\sigma$	Modelle mit starren Platten (z.B. Minster & Jordan, 1978)
Hooke – Material			$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma$	Biegung von Platten bei Auflast; Bestimmung der Spannungsverteilung (Forsyth, 1980; Richardson, 1978)
Newtonsche Flüssigkeit			$\epsilon = \frac{\sigma}{\eta} t$	Mantelkonvektion; Lithosphärendef. (langzeit) (Richter & McKenzie, 1978; England & McKenzie, 1982)
St. Venant Material			$\epsilon = 0$ für $\sigma < \sigma_0$ $\epsilon$ indefinit = $\sigma \geq \sigma_0$	Vorgänge in Bebenherden
II. Kombinierte Modellmaterialien (Auswahl)				
Bezeichnung	Mech. Analogon	$\frac{\sigma-\epsilon}{\epsilon-t}$ Diagramm	Relativer Strain $\epsilon$ bei konst. $\sigma$	Beispiele für gewiss. Anwendungen
Viskoelast. Mat.	Kelvin- Voigt Material 		$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) \right]$ mit $t_1 = \frac{\eta}{E}$	Erdbeben, Chandler Bewegung (Kertz, 1969)
	verallg. Kelvin Material 		$\epsilon = \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) \right]$ mit $t_1 = \frac{\eta}{E_1}$	Lithosphäre allg. (Hasegawa et al., 1985)
Elastoviskoses (Maxwell –) Material 		$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} t$	Lithosphäre allg.; Erdmantel (Walcott, 1970)	
Burgers – Material 		$\epsilon = \frac{\sigma}{E_2} + \frac{\sigma}{E_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_1}\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_2} t$ mit $t_1 = \frac{\eta_1}{E_1}$		
Elastoplast. (Prandtl –) Material 		$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma$ für $\sigma < \sigma_0$ $\epsilon$ indefinit = $\sigma \geq \sigma_0$	Biegung von Platten an Subduktionszonen (Turcotte & Schubert, 1982)	
Bingham Material 		$\epsilon = \frac{1}{E} \sigma$ für $\sigma < \sigma_0$ $\epsilon = (\sigma - \sigma_0) \frac{t}{\eta} + \frac{\sigma}{E}$ = $\sigma \geq \sigma_0$	Gebirgsbildung (Kertz, 1969)	

Tabelle 1.3-2: Rheologische Modellmaterialien mit ihren Anwendungsgebieten in der Geodynamik (aus: Geiss, 1987)

auch die Kataklyse, das spröde Zerbrechen des Gesteins mit Kohäsionsverlust, im Gegensatz zur duktilen Deformation, keine stetige Ereignisfolge mehr. Aber auch bei einer rein duktilen (kristall-plastischen) Verformung können erhebliche Komplikationen auftreten, wenn druck- und temperaturabhängige Phasenübergänge auftreten. Man denke etwa an (partielle) Anatexis (Wiederaufschmelzung) bei Vulkanausbrüchen oder an Druckverflüssigungen, die beim Erreichen der gesteinsabhängigen kritischen Druck- und Temperaturbereiche auftreten. Dies zeigt auch, dass die Gesteinsparameter, insbesondere die Viskosität stark temperatur- und druckabhängig sind. Da nun die Gesteinstemperatur örtlich variiert, dürfen auch die Gesteinsparameter nicht als konstant angenommen werden. Von Interesse ist dabei der vertikale Temperaturgradient, der im Mittel an der Erdoberfläche ca. 33° pro Km Tiefe beträgt. Fleitout, Yuen (1984) zeigen Berechnungen für die Lithosphäre mit einer druck- und temperaturabhängigen Viskosität. In Abb. 1.3-14 ist ein modellhafter Verlauf der Viskosität gezeigt, wie er z.B. für die Lithosphärenmodellierung von Werner (1990) zur Berechnung von Krustenbewegungen im Alpenbereich verwendet wurde.

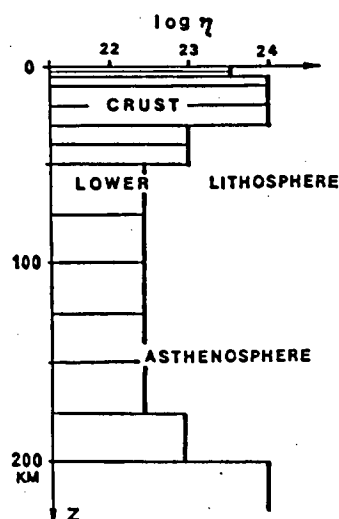


Abbildung 1.3-14: Tiefenabhängiges Viskositätsprofil (Werner, 1990)

In der abstrahierten Problemstellung geht es also darum, eine Lösung der Elastischen Gleichungen oder im Falle Newtonscher Materialien Lösungen der Navier-Stokes'schen Gleichungen zu finden. Dabei können, im komplizierten Falle, auch Wärmetransportprobleme und örtlich wie auch zeitlich variierende Gleichungsparameter auftreten. Zusätzlich sind diverse Randbedingungen, wie etwa vorgegebene Verschiebungsvektoren, bekannte Spannungen oder Schweremessungen zu erfüllen.

Ein effizientes und kraftvolles Instrument zur numerischen Lösung dieser Probleme ist die Methode der Finiten Elemente. Sie ist im Vergleich zu anderen Modellbeschreibungen und Lösungsmethoden, etwa der Methode der finiten Differenzen, als flexibler zu bezeichnen. Es gibt viele internationale Studien und Arbeiten zur numerischen Geodynamik, z.Bsp. versuchen Neugebauer et al. (1980) durch numerische Rechnungen die aktuellen Alpenhebungen zu modellieren. Werner (1980) führt ähnliche Rechnungen zur Alpendynamik aus. Dort stellen allerdings geothermische Daten eine wesentliche Eingangsgröße dar. Am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ werden gegenwärtig Versuche unternommen, um mit Hilfe der FEM Spannungszustände und Deformationen der Kruste zu modellieren (Geiger, 1991, 1992). Vorerst werden noch elastische Modelle gerechnet. Das Augenmerk konzentriert sich vor allem auf den Alpenraum und lokale Gebiete davon (Geiger et al., 1985, 1988). Zudem sind GPS-Kampagnen in Griechenland (Kahle et al., 1991, Billiris et al., 1990) und der West-Türkei (Marti et al., 1990) im Gange, um Randbedingungen für das Deformationsfeld festzulegen, die dann wiederum in die Rechenmodelle einfließen (Bohren, 1989). Die Bewegungen hängen im tektonischen Sinne stark zusammen, so dass der ganze Mittelmeerraum selbst für die Alpenbewegungen von Interesse ist (Müller, St. and Kahle, 1992). In ersten Versuchen wurde das FEM-Programm-Paket 'FLOWERS' der ETH-Zürich (Anderheggen et al., 1981) verwendet. Für die Berechnungen auf PC steht das TPS10 (Helbling, T-Programm, Aarau) zur Verfügung.

Ein interessantes Indiz für tektonische Aktivitäten im Alpenraum sind die durch wiederholtes Nivellement festgestellten Hebungen des Alpenkörpers (Gubler, 1991). Ein Ziel ist es, diese Hebungen anhand von Modellvorstellungen rekonstruieren zu können. Dazu wurde ein Blockmodell der interessierenden Region auf Grund der Topographie, der Mittellandsedimente und der Krustenuntergrenze (Abb. 1.3-15) erstellt (Mégel, 1988). Abb. 1.3-15 zeigt das FE-Blockmodell. Die Randbedingungen des Modells sind in Abb. 1.3-17 dargestellt.

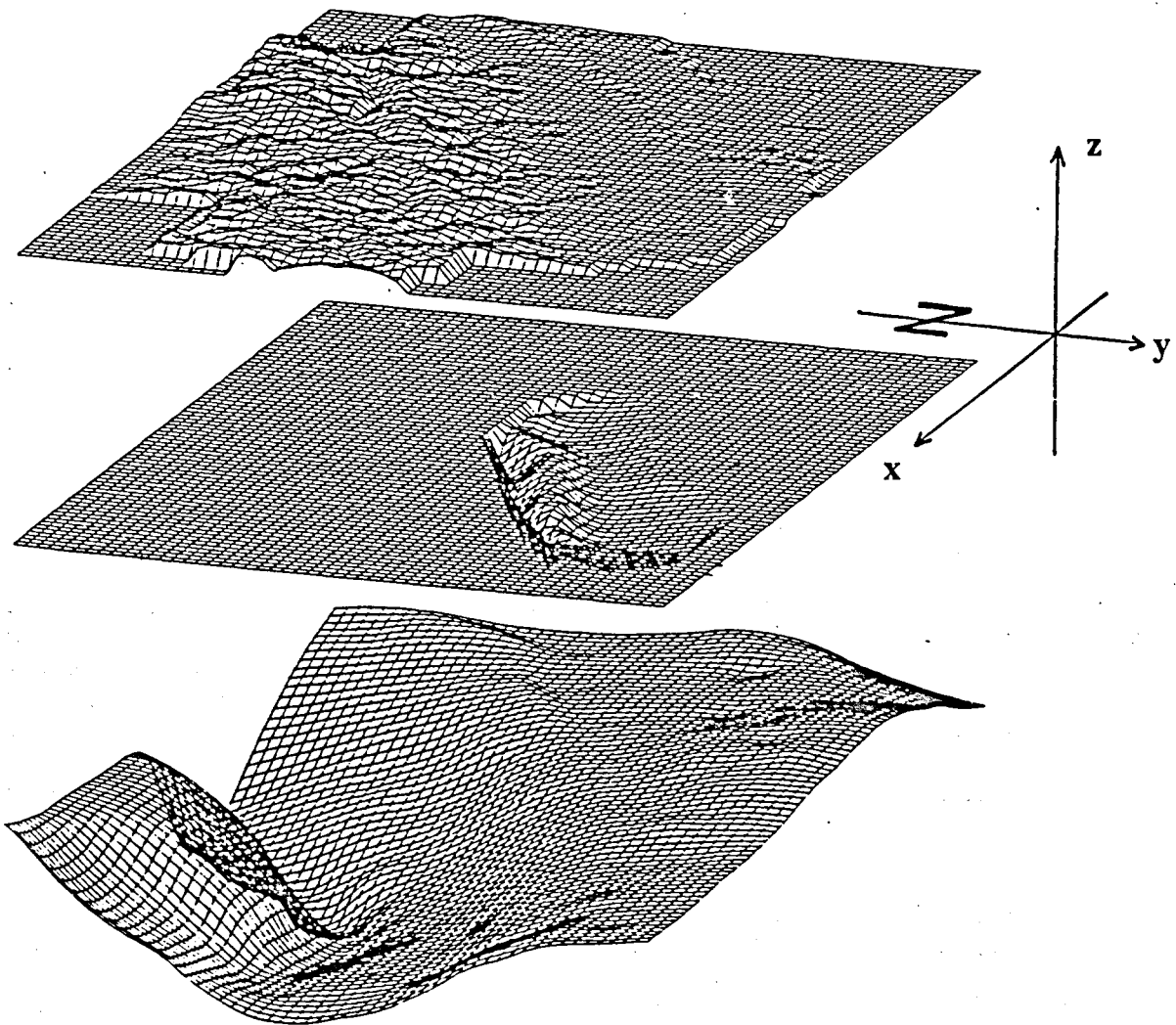


Abbildung 1.3-15: Perspektivische Darstellung der Topographie, Mittellandsedimente und der Krustenuntergrenze. (Mégel, 1988)

Die Vorgabe der Randverschiebungen basieren auf Annahmen über die Verschiebung der Adriatischen Platte im Süden. Die Europäische Platte wurde hier als fest angenommen. Interessant sind die resultierenden Hebungen (Abb. 1.3-18), die ähnliche Beträge und Verteilungen zeigen wie die gemessenen Werte (Abb. 1.3-19).

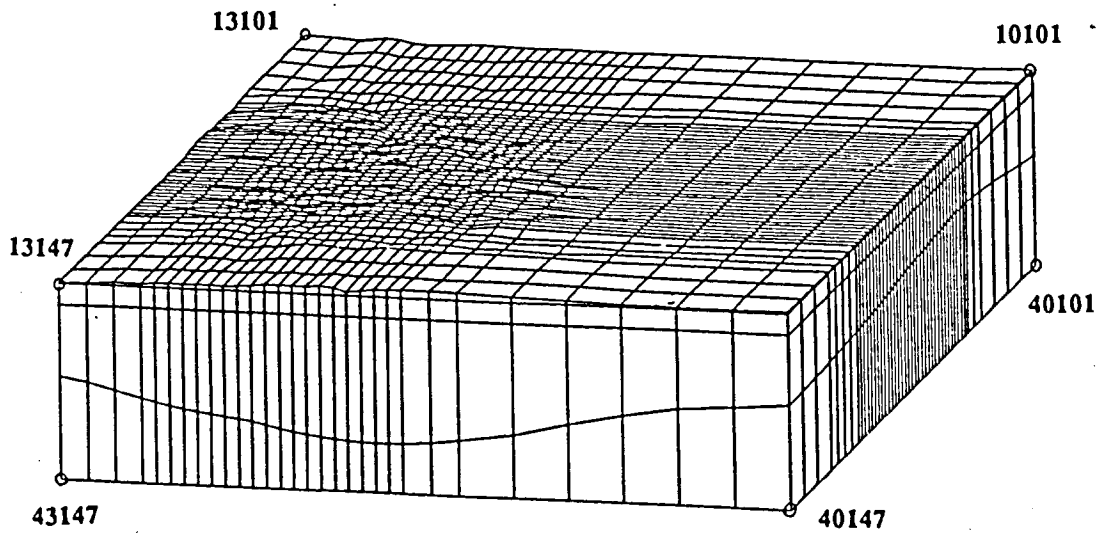


Abbildung 1.3-16: FE Blockmodell des Zentral-Alpengebiet (Mégel, 1988)

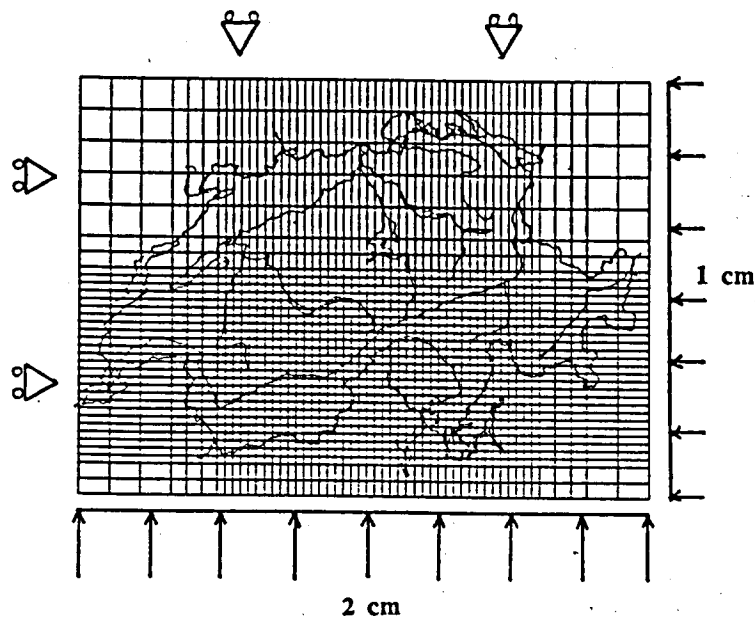
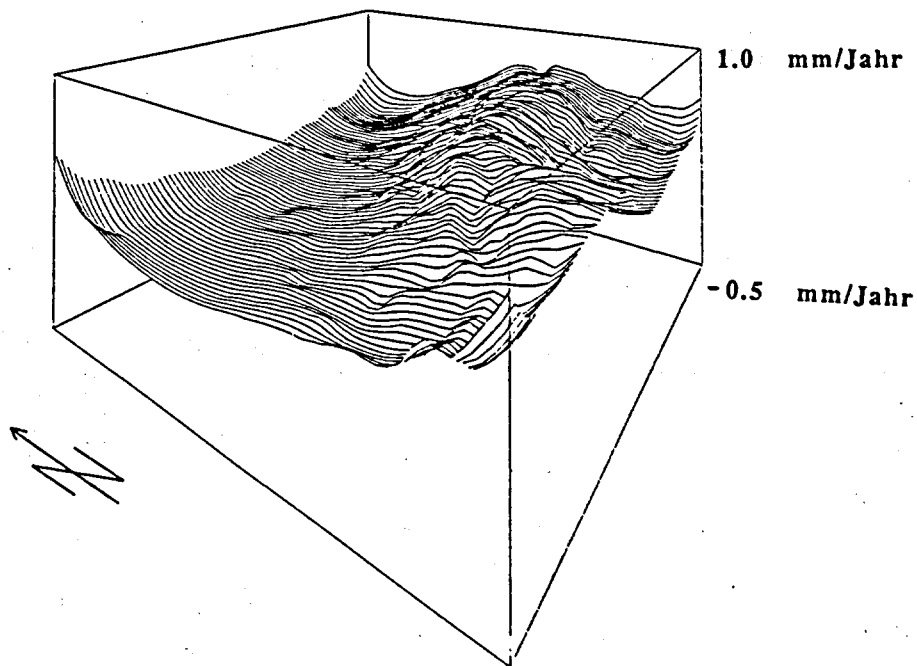
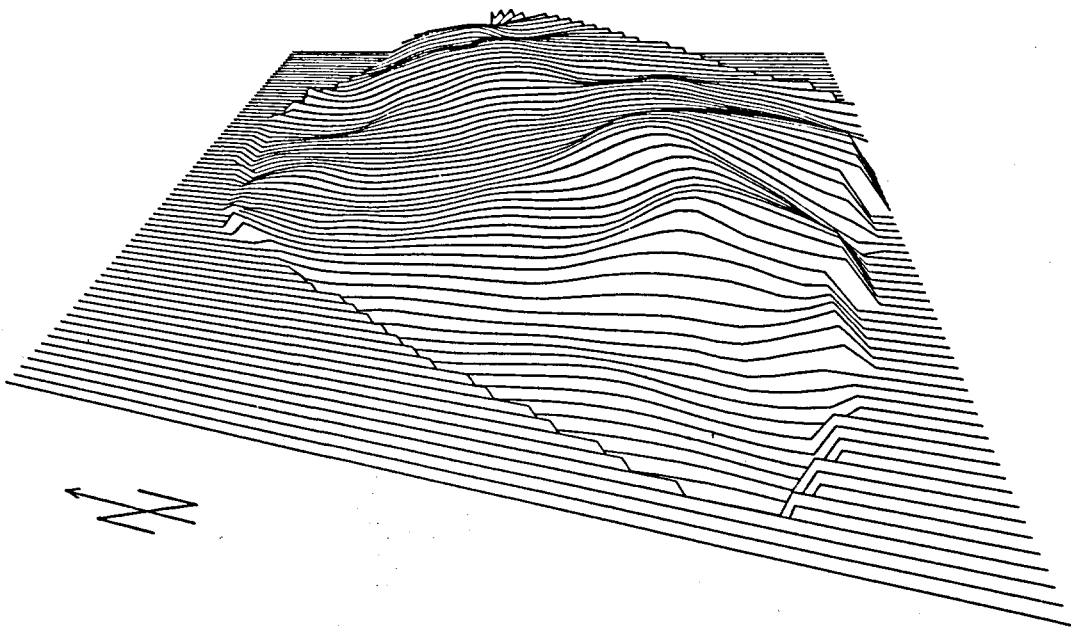


Abbildung 1.3-17: Die Randbedingungen sind einer generalisierten Bewegung der adriatischen Platte angepasst (Mégel, 1988)



**Abbildung 1.3-18:** Aus der FEM-Berechnung bestimmte Hebungsraten (Mégel, 1988)

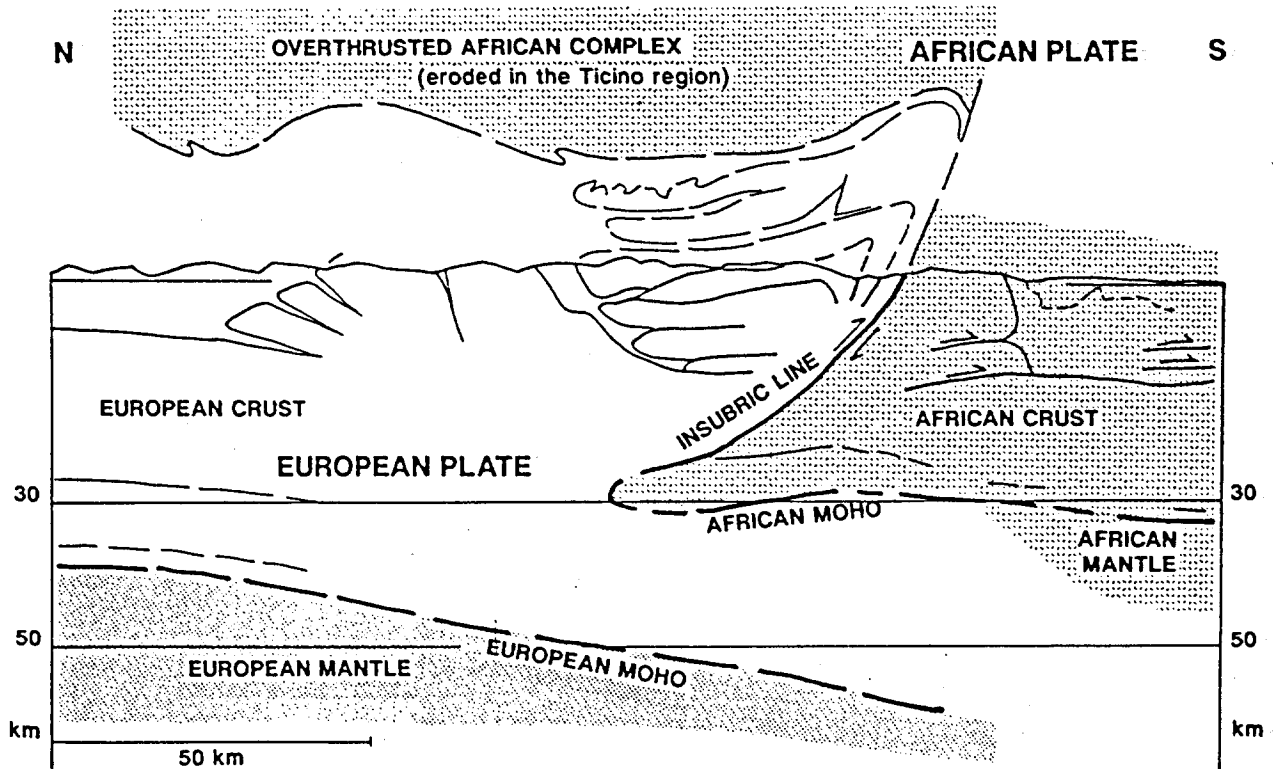


**Abbildung 1.3-19:** Rezente Hebungsraten interpoliert aus Nivellementdaten von Gubler (1991)

Ein weiterer Versuch zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Materialeigenschaften. Der Einfachheit halber wird lediglich ein Querschnitt in NW-SO Richtung durch das Alpengebiet betrachtet (Straub, 1990). Als Grundlage zum Aufbau des Modells dienten erste geologische Interpretationen (Abb. 1.3-20) von seismischen Messungen, die im

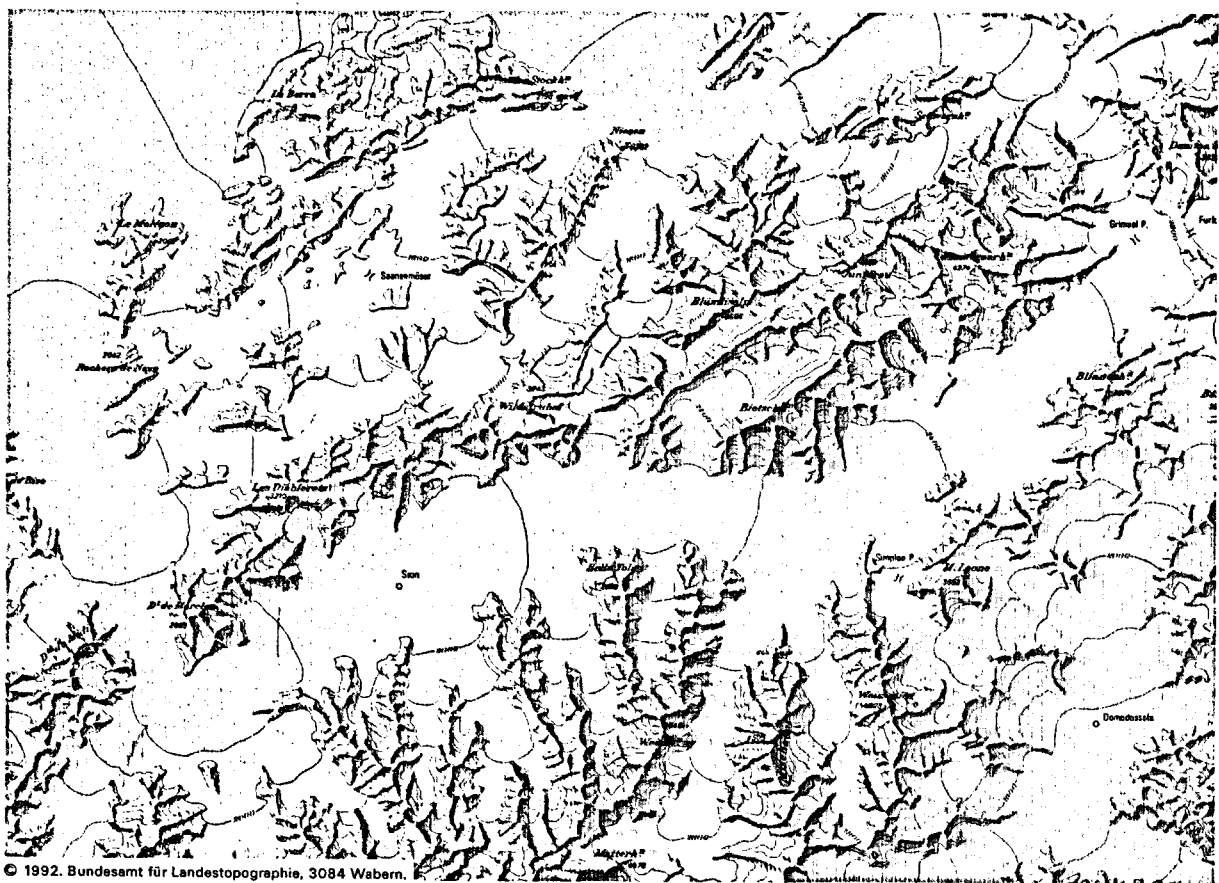


Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes (NFP20) 'Geologische Tiefenstruktur der Schweiz' zur Erforschung des Alpenuntergrundes durchgeführt wurden. Die ganze Struktur wurde durch Zusammenfügen von entsprechenden Bauteilen, jeweils mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln und Dichten versehen, aufgebaut. Die Bauteile wurden entsprechend den Schwächezonen der 'Urserenmulde', respektive der 'Insubrischen Linie', mit speziell tiefen Elastizitätsmoduln eingebaut. Das Ziel war es, die Wirkung des "Vortriebs" des 'afrikanischen Keils' auf die Oberflächendeformationen zu analysieren. Insbesondere sollte der Effekt dieser zwei Schwächezonen, die damit zu potentiellen Verschiebungsflächen werden, studiert werden.



**Abbildung 1.3-20:** Geologische Zusammenstellung erster Ergebnisse seismischer Messungen im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms 20, 'Geologische Tiefenstruktur' (Heitzmann, 1991)

Als zusätzlicher Aspekt wurde die Eisbelastung während der letzten Eiszeit, respektive die Entlastung der Kruste seit der Eiszeit, in das Modell eingearbeitet. Dabei geht man von der einfachen Annahme aus, dass die Kruste durch die Auflast des Eises eingedellt und komprimiert wird und nach dem Schmelzen wieder 'zurückfedert'. In diesen Rechnungen wurde elastisches Verhalten modelliert, was realistischerweise durch plastische Berechnungen ersetzt werden müsste. Die Gletscher der letzten Eiszeit (Würmeiszeit) sind in den vergangenen 15000 Jahren zum grössten Teil abgeschmolzen. Die Eisüberdeckung reichte bis zum Schwarzwald und weit über den Bodensee hinaus (Abb. 1.3-21). Die Eisdicken erreichten in den Tälern der Zentralalpen 1000 m, was einer Auflast von ungefähr 800 Tonnen/m<sup>2</sup> entspricht. Der elastische Response auf die Abschmelzung des Eises ist in Abb. 1.3-22 festgehalten.



**Abbildung 1.3-21:** Die Schweiz während der letzten Eiszeit (Würmeiszeit, vor ca. 15000 Jahren). Das Wallis mit dem Gebiet 'Turtmann' ist (östlich von Sion) deutlich zu erkennen. Ausschnitt aus Karte 6 des Schweizer Atlas.

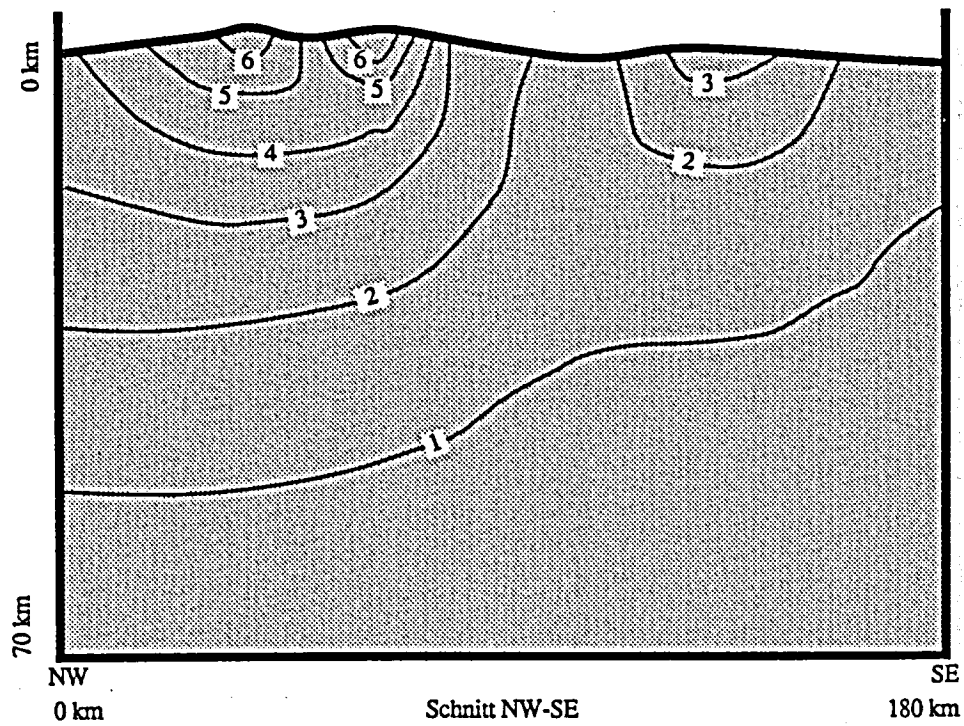


Abbildung 1.3-22: Hebung (elastischer Response) (m) bewirkt durch das Abschmelzen der Gletscher nach der Würmeiszeit (Straub, 1990)

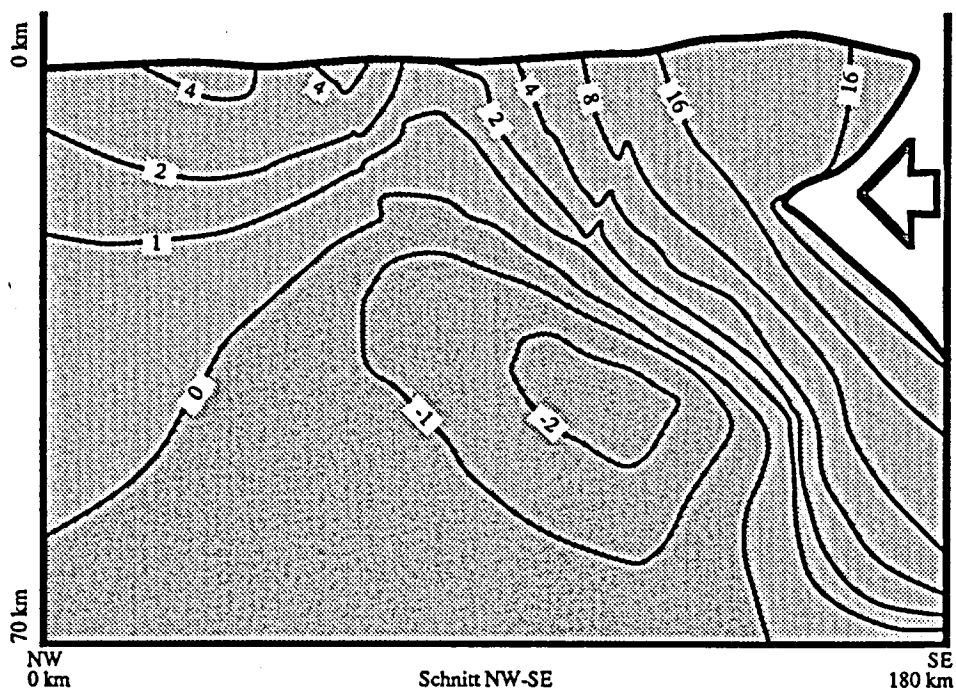


Abbildung 1.3-23: Gesamthebung (m) bewirkt durch den Einschub (max. 120m) der afrikanischen Kruste. Die Schwächezonen machen sich durch (Nahezu)-Diskontinuitäten in den Hebungslinien bemerkbar (Straub, 1990)

Neben den Verschiebungen sind die Spannungsverhältnisse auch aussagekräftig in Bezug auf die Detektion allfälliger seismisch aktiver Gebiete. Auffallend ist, dass die Spannungen in keiner Weise homogen verlaufen. An der Oberfläche sind sowohl bei Schub- als auch bei Normalspannungen deutlich Zonen mit sehr kleiner Kompression, z.T. Extension und solche mit sehr starken Kompressionen auszumachen. Die Spannungsbeträge liegen in diesem Beispiel relativ hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der angenommene jährliche Schub von ca. 8 mm über 15000 Jahre elastisch akkumuliert wurde. Dissipative Energieverluste durch plastisches Verhalten und Spannungsrelaxationen durch Bruchvorgänge wurden durch die elastische Modellierung unterdrückt. Betrachtet man jedoch die jährlichen Akkumulationsraten der Spannungen, so liegen die Werte im interessierenden Gebiet an der Oberfläche bei einigen kPa pro Jahr, was durchaus vernünftig erscheint. Durch mikroseismische Ereignisse, die auch im Alpenraum häufig auftreten, können solche Akkumulationen wieder vernichtet werden.

### 1.3.5 Zusammenfassung

Das Testnetz-Turtmann kann mit guten Gründen nicht nur als geodätisches Testnetz, sondern auch als geodynamisches Kontrollnetz bezeichnet werden. Die Punktgenauigkeiten geben zur Hoffnung Anlass, Verschiebungen im Bereich von wenigen mm detektieren zu können. Die prognostizierten Beträge dürften jedoch nur im optimistischsten Fall in der Grössenordnung von mm/Jahr liegen.

## Literatur

- Anderheggen, E., G. Bazzi, H. Elmer, T. Friedrich, H. Maag, J. Theiler (1981): FLOWERS User's Manual. *Institut für Informatik, ETH-Zürich.*
- Berckhemer, H., K. Hsü (Eds.) (1982): Alpine-Mediterranean Geodynamics. *Geodynamics Series, Vol 7, American Geophysical Union, Washington.*
- Bohren, M. (1989): Geodynamische Untersuchungen in Westgriechenland. *Diplomarbeit, Betr. A.Geiger, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Zürich.*
- Bernauer, I., A. Geiger (1986): Lokale Schwerfeldbestimmung und gravimetrische Modell-rechnungen im Satelliten (GPS)-Testnetz "Turtmann" (Wallis). *Geodätisch - geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 38, p.106.*
- Billiris, H., G. Corrado, H. Drewes, H.-G. Kahle, K. Kaniuth, M. V. Müller, St. Mueller, D. Paradissis, K. Stuber, , H. Tremel, G. Veis, G. Verrone, S. Zerbini (1992): Monitoring West Hellenic Arc Tectonics and Calabrian Arc Tectonics ("WHAT A CAT") using the GPS. *AGU Monograph, Crustal Dynamics Project, in press.*
- Büchi, U. P. und Trümpy, R. (1976): Bemerkungen zum geologischen Profil längs der Geotraverse Basel - Chiasso, *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 56.*
- Bugnon, P. C. (1981): Géologie des racines helvétiques dans la région de Loèche (Valais), *Bull.Soc. Vaud. Sci. Nat. N°395 Vol75, S.201 - 206.*
- Burkhard, M. (-1991): Universität de Neuchatel, Institut de Géologie:*Verschiedene persönliche Mitteilungen.*
- Burkhard, M. (1986): Déformation des calcaires de l'Helvétique de la Suisse occidentale (Phénomènes, mécanisme et interprétations tectoniques). *Revue de géologie dynamique et de géographie physique, Vol. 27, Fasc. 5, p. 281-301, Paris.*
- Burkhard, M. (1986): L'Helvétique de la bordure occidentale du massif de l'Aar (évolution tectonique et métamorphique). *Eclogae geol. Helv. Vol.81/1, p. 63-114.*
- Burkhard, M. (1988): Horizontalschnitt des Helvetikums der Westschweiz auf 2500 m zwischen Mt.Blanc- und Aar-Massiv (Rawil-Depression). *Geologische Berichte, Nr. 4, Bundesamt für Umweltschutz, Landeshydrologie und -geologie.*
- Closs, H., P. Giese, V. Jacobshagen (1983): Alfred Wegeners Kontinental-Verschiebung aus heutiger Sicht. *In: Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung: Ozeane und Kontinente, Ihre Herkunft, ihre Geschichte und Struktur. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, ISBN 3-922508-24-3, pp. 40-53.*
- DeMets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus, S. Stein (1990): Current Plate Motions. *Geophys. J. Int., 101, pp. 425-478.*
- Dolivo, E. (1982): Nouvelles observations structurales au SW du massif de l'Aar Visp et Gampel. *Thèse, Faculté des Sciences, Université de Lausanne. p. 82.*
- DuBois, L., L. Levato, J. Besnard, A. Escher, R. Marchant, R. Olivier, M. Ouwehand, S. Sellami, A. Steck, J.J. Wagner (1990): Pseudo-3D study using crooked line processing from the Swiss Alpine western profile - Line 2 ( Val d'Anniviers-Valais). *Tectonophysics, 173, 31-42.*
- Durney, D. W. (1972): Deformation History of the Western Helvetic Nappes (VS), Thesis University of London.
- Eckhardt, Funk, Labhart (1983): Postglaziale Krustenbewegungen an der Rhein-Rhone Linie, *VPK 2/83*
- Elmiger, A. (1990): Alpentraverse Gotthard. *Bericht z.h. SGK, 144. Sitzung der SGK, 9.11.90, Bern.*
- Fleitout, L., D. A. Yuen (1984): Secondary Convection and the Growth of the Oceanic Lithosphere. *Physics of the Earth and Planetary Interiors, 36, 181-212.*
- Geiger, A., H.-G. Kahle, E. Gubler (1985): Recent Crustal Movements in the Alpine-Mediterranean Region Analysed in the Swiss Alps. *In: Int. Symp. on Recent Crustal Movements, Tectonophysics, Vol. 130, p. 289-298.*
- Geiger, A., T. Mégel, H.-G. Kahle (1988): Three Dimensional Modeling of Recent Crustal Movements of the Swiss Alps. *Pres. at NASA's Crustal Dynamics Project, 17.-21. Oct., Munich.*
- Geiger, A. (1991): Geodynamik: Ein Anwendungsgebiet für die FEM ? *In: 11. Reutlinger Arbeitstagung Finite Elemente in der Praxis. Computergestütztes Berechnen und Konstruieren, pp. 297-324, 11./12. April, Reutlingen.*
- Geiger, A., H.-G. Kahle, M.V. Müller, St. Müller, M. Baer, N. Deichmann, D. Werner (1992): Earth's Crust and Upper Mantle Structure and Its Influence On Recent Crustal Deformation. *Pres. at European Geophysical Society Meeting, April, Edinburgh.*

- Geiss, E. (1987): Die Lithosphäre im mediterranen Raum. Ein Beitrag zu Struktur, Schwerefeld und Deformation. *Deutsche Geodätische Kommission, Heft Nr. 332, Reihe C, p. 115.*
- Gubler, E. (1991): First Order Levelling Net and Recent Crustal Movements. *Report on the Geodetic Activities in the years 1987 to 1991, Swiss Geodetic Commission.*
- Gwinner, M. P. (1971): Geologie der Alpen, Stratigraphie, Paläogeographie, Tektonik. *E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p. 477.*
- Hügi, TH. (1956): Vergleichende petrologische und geochemische Untersuchungen an Graniten des Aarmassivs, Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, N. F. 94.
- Heitzmann, P. (1989): In den Schweizer Alpen sind Europa und Afrika verzahnt, *NZZ 29. 11. 1989*
- Heitzmann, P. (Ed.) (1991): Tectonics and deep structure of the western and southern Swiss Alps - An excursion guide. *NFP20, Bulletin 9, Landeshydrologie und -geologie, Bern*
- Jäckli, R. (1950): Geologische Untersuchungen in der Sturzzone der Mischabeldecke zwischen Réchy, Val d'Anniviers und Visp, *Eclogae geol. Helv. Vol. 43/1, S. 32-93.*
- Kahle H-G, M.V. Müller, G. Veis, H. Billiris, D. Paradissis. (1991): Monitoring recent crustal movements by GPS: The West Hellenic Arc GPS Project. *General Assembly of IUGG, IAG Symposium GM5, August 19, Vienna.*
- Kahle H-G., Müller St. (1984): Geodetic assessment of kinematic processes in the Alps. *Annales Geophysicae 1984, 2, 3, 229-234*
- Kasahara, K. (Ed.) (1987): Recent Plate Movements and Deformation. *Geodynamics Series, Vol. 20. American Geophysical Union, Washington, Publication No. 0137 of International Lithosphere Program.*
- Kertz, W. (1969): Einführung in die Geophysik I, BI-Hochschultaschenbuch Bd. 275, 1969
- Laubscher, H.P. (1983): Der Bau der Alpen. In: *Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung: Ozeane und Kontinente, Ihre Herkunft, ihre Geschichte und Struktur. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, ISBN 3-922508-24-3, pp. 144-157.*
- Marchant, R., A. Steck (1991): The geology of the Simplon massif and the lower Penninic nappes. In: *Heitzmann (ed.), NFP20, Bulletin 9, Aug., 1991.*
- Marthaler, M. (1984): Géologie des unités penniques entre le val d'Anniviers et le val de Tourmagne (Valais), *Eclogae geol. Helv. Vol. 77/2, S. 395 - 448.*
- Marti, U., H.-G. Kahle, A. Aksoy, R. Deniz (1991): GPS-Projekt Marmara. Dokumentation der ersten Messkampagne September 1990. *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht 179.*
- Mégel, Th. (1988): Die Anwendung der FEM auf die Dynamik der Alpen. *Diplomarbeit, Betr. Kahle/Geiger, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Zürich.*
- Minster, B., T.H. Jordan (1978): Present-day plate motions. *J. geophys. Res., 83, 5331-5354.*
- Mueller, St., H.-G. Kahle (eds.) (1982): Schwere-Anomalien und isostatische Modelle in der Schweiz. *Schweizerische Geodätische Kommission, Geodätisch - geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 35, p. 169.*
- Mueller, St. (1984): Dynamic processes in the Alpine Arc, *Annales geophysicae. 2, 2, 161-164*
- Mueller, St. and H.-G. Kahle (1992): Crust-Mantle evolution, structure and dynamics in the Mediterranean-Alpine region. *AGU Monograph, Crustal Dynamics Project, in press.*
- Neugebauer, H. J., R. Brötz, L. Rybach (1980): Recent Crustal Uplift and the Present Stress Field of the Alps Along the Swiss Geotraverse Basel-Chiasso. *Eclogae geol. Helv. Vol. 73/2, 489-500.*
- Pavoni, N. (1980): Comparison of Focal Mechanisms of Earthquakes and Faulting in the Helvetic Zone of the Central Valais, Swiss Alps. *Eclogae geol. Helv. Vol. 73/2, 551-558.*
- Pavoni, N. (1986): Regularities in the pattern of major fault zones of the earth and the origin of arcs. In: *F.C. Wezel (Ed.): The origin of arcs. Elsevier, Amsterdam.*
- Pavoni, N. (1987): Neotectonic Deformation of the Alpine Fold Belt in the Central and Eastern Mediterranean and Neighbouring Regions. In: *Kasahara, K. (Ed.): Recent Plate Movements and Deformation. Geodynamics Series, Vol. 20. American Geophysical Union, Washington, Publication No. 0137 of International Lithosphere Program.*
- Pavoni, N., Ph. Roth (1990): Seismicity and seismotectonics of the Swiss Alps. Results of microearthquake investigations 1983-1988. *Mém. Soc. géol. France, N.S., 156, 129-134.*

- Siever, R. (1987): Einführung in die Dynamik der Erde. In: *Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung: Die Dynamik der Erde. Bewegungen, Strukturen, Wechselwirkungen. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, ISBN 3-922508-40-5, pp. 8-18.*
- Soom, M. A. (1990): Abkühlungs- und Hebungsgeschichte der Externmassive und der penninischen Decken beidseits der Simplon-Rhone-Linie seit dem Oligozän: Spaltspurdaterungen an Apatit/Zirkon und K-Ar-Datierungen an Biotit/Muskowit (Westliche Zentralalpen). *Inauguraldissertation, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern.*
- Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung (1983): Ozeane und Kontinente, Ihre Herkunft, ihre Geschichte und Struktur. *Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, ISBN 3-922508-24-3.*
- Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung (1987): Die Dynamik der Erde. Bewegungen, Strukturen, Wechselwirkungen. *Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, ISBN 3-922508-40-5.*
- Steck, A. (1980): Geology of Switzerland, Part B, Ed. *Schweizerische Geologische Kommission, Wepf & Co. Publishers, Basel.*
- Steck, A. (1987): Le massif du Simplon - Réflexions sur la cinématique des nappes de gneiss, *Schweiz. Minerl. Petrogr. Mitt.* 67, p.27-45.
- Steck, A. (1990): Une carte des zones de cisaillement ductile des Alpes Centrales, *Eclogae geol. Helv.* Vol.83/3, p. 603-627.
- Straub, Ch. (1990): Geodynamische Modellierung im Gebiet des Gotthardpassnetzes. *Diplomarbeit, Kahle/Geiger, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Zürich.*
- Udias, A. (1982): Seismicity and Seismotectonic Stress Field in the Alpine-Mediterranean Region. In: *Berckhemer, H., K. Hsü (Eds.): Alpine-Mediterranean Geodynamics. Geodynamics Series, Vol 7, American Geophysical Union, Washington, pp.75-82.*
- Wegener A (1922): Die Entstehung der Ozeane und Kontinente. 3. Auflage *Vieweg Verlag Braunschweig.*
- Werner, D. (1980): Geothermik der Alpen. *Eclogae geol. Helv.*, Vol. 73/2, 513-525.
- Werner, D. (1990): A Two-Dimensional Geodynamic Model for the Southern Segment of the EGT. *Bericht zur Europäischen Geotraverse, EGT, Institut für Geophysik, ETH-Zürich.*
- Kasahara, K. (Ed.) (1987): Recent Plate Movements and Deformation. *Geodynamics Series, Vol. 20. American Geophysical Union, Washington, Publication No.0137 of International Lithosphere Program.*
- Werner, D. (1991): Pers. Mitteilg.
- Wiget, A., E. Gubler (1988): Beitrag der Geodäsie zur Geodynamik der Alpen. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* Vol. 54, 127, 9-14.
- Wirth, B. (1985): Störkörperbestimmung im Gebiet der Ivrea - Zone aus gravimetrischen und geodätischen Messungen. *IGP Bericht Nr.93, ETH Zürich.*

Bulletins des Nationalen Forschungsprogrammes 20 (NFP 20):

Herausgeber: Programmleitung des Nationalen Forschungsprogramm 'Geologische Tiefenstruktur der Schweiz'  
Redaktion: Dr. P. Heitzmann, landeshydrologie und -geologie, CH-3003 Bern.

Kartenwerke:

- Geologische Karte der Schweiz 1:500'000, Schw. Geol. Komm., 1980
- Tektonische Karte der Schweiz 1:500'000, Schw. Geol. Komm., 1980
- Seismotektonische Karte der Schweiz 1:750'000, Pavoni & Mayer-Rosa, 1978
- Die Schweiz zur letzten Eiszeit 1:550'000 in: Atlas der Schweiz, L+T und Jäckli, 1970

## 1.4 Entwurf und Präanalyse des terrestrischen Netzes

### 1.4.1 Idealnetz-Design

Das Konzept der dreidimensionalen Geodäsie [Bauersima und Schürer, 1976] ermöglicht die Ausgleichung von geodätischen Messungen im Raum in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem ohne vorgängige Reduktion auf eine Modellfläche (Ellipsoid oder Kartenprojektionsebene). Die Trennung in Lage- und Höhenausgleichung entfällt. Das funktionale Modell der Ausgleichung bewirkt, dass die Messungen geneigter Raumstrecken die Bestimmung der relativen Höhen direkt beeinflussen. Alle Reduktionen der Beobachtungen aufs Ellipsoid entfallen (ausgenommen Nivellements- und Schweremessungen). Zudem wird der Einfluss der Lotabweichungen auf die geodätischen Messungen streng berücksichtigt und die astronomischen Längen und Breiten der Stationspunkte als unbekannte Parameter geschätzt (s. Kap. 2.8.1). Das Programm RAUMTRI [Schneider, 1976; Schneider und Wunderlin, 1981], welches in verschiedenen Versionen auf Computern am IGP und an der L+T installiert ist, eignet sich ausgezeichnet für die Ausgleichung von lokalen Raumnetzen in Gebirgstälern [Schneider, 1978; Wunderlin, 1981; Schürer, 1987; Wirth, 1990].

Die Topographie in steilen Gebirgstälern erlaubt den Aufbau geradezu idealer terrestrischer 3D-Netze. Mit dem Einsatz der elektronischen Distanzmessung (EDM) hoher Präzision in talüberspannenden Netzen mit stark geneigten Visuren (s. Abb. 1.4-1) lässt sich nicht nur die relative Lage der Punkte sondern auch ihre relative ellipsoidische Höhe mit guter Genauigkeit bestimmen. Die relative Genauigkeit der geozentrischen 3D-Koordinaten wird durch die mittleren Fehlerellipsoide beschrieben. Bei idealen Netzkonfigurationen im Gebirge lässt sich eine homogene und isotrope Genauigkeit der Punktfelder (d.h. kugelförmige mittlere Fehlerellipsoide gleicher Grösse) anstreben.

Das Programm RAUMTRI erlaubt die Berechnung von Präanalysen projektierter Netze. Damit lassen sich verschiedene Netzentwürfe hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit vergleichen und so ein optimaler Netzdesign erarbeiten. Mit Hilfe der Landeskarte 1:25 000 entstanden so im Büro bereits die ersten Entwürfe für das Testnetz (Idealnetzentwurf RARON).

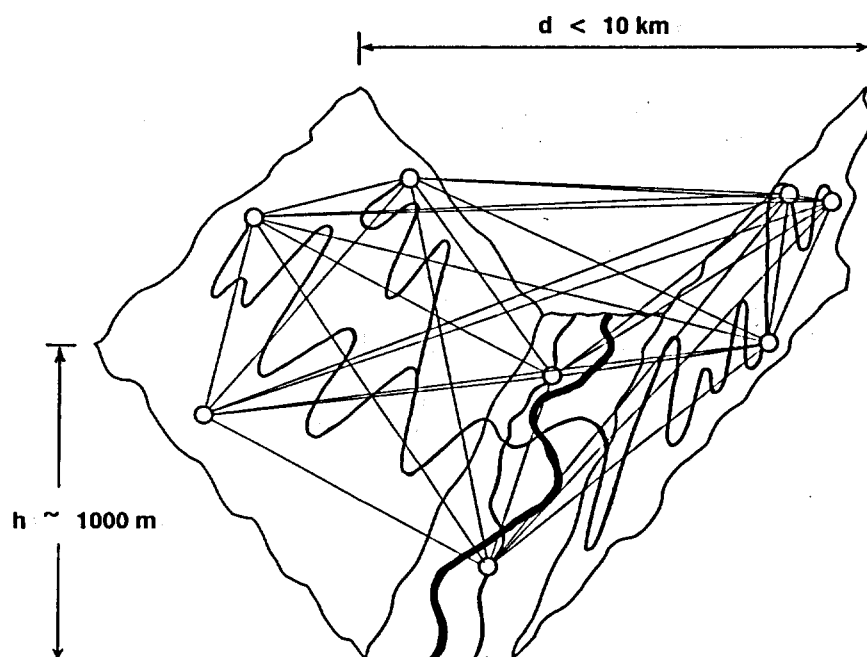


Abbildung 1.4-1: Idealer Netzdesign für 3D-Netz in Gebirgstal



## 1.4.2 Rekognoszierung

Am 17. und 18. Juli 1985 fand eine Rekognoszierung im Mittelwallis statt. Teilnehmer waren A. Geiger (IGP), B. Mattli und D. Schneider (beide L+T). Als Hilfsmittel zur vorgängigen Beurteilung der topographischen Eignung der GPS-Stationspunkte im Büro dienten "Skyplots" (Azimutalprojektionen der sichtbaren Hemisphären auf den Stationen), welche aufgrund des digitalen Geländemodells RIMINI am IGP berechnet wurden (s. *Abb.1.4.4*). Es war sofort ersichtlich, dass der ursprüngliche Karten-Idealentwurf im Gebiet von Raron nur unvollständig realisiert werden könnte, da der dichte Wald westlich von Eischoll einige Visuren verunmöglicht. Im westlich angrenzenden Gebiet von Turtmann gelang es, eine dem ursprünglichen Entwurf sehr ähnliche 3D-Konfiguration aufzubauen (*Abb.1.4-2*). Alle Stationspunkte wurden bezüglich den möglichen terrestrischen Visuren, den Satelliten-Empfangsbedingungen, der Stabilität, der geologischen Situation (s. *Kap.1.3*) und der Dauerhaftigkeit einer möglichen Festlegung sowie der Zugänglichkeit beurteilt.

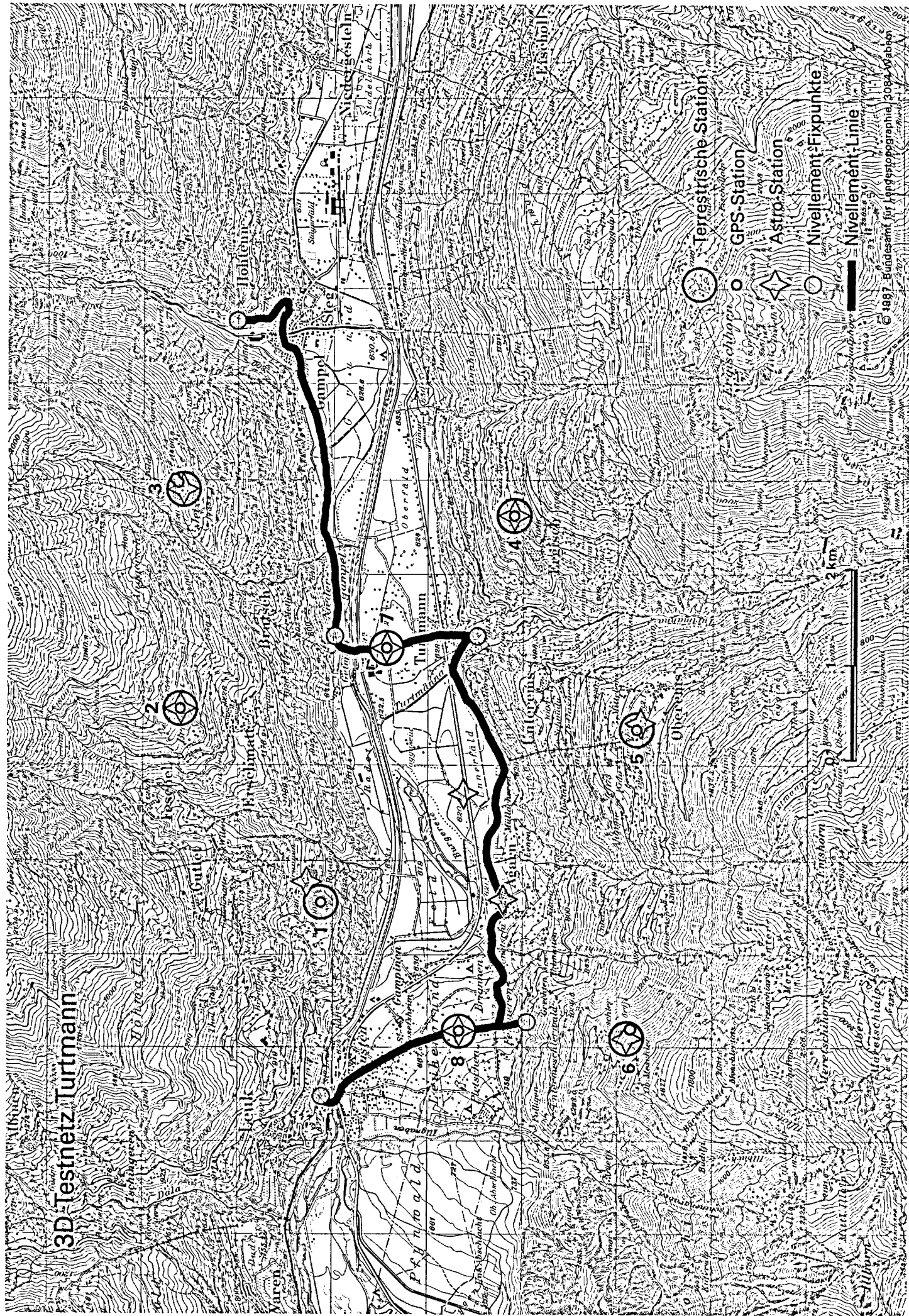
Fixpunkt Nr. Name	Höhe m	Geologie Fels Zustand	Versicherung Anz.Rückmarken	Visuren Anz./mögl.	Zugang mit PW 4WD
1.BRUN	1009	Helvetikum anstehend, gut	im Fels 4	alle	< 200m
2.BRAE	1510	Helvetikum anstehend	Gebäude auf Fels 4	alle	< 30 m
3.JEIZ	1500	Aarmassiv anstehend, gut	im Fels 4	alle	< 200m
4.ERGI	1115	Penninikum anstehend, verwittert	im Fels 5	alle	< 20 m
5.OEMS	1385	Penninikum anstehend	Gebäude auf Fels 5	alle	< 30 m
6.AGAR	1465	Penninikum anstehend, gut	im Fels 5	alle	< 10 m
7.TURT	622	Sediment kein Fels	Betonsockel 2	alle	< 10 m
8.SUST	675	Sediment kein Fels	Betonsockel 4	alle	< 10 m

Tabelle 1.4-1: Resultat der Rekognoszierung

Abbildung 1.4-2: 3D-Testnetz Turtmann: Übersichtskarte 1:50 000 (Map 8)

Abbildung 1.4-3: Perspektive des Messgebiets aus Richtung E -> W (Map 9)

# 3D-Testnetz Turtmann



- Terrestrische Station
- GPS-Station
- Astro-Station
- Nivellement-Fixpunkte
- Nivellement-Linie

© 1987 Bundesamt für Kartographie und Landvermessung

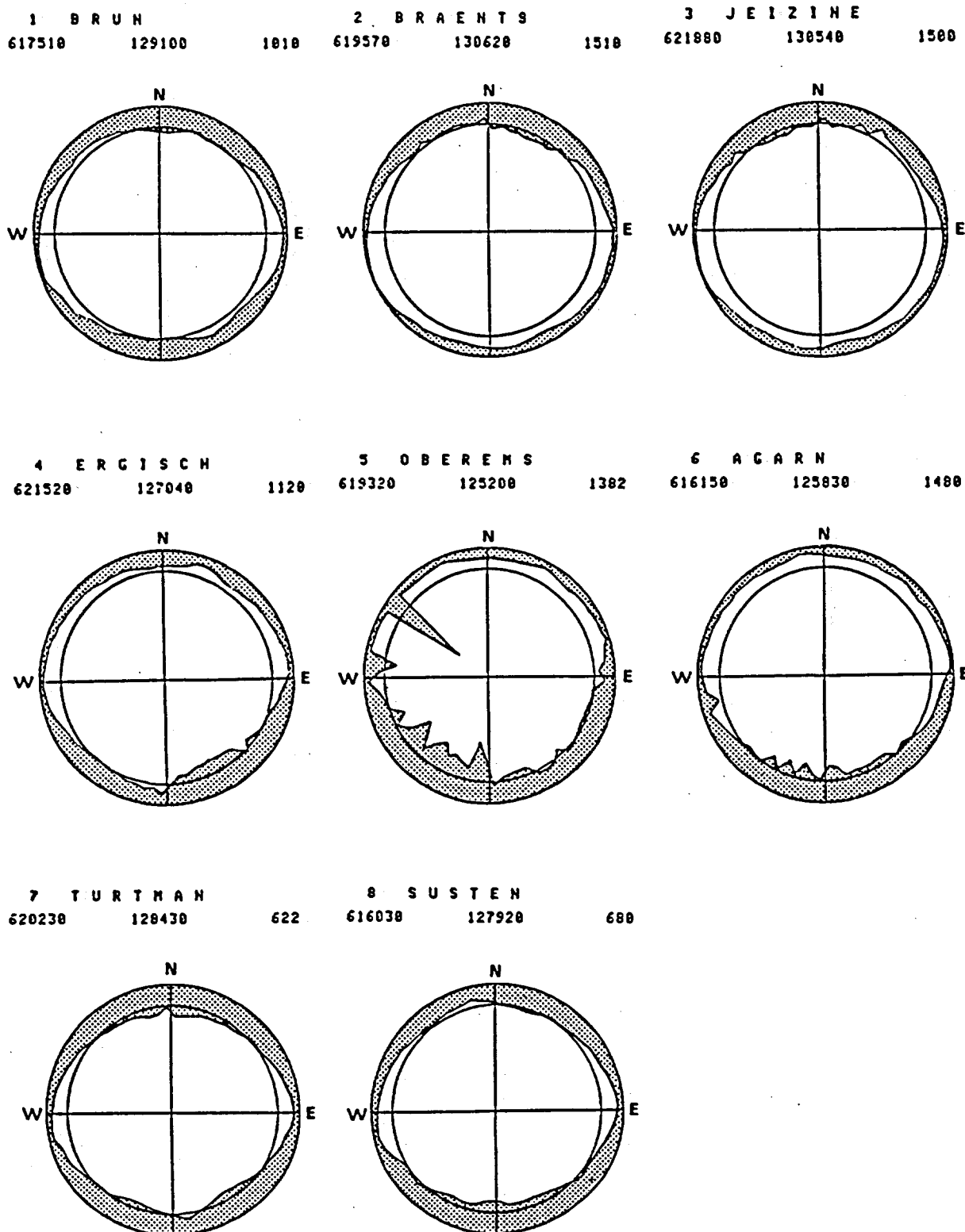
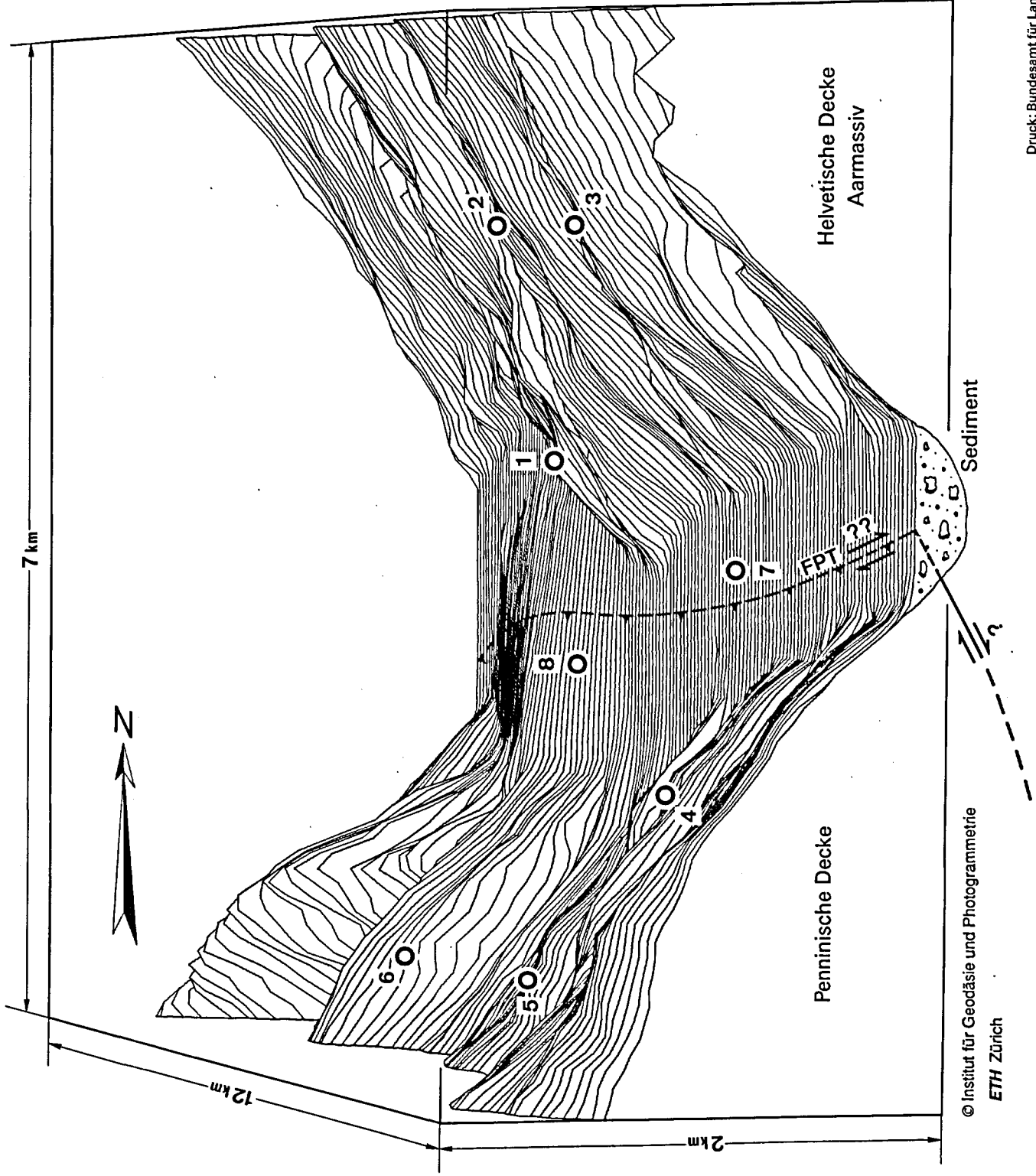


Abbildung 1.4-4: Skyplot mit topographischen Hindernissen auf den Stationen  
(Der Horizont wird als äusserer Kreis abgebildet. Der innere Kreis entspricht einem Höhenwinkel von 20°.)

# 3D Testnetz Turtmann (Perspektive)



### 1.4.3 Lage der Kontrollpunkte

Unter der Bezeichnung 3D-Testnetz Turtmann [Schneider, 1985] wurde schliesslich der in Abb.1.4-5 und 1.4-6 dargestellte Netzentwurf mit 8 Stationspunkten, Seitenlängen von 2-7 km und einer maximalen Höhendifferenz von ca. 900 m festgehalten. Die Lage der Stationspunkte ist aus der Karte (Abb.1.4-2) im Überblick und aus der Versicherungsdokumentation der Kontrollpunkte (s. Abb.1.5-6 bis 1.5-14) im Detail ersichtlich.

Als Zentralpunkt wurde 7.TURT im Talboden nördlich von Turtmann gewählt. Mit dem zweiten Talpunkt 8.SUST auf dem Schuttfächer des Illgrabens entsteht damit eine 4.2 km lange, fast horizontale Basis. Die beiden Talpunkte konnten natürlich nicht direkt im Fels versichert werden. Als Ersatz wurde der Bau von je 2 - 3 schweren Betonfundamenten vorgeschlagen. Diese sind so anzuordnen und gegenseitig einzumessen, dass individuelle Eigenbewegungen aufgedeckt werden können. Allfällige Höhenänderungen dieser Sockel sollen durch die wiederholten Nivellements bis in den anstehenden Fels an den Talflanken aufgedeckt werden können.

Je 3 Stationspunkte liegen am nördlichen bzw. südlichen Talhang. Diese Kontrollpunkte können direkt im anstehenden Fels bzw. auf im Fels fundierten Bauwerken versichert werden. Zusätzlich wurden pro Kontrollpunkt je 4 Rückversicherungspunkte im Abstand von 2 - 80 m vorgesehen (s. Kap.1.5). Die Hangpunkte: 2.BRAE, 3.JEIZ, 5.OEMS und 6.AGAR bilden ein fast ebenes Viereck mit Punkthöhen zwischen 1385 und 1510 m.

Fixpunkt Nr. Name	Näherungskordinaten (Datum: CH-1903, schweiz. Projektionssystem)		
	y (Ostwert) [m]	x (Nordwert) [m]	h (orthom) [m]
1.BRUN	617 522.6	129 106.3	1008.9
2.BRAE	619 560.5	130 594.1	1506.8
3.JEIZ	621 848.8	130 528.4	1498.7
4.ERGI	621 561.0	127 065.6	1131.8
5.OEMS	619 334.3	125 791.4	1385.6
6.AGAR	616 102.5	125 862.9	1475.3
7.TURT	620 176.7	128 424.4	622.4
8.SUST	616 048.7	127 958.1	677.1

Tabelle 1.4-2: Näherungskordinaten der Hauptpunkte

Höchste Priorität bei der Beurteilung der Kontrollpunkte als GPS-Stationen wurde der topographischen Eignung (möglichst freier Horizont) sowie der guten Zugänglichkeit mit 4WD-Fahrzeug oder Seilbahn eingeräumt. Die Kontrollpunkte 1.BRUN (Zugänglichkeit erschwert) 2.BRAE, 4.ERGI, 5.OEMS, 7.TURT und 8.SUST wurden als brauchbare GPS-Empfangsstandorte beurteilt, wenn auch die Bedingung einer freien Geländekulisse über 20° in einem Gebirgstal nicht immer streng eingehalten werden kann (s. Skyplogs in Abb.1.4-4). Bei den Punkten 3.JEIZ und 6.AGAR wurde zur Verbesserung der GPS-Empfangsbedingungen je ein exzentrischer GPS-Stationspunkt (3.GPS und 6.GPS) vorgesehen.

### 1.4.4 Entwurf des Beobachtungsplanes

Für die Beobachtung eines terrestrischen 3D-Netzes höchster Präzision im Gebirge stehen neben den traditionellen geodätischen Messverfahren (astronomische Beobachtungen, Richtungs- und Höhenwinkel-messungen) vor allem die modernen EDM-Messverfahren hoher Genauigkeit im Vordergrund. Der Beobachtungsplan (Tab.1.4-3) sieht deshalb sowohl den Einsatz des KERN Mekometers ME-5000 mit Meteo-Erfassung entlang dem Messstrahl wie auch des Zweifarben-Distanzmessers Terrameter LDM2 vor.

Proj. Messungen	Instrument	Messprogramm	m.F. a priori *
Zweifارben-EDM:	Terrameter LDM 2	Visuren mit Neigung < 15°	0.2mm + 1·10 <sup>-7</sup> ·D
Präzisions-EDM:	KERN ME-5000	alle Visuren	0.2mm + 5·10 <sup>-7</sup> ·D
Richtungen:	KERN E2 WILD T2000	alle Visuren " "	2 cc 2 cc
Höhenwinkel:	KERN E2 WILD T2000	alle Visuren " "	5 cc 5 cc
Astro Azimute:	KERN E2	Stat. 7 <-> 8	2 cc
Astro Länge/Breite:	Zenitkamera IGP	alle Stationen	2 / 1.5 cc

\*) 1 cc  $\hat{=}$  0.1 mgon

Tabelle 1.4-3: Beobachtungsplan

### 1.4.5 3D-Präanalyse

Variante	Lagerungsparameter	Beobachtungen
1	3 Koordinaten (7.TURT)	- alle Strecken mit Terrameter - alle Strecken mit Mekometer - Richtungen und Höhenwinkel auf allen Visuren - 2 gegenseitige Astro-Azimute auf den Talpunkten - astron. Längen/Breiten auf allen Punkten
2	3 Koordinaten 3 Orientierungen (7.TURT)	- alle Strecken mit Terrameter - alle Strecken mit Mekometer - Richtungen und Höhenwinkel auf allen Visuren - 2 gegenseitige Astro-Azimute auf den Talpunkten - astron. Längen/Breiten auf allen Punkten
3	3 Koordinaten 3 Orientierungen (7.TURT)	- alle Strecken mit Mekometer - Richtungen und Höhenwinkel auf allen Visuren - 2 gegenseitige Astro-Azimute auf den Talpunkten - astron. Längen/Breiten auf allen Punkten
4	3 Koordinaten 3 Orientierungen (7.TURT)	- nur 16 Strecken mit Terrameter (Teilnetz) - alle Strecken mit Mekometer - Richtungen und Höhenwinkel auf allen Visuren - 2 gegenseitige Astro-Azimute auf den Talpunkten - astron. Längen/Breiten auf allen Punkten

Tabelle 1.4-4: Varianten der Präanalysen

Die Ausgleichung der terrestrischen 3D-Netze mit RAUMTRI erfolgt in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem. Das mathematische Modell (s. Kap.2.8.1) erlaubt die räumliche Orientierung des Netzes bezüglich einem geodätischen Referenzsystem mit Hilfe von reellen oder fiktiven astronomischen Beobachtungen (mindestens 1 Astro-Azimet, 1 Astro-Länge und 1 Astro-Breite). Zur Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit der räumlichen Punktbestimmung wurden 1 Variante mit astronomischer Orientierung des Netzes und 3 Varianten mit fixer Orientierung sowie unterschiedlichen Strecken-Teilnetzen mit Hilfe von Präanalysen (unbestimmte Auflösung der Normalgleichungen) berechnet. Zur Lage- rung des Netzes dienten die 3 fest eingeführten Koordinaten des Punktes 7.TURT sowie bei den Varianten 2 bis 4 die fiktiv eingeführten 3 Orientierungswinkel im Festpunkt.

Die Resultate der Präanalysen sind am Beispiel des am schwächsten bestimmbareren Punktes 6.AGAR in Tab. 1.4-5 dargestellt. Die Variante 1 zeigt den Einfluss der nur mit begrenzter Genauigkeit möglichen Lageorientierung des Netzes durch die Astro-Azimute. Die grösste Halbachse der Fehlerellipsoide liegen bei allen Punkten ungefähr in tangentialer Richtung in Bezug auf einen konzentrischen Kreis um den Zentralpunkt (7.TURT).

Die konstruktiven Eigenschaften des Terrameters erlauben leider nur die Messung von schwach geneigten Strecken (Neigung  $< 15^\circ$ ). Deshalb musste ein Terrameter-Teilnetz ohne die steilen Strecken entworfen werden (Var.4). Ein Vergleich der Varianten 2 bis 4 beweist, dass eine Reduktion des Terrameter-Messprogramms (Var.4) nur eine unwesentliche Verminderung der Genauigkeit zur Folge hat.

Das Messprogramm gemäss Variante 4 wurde schliesslich zur Ausführung vorgeschlagen [Schneider, 1985]. Diese Variante mit Terrameter-Teilnetz hat gegenüber dem Entwurf ohne Terrameter-Strecken (Var.3) den Vorteil, dass zwei unterschiedliche EDM-Verfahren zum Einsatz kommen und damit die systematischen Resteffekte der troposphärischen Refraktion gegenseitig kontrolliert werden können.

Variante	Anzahl		Genauigkeit (a priori) von Pkt. 6.AGAR:			Bemerkungen
	Beob.	Unbek.	mF(x) [mm]	mF(y) [mm]	mF(H) [mm]	
1	242	45	11.5	6.1	7.2	astro Orientierung
2	239	42	1.5	1.3	7.0	fixe Orientierung Terra- & Mekometer
3	183	42	2.1	1.7	8.0	fixe Orientierung ohne Terrameter
4	199	42	1.9	1.4	7.6	fixe Orientierung Terrameter-Teilnetz

Tabelle 1.4-5: Resultate der Präanalysen

Der definitive Netzentwurf (Var.4) mit den aus der Präanalyse berechneten mittleren Fehlerellipsoiden (Standard-Konfidenz-Ellipsoide) sind in den Abb.1.4-5 und 1.4-6 in Grund- und Aufriss dargestellt.

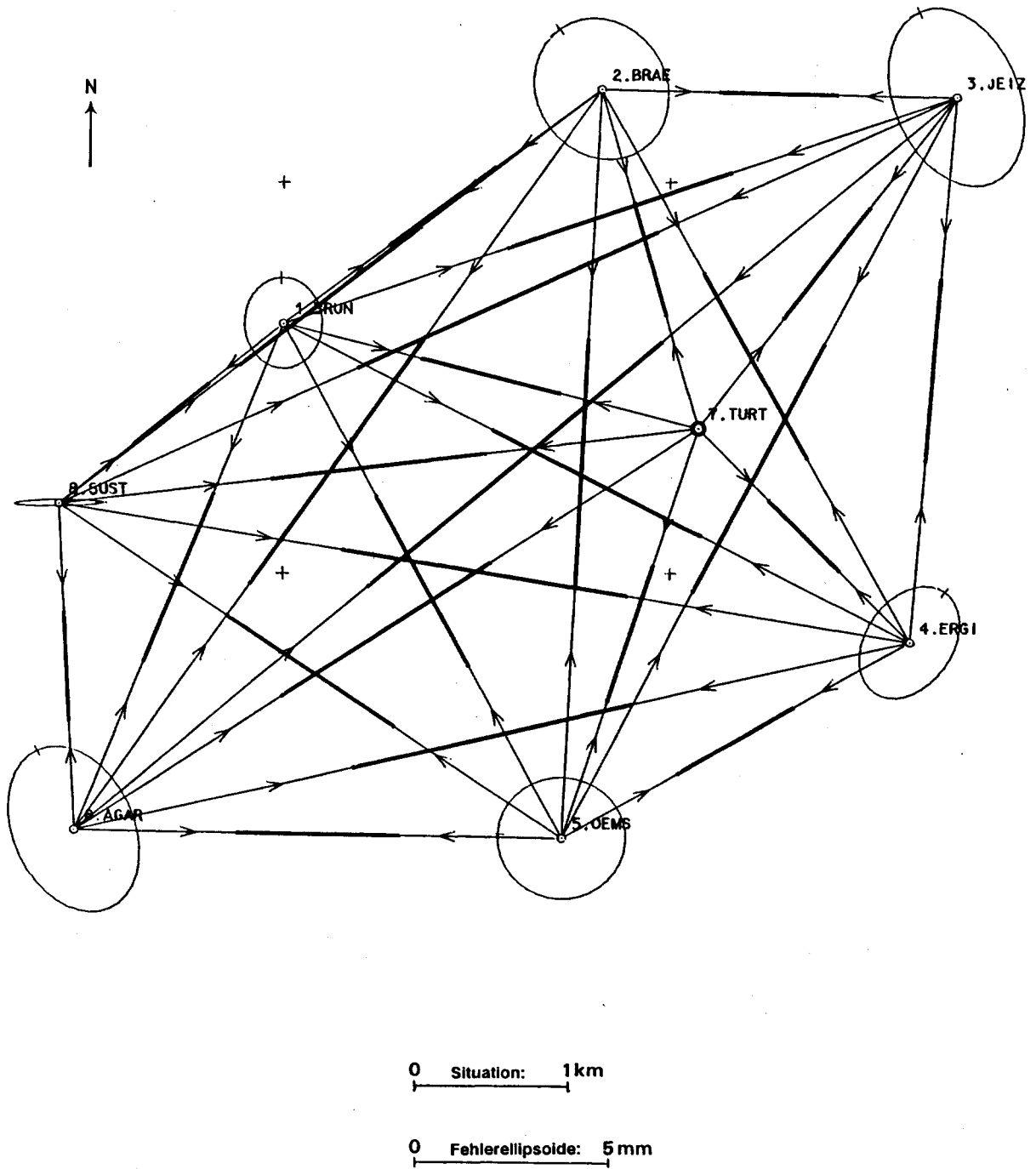


Abbildung 1.4-5: 3D-Testnetz Turtmann: Präanalyse des Netzentwurfs (Grundriss: Variante 4)



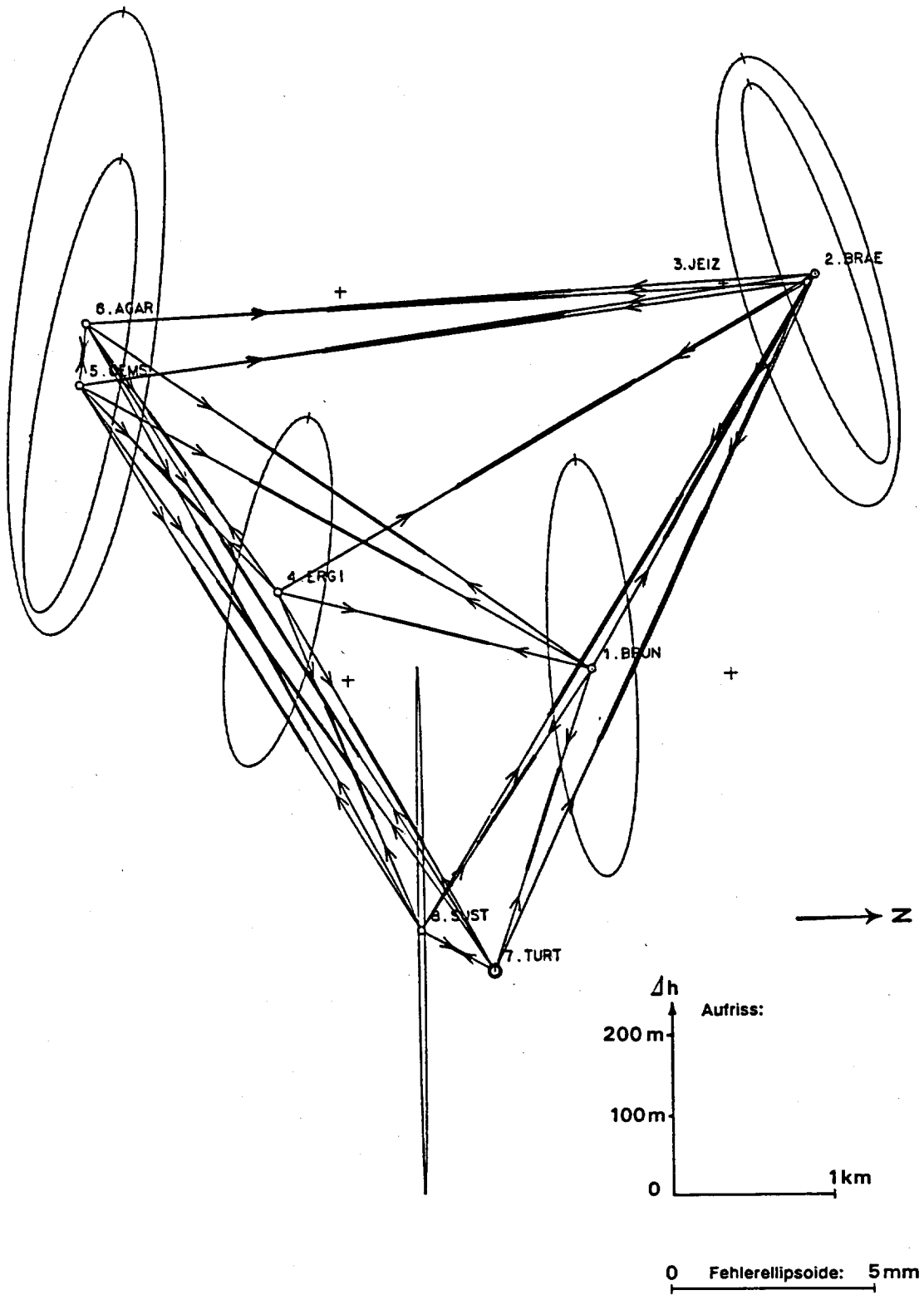


Abbildung 1.4-6: 3D-Testnetz Turtmann: Präanalyse des Netzentwurfs (Aufriss: Variante 4)

## 1.5 Materialisierung der Kontrollpunkte

### 1.5.1 Grundsätzliches

Der Materialisierung (oder Versicherung) der Kontrollpunkte wurde besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Als dritte Zielsetzung in Kap.1.2 wird die Verwendung der Netzanlage als geodynamisches Kontrollnetz postuliert. Die Installation sollte zur Erreichung dieser Ziele für eine Lebensdauer von mindestens 50 Jahren konzipiert sein. Die notwendigen Unterhaltsarbeiten sollten dabei auf ein Minimum beschränkt werden können.

Bei der Auswahl der Versicherungsmethoden und der Materialien konnte unsere reiche Erfahrung aus dem Bereich der Ingenieurvermessung (Deformationsmessungen an Staumauern) genutzt werden. Als Muster diente uns die Methode der lokalen Rückversicherung von Beobachtungspfeilern durch nahe gelegene Mauerzielbolzen im Fels.

### 1.5.2 Verwendetes Versicherungsmaterial

Eine Verwendung von normalen Instrumentenstativen war nicht möglich, da eine exakte und stabile Aufstellung der schweren Messgeräte (z.B. Terrameter) damit nicht erreicht werden kann. Bei Deformationsmessungen an Staumauern werden gewöhnlich doppelwandige-Betonpfeiler zur Stationierung der Präzisionsmessgeräte verwendet. Diese Installationen haben den Vorteil, dass auch schwere Messgeräte mit grosser Zentriergenauigkeit und sehr guter Stabilität aufgestellt werden können. An eine Installation von Betonpfeilern und ihre Erhaltung über mehrere Jahrzehnte war im Messgebiet kaum zu denken. Die Grundeigentümer und Landschaftsschützer hätten den Bau solcher Objekte zu verhindern gewünscht. Es musste deshalb eine andere Lösung gesucht werden, welche eine lange Lebensdauer der Punkte gewährleistet, ohne das Landschaftsbild zu beeinträchtigen.

In enger Zusammenarbeit mit der Mechanischen Werkstatt der L+T wurde ein mobiler Stahlpfeiler (*Abb. 1.5-1*) entwickelt, der mit Hilfe von 3 Stahlflanschen im Beton oder im Fels festgeschraubt werden kann. Untersuchungen haben ergeben, dass die mobilen Stahlpfeiler eine hohe Stabilität der Zentrierung über mehrere Tage gewährleisten können. Für die Richtungsmessung sind diese Installationen etwas weniger gut geeignet. Bei Temperaturänderungen können leichte Verkippungen der Pfeilerplatte auftreten, welche die Horizontierung des Theodoliten beeinflussen. Bei Verwendung moderner elektronischer Theodolite wird dieser Effekt durch die automatische Kompensation der Rest-Stehachsenschiefe allerdings fast vollständig eliminiert.

Der eigentliche Messpunkt wird durch einen Kappenbolzen (*Abb. 1.5-3, oben*) materialisiert. Die geometrische Lage des Punktes ist durch die Achse des Zylinderloches definiert. Die Zentrierung der Messgeräte erfolgt dann mit Hilfe von optischen Loten, wobei die Feinverschiebung der Geräte auf dem Pfeiler durch Kreuzschlitten (System AIUB) [*Gurtner, 1976*] erfolgt. Im Zylinderloch des Kappenbolzens wird dabei ein Zentriereinsatz (sog. Le Pont-Zapfen, *Abb. 1.5-4*) mit aufgeprägtem Millimetergitter (*Abb. 1.5-5, oben*) eingesetzt. Tests haben gezeigt, dass mit Hilfe von gewöhnlichen optischen Loten (z.B. optisches Lot des E2) mittlere Zentrierfehler von 0.25 und mit genaueren Nadirloten solche von 0.1 mm erreichbar sind. Diese Methode der Zentrierung wurde schon beim RCM-Kontrollnetz Le Pont [*Jeanrichard, 1974*] mit Erfolg angewendet. Die Festlegung der genauen Höhe des Punktes wird durch Einsetzen einer Stahlkugel von genau 20 mm Durchmesser auf das Zylinderloch realisiert. Die Bezugshöhe des Punktes ist dann durch OK Kugel gegeben.

# Stahlpfeiler

(System L+T)

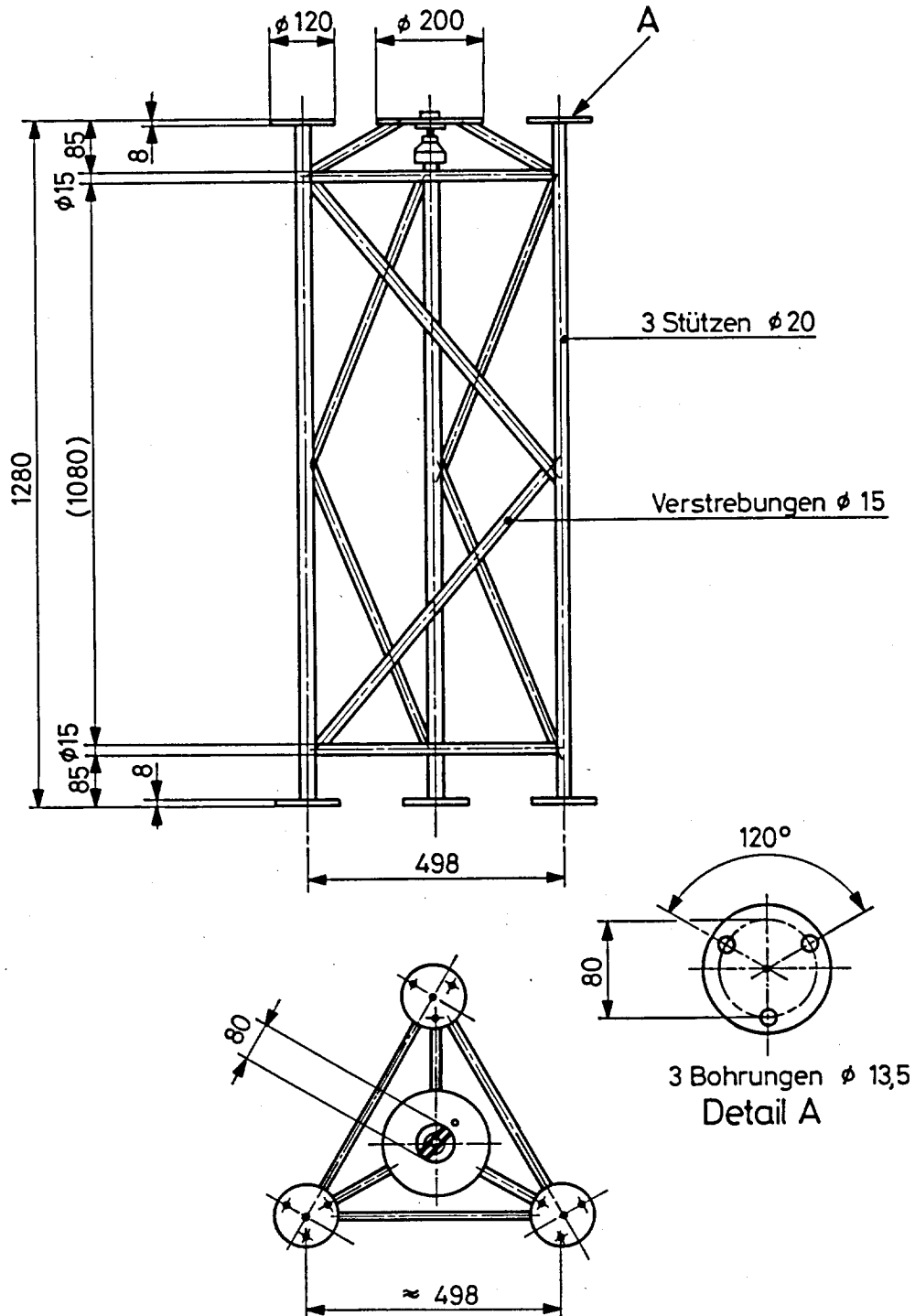


Abbildung 1.5-1: Mobiler Stahlpfeiler System L+T

## Flansch (lang) GPS

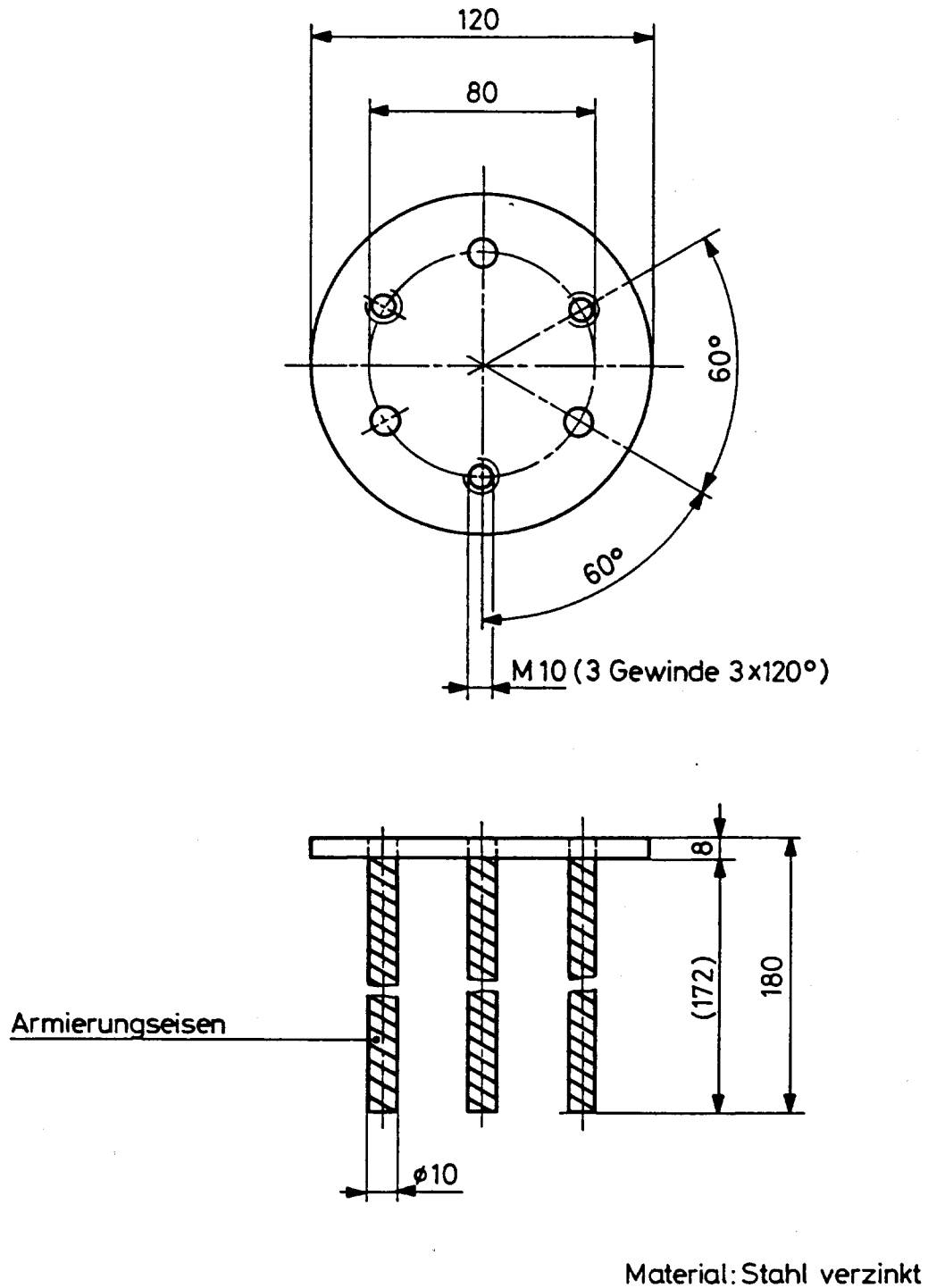


Abbildung 1.5-2: Flansch für die Montage der Stahlpfeiler

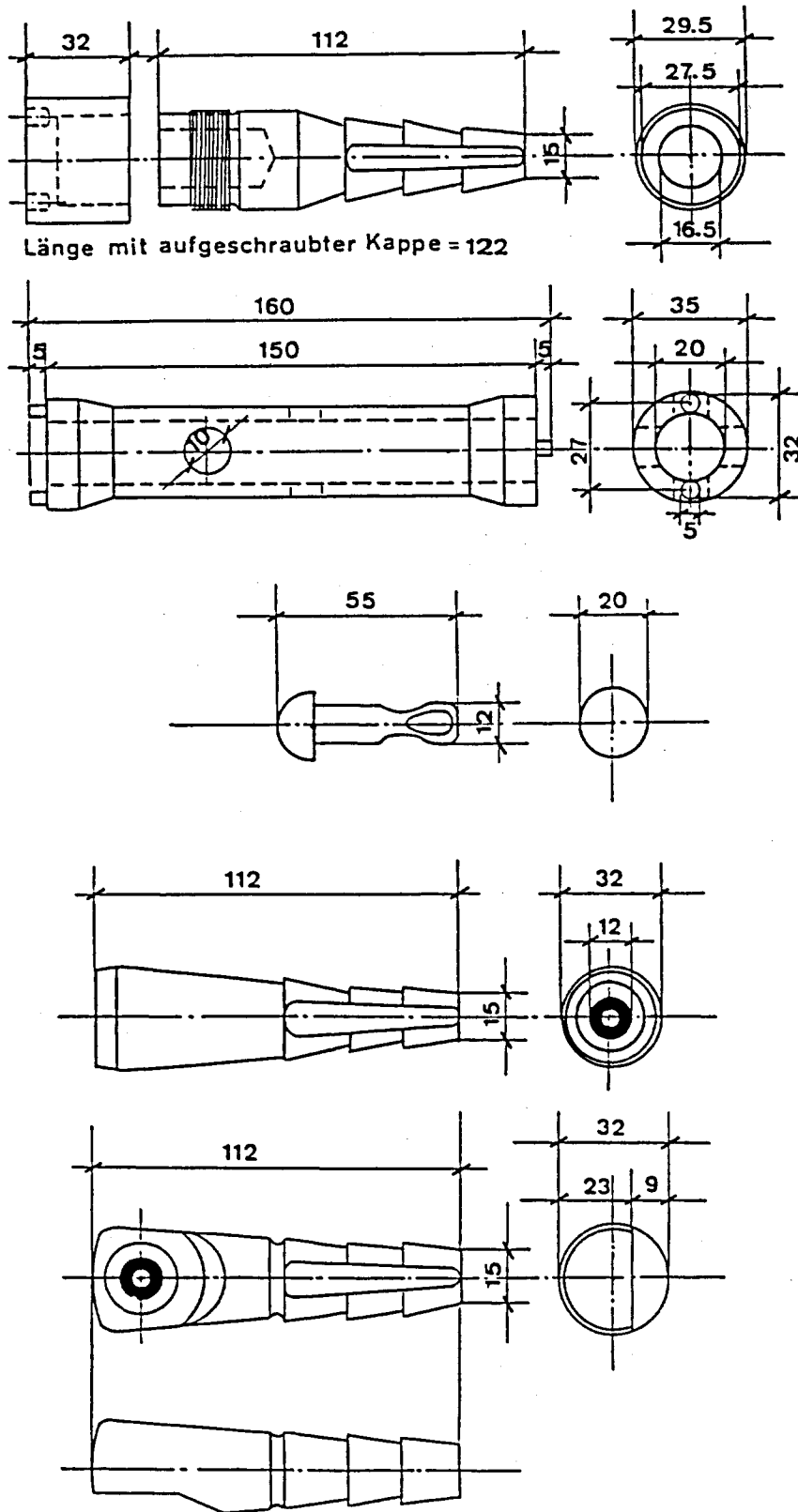
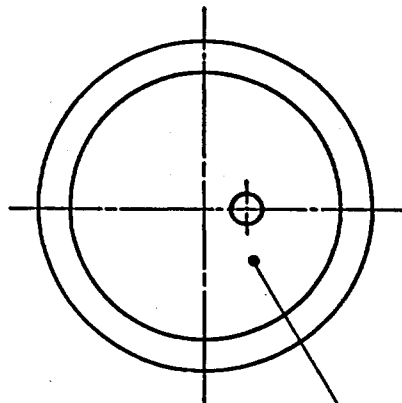
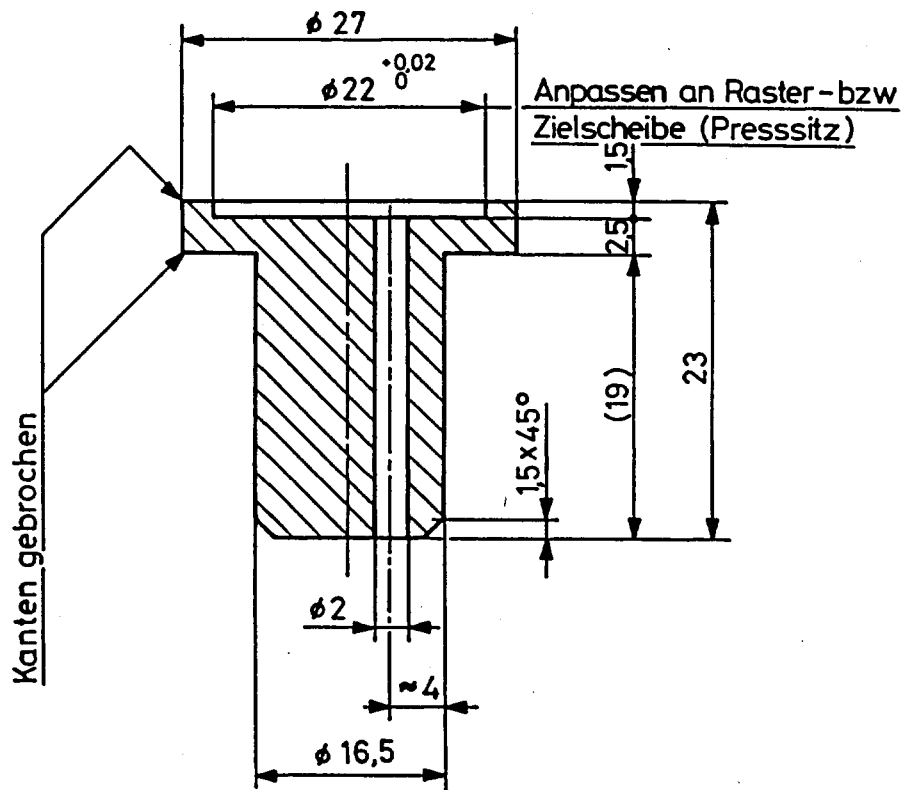


Abbildung 1.5-3: Kappenbolzen mit Kappenschlüssel (oben), Niete (mitte), Mauerzielbolzen "frontal" und "seitlich" (unten)

## Le Pont - Zapfen

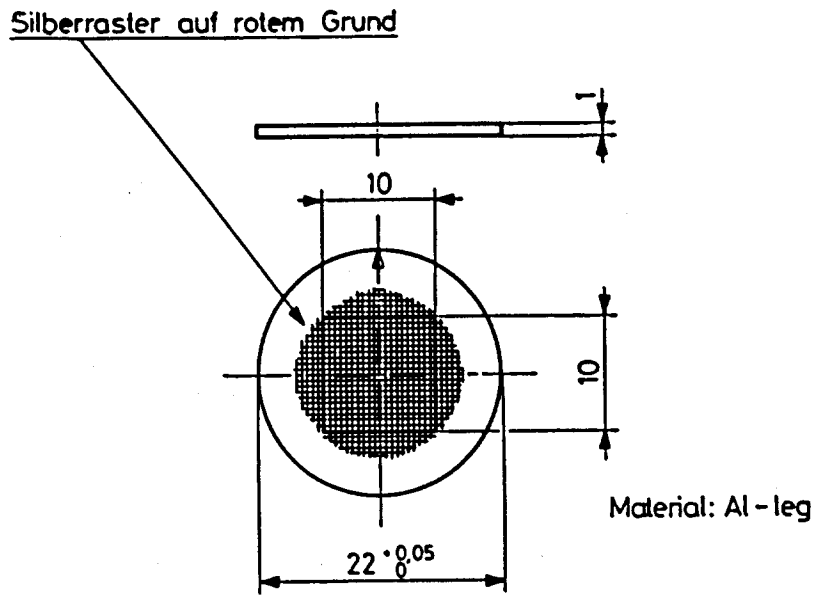


In diese Vertiefung kann die Raster- oder Zielscheibe eingelegt werden.

Material: Messing

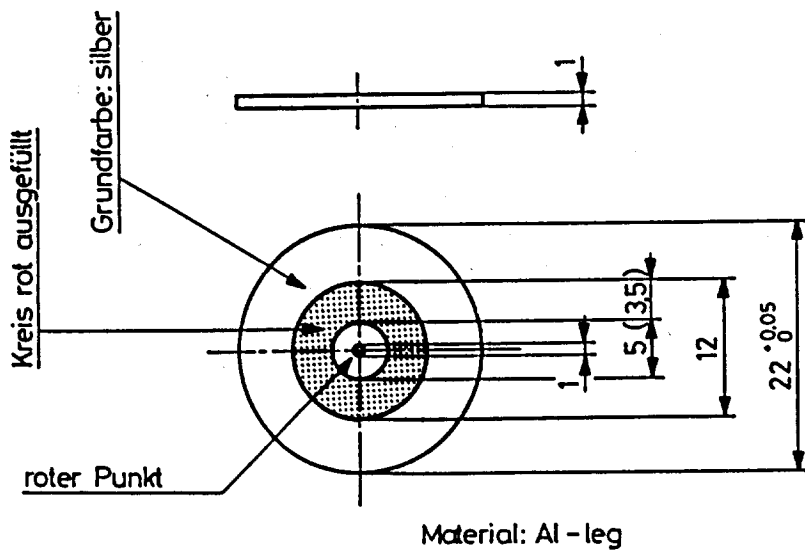
Abbildung 1.5-4: Zentriereinsatz (Le Pont-Zapfen)

## Rasterscheibe



8.5.90

## Zielscheibe



8.5.90

Abbildung 1.5-5: Aloxid-Zielscheiben für Zentriereinsatz und Mauerzielbolzen

### 1.5.3 Lokale Rückversicherungen und exzentrische Stationspunkte

Die lokalen Rückversicherungsmarken dienen zur Kontrolle der unveränderten Lage der Kontrollpunkte in Bezug auf die Stationsumgebung. Damit sollen Eigenbewegungen der Kontrollpunkte, welche durch unerwünschte Störeinflüsse (z.B. durch schwere Bau- oder Landwirtschaftsmaschinen) entstehen können, mit Hilfe von wiederholtem Rückwärtseinschneiden erkannt werden. Die Anordnung der Rückversicherungsmarken erlaubt nötigenfalls auch die Rekonstruktion eines Kontrollpunktes in Lage und Höhe.

Bei den Kontrollpunkten 3.JEIZ und 6.AGAR wurden zusätzliche, exzentrische Stationsbolzen (3.GPS und 6.GPS) für die GPS-Stationierung gesetzt. Zur Materialisierung wurden ebenfalls Kappenbolzen (*Abb. 1.5-3, oben*) verwendet, wobei auf das Anbringen von Flanschen für die Stahlpfeilermontage verzichtet wurde. Als Rückversicherungsmarken wurden Mauerzielbolzen mit auswechselbaren Aloxyl-Zielscheibchen (*Abb. 1.5-3, unten*) im anstehenden Fels gesetzt.

Zur Erleichterung der Bestimmung von Instrumenten- und Antennenhöhe wurde bei jedem Stationspunkt zusätzlich eine Niete (*Abb.1.5-3, mitte*) versetzt. Die Höhenbestimmung der Stahlpfeilerplatte (bzw. des Kreuzschlittens) kann damit nivellistisch von der bekannten Nietenhöhe einfach und sehr genau erfolgen. Der Höhenunterschied zwischen den Kappenbolzen (mit bzw. ohne aufgesetzte Kugel, Durchmesser = 20 mm) und den Niete wurde durch Präzisionsnivelements bestimmt (*s. Tab.1.5-1*).

### 1.5.4 Versicherungsarbeiten

Da die ersten terrestrischen Messungen im Testnetz bereits im September und die erste GPS-Kampagne Anfangs Oktober 1985 geplant war, mussten die Verhandlungen mit den Grundeigentümern und die Versicherungsarbeiten im Sommer 1985 innert kurzer Frist fertiggestellt werden. Die Arbeiten wurden unter Bauleitung von D. Schneider durch die Mitarbeiter H. Gilgen, B. Mattli und Ch. Müller und teilweise E. Beyeler im August 1985 mit grossem Einsatz erledigt.

### 1.5.5 Dokumentation der Versicherung

Zur Dokumentation der Versicherung wurde für jeden Kontrollpunkt ein Versicherungsprotokoll (*Abb. 1.5-6 bis 15*) mit einer Situationsskizze auf der Grundlage des Übersichtsplanes und einem massstabgetreuen Detail-Kroki der Rückversicherungen erstellt. Diese Dokumente wurden in einer Feld-Dokumentation [*L + T, 1985*] zusammengefasst, welche dem Feldpersonal bei Messkampagnen abgegeben werden kann.

Vollständigkeitshalber wurde auch der in Kap.2.7.3 erwähnte zusätzliche GPS-Stationspunkt 9.EMSH, welcher 1986 am Emshorn installiert wurde, mitdokumentiert (*s. Abb.1.5-15*).



# 3D – TESTNETZ TURTMANN

## Versicherungsprotokolle

### Legende:

- Kappenbolzen mit drei Ankerplatten für Stahlfeiler – Montage
- ◎ Exzentrischer Kappenbolzen
- Exzentrum Bolzen
- Mauerzielbolzen mit Aloxyscheibe (Rückversicherung)
- Niete (Höhenbezugspunkt)

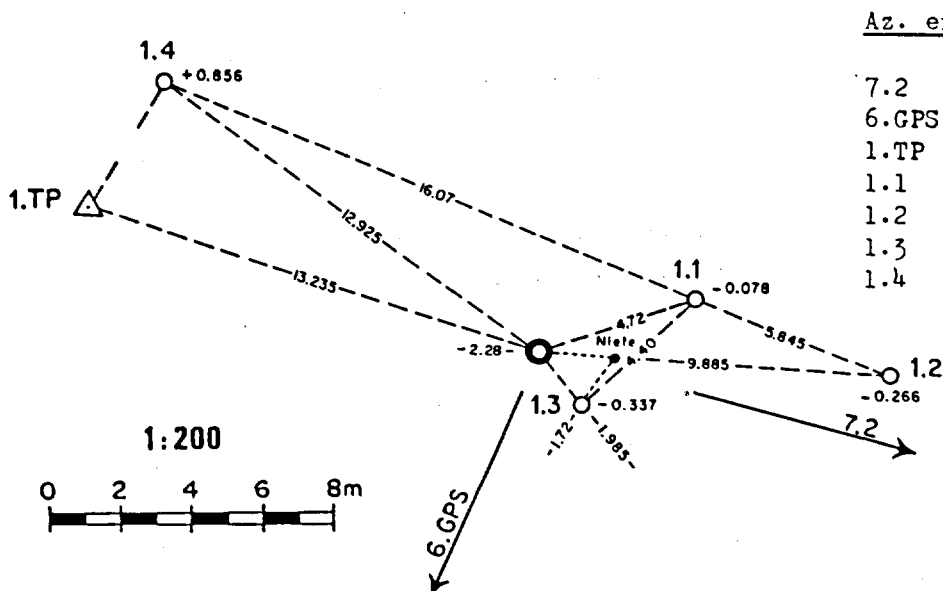
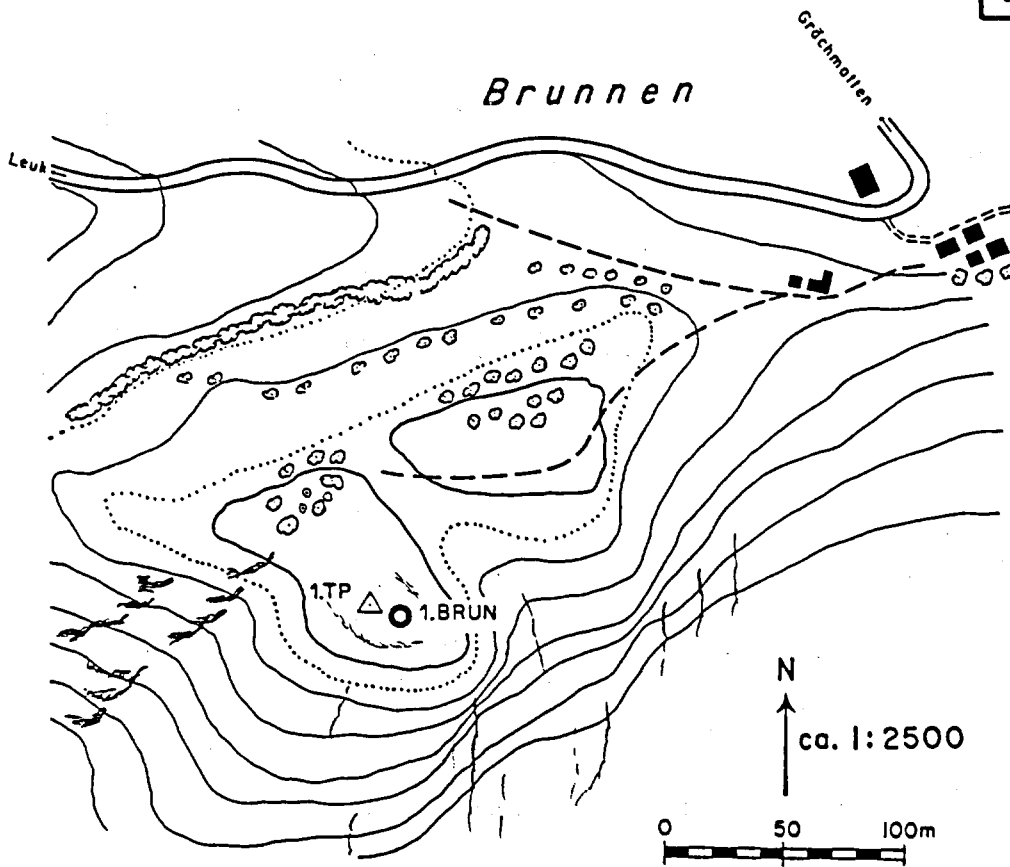
Abbildung 1.5-6: Legende der Versicherungsprotokolle

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt:

**1.BRUN**



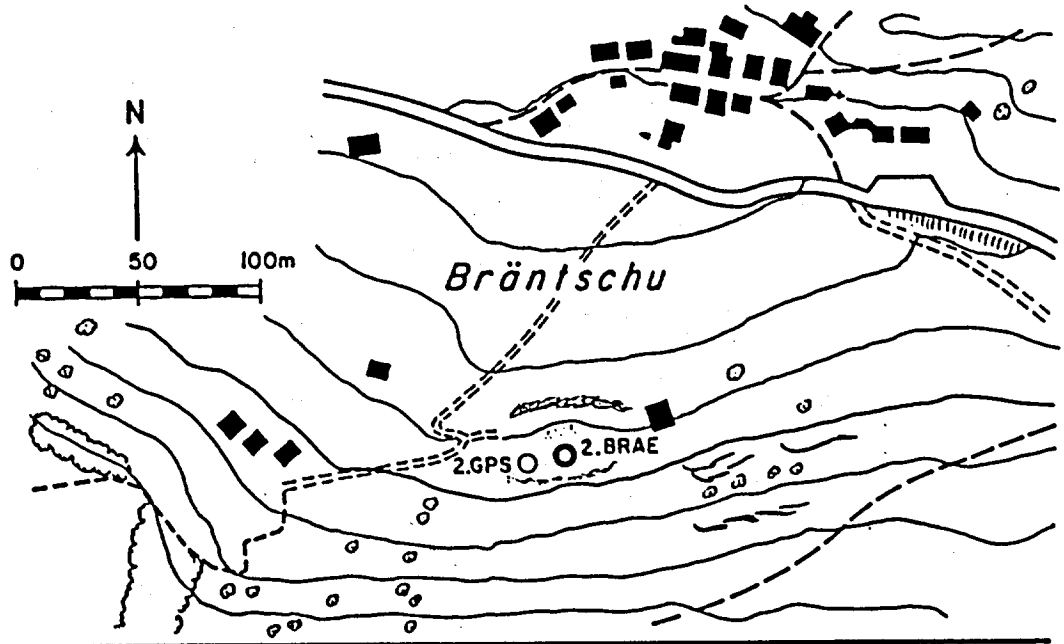
Az. exz. Versicherung	
	g c
7.2	116.52
6.GPS	225.55
1.TP	319.34
1.1	78.01
1.2	103.55
1.3	154.07
1.4	339.25

Abbildung 1.5-7: Station 1.BRUN (Brunnen), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **2.BRAE**



Az. exz. Versicherung

	g	c
7.2	182.73	
6.GPS	239.74	
2.GPS	291.85	
2.1	136.92	
2.2	289.21	
2.3	343.26	
2.4	391.76	

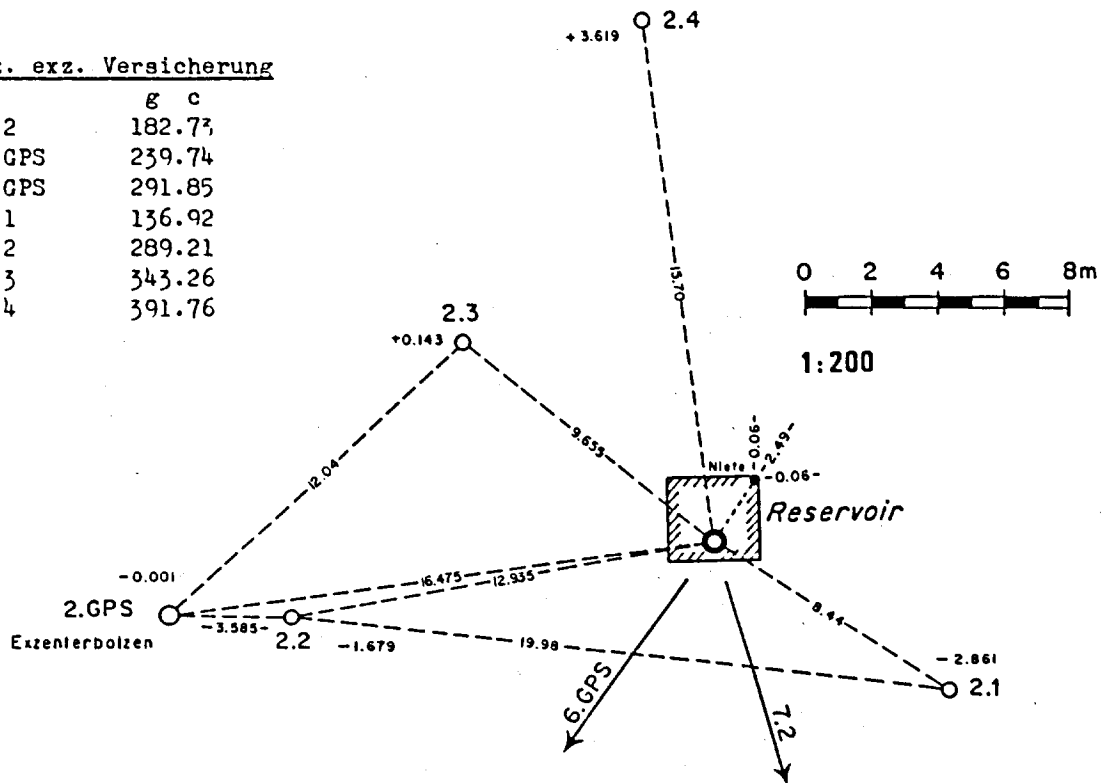
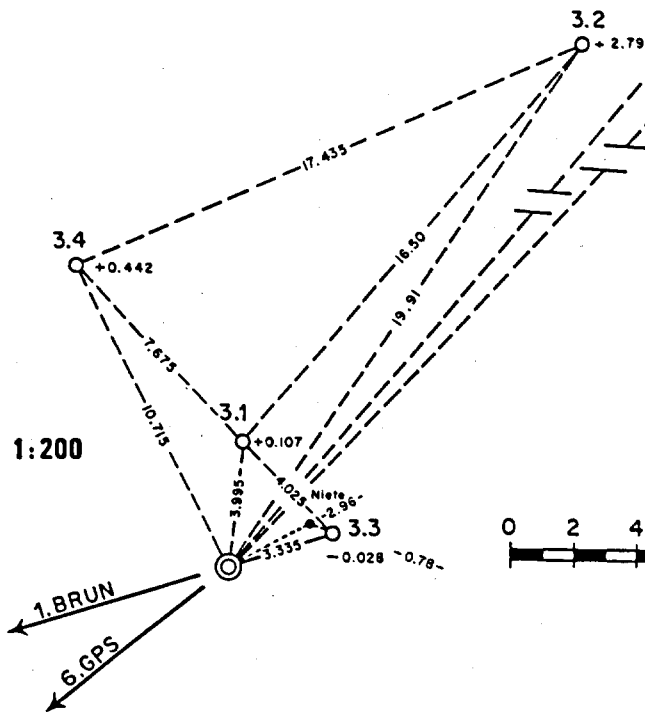
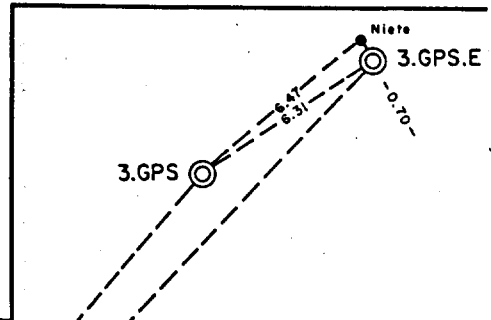
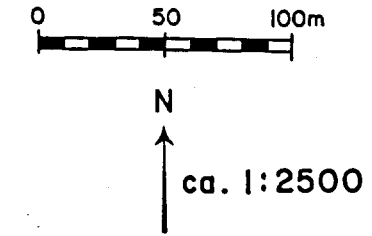
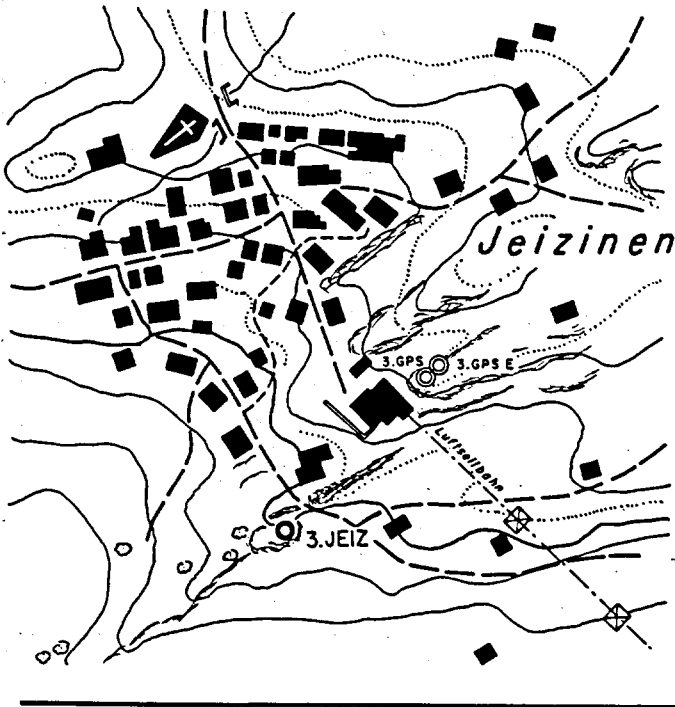


Abbildung 1.5-8: Station 2.BRAE (Bräntschi), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **3.JEIZ**



Az. exz. Versicherung

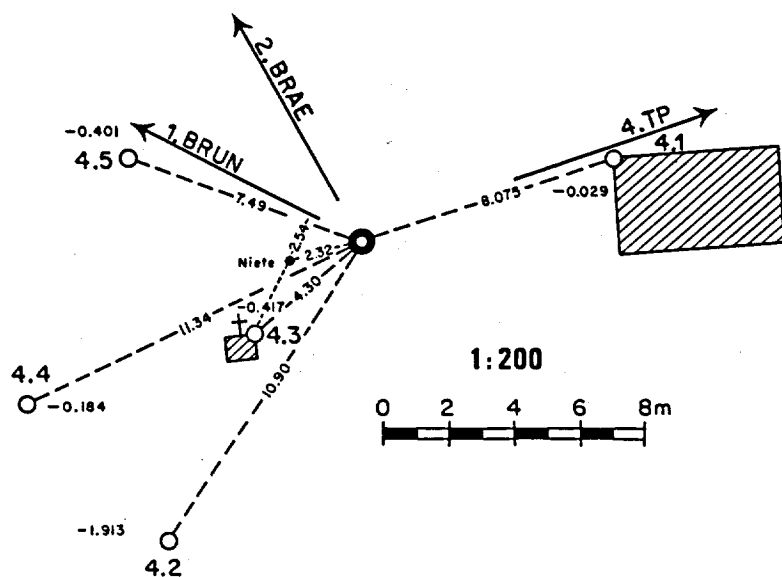
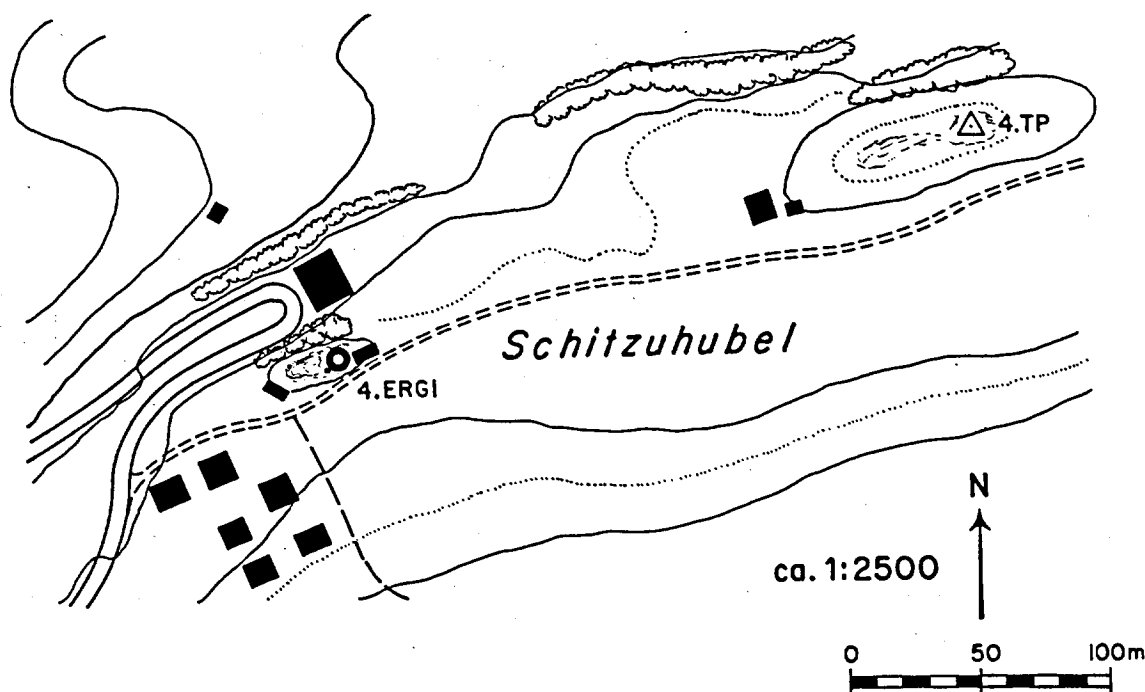
	g	c
6.GPS	256.25	
1.BRUN	279.78	
3.GPS	45.30	
3.GPS.E	63.74	
3.1	6.22	
3.2	37.35	
3.3	79.34	
3.4	369.67	

Abbildung 1.5-9: Station 3.JEIZ (Jeizinen), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **4.ERGI**



## Az. exz. Versicherung

	g	c
4.TP	78.21	
1.BRUN	329.79	
2.BRAE	367.16	
4.1	79.93	
4.2	236.54	
4.3	253.85	
4.4	271.10	
4.5	321.75	

Abbildung 1.5-10: Station 4.ERGI (Ergisch), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **5.OEMS**

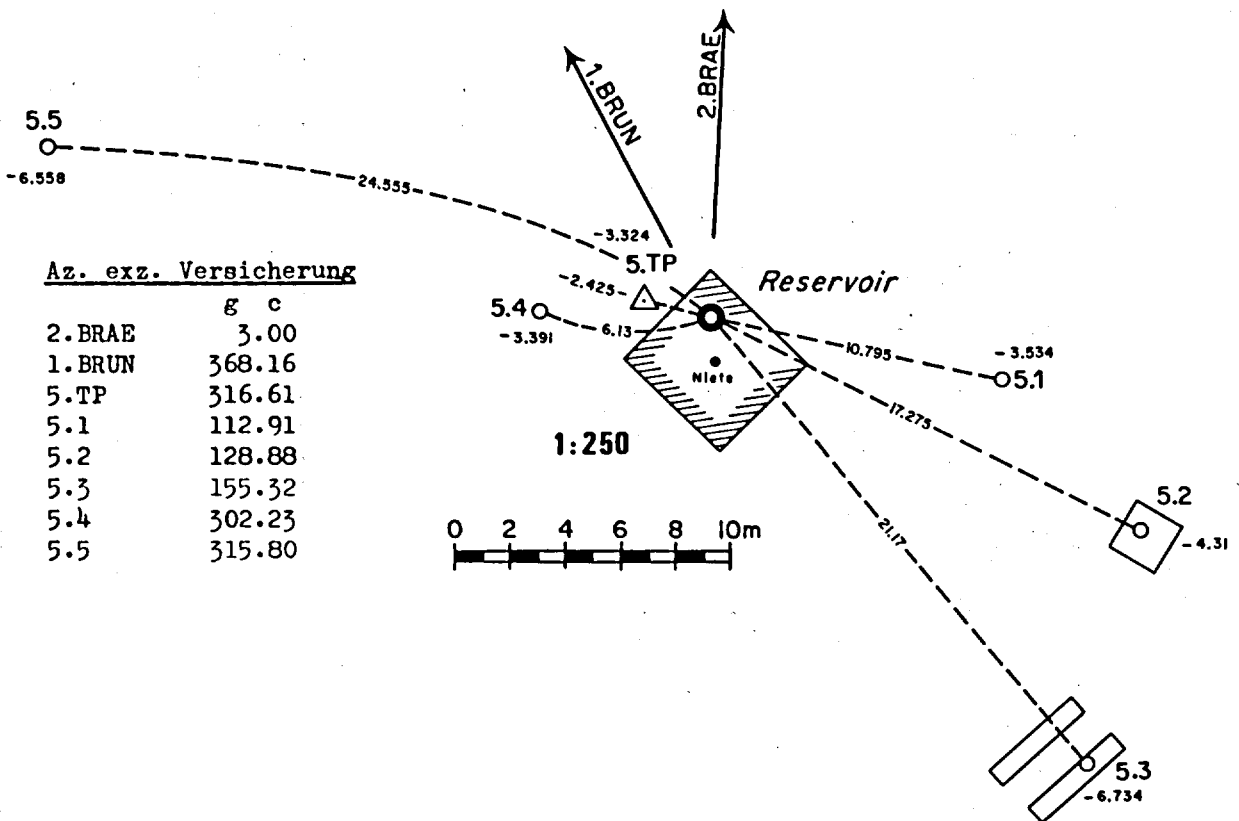
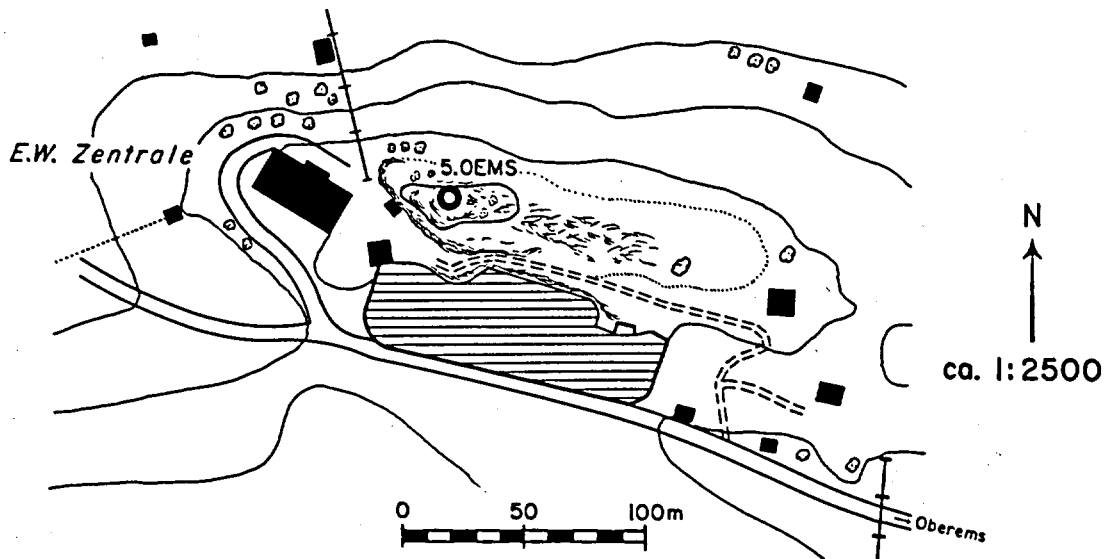
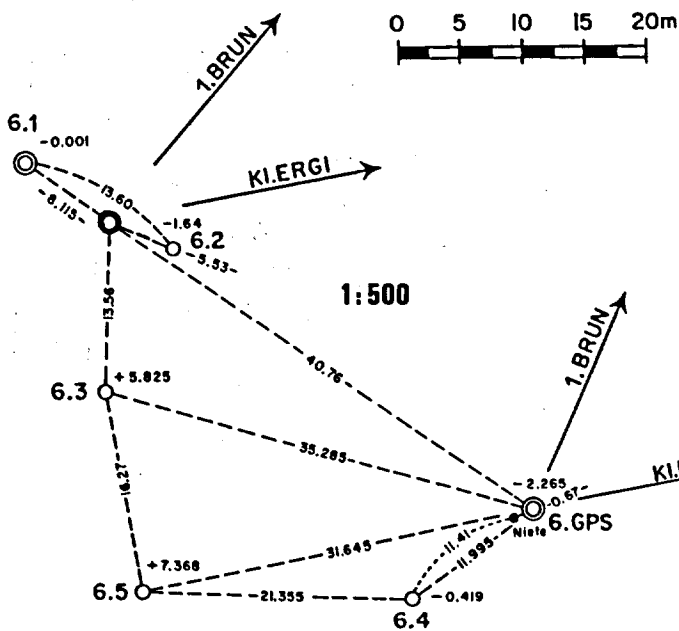
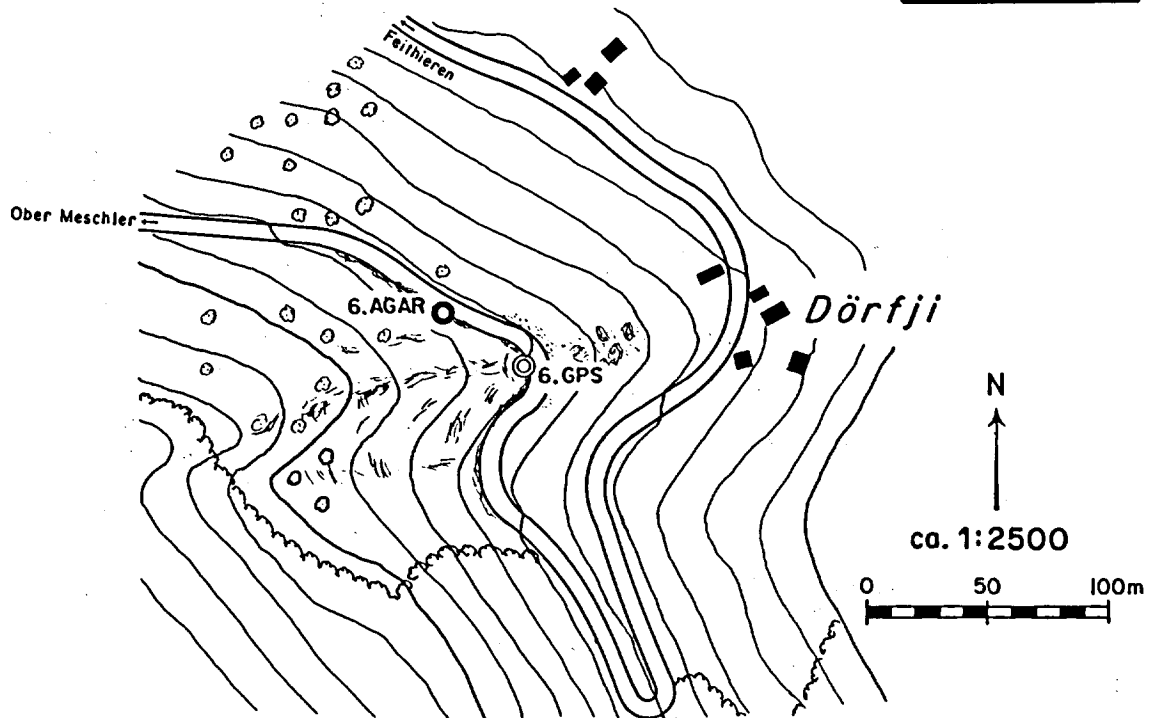


Abbildung 1.5-11: Station 5.OEMS (Oberems), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **6.AGAR**



Az. exz. Versicherung Stat 6.AGAR

	g	c
1.BRUN	26.27	
KI.ERGI	87.53	
6.GPS	137.72	
6.2	125.82	
6.3	200.63	
6.1	338.12	

Az. exz. Versicherung Stat 6.GPS

	g	c
1.BRUN	25.55	
KI.ERGI	87.17	
6.AGAR	337.72	
6.1	337.78	
6.4	258.78	
6.5	286.30	

Abbildung 1.5-12: Station 6.AGAR (Agarn), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **7.TURT**

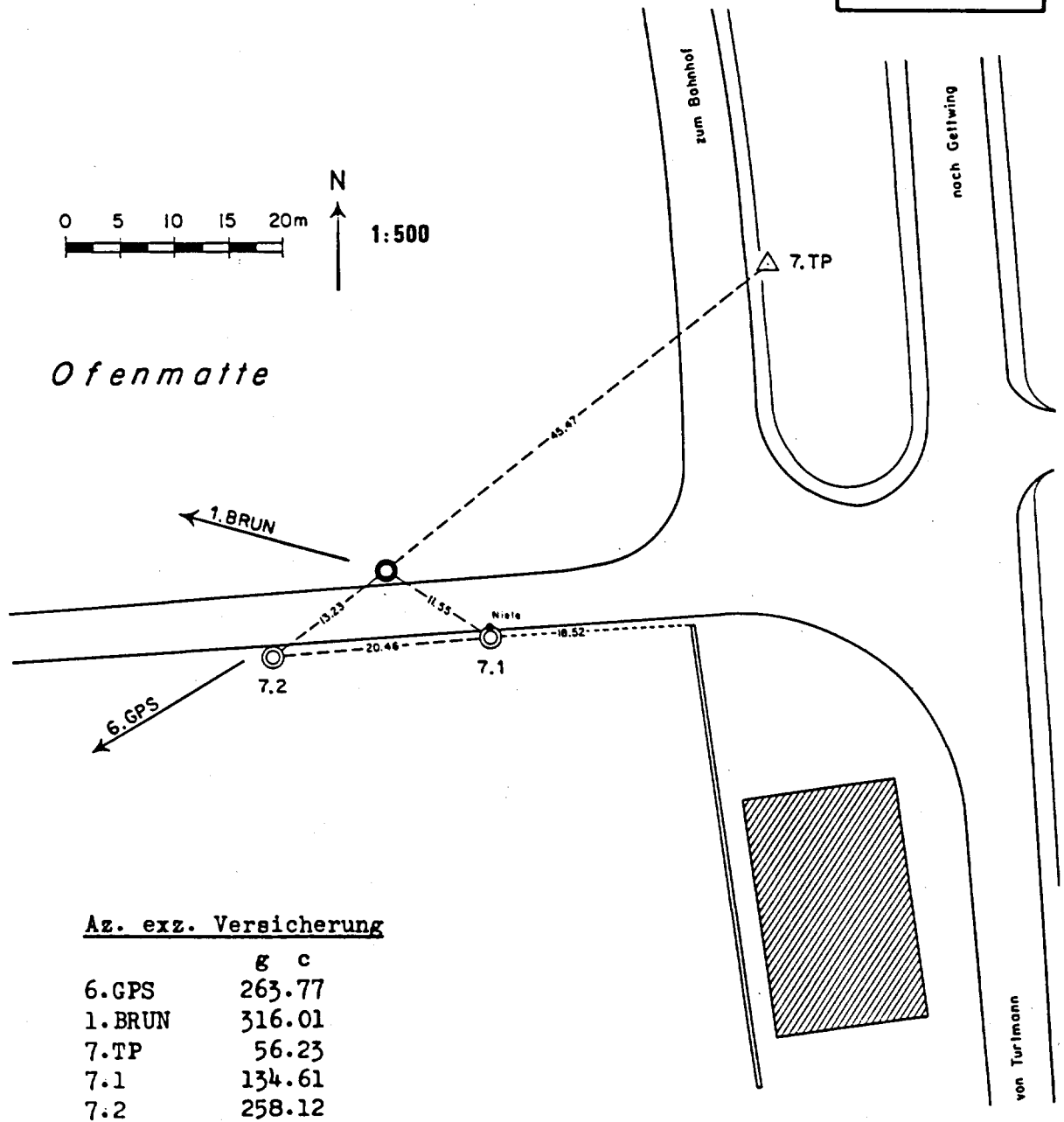


Abbildung 1.5-13: Station 7.TURT (Turtmann), Versicherungsprotokoll



# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **8.SUST**

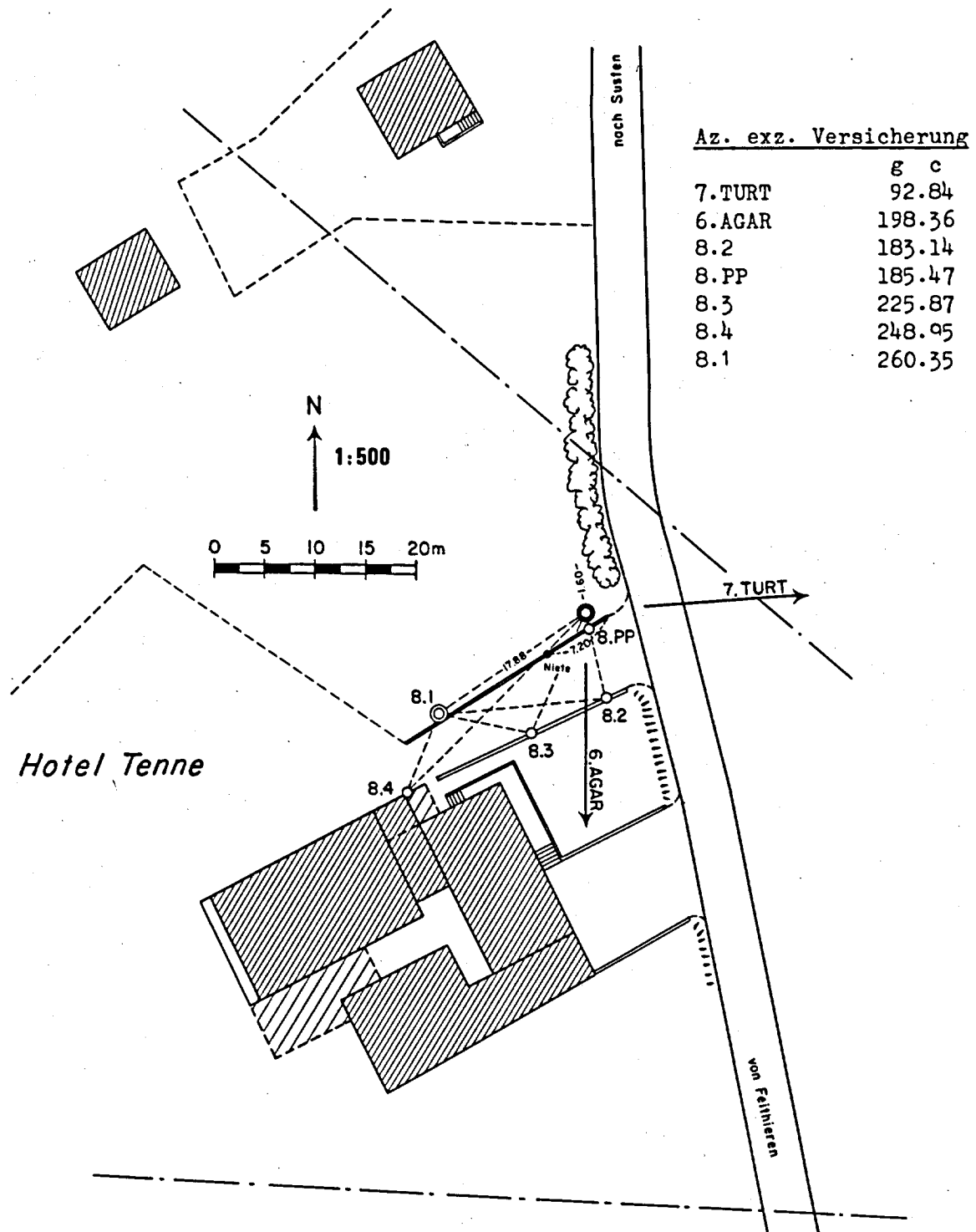


Abbildung 1.5-14: Station 8.SUST (Susten), Versicherungsprotokoll

# 3D-Netz TURTMANN 1985

VERSICHERUNGSPROTOKOLL

Punkt: **9.EMSH**

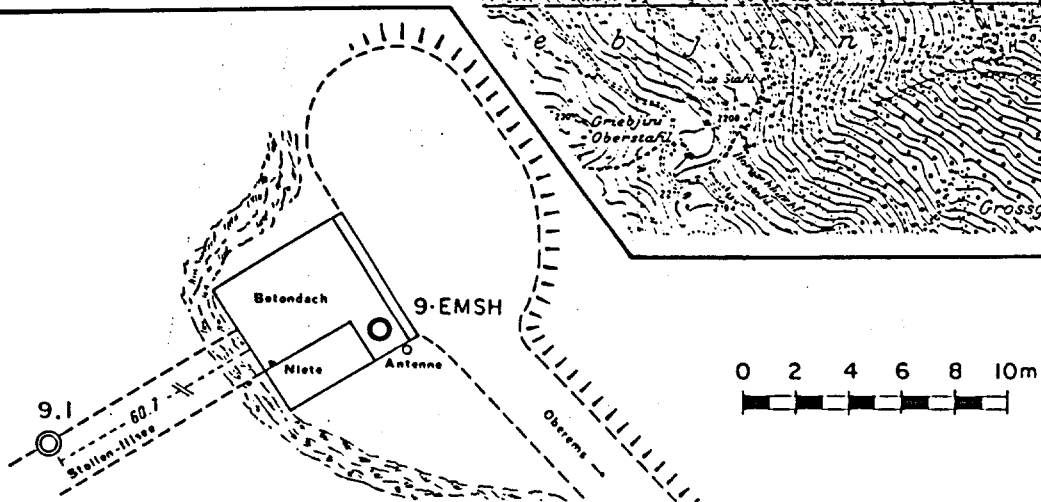
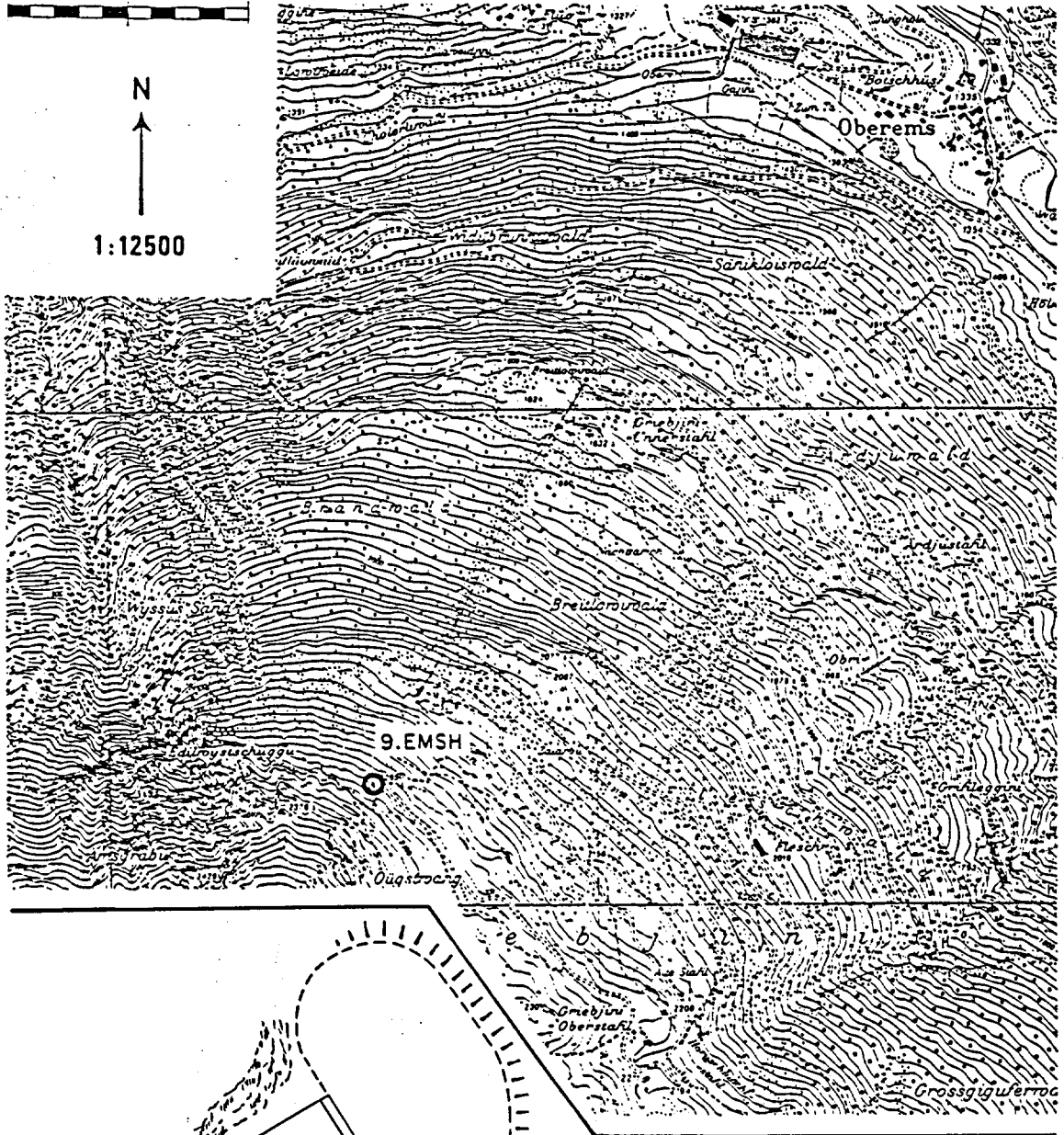
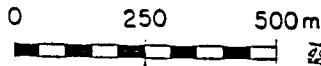


Abbildung 1.5-15: Station 9.EMSH (Emshorn), Versicherungsprotokoll

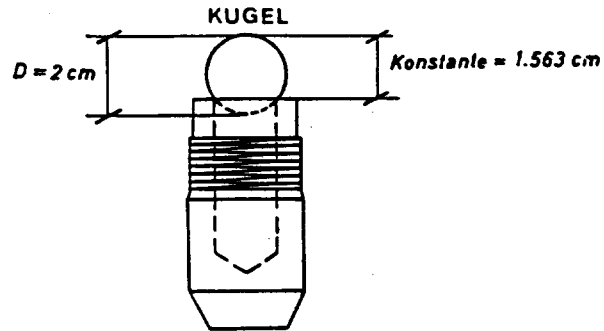
Station	Höhenreferenz Niete dh [m]	Kappenbolzen ohne Kugel ø 20mm dh [m]	Kappenbolzen mit Kugel ø 20mm dh [m]	Bemerkung
1.BRUN	0 - 0.0043	- 0.0427 - 0.0427	- 0.0271 - 0.0271	alte Höhe Niete 1989
2.BRAE	0	0.0810	0.0966	Exz.Bolzen
2.GPS	0	- 1.1888	-	
3.JEIZ	0	0.0368	0.0524	GPS-Niete " "
3.GPS	0	- 1.3487	- 1.3331	
3.GPS.E	0	- 0.1947	- 0.1791	
4.ERGI	0	- 0.2252	- 0.2096	
5.OEMS	0	- 0.2263	- 0.2107	
6.AGAR	0	- 0.1706	- 0.1550	Ref:6.1m.K. GPS-Niete
6.GPS	0	- 0.1341	- 0.1185	
7.TURT	0	- 0.1614	- 0.1458	
7.1	0	- 0.0166	- 0.0001	
7.2	0	- 0.1315	- 0.1159	
8.SUST	0	- 0.6533	- 0.6377	
8.1	0	0.4805	0.4961	
9.EMSH	0	- 0.0183	- 0.0027	ab 1987

Bemerkungen: Bestimmung der dh durch Nivellement 1985.

Die Kugelkonstante beträgt: 0.01563 m.

Nachtrag: Der Höhenreferenzpunkt (Niete) von FP 1.BRUN wurde am 4.7.89 zer-  
schlagen vorgefunden. Seine Höhe hat sich gegenüber dem ursprüng-  
lichen Zustand um 4.3 mm vermindert. Der Lagereferenzpunkt  
(Kappenbolzen) blieb unbeschädigt.

Tabelle 1.5-1: Höhenunterschiede zwischen Höhenreferenzpunkten (Nieten) und Zentrumspunkt (Kappenbolzen)



**Abbildung 1.5-16:** Definition der Kappenbolzenhöhe (Höhenunterschied zwischen dem Rand des offenen Kappenbolzens und dem Niveau der aufgesetzten Stahlkugel)

Die publizierten Höhen der Kappenbolzen beziehen sich auf den offenen Bolzen mit aufgesetzter Stahlkugel  $\varnothing 20$  mm. Die Höhe des Bolzenrandes lässt sich arithmetisch ermitteln (publizierte Höhe - Konstante von 0.01563 m). Die Kappenhöhe (Bolzen mit aufgeschraubter Kappe) ist nicht eindeutig bestimmbar.

## Literatur

- Bauersima, I. und M. Schürer (1976): Rationelle Behandlung der dreidimensionalen Geodäsie. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 7/1976.
- Counselman III, C.C. und D.H. Steinbrecher (1982): The Macrometer: A Compact Radio Interferometry Terminal for Geodesy with GPS. *3rd Internat. Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, New Mexico.*
- Gurtner, W. (1976): Eine Präzisionszentrivorrichtung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 5/1976.
- Jeanrichard, F. (1974): Essais de mesure géodésique des mouvements horizontaux de la croûte terrestre. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 3/1974.
- L+T (1985): 3D-Testnetz Turtmann. *Feld-Dokumente, Bundesamt für Landestopographie, Wabern.*
- Schneider, D. (1976): Programmsystem RAUMTRIG. Dokumentation. *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.*
- Schneider, D. (1978): Raumnetz Thusis. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 4/1978.
- Schneider, D. und N. Wunderlin (1981): RAUMTRI, Dreidimensionale Netzausgleichung in einem geozentrischen kartesischen Koordinatensystem. Programmbeschreibung / Benutzeranleitung. *Bericht Nr.45 aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.*
- Schneider, D. (1985): 3D - TESTNETZ - TURTMANN. Bericht und Vorschlag an die Arbeitsgruppe SATRAPE. *Bundesamt für Landestopographie, Wabern.*
- Schürer, M. (1987): Basismessung Heerbrugg 1959, Ausgleichung des Basisvergrößerungsnetzes. *Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz. Arbeiten der Bodenseekonferenz. Dreissigster Band, Teil VI. Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.*
- Wirth, B. (1990): Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveaulächen. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Bd.42. SGK, Zürich.*
- Wunderlin, N. (1981): Die Neuausgleichung des Vergrößerungsnetzes der Basis Giubiasco. *Bericht Nr.49 aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.*

## 2 Arbeiten der L+T 1985 – 87

(Autoren: D. Schneider, D. Meier)

### 2.1 Allgemeines

Wie schon in Kap.1.1 einleitend erwähnt, war die praktische Durchführung der geplanten terrestrischen Messungen höchster Präzision sowie ihre Auswertung nur im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit aller Mitglieder der Arbeitsgruppe GPS der SGK denkbar. Aufgrund der vorhandenen Erfahrungen und der personellen und technischen Mittel war die Abteilung Geodäsie der L+T in der Lage, einen wesentlichen Teil der terrestrischen Mess- und Auswerteaufgaben sowie deren Leitung und Organisation zu übernehmen. Über diese Arbeiten, welche sich über mehr als 2 Jahre erstreckten und bei welchen viele Mitarbeiter der Partnerinstitute mitgewirkt haben, wird in Kap.2 berichtet.

Zwei wichtige Teilaufgaben: Die Meteo-Erfassung und troposphärische Reduktion der Streckenmessungen sowie die lokale Schwerefeldbestimmung sind in den folgenden Kapiteln (3 und 4) dokumentiert.

### 2.2 Höhenwinkelmessungen

#### 2.2.1 Konzept der simultan gegenseitigen Höhenwinkelmessung

Die relative Höhenbestimmung im 3D-Testnetz Turtmann stützt sich primär auf die Höhenwinkelbeobachtungen und zu einem wesentlichen Teil auch auf die Beobachtungen der steilen Raumdistanzen. Während die systematischen Einflüsse der troposphärischen Refraktion bei den Streckenmessungen durch Meteo-Messungen in dem den Visurstrahl umgebenden Raum oder durch den Einsatz der Dispersionsmethode relativ gut erfasst werden können, fehlen z.Z. praktikable Lösungen für die direkte Bestimmung der Refraktionswinkel über lange Distanzen.

Neben der Möglichkeit, die Vertikalwinkel bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen und während längeren Zeitintervallen wiederholt zu beobachten, hat vor allem die **simultan gegenseitige Beobachtungsweise** in der Praxis erfolgversprechende Ergebnisse geliefert. Dieser Methode liegt die Annahme zugrunde, dass auf der ganzen Länge des Visurstrahls zur gleichen Zeit die gleichen Refraktionsverhältnisse herrschen, was zu einem kreisförmigen Visurstrahl und gleichen Refraktionswinkeln auf den gegenüberliegenden Stationen führen würde. Unter diesen Umständen würde der Refraktions-effekt theoretisch eliminiert. In einem steilen ost-west gerichteten Gebirgstal ist die Hypothese von homogenen Refraktionsverhältnissen im ganzen Raum des Netzes offensichtlich nicht haltbar. Auf der besonnten Nordflanke des Tales sind z.B. andere Temperaturgradienten (und damit Refraktionswinkel) zu erwarten als am schattigen Abhang auf der Südseite. Ein Beobachtungskonzept, das die simultan gegenseitige Messung der Vertikalwinkel während längeren Zeitintervallen (mehreren Stunden) vorsieht, genügt allein als Massnahme nicht, um über Visurlängen von 2-7 km die gewünschte hohe Genauigkeit der Höhendifferenzen zu erreichen.

Einen Ausweg bietet die von *Wunderlin [1987]* entwickelte **Methode zur Refraktionsbestimmung mit Hilfe der Kollokation** (Programm REFKOL), bei welcher die Schätzung der Refraktionswinkel auf Grund eines stochastischen Ansatzes erfolgt. Bei der als Kollokation bezeichneten Variante der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate werden die Verbesserungen in einen der Beobachtung anhaftenden zufälligen Fehleranteil ("Rauschen") und einen infolge von Störeinflüssen entstehenden systematischen Anteil ("Signal") aufgespalten. Die Schwierigkeit liegt dabei bei der Bildung der Kovarianz-Submatrix  $C_{ss}$  der Signale. In REFKOL wird die Submatrix der Gesamtkorrelation als Produkt aus den drei Teilmatrizen MET (wetterbedingte Korrelation), TOP (topographiebedingte Korrelation) und SEP (durch die zeitlichen Abstände der Beobachtungen bedingte Korrelation) gebildet. Zum Studium des Konzepts und des mathematischen Modells der Methode vergleiche man [*Wunderlin, 1987*].

Die rationelle Durchführung von Höhenwinkelmessungen nach dem simultan gegenseitigen Beobachtungsverfahren ist schwierig. Wegen der Bedingung der Gleichzeitigkeit der gegenseitigen Messungen entstehen unweigerlich Wartezeiten. Es gelang schliesslich doch einen Messplan aufzustellen, bei welchem das ganze Netz mit 4 Messequipen innert 3 Tagen gemessen werden konnte. Die Grundidee besteht darin, dass pro Halbtage alle 6 möglichen Visuren in einem Viereck (4 Seiten und 2 Diagonalen) in mehreren Messintervallen systematisch gemessen werden. Durch die wiederholte Messung während je eines Halbtages (von 08:30 Uhr bis 12:00 Uhr bzw. von 14:00 Uhr bis 17:30 Uhr) wird erreicht, dass die ganze Variation des Refraktionswinkels während den für die Vertikalwinkelmessung günstigsten Zeitspannen erfasst werden kann.

### 2.2.2 Messkampagne vom 10. - 13.9.1985

Nach der Fertigstellung der Versicherungsarbeiten wurde als erstes die Höhenwinkelmessung in Angriff genommen. Gleichzeitig wurden Anschlussmessungen an nahegelegene TP 3. Ordnung, Näherungsdistanzmessungen und Einmessungen der Rückversicherungsmarken durchgeführt. Mit diesen Hilfsmessungen konnten die Wartezeiten zwischen den Höhenwinkelmessintervallen optimal ausgefüllt werden. Ziel dieser Feldarbeiten war, alle nötigen Messelemente für eine erste, näherungsweise 3D-Ausgleichung des Netzes zu sammeln. Nach Abschluss der ersten GPS-Messkampagnen im Oktober 1985 sollten bereits erste terrestrische Vergleichskordinaten zur Verfügung stehen. Im Winterhalbjahr stand zudem genügend Zeit für die Auswertung der Höhenwinkelmessungen mit REFKOL zur Verfügung.

Messkampagne: simultan gegenseitige Höhenwinkel	
Termin:	10. - 13. 9. 1985
Leitung:	D. Schneider
Beobachter:	F. Eggenberg, D. Gutknecht, D. Schneider, T. Signer, B. Vogel
Mitarbeiter:	E. Beyeler, B. Mattli, Ch. Müller, Praktikant
Instrumente:	Theodolite: 3 KERN E2 , 1 WILD T2 Zieltafeln: System "Oettli" Scheinwerfer: WILD GEB-72
Messprogramm:	quasi-simultane gegenseitige HW-Messung (Beobachtungssequenzen s.u.)
Datenerfassung:	4 EPSON HX-20 (davon 3 online) Programm: STRI

Tabelle 2.2-1: Höhenwinkelmesskampagne 1985

Beim Entwurf des Beobachtungsprogrammes hat uns Herr N. Wunderlin (IGP-ETHZ) beraten. Seine wertvollen Erfahrungen bezüglich Höhenwinkelmessung und Refraktion sind so in idealer Weise in die Arbeit eingeflossen.

Dank den guten Sichtverhältnissen konnten die Messungen fast genau nach Plan ausgeführt werden. Die transparenten Zieltafeln (System "Oettli") haben sich einmal mehr bewährt. Nur in wenigen Fällen, hauptsächlich bei den langen Visuren zu den Talpunkten, mussten Zielscheinwerfer eingesetzt werden. Das Scheinwerferlicht konnte wegen den Überstrahlungseffekten oft nur mit Mühe angezielt werden. Schwierige Messverhältnisse traten jeweils beim ersten Messintervall am Morgen (zwischen 08:30 und 09:00 Uhr) und beim letzten Messintervall am Abend (nach 17:00 Uhr) auf. Zu diesen Zeiten ändern sich die Refraktionsverhältnisse rasch, was sich beim Anzielen und schliesslich bei der Streuung innerhalb der einzelnen Messsätze bemerkbar machte.

Beobachtungsprogramm									
Messintervall	Vormittag von bis	Nachmittag von bis	Phasen	Dauer Min	Schema	Anzahl HW			
1 (V,N)	8:30- 9:00	14:00-14:30	I ->	5		je 2-4 je 2-4			
			I <-	5					
			II ->	5		je 2-4 je 2-4			
			II <-	5					
			III ->	5		je 2-4 je 2-4			
			III <-	5					
			2 (V,N)	10:00-10:30	15:30-16:00	I ->	5	wie oben	je 2-4
						I <-	5		
						II ->	5		
II <-	5								
III <-	5								
III ->	5								
3 (V,N)	11:30-12:00	17:00-17:30	I ->	5	wie oben	je 2-4			
			I <-	5					
			II ->	5					
			II <-	5					
			III <-	5					
			III ->	5					

Tabelle 2.2-2: Beobachtungsprogramm: Höhenwinkel

Die Auswahl der sechs Vierecke (Figuren 1 bis 6) geschah kurzfristig. Dabei wurden die aktuellen Sicht- und Beleuchtungsverhältnisse nach Möglichkeit berücksichtigt (Tab. 2.2-3).

Auswahl der Vierecke			
Datum	Vor-/Nachmittag	Figur	Viereck A - B - C - D
11.9.85	Vor	2	8.SUST - 3.JEIZ - 4.ERGI - 6.AGAR
	Nach	3	8.SUST - 2.BRAE - 5.OEMS - 7.TURT
12.9.85	Vor	1	1.BRUN - 2.BRAE - 5.OEMS - 4.ERGI
	Nach	4	1.BRUN - 7.TURT - 6.AGAR - 3.JEIZ
13.9.85	Vor	5	6.AGAR - 3.JEIZ - 2.BRAE - 5.OEMS
	Nach	6	7.TURT - 8.SUST - 4.ERGI - 1.BRUN

Tabelle 2.2-3: Höhenwinkelmessung: Auswahl der Figuren



Für die Schätzung der Refraktionswinkel mit dem Programm REFKOL werden Angaben über die meteorologischen Verhältnisse auf den Messstationen benötigt. Die Definition der 4 visuellen Meteowerte ist in Tab.2.2-4 wiedergegeben. Diese Werte wurden auf allen 4 Messstationen und zu jedem einzelnen Messintervall visuell beobachtet und in einem vorbereiteten Messformular festgehalten.

Visuelle Erfassung der Meteo-Bedingungen (Definitionen)		
Beobachtung:	Wert:	Erläuterung:
Windstärke	0 - 3	(Beaufort-Wert/2)
Sonne	0 / 1	(0=keine Sonne / 1=Sonne)
Bewölkung	0 -10	(Himmel zu n/10 bewölkt)
Niederschlag	0 / 1	(0=kein Niederschlag/1=Niederschlag)

Tabelle 2.2-4: Klassierung der visuell erfassten Meteo

Das Wetter war während den ersten 5 Halbtagen wolkenlos und trocken. Am späteren Nachmittag des 13.9. nahm die Windstärke zu und der Himmel begann sich zu bewölken. Es blieb aber bis am Abend niederschlagsfrei.

Die Mittelwerte für jeden Halbtag sind in Tab.2.2-5 zusammengestellt. Es war besonders interessant festzustellen, dass an jedem der drei Nachmittage jeweils an der Nordflanke des Tales mässiger bis starker Wind aufkam, während es auf der Südseite praktisch windstill blieb.

Mittlere Meteo-Bedingungen						
Datum	Vor-/Nach- mittag	Nord-/ Südhang	Wind- stärke	Sonne	Bewölkung	Nieder- schlag
11.9.85	Vor	Nord	1	1	0	0
	Vor	Süd	0	1	0	0
	Nach	Nord	1-2	1	0	0
	Nach	Süd	0	1	0	0
12.9.85	Vor	Nord	1-2	1	0	0
	Vor	Süd	0	1	0	0
	Nach	Nord	1-3	1	0	0
	Nach	Süd	0	1	0	0
13.9.85	Vor	Nord	0-1	1	0	0
	Vor	Süd	0-1	1	0	0
	Nach	Nord	2-3	1	0-5	0
	Nach	Süd	0	1	0-4	0

Tabelle 2.2-5: Mittlere Meteobedingungen während den Höhenwinkelmessungen

### 2.2.3 Refraktionsschätzung mittels Kollokation

Als Messwerte standen die mit den Programmen STRI und MESSED erfassten mittleren Höhenwinkel jedes Messintervalls mit zugehörigen Instrumenten- und Signalhöhen zur Verfügung. Die rohen Messwerte wurden mit Hilfe des Programms RAUMTRI räumlich zentriert und von groben Fehlern befreit. Es mussten nur einzelne fehlerhaft erfasste Zielpunktbezeichnungen und zwei Signalhöhen berichtigt werden.

Die Refraktionsschätzung mit dem Programm REFKOL erfolgte mit Unterstützung durch den Programmator (N. Wunderlin) im November/Dezember 1985 auf der CDC-Rechenanlage des IGP-ETHZ. Als Eingabedaten für REFKOL mussten Näherungskordinaten, ellipsoidische Näherungshöhen sowie Lotabweichungen bereitgestellt werden. Ferner musste die Geländeform des Gebiets in grober Näherung aus einer topographischen Karte (Landeskarte 1:25 000) erfasst werden. Erhoben wurde die mittlere Geländeneigung im ersten Drittel jedes Visurstrahls (Gefälle [%] und Azimut der Fallinie). Zur Bestimmung der Meteo-Korrelation wurden für jeden Halbtag die mittleren Werte "Besonnung", "Niederschlag" und "Wind" erfasst. Als eigentliche Höhenwinkelbeobachtungen wurden 253 zentrierte Mittelwerte mit zugehöriger Messzeit (Datum, Uhrzeit) bereitgestellt.

Eine detaillierte Beschreibung der REFKOL-Berechnungen findet sich in [Wunderlin, 1987]. An dieser Stelle seien nur die wichtigsten Resultate zusammengefasst.

Resultate der Refraktionsschätzung mit Kollokation	
Anzahl Stationspunkte:	8
Anzahl beobachtete Visuren:	56
Visurlänge (Mittel):	3.9 km (1.9 bis 7.4)
Anzahl Beobachtungen pro Visur:	4.5 (3 bis 12)
Anzahl Beobachtungen (total):	253
Refraktionskoeffizient:	
- ohne Kollokation:	K = 0.14 ± 0.01
- mit Kollokation:	K = 0.17 ± 0.03
Verbesserungen an den HW (Durchschnitt):	
- ohne Korrelation:	mm = 7.6 cc *
- mit Korrelation:	mm = 3.3 cc
mittlere Fehler der Parameter (Durchschnitt):	
- Höhen:	mH = 0.014 m
- Lotabweichungen:	m = 3.4 cc
	m = 3.5 cc

\* 1 cc  $\hat{=}$  0.01 mgon

Tabelle 2.2-6: Resultate der Refraktionsschätzung

Die geschätzten Refraktionswinkel wurden schliesslich an den Visurmittelwerten angebracht und diese "refraktionsfreien" Messwerte im L+T - Beobachtungsdatenformat bereitgestellt.

### 2.2.4 Beurteilung der Resultate

Zur Überprüfung und Beurteilung der Resultate der Refraktionsschätzung wurden die Möglichkeiten der Varianzkomponentenanalyse [Welsch, 1984] im Programm RAUMTRI (Vers. L+T) angewendet. Dabei wurden eine dreidimensionale Ausgleichung des Netzes mit den Visurmittelwerten der Original-Höhenwinkel und zum Vergleich eine zweite mit den "refraktionsbefreiten" Visurmittelwerten durchgeführt.

Da im Winter 1985/86 noch keine Präzisionsdistanzen und Richtungen zur Verfügung standen, mussten damals provisorische Messwerte (WILD-DI20-Strecken), welche für die Berechnung der Näherungskordinaten und den Anschluss an die offiziellen Triangulationspunkte gemessen wurden, herangezogen werden. Später wurde dieser Vergleich mit dem endgültigen terrestrischen Messdatensatz (Ausgleichung Nr.19A) wiederholt. Die Reduktion des mittleren Fehlers der Beobachtungsgruppe von 7 auf 3 cc (s.Tab. 2.2-7) demonstriert den Erfolg der Refraktionsschätzung mit REFKOL.

A posteriori Varianzkomponentenschätzung			
	Beobachtungs-Datensatz		Bemerkungen
	Original HW	"refraktions-befreite HW"	
Anzahl der Beobachtungen:			
- Höhenwinkel	56	56	
- andere	183	183	
Refraktionskoeffizienten:			
- Hauptgruppe (47 Beob.)	0.13	0.00	konstant
- bodennahe (9 Beob.)	0.04	-0.07	variabel
mittl. Fehler a posteriori:			
- der Höhenwinkel	7.0 cc	3.1 cc	1cc $\hat{=}$ 0.1 mgom
Anzahl eliminierte Ausreisser:	0	0	

Tabelle 2.2-7: Varianzkomponenten-Schätzung der Höhenwinkel in der 3D-Ausgleichung

## 2.3 Richtungsmessungen

### 2.3.1 Richtungsmessung mit elektronischen Präzisionstheodoliten

Im Sommer 1983 führte die L+T umfangreiche Testmessungen mit den neuen elektronischen Theodoliten KERN E2 und WILD T2000 durch [Schneider, 1983]. Die Resultate dieser Untersuchungen zeigten, dass beide Gerätetypen für Richtungs- und Höhenwinkelmessungen höchster Präzision in der Landes- und Ingenieurvermessung erfolgreich eingesetzt werden können. Die mittleren Fehler der Richtungssätze der Testgeräte unterscheiden sich kaum von jenen, welche mit dem klassischen Vergleichsgerät WILD T3 erreicht wurden. Einzig die schwächere Lichtstärke und Vergrößerung der Fernrohre bei E2 und T2000 wurden bei schwierigen Sichtverhältnissen als Nachteil empfunden. Bei Richtungsmessungen im Gebirge erwies sich das Konzept des KERN E2 mit Korrektur und Erfassung der Rest-Stehachsenschiefe als besonders vorteilhaft. In der Folge beschaffte die L+T ein solches Gerät und entwickelte die notwendige Software (Programm STRI) für die online Stationsausgleichung mit einem EPSON HX-20 (handheld PC).

Die Firma WILD-Leitz Heerbrugg befasste sich 1986 mit der Weiterentwicklung des T2000. Der ursprüngliche Typ wurde mit einem leistungsfähigen panfokalen Fernrohr ausgerüstet (Prototyp T2000S). Diese Entwicklung hat später zum elektronischen Präzisionstheodoliten WILD T3000 geführt. Auf unsere Anfrage hin wurde uns ein Prototyp T2000S für die Richtungsmessung im Netz Turtmann zur Verfügung gestellt. Leider enthielt dieser Typ noch keine Kompensatoren für die direkte Messung und Berücksichtigung der Rest-Stehachsenschiefe.

### 2.3.2 Messkampagne vom 21. - 25.4.1986

<b>Messkampagne: Richtungsmessung</b>	
Termin:	21. - 25. 4. 1986
Leitung:	D. Schneider
Beobachter:	F. Eggenberg, D. Schneider, T. Signer
Mitarbeiter:	E. Beyeler, B. Mattli, Praktikantin
Instrumente:	Theodolite: 1 KERN E2, 1 WILD T2000S Zieltafeln: System "Oettli" Zielscheinwerfer: WILD GEB-72 und WILD-omni-directional
Messprogramm:	je Station 2 X 2 Sätze, beim T2000S: Erfassung der Rest-Stehachsenschiefe
Datenerfassung:	1 EPSON HX-20 online; Prog.STRI 1 WILD GRE3 online; Prog.SATZ (Profis)
Transporte:	teilweise mit Armeehelikopter

Tabelle 2.3-1: Richtungs-Messkampagne 1986

Die Richtungsmessungen wurden schon früh in der Feldsaison 1986 vorgesehen. Da im April 1986 in den höheren Lagen noch Schnee lag, war der Zugang zu den höher gelegenen Stationspunkten erschwert. Dies galt besonders für die Zufahrt zur Station 6.AGAR auf der Meschleralp, da die Alpstrasse durch Hangrutschungen verschüttet war. Dank dem Einsatz eines Militärhelikopters konnten die Messequipen samt Material zu diesen Punkten befördert werden.

Damit ein objektiver Vergleich der Messgenauigkeit des WILD T2000S gegenüber dem KERN E2 möglich war, sahen wir im Messprogramm pro Station je 2 Satzmessungen mit E2 und T2000S unmittelbar hintereinander vor. Die Stationierung erfolgte konsequent auf L+T-Stahlpfeilern (*s. Abschn.1.5.1*). Diese erlauben bei der Verwendung von Zentrierschlitten (System AIUB; [Gurter, 1976]) und Zentriersätzen (*Abb.1.5-4*) eine genaue optische Zentrierung (mittl. Zentrierfehler: 0.25 mm) und eine gegenüber äusseren Einflüssen unempfindliche Aufstellung. In Bezug auf die Einflüsse der Sonneneinstrahlung (Verschiebung, Torsion und Kippung des Stativtellers) ist bei Verwendung von Stahlpfeilern eine Verbesserung gegenüber den klassischen Holzstativen festzustellen, die Qualität eines wärmeisolierten Betonpfeilers kann aber nicht ganz erreicht werden. Deshalb ist es in Netzen mit steilen Visuren notwendig, die momentane Rest-Stehachsenschiefe bei der Richtungsmessung zu erfassen und deren Einflüsse auf die Richtungen zu berücksichtigen.

Zur Signalisierung wurden einmal mehr die altbewährten, transparenten Zieltafeln (System "Oettli") eingesetzt, welche auch die Messung bei Gegenlicht ermöglichten. In einzelnen Fällen wurden auch WILD-Zielscheinwerfer GEB -72 und versuchsweise ein Zielscheinwerfer WILD-"omni directional" verwendet. Die Sichtverhältnisse waren überdurchschnittlich gut, sodass meistens auf den Einsatz der Scheinwerfer verzichtet werden konnte.

Bei der Messung mit dem KERN E2 (und Epson HX-20) wurde bei jeder Richtungsablesung die unvermeidliche Rest-Stehachsenschiefe erfasst und registriert (Messmodus "COMP ON") und die daraus berechneten Korrekturen an jeder Richtungsablesung automatisch angebracht. Die Datenerfassung und online Stationsausgleich beim T2000S erfolgte mit dem Programm SATZ (Programmsammlung WILD Profis) auf einem Feldterminal WILD GRE3. Leider verfügte der T2000S (im Gegensatz zu den später hergestellten Typen WILD T2002 und T3000) noch über keine Möglichkeit, die Rest-Stehachsenschiefe direkt zu messen und die entsprechenden Korrekturen an den Richtungen anzubringen. Deshalb wurde die Stehachsenschiefe vor und nach jedem Satz nach klassischer Manier gemessen und in ein Feldblatt eingetragen. Dabei wird bei festgeklemmtem Höhentrieb in vier Stellungen der Alhidade (0, 100, 200, 300 °)

der Höhenwinkel abgelesen. Anhand dieser Messwerte können die Richtungsablesungen nachträglich reduziert werden (s. *Abschn.2.3.3*), wobei die Annahme gemacht werden muss, dass sich die Stehachsen-schiefe während der Satzmessung nicht verändert hat.

Gleichzeitig mit den Richtungsmessungen 1986 im Netz erfolgten auch die Richtungsmessungen zu den exzentrischen Rückversicherungsmarken (*Kap.2.7.1*) und zu allen GPS-Exzentren (*Kap.2.7.3*).

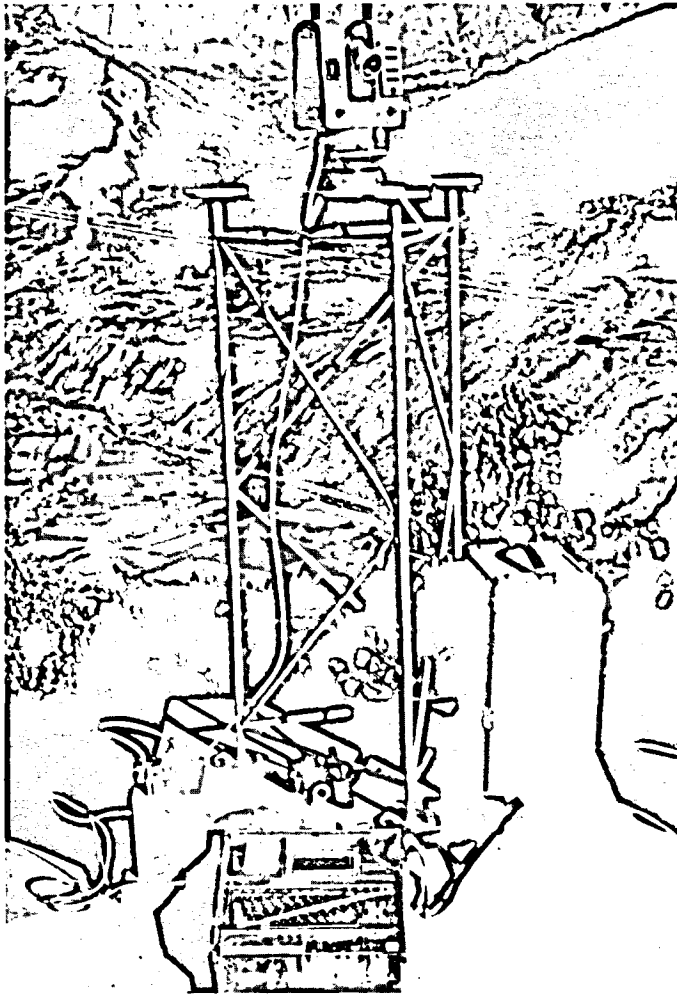


Abbildung 2.3-1: Richtungsmessung mit elektronischem Theodolit E2

### 2.3.3 Auswertung der Richtungsmessungen

#### 2.3.3.1 Berücksichtigung der Stehachsenschiefe

Zur Reduktion der Messungen mit dem T2000S wurde die Methode zur Bestimmung der Rest-Stehachsenschiefe aus Ablesungen am Höhenkreis [Elmiger und Meyer, 1981] angewendet. Dazu wird vor und nach jedem Richtungssatz die Neigung (Zenitdistanz) des festgeklemmten Fernrohrs ( $z_i$ ,  $i=0,1,2,3$ ) in den 4 Stellungen der Alhidade: 0, 100, 200 und 300 gon am Höhenkreis abgelesen.

Die zwei Komponenten der Stehachsenschiefe (im Bezugssystem gegeben durch die Nullmarke des Horizontalkreises)  $s_1$  und  $s_2$  ergeben sich für den Fall der 1. Fernrohrlage wie folgt:

$$s_1 = (z_0 - z_2) / 2 \quad s_2 = (z_1 - z_3) / 2$$

Die korrigierte Horizontalrichtung  $r_i$  (Mittel aus Messung in beiden Lagen) erhält man aus der rohen Ableseung am Horizontalkreis  $r_{i0}$  und der Zenitdistanz  $z_i$  mit:

$$r_i = r_{i0} - (s_1 \sin r_i - s_2 \cos r_i) / \tan z_i$$

Die Richtungskorrekturen wurden mit einem Computerprogramm (STEHAX) auf der Prime-Rechenanlage berechnet und an den Originalmessdaten angebracht. Dabei wurden die errechneten Stehachsneigungen  $s_1$  und  $s_2$  für die Zeit vor und nach jeder Satzmessung verglichen und gemittelt. Die Mittelwerte wurden dann für die Berechnung der Korrekturen am Richtungssatz herangezogen. Die Neigungswerte (vor und nach dem Satz) stimmten i.A. innerhalb weniger cc überein. Bei 12 Einzelsätzen deuten Änderungen dieser Werte um mehr als 10 cc auf eine Kippung während des Satzes hin. Wir müssen daraus schliessen, dass die Methode der direkten Korrektur der Rest-Stehachsenschiefe (KERN E2) unter den Bedingungen in Turtmann dem hier angewendeten Verfahren überlegen ist.

#### 2.3.3.2 Getrennte Stationsausgleichungen KERN E2 / WILD T2000S

Eine erste Stationsausgleichung der Richtungssätze für den jeweiligen Theodoliten wurde bei der Messung online durchgeführt. Diese Berechnungen wurden nach der Datenbereinigung auf der Prime-Rechenanlage mit den entsprechenden Messdaten-Erfassungsprogrammen MESSED (für E2) und SATZ2 (für T2000S-Daten) wiederholt. Die Resultate dieser Stationsausgleichungen sind in Tabelle 2.3-2 in den Kolonnen  $m_0$  (mittlerer Fehler der Gewichtseinheit bzw. einer einmal gemessenen Richtung) und  $m_r$  (mittlerer Fehler einer ausgeglichenen Richtung) getrennt für jeden Gerätetyp zusammengestellt.

#### 2.3.3.3 Vereinigung der Richtungssätze

Mit einer weiteren Stationsausgleichung wurden schliesslich alle vorhandenen Richtungssätze pro Stationspunkt vereinigt. Die Berechnung erfolgte mit dem Programm STATAUS (Ausgleichung von unvollständigen Richtungssätzen [Höpcke, 1969]). Als mittlerer Fehler a priori der Richtungen wurde für beide Gerätetypen einheitlich 2.5 cc eingeführt. Die mittleren Fehler der ausgeglichenen Richtungen sind in Tabelle 2.3-2, Kolonne  $m_m$  aufgeführt. Die ausgeglichenen Richtungssätze wurden schliesslich in die 3D-Ausgleichung eingeführt. Sie sind im Output als Beobachtungsdaten aufgelistet (s. Abschn. 2.8.3, Beob.Nr.80-135).

Stationsausgleichungen: KERN E2 / WILD T2000S										
STATION	Datum	Zeit	Beob.	Instr.	Sets	Vis.	Bemerkung (s. unten)	$m_0$	$m_r$	$m_m$
	dd.mm	hh.mm						cc	cc	cc
1.BRUN	24.04	09:05	dsd	E2	2	7		2.0	1.4	1.8
	24.04	10:45	SIG	T2000S	3	7		3.1	1.8	
2.BRAE	23.04	12:27	dsd	E2	3	7		3.7	2.2	1.6
	23.04	13:15	EGG	T2000S	4	7		5.0	2.5	
	24.04	11:16	dsd	E2	3	7	1)	2.9	1.7	
	24.04	11:50	SIG	T2000S	3	7		2.0	1.2	
3.JEIZ	22.04	14:22	dsd	E2	3	7		3.3	1.9	1.8
	22.04	15:25	EGG	T2000S	3	9	2)	4.9	2.8	
	24.04	17:02	dsd	E2	3	7		4.2	2.4	
	24.04	17:45	EGG	T2000S	2	7		2.7	1.9	
4.ERGI	23.04	14:38	dsd	E2	3	7		3.4	2.0	1.7
	23.04	15:40	EGG	T2000S	3	7		4.5	2.6	
	24.04	15:17	dsd	E2	3	7		3.3	1.9	
	24.04	16:00	EGG	T2000S	3	7		2.0	1.2	
5.OEMS	23.04	16:32	dsd	E2	3	7		3.4	1.9	1.8
	23.04	17:15	EGG	T2000S	3	7		2.2	1.3	
6.AGAR	25.04	08:56	dsd	E2	3	8	2)	2.4	1.4	0.7
	25.04	10:30	EGG	T2000S	3	7		3.0	1.7	
7.TURT	22.04	08:48	dsd	E2	2	6		3.1	2.2	1.2
	22.04	09:20	dsd	E2	3	8	2)	1.8	1.0	
	22.04	10:45	EGG	T2000S	4	8	2)	3.8	1.9	
	24.04	13:57	dsd	E2	3	7		2.8	1.6	
	24.04	14:45	EGG	T2000S	3	7		3.9	2.2	
8.SUST	22.04	16:24	dsd	E2	3	7		2.9	1.7	1.9
	22.04	17:15	EGG	T2000S	3	7		2.6	1.5	
	22.04	18:00	dsd	T2000S	2	7		2.2	1.6	
			KERN	E2	:		3.1	1.8		
			WILD	T2000S	:		3.6	1.9		
			Total	:			3.4	1.8	1.6	

- 1) 1 Beobachtung (Ausreisser) eliminiert  
 2) inkl. Richtungen zu exzentrischen Punkten

Tabelle 2.3-2: Übersicht über die Richtungssätze und ihre Stationsausgleichungen

### 2.3.4 Beurteilung der Resultate

Zur Überprüfung und Beurteilung der Resultate der Stationsausgleichungen wurde wiederum die Varianzkomponenten-Schätzung [Welsch, 1984] im Programm RAUMTRI (Vers. L+T) angewendet. Dabei wurden eine erste dreidimensionale Ausgleichung des Netzes mit den E2-Richtungssätzen, eine zweite mit den T2000S-Richtungssätzen und eine dritte mit den vereinigten Richtungssätzen durchgeführt.

A posteriori Varianzkomponentenschätzung der Beobachtungsgruppe Richtungen in der 3D-Ausgleichung			
	Beobachtungs-Datensatz		
	E2	T2000S	vereinigt
Anzahl der Beobachtungen:			
- Richtungen	56	56	56
- andere	183	183	183
mittl. Fehler a posteriori:			
- der Richtungen	2.7 cc	2.8 cc	2.2 cc
Redundanzanteil:	47.6	47.6	47.6
Anzahl eliminierte Ausreisser:	1	1	0

Tabelle 2.3-3: Varianzkomponenten-Schätzung der Richtungen

## 2.4 Astronomische Azimute

### 2.4.1 Messung und Online-Erfassung von Polaris-Azimuten

Die Orientierung des terrestrischen 3D-Netzes im Raum wird durch die astronomischen Beobachtungen (Azimute, Länge, Breite) erreicht. Während mit der Entwicklung des Zenitkamera-Messsystems am IGP (s. Kap.4.1) ein effizientes Verfahren für die Lotabweichungsbestimmung entstand, war man bei der astronomischen Azimutmessung bis vor wenigen Jahren noch auf die umständliche Beobachtung mit den klassischen astronomischen Theodoliten (z.B. KERN DKM3A oder WILD T4) angewiesen. Als zu Beginn der Achzigerjahre elektronische Sekundentheodolite mit Kompensation der Rest-Stehachsenschiefe auf den Markt kamen (KERN E2 und später WILD T2002), eröffnete sich die Möglichkeit, auch bei der astronomischen Azimutmessung ein effizientes Messverfahren mit automatischer Datenerfassung zu entwickeln.

Ausgehend von der Grundidee der rechnergesteuerten Richtungsmessung mit Online-Stationsausgleichung (s. Kap.2.3) wurde an der L+T das Basic Programm POLARIS-1 konzipiert (Tab.2.4-1). Das Programm, welches für den elektronischen Theodoliten KERNE2 mit angeschlossenem Feld-PC (EPSON HX-20) entwickelt wurde, liefert die Einstellwerte (Azimut und Zenitdistanz) für den Polarstern (Alpha Ursae Minoris), steuert den Messvorgang und hält den genauen Zeitpunkt der Polaris-Zielung fest. Es reduziert, kontrolliert und registriert zudem die Messwerte. Neben der Abspeicherung im Datenspeicher (RAM) des EPSON wird auch ein Protokoll der wichtigen Messdaten und Resultate ausgedruckt. Die endgültige Reduktion der Azimute ins terrestrische Koordinatensystem erfolgt schliesslich offline mit dem Programm POLARIS-2 (Kap.2.4.3). Eine ähnlich konzipierte Software für die Online-Beobachtung von astronomischen Längen und Breiten nach der Standlinienmethode wurde später am IGP entwickelt [Walser, 1987].

Die Beobachtung am E2-Theodolit erfolgte mit einem Okularprisma. Da bei den Geräten der ersten E2-Serien noch keine Fadenkreuzbeleuchtung vorhanden war, musste zudem eine stufenlos regulierbare Beleuchtung vor das Objektiv aufgesetzt werden.



## 2.4.2 Messkampagne vom 23. - 27.6.1986

Die astronomischen Beobachtungen waren ursprünglich im April 1986 geplant, konnten aber wegen ungünstigem Wetter erst im Juni 1986 durchgeführt werden. Die Polaris-Azimutbeobachtungen wurden in einer gemeinsamen Messkampagne von IGP und L + T gleichzeitig mit den astronomischen Längen- und Breitenbestimmungen mit der Zenitkamera (s. Kap.4.1) vorgesehen.

Nachdem am 23.6. bei stark bewölktem Himmel nur lückenhafte Messungen möglich waren, herrschten in den darauffolgenden Nächten ideale Messbedingungen. Die Messungen erfolgten in 3 - 4 "Sätzen" mit je 1 Polaris-Richtung und 2 Richtungen nach Zielpunkten. Im Unterschied zum Beobachtungsplan (Tab.1.4-2) konnten nicht nur je ein Azimut auf den beiden Talstationen sondern mindestens zwei Azimute auf allen 8 Stationen gemessen werden. Während 4 Beobachtungsnächten konnten so 37 "Sätze" mit insgesamt 122 Einzelbeobachtungen gemessen werden.

Messkampagne: Polaris Azimute	
Termin:	23. - 27.6.1986
Leitung:	D. Schneider / B. Vogel
Beobachter:	D. Schneider, D. Gutknecht, B. Vogel
Instrumente:	Theodolit: KERN E2 Zielscheinwerfer: WILD GEB-72
Messprogramm:	Funk-Fernsteuerung für Zielscheinwerfer auf jeder Station min. 2 Astro-Azimute
Datenerfassung:	EPSON HX-20 online mit Prog. POLARIS-1

Als Zielpunkt-Miren wurden in erster Linie die kleinen Zielscheinwerfer WILD GEB-72 eingesetzt. Dank der Verwendung einer Funk-Fernsteuerung konnten diese am Vorabend aufgestellt und während der Nacht grösstenteils unbemannt betrieben werden. Die Funk-Fernsteuerung erlaubte das automatische Ein- und Ausschalten, die Drehung sowie die Kippung von zwei Zielscheinwerfern auf verschiedenen Zielpunkten. Die Regulierung der Lichtstärke der Miren musste durch leichte Kippbewegungen der Scheinwerfer vorgenommen werden. Das Funk-System funktionierte von wenigen Ausnahmen abgesehen gut und erleichterte die Messarbeiten wesentlich.

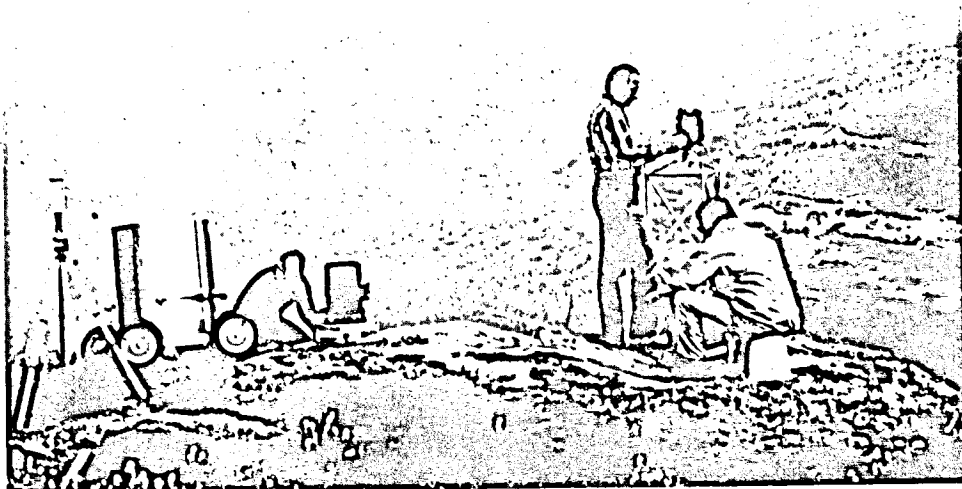


Abbildung 2.4-1: Polaris-Beobachtung mit E2 und EPSON online (rechts) und transportables Zenitkamera-Messsystem TZK3 des IGP (links)

In Tabelle 2.4-1 ist der Mess- und Rechenablauf bei der Online-Erfassung mit dem Programm POLARIS-1 wiedergegeben.

Programm POLARIS-1: Beobachtung und Erfassung			
Schritt	Theodolit KERN E2 Beobachtung	-> Input	Feld - PC EPSON HX-20 { Berechnungen }      Output ->
Vorbereitung	- Teilkreis mit Näherungsazimut orientieren	-> approx. astron. Länge / Breite -> approx. Uhrkorrektur	
Messung:1.Satz 1.Fernrohrlage	- Anzielen Polaris, Zeit- und Messwert- erfassung auslösen		{ Einstellwerte (Polaris) } -> approx. Azimut / Zenitdistanz (Polaris) -> -> Online-Erfassung: Richtung (Polaris) -> Zeiterfassung (interne Quarzuhr)
Preprocessing			{ Polaris-Azimut } -> Zeit (UTC), Richtung (Polaris) ->
	- Anzielen Mire Richtungserfassung		{ Einstellwerte (Mire) } -> -> Online-Erfassung: Richtung (Mire)
Messung:1.Satz 2.Fernrohrlage	wie oben		wie oben
Messung:2.und weitere Sätze	wie oben		wie oben
Ausgleichung			{ Azimute zu Miren } ->
Statistik			{ mittl. Fehler } ->

Tabelle 2.4-1: Mess- und Rechenablauf bei der Online-Erfassung der Polaris-Azimute

### 2.4.3 Auswertung der Polaris-Beobachtungen

Die astronomische Geodäsie ist ein Fachgebiet, welches in der Praxis der Schweizerischen Landesvermessung in den letzten Jahrzehnten kaum Anwendung gefunden hat. Bei der L+T fehlten die praktischen Erfahrungen in diesem Gebiet gänzlich. Die genaue Bestimmung von astronomischen Azimuten im 3D-Testnetz Turmann war daher eine besondere Herausforderung. Bei der Entwicklung der notwendigen Software ist uns Herr Prof. Schürer in verdankenswerter Weise mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Bei praktischen Arbeiten der Landes- und Ingenieurvermessung (z.B. Tunnel-Grundlagenvermessungen) wurde die astronomische Orientierung der geodätischen Netze leider bisher kaum angewendet. Dies ist kaum verständlich, wäre doch gerade die genaue Azimutübertragung zwischen den Portalnetzen eine willkommene unabhängige Kontrollmöglichkeit bei Tunnel-Durchschlagsnetzen. Interessanterweise wurde diese Möglichkeit auch in jüngster Zeit kaum genutzt, obwohl die Methoden heute sehr rationell angewendet werden können.

Eine wichtige Voraussetzung für die Bestimmung von Polaris-Azimuten ist die genaue Kenntnis der Sternkoordinaten von Polaris (Alpha Ursae Minoris) zum Zeitpunkt der Beobachtung im terrestrischen Bezugssystem. Ausgehend von den Koordinaten im Sternkatalog FK4, welche den mittleren Ort für Epoche und Äquinoktium 1950.0 bezeichnen, wurde zuerst der mittlere Ort für Epoche und Äquinoktium 2000.0 berechnet. Die Sternkoordinaten bezogen auf das Jahr 2000.0 dienen schliesslich als Ausgangsdatensatz für die Berechnungen in den Programmen POLARIS-1 und POLARIS-2.

Die weiteren Schritte umfassen die Reduktion der Sternkoordinaten auf den Ort und die Zeit der Beobachtung. In Tabelle 2.4-3 sind die wichtigsten Rechenschritte im Programm POLARIS-2 zusammengefasst.

Programm POLARIS-2: Reduktion der Sternkoordinaten / Azimutberechnung		
-> Input	{ Berechnung }	Output ->
-> Datum / Uhrkorrektionswerte -> aktuelle Erdrotations-Parameter -> astron. Länge / Breite (Station)		
-> Richtung nach Polaris -> Richtung nach Mire -> Uhrablesung	{ Uhrkorrektur }	
Koordinaten (Polaris) aus FK4	{ Eigenbewegung } { jährliche Aberration } { Präzession } { Nutation } { tägliche Aberration } { Polkorrektur } { Azimutberechnung }	reduzierte Azimute ->

Tabelle 2.4-3: Wichtigste Rechenschritte im Programm POLARIS-2

#### 2.4.4 Resultate der Polaris-Beobachtungen

Die reduzierten Einzel-Azimute (Mittelwerte aus Messungen in beiden Fernrohrlagen) wurden in einem ersten Schritt mit einem mittleren Fehler von 5 cc in eine provisorische Ausgleichung des 3D-Netzes eingeführt. Bei der Beurteilung der standardisierten Verbesserungen mussten 21 von den ursprünglichen 122 Einzelbeobachtungen als Ausreisser eliminiert werden. Die Varianzschätzung der restlichen 101 einzelnen Astro-Beobachtungen ergab einen mittleren Fehler a posteriori von 6.5 cc.

Die für gut befundenen Einzelazimute wurden in der Folge gemittelt (s. Tab.2.4-4). Der mittlere Fehler der Azimutmittel wurde schliesslich zu 4 cc (für  $n > 5$ ) und zu 5 cc (für  $n \leq 5$ ) angenommen. Diese Mittelwerte mit ihrem stochastischen Modell wurden in die definitive 3D-Ausgleichung eingeführt (s. Kap.2.8). Die a posteriori Varianz-Schätzung hat die Annahmen des stochastischen Modells bestätigt.

Station Zielpunkt	Sätze	Anzahl:		Mittel cc	mittlere Fehler:		
		Einzel- Azimute	Mittel		Einzel cc	Mittel cc	a priori* cc
1.BRUN → 5.OEMS	2	6	1	168.34016	3.8	1.6	4.0
1.BRUN → 8.SUST	2	6	1	258.04936	4.7	1.9	4.0
2.BRAE → 5.OEMS	2	6	1	203.19998	7.7	3.1	4.0
2.BRAE → 8.SUST	2	7	1	259.21079	9.2	3.5	4.0
3.JEIZ → 5.OEMS	2	6	1	231.29565	5.8	2.4	4.0
3.JEIZ → 8.SUST	2	6	1	273.67190	4.7	1.9	4.0
4.ERGI → 5.OEMS	1	3	1	267.13483	2.8	1.6	5.0
4.ERGI → 8.SUST	2	6	1	310.44352	6.2	2.5	4.0
5.OEMS → 1.BRUN	2	3	1	368.36074	3.8	1.7	5.0
5.OEMS → 7.TURT	2	2	1	19.91439	2.8	2.0	5.0
6.GPS → 1.BRUN	2	6	1	25.72178	2.1	0.8	4.0
6.GPS → 7.TURT	2	6	1	63.94144	3.1	1.3	4.0
7.TURT → 1.BRUN	2	4	1	316.22059	2.0	1.0	5.0
7.TURT → 5.OEMS	2	6	1	219.92237	10.0	4.1	4.0
7.TURT → 8.SUST	4	11	1	293.04923	7.8	2.4	4.0
8.SUST → 5.OEMS	2	5	1	137.28135	5.6	2.2	5.0
8.SUST → 7.TURT	4	12	1	93.00554	7.4	2.1	4.0
<b>Total:</b>	<b>37</b>	<b>101</b>	<b>17</b>	<b>Mittel:</b>	<b>5.3</b>	<b>2.1</b>	

\*) mittlere Fehler a priori für die 3D-Ausgleichung

Tabelle 2.4-2: Resultate der Polaris Azimut-Beobachtungen

Der endgültige Beweis für die gute Qualität der eingeführten Astro-Azimute wird aus der definitiven 3D-Ausgleichung (s. Kap.2.8) ersichtlich. Die Orientierungsunbekannte im Fundamentalpunkt (7.TURT) wurde bei dieser Ausgleichung mit einem mittleren Fehler (a posteriori) von 1.7 cc geschätzt.

## 2.5 Präzisions-Distanzmessungen

### 2.5.1 Methoden der Präzisions-Distanzmessung

Die Methoden der elektronischen Distanzmessung (EDM) sind in den vergangenen 3 Jahrzehnten zu hoher Perfektion entwickelt worden. Mit den Fortschritten in der Elektronik wurde die Auflösung der Phasenmessung bei den elektrooptischen Distanzmessern in den Bereich des Zehntelmillimeters gesteigert. Gleichzeitig galt es, die systematischen Messfehler (gerätebedingte Messfehler und Einflüsse der troposphärischen Refraktion) zu vermindern bzw. durch Modellrechnungen zu korrigieren. Bei den modernen Präzisionsdistanzmessern (z.B. beim KERN Mekometer ME-5000) sind die gerätespezifischen Fehleranteile (Unsicherheit der Additionskonstante und des Gerätemassstabs) durch geeignete Kalibrierungsmessungen (auf EDM-Prüfstrecken und durch die Messung der Modulationsfrequenz) gut unter Kontrolle zu halten. Die Restfehler (nach Anbringen der Korrekturen) sowie die periodischen und aperiodischen Abweichungen von der Linearität sind vernachlässigbar.

Schwierig bleibt die Korrektur der troposphärischen Einflüsse auf die Distanzmessung. Die Qualität der integralen Erfassung der Brechungsindizes der Luft im räumlichen und zeitlichen Bereich des Messstrahls bleibt nach wie vor der limitierende Faktor der Distanzmess-Genauigkeit.

Im Hinblick auf die Erreichung höchster Präzision sind in den Siebzigerjahren zwei grundsätzlich verschiedenen Wege erfolgreich beschritten worden:

1. Die Meteo-Erfassung durch simultane Flugmessungen zur integralen Berücksichtigung der Refraktion entlang dem Messstrahl
2. Die Zweifarben-EDM oder Dispersionsmethode

### 2.5.1.1 Die Meteo-Erfassung durch simultane Flugmessungen

Bei dieser Methode wird der Luftraum um den Messstrahl vor, während und nach der Distanzmessung durch ein Flächenflugzeug ständig abgeflogen und die Lufttemperatur und -feuchtigkeit sowie die Position des Flugzeugs laufend registriert. Bei Verwendung geeigneter Modelle lässt sich aus den erfassten Daten ein 4-dimensionales Refraktivitätsfeld interpolieren. Daraus können für den Messstrahl in Raum und Zeit repräsentative Brechungsindizes prädiert werden.

Diese Methode wurde bei Präzisions-EDM im Rahmen der Untersuchung von relativen Bewegungen der tektonischen Platten im Bereich der San Andreas Bruchzone in Kalifornien angewendet. Aus wiederholten "Geodolite"-Messungen und Meteo-Erfassungen mit dieser Methode erhielten *Savage and Prescott [1973]* folgende Genauigkeitsschätzungen:

$$\sigma^2 = a^2 + b^2 \cdot s^2$$

$$\text{mit } a = 3 \text{ mm} \quad \text{und} \quad b = 2 \cdot 10^{-7}$$

Da diese Methode in den letzten Jahren auch an der ETH Zürich weiterentwickelt und erprobt wurde, war es möglich, das Verfahren auch für die terrestrische Vermessung des Netzes Turtmann einzusetzen. Dem Konzept der Flugmeteoerfassung, der praktischen Erfahrung mit dieser Methode sowie den Resultaten aus der Anwendung in Turtmann ist das Kap.3 gewidmet.

### 2.5.1.2 Die Zweifarben-EDM oder Dispersionsmethode

Im Unterschied zur Flugmeteo-Erfassung wird bei der Zweifarben-EDM der integrale Brechungsindex aus der Differenz zweier simultan erfasster Distanzmessungen mit zwei verschiedenfarbigen Trägerlichtwellen abgeleitet. Bei dieser Methode sind genaue Meteo-Messdaten nicht erforderlich. Es muss lediglich die Luftfeuchtigkeit (der Wasserdampfdruck) durch zusätzliche, approximative Messungen erfasst werden. Die Distanzen können dann sofort atmosphärisch reduziert werden.

Simultane Distanzmessungen mit zwei (oder drei) verschiedenen Trägerwellen (z.B. rotes und blaues Licht) benützen den Dispersionseffekt bei elektromagnetischen Wellen zur Bestimmung der troposphärischen Refraktion. Das Prinzip der Zweifarben-EDM war von *Prilepin [1957]* und *Bender und Owens [1965]* vorgeschlagen worden. Für eine ausführliche Behandlung der Methode verweisen wir auf *Gervaise [1984, I; II]*. In der folgenden Zusammenfassung soll lediglich das verwendete mathematische Modell dokumentiert werden.

Zweifarben-Distanzmesser führen simultane Messungen von zwei, für jeden Träger unterschiedlichen, optischen Weglängen durch. Ist  $L$  die gesuchte geometrische Weglänge und sind  $S_r$  bzw.  $S_b$  die zusätzlichen, durch die troposphärische Refraktion verursachten Anteile, so sind  $L_r$  und  $L_b$  die beiden optischen Weglängen für den roten bzw. blauen Träger.

$$L_r = L + S_r \quad \text{und} \quad L_b = L + S_b$$

$$L_r = L + \int_0^L (n_g^r - 1) dl \quad \text{und} \quad L_b = L + \int_0^L (n_g^b - 1) dl$$

Dabei sind

$n_g^r$  und  $n_g^b$  die Gruppen-Brechungsindizes für rotes bzw. blaues Licht.

Damit erhält man für die Differenz der optischen Wege

$$\Delta S = L_b - L_r = \int_0^L (n_g^b - n_g^r) dl$$

Führt man zusätzlich die dispersive Grösse

$$A = (n_g^b - n_g^r) / (n_g^r - 1) \quad (2.5-1)$$

ein, so wird damit

$$\Delta S = \int_0^L A (n_g^r - 1) dl \quad \text{oder genähert mit dem Mittelwert } \bar{A}$$

$$\Delta S \approx \bar{A} \int_0^L (n_g^r - 1) dl = \bar{A} S_r \quad \text{und mit } S_r \approx \Delta S / \bar{A}$$

erhält man die geometrische Weglänge

$$L = L_r - S_r$$

$$L \approx L_r - (L_b - L_r) / \bar{A} \quad (2.5-2)$$

was zeigt, dass die gesuchte Distanz in erster Näherung nur aus den simultan gemessenen optischen Weglängen  $L_r$  und  $L_b$  beider Träger und der mittleren dispersive Grösse  $\bar{A}$  berechnet werden kann.

Die dispersive Grösse  $A$  ist praktisch unabhängig vom Luftdruck und der Lufttemperatur. Es besteht aber eine schwache, nicht zu vernachlässigende Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit.

Bei der Distanzauswertung im Terrameter werden folgende Formeln zur Berechnung der Gruppen - Refraktivität  $(n - 1)$  und mit (2.5-1) von  $A$  verwendet:

$$(n_g^r - 1) = (C_1^r D_s + C_2^r D_w) \quad \text{und} \quad (n_g^b - 1) = (C_1^b D_s + C_2^b D_w)$$

wobei

$$D_s = P_s / T [ 1 + P_s (57.9 \cdot 10^{-8} - 9.325 \cdot 10^{-4} / T + 0.25844) / T^2 ]$$

$$D_w = P_w / T [ 1 + P_w (1 + 3.7 \cdot 10^{-4} P_w) (-2.37321 \cdot 10^{-3} + 2.23366 / T - 710.792 / T^2 + 7.75141 \cdot 10^4 / T^3) ]$$

$$C_1^r = 84.735399 \cdot 10^{-6} \text{ (HeNe-Laser); } C_1^b = 80.874255 \cdot 10^{-6} \text{ (HeCd-Laser)}$$

$$C_2^r = 73.700935 \cdot 10^{-6} \text{ (HeNe-Laser); } C_2^b = 69.094806 \cdot 10^{-6} \text{ (HeCd-Laser)}$$

$P_s$  = Partialdruck für trockene Luft

$P_w$  = Partialdruck des Wasserdampfes

$T$  = Temperatur in ° Kelvin.

Es wird dabei ein  $\text{CO}_2$  -Gehalt der Troposphäre von 0.03 % angenommen.

Der Wasserdampf-Partialdruck  $P_w$  wird anhand der relativen Luftfeuchtigkeit  $r$  und des Sättigungsdampfdrucks  $P_{sat}$  berechnet mit

$$P_w = r \cdot P_{sat}$$

Der Einflusskoeffizient des Wasserdampf-Partialdruckes auf die Distanz beträgt 0.1 ppm/mb. Deshalb muss die relative Luftfeuchtigkeit auf  $\pm 5\%$  genau bekannt sein, damit der Einfluss auf die Distanz innerhalb  $\pm 0.1$  ppm gehalten werden kann [Rüeger, 1990].

Bei einer Temperatur von 15°C und einem Druck von 760 mmHg (= 1013.25 hPa) sowie  $P_w = 0$  wird damit

$$1/A = 20.86$$

Wird dieser Wert in Formel 2.5-2 eingesetzt, so erkennt man, dass der Unterschied der optischen Weglängen  $\Delta S$  mit hoher Auflösung (etwa 21 mal genauer als die gesuchte Distanz) gemessen werden muss. Für die Konstruktion eines Zweifarben-Distanzmessers bedeutet dies, dass die Messungen mit beiden Trägerwellen quasi-simultan und mit dem gleichen Modulator / Demodulator geschehen muss.

Während die Zweifarbenmethode für die Korrektur der troposphärischen Refraktion (1. Geschwindigkeits-Korrektur) sorgt, bleibt theoretisch noch die Reduktion  $k''$  vom gekrümmten Strahlverlauf auf die Sehne (2. Geschwindigkeits-Korrektur) [Rüeger, 1990]:

$$k'' = -(k - k^2) \cdot d^3 / 12 R^2$$

wobei

$$\begin{aligned} k &= \text{Refraktionskoeffizient} \\ d &= \text{gemessene Distanz (Bogenlänge)} \\ R &= \text{Erdradius} \end{aligned}$$

Für Strecken  $d < 8$  km bleibt der Betrag dieser Korrektur  $k'' < 0.1$  mm und ist damit vernachlässigbar.

Die Zweifarben-EDM wurde bei Untersuchungen von Krustenbewegungen an der San Andreas Bruchzone in Kalifornien praktisch angewendet und dabei deren Genauigkeit mit

$$\sigma = < 1 \cdot 10^{-7} \cdot s$$

abgeschätzt [Hugget und Slater, 1975].

Die Vermessungsabteilung des CERN hat die Methode bei der Grundlagenvermessung für den grossen Beschleunigerring (LEP) erfolgreich eingesetzt [Gervaise, 1984 II]. Dabei wurden Distanzen zwischen 3.5 und 13.6 km mit  $\pm 0.09$  ppm gemessen.

Durch das grosszügige Entgegenkommen der CERN-Leitung war es möglich, auch die Zweifarben-EDM für die Messung des 3D-Testnetzes einzusetzen.

## 2.5.2 Funktionsweise des KERN Mekometer ME-5000

Das Mekometer (KERN ME-5000) arbeitet mit einer polarisationsmodulierten Träger-Lichtwelle von 632.8 nm (HeNe-Laser). Entsprechend dem Prinzip der Fizeau'schen Lichtgeschwindigkeitsmessung wird der Messlichtstrahl zweimal, einmal beim Austritt und ein zweites Mal nach dem Durchlaufen der Messstrecke, mit dem gleichen Modulator phasenmoduliert. Beträgt die Länge des Lichtweges, d.h. die Strecke vom Modulator zum Reflektor und zurück, genau ein Vielfaches der Modulations-Wellenlänge, so zeigt die Analyse der Lichtintensität nach der zweiten Modulation ein Minimum (Nullphase).

Zur Messung einer Distanz wird nun die Modulationsfrequenz so verändert, dass mehrere (im automatischen Messablauf des ME-5000 vier) dieser Minima-Stellen erreicht werden; die entsprechenden Modulationsfrequenzen werden dabei registriert. Zur Berechnung der Distanz muss auch die Anzahl der Modulations-Wellenlängen auf der Messstrecke bestimmt werden. Diese ist durch den Frequenzabstand von zwei direkt "benachbarten" Minima-Stellen gegeben.

Formel zur Berechnung der Distanz aus den Modulations-Frequenzwerten [Meier und Loser, 1986]:

$$d = \frac{c}{2 f n_0} \text{RND} \left( \frac{f}{df} \right) \cdot m + a$$

$d$  = Distanz auf Standardatmosphäre bezogen  
(15°C, 1013.25 mb, 0.03% CO<sub>2</sub>, 0.0% H<sub>2</sub>O)

$c$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$n_0$  = Gruppenbrechungsindex der Standardatmosphäre:  
( $n_0 - 1$ )  $10^8 = 28451.5$  [Edlen, 1966]

$f$  = Frequenz einer Minima-Stelle (Nullphase)

$df$  = Frequenzabstand zweier "benachbarter" Minima-Stellen

$m$  = Massstabsfaktor (aus Messung der internen Quarzfrequenz)

$a$  = Additionskonstante

Die Additionskonstante des ME-5000 wird auf der Teststrecke ausgemessen und mit der Genauigkeit von 0.1 mm mittels Drehschaltern fest eingestellt. Zusammen mit einem fest einprogrammierten Anteil von 200 mm wird eine Additionskonstante von 0 angestrebt.

RND = Bedeutet "Auf ganze Zahl gerundet"

Theoretisch ist der Quotient ( $f/df$ ) eine ganze Zahl. Eine zu grosse Abweichung ( $> 0.3$ ) birgt die Gefahr eines Grobmessfehlers (30 cm). Beim automatischen Messablauf des ME-5000 wird diese Unsicherheit durch die Fehlermeldung P006 abgefangen.

### 2.5.3 Mekometer-Messkampagne vom 30.6. – 3.7.1986

Nachdem die erste Serie der neuen Präzisions-Distanzmesser der Firma KERN, Mekometer ME-5000, für Versuchsmessungen zur Verfügung stand, konnte im Sommer 1986 die bislang grösste terrestrische Messkampagne im 3D-Netz Turtmann stattfinden. Unter der Koordination und Einsatzleitung des Bundesamtes für Landestopographie (L+T) beteiligten sich die folgenden Institute: Das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETHZ (IGP), das Institut für Leichtbau (ETHZ), die Firma KERN & Co. AG Aarau und das Labor für Atmosphärenphysik ETHZ (LAPETH). Ziel der gemeinsamen Anstrengungen war die Messung aller 56 möglichen Strecken in der 3D-Konfiguration mit optimaler Genauigkeit bei gleichzeitiger Erprobung der neuen Messgeräte.

Da bei der Mekometermessung über mittlere Distanzen zwischen 2 und 7 km eine hohe Genauigkeit nur mit Feinsondierungen in der freien Atmosphäre und Interpolation des Refraktivitätsfeldes möglich ist, wurde der Meteo-Erfassung bei diesen Messungen grosse Bedeutung zugemessen. Neben der Erfassung von Stationswerten an beiden Enden der Messstrecken mit klassischen Psychrometern und Aneroidbarometern, waren Radiosonden-Messungen auf 6m hohen Kurbelmasten sowie Flug-Meteoerfassungen in Verbindung mit Radar-Ortung geplant.



Der gute Erfolg des Projektes 3D-Netz Turtmann ist dem Umstand zu verdanken, dass es bei diesen Arbeiten gelang, jene Wissenschaftler und Spezialisten zusammenzubringen, welche bei der Entwicklung der geodätischen Instrumententechnik, der EDM- und der Atmosphären-Messtechnik an vorderster Front standen. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit hat daneben zu einem intensiven, gegenseitigen Lernprozess und Erfahrungsaustausch geführt. Die Organisation und Leitung der Messkampagne wurde durch die grosse Motivation aller Beteiligten und die spontane, unbürokratische Zusammenarbeit aller Institute ganz wesentlich erleichtert.

In Tabelle 2.5-1 sind die wichtigsten Angaben zur gesamten Organisation der Messkampagne zusammengestellt. Über die Meteo-Erfassung am Boden und in der Luft sowie die definitive, troposphärische Distanzreduktion wird in Kap.3 ausführlich berichtet. Wir beschränken uns in diesem Abschnitt deshalb auf den Erfahrungsbericht über die eigentlichen Mekometer-Messungen.

<b>Messkampagne: Streckenmessung mit KERN Mekometer ME-5000</b>	
Termin:	30.6. - 3.7.1986
Leitung:	D. Schneider
Distanzmessungen:	D. Meier und R. Loser (KERN Aarau)
Reflektorgruppen:	H. Gilgen, D. Gutknecht, B. Mattli, Praktikant, Ch. Studer und B. Vogel (L+T)
Flugmeteo und Radar:	B. Neiningen, D. Lüthi, R. Lüthi, B. Ramseier und H. Richner (LAPETH)
Piloten:	T. Hunziker, L. Kocher (Inst. für Leichtbau ETH) Piloten HB-LDT (BAZL)
Bodenmeteo:	F. Chaperon, R. Köchle, A. Ryf und M. Vögeli (IGP) Ch. Misslin (L+T), und A. Geiger (IGP, teilweise)
Instrumente:	2 KERN Mekometer ME-5000 (erste Serie) 1 Frequenzmesser L+T 1 Zeitzeichenempfänger HBG 1500 Ostrac 7 Barometer (Thommen), 7 Psychrometer (Haenni), 7 Radiosonden (Sprenger, IGP), 2 Meteosonden (L+T) 2 Flug-Meteosonden (ATAR, LAPETH, BAZL)
Flugzeuge:	Motorsegler ASK-16, HB-2038 (Institut für Leichtbau ETH) Turboprop Gulfstream I G-159, HB-LDT (BAZL)
EDM-Messprogramm:	2 aufeinanderfolgende Messungen auf allen (56) Visuren (hin und zurück) im Netz
Datenerfassung:	KERN Alphacord und Feldprotokoll
Meteomessung:	Stationsmeteo (klassisch) Stationsmeteo auf 6m-Mast (Sprengersonde, IGP) Meteo-Erfassung mit Flugzeugen (s.Kap.3)

**Tabelle 2.5-1: Organisation der Mekometer-Messkampagne 1986**

Vor und z.T. auch nach dem Messeinsatz wurden die eingesetzten Mekometer-Distanzmesser auf der Aare-Messstrecke der Fa. Kern und durch Messungen der Modulationsfrequenz sorgfältig geprüft (Tab.2.5-2). Beim Gerät Nr.357001 wurde der Additionswert nach der Eichung fix im Gerät eingegeben (zu "0" gesetzt). Zur Bestimmung der definitiven Korrektionswerte wurden die Abweichungen der gemessenen Modulationsfrequenz vom Nominalwert verwendet. Die Massstabskonstanten aus den Vergleichsmessungen der Eichstrecke (Tab.2.5-2) dienten nur zur Kontrolle.

Geräteprüfung der KERN Mekometer ME-5000 auf der Aare-Eichstrecke (KERN)						
Datum	Instrument Typ Ser.Nr.	Additionskonstante [mm] [mm]		Massstabskonstante [ppm] [ppm]		Bemerkungen
22.5.86	ME-5000 357009	57.77	± 0.03	-0.6	± 0.15	
19.6.86	ME-5000 357001	58.46*	± 0.05	-0.8	± 0.2	*nachträglich weggestellt
4.7.86	ME-5000 357009	57.71	± 0.04	-0.4	± 0.19	

Tabelle 2.5-2: ME-5000-Geräteprüfungen auf der Kern-Eichstrecke

Die Präzisions-Streckenmessungen konnten bei guten Sichtverhältnissen an 4 trockenen Sommertagen durchgeführt werden. Die Witterungsverhältnisse waren zwar typisch für die Jahreszeit, für die Erreichung bestmöglicher Resultate aber nicht ideal. Bei niedrigeren Temperaturen und unter bedecktem Himmel hätte man vermutlich homogenere Refraktionsverhältnisse vorgefunden. Es traten auf den meisten Visuren z.T. starke Turbulenzen auf; zudem störte der starke Wind auf den nördlichen Hangpunkten. Auf Station 3JEIZ konnte z.B. erst gemessen werden, nachdem der Wind mit Hilfe von Feldschirmen genügend abgeschirmt war und damit die Vibrationen des Messgeräts in Grenzen gehalten werden konnten.

Die Koordination zwischen der Mekometer-Messgruppe, der Zentrale für die Erfassung der Meteodaten mit den Radiosonden und der Meteo-Fluggruppe erfolgte über ein Funknetz. Das Messprogramm sah die Stationierung auf allen 8 Stationspunkten und die Messung aller Visuren in beiden Richtungen vor. Der Einsatz von 4 unabhängigen Reflektorgruppen hat dabei einen speditiven Messablauf ermöglicht.

Die Meteoflüge begannen wenn immer möglich schon bevor die erste Distanzmessung auf dem Visurstrahl ausgelöst wurde. Auf jeder Visurlinie wurden während einer Zeit von ca. 10 Minuten Messserien von je 3 - 5 Einzeldistanz-Messungen registriert und ihre Variation sofort beurteilt. Falls die Messwerte innerhalb der Serie stark streuten, wurden weitere Messungen ausgeführt. Während dem Ablauf der Mekometer-Messserien auf jeder Visur wurden die Meteo-Messdaten der Radiosonden, welche auf Kurbelmasten bei jeder Station angebracht waren, von der Zentrale aus über Funk erfasst.

Datum	Zeit	Instrument Typ Ser.Nr.	Temp. [°C]	Modulationsfrequenz			Msst.korrektion	
				nominal [MHz]	gemessen [MHz]	Diff. [Hz]	variabel [ppm]	konstant [ppm]
30.6.86	20:10	ME-5000 357001	26	477.33950	.33957	+ 70	-0.1	
1.7.86	09:25	ME-5000 357001	20	478.68530	.68542	+120	-0.2	-0.2
1.7.86	16:50	ME-5000 357001	28	477.33954	.33967	+130	-0.3	
2.7.86	12:03	ME-5000 357009	21	471.95650	.95622	-280	+0.6	
2.7.86	15:00	ME-5000 357009	22	471.95650	.95622	-280	+0.6	+0.6
3.7.86	14:55	ME-5000 357009	21	471.29360	.28336	-240	+0.5	

Tabelle 2.5-3: In situ Messungen der Modulationsfrequenzen beim ME-5000

Ein bis zwei Mal täglich wurde eine Kontrollmessung der Geräte-Modulationsfrequenz vorgenommen. Der Oszillator des eingesetzten Frequenzmessgeräts wurde dabei mit Hilfe von empfangenen Radio-Referenzsignalen (Zeitzeichensender: HBG) stabilisiert. Die Resultate der Frequenzkontrollen bestätigten die hohe Stabilität der Modulationsfrequenz auch unter den aktuellen Feldbedingungen (starke Sonneneinstrahlung und hohe Lufttemperaturen). Die Abweichungen von der Nominalfrequenz schwankten während den 4 Messtagen innerhalb von  $\pm 0.1$  ppm (Tab.2.5-3), was in etwa der Messgenauigkeit entspricht. Es genügte daher, als Frequenz-Korrektionswerte für jedes Gerät einen Mittelwert über die ganze Periode einzugeben.

Die eingesetzten Mekometer-Geräte funktionierten abgesehen von einem Ausfall gut (Gerät Nr.357001 musste am 3. Messtag durch das Reservegerät Nr.357009 ersetzt werden). Bei der Distanzauswertung traten noch vereinzelt Fehler auf, welche auf Unzulänglichkeiten in der damaligen Version der Geräte-Firmware zurückzuführen waren. Durch eine offline Auswertung (Postprocessing) konnten diese Distanzen aber nachträglich korrekt berechnet werden.

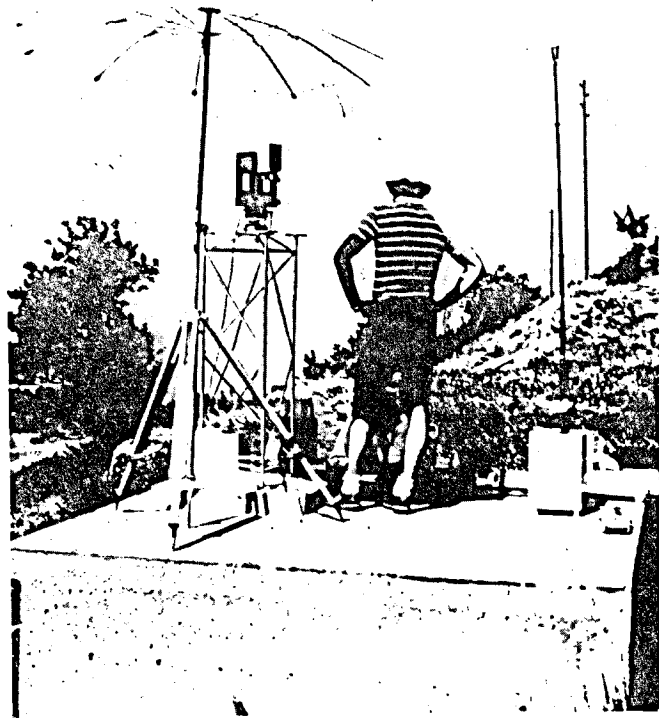


Abbildung 2.5-1: Messung mit dem Kern Mekometer ME-5000.  
Im Hintergrund Kurbelmast mit Radiosonde (Sprenger)

## 2.5.4 Aufbereitung der Messdaten des ME-5000

### 2.5.4.1 Atmosphärische Reduktion

Zur Umrechnung der vom ME-5000 ausgegebenen Distanz auf die realen atmosphärischen Bedingungen wurde folgende Formel benutzt:

mit

$$D = d \left( \frac{n_0}{n} \right)$$

$$n = 1 + \frac{284.515}{720.775} p \frac{1+p (0.817 - 0.013 t) \cdot 10^{-6}}{(1+0.003661) t} - 0.0538 e \cdot 10^{-6}$$

[Edlen, 1966]

- D = Reduzierte Distanz
- d = vom ME-5000 ausgegebene Distanz
- $n_0$  = Gruppenbrechungsindex der Standardatmosphäre
- $n$  = Gruppenbrechungsindex der Atmosphäre
- p = Luftdruck in Torr
- t = Temperatur in Grad Celsius
- e = Wasserdampfdruck in Torr

### 2.5.4.2 Korrekturen der Grobmessfehler

Infolge eines Fehlers im Messalgorithmus konnten nicht alle Distanzen direkt gemessen werden (Grobmessfehler). Die gemessenen Frequenzen der Minima-Stellen wurden aber als richtig angenommen und daraus die entsprechenden Distanzen nach folgenden Formeln berechnet:

- a) Berechnung des Minima-Stellenabstandes in ganzen Einheiten des Grundabstandes (Abstand zweier "benachbarter" Minima-Stellen)

$$k = \text{RND} \left[ \frac{f_1 - f_0}{f_{01} - f_0} \right]$$

- b) Berechnung der Anzahl Modulationswellenlängen auf der Messstrecke

$$N_i = \text{RND} \left[ \frac{f_i}{(f_1 - f_0) / k} \right]$$

- c) Berechnung der Distanz unter Berücksichtigung der Additionskonstanten a und des Massstabsfaktors m (Quarzfrequenz) sowie des atmosphärischen Gruppenbrechungsindex n

$$D_i = N_i \left[ \frac{c}{(2 f_i n) m} \right] + a$$

wobei

- c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- $f_0$  = Frequenz der ersten bzw. im unteren Modulatorbereich (ca.  $470 \cdot 10^6$  bis  $485 \cdot 10^6$ ) gemessenen Minima-Stelle
- $f_{01}$  = Frequenz der nächst höheren Minima-Stelle
- $f_1$  = Frequenz der letzten bzw. im oberen Modulatorbereich gemessenen Minima-Stelle

$f_i$  = Frequenz einer gemessenen Minima-Stelle. Beim ME-5000 werden im automatischen Ablauf drei Frequenzen:  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_m$  (Mitte) genau gemessen. Daraus können drei Modulations-Wellenlängen, die zugehörige Anzahl Wellenlängen auf dem Messweg ( $N_i$ ) und damit drei Distanzwerte ( $D_i$ ) unabhängig errechnet werden.

#### 2.5.4.3 Additionskonstanten und Massstabsfaktoren

Die Messungen der Additionskonstanten wurden für die beiden Geräte auf der Aaremsstrecke (Kern) durchgeführt. Die Additionskonstante von 58.5 mm wurde im Gerät Nr.357001 fix eingestellt und damit kompensiert. Der Massstabsfaktor wurde durch Messungen der Modulationsfrequenz bestimmt.

So galten für die beiden Instrumente folgende Parameter:

ME-5000 Nr.357001: Additionskonstante = 0.0 mm  
 Massstabsfaktor = -0.2 ppm => 0.999 999 8

Alle Messungen auf den Stationspunkten 1, 7 und 8 sowie die Messung von 2 nach 3 wurden mit diesen Werten korrigiert (Tab.2.5-4).

ME-5000 Nr.357009: Additionskonstante = 57.7 mm  
 Massstabsfaktor = +0.6 ppm => 1.000 000 6

Alle Messungen auf den Stationspunkten 2 (ausser von 2 nach 3), 3, 4, 5 und 6 wurden mit diesen Werten korrigiert (Tab.2.5-4).

#### 2.5.5 Beurteilung der provisorisch reduzierten Resultate

Die Zusammenstellung der Messwerte in Tabelle 2.5-4 enthält die meteorologischen Korrekturen (aus Boden-Meteowerten) entsprechend Abschn.2.5.4.1 sowie die Verbesserungen aufgrund der Additionskonstante (Tab.2.5-2) und des Massstabsfaktors (Tab.2.5-3).

Geometrische Reduktionen und die zweite Geschwindigkeitskorrektur wurden bei dieser vorläufigen Auswertung nicht durchgeführt.

Bei einzelnen Distanzen konnten die meteorologischen Daten nicht zum exakt angegebenen Zeitpunkt gemessen bzw. interpoliert werden. Für die Messungen von 4.ERGI nach 8.SUST lagen am Zielpunkt keine meteorologischen Daten vor. Die Barometerdaten vom 1.7.1986, 15.55 Uhr - 16.05 Uhr, der Station 7.TURT wiesen einen groben Ablesefehler von 100 mbar auf, der nachträglich korrigiert wurde.

An den berechneten Differenzen zwischen Hin- und Rückmessung fällt besonders die Station 8.SUST auf. Alle Werte zeigen das gleiche Vorzeichen. Das heisst, dass die Messungen auf Station 8.SUST systematisch zu kürzeren Distanzen führten. Ähnliches, aber dem Betrage nach nicht ganz so extrem zeigt sich bei Station 4.ERGI. Die auffälligste Gemeinsamkeit der beiden Stationierungen ist die Tageszeit der Messung.

8.SUST: 30.06., 1800 - 2000 Uhr  
 4.ERGI: 01.07., 1815 - 1915 Uhr

Die atmosphärischen Verhältnisse (Einsetzen einer Inversion) in diesen Zeitspannen sollten folglich genauer untersucht werden.

Standpunkt	Zielpunkt	Add.konst. [mm]	Masst. [ppm]	korr. Messwert [m]	Differenz [mm] 1)	rel.Diff [ppm]
1. BRUN	2. BRAE	0.0	-0.2	2572.25485	+ 1.71	+ 0.7
	3. JEIZ			4580.83388	- 0.04	0.0
	4. ERGI			4526.87186	+ 2.06	+ 0.4
	5. OEMS			3796.91008	- 2.55	- 0.7
	6. AGAR			3571.70560	- 1.29	- 0.4
	7. TURT			2767.58078	- 0.17	- 0.1
	8. SUST			1897.88302	+ 3.95	+ 2.1
	2. BRAE			1. BRUN	57.7	+0.6
3. JEIZ		0.0	-0.2	2289.66082	- 0.31	- 0.1
4. ERGI		57.7	+0.6	4074.01469	+ 4.36	+ 1.1
5. OEMS				4810.38851	+ 5.21	+ 1.1
6. AGAR				5861.26986	+ 2.21	+ 0.4
7. TURT				2423.01426	+ 0.78	+ 0.3
8. SUST				4469.43496	+ 7.54	+ 1.7
3. JEIZ		1. BRUN	57.7	+0.6	4580.83392	
	2. BRAE	2289.66113				
	4. ERGI	3494.52825			+ 4.57	+ 1.3
	5. OEMS	5365.10168			+ 1.88	+ 0.4
	6. AGAR	7403.07184			+ 0.44	+ 0.1
	7. TURT	2827.09607			- 1.61	- 0.6
	8. SUST	6397.91990			+ 5.96	+ 0.9
	4. ERGI	1. BRUN			57.7	+0.6
2. BRAE		4074.01033				
3. JEIZ		3494.52368				
5. OEMS		2578.29668	- 1.61	- 0.6		
6. AGAR		5600.66914	- 6.63	- 1.2		
7. TURT		2005.82400	- 3.31	- 1.7		
8. SUST		5603.12320	+ 7.43	+ 1.3		
5. OEMS		1. BRUN	57.7	+0.6		
	2. BRAE	4810.38330				
	3. JEIZ	5365.09980				
	4. ERGI	2578.29829				
	6. AGAR	3234.32902			- 1.17	- 0.4
	7. TURT	2868.20186			+ 1.58	+ 0.6
	8. SUST	3999.50678			+ 6.07	+ 1.5
	6. AGAR	1. BRUN			57.7	+0.6
2. BRAE		5861.26765				
3. JEIZ		7403.07228				
4. ERGI		5600.67577				
5. OEMS		3234.33019				
7. TURT		4887.98312	- 1.14	- 0.2		
8. SUST		2243.15998	+ 1.75	+ 0.8		
7. TURT		1. BRUN	0.0	-0.2		
	2. BRAE	2423.01348				
	3. JEIZ	2827.09768				
	4. ERGI	2005.82731				
	5. OEMS	2868.20028				
	6. AGAR	4887.98426				
	8. SUST	4154.80767			+ 5.36	+ 1.3
	8. SUST	1. BRUN			0.0	-0.2
2. BRAE		4469.42742				
3. JEIZ		6397.91394				
4. ERGI		5603.11577				
5. OEMS		3999.50071				
6. AGAR		2243.15823				
7. TURT		4154.80231				

1) Differenz zwischen Hin- und Rückmessung

Tabelle 2.5-4: Zusammenstellung der um die atmosphärische Korrektur (aus Boden-Meteo-werten), Additionskonstante und Masstab verbesserten Werte

Die definitive troposphärische Reduktion der Mekometer-Streckenmessungen auf die Grundlage der Flugmeteo-Daten ist in Kap.3 ausführlich behandelt. Die so reduzierten Beobachtungen sind im Output (Tab.2.8-4) vollständig dokumentiert. Ryf [1986] hat eine empirische Einteilung in 4 Genauigkeitskategorien vorgenommen, welche für die Festlegung des stochastischen Modells (Tab.2.8-2) übernommen wurde.

### 2.5.6 Mehrfarben-Distanzmesser Terrameter LDM 2

Nachdem bereits im Jahre 1969 ein Prototyp eines Zweifarben-Distanzmessgeräts konstruiert worden war, vergingen noch einige Jahre bis die Firma Terratechnology (USA) zu Beginn der Achzigerjahre ein entsprechendes Gerät in kleiner Serie produzierte und auf den Markt brachte [Hugget, 1981; Gervaise, 1984 I].

Das Terrameter misst den Effekt der troposphärischen Refraktion entlang dem Messstrahl durch die simultane Distanzmessung mit zwei verschiedenen optischen Wellenlängen. Die eine Träger-Lichtwelle liegt im roten (HeNe Laser;  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) und die andere im blauen (HeCd Laser;  $\lambda = 441.6 \text{ nm}$ ) Bereich des sichtbaren Lichtspektrums. Aus der Differenz der beiden optischen Weglängen berechnet der Mikro-Computer im Instrument die Korrektionswerte der Refraktion sowie die troposphärisch reduzierte Distanz.

Die Funktionsweise des Terrameters ist in Abbildung 2.5-2 dargestellt. Im Helium-Neon-Laser wird ein roter und im Helium-Cadmium-Laser ein blauer Lichtstrahl erzeugt. Die beiden Strahlen werden im Rochon-Prisma zu einem kollinearen Strahl vereinigt. Das zweifarbige Licht gelangt nun durch einen KDP-Modulator (Kristall aus Kalium-Dihydrogen-Phosphat:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), wo den beiden Trägerwellen eine Schwingung mit einer Frequenz von ca.3 GHz aufmoduliert wird. Die Modulationsfrequenz wird durch ein Rubidiumnormal stabilisiert. Die Genauigkeit des Standards (repeatability, long term stability) ist nach mindestens 10 Minuten Aufwärmzeit um mehrere Zehnerpotenzen besser als erforderlich. Die KDP-Kristallzelle (Pockelzelle) moduliert die Polarisation des Lichts nach dem Pockel's Effekt. Dabei durchdringt der Lichtstrahl einen asymmetrischen Kristall mit angelegtem elektrischem Wechselfeld. Der Messstrahl wird durch ein Cassegrain-Teleskop aufgeweitet und ausgesendet und zum Retroreflektor-System geschickt. Das Retroreflektor-System besteht wiederum aus einem grossen Teleskop, welches den Strahl auf ein kleines Würfelpisma konzentriert.

Nach zweimaligem Durchlaufen des optischen Messweges wird der Strahl durch das gleiche Teleskop empfangen und gelangt ein zweites Mal durch den KDP-Modulator. Je nach der relativen Phasenlage (Polarisation) zwischen der am Modulator angelegten Modulationswelle und der aufmodulierten Welle des empfangenen Lichts wird nun die Amplitude des resultierenden Lichts variieren (Prinzip des Fizeau-Experiments zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit). Das zweifarbige Licht wird im Rochon-Prisma wieder in seine rote und blaue Komponente geteilt und gelangt zu zwei Photodetektoren. Die analogen Signale der Photodetektoren werden nun zur Steuerung der Modulationsfrequenz verwendet (Regelkreis). Die Modulationsfrequenzen werden solange verändert, bis ein minimales Signal (d.h. bei Phasendifferenz  $\Delta\phi = \pi$ ) am roten bzw. blauen Photodetektor gemessen wird. Die eingestellten Modulationsfrequenzen für das rote bzw. blaue Minimum werden gemessen und dem Mikroprozessor für die Distanzberechnung zugeführt.

Um die Effekte 2. Ordnung (insbesondere des Feuchtanteils) der Refraktion berücksichtigen zu können, werden die beim Stations- und Reflektorpunkt gemessenen Meteorwerte (Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit) für die definitive Distanzberechnung eingegeben. Die troposphärisch reduzierten Distanz-Messwerte werden auf einem LCD-Display angezeigt. Diese Werte sowie alle Input-Daten und die intern gemessenen Frequenzen können mit einem angeschlossenen PC alle 10 Sekunden erfasst werden.

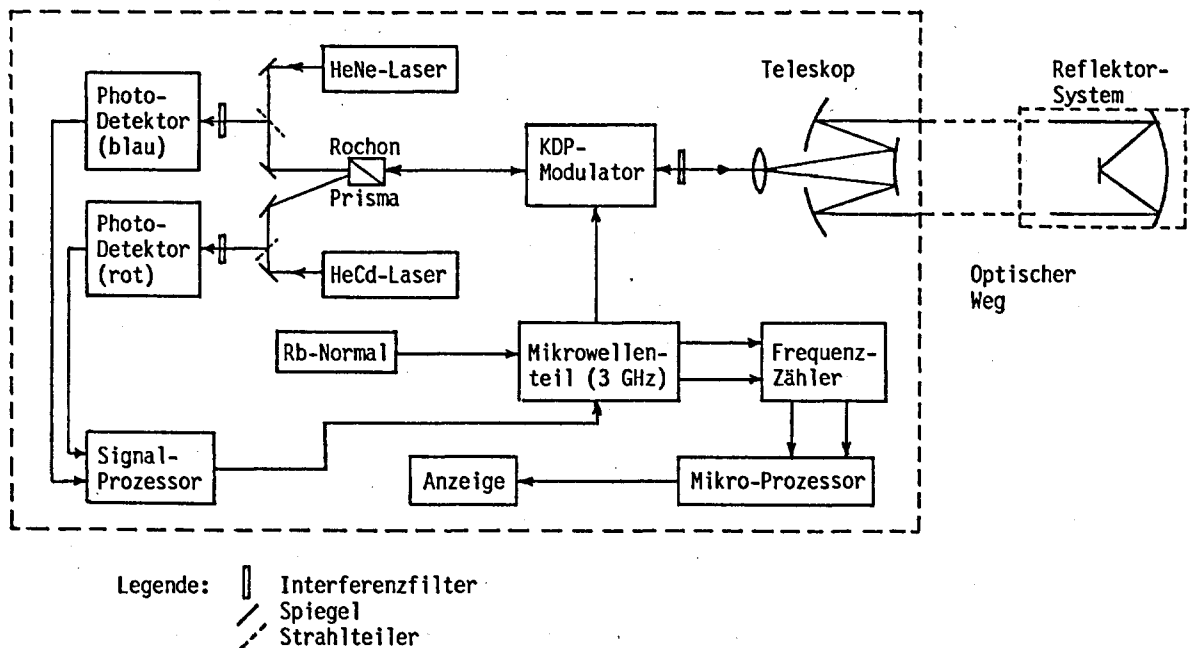


Abbildung 2.5-2: Funktionsschema des Terrameter LDM 2

Da das Terrameter nur mit je einer Modulationsfrequenz von etwa 3 GHz (d.h. mit einer Wellenlänge von  $\lambda \approx 10$  cm) auf beiden Trägern misst, ist eine Berechnung der Distanz nur bis auf die Unbekannte Anzahl ganzer Halbwellenlängen möglich. Damit die ganzzahlige Unbekannte (Ambiguity) bestimmt werden kann, muss deshalb für jede zu messende Distanz ein ziemlich genauer Näherungswert der schiefen Raumstrecke bekannt sein. Dieser Wert wird vor jeder Messung am Terrameter-Panel eingegeben. Damit keine falschen Unbekannten berechnet werden, darf der Näherungswert höchstens um  $\lambda/4$  (d.h. 2.5 cm) vom korrekten Wert abweichen.

### 2.5.7 Terrameter-Messkampagne vom 6. – 9.10.1986

Als letzte grössere terrestrische Messkampagne im Testnetz wurde im Herbst 1986 in enger Zusammenarbeit zwischen der Vermessungsgruppe des CERN und der L+T eine Terrameter-Messkampagne organisiert [Schmitt, 1986]. Die organisatorischen Einzelheiten der Messkampagne sind in Tabelle 2.5-5 zusammengestellt.

Messkampagne: Streckenmessung mit TERRAMETER	
Termin:	6. - 9. 10. 1986
Leitung:	D. Schneider
Beobachter:	J. Schmitt und E. Vincent (CERN Genf)
Mitarbeiter:	F. Eggenberg, D. Gutknecht, T. Signer
Instrumente:	Terrameter LDM 2 (Terratechnology Corp.)
Stromversorgung:	Generator 2 KW
Messprogramm:	ausgewählte Distanzen mit Neigung < 15 °
Datenerfassung:	Hewlett Packard PC (online)
Transporte:	Armeehelikopter (Alouette III)

Tabelle 2.5-5: Organisation der Terrameter-Messkampagne 1986



Die mechanische Konstruktion des Terrameters erlaubt nur eine sehr begrenzte Kippung des Geräts. Deshalb ist es mit diesem Gerät nicht ohne weiteres möglich, stark geneigte Raumstrecken ( $|HW| < 15^\circ$ ) zu messen. Zur Planung des Messprogrammes wurden deshalb nochmals Präanalysen (im Unterschied zu jenen in Kap.1.4.5) mit verschiedenen Teilnetzen berechnet. Der endgültige Netzentwurf enthielt schliesslich 29 messbare Strecken, welche mit einem mittleren Fehler von  $0.3\text{mm} + 0.1\text{ppm}$  zusammen mit den anderen, bereits vorhandenen terrestrischen Beobachtungen in die Präanalyse eingeführt wurden. Die 3D-Präanalyse mit minimaler Lagerung und fixer Orientierung im Punkt 7.TURT ergab damit grösste mittlere Lagefehler von 1.6 mm und grösste mittlere Höhenfehler von 7.2mm.

Als weitere Vorbereitung mussten möglichst genaue Näherungswerte für alle zu messenden Raumstrecken berechnet werden. Dies war aber erst möglich, nachdem auf allen Stationspunkten die mobilen Stahlpfeiler installiert und deren Zentrierköpfe nivelliert worden waren. Glücklicherweise waren im Herbst 1986 bereits provisorische Auswertungen der Mekometermessungen vom Sommer vorhanden, sodass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Raumstrecken eine sichere Bestimmung der ganzzahligen Vielfachen der Mekometer-Modulationswellenlänge (Ambiguities) erlaubte.

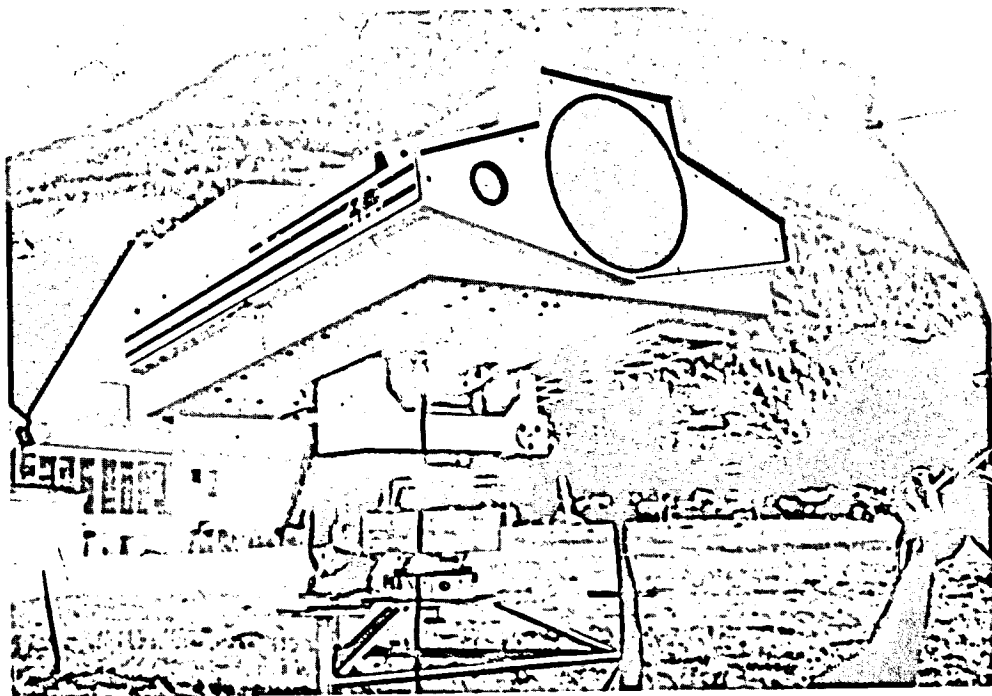


Abbildung 2.5-2: Terrameter LDM 2 (CERN) auf Station 7.TURT.  
Zentrierung auf Stahlpfeiler (L+T) mit Kreuzschlitten (AIUB) und Adapter (KERN/CERN)

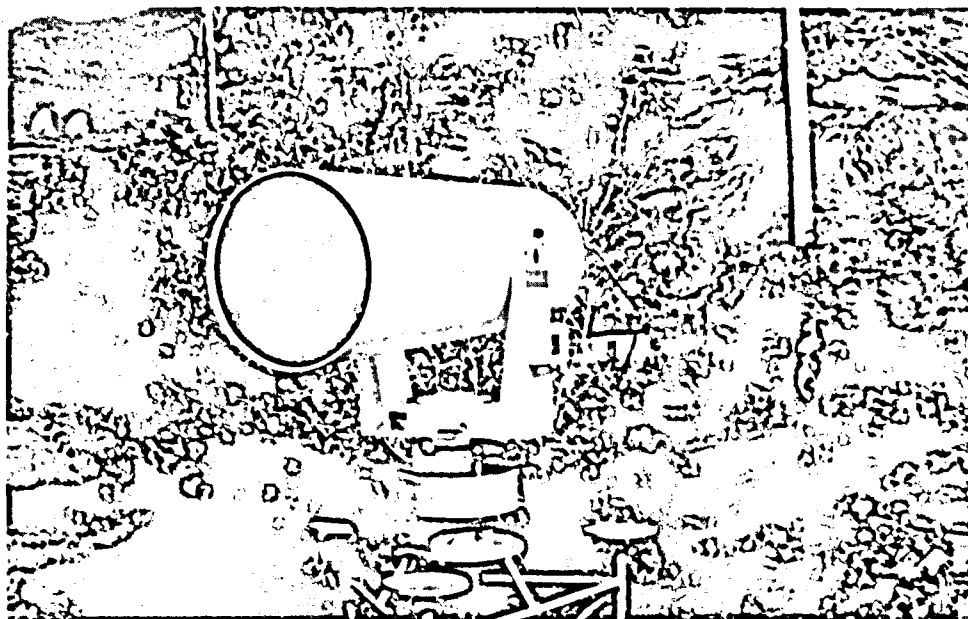


Abbildung 2.5-3: Terrameter-Reflektor

Die Aufstellung des schweren Terrametergeräts und des Reflektors erfolgte ausschliesslich auf den stabilen Stahlfeilern (Abb.2.5-2 und 2.5-3). Die Feinzentrierung erfolgte mit Hilfe eines Kreuzschlittens (AIUB) und mit dem optischen Lot eines KERN E2 oder DKM2A Theodoliten. Da das Terrameter einen speziellen Zentrierzapfen mit grossem Durchmesser besitzt, mussten in der mechanischen Werkstatt des CERN spezielle Adapter hergestellt werden, welche die Zentrierung auf das KERN-System erlaubten.

Gerätekonstanten und Zentrierung des Terrameters	
Additionskonstante:	0.0275 m
Gerätehöhe über KERN-Platte:	0.378 m
Reflektorhöhe über KERN-Platte:	0.361 m

Tabelle 2.5-6: Gerätekonstanten und Zentrierung des Terrameters

Da die Messausrüstung nur einen einzigen Reflektor umfasste, wäre der Ablauf der Messungen durch die langen Wartezeiten beim Verschieben des Reflektors vom einen zum anderen Netzpunkt mit dem Auto stark verzögert worden. Deshalb wurde ein Militärhelikopter für diese Transporte eingesetzt. Auf diese Weise konnten die Messungen innert 4 Messtagen abgeschlossen werden.

Bei der Zweifarben-EDM wird die troposphärische Refraktion grösstenteils berücksichtigt (s. Kap. 2.5.1.2). Um die Resteinflüsse korrigieren zu können, wurden auf der Terrameter- sowie auf der Reflektorstation Meteodaten (Luftdruck, -temperatur und -feuchtigkeit) nach dem bei der EDM üblichen Verfahren gemessen und registriert. Die auf der Terrameterstation aufgenommenen Werte wurden direkt ins Gerät eingegeben. Sie haben damit die Distanzberechnung direkt beeinflusst. Die übrigen Meteodaten wurden im Hinblick auf eine mögliche Nachbehandlung der Messdaten (Postprocessing) aufgezeichnet.

Tabelle 2.5-7 vermittelt einen Überblick über den Ablauf der Messungen, die Resultate der Messserien und die Messbedingungen. Bei den Distanzen handelt es sich um die mit der Gerätekonstante korrigierten Raumstrecken, welche in die Ausgleichung übernommen wurden. Die angegebenen Standardabweichungen in mm und ppm ergaben sich bei der Mittelbildung aus den Messserien, welche auf der Station online berechnet und ausgedruckt wurde.

Besondere Schwierigkeiten ergaben sich auf der Station 4.ERGI, wo auf einem 2.2 m hohen Stahlpfeiler gemessen werden musste. Am Morgen des 7.10. wurde eine Visur direkt in der Einstrahlrichtung der tiefstehenden Sonne gemessen. Dabei kam es zu einer Überhitzung in der Brennebene des Reflektor-Objektivs. Anschliessend musste der Reflektor optisch neu justiert werden.

Eine erste Auswertung der Terrametermessungen erfolgte jeweils am Abend nach Abschluss der Messungen. Die Resultate wurden über Telefon an die L+T nach Wabern übermittelt und in eine 3D-Netzausgleichung mit dem Programm RAUMTRI eingeführt. Dank dieser Sofortauswertung konnte die Qualität der Messungen bereits im Feld beurteilt werden. Aus Zeitgründen wurden lediglich 23 der insgesamt 29 möglichen Visuren gemessen.

Messablauf / Anzahl der Messungen / Distanz / Standard Abweichungen / Messbedingungen						
Datum	Messzeit	Visur	Anz.Mess. Ser.Einz.	gem.Distanz [m]	Std.Abw. [mm][ppm]	Wetter / Bemerkungen
06.10	13:00-13:30	8 -> 7	6 93	4 154.805 58	1.0 0.2	Sonne, wenig Wind, Dunst
	14:50-15:30	-> 4	6 55	5 603.119 49	1.4 0.2	Sonne, mässiger Wind
	16:10-16:30	-> 5	6 95	3 999.499 77	1.0 0.2	
	17:10-17:40	-> 3	5 71	6 397.913 77	1.7 0.3	z.T. Wind
	18:10-18:20	-> 1	4 67	1 897.877 91	0.5 0.3	starker Wind bei Refl.
	19:15-19:45	-> 2	5 81	4 469.424 80	1.1 0.2	gute Messbedingungen
07.10	10:45-10:55	4 -> 7	4 40	2 005.828 41	0.3 0.2	Sonne tief, steile Visur
	11:30-12:00	-> 1	7 70	4 526.865 12	1.8 0.4	Sonne erwärmt Pfeiler
	12:25-12:55	-> 2	6 66	4 074.006 59	1.6 0.4	sonnig
	13:20-13:40	-> 3	8 75	3 494.521 37	1.0 0.3	
	14:20-14:35	-> 6	6 54	5 600.663 88	1.3 0.2	
	15:10-15:20	-> 5	4 54	2 578.290 72	0.5 0.2	leichter Wind, Dunst
07.10	16:45-17:05	7 -> 1	5 63	2 767.574 68	0.8 0.3	Sonne, Wind, etwas Dunst
	17:30-17:40	-> 4	4 64	2 005.820 38	0.7 0.4	
08.10	10:00-10:15	3 -> 2	4 67	2 289.655 43	0.5 0.2	
	13:20-14:10	-> 4	6 54	3 494.520 12	0.5 0.2	Wind, Sonne, etwas Dunst
	15:50-16:05	6 -> 5	4 53	3 234.324 92	0.8 0.2	im Windschatten
	16:50-17:10	-> 1	- -	-	-	Messung abgebrochen
09.10	10:00-10:22	6 -> 1	6 66	3 571.702 04	1.0 0.3	Sonne + Nebel, windstill
	13:20-13:30	-> 7	3 38	4 887.980 14	0.7 0.1	Reflektor neu justiert
	14:50-15:00	-> 3	4 70	7 403.064 89	0.9 0.1	Sonne + Nebel, windstill
	15:35-15:40	-> 2	3 49	5 861.261 45	0.5 0.1	
09.10	18:15-18:35	2 -> 1	3 50	2 572.248 86	0.3 0.1	Wind, Sonne tief
	19:50-19:55	-> 5	5 57	4 810.377 95	0.8 0.2	Wind, knapp über Nebel

Tabelle 2.5-7: Ablauf und Resultate der Terrametermesskampagne 1986

## 2.5.8 Auswertung und Beurteilung der Terrameter-Beobachtungen

Nach Abschluss der Messkampagne wurden die Messungen beim CERN noch bereinigt und schliesslich an die L+T abgeliefert. Eine erste 3D-Netzausgleichung der 23 Terrameterstrecken in Kombination mit den 56 provisorisch aus Bodenmeteo reduzierten Mekometerdistanzen wurde zur Aufdeckung allfälliger grober Fehler durchgeführt. Die Terrameterstrecken wurden mit einem mittleren Fehler a priori von  $0.3\text{mm} + 0.1\text{ ppm}$  eingeführt. Die grössten Verbesserungen ergaben sich bei den vier in Tabelle 2.5-8 angegebenen Strecken, welche alle vom nördlichen stark besonnten Hang aus gemessen wurden. Wir vermuteten, dass ein Teil dieser Effekte von den provisorisch reduzierten Mekometerstrecken kommen könnten. Es bestand deshalb die Hoffnung, dass diese grossen Verbesserungen in der endgültigen Ausgleichung zusammen mit den aus Flugmeteo reduzierten Mekometerstrecken verschwinden könnten.

Grosse Verbesserungen der provisorischen 3D-Ausgleichung					
Visur	d [km]	m.F. [mm]	v [mm]	w	z [%]
3.JEIZ -> 4.ERGI	3.5	*	(5.0)	*	*
8.SUST -> 3.JEIZ	6.4	0.7	-1.8	-2.7	62
2.BRAE -> 1.BRUN	2.6	0.4	1.1	3.8	39
3.JEIZ -> 2.BRAE	2.3	0.4	0.8	3.4	26

\*) Aus dem Datensatz eliminiert (Ausreisser)

Tabelle 2.5-8: Terrameterstrecken mit grossen Verbesserungen in der provisorischen 3D-Ausgleichung

Die auf Terrameter- und Reflektorstation aufgenommenen Meteorodaten wurden für jede gemessene Strecke gemittelt und mit den beim Terrameter eingegebenen Werten (für die Berechnung massgebend) verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass bei der relativen Luftfeuchtigkeit Abweichungen bis maximal 11% (Strecke 4.ERGI -> 6.AGAR) auftraten. Da eine Nachbehandlung der abgespeicherten Originalmessdaten beim CERN nicht möglich war, versuchten wir den Einfluss dieser Abweichungen der Luftfeuchtigkeit auf die Distanz abzuschätzen. Die Abschätzung des Einflusses erfolgte anhand eines Nomogramms [Hübner, 1983] und ergab mit Ausnahme einer Strecke durchwegs kleine Beträge unter  $0.07\text{ ppm}$ . Einzig bei der  $5.6\text{ km}$  langen Strecke 4.ERGI -> 6.AGAR beträgt der Einfluss der verbesserten relativen Luftfeuchtigkeit  $-0.11\text{ ppm}$  oder  $-0.6\text{ mm}$ . Da diese Abweichung noch immer im Bereich der Messgenauigkeit liegt, wurde auf eine Korrektur dieses Einzelwertes verzichtet. Das Beispiel zeigt aber, dass der Erfassung der Luftfeuchtigkeit bei den Terrametermessungen Beachtung geschenkt werden sollte.

Nachdem die definitiv reduzierten Mekometerstrecken zur Verfügung standen, wurden weitere Gesamtausgleichungen mit Terrameter und Mekometerstrecken durchgeführt. Die Varianzkomponenten-Schätzungen zeigten, dass die a priori Genauigkeit der Terrameterstrecken anfänglich zu optimistisch angenommen wurde. Ein a priori Ansatz von  $0.3\text{ mm} + 0.3\text{ ppm}$  scheint beim vorliegenden Messdatensatz der Realität besser zu entsprechen. Dieser Ansatz wurde deshalb bei den definitiven Netzausgleichungen verwendet (Kap.2.8).

## 2.6 Präzisionsnivellements

### 2.6.1 Anlage des Nivellementsnetzes

Das 3D-Testnetz Turtmann umfasst neben dem trigonometrischen Netzteil auch ein Nivellementsnetz (Abb. 1.4-2). Dieses ist Bestandteil des Landesnivellements und soll mehreren, in Tab.2.6-1 aufgeführten Zwecken dienen.

1. Den orthometrischen Höhenunterschied zwischen den beiden Talpunkten 7.TURT und 8.SUST mit hoher Genauigkeit bestimmen.
2. Den Höhenanschluss zum Landesnivellement herstellen.
3. Eine höhenmässige Rückversicherung der wenig stabilen Talpunkte (7.TURT und 8.SUST) durch den Anschluss an stabile Punktgruppen im Fels sichern.
4. Ausgangsmessung für die Untersuchung von relativen Vertikalbewegungen zwischen der nördlichen und südlichen Talflanke durch wiederholte Nivellements von Profilen.
5. Verbesserung der Anlage von vorhandenen Landesnivellementslinien zwischen Susten und Gampel sowie deren Neumessung

Tabelle 2.6-1: Zielsetzungen des Nivellementsnetzes

Das Netz besteht aus dem Nord-Süd-Profil 1: Getwing - Turtmann, das die FP-Gruppe 7.TURT einbindet und dem Nord-Süd-Profil 2: Susten - Feithieren, welches die FP-Gruppe 8.SUST enthält (Abb.1.4-2). Die zwei Nord-Südprofile sind durch die Abschnitte Gampel - Getwing und Turtmann - Agarn - Feithieren der Tallinie miteinander, sowie mit der Löttschberglinie des Landesnivellements (2. Messung 1983) verknüpft. Das Netz enthält 6 FP-Gruppen im Fels (Tab.2.6-2).

Ordnungsnummer (Bezeichnung)	Ort	Anz.	er- stellt	Geologie	Bemerkungen Eignung des Standorts
196a , 197 (B , J)	Strasse Steg- Goppenstein	2	1983,48	Aarmassiv	Anschluss an LN-1983 (Löttschberg) ausgezeichnet, kristallin
364 , 365 (Y , Z)	Steg	2	1985	Aarmassiv	LN-Löttschberg sehr gut, kristallin
176a, 177a, 355 (V , W , X)	Getwing	3	1985	Helvetikum	N-S -Profil 1 sehr gut, Malm
356, 357, 358 (S , T , U)	Turtmann	3	1985	Penninikum	N-S -Profil 1 gut, Bündner Schiefer
359 , 360 (Q , R)	Feithieren	2	1985	Penninikum	N-S -Profil 2 mässig, zerrissen, Bünd. Schiefer
361, 362, 363 (N , O , P)	Susten	3	1985	Helvetikum	N-S -Profil 2 sehr gut, Malm

Tabelle 2.6-2: Nivellements-Fixpunktgruppen im Fels

Die Arbeiten der Rekognoszierung und Linienvorbereitung wurden im August 1985 zusammen mit den übrigen Versicherungsarbeiten ausgeführt. Bei der Auswahl und Versicherung der neuen Felspunkte wurde besonders auf eine gute Eignung der Standorte für die tektonische Zielsetzung der Netzanlage geachtet. Auf der südlichen Talflanke (Penninikum) war es wesentlich schwieriger, im geschieferten Fels geeignete Stellen für die Versicherung zu finden. Zur Unterteilung der Linien wurden zusätzlich 36 provisorische Hilfspunkte (TOV 1-36) durch Stahlnieten versichert. Diese Zwischenpunkte dienen zur Kontrolle der Hin- und Rückmessungen beim Nivellement sowie z.T. als Stationspunkte für die Schwere-messungen (s. *Abb.4.3-1*).

Im April 1986 wurden alle Nivellements-Fixpunkte mit dem Geologen (N. Pavoni, ETHZ) begangen und auf ihre geologische Eignung hin beurteilt. Dabei kam auch die Stabilitäts-Testmethode (nach Pavoni) zur Anwendung. Dabei wird ein Geophon auf dem Fels beim FP aufgestellt und der Fels im Abstand von ca. 1 m mit einer Sprungfeder durch das Körpergewicht in Schwingungen versetzt. Die Vertikalauslenkungen des Geophons werden von einem Seismographen aufgezeichnet und die Stabilität der Felsstandorte anhand der aufgezeichneten Amplituden beurteilt. Alle Felsstandorte wurden dabei als genügend bis sehr gut beurteilt (*Tab.2.6-2*).

KANTON WALLIS




Nachtrag 1986

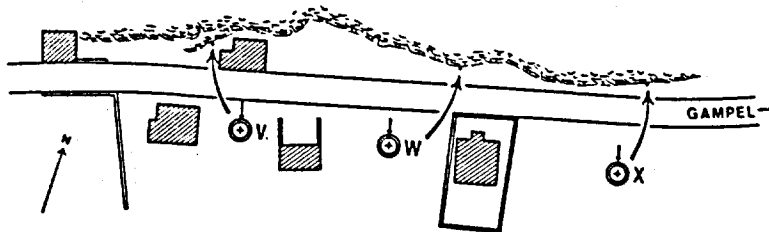
32A

Gampel-Turtmann

LK.B1. 1288

Neuer Horizont, Repère Pierre du Niton (R. P. N.) = 373.600 m

Ordnungsnummer	Fixpunkt-Bezeichnung	Höhe über Meer Meter	Lagebeschreibung	Herkunft und Datum der Messung
<u>Gampel-Turtmann</u>				
176a	 V	624.745	Gettwing, Fels links der Zufahrt zu einem Stall, 5.25m vom Strassenrand, 2.30m von der Stallecke, 0.3m über Boden.	LN 1986
177a	 W	624.002	Gettwing, Felspartie bergseits der Strasse, 2.1m von der Westfassade des ersten Wohnhauses talabwärts, 4.6m vom Strassenrand, 0.9m über Strassenhöhe.	LN 1986
355	 X	623.779	Gettwing, Felspartie bergseits der Strasse, 35.3m von der Ostfassade des ersten Wohnhauses talaufwärts, 1.6m vom Strassenrand, 0.7m über Strassenhöhe.	LN 1986



Abbildungen 2.6-1: Fixpunktgruppen des Landesnivellements (Ausschnitte aus dem Eidg. Nivellementsverzeichnis (ENV) Ausgabe 1967, Nachtrag 1986: VS-D, Blatt Nr.32A)

KANTON WALLIS

Nachtrag 1986

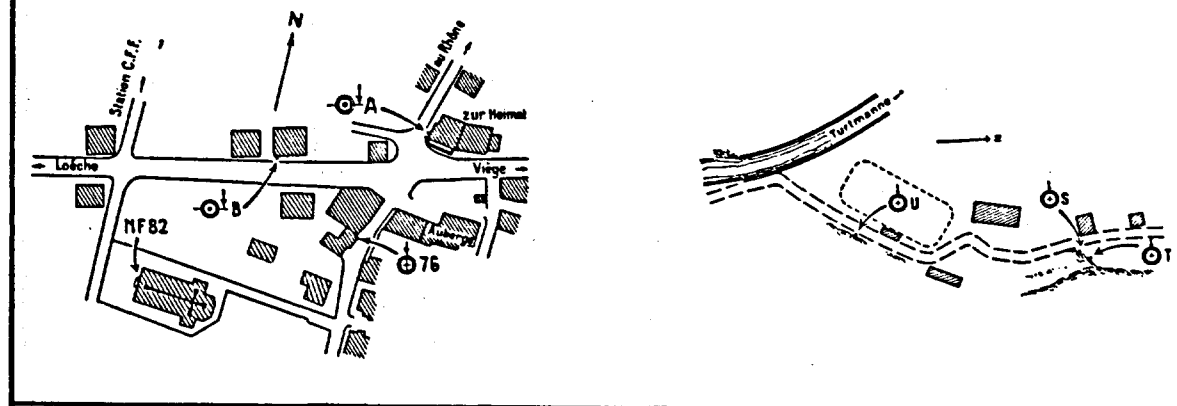
32<sup>B</sup>

Turtmann

LK.B1. 1288

Neuer Horizont, Repère Pierre du Niton (R.P.N.) = 373.600 m

Ordnungsnummer	Fixpunkt-Bezeichnung	Höhe über Meer Meter	Lagebeschreibung	Herkunft und Datum der Messung
<u>Turtmann</u>				
178	⊙ A	627.012	Wohnhaus zur 'Heimat', Südwestecke, Steinquader, 1.02m von der Ecke, 0.3m über Boden.	LN 1986
179	⊙ B	627.834	Café-Restaurant Furrer, Südwestecke, Sockel, 0.35m von der Ecke, 0.3m über Boden.	LN 1986
180	⊙ 76	628.089	Gebäude Denner-Satellit, Hausecke zwischen den 2 gewölbten Türen, in Mauerwerk, 0.12m von der Ecke, 0.75m über Boden.	LN 1986
181	NF 82	629.465	Kirche, Hauptportal, Schwelle, 0.18m vom Pfosten links.	LN 1986
356	⊙ S	638.135	Fels gegenüber dem Feuerwehrlokal, 1.05m von der Verlängerung der Südfassade in Richtung Turtmantal, 4.2m vom Strassenrand, 0.75m über Strassenhöhe.	LN 1986
357	⊙ T	639.798	Fels gegenüber dem Feuerwehrlokal, 3.8m von Bolzen S hangaufwärts (direkt gemessen), 7.2m vom Strassenrand, 2.2m über Strassenhöhe.	LN 1986
358	⊙ U	639.818	Fels gegenüber dem Eishockeyfeld, am Rande des Weges zum Wasserfall, 35.7m von einer Holzbaracke (Kantine) in Richtung Süd, 0.25m über dem Weg.	LN 1986



Abbildungen 2.6-2: Fixpunktgruppen des Landesnivellements (Ausschnitte aus dem Eidg. Nivellementsverzeichnis (ENV) Ausgabe 1967, Nachtrag 1986: VS-D, Blatt 32B)



Agarn, Feithieren

Neuer Horizont, Repère Pierre du Nilon (R. P. N.) = 373.600 m

LK.B1. 1287

Ordnungsnummer	Fixpunkt-Bezeichnung	Höhe über Meer Meter	Lagebeschreibung	Herkunft und Datum der Messung
<u>Agarn</u>				
182a	⊙ M	626.311	Kirche, Nordostecke, Betonfundament, 0.25m vor der Fassade, 0.40m von der Ecke des Fundaments.	LN 1986
183	⊙ E	624.812	Postbüro, Südostecke, Steinquader, 0.20m von der Ecke, 0.20m unter Sockeloberkante.	LN 1986
184	⊙ 511	626.082	Feuerwehrlokal, ehemalige Kapelle von 1679, Eingang, Pfosten links, 0.4m über Boden.	LN 1986
185	⊙ C	631.170	Gampinen, Kapelle, Sockel, 0.20m von der Chorecke, 0.15m über Boden.	LN 1986
<u>Feithieren</u>				
359	⊙ Q	703.606	Fallfluh, Felspartie am Rand des markierten Weges nach Grechten, ca. 37m von der Wegbiegung aufwärts, 4m vom Wegrand, 1.8m über Weghöhe.	LN 1986
360	⊙ R	704.046	Fallfluh, Felspartie am Rande des markierten Weges nach Grechten, 2.7m von Bolzen Q abwärts, 4.5m vom Wegrand, 2.1m über Weghöhe.	LN 1986

Abbildungen 2.6-3: Fixpunktgruppen des Landesnivellements (Ausschnitte aus dem Eidg. Nivellementsverzeichnis (ENV) Ausgabe 1967, Nachtrag 1986: VS-D, Blatt Nr.33A)

KANTON WALLIS

Nachtrag 1986

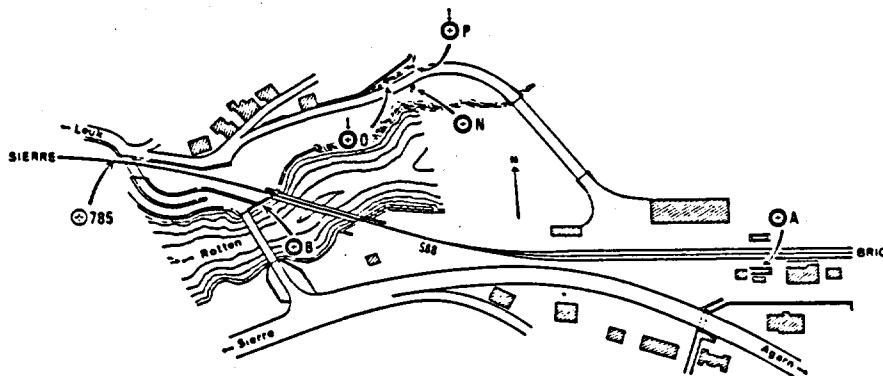
33<sup>B</sup>

Susten

LK.81. 1287

Neuer Horizont, Repère Pierre du Niton (R.P.N.) = 373.600 m

Ordnungsnummer	Fixpunkt-Bezeichnung	Höhe über Meer Meter	Lagebeschreibung	Herkunft und Datum der Messung
<u>Susten</u>				
186	⊕ A	623.753	Station SBB, Fussgängerunterführung zum Perron, Einfassungsmauer, Krönung, 4.51m von der Ecke, bodeneben.	LN 1986
361	⊕ N	626.296	Anstehender Fels, ca. 170m von der Strassenbrücke nach Leuk talaufwärts, flusseits der Strasse, 3.2m vom Strassenrand, 0.4m über Strassenhöhe.	LN 1986
362	⊕ O	626.427	Felspartie, bergseits der Strasse, 21.2m vom Ende der Quadersteinmauer in Richtung Bahnhof, 2.8m vom Strassenrand, 0.6m über Strassenhöhe.	LN 1986
363	⊕ P	626.570	Felspartie, östliches Ende, 40m vom Ende der Quadersteinmauer in Richtung Bahnhof, 1.3m vom Strassenrand, 0.8m über Strassenhöhe.	LN 1986
187	⊕ B	621.366	SBB-Brücke über die Rhone, Widerlager rechtes Ufer, Seite flussabwärts, Krönung der Flügelmauer, 0.40m von der Brüstung der Strasse nach Leuk.	LN 1986
188	⊕ 785	621.719	Brücke der Strasse nach Leuk über die SBB, Bahn Km 117.115, Widerlager bergseits, runder Eckpfeiler gegen Siders, 0.9m über Planum.	LN 1986



Abbildungen 2.6-4: Fixpunktgruppen des Landesnivellements (Ausschnitte aus dem Eidg. Nivellementsverzeichnis (ENV) Ausgabe 1967, Nachtrag 1986: VS-D, Blatt Nr.33B)

KANTON WALLIS

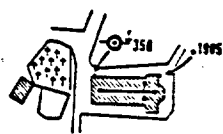
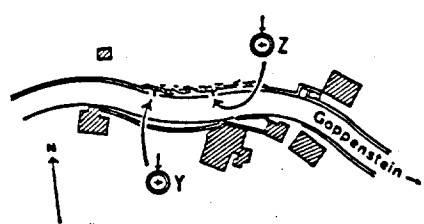
Nachtrag 1986

35A

Gampel-Dorf, Steg

Neuer Horizont, Repère Pierre du Niton (R.P.N.) = 373.600 m

LK.B1. 1288

Ordnungsnummer	Fixpunkt-Bezeichnung	Höhe über Meer Meter	Lagebeschreibung	Herkunft und Datum der Messung
<u>Gampel-Dorf</u>				
194	⊙ 350	636.284	Kirche, Nordwestecke, Sockel; 0.40m von der Ecke, 0.25m über Boden. (Gravimetrische Station 1954)	LN 1986
195	• 1905	636.756	Kirche, Turm, NO-Ecke, Fundamentquader; 0.4m über Boden.	LN 1986
				
<u>Steg</u>				
364	⊙ Y	644.856	Felspartie Eingangs Steg, bergseits der Strasse, 8.1m strassenaufwärts vom Ende der Quadersteinmauer, 1.65m vom Strassenrand, 0.25m über Boden.	LN 1986
365	⊙ Z	647.605	Felspartie Eingangs Steg, bergseits der Strasse, 37.5m strassenaufwärts vom Ende der Quadersteinmauer, 1.3m vom Strassenrand, 0.3m über Boden.	LN 1986
				

Abbildungen 2.6-5: Fixpunktgruppen des Landesnivellements (Ausschnitte aus dem Eidg. Nivellementsverzeichnis (ENV) Ausgabe 1967, Nachtrag 1986: VS-D, Blatt Nr.35A)

KANTON WALLIS

Nachtrag 1986

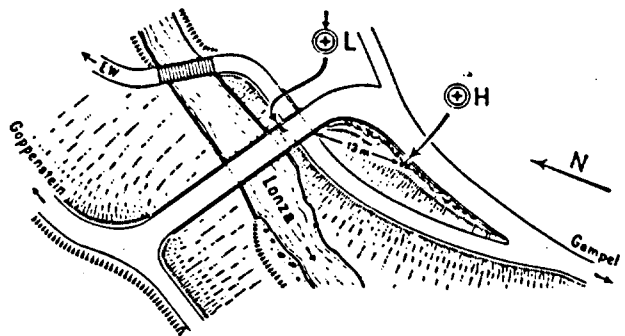
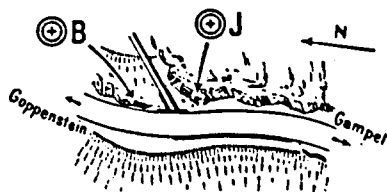
35B

Steg-Goppenstein

LK.B1. 1288

Neuer Horizont, Repère Pierre du Niton (R.P.N.) = 373.600 m

Ordnungsnummer	Fixpunkt-Bezeichnung	Höhe über Meer Meter	Lagebeschreibung	Herkunft und Datum der Messung
<u>Steg-Goppenstein</u>				
196a	⊙ B	709.270	Fels, bergseits der Strasse, 10.6m von der Axe der Druckleitung strassenaufwärts; 1.2m vom Strassenrand, 1.5m über Strassenhöhe.	LN 1986
197	⊙ J	707.777	Fels, bergseits der Strasse, 5.45m von der Axe der Druckleitung strassenabwärts 1.5m über Strassenhöhe, 0.80m von der Pfeilspitze.	LN 1986
198	⊙ H	768.243	Klösterli, Zufahrtstrasse zum EWL, Grundblock der Stützmauer der Hauptstrasse; 11m von der Brücke flussabwärts, 0.5m über Boden.	LN 1983
199	⊙ L	767.799	Klösterli, Strassenbrücke über die Lonza, Pfeiler, Seite flussaufwärts, Betonsockel; 1.0m von der Aussenkante, 0.35m über Weghöhe.	LN 1983



Abbildungen 2.6-6: Fixpunktgruppen des Landesnivellements (Ausschnitte aus dem Eidg. Nivellementsverzeichnis (ENV) Ausgabe 1967, Nachtrag 1986: VS-D, Blatt Nr.35B)

### 2.6.2 Nivellements-kampagne vom 23. – 26.9.1985

Eine erste kleine Messkampagne fand im Herbst 1985 statt (Tab. 2.6-3). Die Arbeiten beschränkten sich aus Zeitgründen auf die Messung der beiden Nord-Süd-Profile. Damit war es zumindest möglich, Näherungshöhen für die provisorische Netzausgleichung zu bestimmen und die Höhen-Stabilität der beiden Talpunkte (7.TURT und 8.SUST) zu überwachen.

Messkampagne: Nivellement der Talprofile 1985	
Termin:	23. - 26.9.1985
Leitung:	B. Mattli
Beobachter:	B. Mattli
Mitarbeiter:	E. Beyeler, Ch. Müller, Praktikant
Instrumente:	automatisches Nivellier WILD NA2 Nr.39 Invarlattenpaar NEDO Nr.61, 62
Messprogramm:	doppeltes Präzisionsnivellement (Beobachtungssequenz: R-V-V-R)
Datenerfassung:	EPSON HX-20, Progr. LNIV

Tabelle 2.6-3: Nivellements-kampagne 1985

Die Messungen erfolgten bei schönem Herbstwetter nach dem beim Landesnivellement üblichen Messverfahren (doppeltes Präzisionsnivellement hin und zurück mit WILD NA2 und interferometrisch geeichten Invarlatten). Die Datenerfassung erfolgte mit dem Feld-PC EPSON HX-20 (Programm LNIV).

### 2.6.3 Nivellements-kampagne vom 1. – 11.4.1986

Die zweite Nivellements-kampagne im Rahmen des Landesnivellements fand im April 1986 statt (Tab.2.6-4). Die Feldarbeiten wurden durch häufige Regenfälle und heftige Winde stark behindert. Neben der Messung der fehlenden Talverbindungen zwischen Steg und Getwing sowie Turtmann und Feithieren wurden auch die beiden Nord-Süd-Profile nochmals gemessen (Abb.1.4-2). Auch diese Messungen erfolgten streng nach der Methode des schweizerischen Landesnivellements.

Messkampagne: Landesnivellement 1986	
Termin:	1. - 11.4.1986
Leitung:	B. Mattli
Beobachter:	B. Mattli
Mitarbeiter:	M. Maier, G. Perret, V. von Sury
Instrumente:	automatisches Nivellier WILD NA2 Nr.39 Invarlattenpaar NEDO Nr. 61, 62
Messprogramm:	doppeltes Präzisionsnivellement (Beobachtungssequenz: R-V-V-R)
Datenerfassung:	EPSON HX-20, Progr. LNIV

Tabelle 2.6-4: Nivellements-kampagne 1986

## 2.6.4 Auswertung der Nivellements

Die Auswertung der Messungen 1985/86 erfolgte mit dem Programm LNAUS (Version 1985) auf der Rechenanlage L+T. Die Lattenkorrekturen (Massstab, Ausdehnung, Lattenfussfehler), die Korrekturen für die Lattenaufstellung und das Latteneinsinken werden mit diesem Programm automatisch angebracht. Die verwendeten Invarlatten waren im Sommer 1985 auf der Interferometer-Prüfbahn des Eidg. Amtes für Messwesen (EAM) geprüft worden. Die dabei bestimmten Lattenkorrekturen wurden an den Messungen angebracht.

Die Auswertung der Messungen 1986 von Steg bis Susten ergab für die 13 km lange Linie einen aussergewöhnlich kleinen mittleren Kilometerfehler aus der Doppelmessung von 0.2 mm (Tab.2.6-5). Zum Vergleich können die Erfahrungswerte der neueren Messungen beim Landesnivellement dienen. Diese Schätzungen liegen im Bereich von 0.3 mm/km bis 0.4 mm/km aus den Doppelmessungen und bei 0.8 mm/km [Gubler, 1991] aus den Netzausgleichungen.

Linie von nach	Distanz [km]	Anz.Ab- schnitte	dh [m]	m.F.(1km) [mm]	Latteneinsinken / UP	
					A [µm]	B [µm]
Steg - Susten	13.0	46	-25.9	0.20	- 3	-16

A: Latteneinsinken bei Umstellpunkten (UP) auf Asphalt  
B: " " " " " Beton / Granit etc.

Tabelle 2.6-5: Genauigkeit der Messungen 1986

Der Höhenanschluss des 3D-Testnetzes an die Fixpunktgruppe im Dorf Turtmann (Tab. 2.6-6) erfolgte im Herbst 1985 anhand der ersten Messung des Nord-Süd-Profiles 1. Die verwendeten Anschlusswerte entsprechen dem alten Nachführungsstand des ENV von 1985. Der Höhenwert von Niete TOV 12: 622.4474 m wurde als orthometrischer Ausgangswert für das 3D-Netz definiert und festgehalten.

Höhenanschluss des 3D-Netzes an das Landesnivellement				
Fixpunkt Ord.Nr. Bez.	beobachtete Niv.-Höhe [m]	offizielle Ge- brauchshöhe(85) [m]	Lagerung dh [mm]	Bemerkungen
178 T5H A	627.0206	627.021	0	Skizzen siehe Abb. 2.6-1 bis -6
181 T1V 82	629.4747	629.476	-1	
180 T4H 76	628.0980	628.098	0	Referenz-Fixpunkt
<b>7.TURT : Niete TOV 12</b>	<b>622.4474</b>			<b>Festpunkt (3D-Netz) Höhenbezugspunkt</b>

Tabelle 2.6-6: Höhenanschluss des 3D-Testnetzes

Nach der Auswertung der Messungen vom Frühjahr 1986 (LN86.1) wurde der Abschnitt Steg - Turtmann - Agarn - Feithieren - Leuk des Landesnivellements neu berechnet und die Dokumente nachgeführt. Als Anschlusshöhen dienten die Werte aus den Landesnivellements von 1948 (Susten) und 1983 (Steg). Zur Berechnung der Gebrauchshöhen des Landesnivellements mussten zwischen diesen Referenzpunkten

-11.37 mm auf die Distanz von 13.7 km ausgeglichen werden. Die offizielle Gebrauchshöhe der Anschluss-Punktgruppe im Dorf Turtmann hat infolge der Nachführung 1986 um -8 bis -9 mm geändert. Die Ausgangshöhe des Höhenbezugspunktes des 3D-Netzes (7.TURT/Niete 12) wurde (im Unterschied zu den Höhen in Kap.4.3) unverändert beibehalten, damit konnte ein Nebeneinander verschiedener Testnetz-Höhen vermieden werden.

Das wichtigste Resultat für die 3D-Berechnung des Testnetzes ist die beobachtete Höhendifferenz von + 54.6700 m zwischen den beiden Talpunkten (Tab.2.6-7), welche zur Berechnung der orthometrischen Höhendifferenz weiterverwendet wurde (Kap.4.3).

Fixpunkt	beobacht. Höhe [m]	dh [m]	m.F. [mm]	Dist. [km]	Bemerkungen, Aufstellung
7.TURT	622.297 84				Hauptsockel, OK-Kugel (ø=2cm)
7.1	622.443 75				Rückvers.-Sockel, OK-Kugel (ø=2cm)
7.2	622.327 77				" " , OK-Kugel (ø=2cm)
T0V 12	622.443 64	0.000 0	0	0	Höhenbezugspunkt von 7.TURT (Niete)
T0V 15	629.380 53	+ 6.936 9		0.86	Zwischenpunkt (Schwerestat., Niete)
T0V 18	622.678 64	- 6.701 9		1.76	Zwischenpunkt (Schwerestat., Niete)
T0V 22	620.599 05	- 2.079 5		3.14	Zwischenpunkt (Schwerestat., Niete)
T5H 511	626.090 09	+ 5.491 0		4.37	Zwischenpunkt (Schwerestat.)
T0V 28	657.579 13	+31.489 0		5.52	Zwischenpunkt (Schwerestat., Niete)
T0V 35	694.609 35	+37.030 2		6.22	Zwischenpunkt (Schwerestat., Niete)
T0V 34	685.330 48	- 9.278 9		6.59	Zwischenpunkt (Schwerestat., Niete)
T0V 33	677.113 68	- 8.216 8	2.1	6.90	Höhenbezugspunkt von 8.SUST (Niete)
8.SUST	676.475 85				OK-Kugel (ø=2cm)
8.1	677.610 06				Rückvers.-Sockel, OK-Kugel (ø=2cm)
T0V12->T0V33	dh (nivelliert)	+54.670 0	2.1	6.9	beobachtete Höhendifferenz ->3D-Netz

Tabelle 2.6-7: Nivellement 7.TURT -> 8.SUST: beobachtete Höhendifferenz

### 2.6.5 Analyse der wiederholten Messungen der Nord-Süd-Profile

Die beiden Nord-Süd-Profile (1: Getwing - Turtmann und 2: Feithieren - Susten) wurden im September 1985 erstmals und im April 1986 zum zweiten Mal gemessen. Aus dem Vergleich der Resultate dieser Wiederholungsmessungen können erste Hinweise über die Stabilität der beiden Talpunkte (Betonsockel in der Sedimentfüllung des Talbodens) gewonnen werden. Zweifel über die Höhenstabilität bestehen in erster Linie bezüglich Punkt 8.SUST, welcher sich auf dem jungen Schuttfächer des Illgrabens (mächtiger Erosionsgraben, Abb.1.4-3) befindet. Bedingt durch die Kompaktierung des Schuttmaterials sind Senkungen dieses Punktes zu erwarten. Da der Schuttkegel aber nur wenig geneigt ist, sind die zu erwartenden Horizontalverschiebungen in der Falllinie wahrscheinlich wesentlich geringer.

Zwischen den Fels-Punktgruppen Getwing und Turtmann veränderte sich die Höhendifferenz im Intervall 1985-86 um  $-0.5 \text{ mm} \pm 1.6 \text{ mm}$ . Da diese Höhenänderung nicht signifikant ist, wurde die mittlere Höhe beider Fels-Punktgruppen für die weitere Analyse des Profils festgehalten. Die Höhenänderung der Haupt- und Rückversicherungspunkte 7.TURT, 7.1, 7.2 und T0V 12 von  $+0.2 \text{ mm} \pm 0.8 \text{ mm}$  ist ebenfalls nicht signifikant.

PROFIL 1: GETWING - TURTMANN							
Fixpunkt Typ Bez.	H (beobachtet) 23.-26.9.1985 [m]	H (beobachtet) 1.-11.4.1986 [m]	Dist. [m]	beob. Diff. [mm]	Korr. * [mm]	Höhen- diff. [mm]	Bemerkung
Getwing:							
T4H X	623.787 03	623.783 02	0	-4.01	3.78	- 0.2	Ref. Fels
T4H W	624.009 63	624.005 99	46	-3.64	3.78	+ 0.1	Ref. Fels
T4H V	624.752 82	624.749 13	106	-3.69	3.78	+ 0.1	Ref. Fels
TOV 12	622.447 39	622.443 64	738	-3.75	3.96	+ 0.2	Betonsockel
7.TURT	622.301 59	622.297 84	738	-3.75	3.96	+ 0.2	"
7.1	622.447 53	622.443 75	738	-3.78	3.96	+ 0.2	"
7.2	622.331 54	622.327 77	738	-3.77	3.96	+ 0.2	"
Turtmann:							
T5H A	627.020 67	623.016 77	1438	-3.90	4.14	+ 0.2	Gebäude
T5H B	627.842 35	627.838 40	1438	-3.95	4.14	+ 0.2	"
T4H 76	628.098 00	628.093 87	1438	-4.13	4.14	0.0	"
T1V 82	629.474 62	629.470 46	1602	-4.16	4.18	0.0	"
T4H S	638.145 07	638.140 60	1963	-4.47	4.28	- 0.2	Ref. Fels
T4H T	639.807 42	639.803 12	1963	-4.30	4.28	0.0	Ref. Fels
T4H U	639.827 62	639.823 56	2090	-4.06	4.28	+ 0.2	Ref. Fels

\*) Interpolation proportional zur Distanz

Tabelle 2.6-8: Analyse der Nivellements: Nord-Süd-Profil Getwing - Turtmann:  
Höhenänderung (1985-86) von 7.TURT

Zwischen den Fels-Punktgruppen Feithieren und Susten veränderte sich die Höhendifferenz im Intervall 1985-86 um  $-1.2 \text{ mm} \pm 1.8 \text{ mm}$ . Da diese Höhenänderung (auf dem Niveau 1-alpha = 95 %) nicht signifikant ist, wurde die mittlere Höhe beider Fels-Punktgruppen für die weitere Analyse des Profils festgehalten. Die Höhenänderung der Haupt- und Rückversicherungspunkte 8.SUST, 8.1 und TOV 33 von  $-1.1$  bis  $-1.4 \text{ mm} \pm 0.9 \text{ mm}$  ist (auf dem Niveau 1-alpha = 95 %) ebenfalls nicht signifikant. Das Resultat lässt aber eine Senkung infolge von Kompaktierungseffekten des Untergrundes (Schutfächer) vermuten.

PROFIL 2: FEITHIEREN - SUSTEN							
Fixpunkt Typ Bez.	H (beobachtet) 23.-26.9.1985 [m]	H (beobachtet) 1.-11.4.1986 [m]	Dist. [m]	beob. Diff. [mm]	Korr. [mm]	Höhen- diff. [mm]	Bemerkung
Feithieren:							
T4H R	704.042 43	704.055 29	0	+12.86	-12.78	+ 0.1	Ref. Fels
T4H Q	703.602 73	703.615 43	16	+12.70	-12.78	- 0.1	Ref. Fels
TOV 33	677.102 57	677.113 68	1042	+11.11	-12.32	- 1.2	Mauer
8.SUST	676.464 90	676.475 85	1042	+10.95	-12.32	- 1.4	Betonsockel
8.1	677.598 83	677.610 06	1042	+11.23	-12.32	- 1.1	"
Susten:							
T4V A	623.754 14	623.763 66	2228	+ 9.52	-11.79	- 2.3	Mauer
T4V N	626.295 30	626.306 80	2495	+11.50	-11.67	- 0.2	Ref. Fels
T4H O	626.426 58	626.438 36	2495	+11.78	-11.67	+ 0.1	Ref. Fels
T4H P	626.569 86	626.581 58	2495	+11.72	-11.67	0.0	Ref. Fels
T4V B	621.356 00	621.377 37	2658	+11.37	-11.67	- 0.3	Mauer
H3H 785	621.718 89	621.730 29	2739	+11.40	-11.67	- 0.3	"

Tabelle 2.6-9: Analyse der Nivellements: Nord-Süd-Profil Feithieren - Susten:  
Höhenänderung (1985-86) von 8.SUST



Die Höhenlage der beiden Talpunkte sollte weiterhin überprüft werden. Dies kann durch wiederholte Messung der Nord-Süd-Profile (z.B. alle 10 Jahre) mit relativ geringem Aufwand erreicht werden.

## 2.7 Ergänzungsmessungen

### 2.7.1 Einmessung der Rückversicherungen

Alle Stationspunkte des 3D-Testnetzes besitzen mehrere Rückversicherungen (Kap.1.5.3). Die Bezugsmessungen zwischen den Hauptpunkten und den Rückversicherungsmarken erfolgten während der Höhenwinkelmesskampagne 1985 (Kap.2.2) und der Richtungsmesskampagne 1986 (Kap.2.3). Die Rückversicherungsmessungen wurden mit Hilfe des Programms LTOP ausgeglichen und dokumentiert. Durch Wiederholung dieser Messungen lassen sich lokale Eigenbewegungen der Versicherungsmarken aufdecken. Bei allfälligem Verlust von Versicherungsmarken durch Bauarbeiten oder Zerstörung lassen sich die Hauptpunkte mit hoher Genauigkeit ( $\pm 0.1 - 0.3$  mm) in Lage und Höhe rekonstruieren.

### 2.7.2 Anschluss an die offizielle Landesvermessung

Für die Lagerung des 3D-Netzes wurden im Herbst 1985 anlässlich der Höhenwinkelmesskampagne (Kap.2.2) Bezugsmessungen zu Triangulationspunkten 3. und 4. Ordnung ausgeführt. Als Anschlusspunkte der Triangulation 3. und 4. Ordnung wurden die folgenden 10 Fixpunkte verwendet:

Anschlusspunkte der Triangulation 3. und 4. Ordnung					
TP: Name	Ord.	Nummer	HP: Name	Ord.	Nummer
Brunnen	3.	1287.718	Kirche Erschmatt	4.	1287.815
Ergisch	3.	1288.027	Kirche Guttet	4.	1287.712
Jeizinen	3.	1288.010	Kirche Ergisch	4.	1288.029
Oberems	4.	1287.844	Kirche Unterems	4.	1287.835
Turtmann	3.	1288.018	Kirche Turtmann	4.	1288.021

Tabelle 2.7-1: Anschluss an die Landestriangulation

### 2.7.3 Netzerweiterung und GPS-Exzentren

Die Lage zweier Stationspunkte des 3D-Netzes (3JEIZ und 6.AGAR) wurde speziell für die terrestrischen Messungen gewählt. Wegen topographischen Hindernissen (z.B. Bäumen oder Gebäuden) sind sie aber für die Stationierung mit GPS-Empfängern weniger geeignet. Deshalb wurde bei diesen Punkten ein GPS-Stations-Exzentrum (3.GPS und 6.GPS) vorgesehen (Abb.1.5-9 und 1.5-12). Bei den Punkten 2.BRAE und 3.GPS sowie 7.TURT und 8.SUST sollte zusätzlich die gleichzeitige Stationierung mit mehreren GPS-Empfängern ermöglicht werden. Deshalb wurden bei 2.BRAE (Abb.1.5-8) und 3.GPS (Abb.1.5-9) je ein weiteres GPS-Stations-Exzentrum (2.GPS und 3.GPS.E) vorgesehen. Bei den Talpunkten boten sich die Rückversicherungspunkte (7.1, 7.2 und 8.1) als weitere GPS-Exzentren an (Abb.1.5-13 und 1.5-14).

Die Einmessung der exzentrischen GPS-Stationen erfolgte gemeinsam mit den Rückversicherungs-Messungen. Die Berechnung der 3D-Koordinaten erfolgte in einer speziellen Ausgleichung mit RAUMTRI gemeinsam mit den übrigen terrestrischen Messungen (Kap.2.8.5).

Im Herbst 1986 wurde am Emshorn auf ca. 2265 m Höhe ein zusätzlicher GPS-Stationspunkte 9.EMSH installiert (Abb.1.5-15). Die grosse Höhendifferenz von - 1643 m zum Talpunkt 7.TURT sollte speziell für die Untersuchung von troposphärischen Refraktionseinflüssen auf die GPS-Messungen dienen. Eine Integration des Punktes ins terrestrische 3D-Netz durch Präzisionsmessung konnte leider bis heute nicht realisiert werden.

## 2.8 Terrestrische 3D-Ausgleichungen

### 2.8.1 Das Modell der 3D-Ausgleichung mit RAUMTRI

Eine ausführliche Beschreibung des mathematischen Modells der 3D-Ausgleichung mit RAUMTRI findet sich in *Schneider und Wunderlin [1981]*. In diesem Kapitel sind die wichtigsten Grundlagen zusammengefasst. Die Modellerweiterungen für die Gesamtausgleichung von terrestrischen 3D-Netzen mit GPS-Koordinaten als fingierte Beobachtungssätze werden im Band II beschrieben.

#### Funktionales Modell:

Als Bezugssystem der Berechnung wird primär ein geozentrisch kartesisches (linkshändiges) Koordinatensystem  $X, Y, Z$  eingeführt. Es steht in einfachem Zusammenhang mit dem Rotationsellipsoid und dem darauf definierten klassischen Bezugssystem  $(L, B, H)$ . Die  $Z$ -Achse fällt mit der Rotationsachse des Ellipsoids zusammen und die  $X$ - und  $Y$ -Achse liegen in dessen Äquatorebene. Die  $X$ -Achse liegt zudem in der Ebene des Nullmeridians.

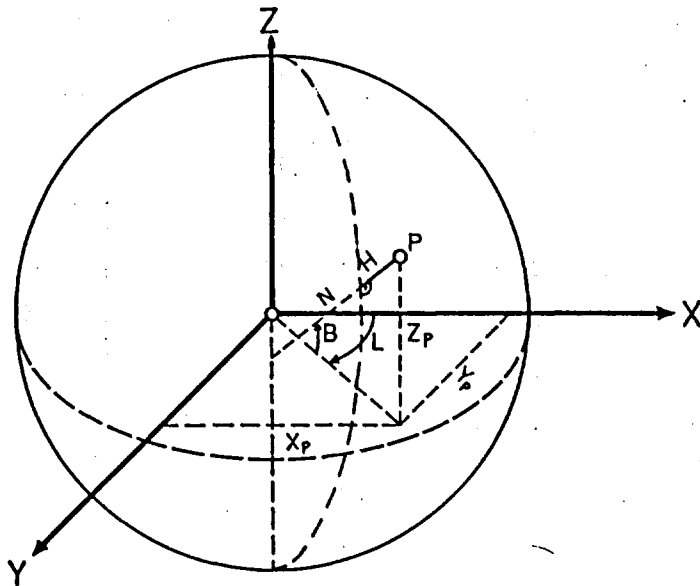


Abbildung 2.8-1: Das geozentrisch kartesische Koordinatensystem und seine Beziehung zum Rotationsellipsoid mit dem klassischen geodätischen Bezugssystem

Die mathematische Beziehung zwischen den geodätischen und den geozentrisch kartesischen Koordinaten ist gegeben durch:

$$[X, Y, Z] = [(N + H) \cos B \cos L, (N + H) \cos B \sin L, (N(1 - e^2) + H) \sin B] \quad (2.8-1)$$

mit  $N$  = Querkrümmungsradius  
 $e$  = 1. Exzentrizität

In jedem Stationspunkt  $P_i$  wird ein lokales kartesisches Koordinatensystem  $(\xi, \eta, \zeta)$  festgelegt. Die  $\zeta$ -Achse dieses Systems fällt mit dem physikalischen Lot im Stationspunkt (realisiert durch die Stehachse des horizontalen Theodolits) zusammen. Die Richtung der  $\xi$ -Achse wird durch den Orientierungswinkel  $\omega_i$  gegenüber geographisch Nord festgelegt (Orientierung des Richtungssatzes in  $P_i$ ).

Als Unbekannte der Ausgleichung werden die Koordinaten  $(X_i, Y_i, Z_i)$  jedes Netzpunktes  $P_i$  betrachtet. Zusätzlich werden die drei Raumwinkel  $\omega_i$  (Orientierungsunbekannte),  $\varphi_i$  (astronomische Breite) und  $\lambda_i$  (astronomische Länge) als unbekannte Parameter eingeführt. Pro Netzpunkt sind somit also 6 Unbekannte zu bestimmen.

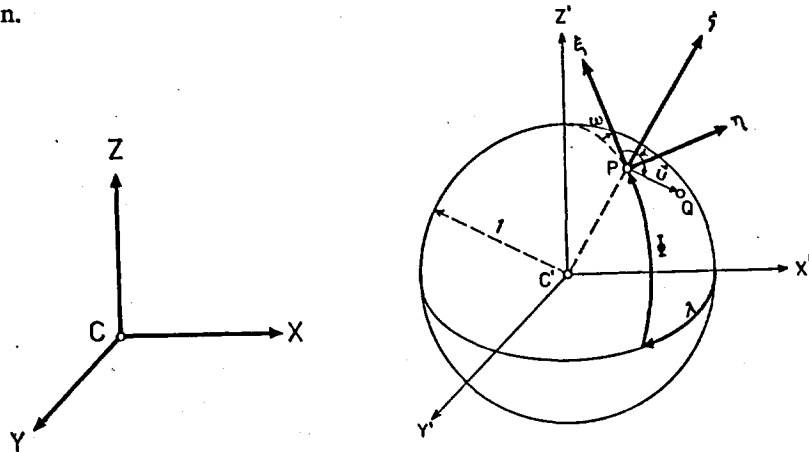


Abbildung 2.8-2: Richtungskugel durch P: Transformation vom geozentrischen ins lokale kartesische Koordinatensystem

Die zwei Punkte P (Stationspunkt) und Q (Zielpunkt) einer Visurlinie definieren den freien Vektor  $U$  im zentralen bzw.  $u$  im lokalen kartesischen System. Zu jeder Visur sind folgende Messgrößen der Beobachtung zugänglich:

terrestrische Beobachtungen (P -> Q):

$z'$  : beobachtete Zenitdistanz  
 $\alpha'$  : beobachtete Richtung  
 $r'$  : beobachtete Distanz

astronomische Beobachtungen (auf P):

$\lambda'$  : beobachtete astronomische Länge  
 $\varphi'$  : beobachtete astronomische Breite  
 $a'$  : beobachtetes astronomisches Azimut

Die geodätischen Beobachtungen  $z'$ ,  $\alpha'$ ,  $r'$  lassen sich im lokalen kartesischen System  $(\xi, \eta, \zeta)$  als Beobachtungsvektor  $u'$  der Visur PQ darstellen.

$$u' = \begin{bmatrix} r' \sin z' \cos \alpha' \\ r' \sin z' \sin \alpha' \\ r' \cos z' \end{bmatrix} \quad (2.8-2)$$

Die räumliche Transformation des freien Vektors  $U$  vom geozentrischen ins lokale System führt direkt zur Beobachtungsgleichung für den ausgeglichenen Beobachtungsvektor:

$$u(\bar{z}, \bar{\alpha}, \bar{r}) = A(\omega_p, \varphi_p, \lambda_p) U(X_p, Y_p, Z_p, X_q, Y_q, Z_q) \quad (2.8-3)$$

oder symbolisch

$$L = F(x).$$

Die Rotationsmatrix  $A$  erhält man aus drei elementaren Rotationen

$$A = R_3(\omega) R_2(\varphi - \pi/2) R_3(\lambda + \pi) \quad (2.8-4)$$

Die Linearisierung der Beobachtungsgleichung in den Stützwerten  $X_p^0, Y_p^0, Z_p^0, X_0^0, Y_0^0, Z_0^0$  (geozentrische Näherungskoodinaten) und  $\omega_p^0 = 0, \varphi_p^0 = B, \lambda_p^0 = L$  führt zu den vektoriellen Verbesserungsgleichungen im  $(\xi, \eta, \zeta)$ -System:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}_0 \delta \mathbf{U} + \mathbf{F} \mathbf{U}_0 \delta \omega + \mathbf{G} \mathbf{U}_0 \delta \varphi + \mathbf{H} \mathbf{U}_0 \delta \lambda - (\mathbf{u}' - \mathbf{A}_0 \mathbf{U}_0) \quad (2.8-5)$$

oder symbolisch

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l}$$

Zur vektoriellen Beschreibung der Verbesserungen an den geodätischen Beobachtungen wird zusätzlich pro Visur  $\mathbf{u}$  ein weiteres kartesisches Hilfssystem (1, 2, 3) eingesetzt. Die 3-Achse fällt mit dem Visurstrahl  $\mathbf{u}$  zusammen, während die 1-Achse in der durch  $\mathbf{u}$  und die  $\zeta$ -Achse aufgespannten Ebene liegt.

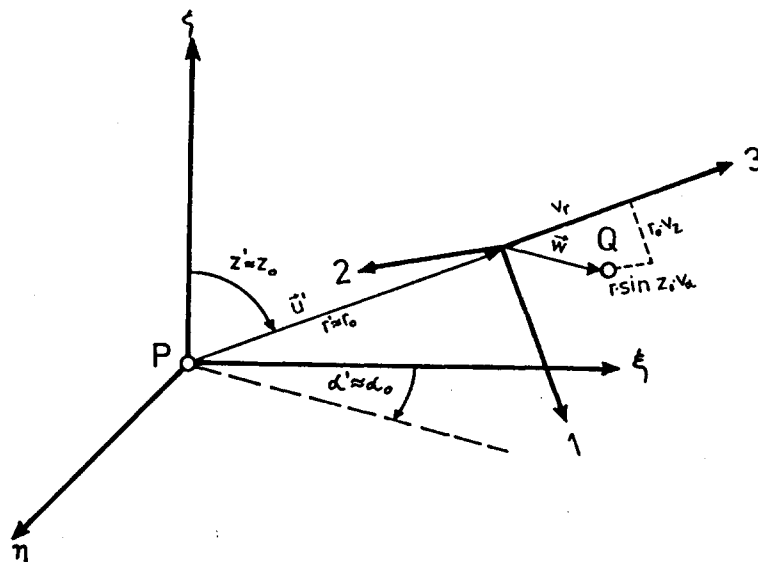


Abbildung 2.8-3: Vektorielle Beschreibung der Verbesserungen im kartesischen Hilfssystem (1,2,3)

Durch Multiplikation von Gleichung (2.8-5) mit der Rotationsmatrix

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_2(z_0) \mathbf{R}_3(\alpha_0) \quad (2.8-6)$$

erhält man die Gleichung der vektoriellen Verbesserung im (1,2,3)-System:

$$\mathbf{w} = \mathbf{R} \mathbf{A}_0 \delta \mathbf{U} + \mathbf{R} \mathbf{F} \mathbf{U}_0 \delta \omega + \mathbf{R} \mathbf{G} \mathbf{U}_0 \delta \varphi + \mathbf{R} \mathbf{H} \mathbf{U}_0 \delta \lambda - \mathbf{R} (\mathbf{u}' - \mathbf{A}_0 \mathbf{U}_0) \quad (2.8-7)$$

wobei

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} r_0 & v_z \\ r_0 \sin z_0 & v_a \\ v_r \end{bmatrix} \quad (2.8-8)$$

und durch eine weitere Multiplikation mit der Matrix

$$C = \begin{bmatrix} 1/r_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/r_0 \sin z_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8-9)$$

schliesslich die zur vermittelnden Ausgleichung notwendige vektorielle Verbesserungsgleichung für die terrestrischen Beobachtungen:

$$C w = \begin{bmatrix} v_z \\ v_a \\ v_r \end{bmatrix} = C R A_0 \delta U + C R F U_0 \delta \omega + C R G U_0 \delta \phi + C R H U_0 \delta \lambda - C R (u' - A U_0) \quad (2.8-10)$$

Die astronomischen Beobachtungen  $\phi'$  und  $\lambda'$  stellen direkte Beobachtungen der unbekannt Parameter dar. Ihre Verbesserungsgleichungen lauten:

$$\begin{aligned} v_\phi &= \delta \phi - (\phi' - \phi_0) \\ v_\lambda &= \delta \lambda - (\lambda' - \lambda_0) \end{aligned} \quad (2.8-11)$$

Die Verbesserungsgleichung für die astronomische Azimutbeobachtung  $a'$  erhält man als Spezialfall der Richtungsverbesserungsgleichung (2. Komponente in 2.8-10):

$$v_a = (C R A_0 \delta U)_2 + (C R G U_0 \delta \omega)_2 + (C R H U_0 \delta \phi)_2 - [a' - (\alpha_0 + \omega_0)] \quad (2.8-12)$$

#### Stochastisches Modell:

Für alle geodätischen Beobachtungen sind a priori Varianzen einzuführen. Beim Programm RAUMTRI ist die Einführung von korrelierten terrestrischen Beobachtungen nicht vorgesehen. Die a priori Varianz-Kovarianzmatrix hat daher Diagonalstruktur.

## 2.8.2 Geodätisches Datum und Lagerung des Netzes

Zur Definition des Bezugssystems für die Berechnung des 3D-Netzes wird das **Geodätische Datum der Schweizerischen Landesvermessung "CH-1903"** mit dem Bessel-Ellipsoid von 1841 verwendet. Damit ist es möglich, das Schweizer Geoidmodell [Gurtner, 1978] für die Umrechnung zwischen ellipsoidischen und orthometrischen Höhen zu verwenden. Auch die Transformation der kartesisch-geozentrischen Koordinaten [X,Y,Z] in geodätische [L,B,H(ell)] und in schweizerische Landeskoordinaten [YP,XP,H(ortho)] im System der konformen, schiefachsigen Zylinderprojektion ist mit den üblichen Formeln berechenbar (Standardprozedur im Programm RAUMTRI).

Im Rahmen der GPS-Testmessungen soll u.A. auch der Netzmassstab und die Netzorientierung überprüft werden können. Deshalb sollen die Vergleichskordinaten des terrestrischen Netzes ("ground truth") keinen Orientierungsfehler beinhalten und bezüglich dem Netzmassstab möglichst genau mit der Meterdefinition übereinstimmen. Da unsere bestehende Landesvermessung örtlich variierende Massstabs- und Orientierungsfehler enthält, kommt nur eine minimale Lagerung (in einem Punkt) ins Netz der Landesvermessung in Frage (Tab.2.8-1). Die Orientierung des Netzes ist damit im wesentlichen nur durch die astronomischen Beobachtungen und der Netzmassstab allein durch die EDM-Strecken gegeben.

Die Koordinaten des Festpunktes 7.TURT entstanden durch den Anschluss an die Landestriangulation (Kap.2.7.2).

Lagerung des 3D-Netzes im schweizerischen Bezugssystem	
<b>Festpunkt:</b>	7.TURT : X = 4 373 700.0721 m Y = 591 465.9898 m Z = 4 588 963.1846 m
<b>3D-Orientierung:</b>	a) durch Astro-Beobachtungen: - Astro-Längen - Astro-Breiten - Astro-Azimute b) durch die ellipsoidische Höhendifferenz 7.TURT - 8.SUST
<b>Netzmasstab:</b>	Durch beobachtete EDM-Strecken

Tabelle 2.8-1: Lagerung des 3D-Netzes

### 2.8.3 3D-Ausgleichung des Hauptnetzes

Als definitives Ergebnis der 3D-Ausgleichung des terrestrischen Netzes sind die Resultate der Ausgleichung Nr.19A im vorliegenden Abschnitt vollständig (numerisch und graphisch) dokumentiert (Tab. 2.8-4 und Abb.2.8-4 und 2.8-5). Das mit dieser Ausgleichung berechnete terrestrische Hauptnetz enthält nur die 8 terrestrischen Hauptpunkte und keine Exzentren. Die wichtigsten Resultate des erweiterten Netzes mit 7 zusätzlichen, exzentrischen GPS-Stationspunkten, welche als Vergleich zu GPS-Lösungen dienen sollen ("ground truth"), sind in Kap.2.8.5 dargestellt.

Beobachtungsgruppen und mittlere Fehler a priori in Ausgleichung Nr.19A		
Beobachtung: Nummern	Gruppe	stochastisches Modell: mittl.Fehler a priori
1 - 23	Terrameter-Strecken	$\sigma_D^2 = (0.3\text{mm})^2 + (3 \cdot 10^{-7} D)^2$
24 - 79	Mekometer-Strecken: Kat.1: (gute Flugmeteodaten, n=35) Kat.2: (mittler " " , n= 7) Kat.3: (schlechte " " , n= 7) Kat.4: (Boden-Meteodaten , n= 7)	$\sigma_{D_1}^2 = (0.3\text{mm})^2 + (1.5 \cdot 10^{-7} D)^2$ $\sigma_{D_2}^2 = (0.3\text{mm})^2 + (3 \cdot 10^{-7} D)^2$ $\sigma_{D_3}^2 = (0.3\text{mm})^2 + (5 \cdot 10^{-7} D)^2$ $\sigma_{D_4}^2 = (0.3\text{mm})^2 + (5 \cdot 10^{-7} D)^2$
80 - 135	Richtungen (KERN E2 / WILD T2000S)	$\sigma_R = 2.2 \text{ cc}$
136 - 191	Höhenwinkel (* , KERN E2)	$\sigma_{HW} = 3.0 \text{ cc}$
192 - 207	Astro-Längen/-Breiten (aus Geoidmodell)	$\sigma_\lambda = 4.0 \text{ cc}$ $\sigma_\phi = 3.0 \text{ cc}$
208 - 223	Astro-Längen/-Breiten (Zenitkamera)	$\sigma_\lambda = 2.2 \text{ cc}$ , $\sigma_\phi = 1.5 \text{ cc}$
224 - 238	Astro-Azimute (KERN E2)	$\sigma_A = 4.0 \text{ cc}$ (n > 5) $\sigma_A = 5.0 \text{ cc}$ (n ≤ 5)
239	ellipsoidische Höhendifferenz (aus Nivellement + Schwere + Geoid)	$\sigma_{DH} = 12 \text{ mm}$

\*) vom Refraktionseinfluss "befreite" Beobachtungen

Tabelle 2.8-2: Beobachtungsgruppen in Ausgleichung Nr.19A

Zwischen den beiden Distanz-Untergruppen (Mekometer ME-5000 und Terrameter) wurde kein signifikanter Massstabsunterschied festgestellt. Beide Untergruppen wurden deshalb ohne Massstabsunbekannte in die Ausgleichung eingeführt.

Die in Kapitel 4.1 als Resultat der astrogeodätischen Geoidbestimmung (Progr. LAG) präziierten Lotabweichungen (Tab. 4.1-6) wurden als fingierte Astro-Beobachtungen (Nr.192 - 207) eingeführt.

Eliminierte Beobachtungen in Ausgleichung Nr.19A		
Beobachtung: Nummern	Gruppe	Bemerkungen:
90	Richtungen	E2-Richtung eliminiert (grober Fehler, Zentrierung?)
91	"	T2000S-Richt. " " " "
92	"	Turbulenz (bodennah): $\sigma_R = 5.0$ cc
210-211	Astro-L/B	Ausreisser eliminiert (Grund ?)
141,143, 144,148, 151,155, 162,169, 177	Höhenwinkel	Bodennahe Visuren, welche infolge von Refraktions- einflüssen systematisch verfälscht sind. Einführung eines unbekanntenen Refraktionsparameters.

**Tabelle 2.8-3:** Eliminierte und besonders behandelte Beobachtungen in Ausgleichung 19A

Wie die Tabelle 2.8-3 zeigt, mussten nur wenige Beobachtungen als Ausreisser eliminiert werden.

**Tabelle 2.8-4:** Resultate der 3D-Ausgleichung (RAUMTRI-Ausgabefile)  
(Siehe folgende Seiten)

-----  
 BA FUER LANDESTOPOGRAPHIE TITEL: 3D-NETZ TURTMANN: TERRESTR. NETZ 1985-86 WABERN, 22.11.90 10:43  
 PROGRAMM RAUMTRI VERSION: 12.10.89  
 -----

MESSFILE: M\_RAUMTRI.19A.ORTH  
 KOORD.FILE:K\_RAUMTRI.6

MITTL.FEHLER DER GEWICHTSEINHEIT: 1.0000  
 MITTL.REFRAKTIONSKOEFFIZIENT: 0.0000  
 GEOAETISCHES DATUM: CH-1903

FUNDAMENTALPUNKT:                    ELLIPSOID:  
                   LO                    BO                    A                    EXQU  
 7 26 22.50           46 57 8.66           6377397.155 0.006674372231

PROJEKTIONSKOORDINATEN (ERSTER PUNKT UND FX= FESTPUNKTE, ST=STATIONSPUNKTE, ZI=ZIELPUNKTE)  
 \*\*\*\*\*

NR	TYP	PUNKT	YP [m]	XP [m]	H(ORTHO) [m]	DGEOID [m]	ETA [cc]	XI [cc]
1	ST	7.TURT	20176.7100	-71575.5720	622.4474	1.3098	-17.4	1.6
2	ST	1.BRUN	17522.6093	-70893.7211	1008.8876	1.2478	-23.6	-26.2
3	ST	2.BRAE	19560.4674	-69405.8940	1506.8276	1.3621	-24.8	-54.0
4	ST	3.JEIZ	21848.7673	-69471.5803	1498.7611	1.4044	-8.6	-53.5
5	ST	4.ERGI	21561.0126	-72934.3928	1131.8407	1.3928	-29.7	56.1
6	ST	5.OEMS	19334.3383	-74208.6378	1385.6658	1.4129	-13.9	74.0
7	ST	6.AGAR	16102.5491	-74137.1272	1475.3806	1.3215	-15.0	79.7
8	ST	8.SUST	16048.6855	-72041.9809	677.1122	1.2019	-19.1	19.4

GEOZENTRISCHE KOORDINATEN  
 \*\*\*\*\*

NR	PUNKT	GL [g]	GB [g]	H(ell)[m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	7.TURT	8.557249986	51.453520036	623.7572	4373700.0721	591465.9898	4588963.1846
2	1.BRUN	8.518993719	51.460418828	1010.1354	4373824.6037	588806.6270	4589719.3096
3	2.BRAE	8.548462246	51.475229006	1508.1897	4372830.4541	590733.7473	4591102.8446
4	3.JEIZ	8.581478828	51.474493933	1500.1655	4372570.7210	593007.9238	4591046.2536
5	4.ERGI	8.577148232	51.439889086	1133.2335	4374840.7812	593012.7206	4588389.4127
6	5.OEMS	8.544977422	51.427226737	1387.0787	4376221.2419	590947.8931	4587697.4918
7	6.AGAR	8.498382598	51.428036326	1476.7021	4376655.9499	587745.1871	4587818.2481
8	8.SUST	8.497686234	51.448981447	678.3141	4374614.2728	587422.2939	4588688.9760

MESSUNGEN  
 \*\*\*\*\*

NR	TYP	STATION	ZIEL	BEOB. [g/m]	M.F. [cc/mm]	IH [m]	SH [m]	ZENTRIERT [g/m]
1	DS	2.BRAE	1.BRUN	2572.24886	0.8	1.8369	1.6471	2572.21214
2	DS	2.BRAE	5.OEMS	4810.37795	1.5	1.8369	1.5049	4810.36971
3	DS	3.JEIZ	2.BRAE	2289.65543	0.8	1.7863	1.8199	2289.65531
4	DS	3.JEIZ	4.ERGI	3494.52012	1.1	1.7863	2.1601	3494.55925
5	DS	4.ERGI	1.BRUN	4526.86512	1.4	2.1771	1.6471	4526.85086
6	DS	4.ERGI	2.BRAE	4074.00659	1.3	2.1771	1.8199	4074.03956
7	DS	4.ERGI	3.JEIZ	3494.52137	1.1	2.1771	1.7693	3494.56428
8	DS	4.ERGI	5.OEMS	2578.29072	0.8	2.1771	1.5049	2578.35695
9	DS	4.ERGI	6.AGAR	5600.66388	1.7	2.1771	1.5620	5600.70184
10	DS	4.ERGI	7.TURT	2005.82841	0.7	2.1771	1.5726	2005.67486
11	DS	6.AGAR	1.BRUN	3571.70204	1.1	1.5790	1.6471	3571.71092
12	DS	6.AGAR	2.BRAE	5861.26145	1.8	1.5790	1.8199	5861.26004
13	DS	6.AGAR	3.JEIZ	7403.06489	2.2	1.5790	1.7693	7403.06417
14	DS	6.AGAR	5.OEMS	3234.32492	1.0	1.5790	1.5049	3234.32288
15	DS	6.AGAR	7.TURT	4887.98014	1.5	1.5790	1.5726	4887.97903
16	DS	7.TURT	1.BRUN	2767.57468	0.9	1.5896	1.6471	2767.56664
17	DS	7.TURT	4.ERGI	2005.82038	0.7	1.5896	2.1601	2005.67530
18	DS	8.SUST	1.BRUN	1897.87791	0.6	1.0156	1.6471	1897.76730
19	DS	8.SUST	2.BRAE	4469.42480	1.4	1.0156	1.8199	4469.27511
20	DS	8.SUST	3.JEIZ	6397.91377	1.9	1.0156	1.7693	6397.81654



NR	TYP	STATION	ZIEL	BEOB. [g/m]	M.F. [cc/mm]	IH [m]	SH [m]	ZENTRIERT [g/m]
21	DS	8.SUST	4.ERGI	5603.11949	1.7	1.0156	2.1601	5603.02595
22	DS	8.SUST	5.OEMS	3999.49977	1.2	1.0156	1.5049	3999.41288
23	DS	8.SUST	7.TURT	4154.80558	1.3	1.0156	1.5726	4154.81268
24	DS	1.BRUN	2.BRAE	2572.24770	1.3	1.2649	1.4378	2572.21418
25	DS	1.BRUN	3.JEIZ	4580.82170	1.4	1.2649	1.3888	4580.80840
26	DS	1.BRUN	4.ERGI	4526.86200	2.3	1.2649	1.7779	4526.84784
27	DS	1.BRUN	5.OEMS	3796.90500	0.6	1.2649	1.1239	3796.91904
28	DS	1.BRUN	6.AGAR	3571.69840	0.6	1.2649	1.1825	3571.70919
29	DS	1.BRUN	7.TURT	2767.57650	0.9	1.2649	1.1909	2767.56618
30	DS	1.BRUN	8.SUST	1897.88270	1.0	1.2649	0.6176	1897.76951
31	DS	2.BRAE	1.BRUN	2572.24660	0.5	1.4378	1.2649	2572.21315
32	DS	2.BRAE	3.JEIZ	2289.65720	1.2	1.4378	1.3888	2289.65704
33	DS	2.BRAE	4.ERGI	4074.00690	0.7	1.4378	1.7779	4074.03808
34	DS	2.BRAE	5.OEMS	4810.38010	0.8	1.4378	1.1239	4810.37231
35	DS	2.BRAE	6.AGAR	5861.25680	0.9	1.4378	1.1825	5861.25554
36	DS	2.BRAE	7.TURT	2423.00840	0.5	1.4378	1.1909	2422.91830
37	DS	2.BRAE	8.SUST	4469.42660	0.7	1.4378	0.6176	4469.27451
38	DS	3.JEIZ	1.BRUN	4580.82480	0.8	1.3888	1.2649	4580.81159
39	DS	3.JEIZ	2.BRAE	2289.65740	1.2	1.3888	1.4378	2289.65722
40	DS	3.JEIZ	4.ERGI	3494.52130	0.6	1.3888	1.7779	3494.56203
41	DS	3.JEIZ	5.OEMS	5365.09250	0.9	1.3888	1.1239	5365.08702
42	DS	3.JEIZ	6.AGAR	7403.06020	1.2	1.3888	1.1825	7403.05966
43	DS	3.JEIZ	7.TURT	2827.09480	1.4	1.3888	1.1909	2827.03348
44	DS	3.JEIZ	8.SUST	6397.91230	1.9	1.3888	0.6176	6397.81357
45	DS	4.ERGI	1.BRUN	4526.86340	0.7	1.7779	1.2649	4526.84960
46	DS	4.ERGI	2.BRAE	4074.00610	0.7	1.7779	1.4378	4074.03749
47	DS	4.ERGI	3.JEIZ	3494.51980	0.6	1.7779	1.3888	3494.56074
48	DS	4.ERGI	5.OEMS	2578.29250	0.5	1.7779	1.1239	2578.35694
49	DS	4.ERGI	6.AGAR	5600.66340	0.9	1.7779	1.1825	5600.70014
50	DS	4.ERGI	7.TURT	2005.82390	0.4	1.7779	1.1909	2005.67480
51	DS	4.ERGI	8.SUST	5603.11720	0.9	1.7779	0.6176	5603.02338
52	DS	5.OEMS	1.BRUN	3796.90680	0.6	1.1239	1.2649	3796.92075
53	DS	5.OEMS	2.BRAE	4810.38050	0.8	1.1239	1.4378	4810.37247
54	DS	5.OEMS	3.JEIZ	5365.09200	0.9	1.1239	1.3888	5365.08630
55	DS	5.OEMS	4.ERGI	2578.29370	0.5	1.1239	1.7779	2578.35787
56	DS	5.OEMS	6.AGAR	3234.32480	0.6	1.1239	1.1825	3234.32316
57	DS	5.OEMS	7.TURT	2868.19610	0.5	1.1239	1.1909	2868.21392
58	DS	5.OEMS	8.SUST	3999.50170	0.7	1.1239	0.6176	3999.41210
59	DS	6.AGAR	1.BRUN	3571.69930	0.6	1.1825	1.2649	3571.71004
60	DS	6.AGAR	2.BRAE	5861.25630	0.9	1.1825	1.4378	5861.25481
61	DS	6.AGAR	3.JEIZ	7403.05780	1.2	1.1825	1.3888	7403.05702
62	DS	6.AGAR	4.ERGI	5600.66530	0.9	1.1825	1.7779	5600.70152
63	DS	6.AGAR	5.OEMS	3234.32540	0.6	1.1825	1.1239	3234.32379
64	DS	6.AGAR	7.TURT	4887.97550	0.8	1.1825	1.1909	4887.97696
65	DS	6.AGAR	8.SUST	2243.15800	0.7	1.1825	0.6176	2242.95695
66	DS	7.TURT	1.BRUN	2767.57740	0.9	1.1909	1.2649	2767.56705
67	DS	7.TURT	2.BRAE	2423.00860	0.5	1.1909	1.4378	2422.91842
68	DS	7.TURT	3.JEIZ	2827.09310	0.9	1.1909	1.3888	2827.03170
69	DS	7.TURT	4.ERGI	2005.82490	0.7	1.1909	1.7779	2005.67563
70	DS	7.TURT	5.OEMS	2868.19600	0.5	1.1909	1.1239	2868.21384
71	DS	7.TURT	6.AGAR	4887.97740	0.8	1.1909	1.1825	4887.97887
72	DS	7.TURT	8.SUST	4154.80780	2.1	1.1909	0.6176	4154.81547
73	DS	8.SUST	1.BRUN	1897.87907	1.0	0.6176	1.2649	1897.76569
74	DS	8.SUST	2.BRAE	4469.42742	2.3	0.6176	1.4378	4469.27477
75	DS	8.SUST	3.JEIZ	6397.91394	3.2	0.6176	1.3888	6397.81445
76	DS	8.SUST	4.ERGI	5603.11577	2.8	0.6176	1.7779	5603.02094
77	DS	8.SUST	5.OEMS	3999.50071	2.0	0.6176	1.1239	3999.41080
78	DS	8.SUST	6.AGAR	2243.15823	1.2	0.6176	1.1825	2242.95700
79	DS	8.SUST	7.TURT	4154.80231	2.1	0.6176	1.1909	4154.80961
80	RI	1.BRUN	4.ERGI	399.99990	2.2			
81	RI	1.BRUN	5.OEMS	38.37034	2.2			
82	RI	1.BRUN	6.AGAR	96.48505	2.2			
83	RI	1.BRUN	8.SUST	128.07939	2.2			
84	RI	1.BRUN	2.BRAE	330.06524	2.2			
85	RI	1.BRUN	3.JEIZ	349.99403	2.2			
86	RI	1.BRUN	7.TURT	386.22268	2.2			
87	RI	2.BRAE	6.AGAR	399.99994	2.2			
88	RI	2.BRAE	8.SUST	18.82680	2.2			

NR	TYP	STATION	ZIEL	BEOB. [g/m]	M.F. [cc/mm]	IH [m]	SH [m]	ZENTRIERT [g/m]
89	RI	2.BRAE	1.BRUN	19.67172	2.2			
90	RI	2.BRAE	3.JEIZ	261.64724	3.4			
91	RI	2.BRAE	4.ERGI	326.98547	3.3			
92	RI	2.BRAE	7.TURT	342.20439	2.9			
93	RI	2.BRAE	5.OEMS	362.81572	2.2			
94	RI	3.JEIZ	4.ERGI	399.99977	2.2			
95	RI	3.JEIZ	5.OEMS	25.78713	2.2			
96	RI	3.JEIZ	7.TURT	37.46944	2.2			
97	RI	3.JEIZ	6.AGAR	51.30497	2.2			
98	RI	3.JEIZ	8.SUST	68.16419	2.2			
99	RI	3.JEIZ	1.BRUN	74.50168	2.2			
100	RI	3.JEIZ	2.BRAE	96.54851	2.2			
101	RI	4.ERGI	1.BRUN	399.99998	2.2			
102	RI	4.ERGI	7.TURT	19.62191	2.2			
103	RI	4.ERGI	2.BRAE	37.37797	2.2			
104	RI	4.ERGI	3.JEIZ	75.49140	2.2			
105	RI	4.ERGI	5.OEMS	337.12230	2.2			
106	RI	4.ERGI	6.AGAR	356.40522	2.2			
107	RI	4.ERGI	8.SUST	380.43072	2.2			
108	RI	5.OEMS	4.ERGI	399.99996	2.2			
109	RI	5.OEMS	6.AGAR	234.49881	2.2			
110	RI	5.OEMS	8.SUST	270.20456	2.2			
111	RI	5.OEMS	1.BRUN	301.24854	2.2			
112	RI	5.OEMS	2.BRAE	336.08599	2.2			
113	RI	5.OEMS	7.TURT	352.80132	2.2			
114	RI	5.OEMS	3.JEIZ	364.15686	2.2			
115	RI	6.AGAR	1.BRUN	0.00000	2.2			
116	RI	6.AGAR	2.BRAE	13.90850	2.2			
117	RI	6.AGAR	3.JEIZ	30.31275	2.2			
118	RI	6.AGAR	7.TURT	37.99526	2.2			
119	RI	6.AGAR	4.ERGI	59.92169	2.2			
120	RI	6.AGAR	5.OEMS	75.13724	2.2			
121	RI	6.AGAR	8.SUST	372.09092	2.2			
122	RI	7.TURT	1.BRUN	-0.00006	2.2			
123	RI	7.TURT	2.BRAE	66.37436	2.2			
124	RI	7.TURT	3.JEIZ	126.74106	2.2			
125	RI	7.TURT	4.ERGI	233.39983	2.2			
126	RI	7.TURT	5.OEMS	303.70268	2.2			
127	RI	7.TURT	6.AGAR	348.25902	2.2			
128	RI	7.TURT	8.SUST	376.82872	2.2			
129	RI	8.SUST	1.BRUN	399.99996	2.2			
130	RI	8.SUST	2.BRAE	1.14102	2.2			
131	RI	8.SUST	3.JEIZ	15.57655	2.2			
132	RI	8.SUST	7.TURT	34.97062	2.2			
133	RI	8.SUST	4.ERGI	52.35099	2.2			
134	RI	8.SUST	5.OEMS	79.24644	2.2			
135	RI	8.SUST	6.AGAR	140.49539	2.2			
136	HW	1.BRUN	2.BRAE	12.38943	3.0	0.0000	0.0000	12.38943
137	HW	1.BRUN	3.JEIZ	6.79746	3.0	0.0000	0.0000	6.79746
138	HW	1.BRUN	4.ERGI	1.70810	3.0	0.0000	0.0000	1.70810
139	HW	1.BRUN	5.OEMS	6.31275	3.0	0.0000	0.0000	6.31275
140	HW	1.BRUN	6.AGAR	8.32516	3.0	0.0000	0.0000	8.32516
141	HW	1.BRUN	7.TURT	-8.93229	3.0	0.0000	0.0000	-8.93229(1)
142	HW	1.BRUN	8.SUST	-11.19460	3.0	0.0000	0.0000	-11.19460
143	HW	2.BRAE	1.BRUN	-12.41294	3.0	0.0000	0.0000	-12.41294(1)
144	HW	2.BRAE	3.JEIZ	-0.23744	3.0	0.0000	0.0000	-0.23744(1)
145	HW	2.BRAE	4.ERGI	-5.88405	3.0	0.0000	0.0000	-5.88405
146	HW	2.BRAE	5.OEMS	-1.62149	3.0	0.0000	0.0000	-1.62149
147	HW	2.BRAE	6.AGAR	-0.36536	3.0	0.0000	0.0000	-0.36536
148	HW	2.BRAE	7.TURT	-23.79473	3.0	0.0000	0.0000	-23.79473(1)
149	HW	2.BRAE	8.SUST	-11.90659	3.0	0.0000	0.0000	-11.90659
150	HW	3.JEIZ	1.BRUN	-6.84395	3.0	0.0000	0.0000	-6.84395
151	HW	3.JEIZ	2.BRAE	0.21149	3.0	0.0000	0.0000	0.21149(1)
152	HW	3.JEIZ	4.ERGI	-6.70879	3.0	0.0000	0.0000	-6.70879
153	HW	3.JEIZ	5.OEMS	-1.36412	3.0	0.0000	0.0000	-1.36412
154	HW	3.JEIZ	6.AGAR	-0.23497	3.0	0.0000	0.0000	-0.23497
155	HW	3.JEIZ	7.TURT	-20.07625	3.0	0.0000	0.0000	-20.07625(1)
156	HW	3.JEIZ	8.SUST	-8.22963	3.0	0.0000	0.0000	-8.22963

NR	TYP	STATION	ZIEL	BEOB. [g/m]	M.F. [cc/mm]	IH [m]	SH [m]	ZENTRIERT [g/m]
157	HW	4.ERGI	1.BRUN	-1.74889	3.0	0.0000	0.0000	-1.74889
158	HW	4.ERGI	2.BRAE	5.85335	3.0	0.0000	0.0000	5.85335
159	HW	4.ERGI	3.JEIZ	6.68455	3.0	0.0000	0.0000	6.68455
160	HW	4.ERGI	5.OEMS	6.26464	3.0	0.0000	0.0000	6.26464
161	HW	4.ERGI	6.AGAR	3.88015	3.0	0.0000	0.0000	3.88015
162	HW	4.ERGI	7.TURT	-16.35466	3.0	0.0000	0.0000	-16.35466(1)
163	HW	4.ERGI	8.SUST	-5.19903	3.0	0.0000	0.0000	-5.19903
164	HW	5.OEMS	1.BRUN	-6.34208	3.0	0.0000	0.0000	-6.34208
165	HW	5.OEMS	2.BRAE	1.58619	3.0	0.0000	0.0000	1.58619
166	HW	5.OEMS	3.JEIZ	1.32111	3.0	0.0000	0.0000	1.32111
167	HW	5.OEMS	4.ERGI	-6.28860	3.0	0.0000	0.0000	-6.28860
168	HW	5.OEMS	6.AGAR	1.74980	3.0	0.0000	0.0000	1.74980
169	HW	5.OEMS	7.TURT	-17.15633	3.0	0.0000	0.0000	-17.15633(1)
170	HW	5.OEMS	8.SUST	-11.35597	3.0	0.0000	0.0000	-11.35597
171	HW	6.AGAR	1.BRUN	-8.35035	3.0	0.0000	0.0000	-8.35035
172	HW	6.AGAR	2.BRAE	0.31864	3.0	0.0000	0.0000	0.31864
173	HW	6.AGAR	3.JEIZ	0.16920	3.0	0.0000	0.0000	0.16920
174	HW	6.AGAR	4.ERGI	-3.93364	3.0	0.0000	0.0000	-3.93364
175	HW	6.AGAR	5.OEMS	-1.78176	3.0	0.0000	0.0000	-1.78176
176	HW	6.AGAR	7.TURT	-11.18678	3.0	0.0000	0.0000	-11.18678
177	HW	6.AGAR	8.SUST	-23.17140	3.0	0.0000	0.0000	-23.17140(1)
178	HW	7.TURT	1.BRUN	8.90530	3.0	0.0000	0.0000	8.90530
179	HW	7.TURT	2.BRAE	23.77701	3.0	0.0000	0.0000	23.77701
180	HW	7.TURT	3.JEIZ	20.05205	3.0	0.0000	0.0000	20.05205
181	HW	7.TURT	4.ERGI	16.33853	3.0	0.0000	0.0000	16.33853
182	HW	7.TURT	5.OEMS	17.13571	3.0	0.0000	0.0000	17.13571
183	HW	7.TURT	6.AGAR	11.14401	3.0	0.0000	0.0000	11.14401
184	HW	7.TURT	8.SUST	0.81725	3.0	0.0000	0.0000	0.81725
185	HW	8.SUST	1.BRUN	11.17940	3.0	0.0000	0.0000	11.17940
186	HW	8.SUST	2.BRAE	11.86792	3.0	0.0000	0.0000	11.86792
187	HW	8.SUST	3.JEIZ	8.16836	3.0	0.0000	0.0000	8.16836
188	HW	8.SUST	4.ERGI	5.14481	3.0	0.0000	0.0000	5.14481
189	HW	8.SUST	5.OEMS	11.31966	3.0	0.0000	0.0000	11.31966
190	HW	8.SUST	6.AGAR	23.15603	3.0	0.0000	0.0000	23.15603
191	HW	8.SUST	7.TURT	-0.85782	3.0	0.0000	0.0000	-0.85782
192	AL	7.TURT		8.55475	4.0			
193	AB	7.TURT		51.45363	3.0			
194	AL	1.BRUN		8.51574	4.0			
195	AB	1.BRUN		51.45769	3.0			
196	AL	2.BRAE		8.54517	4.0			
197	AB	2.BRAE		51.46974	3.0			
198	AL	3.JEIZ		8.58013	4.0			
199	AB	3.JEIZ		51.46909	3.0			
200	AL	4.ERGI		8.57281	4.0			
201	AB	4.ERGI		51.44540	3.0			
202	AL	5.OEMS		8.54285	4.0			
203	AB	5.OEMS		51.43471	3.0			
204	AL	6.AGAR		8.49666	4.0			
205	AB	6.AGAR		51.43609	3.0			
206	AL	8.SUST		8.49497	4.0			
207	AB	8.SUST		51.45090	3.0			
208	AL	7.TURT		8.55494	2.2			
209	AB	7.TURT		51.45298	1.5			
210	AL	1.BRUN		8.51516	999.0			
211	AB	1.BRUN		51.45676	999.0			
212	AL	2.BRAE		8.54527	2.2			
213	AB	2.BRAE		51.46913	1.5			
214	AL	3.JEIZ		8.58056	2.2			
215	AB	3.JEIZ		51.46860	1.5			
216	AL	4.ERGI		8.57307	2.2			
217	AB	4.ERGI		51.44524	1.5			
218	AL	5.OEMS		8.54312	2.2			
219	AB	5.OEMS		51.43472	1.5			
220	AL	6.AGAR		8.49648	2.2			
221	AB	6.AGAR		51.43608	1.5			
222	AL	8.SUST		8.49511	2.2			
223	AB	8.SUST		51.45039	1.5			
224	AZ	1.BRUN	5.OEMS	168.34016	4.0			

NR	TYP	STATION	ZIEL	BEOB. [g/m]	M.F. [cc/mm]	IH [m]	SH [m]	ZENTRIERT [g/m]
225	AZ	1.BRUN	8.SUST	258.04936	4.0			
226	AZ	2.BRAE	5.OEMS	203.19998	4.0			
227	AZ	2.BRAE	8.SUST	259.21079	4.0			
228	AZ	3.JEIZ	5.OEMS	231.29565	4.0			
229	AZ	3.JEIZ	8.SUST	273.67190	4.0			
230	AZ	4.ERGI	8.SUST	310.44352	4.0			
231	AZ	4.ERGI	5.OEMS	267.13483	5.0			
232	AZ	5.OEMS	7.TURT	19.91439	5.0			
233	AZ	5.OEMS	1.BRUN	368.36074	5.0			
234	AZ	7.TURT	5.OEMS	219.92237	4.0			
235	AZ	7.TURT	8.SUST	293.04923	4.0			
236	AZ	7.TURT	1.BRUN	316.22059	5.0			
237	AZ	8.SUST	7.TURT	93.00554	4.0			
238	AZ	8.SUST	5.OEMS	137.28135	5.0			
239	DH	7.TURT	8.SUST	54.66610	12.0	1.3098	1.2019	54.55820

RESULTATE DER AUSGLEICHUNG ITERATION: 1

\*\*\*\*\*

				REDUND	SIGMA
8	PUNKTE	SUMME PVV	= 226.449	56 RICHTUNGEN	47.588 1.020
8	STATIONEN	SIGMA0	= 1.000	56 HOEHENWINKEL	46.961 1.041
46	UNBEKANNTE	MO	= 1.083	79 SCHRAEGDISTANZEN	61.772 1.179
1	REFR.KOEFF.	MO**2/SIGMA0**2	= 1.173	16 BREITEN	10.930 1.197
0	MASSTAEBE			16 LAENGEN	11.702 0.920
239	BEOBACHTUNGEN			15 AZIMUTE	13.198 0.995
193	FREIHEITSGRADE			1 ELL.HOEHEN-DIFF.	0.849 1.348

DIE UNBEKANNTEN UND IHRE MITTL.FEHLER:

\*\*\*\*\*

NR	PUNKT		X0 [m]	DX [mm]	X0+DX [m]	MX [mm]	B/L/H(e11) [g/m]	YKO/XKO/H(ortho) [m]
	7.TURT	X	4373700.0721				51.45352004	620176.7100
		Y	591465.9898				8.55724999	128424.4280
		Z	4588963.1846				623.7572	622.4474
				FESTPUNKT				
1	1.BRUN	X	4373824.6037	-27.09	4373824.5766	5.45	51.46041904	617522.6154
2	1.BRUN	Y	588806.6270	2.61	588806.6296	1.10	8.51899381	129106.3004
3	1.BRUN	Z	4589719.3096	3.34	4589719.3129	4.09	1010.1195	1008.8717
4	2.BRAE	X	4372830.4541	-10.36	4372830.4437	3.54	51.47522903	619560.4823
5	2.BRAE	Y	590733.7473	13.62	590733.7610	4.27	8.54846246	130594.1082
6	2.BRAE	Z	4591102.8446	-5.75	4591102.8389	1.77	1508.1797	1506.8176
7	3.JEIZ	X	4372570.7210	4.26	4372570.7252	4.17	51.47449376	621848.7778
8	3.JEIZ	Y	593007.9238	11.15	593007.9349	4.60	8.58147898	130528.4023
9	3.JEIZ	Z	4591046.2536	-19.31	4591046.2343	3.10	1500.1555	1498.7511
10	4.ERGI	X	4374840.7812	-17.55	4374840.7636	3.27	51.43988902	621560.9928
11	4.ERGI	Y	593012.7206	-22.36	593012.6982	2.73	8.57714795	127065.6010
12	4.ERGI	Z	4588389.4127	-30.20	4588389.3825	2.99	1133.1976	1131.8048
13	5.OEMS	X	4376221.2419	-21.52	4376221.2204	2.07	51.42722683	619334.3134
14	5.OEMS	Y	590947.8931	-27.96	590947.8651	6.00	8.54497706	125791.3719
15	5.OEMS	Z	4587697.4918	-12.11	4587697.4797	3.70	1387.0526	1385.6397
16	6.AGAR	X	4376655.9499	-54.61	4376655.8953	7.12	51.42803678	616102.5295
17	6.AGAR	Y	587745.1871	-26.97	587745.1601	6.67	8.49838232	125862.9180
18	6.AGAR	Z	4587818.2481	5.08	4587818.2532	6.87	1476.6659	1475.3444
19	8.SUST	X	4374614.2728	-44.01	4374614.2288	7.73	51.44898195	616048.6759
20	8.SUST	Y	587422.2939	-15.44	587422.2785	2.06	8.49768610	127958.0692
21	8.SUST	Z	4588688.9760	24.83	4588689.0008	6.14	678.3005	677.0986

NR	PUNKT		ORI [g]	DX(I) [cc]	ORI+DX [g]	MX [cc]	XI/ETA [cc]
22	7.TURT	OM	316.221484	-14.84	316.220000	1.73	
23	7.TURT	AB	51.453520	-3.31	51.453189	1.17	-3.31
24	7.TURT	AL	8.557250	-26.43	8.554607	1.52	-18.26
25	1.BRUN	OM	129.971078	-10.67	129.970010	1.92	
26	1.BRUN	AB	51.460419	-27.52	51.457667	1.81	-27.52
27	1.BRUN	AL	8.518994	-31.50	8.515844	2.04	-21.76
28	2.BRAE	OM	240.384302	-1.73	240.384128	1.84	
29	2.BRAE	AB	51.475229	-59.84	51.469245	1.17	-59.84
30	2.BRAE	AL	8.548462	-33.38	8.545124	1.63	-23.06
31	3.JEIZ	OM	205.510224	-14.76	205.508748	1.78	
32	3.JEIZ	AB	51.474494	-56.58	51.468836	1.22	-56.58
33	3.JEIZ	AL	8.581479	-9.00	8.580578	1.62	-6.22
34	4.ERGI	OM	330.013909	-18.24	330.012086	1.82	
35	4.ERGI	AB	51.439889	52.06	51.445095	1.21	52.06
36	4.ERGI	AL	8.577148	-37.56	8.573392	1.56	-25.95
37	5.OEMS	OM	67.114170	-19.37	67.112233	1.88	
38	5.OEMS	AB	51.427227	74.24	51.434651	1.16	74.24
39	5.OEMS	AL	8.544977	-19.72	8.543006	1.62	-13.62
40	6.AGAR	OM	26.442552	-20.21	26.440530	2.03	
41	6.AGAR	AB	51.428036	80.10	51.436046	1.22	80.09
42	6.AGAR	AL	8.498383	-19.11	8.496471	1.67	-13.21
43	8.SUST	OM	58.036250	-9.96	58.035254	1.81	
44	8.SUST	AB	51.448981	15.99	51.450581	1.24	15.99
45	8.SUST	AL	8.497686	-24.48	8.495239	1.52	-16.91
46		RE(1)	0.0000	-0.0665	-0.0665	0.0093	(Refraktionskoeff.)

## VERBESSERUNGEN UND AUSGEGLICHENE BEOBACHTUNGEN

\*\*\*\*\*

NR	VISUR	TYP	M.F. [mm/cc]	V(I) [mm/cc]	ML(I) [mm/cc]	ZI [%]	WI	
1	122 7.TURT	1.BRUN	RI	2.20	2.02	0.92	85.20	0.92
2	123 7.TURT	2.BRAE	RI	2.20	-0.72	0.99	82.74	-0.33
3	124 7.TURT	3.JEIZ	RI	2.20	0.07	0.98	82.97	0.03
4	125 7.TURT	4.ERGI	RI	2.20	-0.98	0.96	83.62	-0.45
5	126 7.TURT	5.OEMS	RI	2.20	-0.74	0.96	83.84	-0.34
6	127 7.TURT	6.AGAR	RI	2.20	-0.52	0.93	84.87	-0.24
7	128 7.TURT	8.SUST	RI	2.20	0.87	0.91	85.58	0.40
8	16 7.TURT	1.BRUN	DS	0.88	0.51	0.46	76.55	0.61
9	66 7.TURT	1.BRUN	DS	0.88	0.10	0.46	76.55	0.12
10	67 7.TURT	2.BRAE	DS	0.47	-0.10	0.35	53.00	-0.28
11	68 7.TURT	3.JEIZ	DS	0.90	1.25	0.69	49.68	1.82
12	17 7.TURT	4.ERGI	DS	0.67	-0.16	0.30	83.22	-0.24
13	69 7.TURT	4.ERGI	DS	0.67	-0.48	0.30	83.22	-0.72
14	70 7.TURT	5.OEMS	DS	0.52	-0.01	0.36	58.22	-0.01
15	71 7.TURT	6.AGAR	DS	0.79	-0.57	0.42	75.35	-0.77
16	72 7.TURT	8.SUST	DS	2.10	-3.76	0.61	92.73	-1.72
17	178 7.TURT	1.BRUN	HW	3.00	-7.07	1.14	87.70	-2.32
18	179 7.TURT	2.BRAE	HW	3.00	-2.86	1.26	84.91	-0.95
19	180 7.TURT	3.JEIZ	HW	3.00	-6.25	1.24	85.43	-2.08
20	181 7.TURT	4.ERGI	HW	3.00	-0.47	1.23	85.65	-0.16
21	182 7.TURT	5.OEMS	HW	3.00	-1.52	1.24	85.44	-0.51
22	183 7.TURT	6.AGAR	HW	3.00	-6.81	1.12	88.20	-2.23
23	184 7.TURT	8.SUST	HW	3.00	-3.36	1.09	88.85	-1.10
24	193 7.TURT	7.TURT	AB	3.00	-4.41	1.17	87.06	-1.45
25	209 7.TURT	7.TURT	AB	1.50	2.09	1.17	48.26	1.86
26	192 7.TURT	7.TURT	AL	4.00	-1.43	1.52	87.76	-0.35

NR	VISUR	TYP	M.F. [mm/cc]	V(I) [mm/cc]	ML(I) [mm/cc]	ZI [%]	WI		
27	208	7.TURT	7.TURT	AL	2.20	-3.33	1.52	59.55	-1.81
28	236	7.TURT	1.BRUN	AZ	5.00	-4.48	1.47	92.59	-0.86
29	234	7.TURT	5.OEMS	AZ	4.00	2.36	1.64	85.68	0.59
30	235	7.TURT	8.SUST	AZ	4.00	-4.23	1.48	88.31	-1.04
31	239	7.TURT	8.SUST	DH	12.00	-14.91	5.05	84.92	-1.24
32	86	1.BRUN	7.TURT	RI	2.20	-2.38	0.95	84.00	-1.09
33	84	1.BRUN	2.BRAE	RI	2.20	-0.69	0.94	84.30	-0.31
34	85	1.BRUN	3.JEIZ	RI	2.20	-2.19	0.91	85.37	-1.00
35	80	1.BRUN	4.ERGI	RI	2.20	1.32	0.90	85.64	0.60
36	81	1.BRUN	5.OEMS	RI	2.20	-0.78	0.91	85.39	-0.35
37	82	1.BRUN	6.AGAR	RI	2.20	2.81	0.94	84.51	1.28
38	83	1.BRUN	8.SUST	RI	2.20	1.91	0.95	83.99	0.88
39	29	1.BRUN	7.TURT	DS	0.88	0.97	0.46	76.55	1.16
40	24	1.BRUN	2.BRAE	DS	1.32	-1.23	0.36	93.59	-0.89
41	25	1.BRUN	3.JEIZ	DS	1.41	2.64	0.44	91.69	1.80
42	26	1.BRUN	4.ERGI	DS	2.28	1.38	0.39	97.49	0.57
43	27	1.BRUN	5.OEMS	DS	0.64	0.83	0.40	67.34	1.46
44	28	1.BRUN	6.AGAR	DS	0.61	0.65	0.38	66.60	1.20
45	30	1.BRUN	8.SUST	DS	0.99	-1.94	0.41	85.23	-1.96
46	141	1.BRUN	7.TURT	HW	3.00	-2.63	1.75	70.83	-0.96
47	136	1.BRUN	2.BRAE	HW	3.00	-1.01	1.44	80.28	-0.35
48	137	1.BRUN	3.JEIZ	HW	3.00	2.71	1.33	83.15	0.92
49	138	1.BRUN	4.ERGI	HW	3.00	-2.64	1.48	79.18	-0.91
50	139	1.BRUN	5.OEMS	HW	3.00	1.30	1.70	72.66	0.47
51	140	1.BRUN	6.AGAR	HW	3.00	0.79	1.61	75.55	0.28
52	142	1.BRUN	8.SUST	HW	3.00	0.68	1.52	78.12	0.24
53	195	1.BRUN	1.BRUN	AB	3.00	-0.23	1.81	69.14	-0.09
54	211	1.BRUN	1.BRUN	AB	999.00	9.07	1.81	100.00	0.01
55	194	1.BRUN	1.BRUN	AL	4.00	1.04	2.04	77.83	0.27
56	210	1.BRUN	1.BRUN	AL	999.00	6.84	2.04	100.00	0.01
57	224	1.BRUN	5.OEMS	AZ	4.00	1.13	1.78	83.13	0.28
58	225	1.BRUN	8.SUST	AZ	4.00	2.32	1.63	85.85	0.58
59	92	2.BRAE	7.TURT	RI	2.90	-3.16	1.09	87.99	-1.07
60	89	2.BRAE	1.BRUN	RI	2.20	0.14	1.04	81.10	0.07
61	90	2.BRAE	3.JEIZ	RI	3.40	1.30	1.04	91.97	0.37
62	91	2.BRAE	4.ERGI	RI	3.30	0.14	1.03	91.71	0.04
63	93	2.BRAE	5.OEMS	RI	2.20	-2.09	1.03	81.41	-0.97
64	87	2.BRAE	6.AGAR	RI	2.20	1.13	1.03	81.30	0.53
65	88	2.BRAE	8.SUST	RI	2.20	2.03	1.03	81.19	0.95
66	36	2.BRAE	7.TURT	DS	0.47	0.01	0.35	53.00	0.04
67	1	2.BRAE	1.BRUN	DS	0.83	0.81	0.36	83.80	0.99
68	31	2.BRAE	1.BRUN	DS	0.49	-0.20	0.36	53.51	-0.51
69	32	2.BRAE	3.JEIZ	DS	1.18	-0.95	0.48	85.95	-0.80
70	33	2.BRAE	4.ERGI	DS	0.68	0.06	0.40	69.97	0.09
71	34	2.BRAE	5.OEMS	DS	0.78	-0.33	0.47	69.44	-0.47
72	2	2.BRAE	5.OEMS	DS	1.47	2.27	0.47	91.40	1.49
73	35	2.BRAE	6.AGAR	DS	0.93	0.13	0.52	72.84	0.15
74	37	2.BRAE	8.SUST	DS	0.73	0.57	0.45	67.57	0.87
75	148	2.BRAE	7.TURT	HW	3.00	-0.27	1.54	77.48	-0.10
76	143	2.BRAE	1.BRUN	HW	3.00	-4.12	1.63	74.72	-1.47
77	144	2.BRAE	3.JEIZ	HW	3.00	0.53	1.73	71.70	0.19
78	145	2.BRAE	4.ERGI	HW	3.00	0.04	1.28	84.56	0.01
79	146	2.BRAE	5.OEMS	HW	3.00	3.48	1.20	86.25	1.15
80	147	2.BRAE	6.AGAR	HW	3.00	0.00	1.14	87.78	0.00
81	149	2.BRAE	8.SUST	HW	3.00	0.07	1.14	87.62	0.02
82	197	2.BRAE	2.BRAE	AB	3.00	-4.95	1.17	87.00	-1.63
83	213	2.BRAE	2.BRAE	AB	1.50	1.15	1.17	47.98	1.02
84	196	2.BRAE	2.BRAE	AL	4.00	-0.46	1.63	85.85	-0.11
85	212	2.BRAE	2.BRAE	AL	2.20	-1.46	1.63	53.23	-0.84
86	226	2.BRAE	5.OEMS	AZ	4.00	-3.40	1.58	86.78	-0.84
87	227	2.BRAE	8.SUST	AZ	4.00	3.41	1.52	87.73	0.84
88	96	3.JEIZ	7.TURT	RI	2.20	2.81	0.96	83.75	1.29
89	99	3.JEIZ	1.BRUN	RI	2.20	-1.37	0.90	85.62	-0.62
90	100	3.JEIZ	2.BRAE	RI	2.20	-1.19	0.92	85.16	-0.54
91	94	3.JEIZ	4.ERGI	RI	2.20	-1.00	0.91	85.55	-0.46
92	95	3.JEIZ	5.OEMS	RI	2.20	1.48	0.91	85.50	0.67
93	97	3.JEIZ	6.AGAR	RI	2.20	3.77	0.91	85.40	1.71

NR	VISUR	TYP	M.F. [mm/cc]	V(I) [mm/cc]	ML(I) [mm/cc]	ZI [%]	WI		
94	98	3.JEIZ	8.SUST	RI	2.20	-4.50	0.91	85.56	-2.04
95	43	3.JEIZ	7.TURT	DS	1.44	-0.53	0.69	80.34	-0.38
96	38	3.JEIZ	1.BRUN	DS	0.75	-0.55	0.44	70.64	-0.80
97	3	3.JEIZ	2.BRAE	DS	0.75	0.78	0.48	65.22	1.19
98	39	3.JEIZ	2.BRAE	DS	1.18	-1.14	0.48	85.95	-0.96
99	4	3.JEIZ	4.ERGI	DS	1.09	2.03	0.37	90.39	1.81
100	40	3.JEIZ	4.ERGI	DS	0.60	-0.75	0.37	68.30	-1.40
101	41	3.JEIZ	5.OEMS	DS	0.85	0.13	0.49	72.15	0.17
102	42	3.JEIZ	6.AGAR	DS	1.15	-1.17	0.52	82.68	-1.03
103	44	3.JEIZ	8.SUST	DS	1.94	-0.31	0.51	94.21	-0.15
104	155	3.JEIZ	7.TURT	HW	3.00	4.61	1.60	75.87	1.63
105	150	3.JEIZ	1.BRUN	HW	3.00	2.46	1.10	88.57	0.80
106	151	3.JEIZ	2.BRAE	HW	3.00	-1.11	1.59	75.96	-0.39
107	152	3.JEIZ	4.ERGI	HW	3.00	-2.68	1.33	83.20	-0.91
108	153	3.JEIZ	5.OEMS	HW	3.00	4.41	1.15	87.45	1.45
109	154	3.JEIZ	6.AGAR	HW	3.00	0.84	1.05	89.48	0.27
110	156	3.JEIZ	8.SUST	HW	3.00	2.53	1.06	89.35	0.82
111	199	3.JEIZ	3.JEIZ	AB	3.00	-2.54	1.22	85.89	-0.84
112	215	3.JEIZ	3.JEIZ	AB	1.50	2.36	1.22	43.56	2.20
113	198	3.JEIZ	3.JEIZ	AL	4.00	4.48	1.62	86.00	1.12
114	214	3.JEIZ	3.JEIZ	AL	2.20	0.18	1.62	53.71	0.11
115	228	3.JEIZ	5.OEMS	AZ	4.00	3.76	1.58	86.78	0.93
116	229	3.JEIZ	8.SUST	AZ	4.00	5.88	1.54	87.38	1.45
117	102	4.ERGI	7.TURT	RI	2.20	2.02	0.95	83.96	0.92
118	101	4.ERGI	1.BRUN	RI	2.20	-2.27	0.90	85.69	-1.03
119	103	4.ERGI	2.BRAE	RI	2.20	-4.81	0.91	85.35	-2.19
120	104	4.ERGI	3.JEIZ	RI	2.20	0.41	0.91	85.30	0.19
121	105	4.ERGI	5.OEMS	RI	2.20	-1.04	0.92	85.26	-0.47
122	106	4.ERGI	6.AGAR	RI	2.20	2.83	0.91	85.48	1.28
123	107	4.ERGI	8.SUST	RI	2.20	2.87	0.91	85.54	1.30
124	50	4.ERGI	7.TURT	DS	0.42	0.35	0.30	57.31	1.01
125	10	4.ERGI	7.TURT	DS	0.67	0.29	0.30	83.22	0.43
126	5	4.ERGI	1.BRUN	DS	1.39	-1.65	0.39	93.25	-1.13
127	45	4.ERGI	1.BRUN	DS	0.74	-0.38	0.39	76.20	-0.55
128	46	4.ERGI	2.BRAE	DS	0.68	0.64	0.40	69.97	1.04
129	6	4.ERGI	2.BRAE	DS	1.26	-1.43	0.40	91.25	-1.09
130	47	4.ERGI	3.JEIZ	DS	0.60	0.54	0.37	68.30	1.00
131	7	4.ERGI	3.JEIZ	DS	1.09	-3.00	0.37	90.39	-2.67 **
132	48	4.ERGI	5.OEMS	DS	0.49	0.31	0.30	67.31	0.72
133	8	4.ERGI	5.OEMS	DS	0.82	0.30	0.30	88.33	0.36
134	49	4.ERGI	6.AGAR	DS	0.89	0.62	0.37	85.41	0.69
135	9	4.ERGI	6.AGAR	DS	1.71	-1.08	0.37	96.05	-0.59
136	51	4.ERGI	8.SUST	DS	0.89	0.97	0.51	72.27	1.18
137	162	4.ERGI	7.TURT	HW	3.00	5.90	1.44	80.34	2.03
138	157	4.ERGI	1.BRUN	HW	3.00	-0.76	1.12	88.05	-0.25
139	158	4.ERGI	2.BRAE	HW	3.00	0.75	1.23	85.67	0.25
140	159	4.ERGI	3.JEIZ	HW	3.00	4.28	1.36	82.59	1.45
141	160	4.ERGI	5.OEMS	HW	3.00	3.37	1.27	84.77	1.13
142	161	4.ERGI	6.AGAR	HW	3.00	0.15	1.14	87.65	0.05
143	163	4.ERGI	8.SUST	HW	3.00	3.48	1.10	88.63	1.14
144	201	4.ERGI	4.ERGI	AB	3.00	-3.05	1.21	86.16	-1.01
145	217	4.ERGI	4.ERGI	AB	1.50	-1.45	1.21	44.63	-1.34
146	200	4.ERGI	4.ERGI	AL	4.00	5.82	1.56	86.99	1.44
147	216	4.ERGI	4.ERGI	AL	2.20	3.22	1.56	56.99	1.79
148	231	4.ERGI	5.OEMS	AZ	5.00	-5.48	1.60	91.25	-1.06
149	230	4.ERGI	8.SUST	AZ	4.00	-4.28	1.59	86.62	-1.06
150	113	5.OEMS	7.TURT	RI	2.20	1.35	0.94	84.45	0.62
151	111	5.OEMS	1.BRUN	RI	2.20	-3.13	0.90	85.61	-1.42
152	112	5.OEMS	2.BRAE	RI	2.20	-1.22	0.91	85.49	-0.56
153	114	5.OEMS	3.JEIZ	RI	2.20	-0.92	0.91	85.48	-0.42
154	108	5.OEMS	4.ERGI	RI	2.20	-0.06	0.91	85.38	-0.03
155	109	5.OEMS	6.AGAR	RI	2.20	0.15	0.91	85.37	0.07
156	110	5.OEMS	8.SUST	RI	2.20	3.83	0.92	85.06	1.74
157	57	5.OEMS	7.TURT	DS	0.52	-0.08	0.36	58.22	-0.18
158	52	5.OEMS	1.BRUN	DS	0.64	-0.88	0.40	67.34	-1.56
159	53	5.OEMS	2.BRAE	DS	0.78	-0.49	0.47	69.44	-0.70
160	54	5.OEMS	3.JEIZ	DS	0.85	0.86	0.49	72.15	1.10

NR		VISUR	TYP	M.F. [mm/cc]	V(I) [mm/cc]	ML(I) [mm/cc]	ZI [%]	WI	
161	55	5.OEMS	4.ERGI	DS	0.49	-0.62	0.30	67.31	-1.43
162	56	5.OEMS	6.AGAR	DS	0.57	0.21	0.35	68.21	0.42
163	58	5.OEMS	8.SUST	DS	0.67	0.00	0.50	52.60	0.01
164	169	5.OEMS	7.TURT	HW	3.00	-2.88	1.67	73.51	-1.03
165	164	5.OEMS	1.BRUN	HW	3.00	0.20	1.23	85.64	0.07
166	165	5.OEMS	2.BRAE	HW	3.00	3.28	1.20	86.42	1.09
167	166	5.OEMS	3.JEIZ	HW	3.00	1.82	1.19	86.67	0.60
168	167	5.OEMS	4.ERGI	HW	3.00	2.08	1.24	85.41	0.69
169	168	5.OEMS	6.AGAR	HW	3.00	-2.50	1.27	84.66	-0.84
170	170	5.OEMS	8.SUST	HW	3.00	-1.15	1.23	85.69	-0.38
171	203	5.OEMS	5.OEMS	AB	3.00	-0.59	1.16	87.24	-0.20
172	219	5.OEMS	5.OEMS	AB	1.50	-0.69	1.16	48.94	-0.61
173	202	5.OEMS	5.OEMS	AL	4.00	1.56	1.62	86.06	0.39
174	218	5.OEMS	5.OEMS	AL	2.20	-1.14	1.62	53.91	-0.65
175	232	5.OEMS	7.TURT	AZ	5.00	-7.01	1.81	88.84	-1.37
176	233	5.OEMS	1.BRUN	AZ	5.00	-2.80	1.67	90.48	-0.54
177	118	6.AGAR	7.TURT	RI	2.20	-0.47	0.91	85.29	-0.21
178	115	6.AGAR	1.BRUN	RI	2.20	3.41	0.90	85.61	1.55
179	116	6.AGAR	2.BRAE	RI	2.20	0.12	0.91	85.36	0.06
180	117	6.AGAR	3.JEIZ	RI	2.20	0.35	0.91	85.37	0.16
181	119	6.AGAR	4.ERGI	RI	2.20	-3.90	0.91	85.56	-1.77
182	120	6.AGAR	5.OEMS	RI	2.20	-3.66	0.91	85.39	-1.66
183	121	6.AGAR	8.SUST	RI	2.20	4.15	0.97	83.36	1.91
184	15	6.AGAR	7.TURT	DS	1.50	-0.73	0.42	93.16	-0.46
185	64	6.AGAR	7.TURT	DS	0.79	1.34	0.42	75.35	1.80
186	59	6.AGAR	1.BRUN	DS	0.61	-0.21	0.38	66.60	-0.38
187	11	6.AGAR	1.BRUN	DS	1.11	-1.08	0.38	89.91	-0.95
188	60	6.AGAR	2.BRAE	DS	0.92	0.87	0.52	72.25	1.02
189	12	6.AGAR	2.BRAE	DS	1.78	-4.37	0.52	92.59	-2.35
190	61	6.AGAR	3.JEIZ	DS	1.15	1.47	0.52	82.68	1.30
191	13	6.AGAR	3.JEIZ	DS	2.24	-5.68	0.52	95.43	-2.40
192	62	6.AGAR	4.ERGI	DS	0.89	-0.76	0.37	85.41	-0.85
193	63	6.AGAR	5.OEMS	DS	0.57	-0.42	0.35	68.21	-0.82
194	14	6.AGAR	5.OEMS	DS	1.01	0.49	0.35	89.87	0.47
195	65	6.AGAR	8.SUST	DS	0.73	0.03	0.62	38.11	0.05
196	176	6.AGAR	7.TURT	HW	3.00	3.03	1.07	89.22	0.99
197	171	6.AGAR	1.BRUN	HW	3.00	-0.72	1.20	86.35	-0.24
198	172	6.AGAR	2.BRAE	HW	3.00	0.63	1.10	88.52	0.21
199	173	6.AGAR	3.JEIZ	HW	3.00	-1.22	1.07	89.16	-0.40
200	174	6.AGAR	4.ERGI	HW	3.00	-3.82	1.14	87.64	-1.25
201	175	6.AGAR	5.OEMS	HW	3.00	0.31	1.29	84.29	0.10
202	177	6.AGAR	8.SUST	HW	3.00	1.45	1.65	74.19	0.52
203	205	6.AGAR	6.AGAR	AB	3.00	-0.44	1.22	85.96	-0.15
204	221	6.AGAR	6.AGAR	AB	1.50	-0.34	1.22	43.83	-0.32
205	220	6.AGAR	6.AGAR	AL	2.20	-0.09	1.67	50.63	-0.05
206	204	6.AGAR	6.AGAR	AL	4.00	-1.89	1.67	85.07	-0.47
207	132	8.SUST	7.TURT	RI	2.20	-0.18	0.91	85.32	-0.08
208	129	8.SUST	1.BRUN	RI	2.20	0.32	0.93	84.71	0.15
209	130	8.SUST	2.BRAE	RI	2.20	-1.49	0.92	85.08	-0.68
210	131	8.SUST	3.JEIZ	RI	2.20	-1.21	0.91	85.48	-0.55
211	133	8.SUST	4.ERGI	RI	2.20	0.68	0.90	85.68	0.31
212	134	8.SUST	5.OEMS	RI	2.20	0.54	0.91	85.49	0.24
213	135	8.SUST	6.AGAR	RI	2.20	1.34	1.00	82.52	0.62
214	79	8.SUST	7.TURT	DS	2.10	2.10	0.61	92.73	0.96
215	23	8.SUST	7.TURT	DS	1.28	-0.96	0.61	80.43	-0.77
216	73	8.SUST	1.BRUN	DS	1.00	1.87	0.41	85.53	1.87
217	18	8.SUST	1.BRUN	DS	0.64	0.26	0.41	64.66	0.47
218	74	8.SUST	2.BRAE	DS	2.25	0.30	0.45	96.59	0.13
219	19	8.SUST	2.BRAE	DS	1.37	-0.04	0.45	90.79	-0.03
220	75	8.SUST	3.JEIZ	DS	3.21	-1.19	0.51	97.89	-0.35
221	20	8.SUST	3.JEIZ	DS	1.94	-3.28	0.51	94.21	-1.61
222	76	8.SUST	4.ERGI	DS	2.82	3.41	0.51	97.24	1.13
223	21	8.SUST	4.ERGI	DS	1.70	-1.60	0.51	92.40	-0.91
224	77	8.SUST	5.OEMS	DS	2.02	1.30	0.50	94.79	0.61
225	22	8.SUST	5.OEMS	DS	1.23	-0.78	0.50	85.94	-0.63
226	78	8.SUST	6.AGAR	DS	1.16	-0.03	0.62	75.49	-0.03
227	191	8.SUST	7.TURT	HW	3.00	-1.46	1.05	89.60	-0.47



NR	VISUR	TYP	M.F. [mm/cc]	V(I) [mm/cc]	ML(I) [mm/cc]	ZI [%]	WI	
228 185	8.SUST	1.BRUN	HW	3.00	-4.59	1.27	84.71	-1.54
229 186	8.SUST	2.BRAE	HW	3.00	-1.14	1.12	88.11	-0.37
230 187	8.SUST	3.JEIZ	HW	3.00	-2.92	1.07	89.20	-0.95
231 188	8.SUST	4.ERGI	HW	3.00	-2.93	1.09	88.65	-0.96
232 189	8.SUST	5.OEMS	HW	3.00	1.18	1.25	85.31	0.39
233 190	8.SUST	6.AGAR	HW	3.00	-0.71	1.47	79.50	-0.24
234 207	8.SUST	8.SUST	AB	3.00	-3.19	1.24	85.47	-1.06
235 223	8.SUST	8.SUST	AB	1.50	1.91	1.24	41.89	1.81
236 206	8.SUST	8.SUST	AL	4.00	2.69	1.52	87.61	0.66
237 222	8.SUST	8.SUST	AL	2.20	1.29	1.52	59.05	0.70
238 237	8.SUST	7.TURT	AZ	4.00	3.16	1.55	87.14	0.78
239 238	8.SUST	5.OEMS	AZ	5.00	3.97	1.61	91.18	0.77

BERECHNUNG DER FEHLERELLIPSOIDE (IM LOKALEN KARTESISCHEN KOORDINATENSYSTEM DES FESTPUNKTES)  
\*\*\*\*\*

PUNKT	M.F.		PROJEKTIONSELLIPSEN			ELLIPSOIDE:				
	MXYZ [mm]	EBENE	THETA [g]	HA1 [mm]	HA2 [mm]	HALBACHSEN [mm]	AXYZ [mm]	BXYZ [mm]	CXYZ [mm]	
1.BRUN	5.603	X-Y	14.74	5.75	0.61	A=	5.88	5.54	0.81	0.11
	1.447	Y-Z	99.06	3.76	1.45	B=	3.59	1.24	0.61	-0.43
	3.763	Z-X	-81.53	5.75	3.53	C=	0.45	-1.52	3.44	0.05
2.BRAE	1.818	X-Y	81.22	4.59	1.29	A=	4.60	1.45	-1.05	0.31
	4.405	Y-Z	0.31	4.40	3.35	B=	3.55	4.33	0.82	-0.09
	3.351	Z-X	-26.34	3.62	1.19	C=	0.34	-0.61	3.29	0.12
3.JEIZ	3.735	X-Y	-54.58	5.55	1.14	A=	5.64	3.71	0.07	0.47
	4.265	Y-Z	15.31	4.28	3.99	B=	3.99	-4.02	1.38	0.38
	4.003	Z-X	-43.97	4.53	3.08	C=	0.62	-1.41	-3.74	0.15
4.ERGI	2.985	X-Y	51.30	4.24	0.76	A=	4.28	2.85	-0.88	-0.20
	3.102	Y-Z	-43.63	3.44	2.52	B=	2.95	3.09	0.09	0.20
	2.921	Z-X	72.74	3.00	2.90	C=	0.29	-0.79	-2.81	0.07
5.OEMS	2.113	X-Y	-80.43	6.12	1.07	A=	6.12	1.83	1.01	-0.33
	5.839	Y-Z	6.37	5.86	3.89	B=	4.04	-5.84	0.17	-0.11
	3.919	Z-X	18.27	4.05	1.85	C=	0.36	-0.21	3.91	0.09
6.AGAR	8.673	X-Y	-36.81	10.33	1.04	A=	10.42	8.58	1.28	-0.22
	5.715	Y-Z	52.70	6.68	4.75	B=	5.80	-5.70	0.31	-0.35
	5.877	Z-X	-89.74	8.74	5.78	C=	0.42	-1.63	5.65	0.07
8.SUST	8.655	X-Y	-7.12	8.71	0.61	A=	8.85	8.60	-1.01	0.07
	1.144	Y-Z	96.97	5.05	1.12	B=	4.80	-0.96	0.14	0.60
	5.048	Z-X	-86.22	8.80	4.79	C=	0.61	-1.88	-4.69	0.00

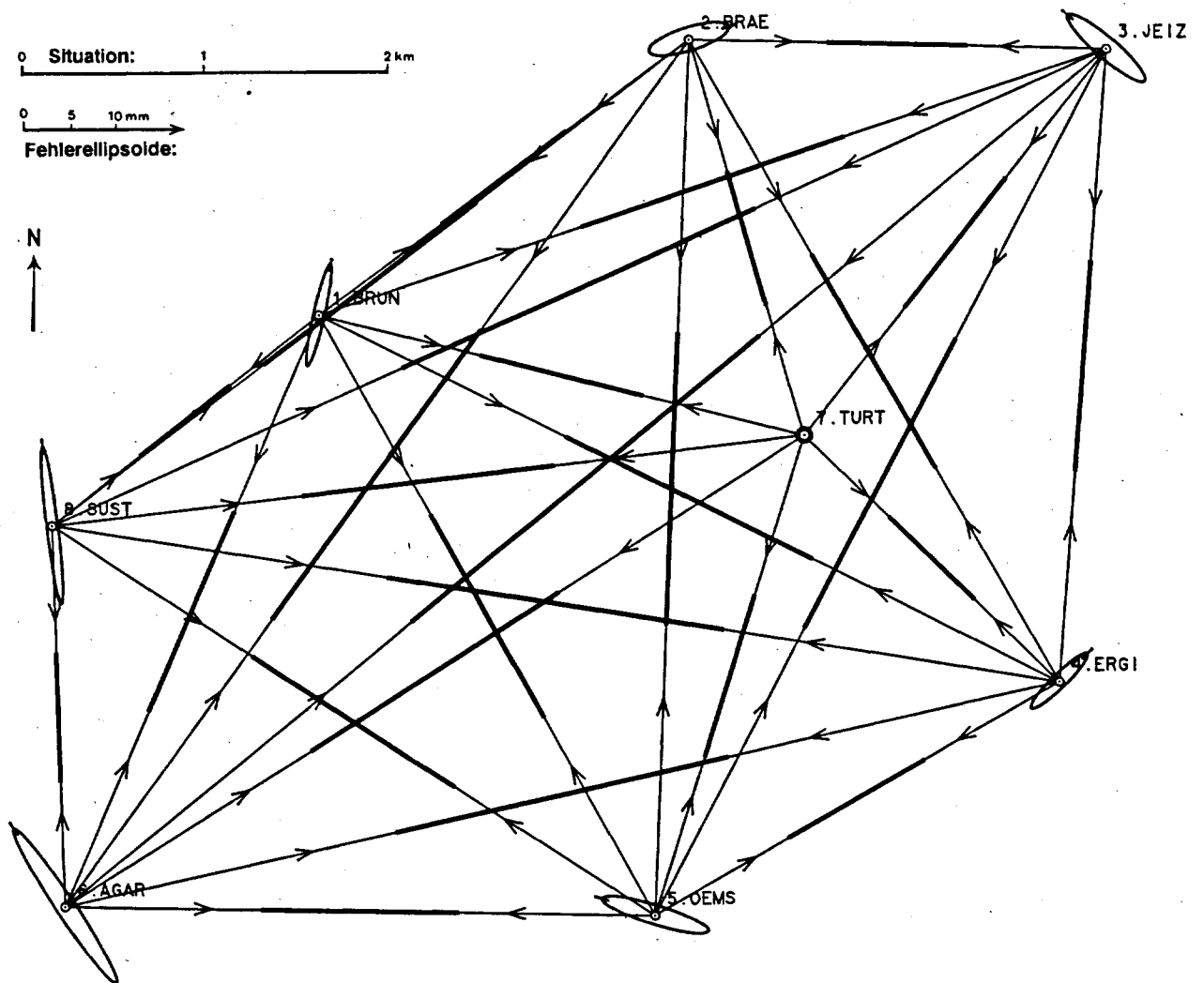


Abbildung 2.8-4: 3D-Testnetz Turtmann: Terrestrisches Hauptnetz, Netzplan mit mittleren Fehlerellipsoiden (Grundriss)

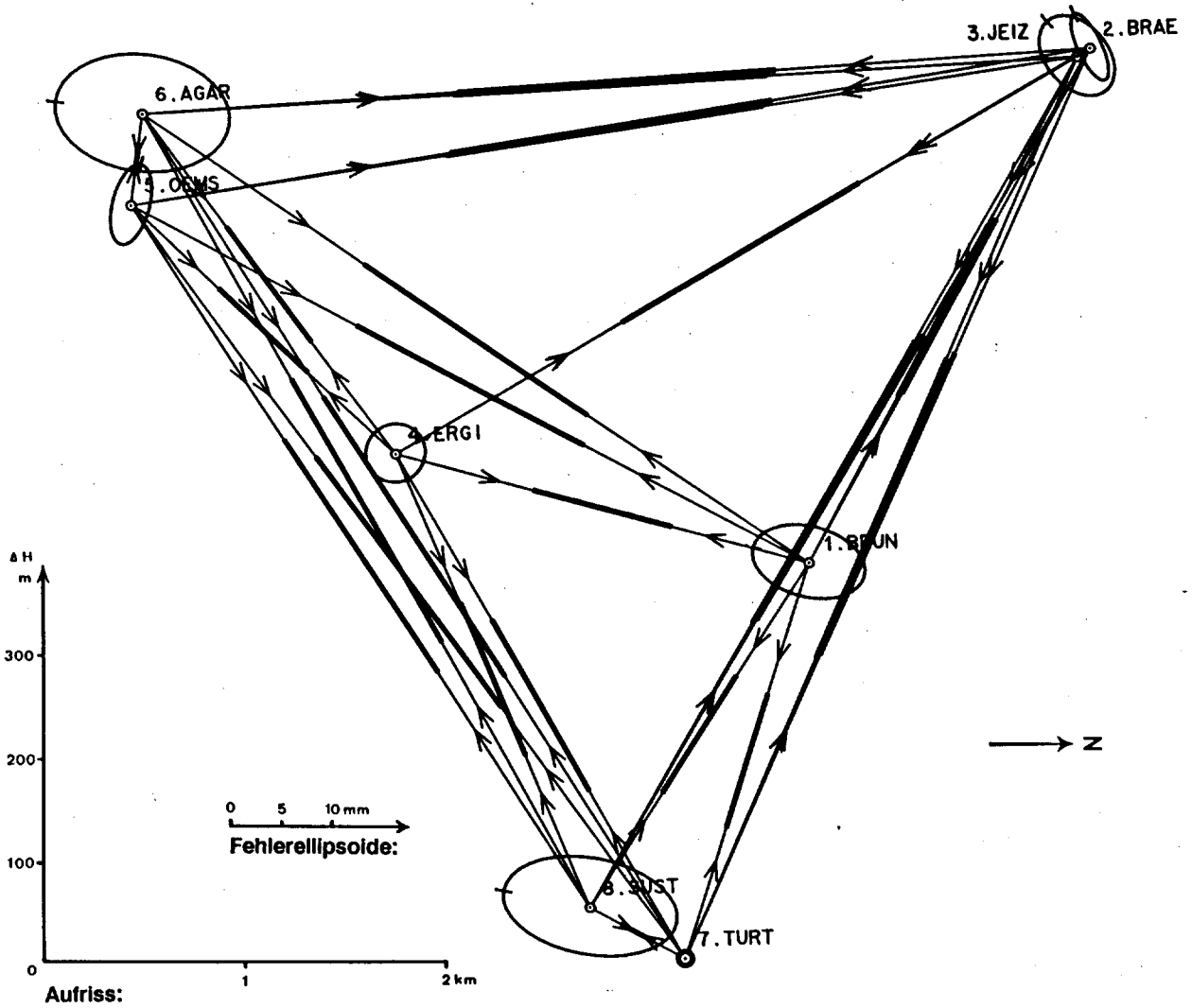


Abbildung 2.8-5: 3D-Testnetz Turtmann: Terrestrisches Hauptnetz, Netzplan mit mittleren Fehlerellipsoiden (Aufriss)

### 2.8.4 Beurteilung der Resultate

Bei der Beurteilung der einzelnen Beobachtungsgruppen bestätigt sich, dass die geschätzten Varianzfaktoren der Gruppen  $\hat{\sigma}_i$  (s. "Resultate der Ausgleichung", Tab.2.8-4) grösstenteils nahe bei ihrem Erwartungswert  $E(\hat{\sigma}_i) = 1$  liegen. Dies ist das Resultat der erfolgten Anpassung der stochastischen Modelle im Sinne der Varianzkomponenten-Schätzung [Welsch, 1984]. Abweichungen bei der Gesamtgruppe der Distanzen (Mekometer + Terrameter):  $\hat{\sigma}_0 = 1.18$  erklären sich dadurch, dass die stochastischen Ansätze der Untergruppen zwar einzeln im Sinne der Varianzkomponenten-Schätzung angepasst wurden, nicht aber diejenigen der Gesamtgruppe. Die Erhöhung des Gruppen-Varianzfaktors deutet auf eine verbleibende Inkonsistenz der beiden Gruppen hin, welche durch die unterschiedliche Art der Refraktionsbehandlung erklärt werden könnte. Ähnliches gilt auch für die Varianzfaktoren der Gesamtgruppe der astronomischen Längen und Breiten, bei welchen ebenfalls die a priori Ansätze der Untergruppen (Zenitkammermessungen / Lotabweichungen aus Geoidmodell) unverändert übernommen wurden.

Die Einführung der ellipsoidischen Höhendifferenz zwischen den beiden Talpunkten (7.TURT bzw. T0V 12 und 8.SUST bzw. T0V 33) brachte nicht ganz den gewünschten Erfolg. Die orthometrische Höhendifferenz aus Nivellement und Schwere:  $DH = -54.6661$  m (Beob.-Nr.239) wurde aus Kap.4.3.1 (Tab.4.3-4) übernommen. Wegen des kleinen Einflusses der orthometrischen Korrektur dürfte ihr mittlerer Fehler bei etwa 2-3 mm liegen (s. Tab.2.6-7). Das Programm RAUMTRI berücksichtigt die Geoidundulation  $N$  an den Endpunkten der Strecke automatisch (s. Output, Tab.2.8-4) wobei: 'IH' =  $N$  (7.TURT); 'SH' =  $N$  (8.SUST) den Undulationswerten aus dem Geoidmodell entspricht. Die ellipsoidische Höhendifferenz wird damit:  $DH(\text{ell.}) = 54.55820$  m. Die trigonometrischen Höhenübertragung im 3D-Netz (ohne die Verwendung von Nivellement und Schwere) ergab den Wert  $DH(\text{ell.}) = 54.5406$  m und unterscheidet sich damit um -17.6 mm. Diese Differenz ist vermutlich auf die nur schwer abschätzbare, begrenzte Genauigkeit des verwendeten Geoidmodells zurückzuführen. Um eine Verfälschung der räumlichen Lagerung des Netzes (Kippung) zu vermeiden, wurde für die ellipsoidischen Höhendifferenz aus Nivellement, Schwere und Geoidmodell ein mittlerer Fehler a priori von 12 mm angenommen und wegen der geringen Redundanz auf eine Varianzkomponenten-Schätzung verzichtet.

Abschliessend stellt sich die Frage, ob die beim Netzentwurf und der Präanalyse postulierten Ziele in Bezug auf die relative Genauigkeit des Netzes erreicht wurden. Aus dem Vergleich der mittleren Fehler a priori der Koordinaten (am Bsp. von Punkt 6.AGAR) von Variante 1 der Präanalyse in Kap. 1.4.5 (Tab.1.4-5) mit den mittlern Fehlern a posteriori im Output (Tab.2.8-4) ist ersichtlich, dass die projektierten mittleren Fehler in  $x$  (Nordwert) um ca. 24%, in  $y$  (Ostwert) um ca. 7% und in  $z$  (ell. Höhe) um ca. 18% unterschritten wurden. Damit können wir feststellen, dass die angestrebte Genauigkeit des terrestrischen Netzes nicht nur erreicht sondern sogar übertroffen wurde.

### 2.8.5 Ausgleichung des erweiterten Netzes mit exzentrischen Stationen

Die Ausgleichung Nr.22 enthält die 7 zusätzlichen exzentrischen GPS-Stationenpunkte: 2.GPS, 3.GPS, 3.GPS.E, 6.GPS, 7.1, 7.2 und 8.1. Die Beobachtungsdaten von Ausgleichung 19A wurden mit ihrem stochastischen Modell übernommen. Auf Station 6.GPS wurden 2 weitere Astro-Azimute zugefügt. Für die Bestimmung der exzentrischen Stationspunkte wurden zusätzliche Richtungs- und Distanzmessungen eingeführt.

In Tabelle 2.8-5 sind die Ausgleichungsergebnisse (nur Koordinaten und Fehlerellipsoide) zusammengestellt. Die berechneten Koordinaten der 8 Hauptpunkte stimmen bis auf wenige Zehntelmillimeter mit denjenigen in Kap.2.8-3 überein.

Tabelle 2.8-5: Resultate der 3D-Ausgleichung des erweiterten terrestrischen Netzes mit exzentrischen Stationen (Auszug aus dem RAUMTRI-Ausgabefile)

BA FUER LANDESTOPOGRAPHIE TITEL:3D-NETZ TURTMANN:TERR.NETZ 85-86 M.EXZ. WABERN, DEN 06.04.92 14:37  
PROGRAMM RAUMTRI VERSION: 12.10.89 SEITE 10

RESULTATE DER AUSGLEICHUNG ITERATION: 1

\*\*\*\*\*

				REDUND	SIGMA
15 PUNKTE	SUMME PVV	= 297.705	86 RICHTUNGEN	64.495	1.042
14 STATIONEN	SIGMAO	= 1.000	58 HOEHENWINKEL	47.995	1.032
85 UNBEKANNTE	MO	= 1.133	105 SCHRAEGDISTANZEN	80.842	1.296
1 REFR.KOEFF.	MO**2/SIGMAO**2	= 1.283	22 BREITEN	10.951	1.198
0 MASSSTAEBE			22 LAENGEN	12.222	0.916
317 BEOBACHTUNGEN			17 AZIMUTE	14.642	0.954
232 FREIHEITSGRADE			7 ELL.HOEHEN-DIFF.	0.854	1.319

DIE UNBEKANNTEN UND IHRE MITTL.FEHLER:

\*\*\*\*\*

NR	PUNKT		XO [m]	DX [mm]	XO+DX [m]	MX [mm]	B/L/H(e11) [g/m]	YKO/XKO/H(ortho) [m]
	7.TURT	X	4373700.0721		FESTPUNKT		51.45352004	620176.7100
		Y	591465.9898				8.55724999	128424.4280
		Z	4588963.1846				623.7572	622.4474
1	7.1	X	4373703.0547	0.06	4373703.0548	0.17	51.45345999	620186.5912
2	7.1	Y	591476.3449	-0.48	591476.3445	0.19	8.55739223	128418.4546
3	7.1	Z	4588959.0356	0.01	4588959.0356	0.16	623.7575	622.4474
4	7.2	X	4373707.2524	0.23	4373707.2526	0.16	51.45343953	620166.2415
5	7.2	Y	591456.3698	-0.33	591456.3695	0.22	8.55709859	128416.3394
6	7.2	Z	4588957.6245	-0.17	4588957.6244	0.16	623.7616	622.4474
7	1.BRUN	X	4373824.5919	-14.55	4373824.5773	5.56	51.46041903	617522.6153
8	1.BRUN	Y	588806.6330	-3.37	588806.6296	1.14	8.51899381	129106.2996
9	1.BRUN	Z	4589719.3200	-7.48	4589719.3125	4.24	1010.1197	1008.8719
10	2.BRAE	X	4372830.4517	-7.60	4372830.4441	3.70	51.47522903	619560.4817
11	2.BRAE	Y	590733.7589	1.51	590733.7605	4.36	8.54846245	130594.1079
12	2.BRAE	Z	4591102.8454	-6.49	4591102.8389	1.86	1508.1799	1506.8178
13	3.JEIZ	X	4372570.7257	-0.66	4372570.7251	4.36	51.47449376	621848.7773
14	3.JEIZ	Y	593007.9337	0.68	593007.9344	4.69	8.58147897	130528.4027
15	3.JEIZ	Z	4591046.2479	-13.21	4591046.2347	3.23	1500.1556	1498.7512
16	3.GPS	X	4372533.8010	-5.24	4372533.7958	4.48	51.47516606	621906.9494
17	3.GPS	Y	593061.8847	2.56	593061.8873	4.85	8.58232191	130595.8680
18	3.GPS	Z	4591112.9270	-16.39	4591112.9106	3.32	1528.1195	1526.7109
19	3.GPS.E	X	4372530.6592	-5.00	4372530.6542	4.49	51.47519988	621912.2637
20	3.GPS.E	Y	593066.8353	2.27	593066.8376	4.86	8.58239878	130599.2710
21	3.GPS.E	Z	4591115.2643	-16.59	4591115.2477	3.33	1528.1197	1526.7109
22	4.ERGI	X	4374840.7897	-26.56	4374840.7632	3.34	51.43988903	621560.9933
23	4.ERGI	Y	593012.7150	-16.43	593012.6986	2.77	8.57714795	127065.6014
24	4.ERGI	Z	4588389.4053	-22.73	4588389.3826	3.13	1133.1974	1131.8046
25	5.OEMS	X	4376221.2408	-20.42	4376221.2204	2.18	51.42722683	619334.3143
26	5.OEMS	Y	590947.8771	-11.14	590947.8660	6.09	8.54497708	125791.3716
27	5.OEMS	Z	4587697.4949	-15.50	4587697.4794	3.89	1387.0525	1385.6396
28	6.AGAR	X	4376655.9357	-39.53	4376655.8961	7.29	51.42803677	616102.5303
29	6.AGAR	Y	587745.1673	-6.22	587745.1611	6.78	8.49838233	125862.9167
30	6.AGAR	Z	4587818.2641	-11.72	4587818.2524	7.11	1476.6660	1475.3445

NR	PUNKT		X0 [m]	DX [mm]	X0+DX [m]	MX [mm]	B/L/H(e11) [g/m]	YKO/XKO/H(ortho) [m]
31	6.GPS	X	4376666.2617	-37.19	4376666.2245	7.25	51.42780835	616136.3430
32	6.GPS	Y	587780.6080	0.52	587780.6085	6.82	8.49886899	125840.1574
33	6.GPS	Z	4587800.8390	-15.07	4587800.8239	7.08	1474.4035	1473.0793
34	8.SUST	X	4374614.2525	-22.66	4374614.2299	7.89	51.44898194	616048.6761
35	8.SUST	Y	587422.2902	-11.41	587422.2788	2.10	8.49768610	127958.0681
36	8.SUST	Z	4588688.9957	4.55	4588689.0002	6.33	678.3008	677.0989
37	8.1	X	4374623.6345	-22.47	4374623.6121	7.91	51.44887807	616034.1555
38	8.1	Y	587408.8709	-11.74	587408.8592	2.14	8.49747626	127947.6389
39	8.1	Z	4588681.8174	4.41	4588681.8219	6.35	678.3008	677.0989
40	2.GPS	X	4372834.1087	-8.25	4372834.1004	3.72	51.47520855	619544.1452
41	2.GPS	Y	590717.7571	2.70	590717.7598	4.36	8.54822662	130592.0068
42	2.GPS	Z	4591101.4299	-6.02	4591101.4239	1.89	1508.1793	1506.8178
			ORI [g]	DX(I) [cc]	ORI+DX [g]	MX [cc]	XI/ETA [cc]	
43	7.TURT	OM	316.221634	-16.38	316.219996	1.79		
44	7.TURT	AB	51.453520	-3.35	51.453185	1.23	-3.35	
45	7.TURT	AL	8.557250	-26.45	8.554605	1.60	-18.27	
46	7.1	OM	293.159267	-18.41	293.157426	4.86		
47	7.1	AB	51.453460	1.80	51.453640	3.43	1.80	
48	7.1	AL	8.557392	-25.10	8.554883	4.57	-17.34	
49	7.2	OM	264.001840	-20.47	263.999794	5.34		
50	7.2	AB	51.453440	1.47	51.453587	3.43	1.47	
51	7.2	AL	8.557099	-25.51	8.554548	4.57	-17.62	
52	1.BRUN	OM	129.971460	-14.38	129.970023	2.05		
53	1.BRUN	AB	51.460419	-27.38	51.457681	1.91	-27.38	
54	1.BRUN	AL	8.518994	-31.08	8.515886	2.23	-21.47	
55	2.BRAE	OM	240.384411	-3.57	240.384054	1.92		
56	2.BRAE	AB	51.475229	-59.91	51.469238	1.24	-59.91	
57	2.BRAE	AL	8.548462	-33.42	8.545121	1.72	-23.08	
58	3.JEIZ	OM	205.510547	-18.27	205.508719	1.84		
59	3.JEIZ	AB	51.474494	-56.56	51.468838	1.29	-56.56	
60	3.JEIZ	AL	8.581479	-9.01	8.580578	1.71	-6.22	
61	3.GPS	OM	212.375382	-9.16	212.374466	5.95		
62	3.GPS	AB	51.475166	-53.91	51.469775	3.43	-53.91	
63	3.GPS	AL	8.582322	-12.25	8.581096	4.58	-8.46	
64	3.GPS.E	OM	212.450256	-9.40	212.449316	4.94		
65	3.GPS.E	AB	51.475200	-53.74	51.469826	3.43	-53.74	
66	3.GPS.E	AL	8.582399	-12.34	8.581164	4.58	-8.52	
67	4.ERGI	OM	330.014312	-22.41	330.012071	1.90		
68	4.ERGI	AB	51.439889	52.04	51.445093	1.28	52.04	
69	4.ERGI	AL	8.577148	-37.50	8.573398	1.65	-25.91	
70	5.OEMS	OM	67.114545	-23.27	67.112219	1.96		
71	5.OEMS	AB	51.427227	74.22	51.434649	1.23	74.22	
72	5.OEMS	AL	8.544977	-19.66	8.543011	1.71	-13.59	
73	6.AGAR	OM	26.442925	-24.49	26.440477	2.11		
74	6.AGAR	AB	51.428037	80.09	51.436045	1.29	80.09	
75	6.AGAR	AL	8.498382	-19.12	8.496470	1.77	-13.21	
76	6.GPS	OM	25.723673	-13.60	25.722313	5.43		
77	6.GPS	AB	51.427808	80.33	51.435841	3.42	80.33	
78	6.GPS	AL	8.498869	-17.40	8.497129	3.20	-12.02	

NR	PUNKT		ORI [g]	DX(I) [cc]	ORI+DX [g]	MX [cc]	XI/ETA [cc]
79	8.SUST	OM	58.036665	-14.23	58.035242	1.88	
80	8.SUST	AB	51.448982	15.97	51.450579	1.31	15.97
81	8.SUST	AL	8.497686	-24.40	8.495246	1.61	-16.86
82	8.1	OM	58.059399	-7.66	58.058633	5.16	
83	8.1	AB	51.448878	19.65	51.450843	3.43	19.65
84	8.1	AL	8.497476	-27.11	8.494766	4.58	-18.72
85		RE(1)	0.0000	-0.0670	-0.0670	0.0093	

## BERECHNUNG DER FEHLERELLIPSOIDE (IM LOKALEN KARTESISCHEN KOORDINATENSYSTEM DES FESTPUNKTES

\*\*\*\*\*

PUNKT	M.F. MXYZ [mm]	EBENE	PROJEKTIONSELLIPSEN			ELLIPSOIDE:				
			THETA [g]	HA1 [mm]	HA2 [mm]	HALBACHSEN [mm]	XYZ [mm]	BXYZ [mm]	CXYZ [mm]	
7.1	0.195	X-Y	46.33	0.22	0.16	A=	0.22	0.16	-0.11	0.00
	0.189	Y-Z	0.00	0.19	0.11	B=	0.16	0.14	0.12	0.00
	0.113	Z-X	100.00	0.20	0.11	C=	0.11	0.00	0.00	0.11
7.2	0.196	X-Y	-68.17	0.22	0.19	A=	0.22	0.11	0.17	0.00
	0.213	Y-Z	0.01	0.21	0.11	B=	0.19	-0.19	0.09	0.00
	0.113	Z-X	99.99	0.20	0.11	C=	0.11	0.00	0.00	0.11
1.BRUN	5.627	X-Y	14.77	5.78	0.63	A=	5.91	5.56	0.87	0.12
	1.465	Y-Z	98.40	3.92	1.46	B=	3.75	1.24	0.64	-0.45
	3.915	Z-X	-80.98	5.78	3.69	C=	0.47	-1.56	3.59	0.05
2.BRAE	1.859	X-Y	81.33	4.62	1.35	A=	4.64	1.47	-1.09	0.33
	4.443	Y-Z	1.82	4.44	3.50	B=	3.71	4.36	0.87	-0.09
	3.499	Z-X	-25.91	3.77	1.20	C=	0.36	-0.63	3.44	0.13
3.JEIZ	3.776	X-Y	-54.54	5.60	1.19	A=	5.70	3.74	0.01	0.49
	4.303	Y-Z	22.70	4.32	4.16	B=	4.16	-4.01	1.51	0.40
	4.182	Z-X	-41.31	4.68	3.14	C=	0.65	-1.55	-3.88	0.16
3.GPS	3.915	X-Y	-54.48	5.80	1.25	A=	5.90	3.88	0.03	0.53
	4.452	Y-Z	18.35	4.47	4.27	B=	4.27	-4.16	1.53	0.43
	4.283	Z-X	-42.28	4.81	3.25	C=	0.71	-1.56	-3.99	0.17
3.GPS.E	3.927	X-Y	-54.43	5.81	1.25	A=	5.91	3.89	0.04	0.53
	4.460	Y-Z	17.74	4.48	4.27	B=	4.27	-4.17	1.52	0.43
	4.284	Z-X	-42.50	4.81	3.26	C=	0.71	-1.55	-3.99	0.17
4.ERGI	3.010	X-Y	51.19	4.26	0.79	A=	4.30	2.86	-0.92	-0.21
	3.117	Y-Z	-47.35	3.50	2.60	B=	3.08	3.11	0.09	0.21
	3.043	Z-X	42.33	3.10	2.96	C=	0.31	-0.80	-2.94	0.07
5.OEMS	2.142	X-Y	-80.44	6.14	1.12	A=	6.14	1.83	1.06	-0.34
	5.864	Y-Z	7.22	5.88	4.07	B=	4.23	-5.86	0.17	-0.11
	4.101	Z-X	17.97	4.24	1.86	C=	0.37	-0.23	4.09	0.09
6.AGAR	8.710	X-Y	-36.79	10.37	1.09	A=	10.46	8.60	1.35	-0.23
	5.740	Y-Z	56.50	6.85	4.87	B=	6.06	-5.72	0.31	-0.37
	6.136	Z-X	-89.69	8.77	6.05	C=	0.44	-1.67	5.90	0.07
6.GPS	8.646	X-Y	-37.27	10.35	1.14	A=	10.44	8.53	1.37	-0.29
	5.795	Y-Z	55.62	6.87	4.90	B=	6.06	-5.77	0.30	-0.46
	6.137	Z-X	-89.53	8.71	6.05	C=	0.55	-1.68	5.90	0.09

PUNKT	M.F.		PROJEKTIONSELLIPSEN			ELLIPSOIDE:				
	MXYZ [mm]	EBENE	THETA [g]	HA1 [mm]	HA2 [mm]	HALBACHSEN [mm]	AXYZ [mm]	BXYZ [mm]	CXYZ [mm]	
8.SUST	8.692	X-Y	-7.12	8.75	0.64	A=	8.89	8.63	-1.07	0.07
	1.162	Y-Z	97.28	5.26	1.14	B=	5.01	-0.96	0.15	0.63
	5.253	Z-X	-86.02	8.84	5.01	C=	0.64	-1.91	-4.89	0.00
8.1	8.728	X-Y	-7.22	8.78	0.72	A=	8.92	8.66	-1.06	0.08
	1.227	Y-Z	97.20	5.26	1.21	B=	5.01	-0.98	0.15	0.72
	5.255	Z-X	-86.14	8.87	5.01	C=	0.72	-1.90	-4.90	0.00
2.GPS	1.915	X-Y	80.81	4.64	1.39	A=	4.66	1.51	-1.09	0.44
	4.449	Y-Z	1.81	4.45	3.50	B=	3.71	4.36	0.89	-0.13
	3.500	Z-X	-26.29	3.78	1.28	C=	0.49	-0.65	3.44	0.17

### 2.8.6 Terrestrische Lösung ("ground truth")

In Tabelle 2.8-6 sind abschliessend die Koordinaten aller für die Stationierung mit GPS geeigneten Punkte zusammengestellt. Dieser "ground truth" genannte Datensatz soll den Koordinatenvergleichen mit Lösungen von GPS-Testkampagnen dienen. Der Teil 2 dieser Publikationsreihe soll diesen Untersuchungen gewidmet werden.

Punktbezeichnung	X	Y	Z
	[m]	[m]	[m]
7.TURT	4373700.0721	591465.9898	4588963.1846
7.1	4373703.0548	591476.3445	4588959.0356
7.2	4373707.2526	591456.3695	4588957.6244
1.BRUN	4373824.5773	588806.6296	4589719.3125
2.BRAE	4372830.4441	590733.7605	4591102.8389
3.JEIZ	4372570.7251	593007.9344	4591046.2347
3.GPS	4372533.7958	593061.8873	4591112.9106
3.GPS.E	4372530.6542	593066.8376	4591115.2477
4.ERGI	4374840.7632	593012.6986	4588389.3826
5.OEMS	4376221.2204	590947.8660	4587697.4794
6.AGAR	4376655.8961	587745.1611	4587818.2524
6.GPS	4376666.2245	587780.6085	4587800.8239
8.SUST	4374614.2299	587422.2788	4588689.0002
8.1	4374623.6121	587408.8592	4588681.8219
2.GPS	4372834.1004	590717.7598	4591101.4239

Tabelle 2.8-6: "Ground truth": Geozentrisch-kartesische Koordinaten der Stationspunkte und der GPS-Exzentren im Schweizer Datum (s. Kap.2.8-1)



## Literatur

- Bauersima, I. und M. Schürer (1976): Rationelle Behandlung der dreidimensionalen Geodäsie. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 7/1976.
- Bender, P.L. and J.C. Owens (1965): Correction of Optical Distance Measurements for the Fluctuative Atmospheric Index of Refraction. *Journal of Geophysical Research, Vol.70, No.10.*
- Bernauer, I. und A. Geiger (1986): Lokale Schwerfeldbestimmung und gravimetrische Modellrechnungen im Satelliten (GPS)-Testnetz "Turtmann" (Wallis). *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Bd.38, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.*
- Edlen, B. (1966): The Refractive Index of Air. *Metrologia, Vol.2, No.2, S.71.*
- Elmiger, A. und U. Meyer (1981): Zur Bestimmung und Berücksichtigung der Stehachsenschiefe bei der Richtungsmessung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 6/1981.
- Gervaise, J. (1984,I): Results of the geodetic measurements carried out at CERN with the Terrameter, a two-wavelength Electromagnetic Distance Measurement Instrument. *Ingenieurvermessung 84, Beiträge zum IX. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Bd.1, Dümmler, Bonn.*
- Gervaise, J. (1984,II): Résultats de mesures géodésiques avec le Terramètre, appareil électronique de mesure de distance à deux longueurs d'ondes. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 6/1984, S.198-194.
- Gervaise, J. (1984,III): Applied Geodesy for CERN Accelerators. *Seminar on High Precision Geodetic Measurements, University of Bologna, 16. - 17. 10. 1984.*
- Gubler, E. (1991): UELN and the Swiss National Levelling Net. *Report on the Geodetic Activities in the Years 1987 to 1991 presented to the XXth General Assembly of the IUGG in Vienna, August 1991, SGK, Zürich.*
- Gurtner, W. (1976): Eine Präzisionszentrivorrichtung. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 5/1976.
- Gurtner, W. (1978): Das Geoid in der Schweiz. *Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz. Bd.32, Schweizerische Geodätische Kommission, Zürich.*
- Höpcke, W. (1969): Einige Ergänzungen zur Theorie der Richtungsmessungen. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 3/1969.
- Hübner, W. (1983): Streckenmessung mit dem Mekometer ME-3000 nach dem Zweifarbenprinzip. *Beitrag zum Geodätischen Seminar der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 11.*
- Huggett, G.R. and L.E. Slater (1975): Precision Electromagnetic Distance-Measuring Instrument for Determining Secular Strain and Fault Movement. *Tectonophysics, Vol.29, p.19-27.*
- Huggett, G.R. (1981): Two-colour Terrameter. *Tectonophysics* 71, p.29-39.
- Jeanrichard, F. (1974): Essais de mesures géodésiques des mouvements horizontaux de la croûte terrestre. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 3/1974.
- Meier, D. und R. Loser (1986): Das Mekometer ME 5000 - Ein neuer Präzisionsdistanzmesser. *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 5/1986.

- Prilepin, M.T. (1957): Light Modulating Method for Determining the Average Index of Refraction of Air along a Line. *Translation, Institute of Geodesy, Aeronomy and Cartography, USSR, Nr.114, p.127-130.*
- Rüeger, J.M. (1990): Electronic Distance Measurement. *3rd Edition, Springer, Berlin.*
- Ryf, A. (1986): Distanzreduktion mit Flugzeugmeteo. *Interner Bericht. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.*
- Savage, J.C. and W.H. Prescott (1973): Precision Geodolite Distance Measurements for Determining Fault Movements. *Journal of Geophysical Research, Vol.78, p. 6001-6008.*
- Schmitt, J. (1986): Réseau test de Turtmann: Campagne de mesures Terramètre réalisées du 6 au 9 octobre 1986 pour le compte de l'Office Fédéral de Topographie. *Interner Technischer Bericht CERN, Genf.*
- Schneider, D. und N. Wunderlin (1981): RAUMTRI, Dreidimensionale Netzausgleichung in einem geozentrischen kartesischen Koordinatensystem. Programmbeschreibung / Benutzeranleitung. *Bericht Nr.45 aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.*
- Schneider, D. (1983): Anschaffung eines elektronischen Theodoliten. Test: E2-T2000. *Überarbeiteter Testbericht an die Instrumentenfirmer, L + T.*
- Walser, F. (1987): Automatisierung im Bereich der astro-geodätischen Mess- und Auswertetechnik. *Bericht Nr.128 aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.*
- Welsch, W. (1984): Zur Nutzbarmachung der Varianz-Komponenten-Schätzung für praktische vermessungstechnische Aufgaben. *Beiträge zum IX. Internat. Kurs für Ingenieurvermessung, Graz, 6. - 13. Sept. 1984, Dümmler, Bonn.*
- Wunderlin, N. (1987): Versuche zur Refraktionsbestimmung mit Hilfe der Kollokation. FORTRAN - Programm REFKOL, Beschreibung und Gebrauchsanleitung. *Bericht Nr.132 aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich.*

### 3. Meteo-Erfassung und troposphärische Reduktion der Streckenmessungen

(Autoren: B. Neiningen\* und R. Köchle\*\*)

#### 3.1 Zusammenfassung

Zusammen mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH wurden am Laboratorium für Atmosphärenphysik der ETH Instrumente und Methoden entwickelt und eingesetzt, welche zum Ziel hatten, die Atmosphäre entlang terrestrischer Visuren und Verbindungslinien zu GPS-Satelliten derart zu sondieren, dass Refraktionskorrekturen zur Verbesserung elektromagnetischer Distanzmessungen angebracht werden konnten. Als Messträger kamen Flugzeuge zum Einsatz (primär Motorsegler). Die im Laufe der verschiedenen Vermessungsprojekte entwickelte Software umfasste die Datenaufbereitung, die 4-d-Interpolation auf die Visuren und die iterativ bestimmte 3-d-Refraktion im interpolierten Refraktivitätsfeld.

Im Testnetz Turtmann wurde die Methodik in zwei Kampagnen angewandt: 14.10.-17.10.86 mit Meteo-Erfassung an der Seilbahn Gampel-Jeizinen und 30.6.-3.7.86 mit Meteo-Erfassung mit dem Motorsegler ASK-16 HB-2038 der ETH und der zweimotorigen Gulfstream I G-159 des Bundesamtes für Zivilluftfahrt, für deren Benützung an dieser Stelle ausdrücklich gedankt sei.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit war geprägt durch intensive gegenseitige Lernprozesse, welche trotz zum Teil recht improvisierter Werkzeuge und praktischer Schwierigkeiten im Feld zu einem erstaunlich guten Ziel führten: Die Ausgleichsrechnungen von Schneider (1987) gaben für 35 von 56 Mekometer(ME-5000)-Distanzen einen

" m.F. a priori  $\sigma_D^2$  von  $(0.3 \text{ mm})^2 + (1.5 \cdot 10^{-7} D)^2$  " an.

Diese erreichte Präzision von 0.15 ppm steht 0.5 ppm für alleinige Boden-Meteo-Erfassung oder 0.3 ppm für Terrameter-Distanzen gegenüber. Die verbleibenden 14 Distanzen mit Flugmeteo, welche auch "nur" ein  $\sigma_D$  zwischen 0.3 und 0.5 ppm aufwiesen, waren mit identifizierbaren und behebbaren Problemen behaftet.

Leider konnte die Verbesserung von GPS-Distanzen mithilfe von in-situ-Meteo-Erfassung in der freien Atmosphäre mit diesem Datensatz noch nicht untersucht werden, da zur Zeit der Befliegung keine GPS-Messungen vorgenommen werden konnten (Zeitfenster). Diese Untersuchungen wurden später (Sept. 88) im Testnetz Heerbrugg nachgeholt, sind jedoch noch nicht ausgewertet (4-d-Meteodaten stehen jedoch zur Verfügung).

#### 3.2 Einführung in die interdisziplinäre Problemstellung

Der Einfluss des thermodynamisch-chemischen Zustandes der Atmosphäre auf die Ausbreitung von Licht- und Radiowellen ist weitgehend bekannt, und wird in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 für die hier typisch vorzufindenden Verhältnisse diskutiert. Seit die geräteseitigen Genauigkeiten der Distanzmessungen in den sub-ppm-Bereich vorgestossen sind, genügt es für die Behandlung dieser Refraktions-Effekte meist nicht mehr, einfache Atmosphärenmodelle wie z.B. eine Standardatmosphäre zu verwenden.

\* Institut für Atmosphärenphysik der ETH, CH-8093 Zürich und MetAir AG, CH-8308 Illnau.

\*\* Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH, CH-8093 Zürich.

Für die Lösung dieses Problems können grundsätzlich zwei Wege beschritten werden: Entweder man erhöht den theoretischen Aufwand, um differenziertere und der Saison sowie der geographischen Lage angepasste Modellatmosphären zu entwickeln, oder man unternimmt Anstrengungen, den aktuellen Zustand der durchstrahlten Atmosphäre während Distanzbestimmungen messtechnisch zu erfassen. Die Wahl des Weges ist ein Optimierungsproblem: Soll eine operationelle Methode entwickelt werden, welche häufig angewendet werden soll, so sind individuelle (in-situ-)Messungen ungeeignet, weil enorm aufwendig. Handelt es sich jedoch wie im Projekt "Testnetz Turtmann" um einzelne Messkampagnen, so ist eine intensive dreidimensionale Beobachtung der atmosphärischen Parameter Druck, Temperatur und Feuchte, welche den Brechungsindex primär definieren, möglich. Solche Beobachtungen können auch Datensätze zur Entwicklung und Verifizierung von Modellen liefern.

Sowohl der theoretische Lösungsansatz, wie der messtechnische, umfasst eine Vielzahl möglicher Wege: Modellatmosphären sind in der Geodäsie zur Zeit hauptsächlich als statistische Mittelwerte mit mehr oder weniger vielen Abhängigkeiten (Klassen) gebräuchlich (z.B. Bean and Dutton, 1966). Die angewandte theoretische Meteorologie stellt heute allerdings in zunehmendem Mass auch komplexe dynamische numerische Modelle zur Verfügung, welche die Atmosphäre aufgrund physikalischer Zusammenhänge auf verschiedenen Skalen simuliert (z.B. Schumann, 1989). Allerdings stehen solche Modelle noch in der Entwicklungsphase, und benötigen zu ihrem Einsatz permanentes Fachpersonal und leistungsfähigste Computer.

Messtechnisch stehen grundsätzlich zwei Wege offen: In-situ-Messung oder Fernerkundung ("remote sensing"). Auch hier steht letzterer aber noch in den "Kinderschuhen", und um eine stark inhomogene Atmosphäre - wie die Gebirgsatmosphäre es zweifellos ist - auf ihre Wasserdampf- und Temperaturverteilung hin zu sondieren, kommt man heute noch kaum ohne in-situ-Messungen aus, welche notgedrungenermassen ein Luftfahrzeug erfordern. Als klassische Messträger kommen dabei oft gefesselte oder freie Ballone mit Telemetriesonden (Radiosonden) zum Einsatz. Aber auch Flugzeuge haben in der Atmosphärenforschung eine lange Tradition (→ Kap. 3.3.1).

Zuletzt lässt sich auch die geodätische Vorgehensweise in zwei grundsätzlich verschiedene Methoden der Distanzbestimmung unterteilen: Terrestrische Visuren und Satellitengeodäsie. Hier läuft der Trend offenbar schnell und eindeutig zur GPS-gestützten Satellitengeodäsie, welche statt der meteorologischen Verhältnisse entlang einer terrestrischen Punkt-zu-Punkt-Verbindung diejenigen entlang der Verbindungslinien von einem Messpunkt zu den "sichtbaren" Satelliten erfordert. Für das Kombinieren von meteorologischen Messungen zur Refraktionskorrektur mit den geodätischen Messungen ist allerdings in beiden Fällen die vierdimensionale Koinzidenz erforderlich, d.h. es muss möglichst simultan und am selben Ort gemessen werden. Diese scheinbar triviale Rahmenbedingung ist von Messungen kaum ideal zu erfüllen, weshalb für die Auswertung von kombinierten meteorologisch-geodätischen Beobachtungen auch vierdimensionale Interpolationen nötig sind. Nebst den eigentlichen Refraktionskorrekturen sollen diese relativ ausführlich behandelt werden, da die Interpolationsmethode insbesondere bei schlechter Koinzidenz durchaus einen wesentlichen Einfluss auf die Resultate haben kann.

### 3.2.1 Diskussion der Einflussgrößen der atmosphärischen Refraktion

Die Einflüsse der Atmosphäre auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen sind in der geodätischen Literatur ausführlich diskutiert (z.B. Brunner, 1984 und 1988; Bean and Dutton, 1966; Hurni, 1987). Die hier zur Anwendung gelangenden Formeln für die Brechungsindizes von Licht und Mikrowellen stammen von Barrel und Sears, bzw. Essen und Froome, welche der Arbeit von Steudler (1984) entnommen sind.

$$(n_L - 1) = (1 / (1 + \alpha \cdot t)) \cdot (p \cdot (n_{Gr} - 1) / 1013.25 - e \cdot 4.1 \cdot 10^{-8}),$$

wobei

$$(n_{Gr} - 1) \cdot 10^7 = 2876.04 + 3 \cdot 16.288 / \lambda^2 + 5 \cdot 0.136 / \lambda^4; \quad (3.2.1 \text{ a})$$

$$(n_M - 1) \cdot 10^6 = (77.64) \cdot (p - e) / T + e \cdot 64.68 \cdot (1 + 5748 / T) / T; \quad (3.2.1 \text{ b})$$

$n_L$  : Brechungsindex für Licht und Infrarot;  
 $\lambda$  : Trägerwellenlänge [ $\mu\text{m}$ ];  
 $n_M$  : Brechungsindex für Mikrowellen;  
 $\alpha$  :  $273.16^{-1}$ ;  
 $t$  : Lufttemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $T$  : Lufttemperatur [K];  
 $e$  : Wasserdampfdruck [hPa];  
 $p$  : Luftdruck [hPa];

Die zusammengefassten wichtigsten Eigenschaften für die Ausbreitung von Mikrowellen sind demnach fehlende Dispersion und primäre Sensitivität auf den Wasserdampfgehalt. Die Lichtausbreitung hingegen hängt nur schwach von der Feuchtigkeit ab, ist primär Druck- und Temperaturabhängig (Dichte) und unterliegt einer deutlichen Dispersion. Die fehlende Dispersion bei Mikrowellen verhindert denn auch die Möglichkeit, durch "Mehrfarbenmessung" die Refraktion zu eliminieren, wohingegen diese Eigenschaft beim optischen Terrameter (vgl. 3.1) ausgenutzt wird. Die Formeln (3.2.1 a und b) sind in der Figur 1 mit den je zwei wichtigsten unabhängigen Variablen grafisch dargestellt (Neining, 1989).

Das Brechungsindexfeld beeinflusst in erster Ordnung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen (Laufzeitverschiebungen). Infolge der Brechgesetze wird an Brechungsindexinhomogenitäten jedoch auch der Strahlverlauf verändert (im folgenden als geometrische Brechung bezeichnet).

Für die Berechnung des dreidimensionalen Strahlverlaufs im allgemeinen inhomogenen Brechungsindexfeld wurden von Köchle (1984) folgende Vektorgleichungen mitgeteilt:

$$\underline{k} = (\underline{\text{grad}}(n) - (\underline{\text{grad}}(n) \cdot \underline{t}) \cdot \underline{t}) / n \quad (3.2.1 \text{ c})$$

und

$$\underline{k} = \underline{\text{grad}}(\ln(n)) - (\underline{\text{grad}}(\ln(n)) \cdot \underline{t}) \cdot \underline{t}; \quad (3.2.1 \text{ d})$$

vektorielle Größen sind unterstrichen;

$\underline{t}$  : Richtung des Lichtstrahls (Tangentialeinheitsvektor);

$\underline{k}$  : Krümmungsvektor;

$n$  : Brechungsindex (Licht oder Mikrowellen);

In üblichen Modellatmosphären folgen Licht- und Mikrowellen nach analytischer Lösung der Gleichungen (3.2.1 a-d) Kreisbogen, deren Krümmung man als relative Strahlenkrümmung (Hurni, 1987) oder Refraktionskoeffizienten  $\kappa$  (Steudler, 1984) angibt:

$$\kappa = R_{\text{Erde}} / R_{\text{Strahlbogen}} \quad (3.2.1 \text{ e})$$

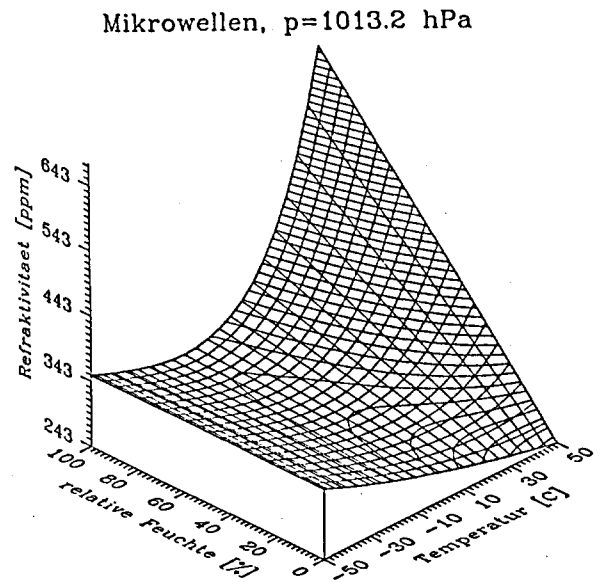
Typische Werte für  $\kappa$  sind 0.25 für Mikrowellen in einer durchmischten Tagesatmosphäre und 0.5 in einer stärker geschichteten Nachtatmosphäre (vgl. 3.2.2). Für Licht wird üblicherweise ein Wert von 0.13 verwendet

(Stuedler, 1984). Diese Werte müssen aber besonders für die Wellenpropagation in einer komplex inhomogenen Gebirgsatmosphäre als problematische "Faustregeln" bezeichnet werden, weshalb in dieser Arbeit die Gleichung (3.2.1 d) numerisch gelöst und iterativ zwischen Sender und Empfänger eingepasst wurde.

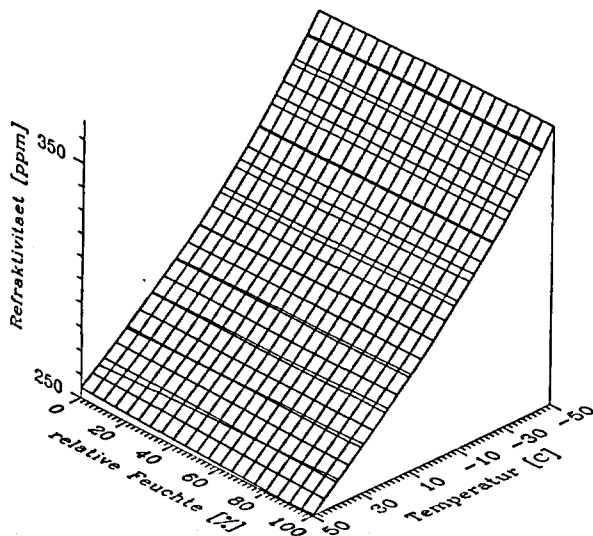
**Fig. 1:** a) *Mit zunehmender Temperatur wird der Wasserdampfdruck  $e$  bei gleicher relativer Feuchte exponentiell grösser. Die Abhängigkeit der Refraktivität  $N = (n-1) \cdot 10^6$  nimmt mit steigender Feuchte stark zu. Bei trockener Luft ist die Temperaturabhängigkeit vergleichsweise gering.*

b) *Die Refraktivität für Licht zeigt keine solche Feuchtigkeitsabhängigkeit.*

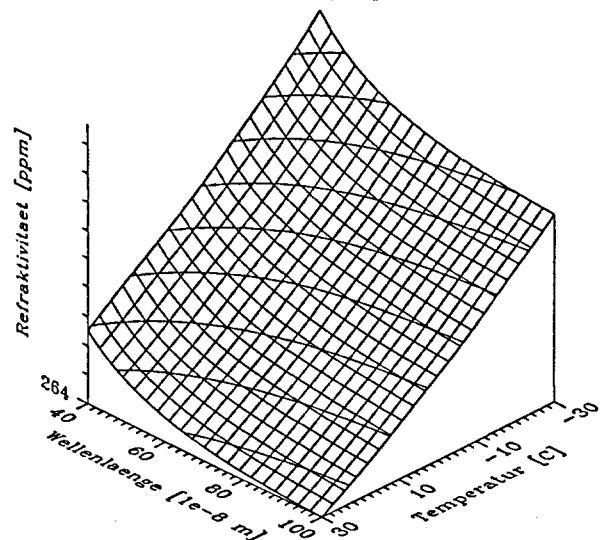
c) *Die Refraktivität für Licht unterliegt aber speziell im kurzwelligen (blauen) Bereich einer Wellenlängenabhängigkeit (Dispersion).*



Licht,  $p=1013.2 \text{ hPa}$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$



Licht,  $f = 0.0 \%$ ,  $p=1013.3 \text{ hPa}$



### 3.2.2 Tagesgang der Atmosphäre, Besonderheiten im Gebirge

Eine Einführung in die allgemeine Meteorologie findet sich in Liljequist (1983); für die Gebirgsmeteorologie kann auf Barry (1981) oder Yoshino (1975) verwiesen werden. Für die Vertiefung des theoretischen Verständnisses der bodennahen Grenzschicht stehen Arbeiten in Brunner (1984 und 1988), von Panofsky et al. (1984), Kraus (1970) oder Becker und Löbel (1985) zur Verfügung. Im folgenden wird aber auf eine detaillierte theoretische Diskussion verzichtet, und die für die Geodäsie im Gebirge relevanten Phänomene sollen anhand von beobachteten Beispielen und einer qualitativen Diskussion behandelt werden.

Die Atmosphäre ist auf allen Skalen ein dynamisch, thermisch und bezüglich Wasserdampf auch von der Zusammensetzung her instationäres, anisotropes und inhomogenes Gasmisch. In der folgenden Diskussion wollen wir uns auf die untere Hälfte der Troposphäre beschränken, wo sich der Grossteil des Wasserdampfes befindet (Scale Height für Wasserdampf beträgt im Mittel nach Bean and Dutton (1966) um 2 km, d.h., dass sich 80 % des Wasserdampfes unterhalb von 3 km Höhe befinden). Die bodennahe Atmosphäre (PBL: Planetary Boundary Layer, i.a. einige  $10^2$  m), welche dadurch definiert ist, dass in ihr der Austausch physikalischer und chemischer Eigenschaften zwischen der Erdoberfläche und der höheren Atmosphäre stattfindet, wird tagesperiodisch verändert (Fig. 2): Das nicht reflektierte Sonnenlicht wird vom Boden (und nur zu einem verschwindenden Teil von der Luft direkt) absorbiert. Mit der absorbierten Energie wird einerseits die Luft im Kontakt mit dem Boden erwärmt (fühlbare Wärme) und andererseits wird auch Wasser verdunstet und damit Energie abgeführt (latente Wärme). Weitere Senken sind der Bodenwärmefluss und die langwellige Ausstrahlung (Häckel et al., 1970). Letztere führt in der nächtlichen Atmosphäre zur bodennahen Auskühlung.

Im folgenden soll eine zusammenfassende Beschreibung dieser (thermo-)dynamischen Vorgänge in einer typischen Gebirgsatmosphäre, wie wir sie auch im Wallis besonders ausgeprägt vorfinden (Neininger und Liechti, 1984; Gassner, 1990), gegeben werden. Die in der Figur 2 dargestellten charakteristischen Temperatur- und Taupunktprofile zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

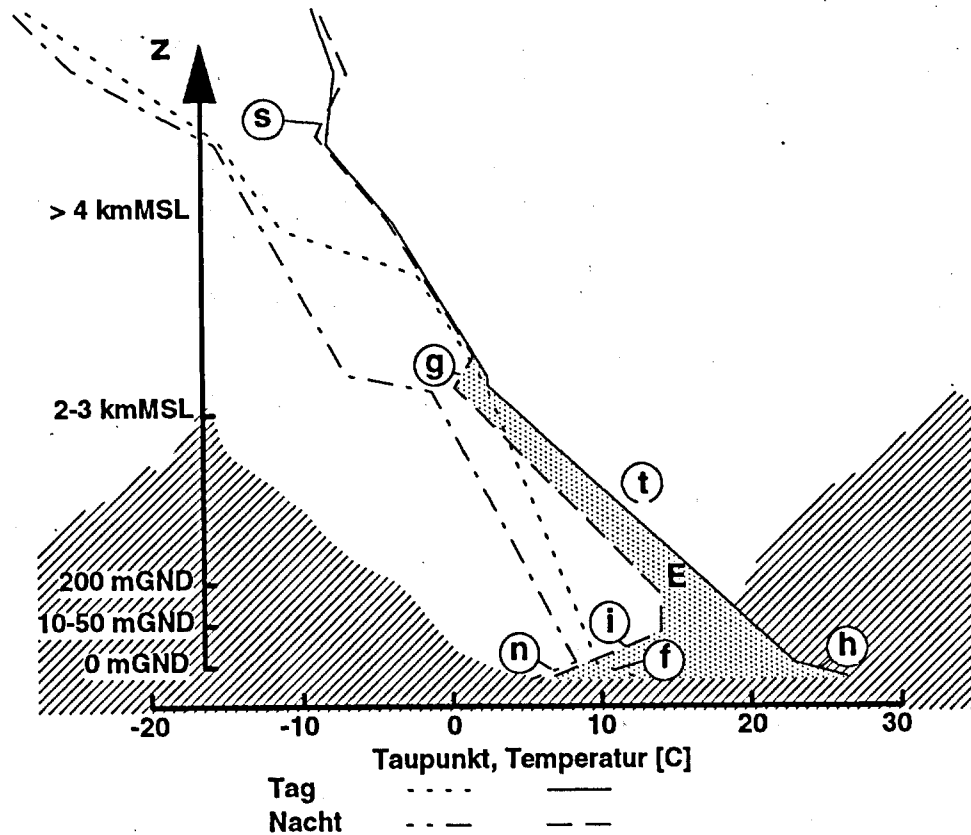
#### 3.2.2.1 Stabile Höhengschicht

Die Atmosphäre ist je nach Wetterlage auf einer Höhe, welche maximal die Tropopausenhöhe sein kann, meist aber irgendwo darunter liegt, thermodynamisch stabil geschichtet. Darüber ist sie i.a. deutlich trockener, da durch diese Schicht keine wesentlichen vertikalen Massentransporte stattfinden können.

#### 3.2.2.2 Konvektive trockenadiabatische Schicht, Wärmetief

Tagsüber wird die Atmosphäre aufgeheizt. Die am Boden erwärmte Luft wird infolge ihrer geringeren Dichte hydrostatisch instabil und bewirkt turbulente (konvektive) Durchmischung. Dadurch stellt sich der sogenannte trockenadiabatische Temperaturgradient mit einer Temperaturabnahme von ca. einem Grad Celsius pro hundert Meter Höhenzunahme ein (feuchtadiabatisch bei Wolkenbildung). Der Wasserdampf wird gut durchmischt, das Mischungsverhältnis (Wasserdampfmasse pro Luftmasse) ist in dieser Schicht mit der Höhe mehr oder weniger konstant. Das Angebot an Sonnenstrahlung und die Grösse der negativen Wärmeströme (Verdunstung, Abstrahlung, Bodenwärmeleitung) bestimmen dabei die Energiebilanz und somit die mittlere Erwärmung der Mischungsschicht. Im Gebirge ist dabei das Luftvolumen pro horizontaler Bodenfläche kleiner als über der Ebene, womit die Sonnenenergie in einer kleineren Luftmasse umgesetzt wird, und zu einer stärkeren Temperaturamplitude führt (Steinacker, 1984; Neininger, 1982). Dieses Luftvolumen dehnt sich dabei auch stärker aus, hebt die darüberliegenden Luftmassen an, und lässt damit bei konstantem Bodendruck (erhaltene Luftmasse) den Druck über den Kreten ansteigen. Der resultierende Druckunterschied zum Alpenvorland bewirkt eine divergente Ausgleichsströmung in der Höhe. Durch diesen Luftmassenverlust über dem Gebirge sinkt der Druck in der gesamten Luftsäule; am Talboden wird ein nachmittäglicher Druckfall von bis zu 5 hPa beobachtet (Neininger und Liechti, 1984; Neininger, 1986). Das entstehende Wärmetief erzeugt die aus dem Vorland nachströmenden Talwinde.

## Typische Temperatur- und Taupunktprofile in der sommerlichen Gebirgsatmosphäre



- Ⓢ stabile Schicht in der Höhe (wetterlagenabhängig);
- ⓖ Gebirgsinversion auf mittlerer Kretenhöhe (Kaltluftakkumulation in den Tälern);
- Ⓣ trockenadiabatische konvektive Schicht (0.01 C/m Temperaturabnahme);
- Ⓢ Inversion über dem Talgrund (Bodeninversion, Talinversion);
- Ⓝ gesättigte unterkühlte Schicht über dem Boden (Bodennebel, Tau);
- ⓗ hyperadiabatische Schicht in bodennähe (Aufheizung via Boden > turbulenter Wärmetransport);
- ⓕ feuchte bodennahe Schicht (Evapotranspiration > turbulenter Transport, Durchmischung);
- ⓔ "Energiefläche": Bei geeigneter Skalierung des Diagrammes ist die aus Luftmasse (Druck, Höhe) und Temperaturänderung gegebene Fläche proportional zur Aufheizenergie;

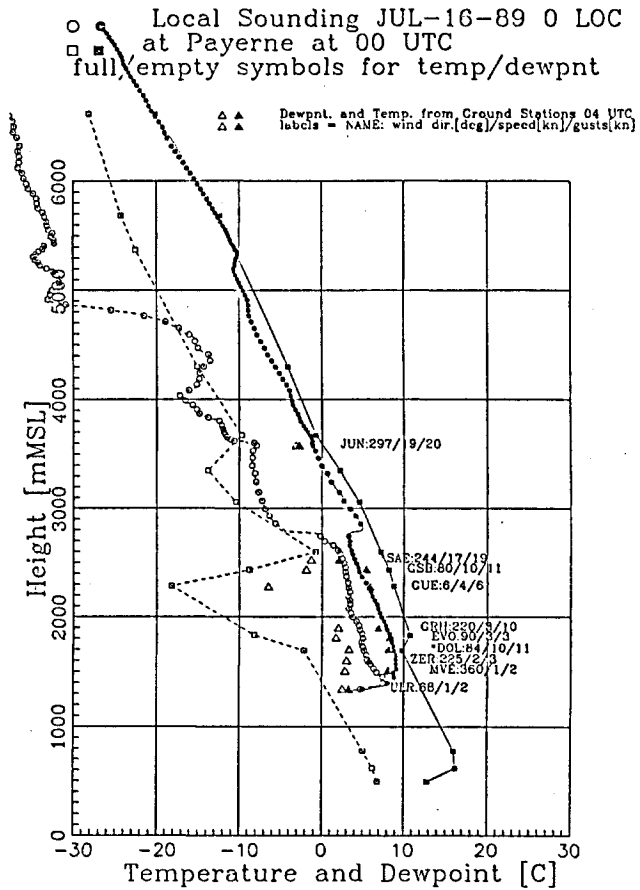
Figur 2: Typische Zustände einer tagesperiodisch veränderten Gebirgsatmosphäre (Erläuterungen siehe Text, reell gemessene Beispiele siehe Figuren 3 und 4).



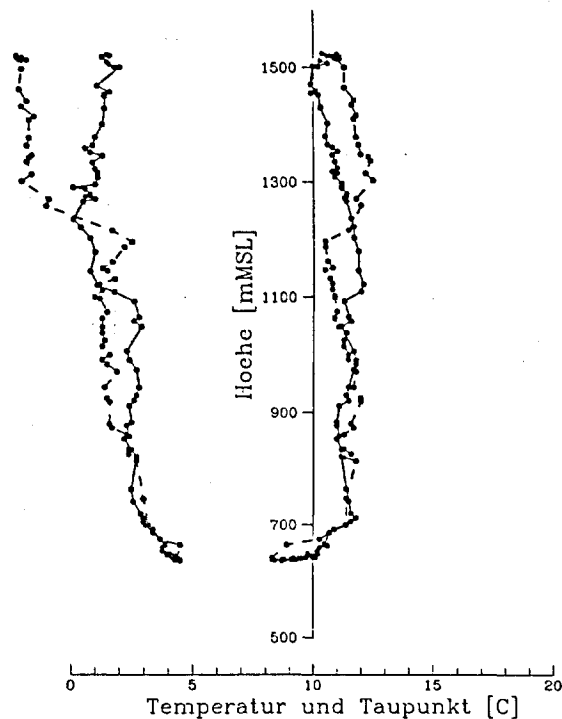
**Figur 3:** Ein mit einer Radiosonde im Sommer 1989 im Oberwallis gemessenes hochaufgelöstes Temperatur- und Feuchteprofil (runde Punkte). Die verbundenen quadratischen Punktsymbole zeigen die simultane Radiosondenmessung von Payerne, die Dreiecke die Messungen von Bodenstationen (ANETZ der SMA). Generell zeigen ausgefüllte Symbole Temperaturen, die leeren zeigen Taupunkte. (Die Punktbeschriftungen geben nebst der Stationsidentifikation Windangaben).

Sehr deutlich sieht man Bodeninversion und Gebirgsinversion, wie auch die bessere Übereinstimmung des lokalen Gebirgsprofils mit dem ANETZ als mit der Sondierung von Payerne.

Das Beispiel stammt aus einem Ensemble von 17 Sondierungen, welche alle diese Merkmale mehr oder weniger deutlich zeigen.



**Figur 4:** Taupunkt (links) und Temperatur (rechts) der ersten und letzten Seilbahn-Messfahrt vom 14. Oktober 1987 (4h 26 und 7h 31). Auch hier ist die Bodeninversion mit einer Mächtigkeit von ca. 50 m deutlich zu sehen, wie auch die typischen Phänomene des Absinkens einer höheren Inversion (Brehm, 1986) oder der einsetzenden Wasserdampfdurchmischung.



### 3.2.2.3 Hyperadiabatische, feuchte Bodengrenzschicht

In der Bodengrenzschicht übertrifft der ankommende Wärmestrom den aufsteigenden turbulenten Wärmestrom, weshalb der trockenadiabatische Temperaturgradient übertroffen werden kann (instabiler Zustand). Die während den Turtmann-Messkampagnen in dieser Schicht auf 5 cm und 2 m Höhe registrierten Temperaturen an den nächstliegenden automatischen Wetterstationen sind in Tabelle 1 gelistet und beeindrucken durch die Grösse ihrer Differenzen. (Auch an höheren Masten im Laufe von Untersuchungen im Oberwallis festgestellte Temperaturunterschiede zwischen 0.5 und 10 m über Grund übertrafen regelmässig 1 °C). Auch das Wasserdampf-Mischungsverhältnis ist bodennah nicht im Gleichgewicht: Je nach Zustand des Untergrundes und des Wasserdampfdefizits in der Luft weist die Bodengrenzschicht gegenüber der übrigen Mischungsschicht einen erhöhten Dampfdruck auf.

*Tabelle 1a: Mittagstemperaturen (T) um 1140 UTC auf 2 m Höhe und Differenz  $\Delta T$  zur "Grastemperatur" auf 5 cm über dem Untergrund an den 5 automatischen Wetterstationen im Wallis der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) während den Messkampagnen.*

Datum 1986	Aigle		Sion		Montana		Visp		Ulrichen	
	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$
30. Juni	24.9	0.5	27.7	5.3	20.9	9.9	27.7	2.4	22.4	6.7
1. Juli	25.7	5.8	26.9	5.2	18.2	8.2	27.0	3.2	23.0	7.1
2. Juli	24.6	3.3	27.2	6.4	21.6	7.8	27.4	3.0	22.9	9.7
3. Juli	23.3	1.9	26.2	6.0	21.0	7.5	27.1	2.7	23.0	12.2
14. Oktober	19.7	3.9	19.4	6.2	16.1	4.2	19.4	0.8	18.0	4.8
15. Oktober	18.7	4.7	17.1	2.3	12.7	4.9	18.8	1.2	18.2	6.3
16. Oktober	17.5	4.4	18.3	3.4	14.8	4.1	19.3	2.0	17.8	5.5
17. Oktober	15.2	3.3	16.9	3.1	13.0	3.9	17.5	2.1	16.5	7.1

*Tabelle 1b: Nächtliche Verhältnisse um 2340 UTC (Vortag).*

Datum 1986	Aigle		Sion		Montana		Visp		Ulrichen	
	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$	T	$\Delta T$
30. Juni	16.5	-4.4	19.9	-4.1	13.7	-1.6	15.0	-4.9	11.7	-6.7
1. Juli	14.1	-2.7	17.5	-1.5	13.9	-1.7	14.2	-2.6	8.1	-5.8
2. Juli	15.9	-2.6	16.5	-4.6	14.0	-2.1	14.7	-4.8	10.6	-4.6
3. Juli	15.1	-2.2	15.6	-4.3	10.8	-1.1	13.5	-1.5	11.1	-2.2
14. Oktober	7.8	-4.0	6.7	-2.3	9.3	-2.6	6.1	-2.0	2.7	-4.3
15. Oktober	9.9	-4.2	11.1	-3.1	8.3	-2.1	5.7	-4.0	0.6	-2.9
16. Oktober	7.8	-3.6	8.2	-3.2	7.7	-1.8	6.0	-5.3	0.3	-4.0
17. Oktober	12.3	-0.6	8.0	-1.3	6.5	-2.1	7.3	-5.4	0.0	-3.6

### 3.2.2.4 Tal(boden)inversion und Bodennebel

Gegen den Abend wird die Energiebilanz am Boden negativ; der Luft wird Wärme entzogen und sie wird in Bodennähe kühler, und deshalb stabil geschichtet. Der turbulente Wärmestrom wird in der Folge unterbunden, was die Bildung der Bodeninversion (Temperaturanstieg mit der Höhe) beschleunigt (der Bildung einer überadiabatischen Schicht am Tag wirkt die resultierende Instabilität entgegen). Auch hier zeigen die Messungen an den verschiedenen hohen Temperaturfühlern deutliche Unterschiede (Tabelle 1b). Bodeninversionen sind einige 10 m mächtig, und können Temperaturunterschiede um 10 °C aufweisen. Die im Wallis gemessenen Beispiele auf den Figuren 3 und 4 lassen diese Inversionen deutlich erkennen. In einer feuchten Atmosphäre kann der Taupunkt unterschritten werden, worauf es zur Nebel- und/oder Taubildung kommen kann. Das kondensierte Wasser fehlt nun als Wasserdampf; die absolute Feuchte und damit der Wasserdampfdruck sinkt.

### 3.2.2.5 Gebirgsinversion, Kältehoch

Der oben beschriebene Mechanismus zur Bildung einer Bodeninversion wirkt nicht nur am Talboden, sondern in vermehrtem Mass auch an den Hängen. Dort kann die Kaltluft aber nicht verharren, sondern sie fliesst infolge ihrer gegenüber der Umgebungsluft grösseren Dichte die Hänge hinunter (katabatischer nächtlicher Hangwind). Die derart abgekühlte Luftmasse nimmt ein kleineres Volumen ein, womit in der Höhe eine Absinkbewegung einsetzt und das entstehende Massendefizit in der Höhe durch eine konvergente Strömung aufgefüllt wird. Dadurch steigt der Bodendruck an (Kältehoch). Der resultierende Druckgradient beschleunigt die auch aufgrund ihrer grösseren Dichte abfliessenden Kaltluftmassen (Bergwind). Zwischen dem bis zur Kretenhöhe ausgekühlten Talluftkörper und der durch die Absinkbewegung adiabatisch erwärmten Höhenluft bildet sich eine weitere Inversion und Luftmassengrenze (darunter feucht, darüber trocken), welche hier "Gebirgsinversion" genannt wird.

Nach Sonnenaufgang beginnt der Zyklus von neuem, und die verschiedenen Inversionen werden aufgelöst, bzw. sinken ab (Whiteman, 1982; Brehm, 1986).

### 3.2.2.6 Konsequenzen für die Geodäsie

Die hier beschriebenen Prozesse verhindern eine zuverlässige Erfassung des Zustandes der freien Atmosphäre aufgrund von Messungen an Bodenstationen. Infolge der ausgeprägten Instationarität ist es auch nötig, die Atmosphäre möglichst simultan mit den Distanzmessungen zu erfassen.

Besonders wichtig ist es auch, einzusehen, *dass es nichts nützt, die Genauigkeit von meteorologischen Messungen am Boden zu erhöhen*. Die innerhalb von wenigen Metern Höhenunterschied anzutreffenden Differenzen übertreffen die Messunsicherheit auch von einfachen Sensoren bei weitem. Weil talüberquerende oder von Satelliten kommende elektromagnetische Wellen zudem nur einen kleinen Bruchteil ihres Weges durch die gestörte Bodengrenzschicht (Inversion oder Hyperadiabatie) zurücklegen, verlieren Bodenmessungen stark an Gewicht, sobald Daten aus der freien Atmosphäre erhältlich sind. Diese Gewichtung wird in der in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Brechungsindexfeldbestimmung automatisch berücksichtigt.

Sehr nachteilig wirkt es sich auch aus, wenn die Feuchte nicht absolut, sondern als relative Feuchte gemessen wird, und sich die Sensoren an signifikant unterschiedlichen Stellen befinden (Tabelle 1!). In diesem Fall wird die Umrechnung von relativer Feuchte in Dampfdruckangaben besonders in einer warmen Atmosphäre, wo die Dampfdruckkurve steil verläuft, verfälscht.

*Es sei auch ausdrücklich davor gewarnt, irgend eine Standardatmosphäre an Bodenmesspunkte "anzubinden"*. Man stelle sich vor, man würde das postulierte nächtliche Temperaturprofil von Figur 2, oder eines der gemessenen auf den Figuren 3 und 4 aufgrund der Bodenmessungen mit dem Standard-Temperaturgradienten extrapolieren! Man käme dabei wohl zum Schluss, dass Meteodaten geodätische Distanzmessungen verschlechtern würden ...

### 3.3 Angewendete Methoden zur atmosphärischen Refraktionskorrektur

#### 3.3.1 Flugmessungen in der freien Atmosphäre

Wie einführend erwähnt, kommen als Trägersysteme für in-situ-Messungen in der freien Atmosphäre Ballone und Flugzeuge in Frage. Die sehr günstigen Fesselballonsonden können nur in schwachwindigen Lagen eingesetzt werden, was im Wallis mit seinen ausgeprägten Talwinden kaum je der Fall ist. Freiballone mit Radiosonden sind relativ teuer und personalintensiv, wenn sie in der für die horizontale und zeitliche Auflösung genügenden Zahl eingesetzt werden sollen. Es war deshalb naheliegend, das in verschiedenen früheren Messkampagnen eingesetzte Motorsegler-Messsystem zu verwenden. Der hier hauptsächlich zum Einsatz gelangte Flugzeugtyp "Motorsegler" zeichnet sich dabei durch günstigen Betrieb und die Möglichkeit, auch relativ nahe an Berghängen zu operieren, aus. Eine Übersicht zur Verwendung von Motorseglern für die meteorologische Forschung geben Hacker und Jochum (1985) oder Jochum et al. (1984). Eine Anwendung für Messungen in der Gebirgsatmosphäre findet sich auch in Neining (1986).

Doms (1980) berichtet von sehr ähnlichen Messkampagnen mit Motorseglern in den Bayerischen Alpen und kommt unter anderem zu folgenden Schlüssen:

- "2. Die aus Messflügen gewonnenen integrierten Mittelwerte aus Temperatur und Dampfdruck führen zu repräsentativen Brechungsindizes. ...
3. Die geringen Abweichungen der einzelnen temperaturverbesserten Geodimeter-8-Messungen zu einem vorhandenen Sollwert rechtfertigen die Annahme, dass hierbei reproduzierbare Absolutstrecken mit einer Genauigkeit von 0.5 ppm oder besser erhalten werden."

Ziel von Flugmessungen ist es, entlang einem vorbestimmten Flugweg die für die Berechnung des Brechungsindex wichtigen Parameter zu messen und somit einen Datensatz bestehend aus

$$t, x(t), y(t), z(t), p(t), T(t), e(t)$$

zu erhalten. Praktisch ist es jedoch so, dass die Meteodatenerfassung im Flugzeug und die Positionsdatenerfassung (im Flugzeug und/oder vom Boden aus) getrennt erfolgen, und damit ein solcher Datensatz entsteht:

$$t_m, t_p, x(t_p), y(t_p), z(t_p), z(t_m), p(t_m), T(t_m), e(t_m)$$

wobei

- t : Zeit (Uhrzeit oder Relativzeit zu Zeitmarke)
- t<sub>m</sub> : registrierte Zeit im Meteodatensatz
- t<sub>p</sub> : registrierte Zeit im Positionsdatensatz
- x : West-Ost-Näherungskordinaten (meteorologisches Koordinatensystem, vgl. 3.3.1.2)
- y : Süd-Nord-Näherungskordinaten (meteorologisches Koordinatensystem, vgl. 3.3.1.2)
- z : Flughöhe (weiter unten definiert)
- p : Luftdruck
- T : Temperatur
- e : Dampfdruck

Die Erfassung der einzelnen Parameter ist in der Tabelle 2 zusammengefasst, danach wird die Erfassung der einzelnen Parameter kurz beschreiben, Fig 5 zeigt die Positionierung der Sensoren am Flugzeug.

**Tabelle 2: Erfassung der einzelnen Parameter in Stichworten. Die geschätzten mittleren Fehler der Einzelmessung sind in  $\langle \rangle$  angegeben. Die in der Turtmann-Messkampagne zur Anwendung gelangten Methoden sind unterstrichen.**

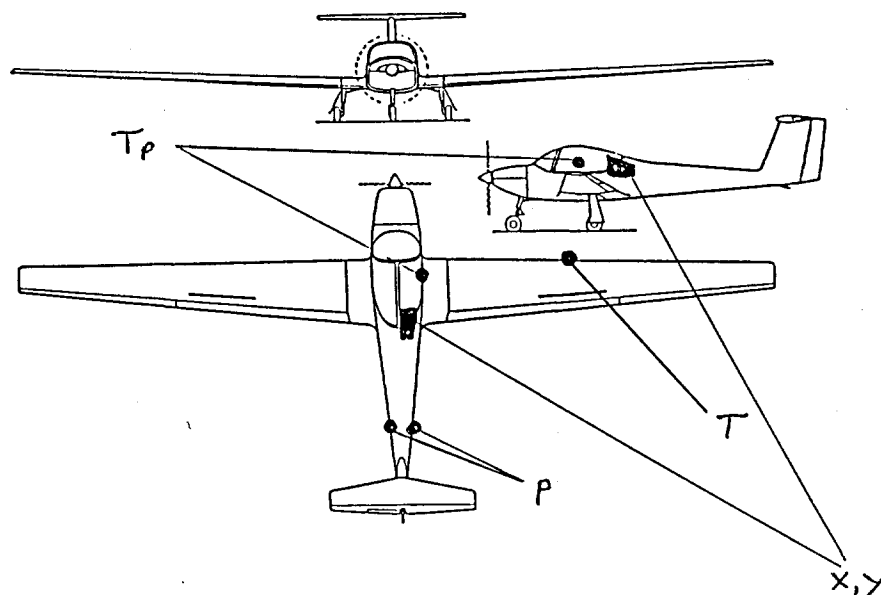
---

$t_m$	: <u>Bandlaufzeit</u> der analogen, Frequenzcodierten Aufzeichnung mit Zeitmarken zur Kontrolle $\langle 10 \text{ s} \rangle$ ;
$t_p$	: Bandlaufzeit $\langle 10 \text{ s} \rangle$ für überflogene Fixpunkte ( $= t_m$ ), <u>digitale Relativzeit</u> bei Radardaten $\langle 2 \text{ s} \rangle$ ;
$\bar{x}, \bar{y}$	: Sichtnavigation (Fixpunkte in grösseren Abständen) $\langle 1 \text{ km} \rangle$ , <u>Radar</u> (2-s-sampling) $\langle 30 \text{ m} \rangle$ ; Omega/VLF-Navigation (5-s-sampling) $\langle 1 \text{ km absolut, } 100 \text{ m relativ} \rangle$ ;
$z$	: Unter Berücksichtigung des Dichteprofiles <u>aufintegrierter Druck</u> $\langle 10 \text{ m} \rangle$ , <u>Radar</u> $\langle 30 \text{ m} \rangle$ ;
$p$	: <u>Kapazitiver Membran-Druckfühler</u> (Rosemount) an statischer Druckabnahme des Flz $\langle 1 \text{ hPa} \rangle$ ;
$T$	: <u>Cu-Konstantan Thermoelement</u> (Meteolabor) am Flügel $\langle 0.5 \text{ K} \rangle$ ;
$e$	: <u>Taupunktspiegel</u> mit Cu-Konstantan Thermoelement (Meteolabor) $\langle 0.5 \text{ K (ca. } 0.5 \text{ hPa bei } 20 \text{ K)} \rangle$ ;

---

### 3.3.1.1 Erfassung der meteorologischen Daten

- T:** Sämtliche Temperaturen wurden mit Kupfer-Konstantan Thermoelementen gemessen. Der dazu nötige hochempfindliche Messverstärker stammt von der Fa. Meteolabor AG in Wetzikon. Für die Elimination der trotz elektronischer Kompensation verbleibenden Restnichlinearität stand ein Eichpolyom zur Verfügung. Die hiermit erreichbare Genauigkeit liegt unter Laborbedingungen bei 0.02 K. Die Anbringung am Flugzeug erfolgte von Motorenabwärme und anderen Störgrössen möglichst geschützt in genügendem Rumpfabstand am Flügel. Die Messunsicherheit im praktischen Einsatz, inklusive der bei der Aufzeichnung entstehenden Fehler, liegt bei ca. 0.5 K. Der Einfluss der Fluggeschwindigkeit (dissipative Erwärmung im Staupunkt, vgl. Richner, 1985) ist bei den Fluggeschwindigkeiten des Motorseglers (100 bis 150 km/h) gering (0.4 bis 0.8 K), wurde aber bei der Auswertung aufgrund der Bahngeschwindigkeit kompensiert. Da der Staudruck, und damit die Relativgeschwindigkeit des Flugzeuges in der Luft nicht erfasst wurde, verbleibt die aus der Differenz von Bahn- und Fluggeschwindigkeit resultierende Korrekturunsicherheit. Sie dürfte bei den vorherrschenden Windverhältnissen um 0.2 K liegen.



**Figur 5: Befestigung der Messfühler am Motorsegelflugzeug: T: Temperatursensor an Flügel (genügend weit weg vom Rumpf (Propeller, Motorwärme); Tp: Taupunktspiegel an Kabinenfenster (wird durch Abwärme nicht gestört); p: Statische Druckentnahme am Rumpf (vom Her-**

steller für die Fluginstrumente sorgfältig plaziert); x,y: Omega/VLF-Navigationscomputer (nicht bei Turtmann-Messungen, wo stattdessen Radar eingesetzt wurde).

- e: Der Dampfdruck wurde via Taupunktmessung ermittelt. Das hat den grossen Vorteil, dass nicht wie bei der Messung der relativen Feuchte der Temperaturfehler (exponentiell!) in die Wasserdampfmessung eingeht, sondern die Feuchtemessung temperaturunabhängig erfolgt (Taupunkt als gegenüber Erwärmung konservative Grösse). Die Anbringung des Sensors (Luftreinlass) am Flugzeug ist deshalb unkritisch -- solange keine Kontamination mit Abgasen stattfindet, und die Luft nicht soweit erwärmt wird, dass die Kühlleistung des Peltier-Elementes am Spiegel nicht mehr ausreicht, den Taupunkt zu erreichen (maximale Taupunktdifferenz ist 40 K). Der Meteolabor-Taupunktspiegel war mit einer Wasserabscheiderdüse an der Kabinenhaube angebracht (auswechselbares Schiebefenster). Die Temperatur des Spiegels wurde mit denselben Thermoelementen und demselben Messverstärker wie die Lufttemperatur ermittelt. Innerhalb der Umrechnung Taupunkt - Mischungsverhältnis - Dampfdruck wurde der Staudruck wie bei der Temperaturkompensation berücksichtigt; der Dampfdruck wird dadurch aber um weniger als 1 % verändert. Ein Problem tritt bei Temperaturen zwischen 0 und etwa -20 °C auf, weil es in diesem Bereich unsicher ist, ob sich auf dem Spiegel ein Tau- oder ein Frostbelag bildet. Über die Unbestimmtheit dieses Prozesses und den zeitlichen Verlauf der Umwandlungen finden sich Details in Joss und Gutermann (1983). Der maximale Fehler für den Wasserdampfdruck liegt bei -10 °C und beträgt 0.27 hPa; bei -20 °C liegt er noch bei 0.22 hPa und bei -40 °C bei 0.06 hPa.
- p: Die Druckmessung erfolgte mit einem "Rosemount pressure transducer model 1332-A3, 0-15 PSI", bei welchem die Auslenkung einer Metallmembran kapazitiv abgegriffen und ein Spannungssignal von 0..5 V erzeugt wird. Diese Druckfühler sind in der Luftfahrt gebräuchlich; Tests in früheren Experimenten zeigten Temperatur-, Lage- und Beschleunigungsfehler von 0.3 bis 0.7 hPa. Um die Auflösung der Aufzeichnung zu erhöhen, wurde das Messsignal in einem speziellen Verstärker in ein Grob- und ein Feinsignal (100 hPa, zyklisch) aufgetrennt. Die Druckentnahme erfolgte mit einem T-Stück am pneumatischen Messsystem des jeweiligen Flugzeuges (statischer Druck für Höhenmesser, Geschwindigkeitsmesser, Variometer). Damit war am ehesten Gewähr gegeben, dass ein guter statischer Druck aufgezeichnet wurde (Kabinendruck schwankt Lage- und Geschwindigkeitsabhängig um mehrere hPa).
- z: Die Flughöhe wurde aus dem Drucksignal berechnet. Dabei gelangte aber nicht die für die aeronautische Höhenmessung übliche Standardatmosphäre zur Anwendung, sondern die Barometerformel (3.3 a) wurde mit (3.3 b und c) auf das effektiv gemessene Temperatur- und Feuchteprofil angewandt. Eine solche Höhenbestimmung hat bei stationärem Bodendruck eine Genauigkeit von ca. 10 m. Der Offset kann als Differenz zwischen Start- und Landehöhe kontrolliert werden.

$$\Delta z = - \Delta p / (\rho \cdot g), \quad (3.3 \text{ a})$$

wobei

$$\rho = p \cdot M / (T \cdot R) \quad (3.3 \text{ b})$$

und

$$M = (M_L \cdot p - (M_L - M_W) \cdot e) / p; \quad (3.3 \text{ c})$$

$\Delta z$	:	Schichtdicke;
$\Delta p$	:	Druckunterschied in dieser Schicht;
T	:	Absolute Temperatur;
$\rho$	:	Dichte der feuchten Luft;
M	:	mittlere Molmasse der feuchten Luft;
$M_L$	:	mittlere Molmasse der trockenen Luft = 28.9 kg·kmol <sup>-1</sup> ;
$M_W$	:	Molmasse von H <sub>2</sub> O = 18 kg·kmol <sup>-1</sup> ;
g	:	(als kontant angenommene) Erdbeschleunigung = 9.81 ms <sup>-2</sup>
R	:	universelle Gaskonstante = 8.314 kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

### 3.3.1.2 Datenaufzeichnung und Erfassung der Position

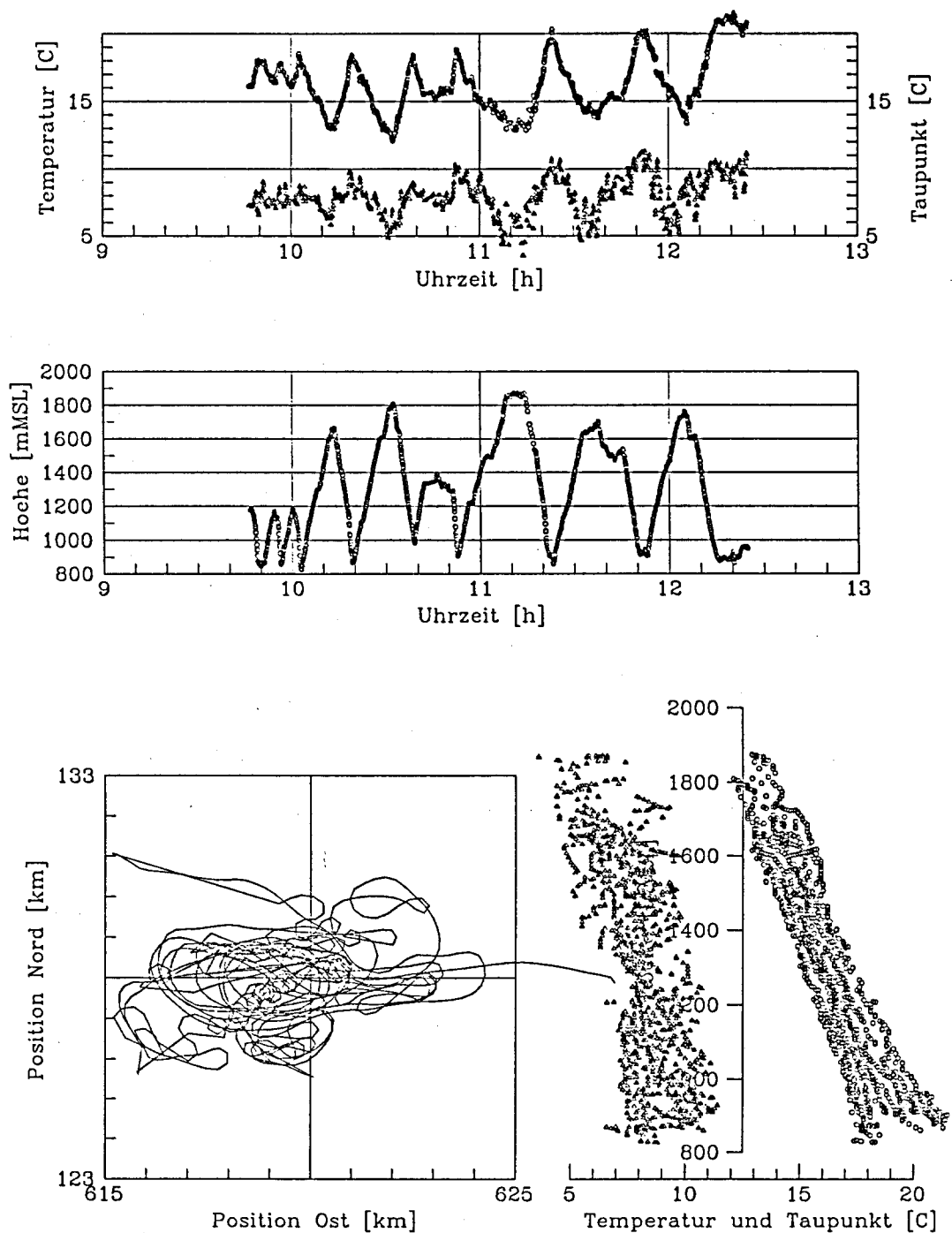
**x,y:** In früheren Messkampagnen wurde die horizontale Flugbahn entweder visuell nach überflogenen Geländepunkten, oder mit Omega/VLF-Navigation (Neininger, 1986) bestimmt. Im Netz Turtmann, welches vom Flugplatz Turtmann aus überblickbar ist, ergab sich auch die Möglichkeit der Flugbahnverfolgung mit einem an der ETH für die digitale Erfassung von Ballontrajektorien umgebauten Feuerleitradar (Neininger, 1987). Die automatische Radarverfolgung wurde optisch/manuell unterstützt, um die Flugbahn auch nahe an den Hängen, wo Bodenechos die automatische Verfolgung verunmöglichen, aufzuzeichnen. Die dadurch erzielte Präzision der kartesischen Komponenten der Flugbahn lag (distanz- und lageabhängig) zwischen 10 und 30 m. Die Synchronisierung der an Bord aufgezeichneten Meteodaten ( $t_m$ ) und der auf einem separaten Datenträger beim Radar aufgezeichneten Positionsdaten ( $t_p$ ) bot einige Probleme, konnte aber aufgrund von mehreren Zeitmarken überprüft werden. Der direkte Vergleich von Radar- und Druckhöhen bestätigte die Vermutung, dass die Druckhöhen, welche in der Folge ausschliesslich verwendet wurden, genauer sind. *Bem: In der Meteorologie werden rechtshändige Koordinatensysteme verwendet mit x in longitudinaler West-Ost-Richtung, y in meridionaler Süd-Nord-Richtung und z in der aufstrebenden Vertikalen. Im Text und in den Zeichnungen gilt diese Konvention).*

**ATAR:** Die Datenaufzeichnung erfolgte im Flugzeug via eine Frequenzcodierung (0..10 kHz) auf ein Mini-Tonband ("SONY Walkman TCS-310". Die neun Messkanäle und ein Referenzkanal wurden dabei im 0.5-Sekundentakt durchgeschaltet (time-multiplexing) -- daher auch der Name der ATAR-Anlage: Akustische Temperatur-Anzeige und -Registrierung. Diese Aufzeichnungsanlage ist sehr kompakt und hat den Vorteil, dass auf der zweiten Spur des Tonbandes simultan gesprochene Kommentare (z.B. Positionen, Systemzustand, Bemerkungen) mit aufgezeichnet werden. Ein grosser Nachteil zeigte sich am ersten Tag, wo infolge starker Turbulenz und ungeeigneter Platzierung des Tonbandgerätes im Flugzeug Gleichlaufschwankungen auftraten, welche mit der alle 5 Sekunden aufgezeichneten Referenzfrequenz nicht mehr genügend ausgeglichen werden konnten. Dadurch entstanden die in den Ausgleichsrechnungen (Schneider, 1987) mit "schlechte Flugmeteo" gekennzeichneten Abschnitte (für spätere Messungen wurde ein weiterentwickeltes Tonbandgerät mit besserem Gleichlauf verwendet, seit 1990 ist die Anlage voll digital).

Die Abtastrate bei der Aufzeichnung betrug somit 5 Sekunden, was etwas über den Zeitkonstanten sämtlicher angeschlossener Fühler liegt, und deshalb als sinnvoll bezeichnet werden darf. Bei der Mischung von Radar- und Meteodaten wurden die im 2-Sekundentakt direkt digital aufgezeichneten Radardaten auf dieses Raster gemittelt, bzw. interpoliert.

Ein Beispiel einer grafischen Flugauswertung ist in der Figur 6 zu sehen.

01 JUL 86 0946LOC HB-2038



**Figur 6:** Beispiel eines "quicklook plots" eines Messfluges: Zeitreihen von Temperatur und Taupunkt (zuoberst) und des Höhenverlaufs (mitte). Unten links ist die Vertikalprojektion der Radar-Flugwegverfolgung dargestellt. Das Taupunktprofil zeigt die grosse Variabilität des Feuchtefeldes (primär Turbulenz und horizontale Unterschiede, nicht etwa Messfehler!) und die typische Evolution des Temperaturprofils: Erwärmung der trockenadiabatischen Schicht vom ersten Aufstieg bis zum letzten Abstieg.



### 3.3.2 Parallelfüge

Weil beabsichtigt war, auch GPS-Messungen durchzuführen, war es ein Bedürfnis, auch die höhere Atmosphäre, welche dem Motorsegler nicht zugänglich war, am Ort der Messungen zu sondieren. Eine zweite ATAR-Anlage wurde deshalb in das freundlicherweise vom BAZL zur Verfügung gestellte und pilotierte zweimotorige Turbo-prop-Flugzeug Gulfstream I G-159 HB-LDT eingebaut. Die Sensoren wurden im hinteren Teil des Rumpfes unten aus der Druckkabine herausgeführt. Am 2. Juli wurden in der Folge auf den Niveaus 3000, 2500, 2000, 1500 und 1000 mMSL mit dem Motorsegler HB-2038 zusammen je eine Strecke während zwei bis drei Minuten parallel befliegen. Mit diesem Versuch wollte man herausfinden, wie gut oder schlecht die Werte für Druck, Temperatur und Taupunkt der beiden auf die Flugzeuge montierten ATAR-Sonden übereinstimmen. Es ist ja nicht auszuschliessen, dass Unterschiede in der Montierung der Fühler, im Strömungsverhalten der Luft, Strahlungseffekte etc. die Parameter systematisch verfälschen. Geflogen wurde mit 200 km/h, als einzig möglichem Kompromiss zwischen der eher langsamen HB-2038 und der schnellen HB-LDT. Anderthalb Minuten vor dem Parallelflug kam die HB-LDT eben aus einem mit 550 km/h Horizontalgeschwindigkeit geflogenen, rasanten Abstieg vom Niveau 9000 mMSL auf das Niveau 3000 mMSL herunter.

#### 3.3.2.1 Temperatur:

Die verbleibenden Höhendifferenzen zwischen den zwei Flugzeugen wurden dadurch unschädlich gemacht, dass alle HB-LDT-Daten auf das Niveau der HB-2038 reduziert wurden. Die Gradienten leiten sich direkt aus den Sondenablesungen ab.

Der Vergleich der reduzierten Mitteltemperaturen auf den einzelnen Niveaus ergibt folgendes Bild (Tabelle 3):

Niveau	mMSL	3000	25000	2000	1500	1000
Reduz. Temp. HB-LDT	°C	5.5	9.1	13.4	19.0	22.0
Temperatur HB-2038	°C	3.7	8.5	13.1	18.2	21.7
Temp.diff. LDT minus 2038	°C	+1.8	+0.6	+0.3	+0.8	+0.3

Abgesehen von der Differenz von 1.8 °C auf dem Niveau 3000 stimmen die Temperaturen der beiden Sonden gut überein. Eine Differenz mit umgekehrtem Vorzeichen wäre nach dem schnellen Abstieg der HB-LDT allerdings plausibler, weil der Flugzeugrumpf, welcher auf einigen Metern Länge vor dem Messfühler angeströmt wird, dabei kälter als die Umgebungsluft wird (Temperaturgradient  $T(z)$ ). Ob allenfalls die dynamische Erwärmung bei einer Fluggeschwindigkeit von über 500 km/h grösser als dieser Hysterese-Effekt ist, kann höchstens vermutet werden. Es ist auch möglich, dass auf diesem ersten Niveau die Fluggeschwindigkeiten noch nicht angeglichen waren, und sich die LDT noch schneller als der Motorsegler bewegte. Die Temperaturkompensation erfolgte nur mit den Flugbahndaten der HB-LDT. Im Mittel registrierte die Sonde auf dem HB-LDT um 0.5 °C höhere Werte, was der abgeschätzten Messunsicherheit der Anlagen entspricht.

### 3.3.3 Messung der Meteorologie auf den Stationen

#### 3.3.3.1 Messanlage

Anlässlich der Ausmessung des Netzes mit dem Mekometer vom 30.6. bis 3.7.86 wurde die Meteorologie, d.h. Luftdruck, Temperatur und Feuchtigkeit auf den Stationen zweifach bestimmt, nämlich

- 1) auf die übliche Art mit einem Aneroidbarometer von Thommen und einem auf ca. 1.5 m über dem Boden hängenden Psychrometer;
- 2) mit elektronischen Sonden auf ca. 7 Meter hohen, ausfahrbaren Metallmasten.

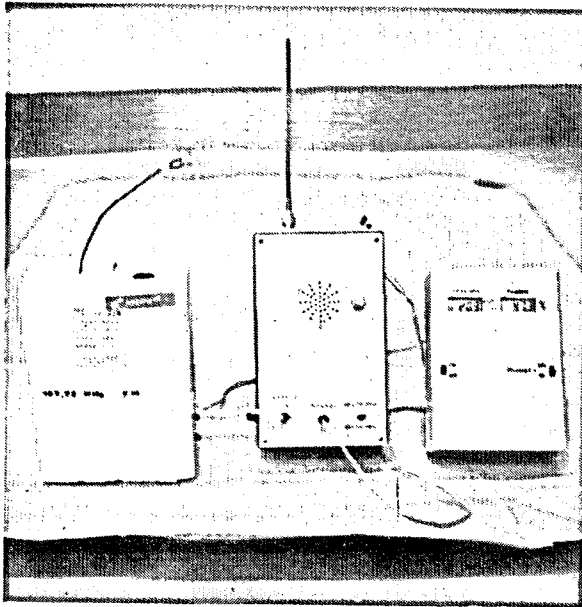
Man hat in unterschiedlicher Höhe über dem Boden gemessen, weil man feststellen wollte, inwieweit die Bodennähe das Mikroklima gegenüber der freien Atmosphäre beeinflusst (vgl. 3.2.2.3).

Die verwendeten Sonden waren

- Radionsonden der Firma Sprenger vom Typ ES75 und E085 für Temperatur und Feuchte (ohne Luftdruck) im Einsatz auf den Stationen 1 bis 6 und auf einigen Zwischenpunkten,
- eigens von der L+T konstruierte Sonden für alle drei Parameter auf den Stationen 7 und 8.

In den Sonden vom Typ E085 war für die bessere Luftzirkulation um die Fühler zusätzlich ein kleiner Saugventilator installiert.

Bei den L+T-Sonden wurde das Signal über ein Kabel einem Epson-Rechner am Fusse des Mastes zur simultanen Signalverarbeitung zugeleitet.



*Figur 7*

Sprenger Radiosonde Typ E085 mit Empfänger und Anzeige.

links: Sprenger-Sonde  
Mitte: Empfänger (Autophon)  
rechts: Anzeige (Konstruktion IGP)

Die Radiosignale der Sprenger-Sonden, welche aufmoduliert auf einen Träger von 403 MHz die frequenzcodierte Information enthalten, wurden über mehrere Kilometer hinweg zentral auf der Station 8 (Susten) empfangen. Dort las ein Operateur die Rohwerte für Temperatur und Feuchte von der Anzeige ab und tippte sie in einen programmierbaren Taschenrechner HP71B ein, wo die Werte korrigiert und sofort ausgedruckt wurden. Um eine gegenseitige Störung der Sonden auszuschliessen, war immer nur eine Sonde auf einmal in Betrieb. Der Operateur auf der Zentrale wies per Funk die Beobachter auf den Stationen an, wann sie die Sonden ein- und auszuschalten hatten. Die Meteorhebungen wurden mit den Mekometermessungen auf den einzelnen Strecken koordiniert.

### 3.3.3.2 Eichung und Vergleich der Sprenger-Sonden

Jeden Morgen vor Beginn der Messungen wurden alle Sonden auf der Station 8 geeicht und miteinander verglichen.

Tabelle 4: Sondenvergleich unmittelbar nach der Eichung.

Sonde IGP-Nr.	1	2	3	4	5	6	7		
Typ	ES75	ES75	E085	E085	E085	E085	E085		
Sprenger-Nr.	243-328	244-368	2780-328	2276-368	2781-368	7362-328	7363-368		
mit Ventilator	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja		
<b>26.6.86 Messlabor IGP</b>	<b>8:57</b>	<b>11:16</b>	<b>8:32</b>	<b>11:19</b>	<b>8:44</b>	<b>8:25</b>	<b>8:29</b>	<b>Mittel</b>	<b>m.F.</b>
Temp. °C	21.6	21.9	21.1	21.6	21.4	21.7	21.3	<b>21.5</b>	<b>0.26</b>
Feuchte %	42.9	41.6	41.9	43.4	42.2	42.1	42.3	<b>42.3</b>	<b>0.6</b>
<b>30.6.86 Station 8, Susten</b>	<b>14:51</b>	<b>14:53</b>	<b>14:56</b>	<b>14:57</b>	<b>14:59</b>	<b>15:00</b>	<b>15:01</b>		
Temp. °C	29.2	29.3	29.2	29.9	29.9	30.3	30.2	<b>29.7</b>	<b>0.47</b>
Feuchte %	(45.0)	26.3	35.3	33.8	31.4	32.9	30.1	<b>31.6</b>	<b>3.2</b>
<b>1.7.86 Station 8, Susten</b>	<b>8:04</b>	<b>8:05</b>	<b>8:06</b>	<b>8:08</b>	<b>8:12</b>	<b>8:13</b>	<b>8:14</b>		
Temp. °C	16.7	16.9	17.6	17.2	17.4	17.7	17.6	<b>17.3</b>	<b>0.38</b>
Feuchte %	66.5	62.8	62.6	65.9	65.9	70.6	63.2	<b>65.4</b>	<b>2.8</b>
<b>2.7.86 Station 8, Susten</b>	<b>7:54</b>	<b>7:56</b>	<b>7:58</b>	<b>8:00</b>	<b>8:01</b>	<b>8:02</b>	<b>8:03</b>		
Temp. °C	16.8	17.4	17.3	17.0	17.9	18.2	17.6	<b>17.5</b>	<b>0.49</b>
Feuchte %	66.4	65.8	64.2	67.0	68.8	68.1	62.3	<b>66.1</b>	<b>2.2</b>
<b>3.7.86 Station 8, Susten</b>	<b>8:08</b>	<b>8:09</b>	<b>8:09</b>	<b>8:10</b>	<b>8:11</b>	<b>8:12</b>	<b>8:13</b>		
Temp. °C	17.8	17.9	18.9	18.5	18.7	17.4	18.8	<b>18.3</b>	<b>0.58</b>
Feuchte %	(93.1)	66.0	68.5	67.6	69.7	67.0	70.1	<b>68.1</b>	<b>1.6</b>
<b>4.7.86 Station 8, Susten</b>	<b>8:53</b>	<b>8:54</b>	<b>8:55</b>	<b>8:57</b>	<b>8:58</b>	<b>8:59</b>	<b>9:00</b>		
Temp. °C	17.7	18.7	19.5	18.8	19.3	18.4	19.3	<b>18.8</b>	<b>0.63</b>
Feuchte %	70.2	68.7	71.8	75.6	72.9	74.9	78.7	<b>73.3</b>	<b>3.</b>
<b>9.7.86 Messlabor IGP</b>	<b>8:33</b>	<b>8:34</b>	<b>8:37</b>	<b>8:39</b>	<b>8:40</b>	<b>8:41</b>	<b>8:43</b>		
Temp. °C	22.2	22.3	23.0	22.7	22.6	22.8	22.6	<b>22.6</b>	<b>0.28</b>
Feuchte %	55.9	57.0	57.1	57.1	60.2	57.6	62.2	<b>58.2</b>	<b>2.2</b>

Bemerkung: Werte in ( ) sind beim Mittel nicht berücksichtigt.

In Eichstellung der Sonde sollten auf der Anzeige bestimmte Werte erscheinen, nämlich eine individuelle, auf der Sonde angegebene Referenztemperatur und 100% relative Feuchte. Durch Drehen an zwei Justierschrauben kann man diese Sollwerte einstellen. Einfacher und schneller geht es, wenn man die Istwerte abliest und rechnerisch korrigiert. Dieser Weg wurde im Experiment Turtmann beschriftet.

**Kommentar:** Der Vergleich wurde fünfmal im Feld und je einmal vor und nach der Kampagne im Messlabor ausgeführt. Es wurde unmittelbar nach der Eichung verglichen. Die Sonden wurden dazu im Feld auf einen Tisch im Freien gelegt und eine nach der anderen abgelesen.

Abgesehen von zwei Ausreißern bei der unventilierten Sonde 1 stimmen die Messungen im erwarteten Rahmen miteinander überein. Im Freien ist die Streuung etwa doppelt so gross wie im Labor. Der hauptsächlichste Grund dafür dürfte der morgendliche Temperaturanstieg von einigen Zehntelgrad während der fünf- bis zehnminütigen

Messperiode sein. Unter kontrollierten Bedingungen streuen die Temperaturwerte im Mittel um  $\pm 0.3$  °C und die Feuchtwerte um 2 bis 3%.

**Tabelle 5: Vergleich mit Psychrometer: Beim Eichen der Sonden am 9.7.86 im Messraum IGP ergaben sich folgende Abweichungen gegenüber den Psychrometerwerten (Haenni Nr. 8: 22.6 °C, 46.5%)**

Sonde Nr.	1	2	3	4	5	6	7	Mittel
Temperatur, Sonde höher um °C	-0.4	-0.4	+0.3	+0.1	0	+0.2	0	-0.03
Feuchte, Sonde höher um %	9	11	10	10	13	11	15	+11.3

**Kommentar:** Während die Temperaturen sehr gut zusammenpassen, liegen die Feuchtwerte der Sonden im Mittel um 11% zu hoch. Möglicherweise ist dieser Effekt durch Alterung der VIZ-Feuchtfühler bedingt, die am 30.6.86 frisch eingesetzt und nachher nicht mehr ausgewechselt wurden.

### 3.3.3.3 Vergleich der Meteorologie auf den Masten mit den Werten in Bodennähe

**Tabelle 6: Verteilung der Sonden auf den Stationen:**

Station Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Sonde Nr.	Sprenger 7	Sprenger 2	Sprenger 3	Sprenger 4	Sprenger 5	Sprenger 6	L+T	L+T

Während der vier Messtage wurden die Sprenger-Sonden zum Vergleich der Meteorologie auf Masthöhe und in Bodennähe öfters von den Masten heruntergeholt. Es liegen zahlreiche, wenige Minuten auseinanderliegende Wertepaare vor, die über den ganzen Tag verteilt sind. Das Wetter war meistens sonnig, mit tagsüber stark wehendem, für das Wallis typischem Talwind.

Wie erwartet zeigt sich, dass die Luft zur Mittagszeit in Bodennähe wärmer ist als in den höheren Schichten. Die Messungen reichen von etwa 9 Uhr morgens bis 19 Uhr, ausnahmsweise 20 Uhr abends. Ganz summarisch lässt sich sagen: Um 9 Uhr ist meist schon eine zusätzliche Erwärmung am Boden festzustellen, die dann zunimmt und zwischen 13 und 15 Uhr ihr *Maximum von 1.5 bis 2°C* gegenüber der Mastspitze erreicht. Gegen abend klingt der Temperaturunterschied wieder ab und verschwindet zwischen 19 und 20 Uhr.

Distanzen, die mit der Bodenmeteorologie reduziert werden, können also von der Temperatur her um 1 bis 2 ppm systematisch verfälscht sein.

### 3.3.3.4 Vergleich von Sprenger-Sonden auf den Stationen und von Psychrometern

Jedesmal beim Herablassen der Sonden von den Masten bot sich die Möglichkeit zum direkten Vergleich mit den Psychrometern.

**Temperatur:** Im Gesamtmittel über 171 Differenzen liegt die mit Sprenger-Sonden gemessene Temperatur um  $0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$  höher als die mit Psychrometern gemessene. Die Einzelwerte streuen mit  $1.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  um dieses Mittel. Dabei streuen die Werte keineswegs zufällig, sondern mit deutlicher Systematik solcherart, dass die Sonden Nr. 3, 4, 5 und 6 meist höhere Werte liefern als das Quecksilberthermometer. Ob das mit den besonderen Gegebenheiten auf den Stationen zusammenhängt (Strahlung etc.) oder mit Kunstfehlern beim Ablesen, lässt sich im Nachhinein schwer entscheiden. Die Laborvergleiche lassen keine derart grosse Systematik erwarten.

**Relative Feuchtigkeit:** Hier liegt das aus 164 Differenzen berechnete Gesamtmittel der Sonden um  $0.9\%$  über dem Psychrometerwert mit einer Streuung von  $4.7\%$  eines Einzelwertes um das Mittel. Auch hier ist eine sehr deutliche Systematik vorhanden. Die Feuchtwerte der Sonden liegen im allgemeinen am Morgen tiefer und am Abend höher als die Psychrometerwerte. Bei einigen Sonden ist eine Korrelation mit den Temperaturdifferenzen vorhanden. Bezüglich einer Erklärung gilt das gleiche wie das bei der Temperatur gesagte.

### 3.3.4 4-dimensionale Interpolation der unregelmässig verteilten Daten

Sowohl die Flugmessungen, wie auch die Bodenstationsmessungen, liegen in einer räumlich-zeitlichen Verteilung vor, welche nicht exakt mit den Visuren übereinstimmen, und liegen auch nicht auf einem gleichmässigen Gitter vor. Damit die verschiedenen Messwerte sinnvoll auf diejenigen Punkte, welche für die Refraktionsrechnung gebraucht werden, interpoliert werden können, wurde ein Verfahren gewählt, welches jedem Messpunkt mit zunehmender raumzeitlicher Distanz vom zu interpolierenden Punkt ein geringeres Gewicht zuordnet.

In der Ebene ist das Verfahren als "inverse distance averaging" bekannt und z.B. in Grafik-Software gebräuchlich (z.B. Golden, 1989). Als Gewichte  $g_i$  der Messpunkte werden die inversen Distanzen mit einem wählbaren Exponenten  $\epsilon$  genommen:

$$g_i = \{1/(dx^2 + dy^2)\}^\epsilon \quad (3.3\ d)$$

Für  $\epsilon = 2$  wird die Berechnung der Gewichte besonders einfach. Für diese inverse quadratische Distanzgewichtung existieren auch zahlreiche physikalische Analogien mit Potentialfeldern (z.B. elektrostatisches Feld: Messpunkte = Ladungen). Die Temperatur- oder Feuchteverteilung in der Atmosphäre hat zwar wenig mit einem E-Feld gemeinsam, aber die Tatsache, dass ein näher liegender Messpunkt ein grösseres Gewicht erhält, scheint vernünftig.

Die Atmosphäre ist aber erstens dreidimensional und zweitens stark anisotrop. Dem kann dadurch Rechnung getragen werden, indem x-, y- und z-Distanzen separat skaliert werden. Aufgrund der Feststellung, dass in der Vertikalen die Temperaturunterschiede über eine bestimmte Distanz etwa zehnmal grösser sind als über dieselbe horizontale Distanz, kann z.B. die vertikale Distanz  $dz$  mit dem Skalierungsfaktor  $s_z = 10$  belegt werden (Höhen als geopotentielle Höhen, Horizontaldistanzen als Grosskreisnäherungen, d.h. Atmosphäre aus sphärisch gekrümmten Schichten). Damit werden die  $g_i$  zu:

$$1/g_i = (s_x \cdot dx)^2 + (s_y \cdot dy)^2 + (s_z \cdot dz)^2 \quad (3.3\ e)$$

Aufgrund der Feststellung, dass in der Vertikalen die Temperaturunterschiede über eine bestimmte Distanz etwa zehnmal grösser sind als über dieselbe horizontale Distanz, kann z.B. die vertikale Distanz  $dz$  mit dem Skalierungsfaktor  $s_z = 10$  belegt werden (vgl. Figur 8a). Als Massstab dieser Skala kann die Distanz genommen

werden, über welche der betrachtete Feldparameter typischerweise um eine Einheit variiert. Für das Temperaturfeld ist das z.B. diejenige Distanz, über welche eine Temperaturänderung von 1 °C erwartet wird. Für die horizontalen Dimensionen (x und y) können das km bis einige 10 km sein, für die vertikale (z) aber nur etwa 100 m. Diese Betrachtung lässt sich auch in die Zeitdimension fortsetzen, indem man sagt, die Massstabseinheit sei diejenige Zeit, in der sich die ortsfeste Temperatur um typischerweise 1 °C ändert. Man kommt dabei auf etwa eine Stunde. Damit wird die Interpolationsformel zu:

$$1/g_i = (dx/a_x)^2 + (dy/a_x)^2 + (dz/a_x)^2 + (dt/a_x)^2, \text{ wobei} \quad (3.3 f)$$

$a_x$  = Distanz, über welche sich die Temperatur in Ost-West-Richtung um 1 °C ändert.

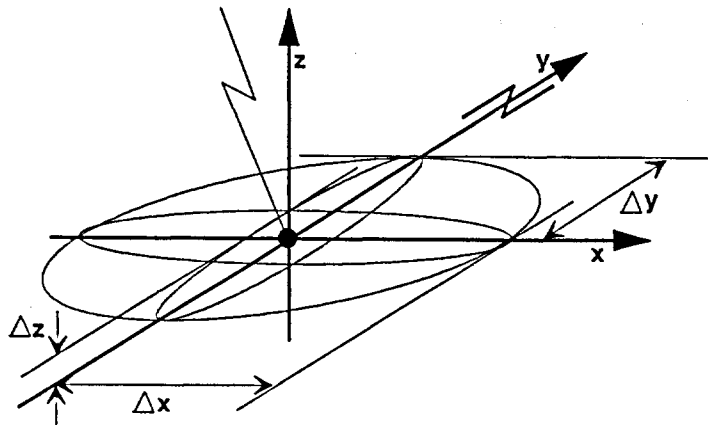
$a_y$  = ... in Nord-Süd-Richtung um 1 °C ändert.

$a_z$  = ... in der Vertikalen um 1 °C ändert.

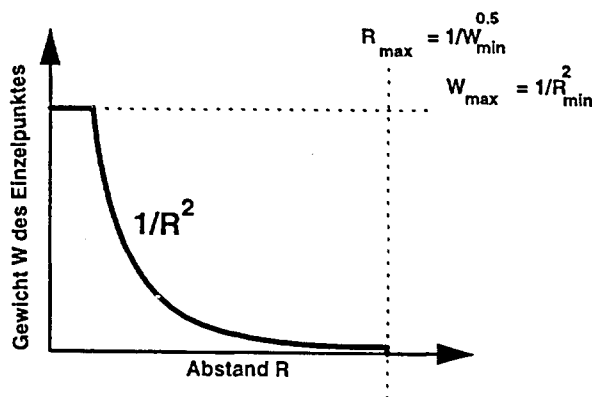
$a_t$  = Zeit, innerhalb welcher sich die Temperatur um 1 °C ändert.

### Anisotrope inverse quadratische Distanzgewichtung (ANINQUAD)

a) Ellipsoid konstanten Gewichtes für den Punkt  $(x_0, y_0, z_0)$



b) Begrenzung der ANINQUAD durch minimales und maximales Gewicht (maximale und minimale Distanz)



Figur 8: Skizzen zur anisotropen Distanzgewichtung (Erläuterungen siehe Text).

Damit werden die Gewichte auch dimensionsfrei. In dieser Form könnten Gewichte bei Messpunkten, welche mit gewünschten Gitterpunkten zusammenfallen, aber unendlich werden. Eine elegante Beschränkung dieses Gewichtes ist dadurch möglich, indem man via den typischen Messfehler  $f$  ein maximales Gewicht bestimmt. Durch diese Plafonierung der Gewichte erhalten alle Punkte, welche innerhalb des (vierdimensionalen) Ellipsoids mit dem "Radius  $f$ " um den Interpolationspunkt liegen, gleiches Gewicht. Diese Plafonierung wirkt gleichzeitig als Glättung des Feldes. Eine weitere Limite kann mit einem minimalen Gewicht, bzw. einem maximalen "Radius" gesetzt werden. Das beeinflusst die Resultate zwar kaum, kann sich aber günstig auf die Rechenzeit auswirken ( $n \cdot m$  Gewichtsberechnungen und Summationen, wobei  $m$  = Anzahl Messpunkte,  $n$  = Anzahl Gitterpunkte,  $m$  liegt oft über 1000!).

**Figur 9: "Treppenbildung" bei ungeeigneter Wahl der Interpolationsparameter:**

**Dicke, ausgezogene Linie:**

$R_{\min} = 0.5;$

**lang gestrichelt:**

$R_{\min} = 0.5, \text{ lineare Gewichtung};$

**punkt-strichliert:**

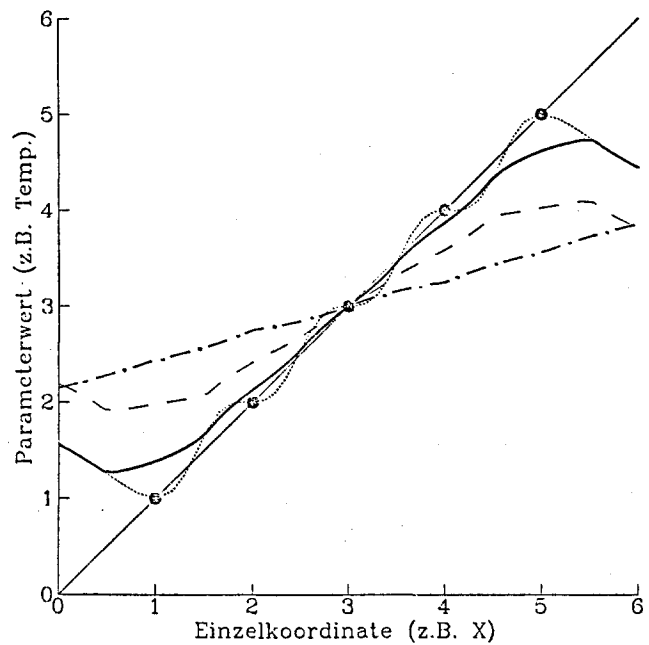
$R_{\min} = 2.0;$

**punktiert:**

$R_{\min} = 0.1;$

**dünn ausgezogen:**

$R_{\min} = 0.1..2.0 \text{ mit vorgängiger Gradient-}$   
 $\text{subtraktion.}$



So anschaulich, universell und einfach der vorgeschlagene Algorithmus ist, so zeigt eine eindimensionale Betrachtung (Figur 9) doch zwei Probleme auf:

1. Bei im Verhältnis zum minimalen Radius und den Gitterpunktabständen grossen Messpunktabständen wird die Interpolation eines vorgegebenen linearen Zusammenhanges wellig. Das ist besonders unerwünscht, weil bei der folgenden Anwendung der Refraktionsberechnung die Gradienten eine wichtige Rolle spielen.
2. Die Ränder tendieren zum Mittelwert aller Messpunkte.

Der zweite Effekt stört hier nicht, weil genügend Messdaten über, unter und um die Messstrahlen vorhanden sind.

Der erste hingegen musste unterdrückt werden. Dazu wurde folgendes unternommen:

1. Die mittleren Gradienten wurden vor der Interpolation eliminiert (Lineare Regressionen je in x-, y-, und z-Richtung). Damit wurde nur das Feld der Abweichungen vom linearen Feld interpoliert, lineare Gradienten wurden nicht verzerrt. Nachträglich wurden die mittleren Gradienten wieder addiert. Das bringt besonders in der Vertikalen sehr viel (vgl. Figur 9).
2. Messreihen, welche nicht so dicht vorlagen, aber von denen angenommen werden darf, dass zwischen den Messpunkten in der Vertikalen linear interpoliert werden darf, wurden "angereichert". Eine Ballonsondierung, welche z.B. nur alle 1000 Höhenmeter einen Messpunkt lieferte, wurde mit zusätzlichen Punkten z.B. alle 10 m dazwischen versehen, damit die Messpunktabstände und der minimale Radius genügend überlappen.

### 3.3.5 Rekonstruktion des 3-dimensionalen Messstrahlverlaufs

#### 3.3.5.1 Iteratives "ray tracing"

Im folgenden sind die in den Figuren 10 und 11 skizzierten Berechnungen beschrieben. Für eine vollständige Beschreibung der zahlreiche Details enthaltenden Berechnungen muss auf das Programmlisting verwiesen werden. Der Strahlverlauf wurde gemäss der in Komponenten zerlegten Vektorgleichung 3.2.1 d berechnet, indem zuerst ein Kreisbogen mit wählbarem Refraktionskoeffizienten zwischen Sender und Empfänger eingepasst wurde. Mit diesen Anfangswinkeln (Elevation und Azimut) wurde ein erster Strahl mit diskreten Schritten losgeschickt, aus dessen zurückgelegter Distanz mit dem mittleren Brechungsindex jedes Teilstücks die Laufzeit aufintegriert wurde. Diese Laufzeit wurde nach jedem Schritt mit der aus der gemessenen Distanz und dem "eingebauten Brechungsindex" resultierenden gemessenen Laufzeit verglichen. Der Strahl erreichte sein Ende, wenn diese Zeit aufgebraucht war. Dazu musste im letzten Teilstück linear interpoliert werden ("Overshoot" dl in Figur 11 a). Nach jedem Teilstück wurde aufgrund der lokalen Brechungsindexgradienten die laterale und vertikale geometrische Brechung berücksichtigt. Im allgemeinen trifft ein solcher Strahl den Empfänger nicht mehr. Aufgrund der Zielablage wurden die Anfangselevation und das Anfangsazimut korrigiert. Da dieser Vorgang nicht linear ist, mussten mehrere "Schüsse" gerechnet werden, bis nach typischerweise drei bis zehn Iterationen die Genauigkeitsanforderungen erreicht wurden (von der Steilheit des Strahls abhängiges Abbruchkriterium für Höhen- und Seitenablage). Die korrigierte Schrägdistanz kann direkt als Distanz zwischen Anfangs- und Endpunkt berechnet werden. Auch die korrigierten Elevations- und Seitenwinkel sind direkt als letzte Anfangswinkel vorhanden.

#### 3.3.5.2 Strahlfolgendes Gitter

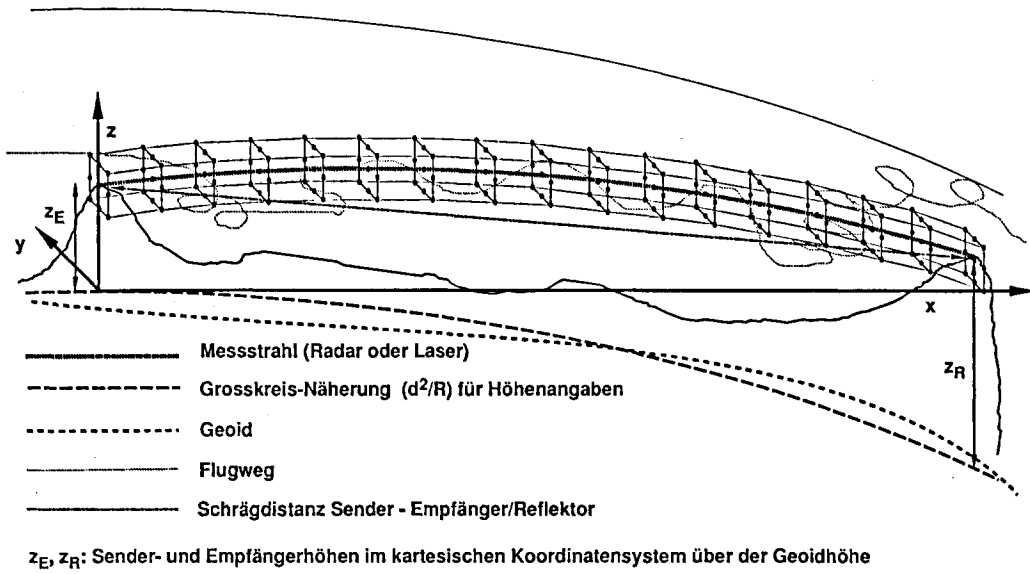
Für die numerischen Berechnungen wurde ein dem geschätzten Strahl angepasstes Datengitter generiert. Das hat die Vorteile, dass

1. der Strahl sehr nahe an Gitterpunkten vorbei verläuft, und
2. nicht ein gesamter Raumquader, bzw. Arbeitsspeicher mit (nicht benötigten) Gitterpunkten angefüllt werden muss.

Gerechnet wurde in einem rechtwinkligen kartesischen Koordinatensystem, dessen z-Achse das Lot durch die Senderstation ist. Die Erde wurde als mit  $d^2/R$  beschriebene "Kugel" genähert, deren Tangenten auf der Höhe  $z = 0$  die x- und y-Achsen bilden. Damit geht keinerlei Vorurteil über die Erdgestalt in die Berechnung ein. Bei der Angabe der Näherungskordinaten des Empfängers muss lediglich darauf geachtet werden, dass diese für höchste Genauigkeitsansprüche in dieses Koordinatensystem transformiert werden müssen, was für die Höhen auch getan wurde. Mit der Annahme einer kugelförmigen Oberfläche wird lediglich festgelegt, dass die Atmosphäre als sphärisch betrachtet wird. Es dürfte dabei klar sein, dass die daraus resultierenden Zuordnungsfehler



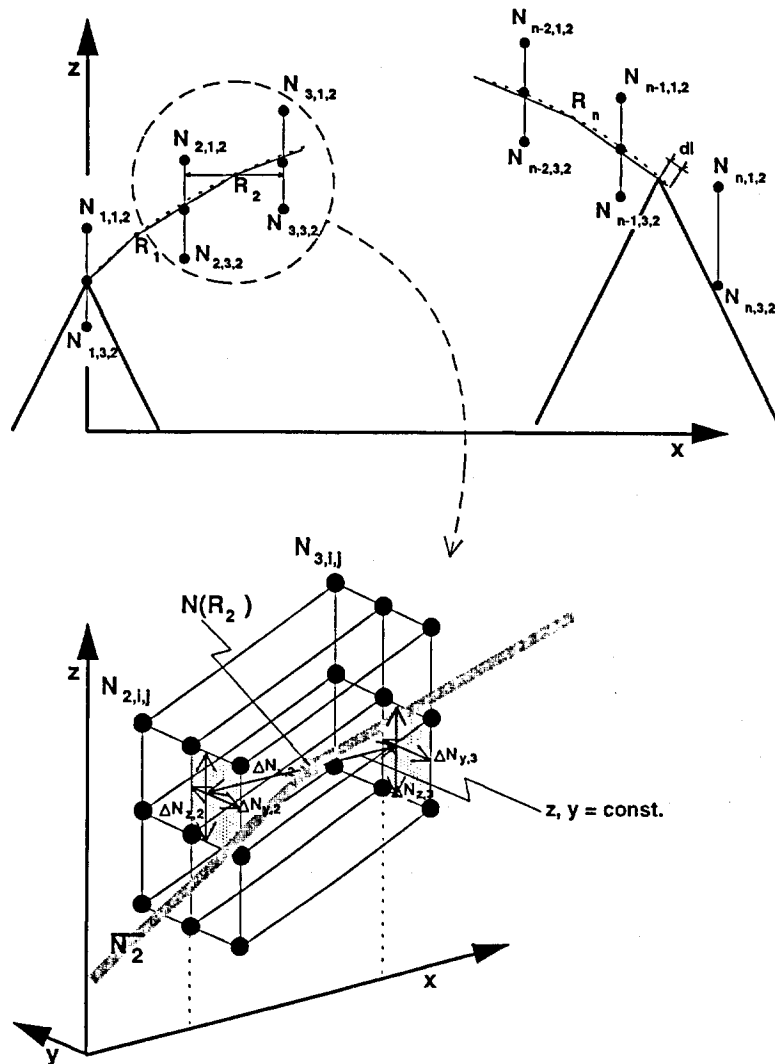
Figur 10: Gitter und Messstrahl zwischen Sender und Empfänger (Erläuterungen siehe Text);



Figur 11:

*Diskretisierung des Messstrahls*

- a) *Anpassung von Anfang und Ende.*
- b) *Interpolation im Gitter, Gradientberechnung.*



der meteorologischen Daten (geopotentielle Höhen) auf das Gitter um viele Grössenordnungen kleiner sind, als die durch Messfehler resultierenden Unsicherheiten.

Der "Datenschlauch" besteht aus den zentralen, auf dem Kreisbogen liegenden Punkten, sowie je einem darüber, darunter, links und rechts liegenden Nachbarpunkt. Breite und Höhe dieses im Querschnitt 9 Punkte umfassenden Gitters, sowie der Längsabstand können frei gewählt werden. Bei steilen Visuren muss darauf geachtet werden, dass das Verhältnis Horizontalabstand/Gitterhöhe nicht zu gross ist. Die Brechungsindizes auf den Gitterpunkten wurden gemäss dem in Abschnitt 3.3.4 beschriebenen Interpolationsverfahren bestimmt.

### 3.3.5.3 Weitere Details des Gitters

Das erste Gitterelement wird auf den Sender zentriert. Der erste Punkt, an welchem die Brechung bestimmt wird ( $R_1$ ), liegt nicht erst bei  $x_0+dx$ , sondern schon bei  $x_0+dx/2$ , damit die Punkte  $R_i$  in der Folge zwischen und nicht auf den Gitterebenen liegen (bessere Gradientberechnung).

Ein vom Operateur gewünschtes  $dx$  wird so angepasst, dass der "overshoot"  $dl$  am Schluss möglichst kurz wird, damit möglichst wenig Einflüsse der nicht beteiligten Atmosphäre hinter dem Zielpunkt einfließen, was insbesondere bei steilen Visuren wichtig ist.

Der Brechungsindex beim Durchstosspunkt des Strahlelementes durch die vertikale Gitterebene wird als mittlerer Brechungsindex  $N_i$  zwischen dem Punkt  $R_{i-1}$  und  $R_i$  genommen. Dieser Wert wird linear im entsprechenden Gitterquadranten interpoliert.

Für die Berechnung des longitudinalen Brechungsindexgradienten  $\Delta N_{x,i}$  werden auf den dem Brechpunkt  $R_i$  benachbart liegenden Gitterebenen die Brechungsindizes an den Positionen  $z,y = z,y(R_i)$  ebenfalls linear in den entsprechenden Gitterquadranten interpoliert.

Die auf den benachbarten Gitterebenen erhaltenen Gradienten  $\Delta N_{z,i-1}$  und  $\Delta N_{z,i}$  bzw.  $\Delta N_{y,i-1}$  und  $\Delta N_{y,i}$  werden für die Verwendung am Punkt  $R_i$  gemittelt.

Die in den beiden Turmann-Messkampagnen gesammelten Flug-, Bodenstations- und Seilbahnmeteo-daten wurden verwendet, um die Strahlgänge der gemessenen Visuren dreidimensional gebrochen nachzurechnen (Ryf, 1986). Die damit erhaltenen korrigierten Strecken wurden von Schneider (1987) in einer Ausgleichsrechnung ausgewertet, und zeigten sehr erfreuliche Resultate ( $\rightarrow$  Kap. 3.1, 3.4).

## 3.4 Resultate und Schlussfolgerungen

Schon der Vergleich von Hin- und Rückmessungen zeigt eine durchschnittliche Verbesserung von Flugmeteo-Distanzen gegenüber den Stationsmeteo-Distanzen um einen Faktor 2 (Ryf, 1987)! Die Resultate von Schneider (1987), welche mit einer Ausgleichsrechnung die mit "guter Flugmeteo" erreichte Präzision mit 0.15 ppb abschätzte, verstärkt den positiven Eindruck.

Als Minimalforderung an Messungen während sonnigen Tagen im Gebirge muss die Verwendung von möglichst hoch liegenden ventilierten Temperaturmessungen an Masten bezeichnet werden.

Die von Doms (1980) bereits gezogenen Schlussfolgerungen, welche besagen, dass der Einsatz von Flugzeugen für die Verbesserung von terrestrischen Distanzmessungen relativ einfach, effizient und lohnend ist, kann somit vollumfänglich bestätigt werden. Dabei ist zu betonen, dass die Vorgehensweise sowohl messtechnisch wie organisatorisch weitgehend improvisiert ablief und somit noch ein beträchtliches Verbesserungspotential besteht, welches in der Zwischenzeit weiter ausgeschöpft wurde.

### 3.5 Ausblick

Sowohl die Sensorik am Flugzeug, wie auch die Datenerfassung wird in nächster Zeit verbessert. (Am 20.4.90 wurde eine neue, digital registrierende und ähnlich kompakte Messanlage mit Erfolg im Flug erprobt). Durch die demnächst erwartete "GPS-Revolution" auch in der Flugnavigation wird auch die Flugbahnbestimmung problemloser werden. Zusammen mit diesen Weiterentwicklungen an der Sensorik kann eine noch bessere Abstimmung der Flugwege und der Flugzeiten auf die Visuren weitere Fortschritte bringen.

Die Auswertesoftware hat sich bewährt, und muss abgesehen von der Migration auf ein neues Computersystem (wahrscheinlich PC) kaum wesentlich geändert werden. Zusätzliche Vorkehrungen sind aber zu treffen, um auch sehr steile Visuren für GPS-Anwendungen richtig rechnen zu können, und um die errechneten Refraktivitätsfelder auch in geeigneter Form für die Nachbearbeitung von GPS-Messungen verfügbar zu machen.

Terrestrische Visuren werden in Zukunft an Bedeutung verlieren. Trotzdem kann die hier vorgestellte Methodik weiterhin erfolgreich sein, wenn es darum geht, stark dreidimensionale GPS-Netze mit grossen Höhenunterschieden zu korrigieren. Es ist zwar bekannt, dass auch auf dem Gebiet der Fernerkundung von Wasserdampf zukunftsweisende Entwicklungen laufen (Wasserdampfradiometrie (WVR), vgl. Westwater et al., 1985). Es darf aber nicht vergessen werden, dass WVR primär für die höhere Atmosphäre hilfreich ist, und die Genauigkeit und Auflösung in niedrigeren Schichten (unterste 3 km), wo ca. 80 % des atmosphärischen Wasserdampfes zu finden sind, recht beschränkt ist (Westwater et al., 1985: 20 % Unsicherheit unterhalb 3 km, darüber ca. 12 %). Bei flachen Visuren (horizontnahe Satelliten) kann damit auch die Strahlkrümmung infolge der stark geglätteten WVR-Profile Probleme bieten, welche hier weitgehend gelöst wurden.

Andererseits gilt die Atmosphäre oberhalb der Mischungsschicht in Abwesenheit von Störungzonen als horizontal recht homogen, weshalb für GPS-Korrekturen WVR-Profile oder (gute) Radiosonden genügen sollten (zur Qualität von Radiosonden vergleiche Richner und Phillips, 1982). Der Vorteil der Allwettertauglichkeit der WVR soll dabei nicht unterschlagen werden - ein Vorteil, den man mit Flugmessungen nicht bieten kann.

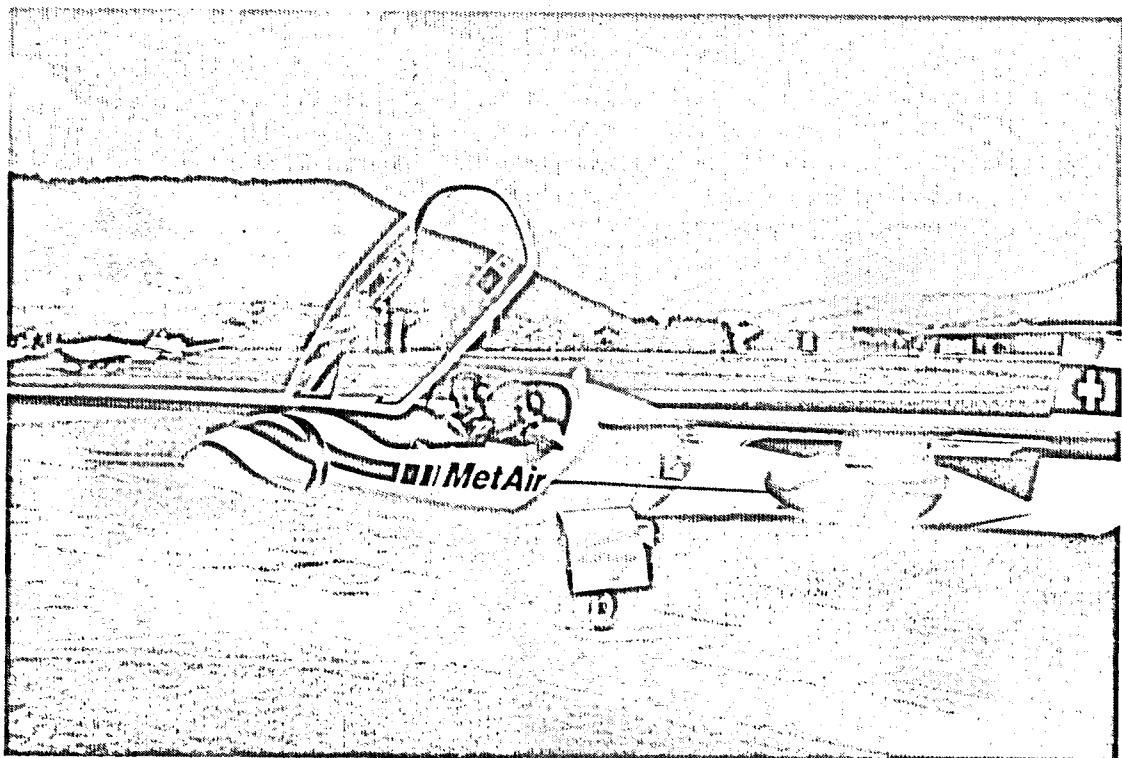
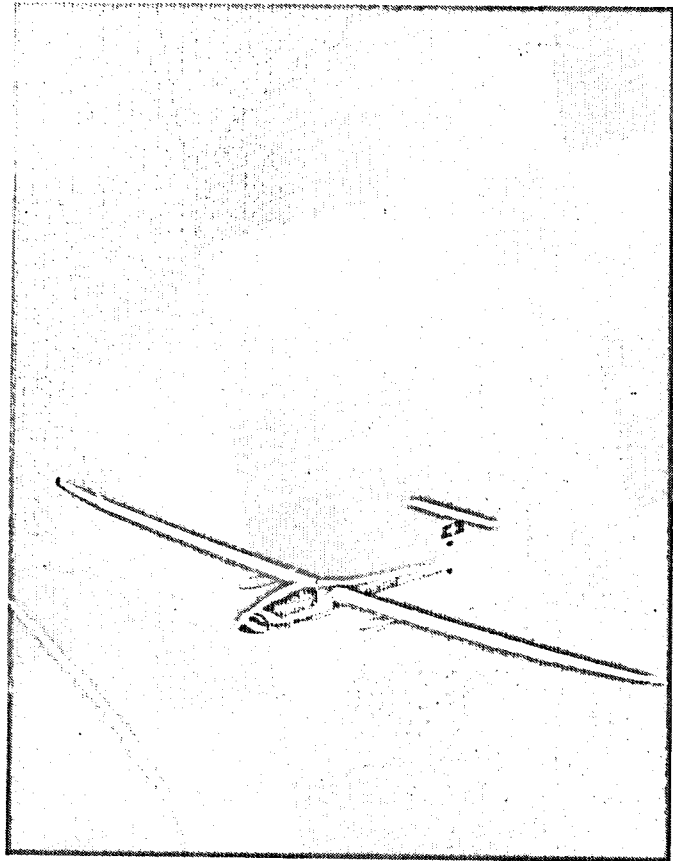
Die Kombination von Flugmessungen während ausgewählter Wetterlagen unterhalb ca. 3000 mMSL und WVR oberhalb der Mischungsschicht scheint aus der Sicht der bisherigen Erfahrungen deshalb die beste Lösung zu sein.

Über der Schweiz besteht auch die Möglichkeit, das sehr gut ausgebaute Automatische Beobachtungsnetz (ANETZ, vgl. Gütermann, 1986) der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt zu verwenden, wenn es darum geht, auf einer Skala von einigen 10 km den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre bis auf eine Höhe von 3600 mMSL (Jungfraujoch-Station) abzuschätzen. Die Brauchbarkeit des ANETZ für diesen Zweck wurde von Tschirren (1989) und Gassner (1990) im wesentlichen bestätigt (Schätzgenauigkeit in der Mischungsschicht ca. 2 hPa Wasserdampfdruck).

Eine weitere Entwicklung könnte dahingehen, dass mit dem vermehrten Einsatz mesoskaliger meteorologischer Modelle zur Auswertung der im Feld gewonnenen Beobachtungsdaten die physikalisch richtige Interpolation der meteorologischen Felder eine weitere Verbesserung erfährt.

## Nachtrag

In der Zeit zwischen dem ersten Manuskript und der Drucklegung wurde das Messpaket für den Motorsegler stark verbessert. Dazu wurden die bewährten Messfühler in eine voll digitale Datenerfassung integriert und auch die Software entsprechend ausgebaut. Die Flugwegaufzeichnung geschieht unterdessen mittels GPS-Navigation (GPS OEM-Module von MAGELLAN). Für den Betrieb des für Messzwecke besonders geeigneten Motorseglers Stemme S10 VC (Bilder) wurde vom ersten Autor die Firma MetAir AG mitgegründet. In den 2,3 m langen Behältern unter den Flügeln können bis je 50 kg wissenschaftliche Geräte untergebracht werden. Bisherige Anwendungen des Messsystems fanden primär im Bereich Meteorologie und Luft-hygiene statt. Beschreibungen der Messprogramme und des Systems finden sich in Neininger und Dommen, 1991, sowie in Neininger, 1991.



## Literatur

- AMS (American Meteorological Society) (1985): Moisture and Humidity; Measurement and Control in Science and Industry, *Proc. of the 1985 Int. Symp. on Moisture and Humidity, Washington, D.C. April 15-18 (1985, 1028 pp.*
- Barry, R.G. (1981): Mountain Weather and Climate. *Methuen, London and New York.*
- Bean, B.R., and E.J. Dutton (1966): Radio Meteorology. *National Bureau of Standards Monograph 92, (vergriffen), ETH-Bibl. TH P 712 188:92 und Mikr. 150:92, 435 pp.*
- Becker, K.H. und J. Löbel (1985): Atmosphärische Spurenstoffe und ihr physikalisch-chemisches Verhalten. *Springer-Verlag, 264 S.*
- Brehm, M. (1986): Experimentelle und numerische Untersuchungen der Hangwindsschicht und ihrer Rolle bei der Erwärmung von Tälern. *Dissertation, Univ. München.*
- Brock, F.V. (editor) (1984): Meteorological Instrumentation. *Excerpt from NCAR Technical Note TN-237+IA (Skript für Vorlesung von H. Richner, Atmosphärenphysik ETH, CH-8093 Zürich).*
- Brunner, F.K. (editor) (1984): Geodetic Refraction; Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere. *Springer, ISBN 3-540-13830-7, 213 pp.*
- Brunner, F.K. (editor) (1988): Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements. *Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, P.O.Box 1, Kensington N.S.W. 2033, Australia.*
- Defant, F. (1949): Zur Theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde. *Arch. Met. Geoph. Biokl. A1, 421-450.*
- Doms, K.P. (1980): Streckenmessung mit Licht und Mikrowelle unter gleichzeitiger Erfassung der meteorologischen Daten im Meßstrahl. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 5, 202-213.*
- Ekhart, E. (1948): De la Structure Thermique de l'Atmosphère dans la Montagne. *La Météorologie 4(9), 3-26.*
- Elgered, G. (1983): Water Vapor Radiometry with Applications to Radio Interferometry and Meteorology. *Technical Report No. 137, School of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden (Diss.): 15 Seiten Übersicht, 7 Reprints von Veröffentlichungen zum Thema).*
- Fritschen, L.J., and Gay, L.W. (1979): Environmental Instrumentation. *Springer, 216 pp.*
- Gassner, M. (1990): Vergleich von Temperatur und Taupunkt in der freien Atmosphäre im Gebirge mit den ANETZ-Stationenwerten und der Sondierung von Payerne. *Semesterarbeit am LAPETH, CH-8093 Zürich, 70 S.*
- Golden Software, Inc. (1989): SURFER Version 4, Reference Manual. *P.O. Box 281, Golden, CO 80402, USA.*
- Guiraud, F.O., J. Howard, and D.C. Hogg (1979): A Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Precipitable Water Vapor and Liquid. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics, GE-17/4, TH P 300 102 GE 17, 129 - 136.*
- Gutermann, T. (1986): Das automatische Wetterbeobachtungsnetz der Schweiz (ANETZ). *Tagungsbericht der VDI/VDE-Aussprachetagung "Signalverarbeitung in Multi-Sensor-Systemen" vom 18./19. Feb. 1986 in Karlsruhe (BRD), 17 pp.*
- Häckel, H., K. Häckel und H. Kraus (1970): Tagesgänge des Energiehaushaltes der Erdoberfläche auf der Alp Chukung im Gebiet des Mt. Everest. *Khumbu Himal, 7, 71-134.*
- Hacker, J.M. und A.M. Jochum (1985): Beiträge zum Workshop MEMO '84 ("Meteorologischer Motorsegler") vom 1. - 5. Oktober 1984 am Institut für Physik der Atmosphäre der DFVLR in Oberpfaffenhofen. *DFVLR-Mitt. 85-04, DLR (ehem. DFVLR) D-8031 Oberpfaffenhofen), 209 S*

- Hurni, L. (1987): Atmosphärische Effekte bei der Messung langer Distanzen mit Mikrowellen. Mit Auswertungen von SIAL- und GPS-Kampagnen "Chasseral-Hörnli" (147 km). *Bericht Nr. 134, Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH, CH-8093 Zürich, 110 S.*
- Jochum, A.M., M.E. Reinhardt und H. Willeke (1984): Die drei Motorsegler der DFVLR - ein meteorologisches Meßsystem zur Untersuchung der atmosphärischen Grenzschicht. *DFVLR-FB 84-50, DLR (ehem. DFVLR) D-8031 Oberpfaffenhofen, 150 S.*
- Jordan, Eggert, Kneissl (1966): Handbuch der Messungskunde, Band VI. *Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.*
- Joss, J., Th. Gutermann (1983): Resultate der Erprobung des kombinierten Temperatur- und Feuchtefühlers Thygan II. *Wiss. Kolloquium, SMA, Krähbühlstr. 58, CH-8044 Zürich, S. 109-125.*
- Köchle, R. (1984): Dreidimensionale vektorielle Refraktion. *Persönliche Kommunikation, Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH, CH-8093 Zürich.*
- Kraus, H. (1970): Die Energieumsätze in der bodennahen Atmosphäre. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes 117, Offenbach a. Main, 43 S.*
- Liljequist, G.H., K. Cihak (1983): Allgemeine Meteorologie. *Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 368 pp.*
- McKay, D.J. (1978): A sad look at commercial humidity sensors for meteorological applications. *Fourth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, American Meteorological Society, April 10-14 (1978, 7-14.*
- Meteorological Office (edition) (1980..86): Measurement of Atmospheric Pressure, ... Temperature, ... Humidity, ... Surface Wind, ... Precipitation and Evaporation, ... Solar and Terrestrial Radiation, ... Visibility and Cloud Height. *(7 Hefte über klassische Meteorologische Messinstrumente) Her Majesty's Stationery Office, Government Bookshops, 49 High Holborn, London WC1V6HB.*
- Neininger, B. und M.E. Reinhardt (1986): Meteorological Aircraft Data Set of the "First Himalaya Soaring Expedition". *DFVLR-FB 86-39, DLR (ehem. DFVLR) D-8031 Oberpfaffenhofen, 149 pp.*
- Neininger, B. und O. Liechti (1984): Local winds in the upper Rhone Valley. *GeoJournal, 8.3, Reidel Publish., 265-270.*
- Neininger, B. (1982): Mesoklimatische Messungen im Oberwallis. *XVII. Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, Berchtesgaden, 21. - 25. Sept. 82; Annalen der Meteorologie (19, Deutscher Wetterdienst, D-6050 Offenbach am Main, 105-107.*
- Neininger, B. (1987): Quasi-Lagrange'sche Turbulenzmessung mit Schwebeballonen in der planetaren Grenzschicht. *Diss. Eidg. Technische Hochschule, Zürich, Nr. 8463; Lenticularis Verlag, Postfach 1109, CH-8152 Opfikon; 299 pp.*
- Neininger, B. (1989): Programmpaket zur grafischen Darstellung von Brechungsindex-Abhängigkeiten. *Turbo-Pascal und Grafik-Paket SURFER von Golden Software, Inc., P.O. Box 281, Golden, Colorado 80402, USA.*
- Neininger, B. und J. Dommen (editors) (1991): POLLUMET Field Phase Report 1991. *POLLUMET-Koordinationsstelle, Inst. für Atmosphärenphysik, CH-8093 Zürich.*
- Neininger, B. (1991): Sommersmog-Messflüge im Tessin und in der Westschweiz im Auftrag des BUWAL. *BUWAL-Bericht, im Druck.*
- Panofsky, Hans A., and John A. Dutton (1984): Atmospheric Turbulence; Models and Methods for Engineering Applications. *Wiley & Sons, TH 734 403 389 pp.*
- Richner, H. (1985): The relative accuracy of ALPEX aircraft data. *LAPETH-23 oder NCAR Tech.note 238+STR.*

- Richner, H., P.D. Phillips (1982): The Radiosonde Intercomparison SONDEX. *PAGEOPH* 120, 852-1198.
- Ryf, A. (1988): Diverse nicht veröffentlichte Arbeitsunterlagen der Streckenreduktionen von 1983 bis 1988. *Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH, CH-8093 Zürich.*
- Savage, J.C., and W.H. Prescott (1973): Precision of Geodolite Distance Measurements for Determining Fault Movements. *Journal of Geoph. Res.*, 78, 6001-6007.
- Schlatter, T.W., and D.V. Baker (1981): Algorithms for thermodynamic calculations. *Profs Program Office, NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, Colorado 80303, 37 pp.*
- Schneider, D. (1987): 3D-Ausgleichung Nr. 19A vom 27.01.1987. *Interner Bericht, BA für Landestopographie, CH-3084 Wabern.*
- Schumann, U. (1989): Large-eddy simulation of the convective slope layer. *Int. Conf on Mountain Meteorology and ALPEX, Garmisch-Partenkirchen, F.R.G., 5 to 9 June 1989 (und Arbeitsbericht DLR, Inst. of Atmosph. Physics, D-8031 Oberpfaffenhofen), 125-126.*
- Schwerdtfeger, P. (1976): Physical Principles of micro-meteorological Measurements. *Elsevier, 113 pp.*
- Steinacker, R. (1984): Aerea-Height Distribution of a Valley and Its Relation to the Valley Wind. *Beitr. Phys. Atmos. 57, 64-71.*
- Stuedler, D. (1984): Ein Pascal-Programmpaket zur Berechnung des integralen Brechungsindex aus Sondenflügen bei der elektronischen Distanzmessung. *Bericht Nr. 87, Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH, CH-8093 Zürich, 128 S.*
- Tschirren, J. (1989): Repräsentativität von Bodenmessstationen (ANETZ) für die Bestimmung des Wasserdampfdruckes in der freien Atmosphäre. *Diplomarbeit am LAPETH, CH-8093 Zürich.*
- Wagner, A. (1938): Theorie und Beobachtung der Periodischen Gebirgswinde. *Gerl. Beitr. Geoph. 52, 408-449.*
- Westwater, E.R., M.J. Falls, and M.T. Decker (1985): Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor by ground-based Microwave Radiometry. *In AMS (1985 (siehe oben), p. 259-268.*
- Whiteman, C.D. (1982): Breakup of Temperature Inversions in Deep Mountain Valleys: Part I, Observations. *J. of Appl. Met. 21, 270-289.*
- Whiteman, C.D., and E. Dreiseitl 1984): Alpine Meteorology, Translations of Classic Contributions by A. Wagner, E. Ekhart, and F. Defant. *Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, PNL-5141, ASCOT-84-3.*
- Yoshino, M.M. (1975): Climate in a small Area - An Introduction to Local Meteorology. *University of Tokyo Press, 549 pp.*

## 4 Lokale Schwerefeldbestimmung

### 4.1 Lotabweichungs-Bestimmungen

Im Testnetz Turtmann wurden sowohl astronomische Positionen als auch astronomische Azimute bestimmt. Diese Beobachtungen wurden gemeinsam vom Bundesamt für Landestopographie (L+T) und vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich in der Woche vom 23. - 27. Juni 1986 ausgeführt. Die Azimutmessungen sind im Teil II dieses Bandes beschrieben. Für die Bestimmung der astronomischen Positionen wurde das Transportable Zenitkamera Messsystem TZK 3 des IGP eingesetzt. Nähere Angaben zu diesem System sind in [Bürki, 1985] zu finden. Folgende Personen führten die Messungen durch:

Dr. D. Schneider, L+T	}	Azimutmessungen
Dipl. Ing. B. Mattli, L+T		
H. Gilgen, L+T	}	Zenitkameramessungen
B. Wirth, IGP		

Punkt	Datum der Beob.	Anz. Filme	Beob. Art	Bem.
10 Falleten	24. 6. 86 abends	6	D ex = 22.44 m	
9 Meretschi	24. 6. 86 abends	6	D ex = 13.65 m	
7 Turtmann	24. 6. 86 abends	6	zentrisch	
8 Susten	24. 6. 86 abends	6	zentrisch	
1 Brunnen Ex.	25. 6. 86 morgens	7	zent. auf Ex.	Schwierigk.!
3 Jeizinen	25. 6. 86 abends	6	D ex = 2.60 m	
2 Bräntschen	25. 6. 86 abends	6	D ex = 1.50 m	
4 Ergisch	25. 6. 86 abends	6	D ex = 10.70 m	
5 Oberems	26. 6. 86 abends	6	D ex = 48.67 m	Reservoir
6 Agam	26. 6. 86 abends	6	D ex = 3.20 m	

Tabelle 4.1-1: Überblick über die ausgeführten Positionsbestimmungen.

Bemerkungen zum Punkt 1 Brunnen Ex.: Die Kamera konnte nicht zum Zentrum transportiert werden. Deshalb wurde beschlossen, in ca 260 m Entfernung davon bei einem Weg ein Exzentrum einzurichten, das von der L+T eingemessen wurde. Die Zentrierung auf den Punkt im Testnetz sollte neben der Ellipsoidkrümmung auch die rechnerische Wirkung der Massenmodelle (Topographie, Moho und Ivreamodell) berücksichtigen. Die Ausmessung der Filme und die Berechnung der Resultate erfolgte am IGP. In Tabelle 4.1-2 sind die erhaltenen astronomischen Positionen  $\Phi$  und  $\Lambda$  mit ihren Genauigkeiten den berechneten geodätischen Koordinaten gegenübergestellt.

Die erhaltenen Resultate sind meist von guter Qualität. Einzig die beiden Stationen Brunnen Ex und Falleten weisen grössere mittlere Fehler an den Mittelwerten aus. Bei der Station Brunnen wurde bereits im Feld registriert, dass Schwierigkeiten mit einer Libelle auftraten. Die Genauigkeit der einzelnen Filme ist, wie auch bei der Station Falleten, von guter Qualität, nur die einzelnen Bestimmungen passen nicht genau genug zusammen. Dies spricht möglicherweise für eine nicht sehr stabile Aufstellung. Bei Brunnen Ex, die eine Station im terrestrischen Netz ist, ist dies besonders schade, während die Station Falleten nur ein Zwischenpunkt auf der Nivellementsline ist, wo die ungenaue Bestimmung nicht so stark ins Gewicht fällt.



Punkt	Astronomische Koordinaten				Geod. Koordinaten	
	$\Phi$	m $\Phi$	$\Lambda$	m $\Lambda$	$\phi$	$\lambda$
1 Brunnen Ex.	46 18 43.92	0.43	7 39 58.82	0.75	46 18 57.41	7 40 10.86
2 Bräntschen	46 19 19.99	0.04	7 41 26.66	0.26	46 19 39.74	7 41 37.00
3 Jeizinen	46 19 18.26	0.18	7 43 21.02	0.21	46 19 37.35	7 43 24.00
4 Ergisch	46 18 02.72	0.22	7 42 56.66	0.22	46 17 45.25	7 43 09.96
5 Oberems	46 17 28.32	0.15	7 41 20.14	0.12	46 17 04.20	7 41 25.71
6 Agarn	46 17 32.91	0.19	7 38 48.63	0.12	46 17 06.84	7 38 54.78
7 Turtmann	46 18 27.63	0.43	7 41 58.01	0.15	46 18 29.39	7 42 05.50
8 Susten	46 18 19.27	0.14	7 38 44.11	0.25	46 18 14.70	7 38 52.47
9 Meretschi	46 18 05.94	0.22	7 39 41.84	0.21	46 17 55.29	7 39 49.41
10 Falleten	46 18 07.49	0.84	7 40 48.62	1.12	46 18 02.18	7 40 53.36

Tabelle 4.1-2: Mittelwerte der astronomischen Bestimmungen mit Genauigkeiten

Die astronomischen Koordinaten sind bereits mit der Ellipsoidkrümmung auf das Zentrum zentriert worden. Da wir hier im Turtmann-Netz aber einige Stationen in starker Hanglage haben, wurde beschlossen, für alle Stationen und die jeweiligen Zentren die Lotabweichungen mit LAG zu berechnen und zur Zentrierung zu berücksichtigen. In der Differenz der Lotabweichungen zwischen dem Kamerastandort und dem zugehörigen Zentrum stecken die unterschiedlichen Einflüsse hauptsächlich der Topographie, aber auch der Moho und des Ivreakörpers. In den Tabellen 4.1-3 und 4.1-4 sind die Resultate dieser Berechnungen dargestellt.

Punkt	Y	X	H	$\xi$ ["]	$\eta$ ["]
1 Brunnen	17523	-70894	1009	-8.85	-7.30
1 Astropunkt	17721	-70719	999	-10.49	-7.03
2 Bräntschen	19560	-69406	1508	-17.78	-7.34
3 Jeizinen	21849	-69472	1499	-17.50	-3.03
3 Astropunkt	21851	-69470	1499	-17.51	-3.02
4 Ergisch	21561	-72934	1132	17.85	-9.73
4 Astropunkt	21560	-72945	1129	18.00	-9.79
5 Oberems	19334	-74209	1386	24.23	-4.77
5 Astropunkt	19381	-74223	1380	24.08	-4.45
6 Agarn	16103	-74137	1475	26.09	-3.86
6 Astropunkt	16101	-74134	1474	26.10	-3.86
7 Turtmann	20177	-71576	624	0.34	-5.61
8 Susten	16049	-72042	677	6.23	-6.08
9 Meretschi	17268	-72638	625	10.95	-5.68
9 Astropunkt	17277	-72648	625	11.09	-5.68
10 Falleten	18636	-72421	621	8.56	-6.34
10 Astropunkt	18651	-72404	619	8.38	-6.32

Tabelle 4.1-3: Mit LAG berechnete Lotabweichungen für alle Punkte (für Zentrierungen)

Punkt	LAG Zent.		gemessen Ex		zentriert	
	$\xi$ ["]	$\eta$ ["]	$\xi$ ["]	$\eta$ ["]	$\xi$ ["]	$\eta$ ["]
1 Brunnen	-8.85	-7.30	-13.49	-8.32	-11.85	-8.59
2 Bräntschen	-17.78	-7.34	-19.75	-7.14	-19.75	-7.14
3 Jeizinen	-17.50	-3.03	-19.09	-2.06	-19.08	-2.07
4 Ergisch	17.85	-9.73	17.47	-9.19	17.32	-9.13
5 Oberems	24.23	-4.77	24.12	-3.85	24.27	-4.17
6 Agarn	26.09	-3.86	26.07	-4.25	26.06	-4.25
7 Turtmann	0.34	-5.61	-1.76	-5.17	-1.76	-5.17
8 Susten	6.23	-6.08	4.57	-5.78	4.57	-5.78
9 Meretschi	10.95	-5.68	10.65	-5.23	10.51	-5.23
10 Falleten	8.56	-6.34	5.31	-3.27	5.49	-3.29

Tabelle 4.1-4: definitiv zentrierte Lotabweichungen

Auffallend sind die grossen in den nördlichen bzw. südlichen Talflanken gemessenen  $\xi$ -Komponenten der Stationen Bräntschen und Jeizinen bzw. Oberems und Agarn.

Punkt	gemessen		LAG Zent.		gem - präd	
	$\xi$	$\eta$	$\xi$	$\eta$	$\xi$	$\eta$
1 Brunnen	-11.85	-8.59	-8.85	-7.30	-3.00	-1.29
2 Bräntschen	-19.75	-7.14	-17.78	-7.34	-1.97	0.20
3 Jeizinen	-19.08	-2.07	-17.50	-3.03	-1.58	0.96
4 Ergisch	17.32	-9.13	17.85	-9.73	-0.53	0.60
5 Oberems	24.27	-4.17	24.23	-4.77	0.04	0.60
6 Agarn	26.06	-4.25	26.09	-3.86	-0.03	-0.39
7 Turtmann	-1.76	-5.17	0.34	-5.61	-2.10	0.44
8 Susten	4.57	-5.78	6.23	-6.08	-1.66	0.30
9 Meretschi	10.51	-5.23	10.95	-5.68	-0.44	0.45
10 Falleten	5.49	-3.29	8.56	-6.34	-3.07	3.05

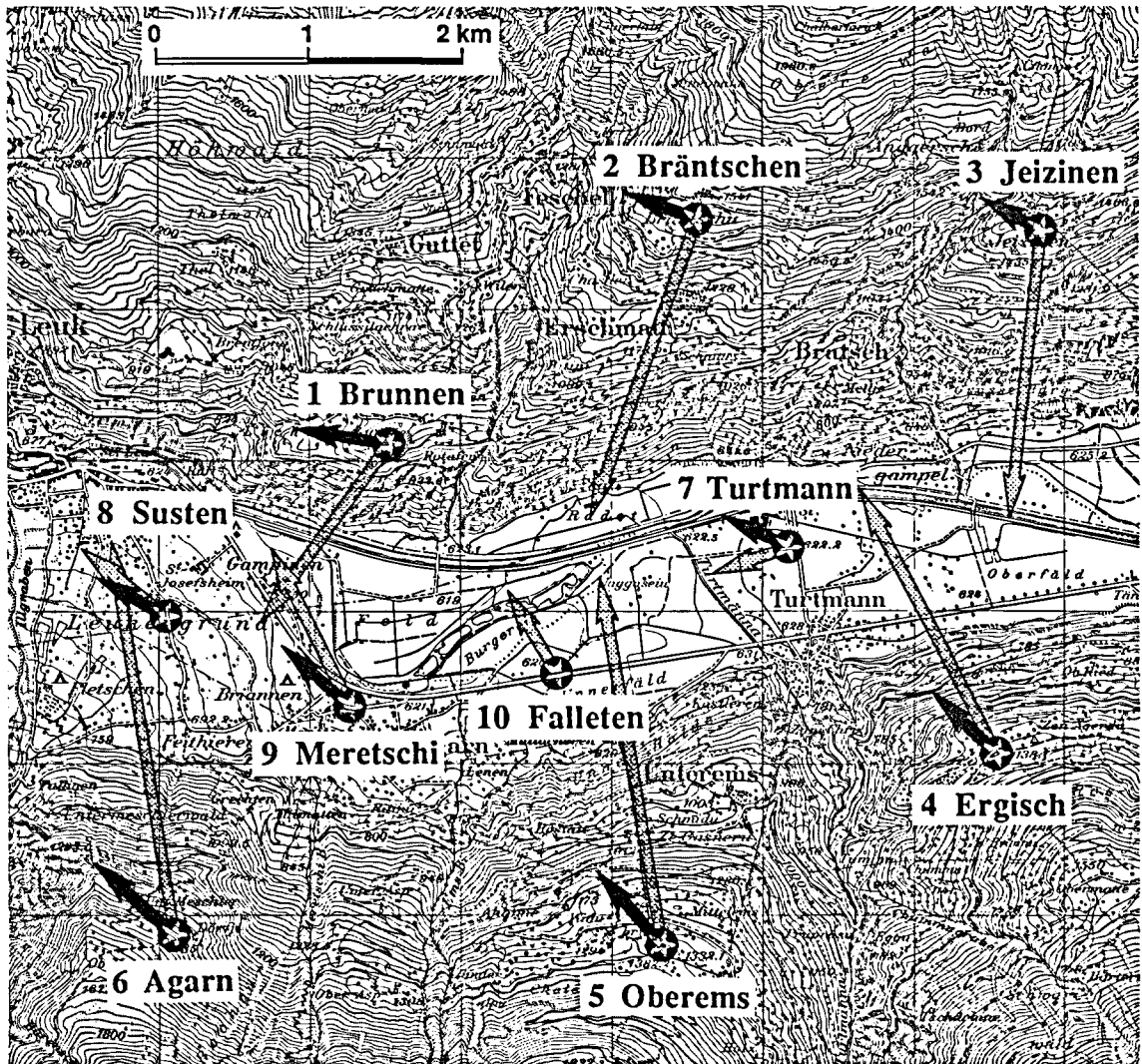
Tabelle 4.1-5: Differenzen zwischen gemessenen und mit LAG prädizierten Lotabweichungen

Diese Differenzen sind besonders für die ungenau bestimmten Stationen Brunnen und Falleten etwas gross. Daneben sind sie durchaus vertretbar, zeigen aber doch örtlich gewisse systematische Abweichungen, die eine lokale Neuberechnung des Geoides notwendig machen. Insbesondere die Nord-Süd Komponente  $\xi$  der Lotabweichungen zeigt im nördlichen Teil des Gebietes (Punkte 1 bis 3, im Südhang gelegen) etwa -3", im Talboden (Punkte 7, 8 und 9) ca -1.5" und im südlichen Teil (Punkte 4, 5 und 6, im Nordhang gelegen) ca 0.0" Differenzen. Diese stammen höchstwahrscheinlich von dem hier nicht vollständig zutreffenden Topographiemodell. Dazu können Dichteabweichungen der tatsächlichen Gesteine von der Referenzdichte (im LAG 2.65 g / cm<sup>3</sup>), aber auch die nicht erfassten Sedimente des Rhonetrogges beitragen. In der Tabelle 4.1-6 sind nochmals die wichtigsten Resultate der Positionsbestimmung zusammengefasst. Es sind die zentrierten astronomischen Positionen angegeben, die für die räumliche Ausgleichung der terrestrischen Messungen verwendet werden. Daneben sind die gemessenen und die mit LAG berechneten Lotabweichungen sowie deren Differenzen dargestellt.

In Abb. 4.1-1 ist schliesslich die Situation des Messgebietes mit den Messstationen und den erhaltenen Lotabweichungen dargestellt. Gleichzeitig sind auch schon die im Kapitel 4.4 über die lokale Geoidbestimmung in der Tabelle 4.4-1 ausgewiesenen reduzierten Lotabweichungen dargestellt. Dies sind die um das Topographiemodell, die Moho-Diskontinuität und das Ivreamodell sowie die Freiluftkrümmung reduzierten Oberflächenlotabweichungen.

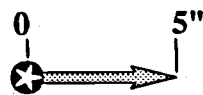
Punkt	zentrierte Astronomische Koordinaten				Lotabweichungen					
	$\phi$	$m\phi$	$\Lambda$	$m\Lambda$	zentriert		LAG Zent.		gem - präd	
					$\xi$	$\eta$	$\xi$	$\eta$	$\xi$	$\eta$
1 Brunnen	46 18 39.90	0.43	7 39 49.12	0.75	-11.85	-8.59	-8.85	-7.30	-3.00	-1.29
2 Bräntsch	46 19 19.99	0.04	7 41 26.66	0.26	-19.75	-7.14	-17.78	-7.34	-1.97	0.20
3 Jeizinen	46 19 18.27	0.18	7 43 21.00	0.21	-19.08	-2.07	-17.50	-3.03	-1.58	0.96
4 Ergisch	46 18 02.57	0.22	7 42 56.74	0.22	17.32	-9.13	17.85	-9.73	-0.53	0.60
5 Oberems	46 17 28.47	0.15	7 41 19.68	0.12	24.27	-4.17	24.23	-4.77	0.04	0.60
6 Agarn	46 17 32.90	0.19	7 38 48.63	0.12	26.06	-4.25	26.09	-3.86	-0.03	-0.39
7 Turtmann	46 18 27.63	0.43	7 41 58.02	0.15	-1.76	-5.17	0.34	-5.61	-2.10	0.44
8 Susten	46 18 19.27	0.14	7 38 44.10	0.25	4.57	-5.78	6.23	-6.08	-1.66	0.30
9 Meretschi	46 18 05.80	0.22	7 39 41.84	0.21	10.51	-5.23	10.95	-5.68	-0.44	0.45
10 Falleten	46 18 07.67	0.84	7 40 48.60	1.12	5.49	-3.29	8.56	-6.34	-3.07	3.05

Tabelle 4.1-6: Zentrierte astronomische Positionen und Lotabweichungen



128

Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 12. 9. 1989



gemessene Oberflächenlotabweichungen



um Massenmodelle reduzierte Lotabweichungen

Abbildung 4.1-1: Gemessene und reduzierte Lotabweichungen in den Stationen des Testnetzes.

## 4.2 Schweremessungen

Über die umfangreichen Schweremessungen im Turtmann-Gebiet, ihre Auswertungen und Interpretationen mit Bezug auf die örtliche Geologie hat die Schweizerische Geodätische Kommission bereits den Band 38 der Geodätisch-geophysikalischen Arbeiten in der Schweiz mit dem Titel "Lokale Schwerefeldbestimmung und gravimetrische Modellrechnungen im Satelliten (GPS)-Testnetz «Turtmann» (Wallis)" von Irene Bernauer und Alain Geiger publiziert [Bernauer, Geiger, 1986]. Hier soll deshalb nur noch eine knappe Zusammenfassung dieses Berichtes gegeben werden.

Im Hinblick auf die bevorstehenden GPS-Messkampagnen im Raume Turtmann, besonders um die GPS-Höhen mit dem Präzisionsnivellement vergleichen zu können, wurde Anfangs 1985 unter der Leitung von dipl. Phys. A. Geiger beschlossen, das ganze Testgebiet gravimetrisch mit ca 3 Stationen pro  $\text{km}^2$  zu vermessen. Vom 6. 8. 1985 bis zum 17. 8. 1985 bestimmten die Geophysik-Studenten Andreas Möckli und Erik Rüttener, Hilfsassistenten des IGP, 202 Schwerestationen. Diese sind meist flächenhaft über das ganze Gebiet verteilt, daneben wurden aber auch zwei Schwereprofile quer über den Rhone-Trog entlang des Präzisionsnivellements der L+T bestimmt. Meistens wurden Triangulations- bzw. Polygonpunkte mit bekannter Lage und Höhe vermessen, daneben aber auch einige Punkte aus den LK 1 : 25'000. Die Punktverteilung ist der Abb. 4.2-1 zu entnehmen. Für die bevorstehenden Reduktionsrechnungen musste für das ganze Gebiet (und mindestens 2.5 km überlappend) die Nahtopographie im 100m - Raster ab den LK 1 : 25'000 erfasst werden. Mit dieser Arbeit begann der Geophysik-Student und Hilfsassistent Markus Bollmann, er erfasste 86  $\text{km}^2$ . Weitere 100  $\text{km}^2$  erfasste schliesslich die Geophysik-Diplomandin Irene Bernauer im Rahmen ihrer Diplomarbeit, in welcher sie unter der Leitung von dipl. Phys. A. Geiger diese Schweremessungen auswertete. Die überarbeitete Version dieser Diplomarbeit ergab obenerwähnten Bericht Nr. 38.

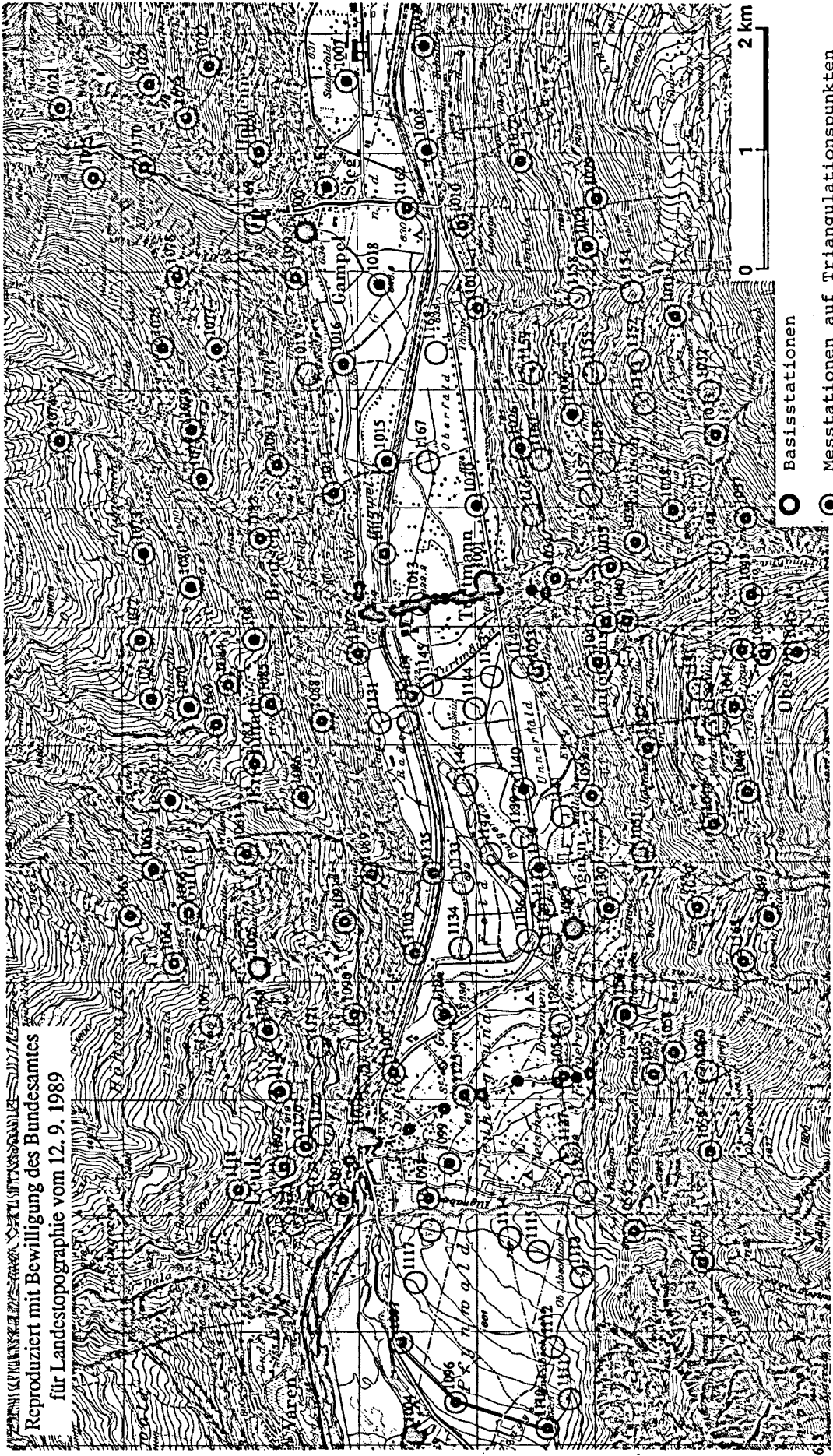
Das Hauptziel der Diplomarbeit bestand darin, von den Schweremessungen alle bekannten Massenstrukturen zu reduzieren und damit die Schwereinflüsse unbekannter Strukturen hervortreten zu lassen. Damit sollte ein gutes räumliches Modell für den Rhone- Sedimenttrog bestimmt werden. Ausgangspunkt der gravimetrischen Messungen war die Station "Gampel Kirche" des Schweizerischen Schweregrundnetzes. Die Wirkungen der topographischen Massen und der Bouguerplatte wurden mit einer konstanten Gesteinsdichte von  $2.67 \text{ g / cm}^3$  bis in eine Entfernung von 166 km berechnet.

615

620

625

Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 12. 9. 1989



○ Basisstationen

● Messtationen auf Triangulationspunkten

○ 3. und 4. Ordnung bzw. auf Polygonpunkten.

○ übrige Messtationen

● Messtationen auf den Spezialnivelements

Abbildung 4.2-1: Verteilung der gravimetrischen Messtationen

131

164

126

● 1095

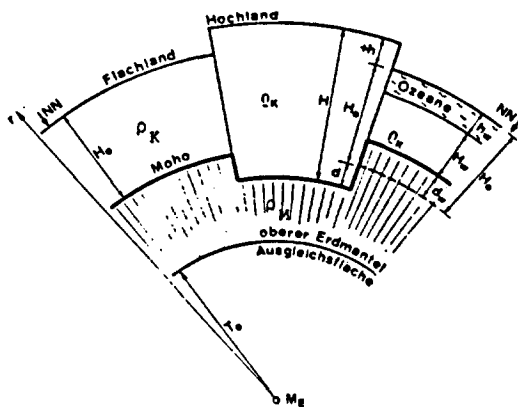
● 1094



**Abbildung 4.2-2:** Isolinienkarte der Bouguer - Anomalien [Einheit :  $\text{mgal} = 10^5 \text{ms}^{-2}$ ] für  $\rho_{\text{ref}} = 2.67 \text{g/cm}^3$ . Isolinien - Abstand : 1 mgal

Die Bouguer-Anomalien bewegen sich zwischen -150 und -170 mgal. Gut sichtbar ist die Wirkung des Sedimenttroges der Rhone, aber auch das Lötchen- und das Turtmantal sind erkennbar. Im Südwesten des Gebietes deutet sich der Pontiskalk mit unterschiedlicher Dichte an.

Die isostatischen Anomalien wurden mit dem Modell nach Airy berechnet, bei dem die Krustenblöcke eine konstante Dichte, aber unterschiedliche Eintauchtiefen aufweisen.



**Abbildung 4.2-3:** Isostasie - Modell nach Airy  
 $\rho_K$  = Dichte der Erdkruste  
 $\rho_M$  = Dichte des Erdmantels

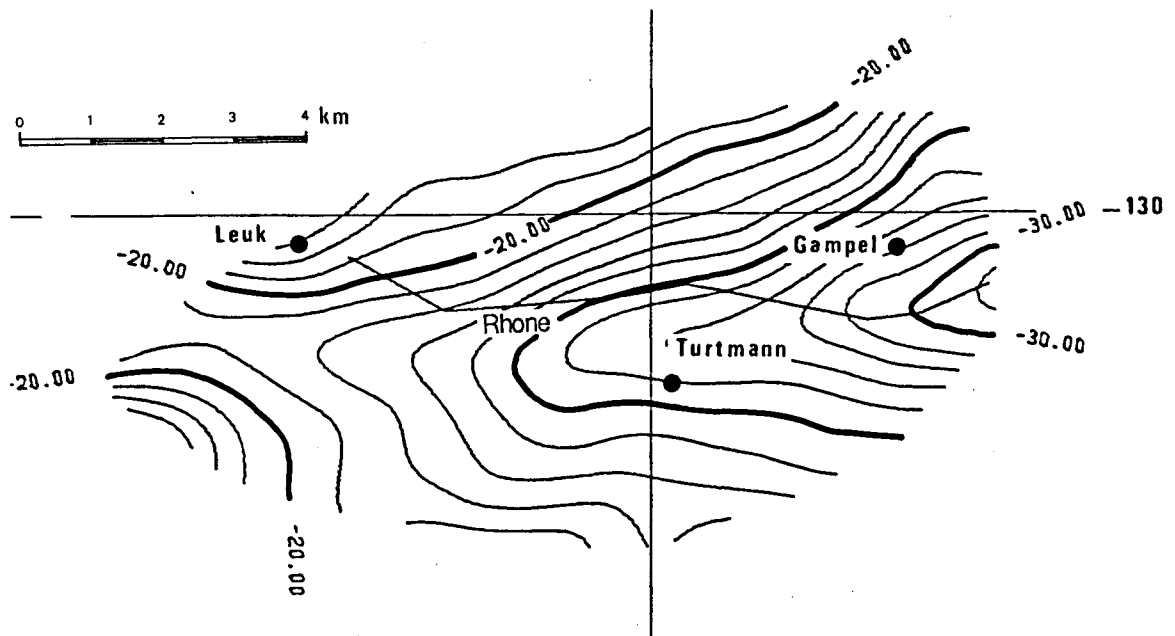


Abbildung 4.2-4: Isostatische Anomalien für  $H_0 = 32 \text{ km}$  und  $\Delta\rho = \rho_{\text{Mantel}} - \rho_{\text{Kruste}} = 0.5 \text{ g/cm}^3$ .

Für die Modellierung des Rhonetropes wollte man von den Bouguer-Anomalien ausgehen. Dazu musste allerdings der Regionaleffekt aus den Anomalien entfernt werden. Eine graphische Trennung an Hand der Bouguer-Anomalienkarte der Schweiz erwies sich als unmöglich, da auf dieser die verwendete Punktdichte im betrachteten Gebiet zu gering ist und die Messungen hauptsächlich im Rhone-Haupttal und in den Seitentälern liegen und somit von diesen beeinflusst sind. Um trotzdem regionale Anomalien zu erhalten und sinngemäss eine isostatische Kompensation der topographischen Massen zu berücksichtigen, wurde die Wirkung der Moho in allen Messpunkten berechnet und in einer Ausgleichung ein optimales Höhen-Bezugsniveau der Mohotiefen und der Dichtekontrast der Krusten-Mantelgrenze geschätzt.



In einem weiteren Schritt wurden Dichtebestimmungen an Handstücken durchgeführt, um für jede tektonische Einheit eine mittlere Dichte berechnen zu können. Es wurde ein Programmpaket entwickelt, das gestattet, aus geologischen Profilen Schichtflächen zu interpolieren, die Schichten miteinander und gegebenenfalls mit der Topographie zu schneiden sowie die Schwerewirkung der Einheiten dazwischen zu berechnen.

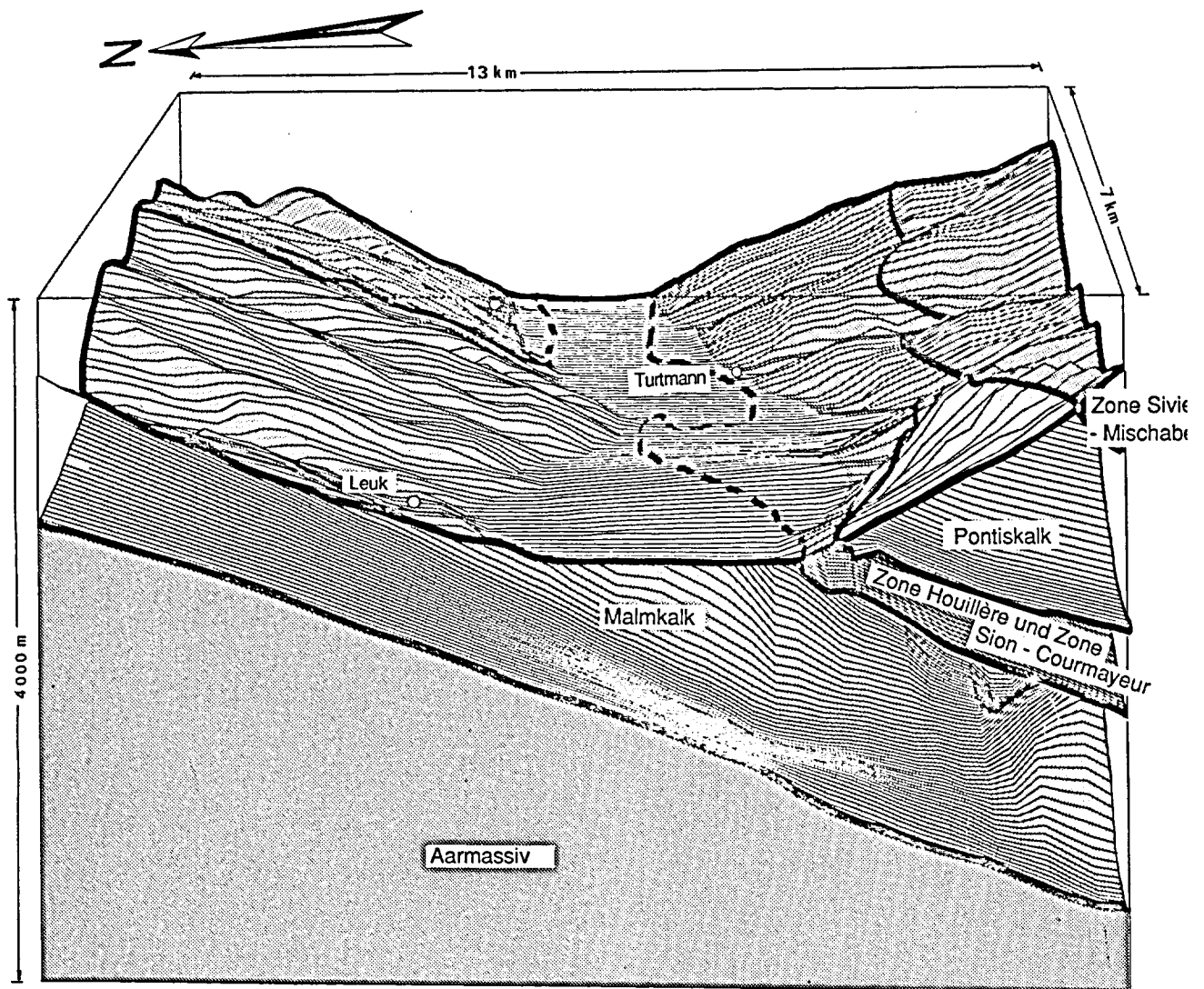
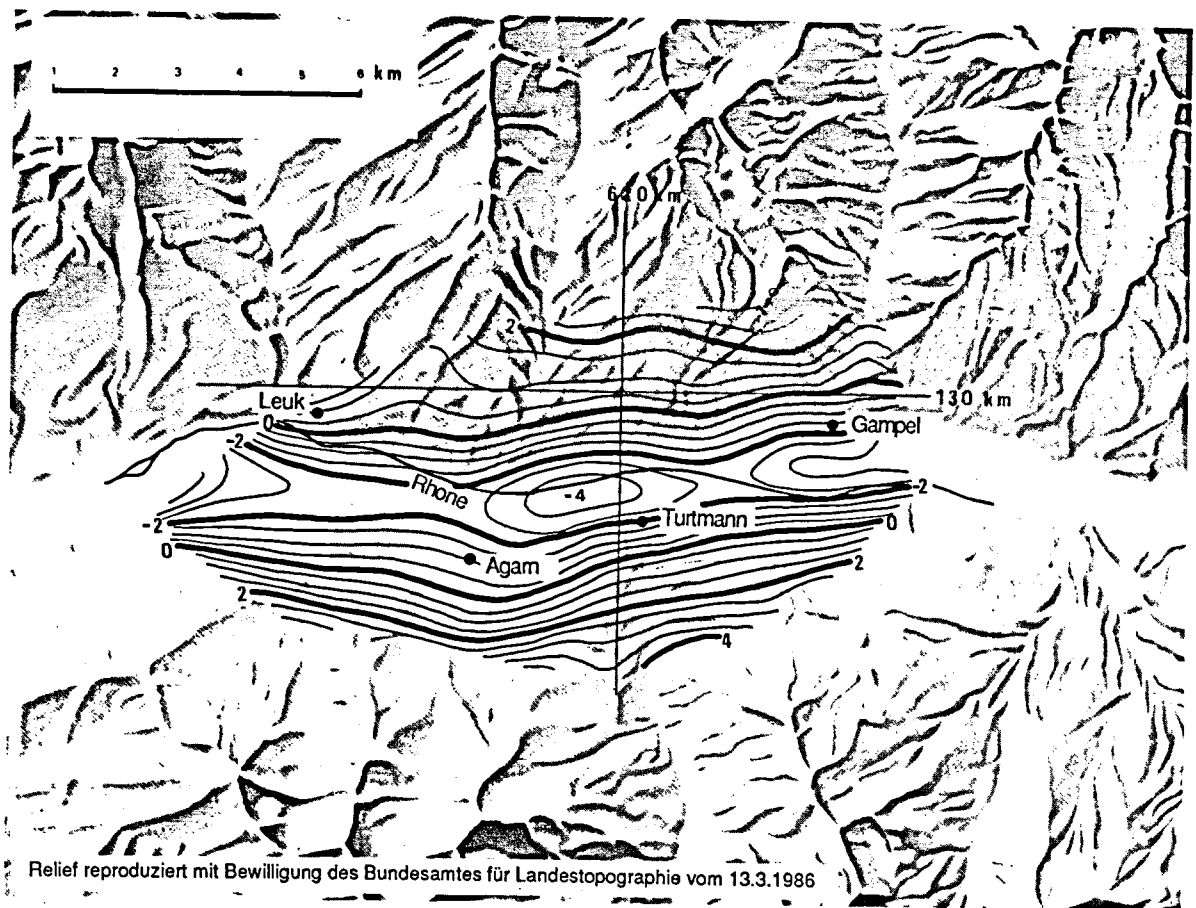


Abbildung 4.2-5: Interpolierte geologische Schichtflächen im Messgebiet Turtmann.

Schliesslich wurden auch die Schwerwirkungen eines Ivrea-Modells reduziert. Nach einigen Iterationen zwischen Reduktionsrechnung und Ausgleich der Moho-Wirkungen wurden die in Abb.4.2-6 dargestellten Residualanomalien erhalten, die sich jetzt nur noch im Bereich von  $\pm 4$  mgal bewegen.



**Abbildung 4.2-6:** Residual - Bouguer - Anomalien nach Abzug von Moho-, Ivrea-, Aarmassiv- und Pontiskalk- Schwerwirkungen.

Referenzdichte  $\rho_{ref} = 2.67 \text{ g/cm}^3$ .

Die Werte für den Dichtekontrast  $\Delta\rho$  zwischen Kruste und Mantel, sowie für die Moho- Bezugsniveau-Tiefe  $H_0$  sind:  $\Delta\rho = 0.529 \pm 0.024 \text{ g/cm}^3$ ,  $H_0 = 32.615 \pm 0.352 \text{ km}$ .

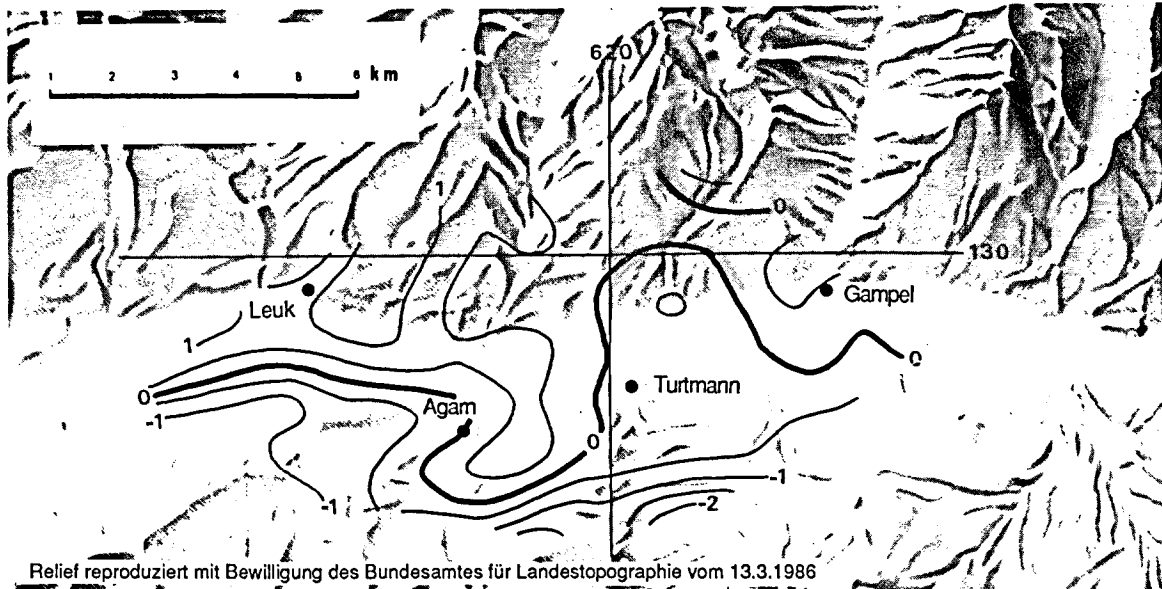
Der Dichtekontrast Aarmassiv - Referenzdichte beträgt  $\Delta\rho = 0.05 \text{ g/cm}^3$ .

Der Dichtekontrast Pontiskalk - Referenzdichte beträgt  $\Delta\rho = -0.20 \text{ g/cm}^3$ .

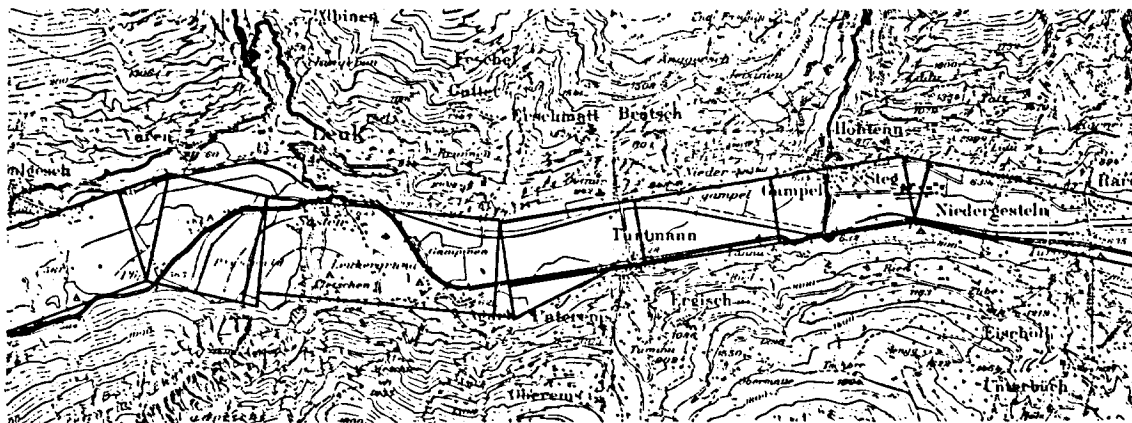
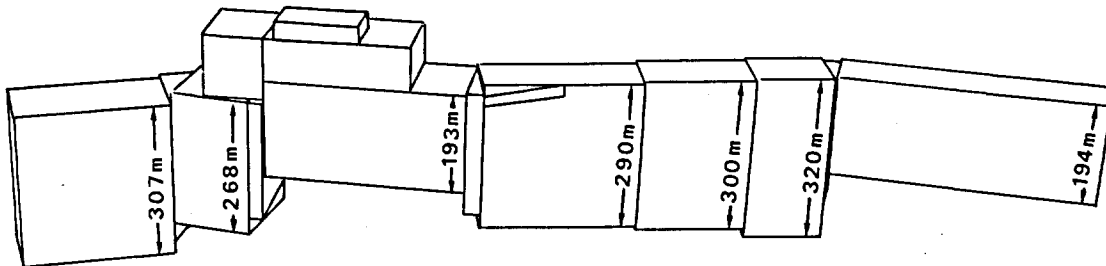
← | → Einfallrichtung des Aarmassivs

Isolinienabstand: 0.5 mgal.

Damit konnte mit der Modellierung des Rhone-Troges begonnen werden. Mit Hilfe von Ausgleichsrechnung und Iteration entstand schliesslich folgendes Modell:



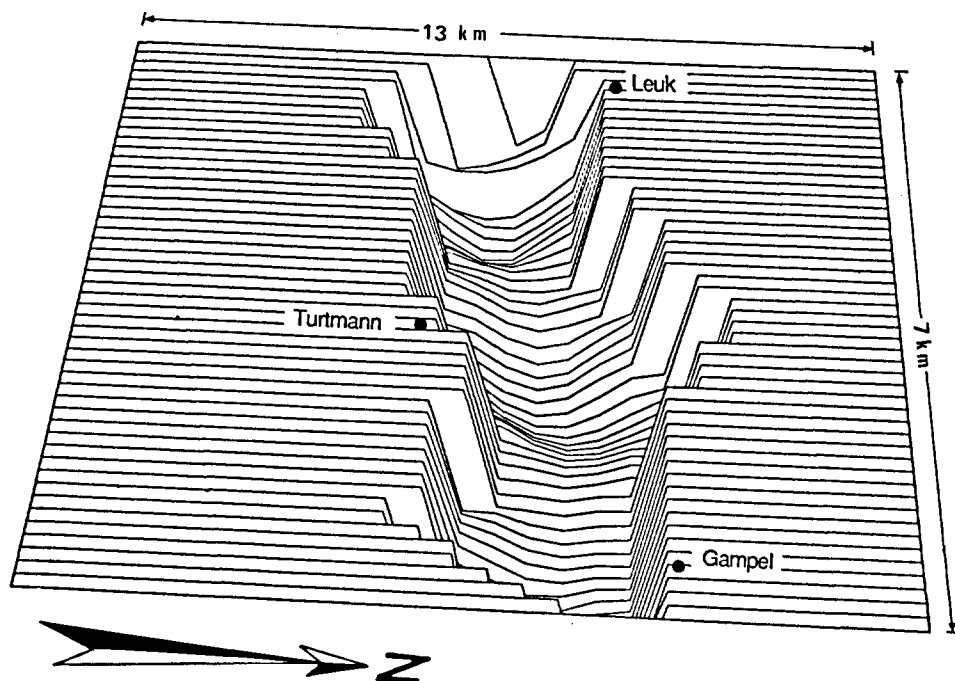
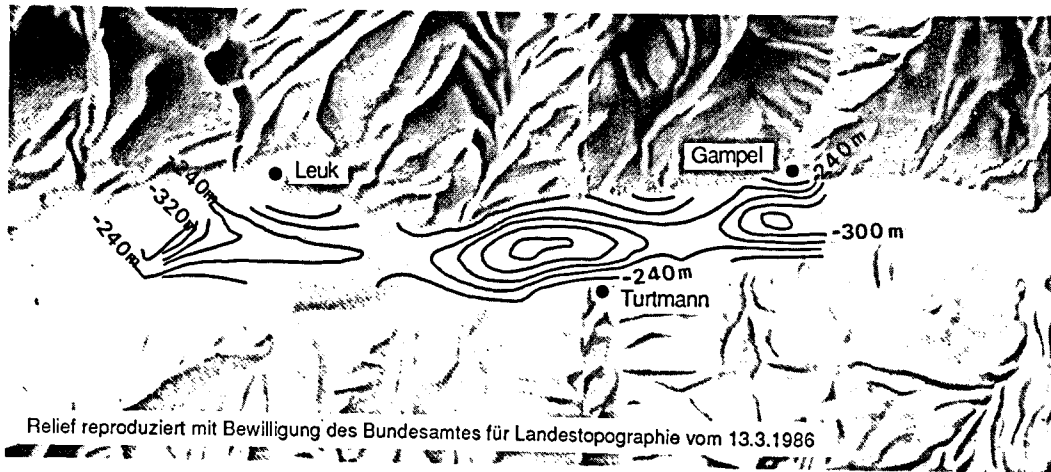
Relief reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 13.3.1986



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 28.8.1986

**Abbildung 4.2-7:** Residual - Bouguer - Anomalien, Ansicht und Grundriss des Rhone - Trogmodelles. Der Dichtekontrast wurde konstant als  $-0.6 \text{ g/cm}^3$  gesetzt. Die reduzierten Bouguer-Anomalie sind damit auf  $\pm 1 \text{ mgal}$  erklärt!

Schliesslich wurden die reduzierten Schwerewerte auch von PD Dr. E. Klingelé in seinem Inversionsprogramm verwendet, das direkt ein Trogmodell liefert:



**Abbildung 4.2-8:** Isolinien - Tiefenplan und 3-d Darstellung des Rhonetroges, berechnet mit dem Inversionsprogramm INVGRA von E. Klingelé. Isolinienabstand: 20 m.

### 4.3 Orthometrische Reduktion des Nivellements

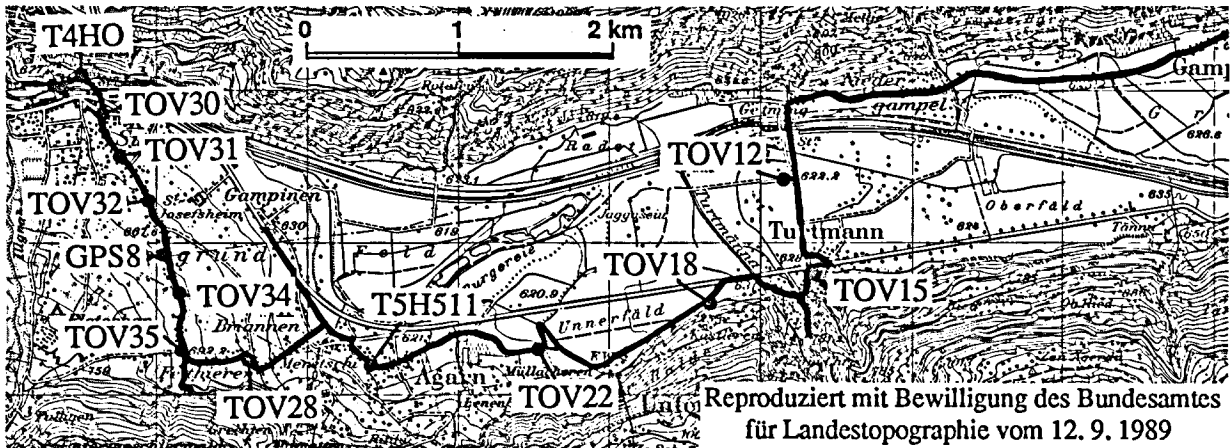


Abbildung 4.3-1: Linie des Landesnivellementes der L+T im Testgebiet

#### 4.3.1 Orthometrische Höhen aus Nivellement und Schweremessungen

Für die Berechnung der orthometrischen Korrekturen aus Nivellement und Schweremessungen wurden zuerst identische (oder sehr nahe gelegene) Nivellements- und Schwerestationen zusammengestellt. Einzig zwischen Punkt T5H511 und TOV 18 war keine geeignete Schweremessung vorhanden. Der Abstand dieser beiden Stationen ist aber so gross, dass ich für den Zwischenpunkt TOV 22 die Schwere interpolieren wollte. Dazu wurden für die benachbarten Schwerepunkte die Modellwirkungen der Topographie, der Moho und des Ivreakörpers berechnet. Werden die absoluten Schwere um diese Modellwirkungen und um die Einflüsse der Bouguerplatte und der Stationshöhe (Freiluft) korrigiert, so ist diese reduzierte Schwere für Zwischenpunkte gut interpolierbar.

Punkt	g gem	g Modell	g Bpl+Frei	g red
1140	430.71	108.95	122.60	662.26
1141	429.83	111.36	123.20	664.39
1052	418.31	115.61	132.36	666.28
1139	432.06	108.03	122.41	662.50
1138	431.94	108.44	123.15	663.53
1142	429.92	113.82	122.94	666.68
TOV 22	430.4	111.30	122.53	664.2

$$+0.19744 \frac{\text{mgal}}{\text{m}}$$

Tabelle 4.3-1: Reduktion der Schwerewerte (Angaben in [mgal] - 980000.0)

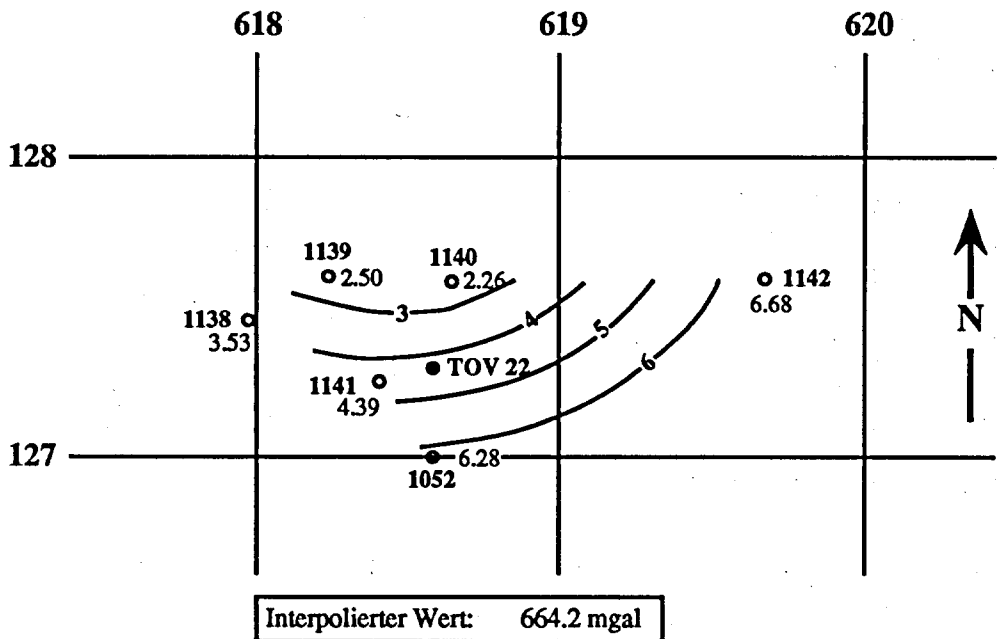


Abbildung 4.3-2: Graphische Interpolation des reduzierten Schwerewertes für TOV 22.

$$g_{red} = \frac{[pd]}{[p]} \quad \text{mit} \quad p = \frac{1}{D}$$

Pkt	D	1/D = p	d	pd
1140	1.22	0.82	2.26	1.85
1141	0.68	1.47	4.39	6.46
1052	1.12	0.89	6.28	5.61
1139	1.97	0.51	2.50	1.27
1138	2.55	0.39	3.53	1.38
1142	4.70	0.21	6.68	1.42
		[p] = 4.30		[pd] = 17.99

$$g_{red} = \frac{17.99}{4.30} = 4.19, \quad \text{also} \quad \underline{\underline{g_{red} = 664.19 \text{ mgal}}}$$

Tabelle 4.3-2: Berechnung des reduzierten Wertes für TOV 22 als gewichtetes Mittel.

Das gewichtete Mittel stimmt gut mit der graphischen Interpolation überein. Damit ergibt sich die absolute Schwere von TOV 22 zu 980'430.4 mgal. Damit haben wir alle Oberflächenschwerewerte zur Verfügung und können die geopotentiellen Knoten der Stationen in GPU berechnen. (GPU = Geo Potential Unit. 1 GPU = 10 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>). Zuerst berechnen wir aber die mittleren Schweren in der Lotlinie.

Die mittleren Schweren  $\bar{g}$  in den Lotlinien erhält man folgendermassen:

$$\bar{g} = g_{\text{Mess}} + \frac{1}{2} g_{\text{Frei}} - g_{\text{Bpl}} - DG + DGM = g_{\text{Mess}} + 0.04319 \cdot H - DG + DGM$$

$$\begin{array}{ccc} \uparrow & & \uparrow \\ +0.15425 H & & -0.11106 H \end{array}$$

DG enthält die Wirkungen der Topographie, der Moho und der Ivreazone im Oberflächenpunkt.

DGM dieselben Wirkungen, aber als Mittelwert in der Lotlinie.

Für die Herleitung dieser Formel und die Erklärung des verwendeten Programmes LOST zur Berechnung von DG und DGM vgl. [Wirth, 1990].

Punkt		Y	X	H	DG	DGM	
L + T	Grav.						
T4HO	3010	615475	129087	626.43	-104.00	-119.72	
TOV30	3001	615637	128850	630.53	-102.12	-117.23	
TOV31	3002	615750	128575	649.87	-100.51	-114.49	
TOV32	3003	615925	128275	662.47	-100.63	-114.02	
TOV33	3004	616037	127950	677.10	-101.14	-114.32	
GPS 8	3005	616049	127958	676.45	-101.19	-114.35	
TOV34	3006	616162	127650	685.32	-102.50	-116.13	
TOV35	3007	616150	127312	694.60	-105.59	-120.49	
TOV28	1128	616635	127285	657.57	-107.43	-123.31	
TSH511	1002	617450	127170	626.08	-110.53	-127.38	
TOV22	---	618580	127295	620.59	-111.30	-127.94	
TOV18	1142	619675	127588	622.67	-113.82	-129.14	
TOV15	4006	620325	127787	629.38	-110.79	-127.46	
TOV12	4004	620187	128412	622.45	-109.29	-125.10	
	1141	618405	127250	624.00	-111.36	-127.84	
Für	}	1052	618578	127002	670.40	-115.61	-129.05
TOV 22		1140	618636	127579	620.95	-108.95	-124.14
		1139	618230	127600	620.00	-108.03	-123.19
		1138	617969	127452	623.75	-108.44	-123.71

**Tabelle 4.3-3:** Berechnung der Modellschweren in den Beobachtungspunkten und als Mittelwert in der Lotlinie mit dem Programm LOST.

Nun können die orthometrischen Höhen aus Nivellement und Schweremessungen berechnet werden (vgl. Tabelle 4.3-4). Die absolute Höhe in GPU wurde so gewählt, dass für den Punkt TOV12 die orthometrische Höhe 622.439 m entsteht.

Punkt L + T	Y	X	H	g Abs	Δh gem	ΔGPU	GPU	$\bar{g}$	Orthometrische Höhe aus Niv. und Schwere
T4HO	615475	129087	626.43	980441.93	4.105	4.02471	614.18054	980453.27	626.4251
TOV30	615637	128850	630.53	980441.26	19.333	18.95484	618.20525	980453.38	630.5300
TOV31	615750	128575	649.87	980437.71	12.600	12.35349	637.16009	980451.80	649.8638
TOV32	615925	128275	662.47	980434.27	14.638	14.35157	649.51358	980449.49	662.4651
TOV33	616037	127950	677.10	980430.23	-0.638	-0.62551	663.86515	980446.29	677.1051
GPS 8	616049	127958	676.45	980430.44	8.854	8.68072	663.23964	980446.50	676.4669
TOV34	616162	127650	685.32	980427.49	9.279	9.09737	671.92036	980443.46	685.3229
TOV35	616150	127312	694.60	980423.58	-37.030	-36.30517	681.01773	980438.68	694.6051
TOV28	616635	127285	657.57	980428.17	-31.489	-30.87275	644.71256	980440.69	657.5743
T5H511	617450	127170	626.08	980431.00	-5.491	-5.38354	613.83981	980441.19	626.0853
TOV22	618580	127295	620.59	980430.4	2.080	2.03929	608.45627	980440.56	620.5948
TOV18	619675	127588	622.67	980429.92	6.702	6.57084	610.49556	980441.49	622.6741
TOV15	620325	127787	629.38	980429.20	-6.937	-6.80124	617.06640	980439.71	629.3772
TOV12	620187	128412	622.45	980430.64			610.26516*	980441.71	622.4390*
Für TOV 22	618405	127250	624.00	980429.83				* Def	
	618578	127002	670.40	980418.31					
	618636	127579	620.95	980430.71					
	618230	127600	620.00	980432.06					
	617969	127452	623.75	980431.94					

Tabelle 4.3-4: Berechnung von orthometrischen Höhen aus Nivellement und Schwere.



Höhendifferenz GPS 8 --> TOV12:	gemessen	-54.0323 m
	orthometrisch	-54.0279 m

Dies ergibt für diese Strecke eine orthometrische Korrektur von + 4.4 mm.

### 4.3.2 Orthometrische Korrektur aus Lotkrümmungen $\kappa$

$$\kappa_N = \xi_n - \xi_o \quad (\text{unten minus oben, N = Nord})$$

$$\kappa_E = \eta_n - \eta_o \quad (\text{unten minus oben, E = Ost})$$

$$\kappa_\alpha = \kappa_N \cos \alpha + \kappa_E \sin \alpha \quad (\text{in beliebiges Azimut } \alpha)$$

$$\text{Orth. Korr} (\alpha) = \kappa_\alpha \cdot D \cdot 1 / \rho'' \quad (D = \text{Horizontaldistanz})$$

Wir erhalten von beiden Punkten her eine Lotkrümmung, die wir für die Berechnung der orthometrischen Korrektur mitteln (vgl. Tabelle 4.3-6).

Punkt	Y	X	H	D	Azimut
T4HO	615475	129087	626.43	287.08	161.83
TOV30	615637	128850	630.53	297.31	175.18
TOV31	615750	128575	649.87	347.31	166.38
TOV32	615925	128275	662.47	340.39	176.26
GPS8	616049	127958	676.45		

Punkt	Y	X	H	D	Azimut
GPS 8	616049	127958	676.45		
TOV34	616162	127650	685.32	328.08	177.61
TOV35	616150	127312	694.60	338.21	202.26
TOV28	616635	127285	657.57	485.75	103.54
T5H511	617450	127170	626.08	823.07	108.92
TOV22	618580	127295	620.59	1136.89	92.99
TOV18	619675	127588	622.67	1133.52	83.36
TOV15	620325	127787	629.38	679.78	81.09
TOV12	620187	128412	622.45	640.05	386.17

Tabelle 4.3-5: Koordinatenverzeichnis mit Distanz [m] und Azimut [°]

Punkt	$\kappa_N$	$\kappa_E$	$\kappa_{Az}$	$\kappa_M$	D	Orth. Korr.
T4HO	2.54	0.88	-1.600	-0.869	287.08	-0.0012
TOV30	0.59	0.62	-0.137	-0.0095	297.31	-0.0000
TOV31	-0.20	0.28	-0.310	0.467	347.31	0.0008
TOV32	-0.73	-0.02	0.291	0.904	340.39	0.0015
GPS8	-1.36	-0.36	0.314			
			0.620			
			0.673			
			1.135			

Total: + 0.0011 m

Punkt	$\kappa_N$	$\kappa_E$	$\kappa_{Az}$	$\kappa_M$	D	Orth. Korr.
GPS 8	-1.36	-0.36	1.153	1.432	328.08	0.0023
TOV34	-2.01	-0.51	1.711	2.633	338.21	0.0043
TOV35	-3.21	-0.85	2.027	-0.598	485.75	-0.0014
TOV28	-2.95	-0.69	3.238	-0.271	823.07	-0.0000
T5H511	-2.89	-0.14	-0.670	-0.003	1136.89	-0.0008
TOV22	-2.56	0.46	-0.525	-0.141	1133.52	-0.0003
TOV18	-3.16	0.96	-0.271	-0.053	679.78	0.0001
TOV15	-1.86	0.65	0.265	0.035	640.05	-0.0025
TOV12	0.41	0.27	-0.457	-0.807		
			0.176			
			-0.217			
			0.111			
			-0.007			
			0.077			
			-1.956			
			0.342			

Total: + 0.0017 m

Tabelle 4.3-6: Orthometrische Korrektur aus Lotkrümmungen

### 4.3.3 Helmertsche orthometrische Höhen

Nach Helmert liegt jede Station auf einer ebenen Platte, es gibt also keine Hänge. Für die Berechnung der mittleren Schwere in der Lotlinie wird nur die Wirkung der Bouguerplatte und der Freiluftgradient berücksichtigt:

$$\bar{g} = g_{\text{Mess}} + \frac{1}{2} g_{\text{Frei}} - g_{\text{Bpl}} \quad \Rightarrow \quad \bar{g} = g_{\text{Mess}} + 0.04319 \frac{\text{mgal}}{\text{m}} \cdot H$$

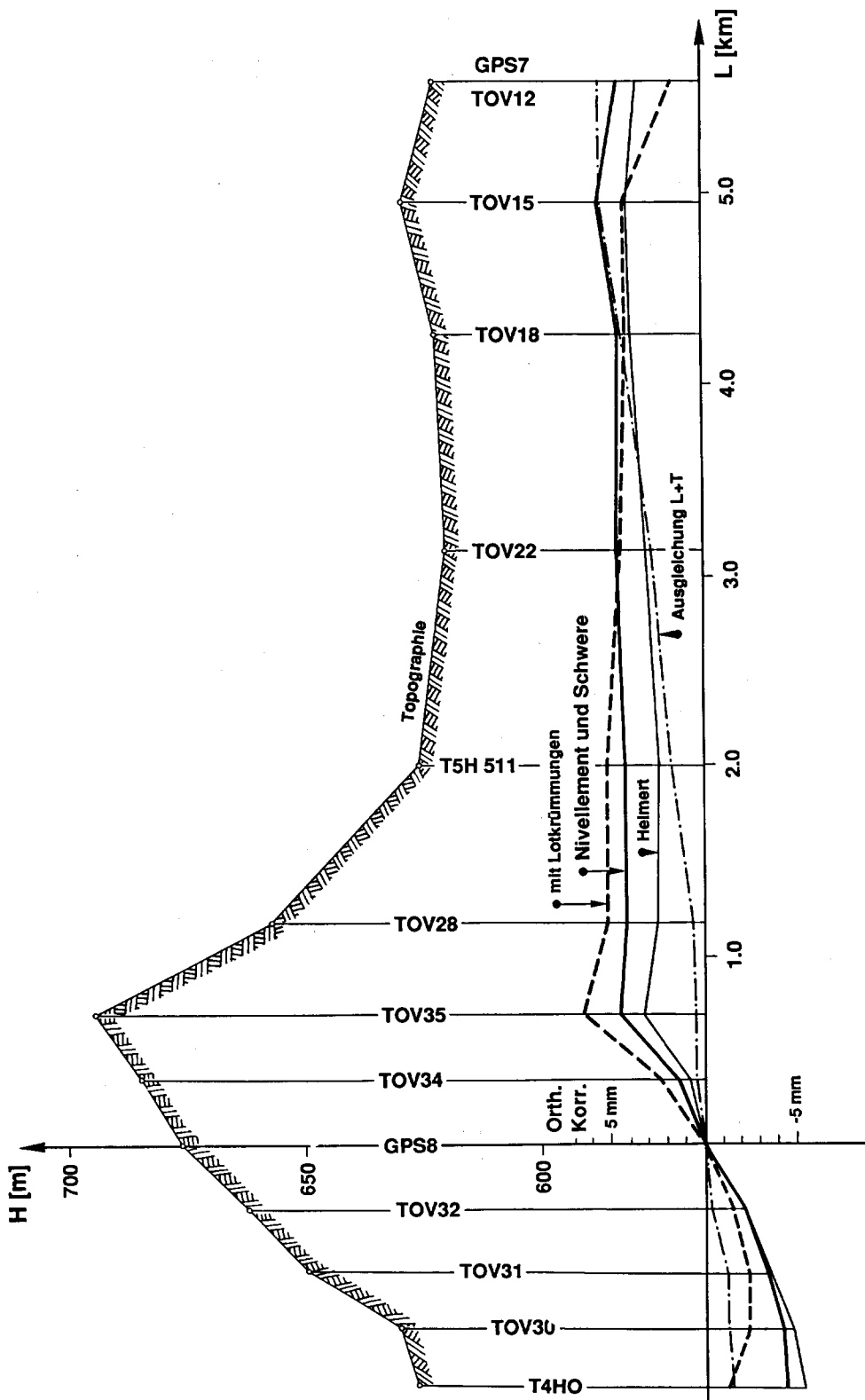
$\uparrow$   
 $+0.15425 H$

$\uparrow$   
 $-0.11106 H$

Punkt	H	g Abs	$\bar{g}$	GPU	H Helmert
T4HO	626.43	980441.93	980468.99	614.18054	626.4151
TOV30	630.53	980441.26	980468.49	618.20525	630.5203
TOV31	649.87	980437.71	980465.78	637.16009	649.8545
TOV32	662.47	980434.27	980462.88	649.51358	662.4561
GPS 8	676.45	980430.44	980459.66	663.23964	676.4579
TOV34	685.32	980427.49	980457.09	671.92036	685.3134
TOV35	694.60	980423.58	980453.58	681.01773	694.5946
TOV28	657.57	980428.17	980456.57	644.71256	657.5636
T5H511	626.08	980431.00	980458.04	613.83981	626.0745
TOV22	620.59	980430.4	980457.20	608.45627	620.5842
TOV18	622.67	980429.92	980456.81	610.49556	622.6644
TOV15	629.38	980429.20	980456.38	617.06640	629.3665
TOV12	622.45	980430.64	980457.52	610.26516	622.4290

Tabelle 4.3-7: Helmertsche orthometrische Höhen

In der Abbildung 4.3-3 sind die Resultate der Tabellen 4.3-4, 4.3-6 und 4.3-7 graphisch in einem Längenprofil dargestellt. Auffällig ist das ganz andere Verhalten der orthometrischen Korrektur in Nord-Süd Richtung von T4HO bis TOV35 als in Ost-West Richtung längs des Rhonetales von TOV35 bis TOV12. Quer zum Tal wird eine Korrektur von ca 8 mm auf eine Länge des Nivellementes von 2 km erreicht, während in Längsrichtung praktisch keine Korrektur auftritt. Alle drei Verfahren liefern von der Charakteristik her ähnliche Resultate, die sich aber deutlich von der praktisch linearen Ausgleichung der L+T unterscheiden. Die realistischste Korrektur dürfte diejenige aus Nivellement und Schwere sein, die sowohl die Massenmodelle als auch Beobachtungen (Schweren) berücksichtigt.



**Abbildung 4.3-3:** Längenprofil der Nivellementslinie mit Darstellung der verschiedenen orthometrischen Korrekturen.

## 4.4 Lokale Geoidbestimmung

Die in Kapitel 4.1 erwähnten Lotabweichungen und die in 4.2 aufgeführten Schweremessungen sollen hier zu einer lokalen kombinierten astrogeodätisch-gravimetrischen Geoidbestimmung mit Hilfe der multivariaten Prädiktion herangezogen werden. Verwendet wurde das Markov-Undulationsmodell 3. Ordnung (vgl z.B. [Marti, 1988]). Dazu wurde ein neues Programm in Turbo-Pascal auf dem Macintosh entwickelt. Für genauere Angaben vgl. [Wirth, 1990].

Als erstes wurden die Modellwirkungen der Topographie, der Moho und der Ivreazone auf die Lotabweichungen mit LAG berechnet. Zusätzlich wurden die in 4.2 beschriebenen 202 Bougueranomalien der Schweremessstationen herangezogen. Die Bougueranomalien sind bereits von der Wirkung der Topographie befreit, weshalb sie nur noch um die Schwerewirkungen der Moho und der Ivreazone reduziert werden mussten.

Punkt	gemessen		Modelle		Freil $\xi$	reduziert	
	$\xi$	$\eta$	$\xi$	$\eta$		$\xi$	$\eta$
1 Brunnen	-11.85	-8.59	-13.09	-2.31	0.17	1.07	-6.28
2 Bräntschen	-19.75	-7.14	-21.77	-2.35	0.26	1.76	-4.79
3 Jeizinen	-19.08	-2.07	-21.46	1.95	0.25	2.13	-4.02
4 Ergisch	17.32	-9.13	13.14	-4.82	0.19	3.99	-4.31
5 Oberems	24.27	-4.17	19.17	0.20	0.24	4.86	-4.37
6 Agarn	26.06	-4.25	21.08	1.18	0.25	4.73	-5.43
7 Turtmann	-1.76	-5.17	-3.98	-0.64	0.11	2.11	-4.53
8 Susten	4.57	-5.78	1.82	-1.09	0.12	2.63	-4.69
9 Meretschi	10.51	-5.23	6.40	-0.68	0.11	4.00	-4.55
10 Falleten	5.49	-3.29	4.04	-1.36	0.11	1.34	-1.93

Tabelle 4.4-1: Bestimmung der Moho-reduzierten Lotabweichungen (Werte in ["])

Tabelle 4.4-1 zeigt, wie durch die Reduktion der gemessenen Lotabweichungen um die Modelle Topographie, Moho und Ivreazone (sowie Korrektur der  $\xi$ -Komponente um die ellipsoidische Freilufkrümmung) die Systematik des Tales praktisch vollständig verschwindet. Die  $\eta$ -Komponente ist beinahe vollständig zur Konstanten reduziert, während in der  $\xi$ -Komponente noch eine leichte Systematik von Norden nach Süden zu sehen ist (vgl. auch Abb. 4.1-1).

Die auf dieselbe Art reduzierten Schwerewerte schwanken noch zwischen -79.81 und -90.31 mgal.

Folgende Angaben stammen aus dem Programm-Output:

```

Verwendetes Modell :           M A R K O V   3

Parameter :   d =           2000 m   (char. Distanz der
                                   Kovarianzfunktion)
Varianzen :   (a Priori)

                                   Signal      Noise

Undulation:           0.031           0.020 [ m ]
Xi      :             1.860           0.500 [ " ]
Eta     :             1.860           0.700 [ " ]
Schwere :             12.508           0.500 [mgal]
  
```

Offsets zwischen den verschiedenen Datensätzen

```

Xinull :           3.1 "   Offset zwischen Lotabweichungen
Etanull :          -4.8 "   und Schweren
Dgnull  :          -85.00 mgal Konstanter Offset der Schwerewerte
  
```

Totale Anzahl Beobachtungen = 222

N = 0 DG = 202 XI = 10 ET = 10

Ymin = 612440.000 Ymax = 624908.000  
Xmin = 125260.000 Xmax = 131502.000

Prädiktionsgenauigkeit a Posteriori in den Beobachtungspunkten (Maximal- und Mittelwerte):

Gmax = 1.507 Gmin = -0.593 Gquer = 0.207 [mgal]  
Xmax = 1.075 Xmin = -1.928 Xquer = 0.870 ["]  
Emax = 2.422 Emin = -1.525 Equer = 0.980 ["]

Punkt	Messungen reduziert		prädizierte Werte					N <sub>CH</sub>
	$\xi$	$\eta$	N <sub>red</sub>	sN	$\xi$	$\eta$	$\Delta g$	
1 Brunnen	1.07	-6.28	-0.013	0.0024	1.9	-4.8	-81.3	1.262
2 Bräntschén	1.76	-4.79	0.017	0.0021	1.7	-4.3	-81.1	1.384
3 Jeizinen	2.13	-4.02	0.063	0.0026	2.0	-4.0	-82.8	1.418
4 Ergisch	3.99	-4.31	0.101	0.0019	3.4	-4.3	-83.4	1.384
5 Oberems	4.86	-4.37	0.077	0.0024	3.9	-4.3	-81.3	1.404
6 Agarn	4.73	-5.43	0.000	0.0041	4.2	-5.1	-83.9	1.310
7 Turtmann	2.11	-4.53	0.050	0.0000	2.4	-4.4	-88.2	1.312
8 Susten	2.63	-4.69	-0.036	0.0034	3.0	-4.9	-86.3	1.204
9 Meretschi	4.00	-4.55	0.002	0.0024	3.5	-4.7	-84.4	1.256
10 Falleten	1.34	-1.93	0.028	0.0014	3.3	-4.4	-87.4	1.284

Tabelle 4.4-2: Resultate der lokalen Schwerfeldbestimmung in den GPS-Stationen

Bemerkungen zur Tabelle 4.4-2: Die reduzierten Lotabweichungen gingen neben 202 Schwerewerten in die Ausgleichung. Die nächsten fünf Kolonnen geben die in den Beobachtungsstationen berechneten prädizierten Werte der reduzierten Schwerfeldparameter. Für die Geoidundulationen wurden ebenfalls die relativen Genauigkeiten zur Station Turtmann ausgewiesen. Berechnet wurden sämtliche Werte für alle 212 Stationspunkte, daraus ergeben sich die weiter oben ausgewiesenen Prädiktionsgenauigkeiten a Posteriori in den Beobachtungspunkten. Diese zeigen, dass die verwendeten a Priori Annahmen der Signale und des Noise sowie die charakteristische Distanz der Kovarianzfunktionen etwa zutreffend gewählt wurden. Es wurde eine beträchtliche Genauigkeit der Geoidhöhen erreicht, beträgt doch der maximale Wert der sN in Agarn lediglich 4.1 mm!

Interessant ist noch der Vergleich der prädizierten reduzierten Lotabweichungen mit den Messwerten. Die ausgewiesenen Genauigkeiten sind leicht schwächer als angenommen. Grosse Differenzen gibt es aber lediglich in den beiden Stationspunkten 1 Brunnen Ex. ( $\eta$ -Komponente) und 10 Falleten ( $\xi$ - und  $\eta$ -Komponente), die bereits bei den Messungen aufgefallen sind. Wenn diese beiden Stationen aus der Fehlerrechnung weggelassen werden, ergeben sich für  $\xi \pm 0.51''$  und für  $\eta \pm 0.23''$ . Es spricht natürlich für das Verfahren der multivariaten Prädiktion, dass grosse Noise-Verbesserungen an den fragwürdigen Beobachtungen angebracht werden und nicht an den guten! Es ist also mit diesem Verfahren möglich, ungenaue Lotabweichungen mit Hilfe von benachbarten Lotabweichungsbeobachtungen und Schweremessungen zu verbessern.

Die Kolonne ganz rechts schliesslich zeigt die prädizierten vollständigen Geoidundulationen, die um die Modellundulationen korrigiert wurden. Diese Werte wurden in der Höhe zusätzlich so transliert, dass der Punkt 7 Turtmann die mit LAG berechnete Geoidhöhe (also im Schweizer Datum) erhält.

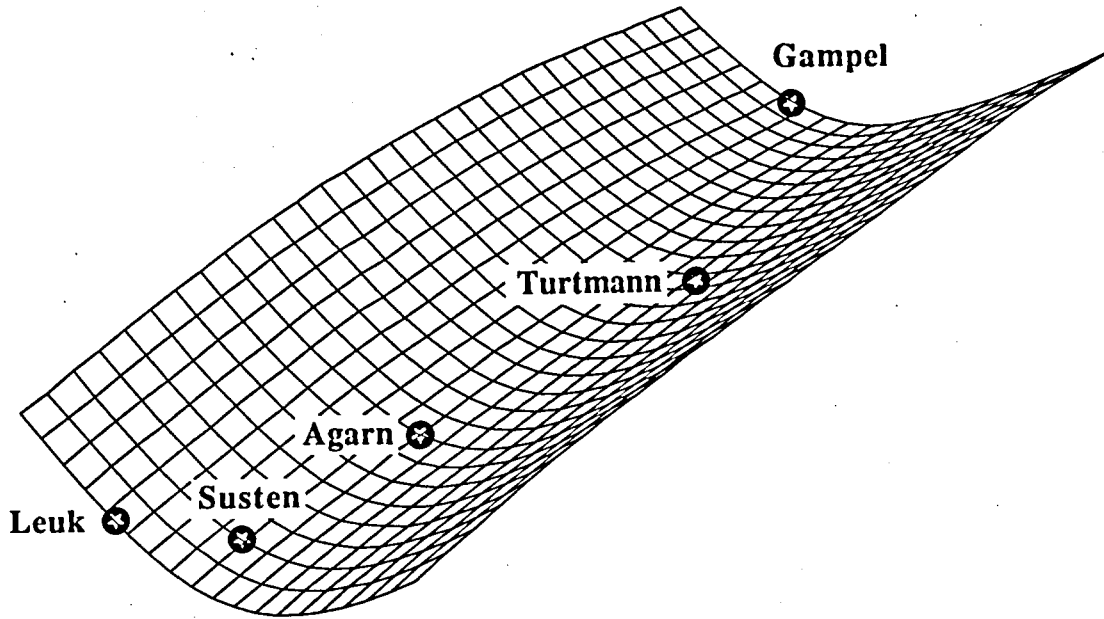
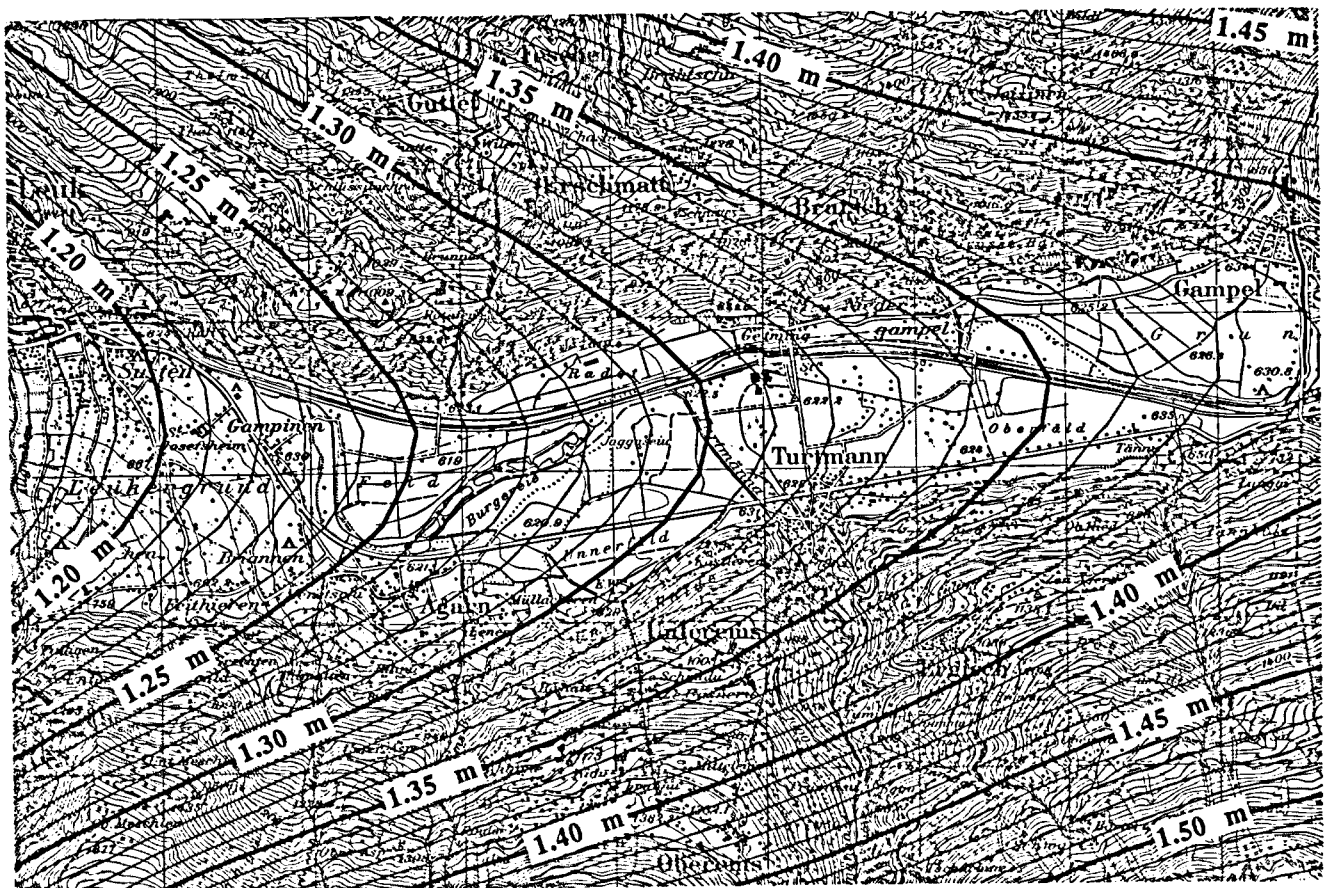


Abbildung 4.4-1: Ansicht des Geoides im Turtmann-Netz.



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes  
für Landestopographie vom 12. 9. 1989

Abbildung 4.4-2: 1 cm - Isolinienplan des Geoides im Turtmann-Netz (Schweizer Datum).

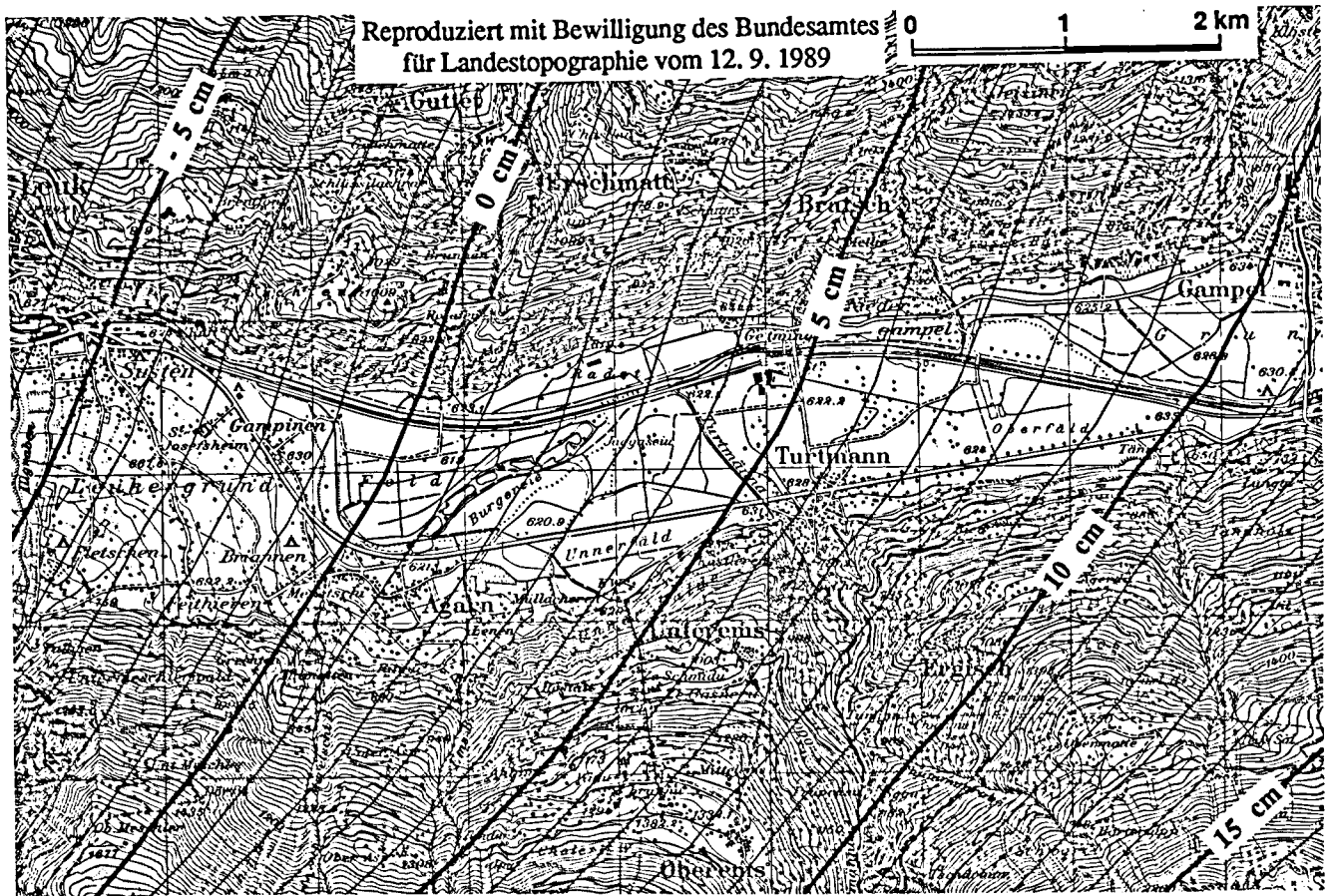


Abbildung 4.4-3: Um Massenmodelle reduziertes Teilgeoid (Isolinienabstand: 1 cm).

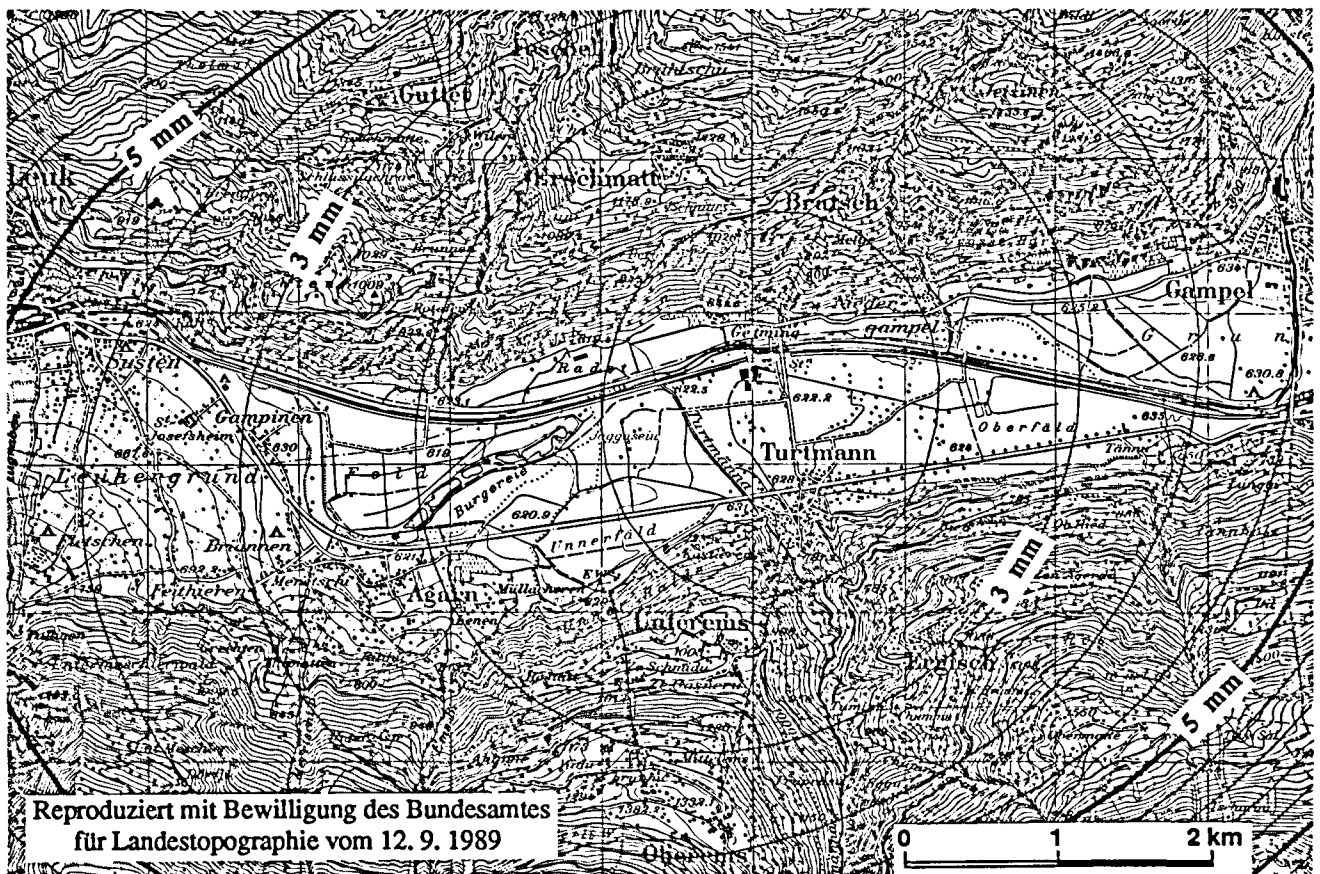


Abbildung 4.4-4: Genauigkeit des Geoides relativ zu Punkt Turmann (Isolinienabstand: 1mm).



Mit demselben Programm wurden schliesslich die reduzierten Geoidundulationen mit ihren relativen Genauigkeiten bezüglich Turtmann in einem regelmässigen Gitter über das Messgebiet berechnet. In diesen Gitterpunkten wurden wiederum mit LAG die Modellwirkungen berechnet, so dass auch die Geoidhöhen im Schweizer Datum dargestellt werden konnten (Abbildungen 4.4-1 und 4.4-2). Die in der Abbildung 4.4-3 dargestellten reduzierten Geoidhöhen widerspiegeln neben einem konstanten Trend sehr schön die Wirkung des nicht reduzierten Sedimenttroges des Rhonetales, der noch in den Messungen (besonders natürlich in diesem Beispiel in den Schweremessungen) steckt. Abbildung 4.4-4 schliesslich zeigt, dass die Genauigkeit der Geoidhöhen für das ganze Testnetz besser als 5mm sind. Damit wurde wirklich ein lokales Geoid mit Subzentimetergenauigkeit berechnet.

## Literatur

Bernauer, I., A.Geiger (1986): Lokale Schwerefeldbestimmung und gravimetrische Modellrechnungen im Satelliten(GPS)-Testnetz 'Turtmann' (Wallis). *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, SGK; Bd 38.*

Bürki, B. (1985) : Die operationelle Bestimmung von Lotabweichungen. Mit Erläuterungen zur transportablen Zenitkamera TZK3 des IGP und zum computergestützten Auswertesystem. *Bericht Nr. 91 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.*

Marti, U. (1988): Astrogeodätische Geoidbestimmung in der Ivrea-Zone. *Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 153. p 51.*

Wirth, B. (1990): Höhensysteme, Schwerepotentiale und Niveaulächen: Systematische Untersuchungen zur zukünftigen terrestrischen und GPS-gestützten Höhenbestimmung in der Schweiz. *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerische Geodätische Kommission, Band 42 , pp 204.*

