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)

Vierzigster Band

Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea- Zone und deren geophysikalische Interpretation

Beat Bürki

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)

Vierzigster Band

Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea- Zone und deren geophysikalische Interpretation

Beat Bürki

Adresse der Schweizerischen Geodätischen Kommission:

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

Redaktion des 40. Bandes: Dr. B. Bürki Prof. Dr. Hans-Gert Kahle

Druck: Offsetdruck Bern AG

VORWORT

Eine scheinbar im Widerspruch zum Newton'schen Gravitationsgesetz stehende Beobachtung machten die französischen Geodäten Bouguer und de la Condamine in der Mitte des 18. Jahrhunderts, als sie während Gradmessungen in Ecuador feststellten, dass die Gebirgsmasse des Chimborazzo das Lot nur um wenige Bogensekunden ablenkte, anstatt um Bogenminuten, wie nach dem Gravitationsgesetz zu erwarten gewesen wäre. 100 Jahre später wurden ähnliche Beobachtungen von den englischen Astronomen Airy und Pratt im Vorland des Himalaya-Gebirges gemacht. Damit waren erstmals Hinweise dafür gegeben, dass im tiefen Untergrund von Gebirgen Massendefizite existieren müssen, die die Gravitationswirkung der sichtbaren topographischen Massen weitgehend kompensieren. Auch die ersten Schweremessungen in den Alpen, ausgeführt von Mitarbeitern der Schweizerischen Geodätischen Kommission anfangs dieses Jahrhunderts, haben die Hypothese einer im hydrostatischen Gleichgewicht befindlichen Erdkruste unterstützt. Die Existenz von Kompensationsmassen hat in den vergangenen Jahren zur zentralen Frage geführt, wie diese Massen verteilt sind und welche Kräfte bei der Gebirgsbildung wirksam werden. Die damit verbundenen Probleme sind nach wie vor von grosser Aktualität, wie die Zielsetzungen des laufenden Internationalen Lithosphärenprojektes belegen und an dem sich viele Geowissenschafter der Schweiz aktiv beteiligen.

Im vorliegenden Band Nr. 40 der Geodätisch-geophysikalischen Arbeiten in der Schweiz wird ein Beitrag zu diesem Problemkreis geleistet. Als "geodätische" Signale der geologischen Tiefenstrukturen analysiert Herr Dr. Beat Bürki die Gravitationswirkungen der anomalen Störungsmassen im Gebiet der Zone von Ivrea-Verbano. Ziel der ausgeführten Forschungsarbeiten war es, Richtung und Betrag der Gravitationsbeschleunigung auf optimal verteilten Stationen flächenhaft im Gelände zu bestimmen, im Labor auszuwerten und aus den resultierenden Schwereanomalien und Lotabweichungen quantitative Rückschlüsse auf die Tiefenstruktur zu ziehen.

Von besonderem Interesse war die Ivrea-Zone. Sie stellt weltweit eine der grössten intrakrustalen Masseninhomogenitäten dar. Es sollte die Frage abgeklärt werden, wie weit die von Herrn Bürki angewandte und zum Teil selbstentwickelte astro-gravimetrische Methode geeignet ist, qualitative und quantitative Randbedingungen für die Struktur des Ivrea-Körpers festzulegen. So einfach die Aufgabenstellung theoretisch klingen mag: Der Weg von der ersten Spezifikation des Messsystems (auf dem Papier), über die Testmessungen und operationellen nächtlichen Messkampagnen, die Entwicklung des Auswertesystems bis hin zur Datenanalyse und geophysikalischen Auswertung musste von der ingenieurtechnischen Seite her auch realisiert werden

Als Starthilfe wurde am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich beschlossen, ein modernes Zenitkamera-Messsystem anzuschaffen. Es war in mehrjähriger Konstruktionsarbeit von der TU Hannover entwickelt und geländetüchtig hergestellt worden. Von Anfang an stand fest, dass die Geländemessungen nur durch den Einsatz möglichst vieler Kamerasysteme in einem zeitlich vertretbaren Rahmen durchgeführt werden konnten. Herr Bürki hat hier sein Organisationstalent unter Beweis gestellt. Unter seiner kundigen Leitung kamen alle zur Zeit in Europa vorhandenen Messsysteme in einem logistisch schwer zugänglichen Gebiet erfolgreich zum Einsatz:

- 1. Institut für Erdmessung der TU Hannover (Proff. W. Torge/ G. Seeber)
- Institut f\u00fcr Angewandte Geod\u00e4sie und Photogrammetrie der TU Graz (Prof. K. Rinner)
- 3. Institut für Topographie und Geodäsie der Universität Rom (Prof. G. Birardi)
- 4. Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI), Florenz (Gen. L. Zanetti)
- 5. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich

Die anspruchsvollen astro- und satellitengeodätischen Messkampagnen- und Auswertungen wurden vom Schweizerischen Nationalfonds der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SANW) und der ETH Zürich finanziert. Allen genannten Institutionen sei an dieser Stelle in aller Form für ihre wertvolle Unterstützung und Mitwirkung gedankt.

Die zu detektierenden Lotabweichungen liegen in der Grössenordnung von 20 bis 30 Bogensekunden: Ein äusserst kleiner Effekt, wenn man bedenkt, dass z.B. die Grösse der Venus von der Erde aus gesehen maximal einem Winkel von 40" entspricht. Neben der Zenitrichtungsbestimmung besteht die Problematik der astro-geodätischen Geoidbestimmung zudem darin, Ellipsoidnormalenrichtungen zu kompilieren. Dieser Aspekt war im Grenzgebiet Italien/Schweiz besonders schwierig zu behandeln. Herr Bürki hat hierzu eine sehr elegante Lösung gefunden, indem er Messdaten des damals verfügbaren amerikanischen weltraumgestützten Navigationssystems benutzte. Für die anschliessende Datenaufbereitung und analyse war es nötig, umfangreiche eigene Software-Entwicklungen zu realisieren.

Im Abschluss der vorliegenden Arbeit leitet Herr Bürki ein Ivrea-Modell her, das mit den zur Zeit vorhandenen astro-gravimetrischen Daten bestmöglich im Einklang steht. Er kann zeigen, dass die prägnante anomale Störungsmasse der Ivrea-Zone wahrscheinlich eine unterirdische Fortsetzung nach Osten, vom Maggia Tal bis über den Comer-See aufweist. Zudem deutet sich ein keilförmiger Vorsprung nach Norden in die Leventina an.

Im Zuge der zukünftigen Anwendung von satellitengestützten Messverfahren (GPS) wird der erarbeitete Datensatz eine wertvolle wissenschaftliche Basis für weiterführende Detailstudien zum Schwerefeld der Alpen bilden. Die Bearbeitung des breitgefächerten Themas setzt eine profunde Kenntnis des Gesamtgebietes voraus: Eine Eigenschaft, die oft schwerer zu finden ist, als die Spezialisierung in einem engen Wissenschaftsbereich. Wie wichtig solche Fähigkeiten sind, zeigt das Beispiel dieser Abhandlung.

Die Schweizerische Geodätische Kommission der SANW dankt Herrn Dr. Bürki für die mit viel Einfallsreichtum und grossem Einsatz geleistete erfolgreiche Arbeit und hofft auch in Zukunft auf seinen unermüdlichen Einsatz im Dienste der Schweizerischen Geodäsie. Herr Prof. Dr. St. Müller, Institut für Geophysik der ETHZ, hat diese Arbeit mit vielen wertvollen Anregungen bereichert. Seine kritischen Korrekturvorschläge haben wesentlich zur Ausarbeitung dieses Bandes beigetragen. Die SGK dankt Prof. Müller für seine Mitwirkung.

Zudem konnte Herr Dr. Bürki von den erfahrungsreichen Ratschlägen von Herrn PD Dr. E. Klingelé profitieren. Auch ihm sei an dieser Stelle besonders gedankt.

Im Namen der Schweizerischen Geodätischen Kommission

Der Vizepräsident F. Jeanrichard

Der Präsident Hans-Gert Kahle

Dank

Die vorliegende Arbeit ist das Resultat mehrjähriger Aktivitäten der Professur für Höhere Geodäsie und Geodynamik unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H.-G. Kahle. Der Autor möchte sich bei ihm an dieser Stelle für die Unterstützung und die Möglichkeit zur weitgehend selbständigen Durchführung dieses Projekts herzlich bedanken. Gleichzeitig sei allen Studenten und Kollegen gedankt, die nicht nur mit gutgemeinten Ratschlägen und Gesprächen, sondern auch mit hartem Geländeeinsatz wesentlich zum Gelingen der Messkampagnen beigetragen haben: Es sind dies im speziellen: Dr. A. Geiger, Herren Dipl. Ing. Bruno Wirth, Urs Marti, Max Müller, Adrian Wiget, Marc Cocard, Claus Hinze, Peter Wehrli, Felix Walser, Stefan Nebiker, Dipl. Natw. Diego Santini, Irene Wehrli-Bernauer, Adrian Egger, Clemens Casutt, Erik Rüttener, Andreas Möckli, Markus Bollmann, Thomas Mégèl. Den Herren Dr. E. Wildermann, Dipl. Ing. grad. M. Schnüll und O. Krüger sowie P. Witte von der TU Hannover, Dr. G. Chesi von der TU Graz, den Herren Dr. F. Di Fonzo und G. Maruffi von der Universität Rom sowie Cpt. Colella und seiner Gruppe vom IGMI in Florenz sei ebenfalls für ihren Einsatz gedankt.

Herrn PD Dr. E. Klingelé danke ich für die anregenden Diskussionen und die Lesung einer ersten Skriptfassung. Bei den Herren Prof. Dr. St. Müller und Prof. Dr. W. Torge bedanke ich mich für kritische Anregungen und für die Übernahme der Korreferate.

Dem Bundesamt für Landestopographie gilt unser Dank für die Drucklegung der Kartenbeilage.

B. Bürki, im Nov. 1989

PREFACE

Au milieu du 18e siècle, lors de la mesure du degré de méridien au Pérou, les géodésiens français Bouguer et La Condamine constatèrent, apparemment en contradiction avec la loi de la gravitation de Newton, que la masse du Chimborazzo ne déviait la verticale que de quelques secondes d'arc au lieu des quelques minutes attendues selon cette loi. Cent ans plus tard, les astronomes anglais Airy et Pratt firent les mêmes constatations dans les contreforts de l'Himalaya. Ainsi, pour la première fois, des indices montraient qu'il devait exister des déficits de masse dans le sous-sol des montagnes qui compensent largement l'effet de gravitation des masses visibles de la topographie. De même, les mesures gravimétriques effectuées dans les Alpes par des collaborateurs de la Commission géodésique suisse au début de ce siècle ont confirmé l'hypothèse d'un équilibre hydrostatique de la croûte terrestre. L'existence de masses compensatoires a, dans les années passées, soulevé la question fondamentale de la répartition de ces masses et des forces agissantes lors de la formation des montagnes. Les problèmes liés à cette question sont, aujourd'hui encore, d'une grande actualité, comme le montrent les buts fixés par le projet international en cours sur l'étude de la lithosphère et auquel participent activement plusieurs chercheurs suisses des géo-sciences.

Ce volume no 40 des Travaux géodésiques et géophysiques en Suisse représente une contribution à ces nombreux problèmes. M. Beat Bürki, dr ès sc. techn., analyse les effets des masses perturbatrices anomales de la zone d'Ivrea-Verbano sur la gravité en tant que signaux "géodésiques" des structures géologiques profondes. Le but de ces recherches était de déterminer la direction et le montant de l'accélération de la pesanteur en des stations réparties de façon optimale dans le terrain, d'en effectuer l'analyse en laboratoire et, à partir des anomalies de la pesanteur et des déviations de la verticale résultantes, d'en tirer des résultats quantitatifs concernant les structures profondes.

La Zone d'Ivrea était d'un intérêt particulier. L'hétérogénéité des masses intérieures de la croûte terrestre y est, de loin, l'une des plus importantes. Il s'agissait de savoir dans quelle mesure la méthode astro-gravimétrique appliquée par M. Bürki et en partie développée par lui, était appropriée pour définir la structure du corps d'Ivrea qualitativement et quantitativement. Théoriquement, la question paraît simple: mais il fallait réaliser la voie qui mène, depuis les premières spécifications du système de mesure (sur le papier) jusqu'à l'analyse des données et l'interprétation géophysique, en passant par les mesures expérimentales, les campagnes nocturnes des mesures opérationnelles et le développement du système d'analyse, selon les règles de l'art de l'ingénieur. La décision d'acquérir un système moderne de caméra zénithale par l'Institut de Géodésie et de Photogrammétrie de l'EPF-Zurich fut décisive pour le démarrage du projet. Ce système, bien adapté aux travaux en campagne, a été longuement développé et construit par l'Université technique de Hannovre. Dès le début, il apparut que seul l'engagement de plusieurs systèmes de caméras permettrait d'effectuer les mesures dans un délai raisonnable. M. Bürki a prouvé ici ses talents d'organisateur en engageant avec succès, sous sa direction et dans une région d'accès difficile, tous les systèmes disponibles actuellement en Europe:

- 1. Institut für Erdmessung der TU Hannover (Prof. W. Torge / G. Seeber)
- Institut f
 ür Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie der TU Graz (Prof. K. Rinner)

- 3. Facolta di Ingegneria dell'Universita di Roma (Prof. G. Birardi)
- 4. Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI), Firenze, (Gen. L. Zanetti)
- 5. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich

Les levées et le dépouillement des mesures astro-géodésiques et par satellites furent financés par le fonds national suisse de la recherche scientifique de l' Académie Suisse des Sciences Naturelles (ASSN) et par l'EPF Zurich. Nous exprimons nos grands remerciements à tous les instituts mentionnés ci-dessus pour leur précieux support et leur collaboration.

Les déviations de la verticale à détecter sont de l'ordre de grandeur de 20 à 30 secondes d'arc: il s'agit de valeurs extrêmement faibles si l'on songe que Vénus, vue de la terre, sous-tend un angle de 40". La difficulté de la détermination astro-géodésique du géoïde réside, en plus de la détermination de la direction du zénith, en la compilation des normales à l'ellipsoïde. Cet aspect était particulièrement difficile à traiter dans la zone frontière Italie/Suisse. M. Bürki a trouvé une solution très élégante en utilisant les données du système spatial de navigation américain d'alors. Mais il lui fallut entreprendre lui-même d'importants développements de logiciels pour le traitement et l'analyse des données.

A la fin du présent travail, M. Bürki propose un modèle du corps d'Ivrea qui correspond au mieux aux données astro-gravimétriques disponibles actuellement. Il peut montrer que la masse perturbatrice marquante et anomale de la Zone d'Ivrea présente probablement une continuation vers l'est, du Val Maggia au Lac de Côme. En plus, un éperon cunéiforme se dessine en direction de la Léventine. Les résultats acquis procureront une base scientifique précieuse aux études détaillées et plus approfondies du champ de gravité dans les Alpes lors des applications futures des méthodes de mesures assistées par satellites (GPS). Le traitement d'un thème aussi vaste exige une connaissance approfondie de plusieurs disciplines: une qualité qui est souvent plus difficile à trouver que la spécialisation dans un domaine scientifique défini étroitement. Cet ouvrage montre combien de telles qualités sont importantes.

La Commission géodésique suisse de l'ASSN remercie M. Bürki, dr ès sc. techn., pour ce travail mené à bien avec élan et savoir-faire et espère qu'à l'avenir également, son zèle infatigable sera mis au service de la géodésie helvétique. Le professeur St. Müller, de l'Institut de géophysique, a enrichi ce travail de ses nombreuses et précieuses suggestions. Ses propositions critiques ont contribué grandement à la préparation de ce volume. La Commission géodésique suisse le remercie de sa collaboration. En outre, M. Bürki a profité des conseils expérimentés de M. E. Klingelé, dr ès sc. nat., privatdocent, que nous remercions ici tout spécialement.

Au nom de la Commission Géodésique Suisse

Le Vice-Président F. Jeanrichard, ing. dipl. EPF

Le Président Prof. Dr. H.-G. Kahle

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung

Abstract

1.	Einleitung	1
1.1	Zur Bedeutung des Schwerefeldes	1
1.2	Das Geoid in der Schweiz	2
1.3	Verbesserungsmöglichkeiten zur Geoidberechnung	3
1.4	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	4
1.5	Überblick über die Struktur der Arbeit	7
2.	Eingesetzte Mess- und Auswertesysteme	8
2.1	Die transportable Zenitkamera als neuer Instrumententyp in der astronomischen Geodäsie	8
2.2	Zum Prinzip der astronomischen Lotrichtungsbestimmung mittels	9
L.L	transportabler Zenitkameras	,
2.3	Europäische Zenitkameras im Vergleich	17
2.3.1	Transportable Zenitkameras in Italien	19
2.3.2	Transportable Zenitkamera der TU Graz	20
2.3.3	Transportable Zenitkamera TZK1 der TU Hannover	21
2.3.4	Transportable Zenitkamera TZK2 der TU Hannover	22
2.3.5	Transportable Zenitkamera TZK3 der ETH Zürich	24
2.4	Auswertegeräte	31
2.4.1	Umbau des Stereokomparators STK1 des IGP	31
2.4.2	Auswertesoftware	36
3.	Einführung in die kombinierte astro-	40
	gravimetrische Störkörperinterpretation	
3.1	Allgemeines zur Störkörperbestimmung	40
3.2	Die Wirkung von Massen auf den Schwerevektor	42
3.2.1	Lotabweichungen	46
3.2.2	Schwereanomalien	50

Inhaltsverzeichnis

3.3	Formeln zur Berechnung der Anziehung geometrisch definierter Körper	52
3.3.1	Anziehung eines Quaders	52
3.3.2	Anziehung eines Prismas mit dreieckigem Querschnitt	55
3.4	Das mathematische Modell der Störkörperinterpretation	56
3.4.1	Allgemeine Bemerkungen	56
3.4.2	Berechnung von Anziehungen und deren Zuordnung zum Schweizerischen	
	Projektionssystem mit Rotationsmatrizen	57
3.4.3	Funktionales Modell	59
3.4.4	Stochastisches Modell	62
4.	Die geologische Störzone Ivrea - Verbano	66
4.1	Beschreibung des Messgebietes: Die Zone "Ivrea- Verbano"	66
4.2	Bisherige Arbeiten im Ivrea- Gebiet	69
5.	Die Messkampagnen 1983 - 86	75
5.1	Planung und Vorbereitung	75
5.1.1	Festlegung der Anzahl der Beobachtungsstandorte	75
5.1.2	Die Beschaffung der geodätischen Koordinaten	76
5.1.3	Feldrekognoszierung	77
5.2	Durchführung der Feldmessungen	79
5.2.1	Astronomische Messungen	79
5.2.2	Schweremessungen	82
5.2.3	Geodätische Messungen	83
5.2.4	Dichtebestimmung von Handstücken	87
6.	Auswertung und Reduktion der Feldmessungen	89
6.1	Auswertungen	89
6.1.1	Zenitkamera- Aufnahmen	89
6.1.2	Schweremessungen	90
6.1.3	Geodätische Messungen	92
6.1.4	Abschätzung der erreichten Genauigkeiten	94
6.2	Reduktion der Messwerte	97
6.2.1	Vorbemerkungen zur Terminologie	97
6.2.2	Topographische Reduktion (Geländereduktion)	99

6.2.2.1	Zur Geländereduktion benutzte Software	101
6.2.3	Moho - Reduktion	104
6.2.4	Reduktion der Sedimentationsgebiete	108
6.2.4.1	Reduktion der Po - Ebene	108
6.2.4.2	Reduktion der Talfüllungen	110
6.2.5	Geologische Reduktion	112
6.2.6	Reduktion der Seen	113
6.2.7	Abschliessender Kommentar zu den Reduktionen	114
6.3	Resultierende Anomalien als bereinigte Ausgangsgrössen zur Interpretation	115
7.	Interpretation	118
7.1	Überlegungen zum Regionalfeld	118
7.1.1	Die Wahl des Bezugsellipsoids	118
7.1.2	Einfluss tiefgelegener Masseninhomogenitäten	121
7.2	Erste Interpretation	124
7.2.1	Weitere Erkenntnisse	126
7.3	Das definitive Modell: Beschreibung des Ivrea- Körpers	128
7.3.1	Die Abschnitte des Modells im einzelnen	131
7.3.1.1	Abschnitt A	131
7.3.1.2	Abschnitt B	132
7.3.1.3	Abschnitt C	135
7.3.1.4	Abschnitt D	137
7.3.1.5	Abschnitt E	138
7.3.1.6	Abschnitt F	139
7.3.1.7	Abschnitt G	140
7.3.2	Zusammenfassung der Interpretationsergebnisse	141
8.	Zusammenfassung, Schlussbemerkungen und Ausblick	155
9.	Literaturverzeichnis	162
10.	Anhang	172
A1:	Formeln für die Berechnung der Wirkungen eines Prismas mit dreieckigem Querschnitt in 3 Komponenten	172

Inhaltsverzeichnis

A2:	Tabelle der Rohdaten aller Zenitkamerastationen im Ivrea- Gebiet	175
A3:	Tabelle der berechneten Einflüsse auf Lotabweichung und Schwerebeschleunigung	177
A4:	Tabelle aller Reduktionswerte und der Residual- Anomalien	180
A5:	Tabelle des neuen Ivrea- Modells	183
A6:	Karte der bis 1987 gemessenen Astro- Stationen	186

Zusammenfassung

Hauptziel eines langjährigen interdisziplinären Forschungsprojekts am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie war die Messung und Interpretation des Schwerefeldes im südlichen Alpenraum. Es bildet den Inhalt der vorliegenden Arbeit. Mit den Untersuchungen wurde in der Schweiz erstmals eine potentialtheoretische Methode auf der Grundlage einer integralen Schwerefeldbestimmung realisiert. Dabei werden sowohl die Beträge als auch die Richtungen der anomalen Schwerevektoren bearbeitet. Eine besonders ausgeprägte Schwerestörung wird im Süden der Schweiz durch die prominente Zone Ivrea- Verbano verursacht. Sie bewirkt Schwereanomalien von rund 170 mgal und Lotabweichungen von rund 30 Bogensekunden in beiden Komponenten. Die Interpretation gezielt beobachteter Lotabweichungen und Schwereanomalien sollte einen Beitrag zur Kenntnis der Tiefenstruktur des Ivrea- Körpers liefern.

In den Jahren 1983, 1985 und 1986 wurden auf insgesamt 117 Stationen zwischen dem Aosta- Tal und dem Veltlin Schwereanomalien sowie Lot- und Ellipsoidennormalenrichtungen bestimmt. Zum Einsatz kamen u. a. transportable Zenitkamera- Messsysteme und Satellitenempfänger des Instituts für Geodäsie und Photogrammtrie (IGP) sowie Gravimeter des Instituts für Geophysik (IG) der ETH Zürich. An den Messkampagnen beteiligten sich ausserdem europäische Institutionen, die über ähnliche Messsysteme verfügen.

Nach Auswertung der Feldmessungen wurden die Schwere- und Lotrichtungsmessungen von den Effekten, die auf die inhomogene Massenverteilung zurückzuführen sind, abgespalten, und so die Signale ermittelt, die durch die Dichtekontraste des Ivrea- Körpers verursacht werden. Diese Signale bildeten die Ausgangsgrössen für die geophysikalische Interpretation. Mit Hilfe eines neuen Ansatzes für die gemeinsame Bearbeitung aller Komponenten des beobachteten Schwerevektors auf der Basis einer vermittelnden Ausgleichung, wurde ein neues Modell für die Ivrea- Struktur erarbeitet.

Gegenüber den bisherigen Modellen zeigten sich im wesentlichen zwei Änderungen:

Der Unterbau des Ivrea- Körpers war bisher als schiefstehende Platte angenommen worden, die in Richtung Nordwesten über Material von relativ geringerer Kompressions-wellengeschwindigkeit liegt und gegenüber dem Krustengestein einen Dichtekontrast von +0.4 gcm⁻³ aufweist. Die in der vorliegenden Arbeit präsentierten neuen astro- gravimetrischen Messungen stehen jedoch mit diesem Modell nicht in Einklang. Stattdessen ergab die Interpretation ein senkrechtes Abfallen des Ivrea- Körpers im südwestlichen Teil, während die

Abgrenzung gegenüber dem "normalen" Krustengestein im nördlichen Teil sogar nach Norden dreht. In der Gegend von Locarno bildet sie einen massiven Keil, der bis zur Moho-Diskontinuität hinunterreicht. Dieser markante Widerspruch zwischen den beiden Interpretationen bleibt vorderhand bestehen. Für die Beurteilung der geotektonischen Entstehungsgeschichte des Ivrea- Körpers wäre ein zusätzlicher seismischer Datensatz von besonders grosser Bedeutung, um die aufgezeigten Differenzen genauer analysieren und beseitigen zu können.

Im Osten ergaben die Messungen eine Fortsetzung des Ivrea- Körpers bis über den Comersee hinaus. Der festgestellte Dichtekontrast beträgt in dieser Fortsetzung allerdings nur ca. 0.1 gcm⁻³. Dies deutet nicht zwingend auf Material des Ivrea- Körpers hin, zumal sich die Hauptrichtung dieser Struktur nicht mit der der Tonale-Linie korrelieren lässt. Es könnte sich aber möglicherweise um eine Verbindung in Form eines Rückens zwischen der Ivrea- Zone und dem Schwerehoch von Verona handeln.

Wenngleich die geodätische Interpretation mit den geophysikalischen Daten einige Widersprüche aufweist, kann sie doch das beobachtete Schwerefeld mit hoher Genauigkeit reproduzieren. Dank dieser wichtigen Voraussetzung ist es gelungen, die Genauigkeit der Geoidberechnung in die Grössenordnung von wenigen Zentimetern zu senken (MARTI, 1988).

Das Forschungsprojekt war interdisziplinär (Geodätische Astronomie, Satellitengeodäsie, Geophysik, Geologie) und international (bei den Messkampagnen beteiligten sich Institutionen aus der BRD, Italien, Österreich und der Schweiz). Es ist versucht worden, mit den vorgelegten Ergebnissen einen Beitrag zur Geoidbestimmung und zur vertieften Kenntnis der geologischen Tiefenstruktur im Süden der Schweiz zu liefern. Die Forschungsarbeiten finden zum Teil ihre Fortsetzung im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms "Geologische Tiefenstruktur der Schweiz" (NFP20).

Abstract

The geophysical and geodetic interpretation of variations of the earth's gravity field has been the goal of numerous geophysical and geodetic investigations in the last two decades. While most of the publications report on the interpretation of either gravity data only or astrogeodetic data only, no methods were published until now enabling a simultaneous treatment of all three components of the gravity vector. The main task of this thesis was to apply modern zenith camera systems and gravimeters for the determination of both data sets. A total of 117 astronomic stations was observed in northern Italy and southern Switzerland where the prominent zone of Ivrea- Verbano causes very significant disturbances of the gravity field. For the determination of ellipsoidal coordinates two Doppler satellite receivers MX1502 were used in the translocation mode.

The astro- geodetic and gravity measurements were used to interpret the deep- seated mass disturbance caused by the Ivrea body in terms of location, size and density contrast. The entire structure was assembled by a series of elementary bodies which can be oriented arbitrarily in space and from which the gravitational attraction can be computed by using rigorous formulae. For the geophysical interpretation the effects of all known mass inhomogeneities had to be removed from the measured values. The remaining residual field can be considered as the true signal caused by the Ivrea body. The reductions which were applied in our work include digital mass models for the following effects: topography, Moho discontinuity, sediments of the Po plain and of the main valleys, lakes as well as geological reductions for near-surface structures. Furthermore an appropriate mathematical model was used to perform a least-squares adjustment for estimating the following parameters: Density contrast of a single or several elementary structures with respect to the mean density value; changes in the geometry of every single element (either rectangular or triangular prisms); changes in the position or spatial orientation of every element.

As a result of our investigations a new astro- gravimetric model for the Ivrea body is presented. It reveals the following aspects:

the proposed steepness of the Ivrea- body on its northern part underneath the Insubric line cannot be confirmed by our astro- gravimetric measurements. On the contrary, the measurements show a mass excess which reaches its maximum north of Locarno. There a big wedge reaching down to the Moho is needed to satisfy the measurements. In spite of the fact that the Insubric line cuts this northern continuation the density contrast of +0.4gcm⁻³ corresponds well with the density contrast encountered south of this tectonic lineament. This

interpretation is in contrast with seismic results which show a pronounced velocity inversion-zone beneath the Ivrea- body. On the other hand, this would produce a large mass deficit. Since the answer to this particular question is very important for the study of the evolution of the Ivrea zone, more seismic investigations would be very helpful.

- in the eastern continuation of the Ivrea- body a large mass anomaly is reflected showing a low density contrast of only +0.1gcm⁻³.

Besides the use of these measurements for the described purpose the data are also of importance for the determination of the geoid. First test computations have confirmed the excellent accuracy of the geoid which was thereby improved down to the centimeter level over an area of approximately $100 \times 100 \text{ km}$.

1. Einleitung

1.1 Zur Bedeutung des Schwerefeldes

Das reale Schwerefeld der Erde mit seiner unregelmässigen Struktur stellt für die meisten geodätischen Messverfahren die physikalische Bezugswelt dar, in dem die Messinstrumente mit Hilfe von herkömmlichen oder elektronischen Libellen in die örtliche Lotlinie ausgerichtet werden. Die Lotlinie als Tangente an die gekrümmte Schwerefeldlinie weist gegenüber der ungestörten, mathematisch definierten Normalen des Erdellipsoids relativ grosse Differenzen auf, die man als Lotabweichungen bezeichnet. Ursachen für die stark gegliederte "Topographie" der Äquipotentialfläche sind die Struktur und Massenverteilung der Erdoberfläche sowie des tieferen Erdinnern.

Die Kenntnis des Schwerefeldes spielt angesichts der stetigen Verbesserung der Vermessungsgeräte eine zunehmend wichtige Rolle. Die Steigerung der Genauigkeit von Distanzmessgeräten der neusten Generation in die Grössenordnung von wenigen Zehntel ppm (parts per million) kann nur dann voll ausgeschöpft werden, wenn man einerseits die Meteorologie mit der notwendigen Sorgfalt berücksichtigt und anderseits die Distanzen korrekt auf das Referenzellipsoid reduziert. Dies setzt die Kenntnis der Geoidhöhen und der räumlichen Änderungen der Lotrichtungen voraus. Die Fehler, die bei der Vernachlässigung des Schwerefeldes in lokalen Netzausgleichungen zu erwarten sind, erreichen nach ELMIGER (1973) und GRAFAREND (1987) bereits bei kleinen Netzen von wenigen Kilometern Ausdehnung Beträge von mehreren Dezimetern! Auch im Falle eines dreidimensionalen Modellansatzes, in dem schiefe Distanzen und Höhenwinkel als Beobachtungen eingeführt werden, müssen die Richtungen der örtlichen Lotlinien bekannt sein oder zumindest als Unbekannte eingeführt werden (WUNDERLIN, 1967).

Die Berechnung des Geoids ist demzufolge nicht nur für wissenschaftliche Zwecke, sondern auch für praktische Anwendungen von grundlegender Bedeutung. Daran wird sich auch in Zukunft wenig ändern, wenn angesichts neuer operationeller satellitengeodätischer Vermessungsmethoden, wie z. B. dem Global Positioning System (GPS) direkt dreidimensionale Koordinaten, bzw. Koordinatenunterschiede und damit räumliche Vektoren in einem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem bestimmt werden können. Die Verknüpfung dieser geozentrischen Koordinaten mit klassisch bestimmten Koordinaten, z. B. mit Triangulationen oder Nivellements, führt zwangsläufig wieder auf das Problem des Schwerefeldes und damit auf das Geoid als dessen repräsentativer Parameter.

1.2 Das Geoid in der Schweiz

Bereits vor Ende des letzten Jahrhunderts erfolgte in der Schweiz eine erste stückweise Geoidberechnung von MESSERSCHMITT (1901). Weitere einschlägige Arbeiten folgten von NIETHAMMER (1939), ENGI & HUNZIKER (1944,1951), WUNDERLIN (1967), ELMIGER (1969,1975,1975) und GURTNER (1978). Gurtner's Geoidberechnung basierte ausschliesslich auf astronomischen Beobachtungen. Die rechnerisch ausgewiesene relative Genauigkeit der Geoidhöhen gegenüber einem gewählten Bezugspunkt in der Nähe von Zürich bewegte sich für den grössten Teil der Schweiz innerhalb von \pm 10 cm, im ungünstigsten Fall wuchs sie auf ca. 15 - 20 cm an. Diese relativ hohe Genauigkeit wurde dadurch erreicht, dass die unruhige Fläche des Geoids nicht direkt, sondern mit einem Zwischenschritt über das wesentlich glattere Cogeoid berechnet wurde. Als Cogeoid bezeichnet man die Fläche, deren Flächennormalen den sog. "reduzierten" Lotrichtungen entsprechen. Die reduzierten Lotrichtungen sind an dieser Stelle als Differenz zwischen gemessenen und berechneten Lotrichtungen zu verstehen. Zur Berechnung des Cogeoids und der Lotabweichungen führt mar ein Massenmodell ein, das die sichtbare Topographie, den Verlauf der Krusten / Mantelgrenze (Moho- Diskontinuität) sowie die Störmasse des Ivrea- Körpers enthält. Mit diesem Massenmodell lassen sich Lotabweichungen berechnen und in den Punkten, wo astronomische Messungen vorliegen, die berechneten mit den gemessenen Werten vergleichen. Die Differenzen (reduzierten Lotabweichungen) stellen die Normalenrichtungen der als Cogeoid bezeichneten Fläche dar. Gurtners Berechnungen zeigen, dass diese Unterschiede, die er als Modellfehler bezeichnet, einen ruhigen Verlauf zeigen. Die neue Niveaufläche, die damit beschrieben wird, das sog. Cogeoid, lässt sich dadurch wesentlich einfacher als das Geoid selbst berechnen. Auch für die Interpolation von Lotabweichungen in beliebigen Punkten mit Hilfe der Prädiktion bringt die Einführung des Cogeoids grosse Vorteile, da sich die Modellfehler in der Regel nicht sprunghaft ändern, sondern einen örtlich stark korellierten Verlauf aufweisen.

Der Übergang vom Cogeoid zum Geoid besteht in der Folge lediglich darin, gemäss dem Theorem von BRUNS (1878), den Quotienten des Störpotentials und der Normalschwere zu bilden und den resultierenden Geoidhöhenanteil zur Cogeoid- Höhe zu addieren. Für weitergehende Angaben zu den Berechnungsmethoden wird auf GURTNER (1978) verwiesen.

1.3 Verbesserungsmöglichkeiten zur Geoidberechnung

Für die Praxis besteht der Zweck einer möglichst genauen Berechnung des Geoids und seiner feingegliederten Detailstrukturen in erster Linie darin, in jedem beliebigen Punkt der Schweiz die Höhe des Geoids über dem Ellipsoid, sowie die Richtung ihrer Flächennormalen zu liefern. Die bisher erreichte Genauigkeit genügte weitgehend den Ansprüchen der Praxis. Das Aufkommen neuer Instrumente und Methoden zeigt aber, dass die Geoidberechnung, soll sie auch zukünftigen Anforderungen genügen, einer Verbesserung bedarf.

Diese Aussage kann mit folgendem Beispiel unterstrichen werden :

Es sei eine mit einem Distanzmessgerät der neuesten Generation (z. B. Mekometer ME 5000 von Kern) gemessene Distanz auf die Meereshöhe Null zu reduzieren. Die Stationspunkte haben nivellitisch bestimmte Höhen:

Punkt A:
$$H_A = 824 \text{ m}$$
; Punkt B: $H_B = 1309 \text{ m}$

und die gemessene schiefe Distanz betrage : s = 2620 m.

Für die Reduktion auf das Ellipsoid werden die berechneten Geoidhöhen zu den Punkthöhen addiert, was genäherte Ellipsoidhöhen ergibt. Die folgende Tabelle stellt den Einfluss $m(s_0)$ eines Fehlers an der Geoidhöhendifferenz N_i auf die reduzierte Distanz s_0 dar:

Fehler an Ni	Einfluss m(s ₀)
[cm]	[mm]
-3	+5.7
-2	+3.8
-1	+1.9
+1	- 1.7
+2	- 3.7
+3	- 5.6

Näherungsweise gilt für den Einfluss m (s₀) folgende Formel:

$$m(s_0) \approx d\Delta N \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$
 ($\alpha = H\ddot{o}henwinkel der Visurlinie)$

Mit dem Ansatz $m(s)^2 = (0.3 \text{ mm})^2 + (5\cdot10^{-7}\cdot s)^2$ für die Genauigkeit der Distanzmessung ergibt sich ein mittlererer Fehler von 1.34 mm¹⁾. Wie man der Tabelle entnehmen kann, bewirkt bereits ein Fehler von einem Zentimeter an der Geoidhöhendifferenz einen Einfluss in der Grösse des mittleren Fehlers der Distanzmessung selbst. Demnach wird die erreichbare Genauigkeit der Distanzmessung nicht nur durch die Meteorologie, sondern auch durch die Unsicherheiten der berechneten Geoidhöhendifferenzen (d Δ N) begrenzt. Für den Bereich bis zu 20 km beträgt diese Unsicherheit nach ELMIGER und GURTNER (1983): $d\Delta N_i = \pm 5 \text{ mm} \cdot d_{[km]}$ für die Geoidhöhendifferenz und $m(s_0) = \Delta H_{[km]} \cdot 5 \text{mm}$ für den mittleren Fehler an der reduzierten Distanz.

¹⁾ Laut Firmenangabe beträgt die erreichbare Genauigkeit m(S) = 0.2 mm + 2·10-7· s. Diese Angabe bezieht sich auf reine Messfehler (ohne Zentrierfehler) sowie auf ideale Messbedingungen und erfordert eine rigorose und aufwendige Erfassung der Meteorologie. Die hier eingesetzte Genauigkeit berücksichtigt auch den zufälligen und unabhängigen Anteil der Zentrierung und beruht auf praktischen Erfahrungen, die im GPS- Testnetz von Turtmann im Kanton Wallis erzielt wurden (SCHNEIDER, 1987).

Dies gilt nicht nur in Gebirgsgegenden, wo die Einflüsse noch drastischer sein können, sondern auch im Mittelland. Ausgehend von diesen Überlegungen können wir die Faktoren aufzählen, die die erreichbare Genauigkeit der astro- geodätischen Geoidbestimmung limitieren:

Liste von Verbesserungsmöglichkeiten zur Verbesserung der astro- geodätischen Geoidberechnung:

- 1. die Anzahl der zur Verfügung stehenden Stationen (=Stützpunkte) mit gemessenen astronomischen Längen und/ oder Breiten.
- 2. die geographische Verteilung der Stationen.
- 3. die Qualität der astronomischen Beobachtungen.
- 4. Auflösung des digitalen Geländemodells für die Topographie (Generalisierungsgrad).
- 5. Kenntnis der Tiefenlage der Moho- Diskontinuität, sowie des entsprechenden Dichtekontrasts zwischen dem Krusten- und Mantelmaterial.
- 6. Kenntnis von grossräumigen Massenstörungen wie Störkörpern oder Sedimentbecken innerhalb der Erdkruste.
- 7. Kenntnis der allgemeinen Dichteverteilung und deren lokalen Variationen innerhalb der Erdkruste und an der Erdoberfläche.

Insbesondere der unter 6. erwähnte Einfluss der Massenstörungen limitierte bisher die erreichbare Genauigkeit von prädizierten Lotabweichungen. Im südlichen Bereich der Schweiz wird die Genauigkeit systematisch verschlechtert, da sich der Einfluss der offensichtlich zu ungenau bekannten Ivrea- Störmasse bemerkbar macht. Während im Grossteil der Schweiz die erreichbare Prädiktionsgenauigkeit im Bereich von 1" liegt, vermindert sie sich in den südlichen Regionen auf schätzungsweise 3".

1.4 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Es geht an dieser Stelle nicht um eine Neuberechnung des Geoids in der Schweiz. Dazu muss vorerst die Methodik studiert werden, mit der die neuen satellitengestützten Messverfahren in Kombination mit terrestrischen, astronomischen und gravimetrischen Messungen in einer gemeinsamen Geoidberechnung verarbeitet werden können. Diesbezügliche Untersuchungen laufen derzeit an der Professur für Höhere Geodäsie und Geodynamik (P 05) am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf den geodätisch / geophysikalischen Aspekt der Geoidberechnung, unter Einbezug einer integralen Schwerefeldbestimmung. Unter einer integralen Schwerefeldbestimmung ist in diesem Zusammenhang die Bestimmung sowohl des Betrages wie auch der Richtung des Schwerevektors zu verstehen. Die dazu ausgeführten astronomischen und gravimetrischen Messungen dienen einerseits der gezielten Untersuchung und Modellierung der Erdkruste. Anderseits stellen diese Messungen wesentlich verbesserte Grundlagen zur Geoidberechnung dar. In diesem Sinn wurde versucht, einige der aufgelisteten Verbesserungsmöglichkeiten zu analysieren und Lösungswege aufzuzeigen, und damit von Seiten der astronomischen, geodätischen und geophysikalischen Grundlagen bestmögliche Voraussetzungen für eine später auszuführende Neuberechnung zu schaffen.

Dass die dazu notwendigen neuen astronomischen Beobachtungen nicht mit klassischen Methoden ausgeführt werden konnten, stand von vornherein fest. Der mit konventionellen Instrumenten (z. B. T4 oder DKM3A) zu betreibende Aufwand wäre im Vergleich zu Schweremessungen viel zu kostspielig geworden. Dies wird durch die Anzahl der bis 1983 in der Schweiz ausgeführten Schwerefeld- Messungen deutlich unterstrichen:

Schweremessungen: ca. 20'000 Punkte

Lotrichtungsmessungen: 220 Punkte mit 330 Komponenten.

Dank den Aktivitäten der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK) der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (SNG), die die Schweremessungen in der Schweiz in den Jahren 1973 bis 1979 im Rahmen der "Geophysikalischen Landesaufnahme der Schweiz" stark förderte, konnte 1980 die neue Schwerekarte der Schweiz publiziert werden (KLINGELE, OLIVIER und KAHLE, 1980). Während damit die Schweremessungen in der Schweiz recht homogen verteilt sind, konzentrierten sich die früheren Lotabweichungsstationen im wesentlichen auf ehemalige Projektgebiete, resp. Profillinien, die von der Schweizerischen Geodätischen Kommission (SGK), ebenfalls ein Organ der SNG, gefördert und mitfinanziert wurden. Es sind dies die Parallelprofile von Zürich und Locarno, die Meridianprofile vom Gotthard und von Lugano, das Berner Oberland, das Oberwallis sowie einige unregelmässig verteilte Einzelstationen. Die meisten dieser Messungen wurden zwischen 1867 und 1970 vorgenommen und die Ergebnisse in der Publikationsreihe "Astronomisch- geodätische Arbeiten in der Schweiz" der SGK veröffentlicht (z. B. WUNDERLIN (1967), HUNZIKER (1968), WUNDERLIN (1969) und MÜLLER (1972)). Wie die Dokumentationen zu diesen umfangreichen Arbeiten aufzeigen, war die Lotrichtungsbestimmung eine aufwendige und zeitraubende Arbeit. Die Beobachtung einzelner Stationen dauerte oft mehrere Tage.

Mit der Anschaffung des Transportablen Zenitkamera- Messsystems (TZK3) am IGP der ETHZ im Jahre 1983 konnte diese Situation wesentlich verbessert werden. Der Vorteil dieser am Institut für Erdmessung der Technischen Universität Hannover entwickelten Apparatur besteht u. a. darin, dass es sich um ein von persönlichen Einflüssen unabhängiges Verfahren handelt, mehrere Stationen in einer einzigen Nacht beobachten werden können und die Handhabung auch Nicht- Spezialisten überlassen werden kann. Mit der Einführung dieses Messsystems in der Schweiz waren die notwendigen Bedingungen erfüllt, um einige der vorgehend aufgezählten Verbesserungsmöglichkeiten realisieren zu können.

Die astronomischen Messungen kann man über die formale Geoidberechnung hinaus auch als direkte Signalgrössen der tiefen Massenverteilung betrachten und demzufolge zu geophysikalischen Interpretationszwecken heranziehen. Damit lassen sich gleichzeitig zwei Ziele verfolgen:

- 1.) Bestimmung der Feinstruktur des Geoids.
- 2.) Bestimmung von genaueren digitalen Modellen der Massenstrukturen und deren Anomalien. Diese Massenmodelle sind sowohl für die Geodäsie wie für die Geophysik von grossem Interesse.

In den Jahren 1983 - 85 wurde für diese Zielsetzung ein Forschungsprojekt der Professuren KAHLE, H.-G., SCHMID, H. und MUELLER, ST.: Zenitkamera und Lotabweichungsmessungen in der Schweiz, insbesondere Zone Ivrea- Verbano) durchgeführt. Es bestand aus drei Teilaufgaben:

- 1. Die Einführung und Inbetriebsetzung eines modernen TZK- Systems mit den dazu notwendigen computergestützten Auswerteeinrichtungen.
- 2. Die Anwendung des Systems auf ein konkretes Beispiel: Zur gezielten Beobachtung der durch die geologische Störzone im Ivrea- Gebiet verursachten Lotrichtungsstörungen und deren Interpretation.
- 3. Bereitstellen eines verbesserten Ivrea- Massenmodells als Grundlage für eine neue Geoid- Berechnung.

Im Verlauf eines Folgeprojekts (KAHLE, H.G., MUELLER, ST.: Lotabweichungsbestimmungen mit dem Zenitkamera-Messsystem in der Zone Ivrea-Verbano)

erfolgten zusätzliche Messungen in einem erweiterten Einzugsgebiet, da die bisher ausgeführten Messungen auf eine stärkere Deformation des Schwerefeldes hinwiesen, als man bisher angenommen hatte. Dies betraf vor allem den Bereich der südlichen und nordöstlichen Projektgrenzen. Dieses zweite Projekt wurde um ein zusätzliches Jahr verlängert und mittlerweile abgeschlossen. Als Hauptziel wurde nach der Methode von GURTNER (1978) eine abschliessende astro- geodätische Geoidberechnung in der Südschweiz durchgeführt, unter Berücksichtigung der neu gewonnenen Erkenntnisse bezüglich des Ivrea- Körpers (MARTI, 1988).

1.5 Überblick über die Struktur der Arbeit

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit besteht in der Dokumentation zur Einführung und Weiterentwicklung des TZK3- Messsystems sowie in der wissenschaftlichen Analyse der in den 2 genannten Projekten erhobenen Messdaten. Nach der hier beendeten Einleitung werden im zweiten Kapitel die verschiedenen Zenitkameras in Europa sowie das an der ETH entwickelte und operationell eingesetzte computergestützte Auswertesystem erläutert. Im dritten Kapitel erfolgt eine Einführung in die kombinierte astro- gravimetrische Störkörperinterpretation. Das vierte Kapitel enthält die Beschreibung der Ivrea- Zone, die den Ausgangspunkt der hier beschriebenen Arbeiten darstellt. Die Dokumentation, Planung und Ausführung der verschiedenen Messkampagnen, die in den Jahren 1983 bis 1986 mit internationaler Beteiligung unter der Leitung des IGP erfolgten, sind Gegenstand des fünften Kapitels. Die Auswertungen und die numerische Behandlung der Messwert- Reduktionen folgen im sechsten Kapitel. Die Anwendung der beschriebenen Grundlagen am konkreten Beispiel der Ivrea- Zone ist Gegenstand des siebten Kapitels, das der Interpretation der ausgeführten Messungen gewidmet ist und mit der Präsentation eines neuen Ivrea- Modells abgerundet wird. Im achten Kapitel folgen schliesslich eine zusammenfassende Beurteilung der beschriebenen Verfahren, Schlussbemerkungen sowie ein Ausblick zur Anwendbarkeit der Methode unter Berücksichtigung neuer Messverfahren.

2. Eingesetzte Mess- und Auswertesysteme

2.1 Die transportable Zenitkamera als neuer Instrumententyp in der astronomischen Geodäsie

Die transportable Zenitkamera hat sich in den letzten Jahren nicht zuletzt wegen ihrer einfachen Handhabung und Zuverlässigkeit an vielen Orten durchgesetzt, wo Lotrichtungsbestimmungen benötigt werden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Instrumententyps gegenüber den konventionellen Instrumenten besteht darin, ohne spezialisiertes Bedienungspersonal in einer Nacht mehrere Stationen messen zu können, und zwar mit stets gleichbleibender Genauigkeit und unabhängig von der praktischen Erfahrung des Beobachters. Als Nachteil muss vielleicht das relativ hohe Gewicht bezeichnet werden, das die Besetzung von gewissen Stationen, insbesondere im Alpen- und Voralpengebiet verunmöglicht oder zumindest erschwert. Die angewandten Verfahren der Lotabweichungsprädikation mit Hilfe von digitalen Gelände- und Massenstrukturmodellen lassen diese Notwendigkeit allerdings mehr und mehr in den Hintergrund treten, was im Gelände eine weitgehend freie Punktwahl ohne besondere Rücksicht auf topographische Verhältnisse zulässt.

Mehrere Autoren haben in den letzten Jahren die Zenitkamera in theoretischer und in praktischer Hinsicht ausführlich beschrieben: BIRARDI (1971,74,76,77), PILOWSKY (1973,74), GESSLER (1975), WISSEL (1982), CHESI (1984), SEEBER und TORGE (1985). Aus diesem Grund kann an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung von Einzelheiten verzichtet und die Beschreibung auf eine illustrative Kurzfassung reduziert werden. Da sich die zitierten Arbeiten jeweils nur mit einem bestimmten Instrument befassen, scheint es angebracht, die verschiedenen Instrumente hier kurz vorzustellen und auf ihre Gemeinsamkeiten wie auch auf ihre Vor- und Nachteile sowie ihre gegenseitigen Unterschiede hinzuweisen. Dieser Vergleich (s. Tabelle 1) ist nicht nur in technischer Hinsicht aufschlussreich, sondern auch nützlich zur Beurteilung der individuellen Resultate, waren doch sämtliche 6 der in Europa vorhandenen Zenitkameras für Messungen im Rahmen des Ivrea- Projektes in der Schweiz und/oder im angrenzenden Italien im Einsatz. Durch die gemeinsamen Beobachtungen konnten in diesen Feldkampagnen wertvolle Erfahrungen gesammelt werden, vor allem im Hinblick auf die erreichten Genauigkeiten sowie auf sicherlich noch vorhandene Verbesserungsmöglichkeiten der Kamerasysteme.

2.2 Zum Prinzip der astronomischen Lotrichtungsbestimmung mittels transportabler Zenitkameras

Ein wichtiges Merkmal, das die Beobachtungsmethode mit transportablen Zenitkameras von den konventionellen Verfahren der geodätisch / astronomischen Messpraxis unterscheidet, besteht in der unpersönlichen Messung mittels photographischer Abbildung, die keinem Einfluss des Beobachters unterliegt. Ein weiteres Merkmal besteht in der stets gleichbleibenden vertikalen Ausrichtung des Instrumentes während des Messvorgangs, bei dem lediglich eine Drehung des Objektivs um 180 Grad erfolgt. Damit können instrumentenbedingte Fehlereinflüsse wie z. B. Achsdeformationen ausgeschlossen werden. Diese Idee ist an sich nicht neu, funktionieren doch die photographischen Zenitteleskope⁽¹⁾, die zu den genauesten Astro - Positionsinstrumenten gehören, auch nach dem Prinzip einer Photographie des zenitalen Ausschnitts des Sternhimmels bei gleichzeitiger Registrierung der Zeit (Epoche) und der Neigung der Kamera gegenüber der Lotlinie während der Belichtung. Abbildung 1 zeigt schematisch, wie der Sternhimmel in Richtung der örtlichen Lotlinie photographiert wird:

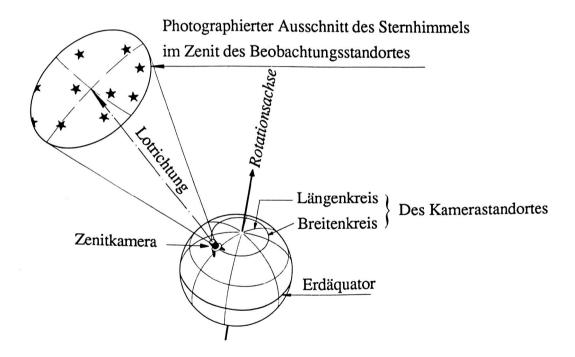
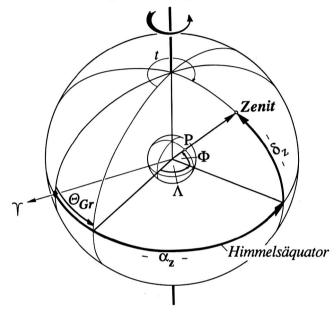


Abbildung 1: Zum Prinzip der Lotrichtungsbestimmung mittels Zenitkameraaufnahmen

¹⁾ Im Gegensatz zu den Zenitteleskopen wird die transportable Zentkamera der scheinbaren Bewegung der Sterne nicht nachgeführt, ausserdem arbeiten die Zenitteleskope nicht mit Libellen, sondern mit Quecksilber-Referenzhorizonten. Diese Unterschiede in den technischen Ausführungsdetails ändern aber nichts am prinzipiellen Funktiosschema.

Mit dieser Methode lassen sich die geographisch- astronomischen Koordinaten des Kamerastandortes bestimmen. Die Aufgabe ist gelöst, wenn es gelingt, Rektaszension und Deklination der verlängerten Drehachse der Kamera zu messen. Die Drehachsenrichtung entspricht der Zenitrichtung und damit der Richtung der örtlichen Lotlinie im Punkt P. Die Beziehungen zwischen den sphärischen Koordinaten der Fixsterne und den zu bestimmenden Lotrichtungsparametern Φ und Λ zeigt Abbildung 2:



 Φ , Λ = astronomische Breite und Länge des Standortes P

 δ_{z} , α_{z} = Deklination und Rektaszension des Zenits Z

 Θ_{Gr} = Sternzeit Greenwich

Υ = Frühlingspunkt

Abbildung 2: Die gesuchte Breite Φ des Standortes P entspricht der Deklination δ_z des Zenits. Die gesuchte Länge Λ berechnet sich aus der Differenz zwischen der gemessenen Ortssternzeit und der Sternzeit Greenwich Θ_{Gr} :

$$\Phi = \delta_z$$

$$\Lambda = \alpha_z - \Theta_{Gr}$$
(2.1)

Jede Aufnahme besteht aus zwei Belichtungsfolgen in zwei Aufnahmelagen, die sich in der Orientierung um 180 Grad unterscheiden. Die Kamera muss während der Aufnahme stets möglichst genau in vertikaler Ausrichtung verbleiben. Abweichungen gegenüber der Vertikalen werden von zwei elektronischen Libellen in rechtwinkliger Anordnung gemessen und bei jeder Belichtung erfasst. Die Abbildung der beiden Aufnahmerichtungen erfolgt auf einen Film, dessen Lage beim Drehen des Objektivs in die 2. Aufnahmelage gegnüber dem Unterbau der Kamera nicht verändert wird. Der richtungsmässige Bezug zwischen der azimutalen

Ausrichtung der Kamera und dem eingelegten Film erfolgt durch aufbelichtete Rahmenmarken. Diese bestehen konstruktiv aus vier im Anlegerahmen eingebauten Lochmasken und dahinter montierten Leuchtdioden, die durch ein Loch in der Maske die Rahmenmarke als feinen Punkt auf den Film aufbelichten. Neben den Rahmenmarken sind im Anlegerahmen auch 7 mm hohe 7- Segmentanzeigen eingelassen, mit denen das Datum und die Filmnummer per Tastendruck auf den Film aufbelichtet werden können. Die Einstellung der entsprechenden Werte erfolgt an BCD- Codierschaltern, die am Drehteil der Kamera angebracht sind. Zur Steigerung der Genauigkeit werden pro Aufnahmelage vier Belichtungen durchgeführt, deren Dauer von einer Sekunde so bemessen ist, dass die Sterne nahezu punktförmig abgebildet werden. Zu jeder Folge von Einzelbelichtungen gehört eine zusätzliche Belichtung von 1 x 8, resp. 2 x 4 Sekunden Dauer (mit einem Unterbruch von 7 Sekunden). Diese Kennbelichtung dient der Unterscheidung der beiden Aufnahmelagen beim Ausmessvorgang am Komparator.

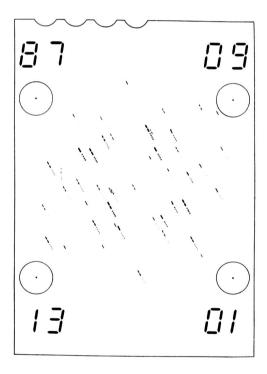


Abbildung 3: Beispiel eines mit der Zenitkamera belichteten Films in Originalgrösse von 6,5 x 9 cm. Die Belichtungszeit für die einzelnen Spurpunkte der Sterne beträgt jeweils 1 Sekunde, gefolgt von einem Intervall von 7 Sekunden. Die Zentren der 4 Kreise stellen die Rahmenmarken dar. Die Kennzeichnung der aus dem Datum und einer laufenden Zahl bestehenden Filmnummer erfolgt durch Einbelichtung mittels 7- Segmentanzeigen.

Nach der Entwicklung der Filme sind die abgebildeten Sternspuren an einem Komparator auszumessen. Danach steht ein Satz von gemessenen rechtwinkligen Bildkoordinaten der photographierten und zunächst noch unbekannten Sterne zur Verfügung. Nach der

Übertragung dieser Messwerte, zusammen mit den im Feld erhobenen Daten zum Rechenzentrum, folgt die Berechnung der Lotrichtungsparameter Φ und Λ mit Hilfe des dort installierten TZK- Auswerteprogramms, einer erweiterten Version der an der TU Hannover entwickelten und von GESSLER (1975) und WISSEL (1982) dokumentierten Fortran-Software.

Durch verschiedene systembedingte Einflüsse sind die relevanten Messgrössen noch mit systematisch wirkenden Fehlern behaftet, die es als erstes wegzureduzieren gilt. Es sind dies :

- Korrektur der Verschlussepochen infolge Uhrstand und Uhrgang der internen Uhr.
- Korrektur der Verschlussepochen infolge der Laufzeitverzögerung des Zeitzeichens vom Sender zum Empfänger sowie innerhalb des Empfängers.
- Korrektur der Verschlussepochen infolge der mechanischen Verschluss- Verzögerungen entsprechend einem empirisch bestimmten Verschlussdiagramm.
- Korrektur der Verschlussepochen infolge des Unterschiedes zwischen der empfangenen UTC- Atomzeitskala und der der Erdrotation angepassten UT1- Skala (Polschwankungen).
- Korrektur der Libellenablesungen um den Eich- Skalenfaktor.
- Umrechnung der gemessenen Bildkoordinaten auf den genäherten Drehpunkt und Transformation des Datensatzes in eine genäherte, nach Norden orientierte Richtung.
- Reduktion des transformierten Datensatzes um die Einflüsse von Refraktion und Verzeichnungsgliedern höherer Ordnung.

Das mathematisch- funktionale Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen den nunmehr bereinigten Eingabe- Daten und den zu bestimmenden Lotrichtungsparametern. Die analytische Verknüpfung dieser Grössen gelingt nicht auf direktem Wege, sondern bedingt die Einführung einer Zwischenstufe in Form der Projektion des Sternfeldes auf eine Ebene, welche bildseitig durch die photographische Abbildung auf dem Film repräsentiert wird. Für diese Abbildung eignet sich nach SCHÜRER (1977) die gnomonische Projektion:

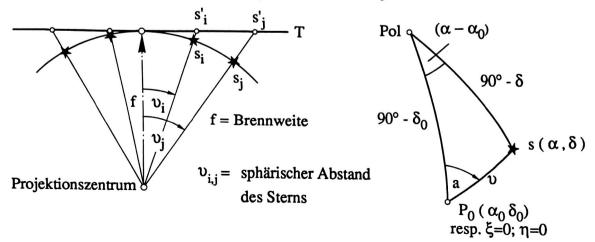


Abbildung 4: Die gnomonische Projektion und das entsprechende Poldreieck

Die gnomonische Projektion beschreibt die perspektive Abbildung einer Kugelkalotte auf eine im Punkt P_0 berührende Tangentialebene T. Die Projektion des abgebildeten Sternpunkts s_i' auf zwei orthogonale Hauptachsen ergibt die **idealen Plattenkoordinaten**:

$$\begin{split} &\zeta_i = f \ \, tan \, \, \upsilon_i \ \, sin \, \, a \quad (in \, Richtung \, zunehmender \, Rektaszension) \\ &\eta_i = f \ \, tan \, \, \upsilon_i \, \, cos \, \, a \, \, \, (in \, Richtung \, zunehmender \, Deklination) \\ &und \, \, \overline{PS} = \sqrt{\zeta^2 + \eta^2} \, \, = f \, \, tan \, \, \upsilon \end{split} \tag{2.2}$$

Im Poldreieck Pol - P₀ - s gilt:

$$\sin v \cdot \sin a = \cos \delta \cdot \sin (\alpha - \alpha_0)$$

$$\sin v \cdot \cos a = \sin \delta \cdot \cos \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)$$

$$\cos v = \sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)$$
(2.3)

eingesetzt in (2.2):

$$\xi = f \cdot \frac{\cos \delta \cdot \sin (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}$$

$$= f \cdot \frac{\sin (\alpha - \alpha_0)}{\tan \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}$$
(2.4)

$$\eta = f \cdot \frac{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 - \cos \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \cdot \sin \delta_0 + \cos \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}$$

$$= f \cdot \frac{\tan \delta - \tan \delta_0 \cdot \cos (\alpha - \alpha_0)}{\tan \delta \cdot \tan \delta_0 + \cos (\alpha - \alpha_0)}$$
(2.5)

Die Umkehrung obenstehender Formeln führt zur Darstellung der sphärischen Koordinaten ϕ und λ als Funktion der Plattenkoordinaten ξ und η :

$$\alpha = \alpha_0 + \operatorname{atan} \frac{\xi}{f \cdot \cos \delta_0 - \eta \cdot \sin \delta_0}$$

$$\delta = \operatorname{atan} \left(\frac{f \cdot \sin \delta_0 + \eta \cdot \cos \delta_0}{f \cdot \cos \delta_0 - \eta \cdot \sin \delta_0} \cdot \cos (\alpha - \alpha_0) \right)$$
(2.6)

Ausgehend von diesen Zusammenhängen und mit den Näherungswerten $\alpha_0 = \Theta_{0(gem)} + \Lambda_0$ sowie $\delta_0 = \Phi_0$, berechnet nun das Programm für alle Katalogsterne im Aufnahmefeld des Films die scheinbare Position und führt die automatische Identifikation der angemessenen Sterne durch, wobei in den Formeln (2.6) die Plattenkoordinaten ξ und η durch die Komparator-Messwerte x und y ersetzt werden. Die Berechnung der scheinbaren Sternörter erfolgt unter Einbezug aller Reduktionsschritte für Präzession, Nutation, Eigenbewegung, sowie jährliche und tägliche Aberration, wie sie in GESSLER (1975) und WISSEL (1982) detailliert beschrieben sind. Danach erfolgt die eigentliche Plattenreduktion zur Ermittlung der Aufnahmerichtung im äquatorialen Koordinatensystem der Fixsterne. Dazu müssen die gemessenen Bildkoordinaten in geeigneter Weise mit den idealen Plattenkoordinaten der identifizierten Sterne verknüpft werden. Standardmässig wird dazu eine astrometrische Reduktion angesetzt, und zwar die vereinfachte projektive Abbildung (Abbildung 5):

$$\xi = A + Cx + Dy + Ex\xi + Fy\xi$$

$$\eta = B + Cy - Dx + Ex\eta + Fy\eta$$
(2.7)

Die 6 Transformations- Unbekannten A-F, die man auch als Plattenkonstanten bezeichnet, lassen sich im Zuge einer vermittelnden Ausgleichung bestimmen. Die Verbesserungsgleichungen lauten:

$$v_{\xi} = A + Cx + Dy + Ex\xi + Fy\xi - \xi_{0}$$

$$v_{\eta} = B + Cy - Dx + Ex\eta + Fy\eta - \eta_{0}$$
 (2.8)

Die Plattenkonstanten beschreiben (in impliziter Form) die Nullpunktsverschiebung in zwei Richtungen, den Orientierungsfehler, den Massstabsfehler sowie die Neigung der Filmebene gegenüber der Bildebene, ebenfalls in zwei Komponenten. Die Berechnung der definitiven Drehachsenrichung muss gemäss der Darstellung (2.6) iterativ erfolgen, und zwar getrennt nach Aufnahmelage. Durch die Mehrfach- Belichtungssequenz bei Zenitkameraaufnahmen müssen dabei zwei Punkte speziell beachtet werden: Erstens handelt es sich strenggenommen um vier überlagerte Einzelaufnahmen des Sternhimmels mit zeitlich bekannten Abständen. Für die Identifikation eines Sterns wird nur der erste Spurpunkt herangezogen. Für die restlichen drei Spurpunkte wird der scheinbare Sternort lediglich durch den zeitlichen Versatz infolge der Erdumdrehung vom ersten Spurpunkt abgeleitet und in der Folge als unabhängiger Stern behandelt.

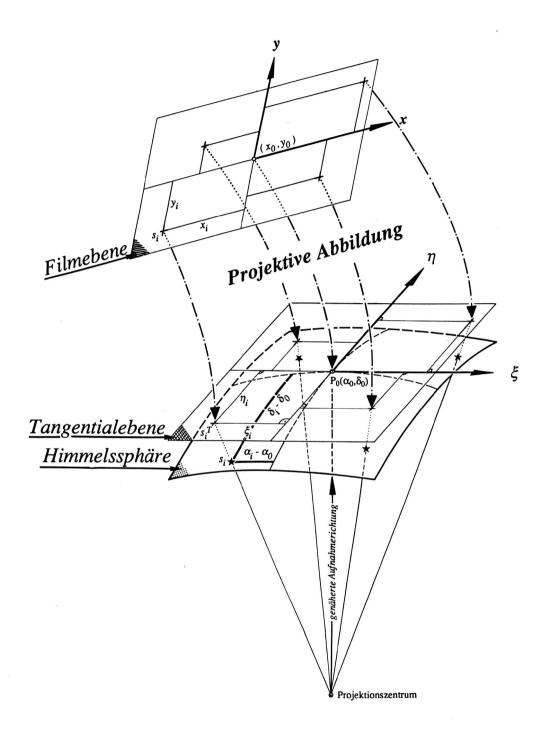


Abbildung 5: Zur mathematisch/ funktionalen Modellvorstellung bei Zenitkameraaufnahmen. Als eigentliche Beobachtungsgrössen werden die am Komparator gemessenen Bildkoordinaten x,y der Sternspuren in die Ausgleichung eingeführt. Die Parameter der schematisch dargestellten projektiven Abbildung beschreiben die räumlich/ geometrischen Beziehungen der Photographie (Filmebene) zu einer fiktiven Tangentialebene. Damit lässt sich ein direkter Zusammenhang der Messgrössen x,y mit den aus den Sternkoordinaten berechneten theoretischen Plattenkoordinaten ξ und η herstellen.

Zweitens kann sich die Aufnahmerichtung zwischen zwei Einzelbelichtungen infolge einer unstabilen Kameraaufstellung leicht verändern. Diese durch die elektronischen Libellen erfassten Neigungsänderungen werden sinnvollerweise nicht an der Aufnahmerichtung, sondern im astrometrischen Sinn an den Sternörtern individuell angebracht.

$$\alpha_{Z} = \alpha_{S} + \frac{n_{\alpha}}{\cos \delta_{D}}$$

$$\delta_{Z} = \delta_{S} + n_{\delta}$$
(2.9)

wobei α_S , δ_S = Scheinbare Sternkoordinaten, bezogen auf den Zeitpunkt der ersten Belichtung α_Z , δ_Z = aktualisierte Äquatorial- Sternkoordinaten nach Berücksichtigung der Neigungswerte n_{α} , n_{δ} = Neigungskomponenten in West / Ost, resp. Nord / Süd-Richtung

Einzelne Messungen, die zu grosse Residuen aufweisen, oder sich auf einen falsch identifizierten Stern beziehen, werden ausgeschieden, und die Iteration wird wiederholt. Das bereinigte Mittel aus beiden Lagen entspricht der räumlichen Richtung (α_D , δ_D) der Kameradrehachse. Infolge der Polwanderung ist diese Richtung aber nicht raumfest, sondern entspricht prinzipiell einer Momentaufnahme. Diese auf die momentane Pollage bezogene Richtung bedarf daher der Reduktion auf eine definierte mittlere erdfeste Richtung. Dazu benützt man den Conventional International Origin (CIO), der der mittleren Pollage aus der Beobachtungsperiode 1900 - 1905 entspricht. Die dafür benötigten Werte erscheinen regelmässig im NEOS (National Earth Orientation Bulletin, Serie 7) des US Naval Observatory und des National Geodetic Survey, Washington, D. C., oder ehemals im Bulletin D des Bureau Internationale de l' Heure (BIH) in Paris.

Bei der TZK2 und bei der TZK3 verbleibt schliesslich noch als letzte Korrektur die sog. Azimutkorrektur, um den konstruktionsbedingten, azimutabhängigen Unterschied zwischen der Drehachsenrichtung und der Richtung der optischen Achse auszugleichen. Die erhaltene Richtung, definiert durch die zwei Komponenten Φ und Λ , entspricht damit der Richtung der örtlichen Lotlinie.

2.3 Europäische Zenitkameras im Vergleich

Aus dem wissenschaftlichen Bedürfnis nach mehr astrogeodätischen Lotrichtungsbestimmungen für verschiedene Zwecke der Geodäsie, insbesondere für die Geoidbestimmung, begann in den siebziger Jahren die Entwicklung von leichten, das heisst transportierbaren Astro- Kameras für den Feldgebrauch. In Europa wurden im Prinzip zwei Wege verfolgt:

- Umbau von bestehenden und im ursprünglichen Einsatzgebiet nicht mehr verwendeten photogrammetrischen Satellitenkammern mit ca. 300 mm Brennweite.
- Neukonstruktion von speziellen Kameras mit handelsüblichen Objektiven von 800 bis 1000 mm Brennweite.

Die Tatsache, dass heute im europäischen Raum 6 verschiedene Zenitkameras unterschiedlicher Konstruktion im Einsatz stehen, beweist, dass beide Wege zu brauchbaren Instrumenten führten, wenngleich die technische Ausrüstungen zur Steuerung der Instrumente recht unterschiedlich sind.

Infolge der Erdrotation und im Hinblick auf die Genauigkeit muss die Steuerung der Belichtungssequenzen sowie deren zeitliche Erfassung besonders sorgfältig erfolgen. Dazu sind spezielle Steuergeräte notwendig, deren Aufgabe es ist, minimal folgende Funktionen auszuführen:

- Aufrechterhaltung einer Uhr zur Zeiterfassung der Verschlussbewegungen
- Ermöglichung von Zeitvergleichen mittels Zeitzeichenempfängern zur Einhängung der Uhr in ein übergeordnetes Zeitsystem (UTC, resp. UT1) sowie zur Kontrolle des Uhrverhaltens
- manuelle oder automatische Ansteuerung des Kamera- Verschlusses. Diese Funktion kann durch einfache Vorwahl der Belichtungsdauer an einem mechanischen Stufenschalter mit manueller Betätigung eines Tasters, oder durch geeignete Hard- oder Softwarelösungen erfolgen.
- Erfassung der durch elektronische oder mechanische Kontakte ausgelösten Zeitpunkte (Epochen) der Verschlussbewegungen
- analoge oder digitale Anzeige der von den Libellen gemessenen Neigungswerte.

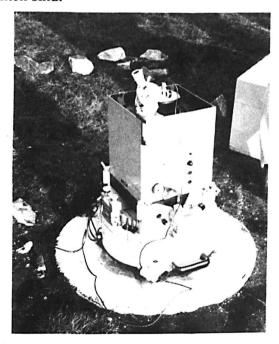
Je nach Ausführung der in Europa zur Zeit eingesetzten Kameras sind die Steuergeräte unterschiedlich weit entwickelt. Bei einigen geht die Automatisation weiter, als hier dargestellt. Sie umfasst z. B. zusätzlich die digitale Abspeicherung der Daten mittels Mikroprozessoren, vorzugsweise mit der Möglichkeit eines möglichst einfachen Datentransfers zum Computer. Einen Vergleich der verschiedenen Systeme zeigt Tabelle 1.

	TZK 1 TU Hannover	TZK2 TU Hannover	TZK3 ETH Zürich	TU Graz	Universität Rom	IGMI Florenz
Objektiv	Astro Fernbildlinse	Zeiss Mirotar	Zeiss Mirotar	Kodak Aero Ektar	Kinoptik Paris	Kinoptik Paris
Brennweite	800 mm	1000 mm	1000 mm	306 mm	308 mm	312 mm
Öffnungsverhältnis	1:5.0	1:5.6	1:5.6	1:2.5	1:4.3	1:4.3
Objektivdurchmesser	160 mm	200 mm	200 mm	140 mm	ca. 80 mm	ca. 80 mm
Abbildungsfeld	4.5 Grad	3.6 Grad	3.6 Grad	~ 33 Grad	~ 33 Grad	~ 33 Grad
Abbildungsmassstab	0.25 "/ µ	0.2 "/ µ	0.2 "/ μ	η/"/0	η/0	η//0
Verschluss	Compur 5FS	Compur 5FS	Compur 5FS	elektromechanisch	elektromechanisch	elektromechanisch
Negativformat	6.5 x 9 cm	6.5 x 9 cm	6.5 x 9 cm	18 x 18 cm	18 x 18 cm	18 x 18 cm
Negativmaterial	Agfapan 400 Planfilm	Agfapan 400 Planfilm	Agfapan 400 Planfilm	Kodak 103 F Platte	HP3- Platte	HP3- Platte
Anzahl Belichtungen	2 x 4	2 x 4 (7)	2×4	4 x 6-7	4 x 6	4 x 6
Aufnahmerichtungen	2 (± 180°), Or. beliebig	2 (± 180°), Or. beliebig	2 (± 180°), Or. beliebig	4, Orient. beliebig	4, Orient. nach Polaris	4, Orient. nach Polaris
Verschlusssteuerung	manuell, Bel. Zeit wählbar	automatisch (Hardware)	automatisch (Software)	automatisch (Software) manuell, Bel. Zeit wählbar	automatisch	manuell
Libellen	Talyvel II	Talyvel II	Talyvel III	Talyvel II	Talyvel II	Röhrenlibellen
Zeitregistrierung	BCD- codiert, auf Streifen	digital, auf Streifen	digital	auf Chronographenstreifen	digital	Stroboskop-Synchron.
Libellenregistrierung	manuell, analog	digital, auf Streifen	digital	manuell / analog	digital	manuell / analog

Tabelle 1 : Vergleich der in Europa verwendeten transportablen Zenitkameras.

2.3.1 Transportable Zenitkameras in Italien

In Italien stehen zur Zeit zwei Zenitkameras im Einsatz. Beide Modelle entstanden durch den Umbau von französischen IGN (Institut Géographique National, Paris)- Satellitenkammern. Das wichtigste Merkmal besteht bei diesen Apparaturen darin, dass der optische Teil, also die eigentliche Satellitenkamera, frei beweglich ist, und auf einen horizontierbaren Unterbau definiert aufgesetzt wird. Die azimutale Ausrichtung der Kamera erfolgt mit Hilfe eines aufgesetzten Hilfsfernrohrs genau in Richtung des Polarsterns. Gemessen wird in 4 verschiedenen Lagen (Azimuten), mit jeweils 90° Unterschied. Das ältere Modell der beiden Kameras ist im Besitz des Instituto Geografico Militare Italiano (IGMI) in Florenz. Wegen der verwendeten Röhrenlibellen weist es allerdings eine verminderte Genauigkeit auf. Die neuere Ausführung der von BIRARDI (1971,74,76,77) umgebauten Kamera, die an der Universität Rom für astronomische Lotrichtungsbestimmungen eingesetzt wird, ist mit elektronischen Libellen vom Typ Talyvel II ausgerüstet (Abb.6). Die Kamerasteuerung sowie die veraltete Zeitmess-Einrichtung, in der die Ursache der vergleichsweise grossen Längenabweichungen vermutet werden kann, wurden zwischenzeitlich durch ein am IGP entwickeltes Steuergerät ersetzt, das einen weitgehend automatisierten Messablauf ermöglicht. Als Nachteil, der sich unvorteilhaft auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt, muss bei den italienischen Kameras der Umstand bezeichnet werden, dass für die Feldmessungen kein Stativ eingesetzt wird. Dies führt oft dazu, dass die Station im Gelände wegen schlechten Untergrundes nicht optimal plaziert werden kann, oder dass spezielle (zeit- und kostenaufwendige) Betonfundamente zu errichten sind.



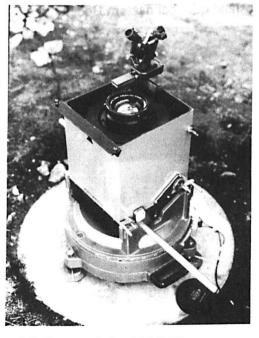


Abbildung 6: Transportable Zenitkameras der Universität Rom und des IGMI Florenz.

·

2.3.2 Transportable Zenitkamera der TU Graz

Die am Institut für Erdmessung und Physikalische Geodäsie der TU Graz vorhandene Zenitkamera (Abb. 7) besteht aus einer umgebauten Satellitenkamera BE1 und ist von RINNER et al. (1981) und CHESI (1984) ausführlich beschrieben worden. Aus Gründen der Gewichtsersparnis wurde die Kamera umgebaut, wobei auf schwere Teile, wie Montierung, Rotationsverschluss, Bildzählwerk, Blende, Rahmenmarken- und Beleuchtungseinrichtung verzichtet wurde, soweit diese für das einwandfreie Funktionieren des Systems entbehrlich waren. Ein leichter Unterbau aus Leichtmetall ermöglicht die Drehung der Kamera in beliebige Richtungen, was Aufnahmen in 2x2 korrespondierenden Lagen ermöglicht. Die Ablesungen der Libellen erfolgen an den Analoganzeigen und werden von Hand notiert, die Registrierung der Belichtungszeiten erfolgt ebenfalls analog auf einen Chronographenstreifen, der gleichzeitig mit den Verschlusskontakten die Sekundentakte des Zeitzeichenempfängers festhält. Für die Neuberechnung des österreichischen Geoids erfolgten umfangreiche Messungen (LICHTENEGGER und CHESI, 1983), die auch als Vergleichstationen für die klassischen Messverfahren dienten (ERKER, 1983). Wie Vergleichsmessungen im Rahmen des Ivrea- Projektes gezeigt haben, ist die Genauigkeit dieser Apparatur mit derjenigen der TZK2 und TZK3 vergleichbar, wobei dem Vorteil der leichten Bauweise der Nachteil einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Wind und Bodenunruhen gegenübersteht. Ausserdem muss bei der Wahl des Aufstellpunktes der Bodenbeschaffenheit besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, da die Kamera nicht auf einem Stativ, sondern auf dem Erdboden, grossen Steinen, Felsen, Mauern usw. aufgestellt wird. Dies kann bei Stationierungen in offenem Wiesland oder bei nassem Boden Schwierigkeiten mit sich bringen.



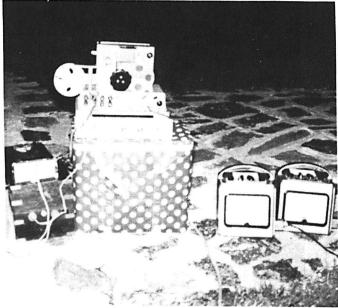


Abbildung 7: Transportable Zenitkamera und Steuergeräte der TU Graz (1983).

2.3.3 Transportable Zenitkamera TZK1 der TU Hannover

Die erste Kamera, die 1980 im Rahmen eines Pilotprojektes (WUNDERLIN, 1981; WISSEL, 1982) in der Südschweiz mit Erfolg zum Einsatz gelangte, war die TZK 1, die in den Werkstätten der Technischen Universität Hannover gebaut wurde. Die von GESSLER (1975) von Grund auf neuentwickelte Kamera kann als Prototyp einer neuen Generation transportabler Zenitkameras mit grossen Brennweiten bezeichnet werden, die erstmals rasche, genaue und damit wirtschaftliche Lotrichtungsbestimmungen, auch im Hochgebirge, ermöglichte. Im Rahmen des erwähnten Pilotprojektes erfolgte eine Beobachtung auf Monte Cimetta, einem auf 1671 m über Meer gelegenen Punkt des Basisvergrösserungsnetzes Giubiasco (WUNDERLIN, 1981). Dank dem Einsatz eines Armeehelikopters war der Einsatz der Kamera recht einfach, abgesehen von den letzten 200 Metern vom Landeplatz zum Zentrum. Abbildung 8 zeigt die Kamera in Aufnahmeposition auf dem Beobachtungspunkt. Abbildung 9 dokumentiert, wieviel Transportkapazität für das Material benötigt wird, wenn kein Helikopter zum Rücktransport zu Verfügung steht. Mittlerweile hat sich diese Kamera seit über 10 Jahren in vielen Einsätzen von Brasilien über die Bundesrepublik Deutschland und die Schweiz bis Dänemark bestens bewährt und ihre Robustheit unter Beweis gestellt.

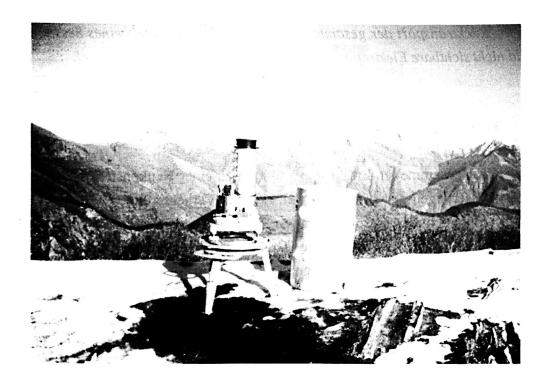


Abbildung 8: TZK1 in Messposition auf Mte. Cimetta, nördlich von Locarno (Tessin).

Im Vergleich zu den moderneren Ausführungen TZK2 und TZK3 erfordert diese Kamera allerdings bedeutend mehr Arbeit bei den Feldmessungen und bei der Auswertung, besonders bei der fehleranfälligen Eingabe der binär codierten Belichtungszeiten in den Computer.

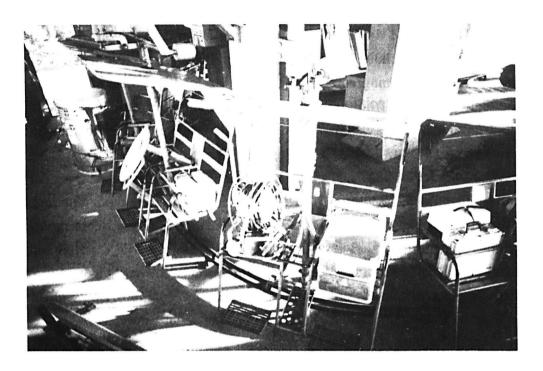


Abbildung 9: Rücktransport der gesamten TZK1 - Ausrüstung mittels eines Sessellifts. Die auf dem Bild nicht sichtbare Elektronik beansprucht einen weiteren Doppelsessel.

2.3.4 Transportable Zenitkamera TZK2 der TU Hannover

Die mit der TZK1 gesammelten Erfahrungen führten zu einer Neukonstruktion mit einigen wichtigen Verbesserungen gegenüber der TZK1. Diese Verbesserungen halfen, sowohl die Feldarbeiten, als auch die anschliessenden Büroarbeiten wesentlich zu erleichtern (WISSEL,1982). Dabei ist zunächst die neue Optik erwähnenswert, die dank der Cassegrain Spiegel/Linsen Optik eine um 25% vergrösserte Brennweite aufweist. Neben erhöhter Sternausbeute infolge verbesserter Abbildungsqualität weist die TZK2 eine kürzere und kompaktere Bauform auf. Als Nachteil dieser Kamera muss allerdings der Umstand erwähnt werden, dass sich die Brennweite des Objektivs mit der Temperatur verändert. Dies führt bei Nichtbeachtung u. U. zu erheblichen Unschärfen, wenn bei extremen Temperaturen photographiert wird und der Fokus unverändert fixiert bleibt. Auf Grund dieser Eigenschaft musste eine konstruktive Lösung erarbeitet werden, mit der sich die Brennweite in einem Bereich von ca. ±2 mm verändern lässt. Dazu wurde der Anlegerahmen (der sich bei scharfer

Abbildung genau in der Bildebene befinden muss) auf 3 Spindeln montiert, die über einen Kettenantrieb miteinander verbunden sind. Durch einen von aussen bedienbaren Schneckenantrieb lässt sich der Anlegerahmen parallel verschieben. An der Skala eines Mikrometer- Tasters ist die Position des Rahmens ablesbar. Mittels Fokusaufnahmen bei verschiedenen Aussentemperaturen kann die Skala geeicht und die Fokuslänge entsprechend der Temperatur korrigiert werden. Der Einfluss beträgt rund 0.05 mm / °C. Ein weiterer Fortschritt gegenüber der TZK1 konnte mit der Entwicklung einer neuen Elektronik mit automatisierter Verschlusssteuerung und digitaler Ausgabe aller Messdaten auf Druckerstreifen erzielt werden, was sich positiv auf den Bedienungskomfort während der Feldmessung auswirkte. Die Ansteuerung des Verschlusses erfolgt durch eine in der Elektronik integrierten Hardware- Schaltung, in der eine bestimmte Belichtungssequenz fest verdrahtet ist. Für Sonderfälle, wie z. B. Fokusaufnahmen besteht die Möglichkeit des manuellen Betriebs der Schaltung. Dabei kann die Dauer jeder Einzelbelichtung mit einem Drehschalter vorgewählt und danach per Knopfdruck ausgelöst werden.

Obwohl die Felddaten weitgehend automatisch erfasst werden, verbleiben zur Datensicherung verschiedene manuelle Arbeiten. Zum einen sind die von drei Druckwerken ausgegebenen Metallpapierstreifen (zwei von den Libellen- und einer vom Zeitdrucker) zu ordnen und nach Aufnahmen sortiert abzulegen, was grosse Sorgfalt bedingt. Zum anderen verbleibt das manuelle Eintippen der Daten bei der Büroauswertung sowie die entsprechenden Kontrollen.



Abbildung 10 : TZK2 der TU Hannover in Messposition. Auf der linken Seite ist der geöffnete Schlitten zur Aufnahme der Filmkassette sichtbar.

2.3.5 Transportable Zenitkamera TZK3 der ETH Zürich



Abbildung 11: TZK3 - Messsystem des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich in Messposition. Links ist das "Libellengehäuse" aufgebaut. An dieser Einheit kann der Operateur die Libellenwerte ablesen und kontrollieren. Darunter befindet sich der Koffer mit den Filmkassetten. In der Zubehörkiste rechts ist die Steuerelektronik mit dem Tastaturfeld sichtbar (s. auch Abb. 13).

Die am IGP seit 1983 im Einsatz stehende TZK3 (Abbildung 11) wurde, wie die Vorgängermodelle TZK1 und TZK2, am Institut für Erdmessung der TU Hannover entwickelt und in den institutseigenen Werkstätten angefertigt. Der optische Teil des TZK3- Messsystems entspricht praktisch unverändert demjenigen der TZK2 (Abbildung 12). Lediglich die Verschluss- Ansteuerung wurde extern aufgebaut und im Objektiv- Tubus ein zusätzlicher Temperaturfühler mit digitaler Aussenanzeige montiert. Diese Messvorrichtung wird zur Fokuseinstellung benötigt, da sich die massgebliche Innentemperatur der Kamera nur sehr träge der Umgebungstemperatur anpasst. Dadurch ist eine Wartezeit zur Temperaturangleichung nicht nötig, sofern zur Fokuseinstellung ein auf Erfahrungswerten beruhendes Eichdiagramm beachtet wird.

Die Grundausstattung der Steuerelektronik der TZK3 beruhte ebenfalls auf den mit der TZK2 in Hannover gemachten Erfahrungen. Die sich rasch weiterentwickelnden Möglichkeiten der Mikroprozessortechnik ermöglichten darüber hinaus den Ausbau und die Weiterentwicklung dieses wichtigen Teils des Messsystems in Zürich (BÜRKI, 1985).

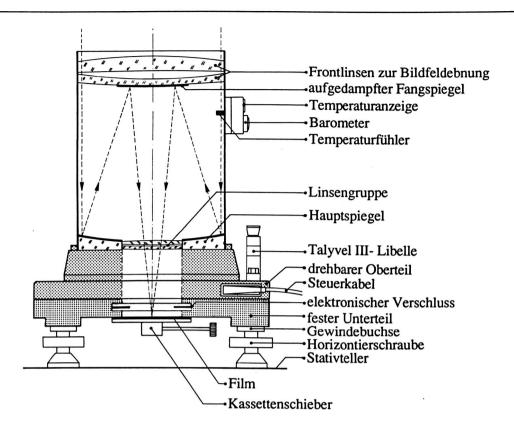


Abbildung 12: Schnitt durch die TZK3. Der eintretende Strahl wird im Cassegrain-Objektiv 1:5.6 / 1000 mm durch die beiden Spiegel zweimal zurückgeworfen. Gegenüber brechenden Objektiven erreicht man damit trotz grösseren Brennweiten eine kürzere Bauweise.

Im Rahmen einer am Institut für Elektrotechnik der ETHZ ausgeführten Semesterarbeit von zwei Studenten der Abteilung für Elektrotechnik erfolgte eine erste Erweiterung der Grundausführung der Steuerelektronik um ein Datenerfassungssystem auf der Basis eines programmierbaren Mikroprozessors. Die für den verwendeten CMOS- Mikroprozessor vom Typ RCA 1802 geschriebenen Assembler- Programme automatisierten die digitale Erfassung der im Feld anfallenden Daten, speicherten sie ab und protokollierten sie zu Kontrollzwecken auf einem Druckerstreifen. Ausserdem bestand die Möglichkeit, die Daten auf Tonbandkassetten zu übertragen, was lediglich ein mit einer seriellen Schnittstelle ausgerüstetes Tonband- Kassettengerät benötigte. Dieses batteriebetriebene Gerät gestattete auch den Datenübertrag zum Rechner nach Abschluss der Feldarbeiten. Ein weiteres, der im ROM (Read Only Memory)- Bereich resident abgespeicherten Programme, besorgte den automatischen Zeitvergleich der internen Quarzbasis mit dem Sekundenpuls eines angeschlossenen Zeitzeichenempfängers. Dadurch konnte gegenüber der TZK2- Elektronik der Arbeitsschritt der Datenübernahme im Büro automatisiert und auf das manuelle Eintippen verzichtet werden. Allerdings gingen bei Stromausfall sämtliche der im 16 kByte-Halbleiterspeicher abgelegten Daten verloren. Bei Problemen mit der Stromversorgung oder beim "Hängenbleiben" des Prozessors konnte es mitunter vorkommen, dass der Speicherinhalt

durch Ausschalten der Stromversorgung geopfert werden musste, ansonsten die Steuerung für weiere Aufnahmen blockiert blieb. In solchen Fällen blieb der Umweg über den Druckerstreifen die einzige Möglichkeit, die Daten und damit die Aufnahme(n) zu "retten". Nach 5 Jahren Betriebsdauer, in denen Messungen auf insgesamt rund 250 Stationen erfolgten, zeigten sich Verschleisserscheinungen. Insbesondere offenbarte der Metallpapierdrucker ernsthafte Mängel, indem die bedruckten Streifen immer unleserlicher wurden. Bei einem zu erwartenden Ausfall dieses wichtigen Teils bestand damit die Gefahr des "plötzlichen Todes" der gesamten Elektronik. Aus diesem Grund wurde 1987 der Entschluss gefasst, eine neue Steuerelektronik zu bauen. Neben einer Reduktion der Grösse und des Gewichts (die bisherige Elektronik bestand aus einem 19"- Rack mit drei Einschüben und wog ca. 35 kg.) standen bei dieser Neuentwicklung Zuverlässigkeit, Datensicherheit und Bedienungskomfort im Vordergrund. Eine Aufteilung der Bauteile in zwei separate Gehäuse erschien dazu am besten geeignet, da dies erlaubt, die wichtigsten Funktionen dort zu kontrollieren, wo es bedienungsmässig sinnvoll ist. Das Haupt- Steuergerät besteht aus einem in Aluminium gefertigten Gehäuse, in dem das Prozessorsystem die Eingabetastatur und eine hintergrundbeleuchtete Flüssigkristallanzeige, die Verschlusssteuerung sowie der Datenspeicher untergebracht sind. Dieses Gehäuse mit den Aussenmassen 44 x 31 x 11 cm findet bequem in der gepolsterten Zubehörkiste Platz, wo es beim Transport gut geschützt ist (Abbildung 13).

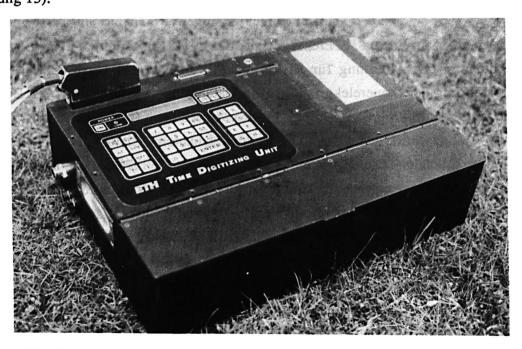


Abbildung 13: Steuergerät für die TZK3 des IGP. Auf der linken Hälfte des Geräts sind die wasserdichte Folientastatur und das Fenster für die beleuchtete Flüssigkristallanzeige sichtbar. Der vordere Teil besteht aus einem Fach zur Aufnahme von Zubehör, wie Zeitzeichenempfänger, Taschenlampe, Filme usw.

Die Stromversorgung der gesamten Steuerung erfolgt durch einen in der Zubehörkiste untergebrachten Bleiakku, der seinerseits am Autoakku angeschlossen bleibt, was einen stets optimalen Ladezustand garantiert. Nach Bedarf kann der Akku durch einen grösseren ersetzt oder ergänzt werden, wenn die Kamera für längere Zeit ausserhalb des Fahrzeugs eingesetzt werden muss.

Im zweiten Gehäuse mit den Massen 30 x 23 x 11 cm sind die neuen Verstärkerstufen TALYVEL III mit digitalen Anzeigen und den Bedienungsknöpfen für den Nullabgleich untergebracht. Im weiteren enthält das Gehäuse die Elektronik für die Ansteuerung des Verschlusses und diejenige für die Rahmenmarken und Siebensegment- Elemente zur Kennzeichnung der Filme (s. auch Abbildung 14). Dieses "Libellengehäuse" ist über ein 50 m langes Kabel mit dem Steuergerät und mit einem Kabel von 2.5 m Länge mit der Kamera verbunden. Dies ermöglicht den Betrieb der Libelleneinheit mit den Anzeigen und den übrigen Bedienungselementen in unmittelbarer Nähe der Kamera. Der Operateur kann damit die Horizontierung allein vornehmen, er ist nicht auf direkte Sichtverbindung zum Steuergerät angewiesen, da dieses in der Regel im Fahrzeug verbleibt. Auf diese Weise erübrigt sich beim Horizontieren das mühsame Zurufen der Libellenwerte über grössere Distanzen, und die Wahl der Stationierung ist weniger Einschränkungen unterworfen.

Die Grundlage des Steuergeräts bildet die Time Digitizing Unit (TDU), ein am IGP entwickeltes tragbares Zeitmessmodul (BÜRKI et al, 1987). Dieses batteriebetriebene Gerät ist nur ca. 2.5 kg schwer und ist auf die speziellen Bedürfnisse der geodätisch / astronomischen Messtechnik abgestimmt und wird seit einiger Zeit im Rahmen von Übungen und Praktika eingesetzt (WALSER 1987). Es kann im wesentlichen als digitale Uhr bezeichnet werden, die neben der reinen Zeiterfassung auch andere Mess- oder Steuerfunktionen ausführen kann, sofern sie entsprechend programmiert ist. Die Uhr kann synchron mit einem beliebigen Zeitzeichen gestartet werden, vorausgesetzt, der verwendete Zeitzeichenempfänger liefert einen demodulierten 1 Hz- Puls am Ausgang. Für den Empfang des in der BRD stationierten DCF77- Senders ist das Gerät zudem mit einer Decodierschaltung ausgerüstet, die einen vollautomatischen Synchronstart, mit gleichzeitiger Übernahme des Datums ermöglicht. Dank eines Quarzoszillators als internes Zeitnormal, kann die TDU Epochen von beliebigen Ereignissen mit einer Genauigkeit von 1 ms erfassen und in digitaler Form abspeichern. Garantiert wird diese Genauigkeit durch die Möglichkeit, jederzeit mittels einem geeigneten Empfänger Zeitvergleiche zur UTC- Atomzeitskala eines Zeitzeichensenders durchzuführen. Für die TZK3- Elektronik wurde der Quarz übernommen, der bereits in der nunmehr ersetzten Elektronik Verwendung fand. Dieser ständig geheizte Quarzoszillator (OCXO) weist bei guter Trimmung eine Driftrate von < 1 ms pro Tag auf. Dadurch ist ein Betrieb der Uhr auch in Gebieten ohne Zeitzeichenempfang, wie z. B. in engen Gebirgstälern, ohne weiteres über mehrere Stunden möglich. Die beschriebenen Möglichkeiten dieser Entwicklung wurden für

die neue Steuerung der Kamera ausgenutzt und erweitert. Neben der Zeithaltung ist die TDU so programmiert, dass sie den Verschluss ansteuern und die Libellenwerte einlesen kann. Nach der Horizontierung der Kamera verbleibt somit lediglich die einmalige Eingabe der Stationsdaten, bestehend aus Stationsnummer, den aktuellen Meteowerten sowie einer allfälligen Exzentrumsdistanz. Die Eingabe erfolgt durch den Aufruf des entsprechenden Eingabeprogramms auf einer der 8 zur Verfügung stehenden Programmtasten. Im weiteren Ablauf der Aufnahmen muss lediglich bei jedem neu eingelegten Film die Filmnummer eingetippt werden. Nach Einlegen der Filmkassette und dem Start des Belichtungsprogramms, läuft anschliessend die Belichtungssequenz inklusive der Datenerfassung automatisch ab. Für den Operateur verbleiben einzig die Einbelichtung der Rahmenmarken und der Filmnummer, die Drehung der Kamera in die zweite Aufnahmelage sowie allfällige Nachhorizontierungen bei unstabilem Untergrund. Dieser hohe Bedienungskomfort wird durch folgende, in Assembler abgefassten Programme erreicht:

- Hauptprogramm "Zeithaltung" *
- Programm "Zeitvergleich" *
- Angabe des Speicher Füllstandes*
- Datenübertrag*
- spezifisches Programm für den Einsatz von klassischen Messinstrumenten*
- Abfrage und Eingabe der Stationsdaten
- Abfrage und Eingabe der Filmnummer
- automatische Steuerung des Verschlusses mit Datenerfassung (Zeiten und Libellenwerte)
- Betriebsprogramm mit Menueführung zur Einstellung wichtiger Parameter, wie z. B. Baudrate, Wortlänge, Löschen des Speichers, Neustart usw.*

(Mit * bezeichnete Programme gehören zur Standardsoftware der TDU)

Das in der Steuerung integrierte Mikroprozessorsystem besteht aus steckbaren Baustein-Modulen:

- Base Plane (Power Supply)
- CPU (Central Processing Unit, Typ NSC 800 von National Semiconductors, mit Z80- kompatiblem Befehlssatz.
- ROM (Read Only Memory) mit 16 kByte Programmspeicher für Anwenderprogramme
- RS232- Modul für die Serielle Schnittstelle

Als Speichermedium für die Messdaten finden sog. Memocards von Panasonic mit 32 kByte, resp. 256 kByte Kapazität Verwendung. Es handelt sich um 4 mm dünne, steckbare Speicherkarten in Kreditkartengrösse. Sie können die Daten dank einer eingebauten Lithium-Batterie für 5 bis 10 Jahre nichtflüchtig speichern. In dieser Zeit kann die Speicherkarte beliebig oft benutzt, ausgetauscht, gelesen und wiederverwendet werden. Mit einer kompaktierten Speicherung der Daten lässt sich zudem eine Verdoppelung der Speicherkapazität erreichen. Die 32 kByte- Karte speichert auf diese Art die Daten von ca. 18 Stationen zu je 6 Aufnahmen. Diese umfassende Datenerhebung im Feld reduziert die im Büro anfallenden Auswertearbeiten auf ein Minimum. Sie bestehen lediglich im Datenübertrag von den Memory- Karten zum Rechner. Mit Hilfe der dazu entwickelten Software kann man die Daten übersichtlich darstellen, editieren und ergänzen (z.B. um die aktuellen Polkoordinaten). Gleichzeitig werden die Daten einigen Plausibilitätstest bezüglich der zeitlich korrekten Abfolge der einzelnen Belichtungen sowie etwaiger Veränderungen der Libellenwerte während der Aufnahme unterworfen. Durch den erreichten Bedienungskomfort und die hohe Zuverlässigkeit der Datenerfassung fielen die bisher gemachten Erfahrungen mit der neuen Elektronik positiv aus. Eine Übersicht der einzelnen Komponenten, aus denen die Steuerung aufgebaut ist, folgt in Abbildung 14.

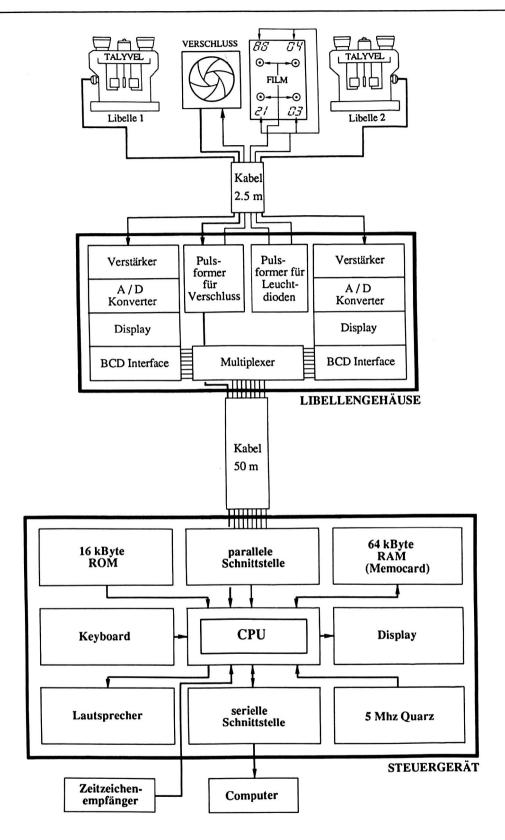


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Komponenten, aus denen sich die Steuerung der TZK3 zusammensetzt. Aus arbeitstechnischen Gründen sind die Bedienung und die Anzeige der elektronischen Libellen nicht mehr im Hauptsteuergerät, sondern in einem separaten "Libellengehäuse" untergebracht, das in unmittelbarer Umgebung der Kamera aufgestellt wird.

2.4 Auswertegeräte

Die Ausmessung der entwickelten Filme oder Glasplatten stellt bei diesem photographischen Verfahren der Lotrichtungsbestimmung den Mess- oder Beobachtungsvorgang dar. Die Erhebung und Ausmessung einer geeigneten Auswahl von Sternspuren kann unter Umständen mit viel Aufwand verbunden sein, gilt es doch, nicht nur eine bestimmte, minimal notwendige Anzahl von Sternen zu finden und auszumessen, sondern auch eine möglichst gute Verteilung der Messpunkte über das gesamte Bild zu erreichen. Anderseits hat es aber wenig Sinn, übermässig viele Sterne auszumessen. Dies erhöht nur den Aufwand, nicht aber die Genauigkeit des Resultats. Es gilt demzufolge, den optimalen Weg zu finden, der bei grösstmöglichem Ertrag mit möglichst wenig Aufwand verbunden ist. Dieser Zeitaufwand am Auswertegerät ist u. U. in erheblichem Masse von der jeweils verwendeten Messapparatur abhängig. Dieser für die Wirtschaftlichkeit wichtige Faktor hängt deshalb weitgehend von der verfügbaren Hard- und Softwareunterstützung während des Auswertevorgangs ab. Die verwendeten Auswertegeräte sind unterschiedlich in ihrer Ausführung und im Bedienungskomfort. Auf eine umfassende Dokumentation der verschiedenen Geräte wird hier zu Gunsten einer Beschreibung des am IGP eingesetzten Auswertegeräts STK1 von WILD verzichtet.

2.4.1 Umbau des Stereokomparators STK 1 des IGP

Der am IGP vorhandene und für die Auswertungen der umfangreichen Ivrea- Messungen vorgesehene Präzisions- Stereokomparator STK 1 von WILD, Baujahr 1964, bedurfte aus verschiedenen Gründen eines vorgängigen Umbaus zur Modernisierung des Koordinaten-Abgriffsystems. Obwohl das Gerät neben der analogen auch mit einer digitalen Datenerfassung ausgerüstet war, drängte sich diese Massnahme auf, denn die Ausgabe der Koordinaten erfolgte auf einer elektrischen Schreibmaschine in Form eines Messprotokolls sowie nach Wunsch auf einem mechanisch anfälligen Lochkartenstanzer. Zur Registrierung der Koordinaten und der Punktnummern stand ein Steuerpult mit einer Tastatur zur Verfügung. Infolge eines komplizierten elektromechanischen Ablesemechanismus dauerte die Registrierung eines Messwertes, vom auslösenden Tastendruck an gerechnet, rund 7 Sekunden (Abbildung 16). Um eine Beschädigung der Relaiskontakte zu verhindern, die die auf den Messspindeln montierten Konturenscheiben abtasten, durfte der Messschlitten während der Ablesung nicht bewegt werden. Zu dieser Wartezeit addierte sich der Zeitaufwand für das Eintippen der Punktnummern. Dies bewirkte einen ständigen Unterbruch des Messvorgangs und damit der Augenadaption. Durch diese sehr niedrige Messgeschwindigkeit und den geringen Messkomfort kam der Einsatz des Stereokomparators ohne wesentliche

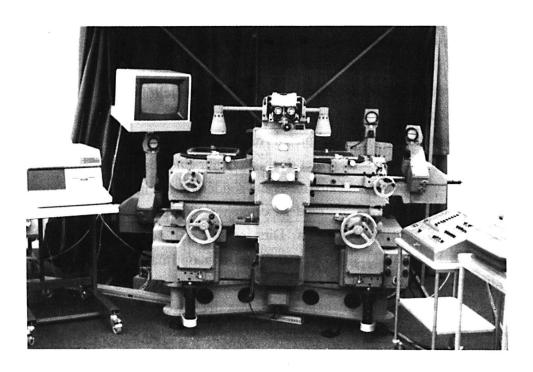


Abbildung 15: Stereokomparator STK1 von WILD zur Ausmessung der Zenitkamerafilme.

Verbesserungen nicht in Frage. Nach längeren Abklärungen der technisch realisierbaren Automatisierungsmöglichkeiten, wurde der Entschluss gefasst, den Komparator mit einem computergestützten Steuersystem auszurüsten. Dadurch wird nicht nur die Messgeschwindigkeit erheblich gesteigert, sondern durch die Möglichkeit der automatischen Positionierung auch eine optimale Unterstützung während der Messung angeboten. Erreicht wird dieser Komfort durch ein computergestütztes dynamisches Koordinatenabgriffs- und ein motorisches Antriebssystem. Das komplette System besteht aus einem Steuerrechner (HP Serie 9000, Model 9826), einem Multiprogrammer (HP6942A), 4 Drehgebern, 2 Gleichstrom-Servomotoren, einem Zweikanal- Servoverstärker mit digitalen Steuereingängen, sowie einigen zusätzlich benötigten Komponenten wie elektromagnetische Kupplungen, Endschaltern, Joystick usw. Der Multiprogrammer verfügt über einen lokalen Prozessor und kann, je nach Konfiguration, unterschiedliche digitale oder analoge Ein- und Ausgabefunktionen zwischen dem Rechner und den angeschlossenen Peripheriegeräten bewältigen. Auf der Rückseite verfügt das Gerät über 16 Steckplätze zur Aufnahme spezieller Einschub- Karten, die jeweils eine ganz spezifische Aufgabe erfüllen. Die Ausführung dieser Aufgaben kann im direkten Verbund mit dem Rechner erfolgen (z. B. die Ansteuerung der Servomotoren) oder als "Background Task" im Hintergrund ablaufen, wenn der Rechner für andere Aufgaben beschäftigt ist. Dies ist zum Beispiel der Fall bei der stets aktivierten Positionsmessung (Pulszählung) und bei der Überwachungsfunktion des Messschlittens, die durch die Not- Stoppschalter und die Interrupt- Karte des Multiprogrammers gewährleistet sein muss. Alle Befehle vom und zum Rechner werden über den schnellen HPIB- Bus (Hewlett Packard Interface - Bus) parallel übertragen. Mit dieser Hardwarelösung besteht die Möglichkeit des Aufbaus eines Regelkreises zur automatischen Positionierung:

- Die Position des Messchlittens kann durch die Drehgeber mit einer hohen Abtastrate dynamisch abgefragt werden (Abbildung 16). Die Drehgeber erzeugen pro Umdrehung 1000 Rechteckpulse, was einer Auflösung von 1µm in Achsrichtung entspricht. Die Rechteckpulse gelangen nach einer Pulsumformung als Nadelpulse auf die Zählerkarten des Multiprogrammers, wo die Position jederzeit vom Rechner abgefragt werden kann.
- Die mittels elektromagnetischen Kupplungen zum normalen Handradantrieb zuschaltbaren Servomotoren (Abbildung 17) können die Messapparatur antreiben und auf jeden beliebigen Koordinatenwert positionieren, und zwar in sehr viel kürzerer Zeit als dies manuell mit den Handrädern möglich ist.

Auch hier setzt der Multiprogrammer die vom Rechner berechneten Spannungen in analoge Gleichspannungssignale um, die er dem zwischengeschalteten Servoverstärker zuführt. Dieses Gerät setzt das hochohmige Steuersignal (Bereich \pm 10 Volt) in eine Steuerspannung von \pm 24 Volt um. Mit diesem Signal erfolgt schliesslich die Ansteuerung der Motoren, deren Gleichlauf der Geschwindigkeit ständig mit den angebauten Tachogeneratoren ausgeregelt wird.

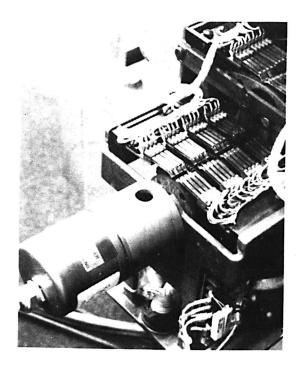


Abbildung 16: Neu montierter Drehgeber zusammen mit dem alten Relais- Abgriffsystem.

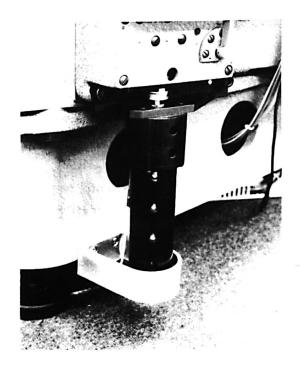


Abbildung 17: Gleichstrom- Servomotor zum Antrieb des Messschlittens

Die Ein- und Ausschaltung der elektromagnetischen Kupplungen erfolgt über eine digitale Outputkarte, die nicht nur die Ansteuerung der Kupplungen und des Servoverstärkers, sondern auch die Zuschaltung des Joysticks bewerkstelligt, was den Betrieb des Komparators in einem halbautomatischen Modus erlaubt. Das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 18 dargestellt:

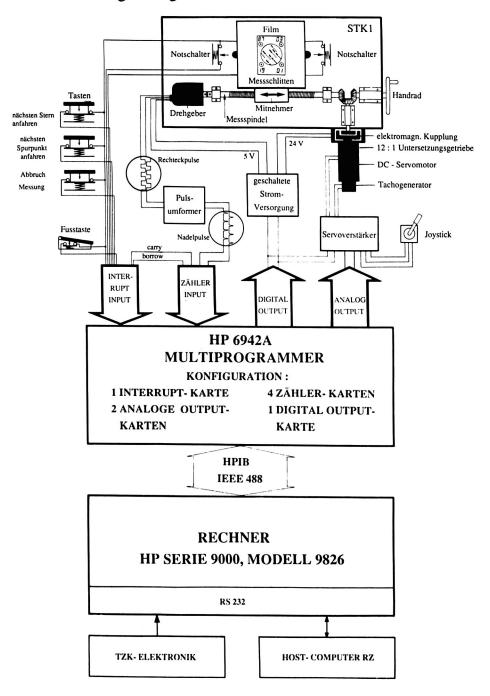


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Komponenten zur STK1- Steuerung. Zur Vereinfachung ist nur die X- Achse dargestellt. Die px- und py- Achsen sind nur mit Drehgebern, nicht aber mit Antriebsmotoren ausgestattet.

Neben der Steuerfunktion kann der eingesetzte Rechner aber auch zum Einlesen und Verwalten der für die Ausmessung benötigten Felddaten eingesetzt werden. So kann der eingelesene Felddatensatz um die gemessenen Komparatordaten ergänzt und als Inputfile für die definitive Auswertung zum Rechenzentrum übertragen werden. Diese Hard- und Softwarelösung gestattet einen durchgehenden und kontrollierbaren Datenfluss von der Datenerhebung bis zum Grossrechner (Abbildung 19). Als Ersatz für die ausgefallene Datenregistrierung mit Schreibmaschine und auf Wunsch der Professur für Photogrammetrie des IGP wurde ein spezielles Programm zur Datenerfassung am STK1 geschrieben, das einen vollautomatischen Datentransfer zum SUN- Computer der Photogrammetrie- Gruppe des IGP ermöglicht.

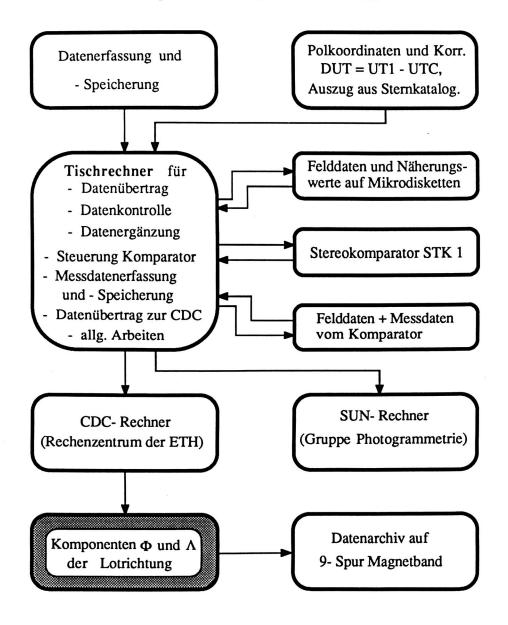


Abbildung 19: Organisation des Datenflusses

2.4.2 Auswertesoftware

Der angestrebte Hauptvorteil der rechnergestützten Ausmessung am Stereokomparator besteht in der Möglichkeit, den Messschlitten und damit die Messmarke auf eine vorgegebene Position zu verschieben und anschliessend die mittels Handrad angefahrenen Messkoordinaten vom Rechner einzulesen. Die resultierenden Einsparungen liegen nicht nur in einer wesentlich verkürzten Messdauer, sondern auch in einer entscheidenden Entlastung des Operateurs, der die Filme nicht mehr nach brauchbaren, das heisst messbaren Sternspuren absuchen muss. Diese Arbeit kann der Rechner ebensogut übernehmen, er muss lediglich die anzufahrenden Sternpositionen berechnen können, was die Kenntnis des Sternkatalogs oder zumindest eines Teils desselben voraussetzt.

Die erste Vorarbeit bestand in der Vorbereitung und Abspeicherung eines passenden Auszugs aus dem AGK3- Sternkatalog, der freundlicherweise vom Astronomischen Recheninstitut in Heidelberg auf Magnetband zur Verfügung gestellt wurde. Der gesamte Katalog enthält innerhalb eines Deklinationsbereichs von ca -10° bis +90° insgesamt rund 180'000 Sterne bis zur Grenzgrösse von $m_g = 11,5$. Da die Zenitkameramessungen in der Regel in einem geographisch beschränkten Aufnahmegebiet erfolgen, beschränken sich die benutzten Deklinationen ($\phi = \delta$) auf einen Streifen, dessen Breite grob der Gebietsausdehnung in Nord/Südrichtung entspricht. Für die Aufnahmen im Ivrea- Gebiet und in der übrigen Schweiz erfolgte eine Reduktion des Kataloginhalts auf einen Deklinationsbereich von $\delta_{min} = 43^{\circ} < \delta < \delta_{max} = 51^{\circ}$, so dass der Speicherplatz von 2 Disketten für die verbleibenden rund 8000 Sterne genügt und das Sternfile für Aufnahmen innerhalb eines Bereichs von $\delta_{min} = 44.5^{\circ} < \delta < \delta_{max} = 49.5^{\circ}$ verwendet werden kann. Um die Tageszeiten der Aufnahmen nicht einzuschränken, erfolgte keine Reduktion des Rektaszensionsbereichs.

Die gesamte zur Unterstützung des Auswertevorgangs geschriebene Software wurde in HP-Basic 2.1 abgefasst, weil diese Programmiersprache einen hohen Bedienungs- und Anwendungskomfort aufweist, sowie über einen effizienten Programm- Editor verfügt, der sehr einfach zu handhaben ist. Im weiteren hat der entsprechende Befehlssatz viele Ähnlichkeiten mit höheren Programmiersprachen, wie Fortran und Pascal. Durch die Möglichkeit, aus einem Basicprogramm heraus Subroutinen aufzurufen, die in Pascal oder in Assembler geschrieben sind, lassen sich auch zeitkritische Probleme, wie sie in der Regeltechnik häufig auftreten, bewältigen. Ausserdem sind die Schnittstellen mit Basic einfacher zu handhaben als mit anderen Programmiersprachen. Auch die spezielle Mnemonik des Multiprogrammer- Befehlssatzes lehnt sich stark an diese Sprache an. Dieser Punkt bietet vor allem bei der Entwicklung von Datenübertragungsprogrammen nicht zu unterschätzende Vorteile. Dank des schnellen 16/32 Bit- Prozessors MC 68000 von Motorola erwuchsen mit den Basic- Programmen überhaupt keine Zeitprobleme, obwohl die verwendete Version über

keinen Compiler verfügt. Die Unterstützung des Komparators durch den Computer bewirkt eine erhebliche Beschleunigung des praktischen Messablaufs, der folgendermassen abläuft:

Messablauf:

Nach dem Start des Ausmessprogramms wird der Film auf dem Bildträger mit Hilfe der Glas-Deckplatte so fixiert, dass die Kanten etwa parallel zu den Messachsen verlaufen. Danach wird die Diskette mit den Felddaten eingelegt. Nach Eingabe der Filmnummer sucht sich das Programm den entsprechenden TZK- Datensatz auf der Diskette und liest die benötigten Näherungswerte für die astronomischen Koordinaten und die ersten Belichtungsepochen für beide Aufnahmelagen ein. Damit ist die genäherte Zenitrichtung (Φ_0 , Λ_0) im äquatorialen Rektaszensions- Deklinationssystem der Fixsterne definiert. In Anlehnung an Formel (2.1) entspricht im Zenit die Rektaszension α_0 der aus der Belichtungsepoche abgeleiteten Ortssternzeit und die Deklination direkt der genäherten Breite:

$$\alpha_0 = LMST = GMST + \Lambda_0 / 15$$

$$\delta_0 = \Phi_0$$
(2.10)

Ausgehend von dieser Aufnahmerichtung wird daraufhin der Sternkatalog gezielt durchmustert, alle Sterne in einem gewissen Umkreis um den Zenitpunkt herausgesucht und nach steigendem (Bild-) Abstand von der Ausgangsrichtung sortiert. Nach Umrechnung der auf Epoche und Äquinoktium 1950.0 bezogenen Sternkoordinaten auf das aktuelle Äquinoktium werden die Werte auf spezielle Stern- Datenfiles geschrieben. Sie bilden die Grundlage für die Autopositionierung. Zur Verkürzung der Sternsuche sind sie auf 24 Files mit je einer Stunde Rektaszensionsbereich verteilt. Durch akustische Signale und graphische Darstellungen am Bildschirm führt das Programm sodann den Operateur durch die Ausmessung. Als Hilfe wurde ein mit dem Rechner verbundener 12"- Tochterbildschirm so auf dem STK1 montiert, dass der Operateur den Bildschirm bequem einsehen kann.

Die eigentliche Ausmessung beginnt mit der Messung der Rahmenmarken und eines "Azimutsterns"; das heisst, Anfang und Ende der Spur eines ungefähr in Bildmitte abgebildeten Sterns. Dieser Vorgang ist notwendig zur Ermittlung der azimutalen Ausrichtung der Kamera während der Aufnahme, damit die berechneten Plattenkoordinaten der Sternpunkte entsprechend transformiert und automatisch angefahren werden können. Die Messung der Spurpunkte beginnt in der Bildmitte. Für den Operateur bleibt in dieser Phase nur die Entscheidung, ob er den jeweils angefahrenen Sternpunkt messen will oder nicht. Durch spezielle Tasten in unmittelbarer Nähe des Joysticks kann er einen einzelnen Spurpunkt oder den ganzen Stern überspringen und den nächsten anfahren lassen. Zur Auslösung und Registrierung der Messung muss er lediglich die Fusstaste betätigen. Die Punktnumerierung

besorgt der Rechner. Jeder gemessene Stern wird auf dem Bildschirm als Punkt dargestellt, damit der Operateur jederzeit die Anzahl der bereits gemessenen Sterne und deren Verteilung überblicken kann.

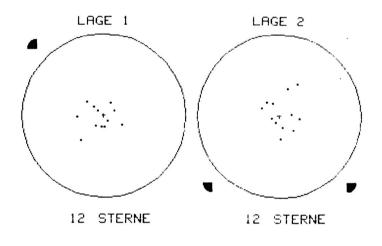
Zur Vereinfachung und Beschleunigung stehen ihm weitere Möglichkeiten zur Verfügung, die automatische Positionierung zu beeinflussen: Er kann die maximale Magnitude der Sterne auf einen bestimmten Wert festlegen und/ oder einzelne Bildquadranten von der Autopositionierung ausschliessen. Sterne, die unter eine oder mehrere der genannten Restriktionen fallen, werden in der Folge übersprungen. Nach Beendigung der ersten Komparatorlage wird der Film auf der Glasplatte um 180° gedreht und der Messvorgang wiederholt. Nach der Messung der ersten zwei Rahmenmarken ermittelt das Programm die Transformationsparameter zur Umrechnung des bereits gemessenen Datensatzes auf die gedrehte Lage und fährt sämtliche Punkte nochmals an. Die Anzeige auf dem Bildschirm erfolgt diesmal rückläufig, indem jeder zum zweiten Mal gemessene Stern auf dem Bildschirm ausgelöscht wird und somit nur die noch zu messenden Sterne auf dem Bildschirm sichtbar sind.

Nach Beendigung der Messung werden die Messdaten ausgedruckt und, zusammen mit den im Feld erhobenen Daten so auf Diskette abgespeichert, dass sie nach dem Übertrag zum Rechenzentrum vom Auswerteprogramm direkt eingelesen werden können. Die Messungen der zweiten Komparatorlage werden mittels Helmerttransformation auf die erste Lage transformiert und als Zweitmessung abgespeichert. Auf Grund der sich ergebenden Klaffungen berechnet das Programm die erreichte Messgenauigkeit, die zusammen mit der benötigten Messzeit ebenfalls protokolliert wird. Als Hilfsmittel bei der Beurteilung der definitiven Resultate wird zudem eine graphische Darstellung der Sternverteilung ausgedruckt (Abbildung 20). Die Anzahl der zu messenden Sterne beträgt in der Regel 12 bis 14 möglichst innerhalb eines kleinen Kreises um die Bildmitte gruppiert. Infolge schlechter atmosphärischer Bedingungen bei der Aufnahme kann es aber vorkommen, dass diese Forderung nicht erfüllt wird, und nur wenig, über das ganze Bild verteilte Sterne ausmessbar sind. Die minimale Anzahl Sterne liegt bei ca. 5. Allerdings sind bei solchen Verhältnissen unbedingt sämtliche verfügbaren Filme auszumessen, da die einzelnen Resultate eine grössere Varianz aufweisen als im Normalfall, wo es durchaus genügt, von den üblicherweise 6 belichteten und entwickelten Aufnahmen deren 4 auszumessen.

Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Operateure beim Ausmessvorgang haben ergeben, dass das Resultat sehr stabil ist, und sich nur im Bereich von Hundertstel Bogensekunden äussert, und zwar unabhängig davon, ob die Messungen von routinierten oder weniger geübten Operateuren erfolgen. Wie zudem Vergleichsmessungen an der Messmaschine des Astronomischen Instituts der Universität Bern gezeigt haben, ist das Resultat ebensowenig von der Wahl des Messsystems abhängig und ändert sich nur marginal.

Sowohl für projektgebundene Arbeiten, wie auch für Auswertungen im Rahmen von Übungen oder Praktika, bietet dies den Vorteil, dass die Studenten, die in der Regel zum ersten Mal mit dem System arbeiten, auf Anhieb gute Resultate erzielen können. Dazu mag vielleicht auch der Umstand beitragen, dass sich der Stereokomparator in einem klimatisierten Raum befindet, der nur geringen Temperaturschwankungen unterworfen ist, und somit stets ähnliche Verhältnisse bezüglich Temperatur und Luftfeuchte vorherrschen.

Die durchschnittliche Auswertezeit beträgt ca. 25 bis 40 Minuten pro Film. Erfahrungsgemäss beansprucht eine Station mit vier auszumessenden Aufnahmen rund 2.5 Stunden Messaufwand. Verglichen mit einem konventionellen Komparator ohne jegliche Unterstützung, entspricht dies lediglich einem Bruchteil des Arbeitsaufwandes.



FILM - NR. 85091925

Abbildung 20: Darstellung eines Films und der gemessenen Sterne auf dem Hilfsmonitor beim Stereokomparator. Die zwei Kreise entsprechen den beiden Aufnahmelagen der Kamera. Kleine Symbole in Form eines ausgefüllten Viertelskreises zeigen an, dass im entsprechenden Quadranten keine Messungen mehr erfolgen.

3. Einführung in die kombinierte astro-gravimetrische Störkörperinterpretation

3.1 Allgemeines zur Störkörperbestimmung

Störungen im Aufbau der Erdkruste stehen seit langem im Brennpunkt des Interesses vieler Geowissenschaften. Die Geophysik im speziellen hat zuverlässige Methoden entwickelt, mit denen Aussagen über die Struktur der obersten Schichten der Erdkruste gewonnen werden können. Dieses Interesse besteht aber nicht nur von Seiten der Geowissenschaften, die diese Informationen unter anderem für das Studium der grossräumigen Bewegungsvorgänge im Sinne der Plattentektonik benötigen, sondern auch von Seiten verschiedener Wirtschaftskreise, die Lagerstättenerkundung betreiben (z. B. Erdöl-, Kohlen-, Erz- oder Salzindustrie).

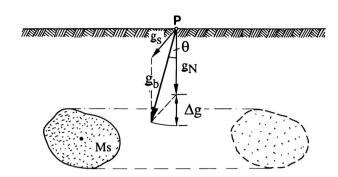
Vom Standpunkt der geodätischen Messtechnik her betrachtet, ist der Schwerevektor eine primäre Signalgrösse der realen Massenverteilung des Erdinnern wie auch der hier besonders interessierenden Erdkruste. Nachdem in den ersten beiden Kapiteln ein Verfahren zur räumlichen Bestimmung dieser Signalgrösse betrachtet und erläutert wurde, dient das folgende Kapitel zur Bereitstellung der theoretischen Grundlagen zur astro- gravimetrischen Störkörperbestimmung, deren praktische Anwendung im Ivreagebiet letztlich einen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet.

Mit dem Einbezug von analytisch erfassten Strukturen zu Reduktionszwecken und mit entsprechenden Rechenprogrammen (z.B. ELMIGER 1969, KLINGELE 1980, und SCHWENDENER 1984) wurde es möglich, gemessene Schwereanomalien und Lotabweichungen von den Einflüssen bekannter Störmassen oder Dichteinhomogenitäten abzuspalten, und damit das Residualfeld der gesuchten Struktur zu berechnen. In den letzten Jahren wurden damit hauptsächlich lokal begrenzte Störungsmassen interpretiert. Auf dem Gebiet der Erdölprospektion entwickelte NETTLETON (1939) gravimetrische Verfahren, die dazu geeignet waren, mit möglichst wenig Messungen entlang oberflächennaher Strukturen den für die Erdölprospektion besonders aufschlussreichen Dichtekontrast zum Umgebungsgestein zu bestimmen.

Der 20 km grosse Nördlinger Ries- Krater in Süddeutschland übte in dieser Hinsicht eine besondere Anziehungskraft aus: REICH und HORRIX (1955), JUNG et al (1965,1967) und KAHLE (1969,1970) benutzten gravimetrische Datensätze zur Interpretationen der Massenstruktur, um Hinweise für die Ursache des Riesereignisses zu erhalten. HEITZ und SOLTAU(1971), GROSSE, RÖDDE und ZIMMERMANN (1971) und TUGLUOGLU(1971)

bearbeiteten Lotabweichungen in diesem Gebiet. Ähnliche Untersuchungen wurden von GERSTBACH (1979,1980,1982,1983,1983) im Wiener Becken und von MÖNIKE (1981) im Rheingraben durchgeführt. Die Gemeinsamkeit dieser Arbeiten besteht darin, dass entweder nur gravimetrische oder nur astrogeodätische Daten, allenfalls durch geologische oder seismische Zusatzinformation ergänzt, in die Interpretation miteinbezogen wurden.

Eine kombinierte Interpretationsmethode mit Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Beobachtungen auf der Basis einer korrekten mathematischen Formulierung fehlte bisher und wurde erstmals im Rahmen des erwähnten Nationalfonds- Projekts Nr. 2.305-0.81 in Angriff genommen. In der vorliegenden Arbeit wird ein Lösungsansatz angewandt, der von WIRTH (1985) am IGP erarbeitet wurde. Dieser Ansatz ermöglicht den Einbezug von Schwere- und von Lotabweichungsbeobachtungen in die Interpretation. Beiden Messverfahren liegt grundsätzlich die gleiche physikalische Wirkung zu Grunde: die räumlichen Änderungen des Schwerevektors bezüglich Richtung und Betrag infolge von Masseninhomogenitäten. Es drängt sich daher auf, beide Informationen zu verwenden. Das in Abbildung 21 dargestellte Beispiel illustriert diesen Sachverhalt. Es zeigt auch das allgemeine Problem der Potentialtheorie; eine bestimmte Massenverteilung erzeugt ein eindeutiges Schwerefeld, das Umkehrproblem hingegen bleibt mehrdeutig, indem beliebig viele Massenverteilungen dasselbe Schwerefeld erzeugen können. Wie eingangs erwähnt, ist der Einbezug weiterer Informationen, die von Seiten der Geophysik (insbesondere von der Seismologie), Geologie, Petrographie und Geomorphologie verfügbar sind, eine unabdingbare Voraussetzung zur gegenseitigen Akzeptanz.



Ms = Störmasse mit Dichtekontrast $\Delta \rho$ (positiv oder negativ)

 g_N = Vektor der Normalschwere

 g_s = Vektor der Schwerestörung infolge Ms

g_b = beobachteter Schwerevektor in P

 θ = beobachtete Lotabweichung

 Δg = beobachtete Schwereanomalie in P : = $|g_b| - |g_N|$

Abbildung 21: Die von der Störmasse Ms erzeugte Schwereanomalie Δg kann im Punkt P beobachtet werden. Die eindeutige Lokalisierung von Ms gelingt nicht, weil Ms sowohl in der linken wie in der rechten Position die selbe Schwereanomalie in P bewirkt. Die Lotabweichung θ vermag aber die Richtung zur Störmasse zu bestimmen. Dieses Beispiel ist zwar nicht repräsentativ, weil stets mehrere Messungen vorliegen, es zeigt aber den potentiellen Informationsgehalt der beiden Beobachtungsmethoden, indem die Kombination der beiden Methoden bei begrenzt vorliegenden Messwerten die Aussagekraft wesentlich zu verbessern gestattet.

3.2 Die Wirkung von Massen auf den Schwerevektor

Der physikalische Zusammenhang zwischen Störmassen und ihren wirkenden Anziehungskräften ist im Gravitationsgesetz begründet, das NEWTON (1685) formulierte:

$$\underline{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \cdot \frac{\underline{r}}{|\underline{r}|}$$
 (3.1)

 \underline{F} ist dabei die wirkende Anziehungskraft, die zwei Massen m_1 und m_2 im Abstand r gegenseitig ausüben (actio=reactio). G ist die Gravitationskonstante, deren Wert anlässlich des IUGG- Kongresses von 1980 in Canberra zu 6.672 · 10^{-11} (± 0.004) m³kg⁻¹s⁻² festgesetzt wurde (MORITZ 1980).

Gemessen wurde diese Naturkonstante erstmals 1798 von Cavendish im Laboratorium mit Hilfe des Drehwaagen- Experimentes. Die Bezeichnung als Konstante ist allerdings umstritten, da verschiedene unabhängige Bestimmungen unterschiedliche Werte für G ergaben. Vermutungen gehen dahin, dass G sowohl zeitlich als auch entfernungsmässig gewissen Veränderungen unterliegt. FISCHBACH et al. (1986) haben das Experiment von Eötvös dahingehend neu bearbeitet und kommen zum Schluss, dass sich die Anziehungskraft nicht nach (3.1) berechnet, sondern von einem nicht- Newton - Effekt begleitet wird:

$$E = -G \frac{m_1 m_2}{r} \cdot (1 + \alpha \cdot e^{-\frac{r}{\lambda}}) \cdot \frac{r}{|r|}$$

Den von der Norm abweichenden Anteil bezeichnen sie als Hyperphoton- Wechselwirkung, einer möglicherweise bisher noch nicht entdeckten schwachen Elementarkraft. Der Einfluss, den diese negativ wirkende, also abstossende Kraft auf den an der Erdoberfläche gemessenen Schwerewert bewirkt, ist nicht genau anzugeben. Abschätzungen auf Grund von vorhandenen Schweredaten haben eine mögliche Grössenordnung von $\Delta g/g \approx (6\pm10)\cdot 10^{-7}$ ergeben. Im Bereich der Hochenergiephysik hingegen führt die Abschätzung zu bedeutend geringeren Werten von $\approx 6\cdot 10^{-9}$ (FISCHBACH et al. 1986) . Diese Aussagen scheinen allerdings noch nicht genügend erhärtet zu sein. Weitere Untersuchungen mit experimentellen Messungen sind geplant.

Die auf einen Körper der Masse $m_2 = 1$ wirkende totale Anziehungskraft \underline{F}_{Total} kann als Summe aller elementar wirkenden Teilkräfte \underline{F}_i berechnet werden (vektorielle Addition):

$$\underline{F}_{\text{Total}} = \sum \underline{F}_{i} \tag{3.2}$$

Zur Berechnung der in einem Punkt P auf der Erdoberfläche wirkenden Anziehungskraft muss gemäss (3.2) die Summe aller Teilkräfte gebildet werden. Zu diesem Zweck ist man gezwungen, die sichtbaren und (soweit bekannt) auch die unsichtbaren Massen in geeignete geometrische Elementarstrukturen zu zerlegen, deren Wirkungen auf den Schwerevektor sich elementar berechnen lassen. Die Genauigkeit der berechneten Anziehungskraft (Schwerebeschleunigung) ist von der Kenntnis der Dichte- und Massenverteilung sowie von der Güte der analytischen Approximation (Digitalisation) abhängig. Gemäss (3.1) vermindert sich die wirkende Kraft einer Masse mit dem Quadrat ihres Abstandes. Dies bedeutet, dass vor allem nahegelegene Massen wirksam sind. Deshalb muss die Digitalisierung der Topographie insbesondere im Nahbereich sehr sorgfältig erfolgen, was sich u.a. durch eine feinere Unterteilung in Elementarstrukturen (Quader) erreichen lässt. Der damit verbundene Aufwand steigt dann allerdings an.

Für praktische Berechnungen wählt man zunächst das Schwerepotential W als Ausgangsgrösse. Es besteht aus zwei Anteilen; dem Gravitationspotential U_g und dem Zentrifugalpotential U_z :

$$W = U_g + U_z \tag{3.3}$$

Das Zentrifugalpotential U_z muss nicht berücksichtigt werden, da es bei der späteren Berücksichtigung von Anomalien im Zusammenhang mit der Interpretation bei der Bildung von Potentialdifferenzen wegfällt. Die Bezeichnung U_g wird daher im folgenden durch U ersetzt. Durch Differentiation des Potentials erhält man :

$$\underline{F} = \text{grad } W$$
 (3.4)

was der Anziehungskraft in (3.2) entspricht. Das Gravitationspotential wird in der Geodäsie üblicherweise positiv eingeführt und entspricht der Arbeit, die vom Gravitationsfeld geleistet wird, wenn eine Einheitsmasse M vom Nullpunkt (∞) zum betrachteten Punkt verschoben wird:

$$U = G \cdot \frac{M}{r} \tag{3.5}$$

M bezeichnet die wirkende Masse, und r deren Abstand vom Aufpunkt. Aus (3.5) ist im weiteren ersichtlich, dass die SI- Einheiten des Potentials [m²s⁻²] sind, also der Arbeit entsprechen, die pro Einheitsmasse aufzubringen ist.

Zur Berechnung des Potentials nichthomogener Massen wie des Erdkörpers muss anstelle von M (Punktmasse) das Integral eingeführt werden

$$U = G \cdot \iiint_{\text{Erde}} \frac{dm}{r}$$
 (3.6)

 $dm = Massenelement = dV \cdot \rho(a)$

 $dV = Volumenelement = dx \cdot dy \cdot dz$

r = Abstand des betrachteten Massenelements vom Aufpunkt

und mit $\rho(a)$ = Dichte des betrachteten Massenelementes als Funktion des Abstandes a vom Zentrum:

$$U = G \cdot \iiint_{Erda} \frac{\rho(a)}{r} dV \qquad (3.7)$$

Diese Darstellung bestätigt die eingangs erwähnten Schwierigkeiten bezüglich der realen Dichteverteilung $\rho(a) = \rho(x,y,z)$ und der Geometrie des dazugehörigen Volumens V. Das Störpotential entspricht dem Unterschied zwischen dem Potential W der realen Massenverteilung der Erde und dem Potential U, das sich aus der Normalschwere berechnen lässt (Zahlenwerte für Potential und Normalschwere folgen im Abschnitt 3.2.1).

Wie Abb. 22 zeigt, erfährt der ungestörte Schwerevektor g durch die Präsenz der Störmasse dm sowohl in der Richtung als auch im Betrag eine Änderung. Die Überlagerung von g mit dem Störvektor dg ergibt den resultierenden Schwerevektor gr, der beobachtet werden kann:

$$gr = g + dg (3.8)$$

Der richtungsmässige Unterschied führt zu den Lotabweichungen, der betragsmässige Unterschied zur Schwereanomalie.

Geometrisch lässt sich die Anziehung in einem kartesischen Koordinatensystem, dessen Achsen nach Norden (x), Osten (y) und zum Nadir (z) ausgerichtet sind, folgendermassen darstellen:

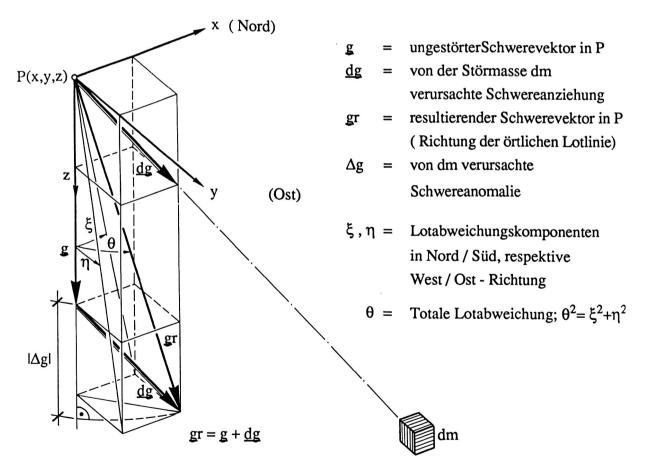


Abbildung 22: Vektorielle Darstellung der von einer Störmasse dm verursachten Anziehung.

3.2.1 Lotabweichungen

Die Definition der Lotabweichung bedarf zunächst der Erläuterung der relevanten Bezugsflächen. Die Ausgangsfläche bildet das Geoid als physikalisch definierte Fläche in mittlerer Meereshöhe mit konstantem Schwerepotential, d. h. $\partial W/\partial x = \partial W/\partial y = 0$. Im Gleichgewichtszustand aller wirkenden Kräfte, also nur dem Vorhandensein der Erdanziehung, ohne Strömungen, Gezeiten, Wind und sonstigen Einflüssen, würde die freie Oberfläche eines idealisierten Ozeans dem Geoid entsprechen (TORGE 1975). Infolge der Massenverteilung innerhalb der Erde ist diese Fläche aber stark gegliedert und lässt sich mathematisch nicht in einem geschlossenen Ausdruck darstellen. Das Geoid ist deshalb zur Beschreibung der Lage eines Punktes wenig geeignet. Einfacher gelingt dies mit Hilfe eines Rotationsellipsoids, dessen Oberfläche auch eine Niveaufläche ist, sich aber analytisch in einer einfacheren Form beschreiben lässt. Das Ellipsoid wird so gewählt, dass seine Abweichungen vom Geoid möglichst minimal sind und es als rechnerische Ersatz-Bezugsfläche dienen kann. Physikalisch muss das Erdellipsoid folgende Bedingungen erfüllen: Es soll

- die gleiche Gesamtmasse,
- das gleiche Potential,
- den gleichen Schwerpunkt und
- die gleiche Umdrehungsgeschwindigkeit

wie die vom Geoid begrenzte Erdmasse aufweisen (KAHLE, 1985). Das aktuelle geodätische Referenzsystem GRS80 ist gemäss IUGG- Beschluss folgendermassen definiert (MORITZ, 1980):

Definierende Konstanten:

- grosse Halbachse a (Aequatorradius) : 6 378 137 [m]

- Geozentrische Gravitations-

konstante GM : $3.986.005 \cdot 10^8$ [m³ s⁻²]

- Potentialkoeffizient J_2 für die

dynamische Abplattung (dynamischer: 108 263 · 10⁻⁸

Formfaktor)

- Winkelgeschwindigkeit ω der Erde : 7 292 115 · 10⁻¹¹ [rad s⁻¹]

Daraus abgeleitete geometrische Grössen:

- kleine Halbachse b (Polradius) : 6 356 752.3141 [m]

- 1. Num. Exzentrizität e² : 0.006 694 380 022 90 - 2. Num. Exzentrizität e² : 0.006 739 496 775 48

- Abplattung f : 0.003 352 810 681 18

- 1/f : 298. 257 222 101

- Mittlerer Radius $R_m = (2a+b)/3$: 6 371 008.7714 [m]

und die entsprechenden physikalischen Grössen:

Normal- Schwerepotential U_0 auf dem Ellipsoid: 6 263 686.0850 · 10^1 [m²s⁻²]

Normalschwere im Äquator $g_{\text{Äqu}}$: 9.780 326 7715 [m s⁻²]

Normalschwere im Pol g_{Pol} : 9.832 186 3685 [m s⁻²]

Mittlere Normalschwere auf dem Ellipsoid g_{m} : 9.797 644 6560 [m s⁻²]

Übrige wichtige Konstanten:

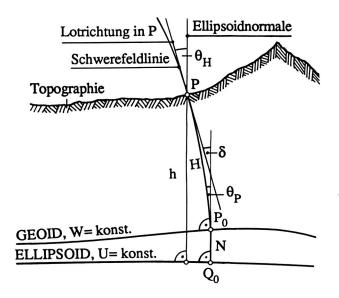
Gravitationskonstante G : $(6.672 \pm 0.004) \cdot 10^{-11}$ [m³kg-¹s-²] Masse der Erde M_E : $(5.974 \pm 0.004) \cdot 10^{24}$ [kg] Mittlere Dichte der Erde ρ_m : 5.515 [g cm-³]

Der Abstand des Geoids vom Ellipsoid wird als Geoidundulation N bezeichnet, deren Amplitude global die Grössenordnung von ca \pm 100 m erreicht. In analoger Weise wird der richtungsmässige Unterschied zwischen der Flächennormalen des Ellipsoids und der physikalischen Lotrichtung, die der Tangente an die Schwerefeldlinie (also der örtlichen Lotrichtung) entspricht, als Lotabweichung θ bezeichnet. Da gemäss Abbildung 23 die Richtung der Schwerefeldlinie im Oberflächenpunkt P nicht mit der entsprechenden Richung im Punkt P_0 auf dem Geoid übereinstimmt, muss zwischen der Oberflächenlotabweichung θ_H nach Helmert und der Lotabweichung θ_H nach Pizetti auf dem Geoid unterschieden werden (Abb. 23). Üblicherweise wird die Lotabweichung θ in zwei Komponenten zerlegt dargestellt :

$$\xi = \Phi - \phi \qquad \text{Nord / Süd - Komponente}$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \Phi \quad \text{West / Ost - Komponente}$$
 (3.9)

 ξ , resp. η sind positiv definiert, wenn der astronomische Zenit nördlich, resp. östlich des ellipsoidischen Zenits liegt (östlich von Greenwich gelegene Stationen haben positiv definierte astronomische Längen).



h = ellipsoidische Höhe

H = orthometrische Höhe
(Länge der Lotlinie P-P₀)

N = Geoidhöhe = h - H

θ_H = Oberflächenlotabweichung nach Helmert

θ_P = Lotabweichung nach Pizetti auf dem Geoid

 δ = Lotkrümmung = θ_H - θ_P

Abbildung 23: Zur Definition der Lotabweichung

 Φ und Λ sind die astronomischen Ortskoordinaten (sog. natürliche Koordinaten). Sie sind mit Methoden der geodätischen Astronomie (s. Kap. 2) bestimmbar. ϕ und λ sind die geodätisch / ellipsoidischen Ortskoordinaten, die man entweder mit terrestrischen Messverfahren oder mit satellitengeodätischen Methoden wie z. B. GPS Empfängern bestimmt.

Neben der direkten Messung von Φ und Λ bestehen weitere Möglichkeiten, die η -Komponente der Lotabweichung zu bestimmen: Durch das Messen von astronomischen Azimuten oder Zenitdistanzen in Triangulationsnetzten. Bei der ersten Methode bildet die Laplace- Gleichung den Ausgangspunkt, die den Unterschied zwischen dem astronomischen Azimut Az_{astr.}und dem ellipsoidischen Azimut Az_{ell.} im Punkt P ausdrückt:

$$Az_{astr.} - Az_{ell.} = \eta \cdot tan\Phi + (\xi \cdot sin Az_{ell.} - \eta \cdot cos Az_{ell.}) \cdot cot z$$
 (3.10)

Für annähernd horizontale Visuren (mit Zenitdistanz $z \cong 90^{\circ}$) fällt der Term mit cot z auf der rechten Seite weg, und die Laplace-Gleichung vereinfacht sich zu :

$$Az_{astr.} - Az_{ell.} = \eta \cdot tan\Phi$$
 (3.11)

Daraus folgt schliesslich die Beziehung

$$\eta = (Az_{astr.} - Az_{ell.}) \cot \Phi, \qquad (3.12)$$

mit der η- Komponente als Funktion der beobachtbaren Azimutdifferenz.

Die zweite Methode geht von der Reduktion gemessener Zenitdistanzen z auf das Ellipsoid aus:

$$z_{ell.} = z_{gem.} + (\xi \cdot \sin Az_{ell.} - \eta \cdot \cos Az_{ell.})$$
 (3.12a)

Durch den Einbau dieses Korrekturterms in die Beobachtungsgleichungen genügend überbestimmter Triangulationsnetze, sind die Komponenten ξ und η auf Stationen ohne astronomische Beobachtungen im Zuge einer vermittelnden Ausgleichung berechenbar (KOBOLD 1951, GLEINSVIK 1960 und WUNDERLIN 1966). Infolge der reduzierten Genauigkeit dieser beiden Verfahren spielen sie heute eine eher untergeordnete Rolle und werden in der Praxis kaum mehr angewandt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das natürliche Bezugssystem für die astronomischen Koordinaten (abgesehen von kleinen Änderungen der definierenden Konstanten bei Einbezug neuer Methoden oder neuer Erkenntnisse) weltweit das gleiche ist (also ein Quasi- Inertialsystem darstellt), während dasjenige für die geodätischen Koordinaten von Land zu Land unterschiedlich ist. Dies ist durch den Umstand begründet, dass in jedem Land die Berechnungen auf ein Ellipsoid bezogen sind, das in einem lokalen Referenzpunkt gelagert ist und für das entsprechende Gebiet am besten mit dem Geoid übereinstimmt. Durch Festlegung der Lotrichtung und der Orientierung in diesem Punkt erhält das Referenzellipsoid eine willkürliche räumliche Lagerung. Auf dieses Ellipsoid bezogene Lotabweichungen bezeichnet man daher als relative Lotabweichungen. Nur wenn anstelle des landesweit bestangepassten Ellipsoids ein global bestangepasstes Ellipsoid verwendet wird, spricht man von absoluten Lotabweichungen. Für absolute Lotabweichungen muss daher die Transformation der Projektionskoordinaten (Gebrauchskoordinaten) auf das mittlere Ellipsoid erfolgen.

Für Interpretationen von Lotabweichungen muss diesem Umstand Rechnung getragen werden, insbesondere bei grenzüberschreitenden Projekten, wie z. B. in der Ivrea- Zone, wo die systematischen Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen nach KOBOLD (1938) fast 5 Bogensekunden betragen und zudem ortsabhängig sind. Diese Unterschiede verunmöglichen daher zunächst den direkten Vergleich von schweizerischen und italienischen Lotabweichungen. Erst die Datumstransformation von einem Ellipsoid auf das andere ermöglicht die gegenseitige Kompatibilität, da damit die Lagerungsdifferenzen in den Bezugspunkten berücksichtigt werden (HEISKANEN, MORITZ, 1967). Ferner ist der als Regionalfeld bezeichnete systematische Anteil von beobachteten Lotabweichungen vor einer Interpretation rechnerisch zu subtrahieren, um Enflüsse von tiefen oder entfernt gelegenen Massenstörungen auszugleichen, die die Messungen in einem lokalen Einzugsgebiet mehr oder weniger konstant beeinflussen. Dieses Regionalfeld kann zumindest teilweise auch als

Kippung des verwendeten Referenzellipsoids gegenüber dem mittleren Erdellipsoid, unter Beibehaltung der azimutalen Ausrichtung, gedeutet werden. Dasselbe gilt auch für die im folgenden Abschnitt behandelten Schwereanomalien, die durch Umtransformation auf ein anderes Bezugsellipsoid eine systematische Änderung erfahren. Die berechneten Lotabweichungen erhält man aus der Summe aller Anziehungskräfte gemäss (3.2). Dabei wird der Schwerevektor in der Regel in die einzelnen Komponenten U_x und U_y zerlegt :

$$U_x = \frac{\partial U}{\partial x}$$
 ; $U_y = \frac{\partial U}{\partial y}$ (3.13)

Aus diesen Horizontalkomponenten erhält man schliesslich die Komponenten der Lotabweichung, indem man sie zum Schwerevektor g in Beziehung setzt:

$$\xi^{["]} = -Rho^{["]} \cdot \frac{U_x}{g} \quad \text{und} \quad \eta^{["]} = -Rho^{["]} \cdot \frac{U_y}{g}$$
mit $Rho^{["]} = \frac{180 \cdot 3600}{\pi} = 206264.806247^{["]}$
und $g = Normalschwere.$ (3.14)

Bei diesen Berechnungen kann für g ein mittlerer Wert von 9.807 [m s⁻²] ohne Genauigkeitsverlust eingesetzt werden

3.2.2 Schwereanomalien

Als Schwereanomalie im Oberflächenpunkt P wird der Unterschied der Beträge der gemessenen Schwere $g(P_0)$ im Punkt P_0 auf dem Geoid und der berechneten Normalschwere $g_{Norm}(Q_0)$ im Punkt Q_0 auf dem Ellipsoid bezeichnet:

$$\Delta g = g(P_0) - g_{Norm}(Q_0) \tag{3.15}$$

Die Normalschwere ist breitenabhängig und berechnet sich nach der Fomel von SOMIGLIANA, die 1980 von der IUGG als gültig angenommen wurde (MORITZ 1980):

$$g_{Norm}(\varphi) = g_{\ddot{A}qu} \cdot \frac{1 + k \cdot \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$
 (3.16)

 φ = geographisch- ellipsoidische Breite

$$k = \frac{b \cdot g_{Pol}}{a \cdot g_{\ddot{A}qu}} - 1 = \frac{\sqrt{a^2 (1 - e^2)} \cdot g_{Pol}}{a \cdot g_{\ddot{A}qu}} = 1.931 851 353 \cdot 10^{-3}$$

 e^2 = erste numerische Exzentrizität = 0.006 694 380 022 90

Bei der Bestimmung der gemessenen Schwere $g(P_0)$ im Punkt P_0 auf dem Geoid begegnet uns eine Schwierigkeit: Da das Geoid im Kontinentalbereich nicht direkt zugänglich ist, lässt sich die Schwere auch nicht direkt auf dem Geoid messen. Ausgehend von der im Oberflächenpunkt gemessenen Schwere muss deshalb der Einfluss der Massenverteilung über dem Geoid entlang dem Höhenunterschied h zwischen P und P_0 weggerechnet (reduziert) werden. Wie im Kapitel 6 ausgeführt ist, besteht diese Reduktionsrechnung aus mehreren Schritten. Bei vollständiger Reduktion aller ausserhalb des Geoids gelegenen Massenanteile erhält man sog. Bouguersche Schwereanomalien Δg_{Boug} . Diese Schwereanomalien sind zumindest im Flachland gut interpolierbar und eignen sich für die Interpretation von Massenstörungen, hingegen sind sie für geodätische Berechnungen weniger gut geeignet, da mit der Reduktion aller Massenanteile das Geoid in das sog. Cogeoid (compensated geoid) überführt wird (HEISKANEN, MORITZ, 1967). Der als indirekte Effekt bezeichnete Unterschied müsste daher speziell berücksichtigt werden.

Für die Geoidberechnung eignen sich besser die Freiluftanomalien $\Delta g_{free\ air}$, bei denen lediglich die durch die Stationshöhe h bewirkte Schwereänderung dg = h· $\partial g/\partial h$ berücksichtigt wird, und die Wirkung der Bouguerplatte und die Geländewirkung nicht wegreduziert werden. Der Nachteil der Freiluftanomalien besteht in der erschwerten Interpolierbarkeit, was bei der Geoidberechnung nach STOKES vor allem in Gebieten mit grossen Höhenunterschieden und geringer Stationsdichte Probleme mit sich bringt. Das Problem besteht hauptsächlich darin, aus heterogen verteilten und in unterschiedlichen Höhen gemessenen Punktwerten für eine gewisse Gebietseinteilung repräsentative Schwerewerte zu berechnen.

Eine weitere Schwereanomalie erhält man bei zusätzlicher Berücksichtigung der Massenverteilung im Kontinentalgebiet unter Zugrundelegung eines isostatisch kompensierten Erdmodells. Die **isostatischen Schwereanomalien** Δg_{Iso} berechnen sich aus der Überlagerung der Bouguer'schen Schwereanomalie und der Wirkung der isostatischen Kompensation. Sie werden häufig in der Geophysik benutzt, um für geodynamische Untersuchungen Hinweise auf die tektonischen und hydrostatischen Verhältnisse zu liefern (KAHLE et al., 1975; KISSLING, 1980). Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit benutzten Schwereanomalien bildeten die Bougueranomalien Δg_{Boug} die Ausgangsgrösse. Die Darstellung weiterer Reduktionen ist Gegenstand des sechsten Kapitels.

3.3 Formeln zur Berechnung der Anziehung geometrisch definierter Körper

3.3.1 Anziehung eines Quaders

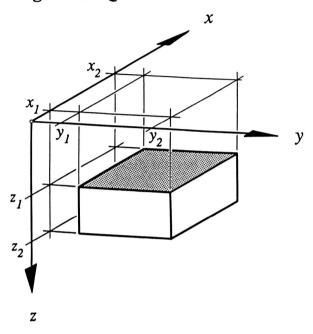


Abbildung 24: Anlage des lokalen kartesischen Koordinatensystems beim Quader. Die Quaderkanten verlaufen parallel zu den Koordinatenachsen, also nach Norden (x- Achse), Osten (y- Achse) und in Richtung der Lotlinie (z- Achse). Die nachstehend aufgeführten Formeln sind damit auch im System der Landeskoordinaten gültig, sofern die Richtung der z- Achse bei der Quaderhöhe entsprechend berücksichtigt wird.

In einem kartesischen Koordinatensystem gelten für das Gravitationspotential $U_g = U$ eines Quaders, dessen Kanten gemäss Abb. 24 parallel zu den Koordinatenachsen ausgerichtet sind, folgende Ausdrücke:

$$U = G \cdot \rho \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dx \, dy \, dz}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$
 (3.17)

wobei dx dy dz = dm (Massenelement) und $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$

Die Differentiation des Potentials in Richtung der Koordinatenachsen ergibt die 3 Komponenten der Anziehung (im Gegensatz zu MADER (1951), der die Vorzeichen negativ ansetzt, werden sie hier positiv eingeführt, mit der Begründung, dass die Anziehung positiv sein soll, wenn sie in der Richtung der positiv definierten Achse wirkt).

$$U_{x} = \frac{\partial U}{\partial x} = G \cdot \rho \int_{x_{1}}^{x_{2}} \int_{y_{1}}^{y_{2}} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \frac{x \cdot dx \, dy \, dz}{\sqrt{(x^{2} + y^{2} + z^{2})^{3}}}$$
(3.18)

$$U_{y} = \frac{\partial U}{\partial y} = G \cdot \rho \int_{x_{1}}^{x_{2}} \int_{y_{1}}^{y_{2}} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \frac{y \cdot dx \, dy \, dz}{\sqrt{(x^{2} + y^{2} + z^{2})^{3}}}$$
(3.19)

$$U_{z} = \frac{\partial U}{\partial z} = G \cdot \rho \int_{x_{1}}^{x_{2}} \int_{y_{1}}^{y_{2}} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \frac{z \cdot dx \, dy \, dz}{\sqrt{(x^{2} + y^{2} + z^{2})^{3}}}$$
(3.20)

Die Auflösung dieser Integration in Richtung der x - Achse führt nach MADER (1951) auf den Ausdruck

$$U_{x} = U_{x}(x,y,z) = -G \cdot \rho \left[z \cdot \ln \left(y + \sqrt{x^{2} + y^{2} + z^{2}} \right) + y \cdot \ln \left(z + \sqrt{x^{2} + y^{2} + z^{2}} \right) \right]$$

$$-x \cdot \arctan \frac{y \cdot z}{x \cdot \sqrt{x^{2} + y^{2} + z^{2}}} \right]_{x_{1}y_{1}z_{1}}^{x_{2}y_{2}z_{2}}$$
(3.21)

Die Formulierung dieser Grundfunktion für jede der 8 Ecken führt bei Berücksichtigung der Integrationsgrenzen zu folgendem Rechenschema:

$$U_{x} = U_{x}(x_{2}, y_{2}, z_{2}) - U_{x}(x_{2}, y_{2}, z_{1}) + U_{x}(x_{2}, y_{1}, z_{1}) - U_{x}(x_{2}, y_{1}, z_{2})$$

$$+ U_{x}(x_{1}, y_{1}, z_{2}) - U_{x}(x_{1}, y_{2}, z_{2}) + U_{x}(x_{1}, y_{2}, z_{1}) - U_{x}(x_{1}, y_{1}, z_{1})$$
(3.22)

Die beiden verbleibenden Komponenten $\mathbf{U}_{\mathbf{y}}$ und $\mathbf{U}_{\mathbf{z}}$ erhält man durch zyklische Vertauschung.

Zur besseren quantitativen Veranschaulichung ist in der folgenden Abbildung Nr. 25 die Schwerestörung dg (entsprechend unserer Anziehung in obigen Formeln) als Funktion der

Entfernung von kubischen Würfeln mit unterschiedlichen Kantenlängen dargestellt, wobei die Würfelmitte jeweils auf der Entfernungsachse liegt.

Wie die Graphik zeigt, steigt die Wirkung mit zunehmendem Abstand des Aufpunktes innerhalb des Würfels praktisch linear an und erreicht bei der Würfelkante den Maximalwert, um dann mit dem Quadrat der Entfernung abzunehmen. Im weiteren fällt auf, dass bei Vergrösserung der Kantenlänge des Würfels um einen konstanten Betrag die entsprechenden Maximalwerte ebenfalls um einen konstanten Betrag zunehmen, und zwar unabhängig vom Würfelvolumen. Die Kurven verdeutlichen ausserdem, dass eine bestimmte Schwerestörung durch verschiedene Körper in unterschiedlichen Entfernungen verursacht sein kann (Umkehrproblem der Potentialtheorie). Die dargestellte Schwerewirkung bezieht sich auf den Vektor vom Aufpunkt zum genäherten Massenschwerpunkt des die Anziehung verursachenden Würfels. Ferner ist zu beachten, dass sich die aus dem Diagramm ermittelte Wirkung auf eine Dichte von 1 g cm⁻³ bezieht. Zur Ermittlung der Wirkung einer topographischen Masse muss deshalb die Wirkung mit der entsprechenden Dichte in [g cm⁻³] multipliziert werden.

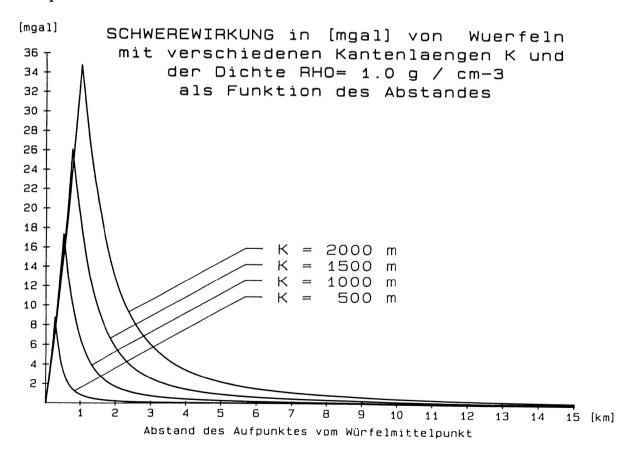


Abbildung 25: Schwerewirkung verschiedener kubischer Würfel, deren Mittelpunkt sich auf der Abstandsachse befindet.

3.3.2 Anziehung eines Prismas mit dreieckigem Querschnitt

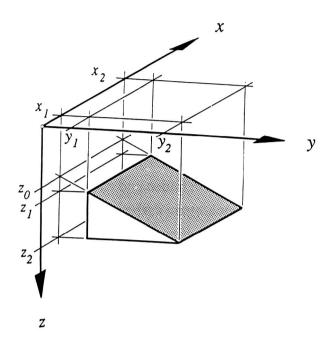


Abbildung 26: Anlage des Koordinatensystems beim Prisma mit dreieckigem Querschnitt. Die Koordinatenachsen verlaufen wie in Abb. 25 parallel zu den Prismenkanten.

Die Formeln für ein Prisma mit dreieckigem Querschnitt sind etwas umfangreicher und deshalb im Anhang wiedergegeben.

3.4 Das mathematische Modell der Störkörperinterpretation

3.4.1 Allgemeine Bemerkungen

Die im Normalfall im Zuge einer Ausgleichung bestimmten Unbekannten einer geodätischen Problemstellung bestimmen die Lösung eindeutig und vollständig. Das Resultat ist durch das Vorhandensein überschüssiger Beobachtungen verifiziert, und die statistische Zuverlässigkeit kann sich, entsprechend der Messanlage und dem erzielten Freiheitsgrad, nur innerhalb eines gewissen Bereichs bewegen. Es existiert genau eine Lösung, für die die verbesserten Beobachtungen ein widerspruchsfreies System bilden und dabei die Bedingung erfüllen, dass die Summe der quadrierten und gewichteten Verbesserungen minimal wird. Bei der Störkörperinterpretation gilt diese Aussage hingegen nicht mehr, da infolge der bereits erwähnten Mehrdeutigkeit des potentialtheoretischen Inversionsproblems prinzipiell beliebig viele Lösungsmöglichkeiten existieren. Diesen Vorbehalt gilt es bei Interpretationen zu beachten; eine aus einem Ausgleichungsverfahren resultierende Lösung sollte daher stets auch aus diesem Blickwinkel betrachtet werden. Trotzdem bietet der Ansatz einer Ausgleichung, deren funktionales Modell nachfolgend erläutert wird, einige Vorteile, und zwar vor allem im Hinblick auf die Kombination der verschiedenartigen Messdaten.

Für die erste geodätische Interpretation von Lotabweichungs- und Schweremessungen im Gebiet der Ivrea Zone übernahm WIRTH (1985) zunächst eine Kompilation der bisherigen Modelle von GURTNER (1978) und KISSLING (1980,1984). Im Rahmen seiner Diplomarbeit erarbeitete er die zum Ansatz einer vermittelnden Ausgleichung notwendige Software LOBOS (Lotabweichungen und Bougueranomalien aus Störkörpern). Die in dieser Arbeit angewandte Methodik stützt sich weitgehend auf diese Vorarbeiten.

Der Einbezug einer flexiblen Ausgleichungsrechnung ist ein sehr brauchbares Werkzeug, um eine hergeleitete Massenverteilung in Bezug auf die Beobachtungen zu verifizieren. Bei LOBOS besteht unter anderem die Möglichkeit, die Unbekannten mit wenigen Änderungen in der Eingabe zu definieren, zu gruppieren oder als bekannt einzuführen. In diesem Sinn liefert die Ausgleichung nicht nur einen Satz von geschätzten Parametern¹⁾, sondern auch die analytische Antwort einer möglichen Lösung auf die eingeführten Beobachtungen. Unter der analytischen Antwort ist dabei die Angabe zu verstehen, wie weit die angenommene Lösung, das heisst die Struktur des betreffenden Modells, mit den Beobachtungen übereinstimmt. Neben den Beobachtungen wird ein Ausgangsmodell des Störkörpers in die Ausgleichung ein-

¹⁾Im Sinne der modernen Schätztheorie

geführt, dessen strukturelle Bausteine den Störkörper geometrisch beschreiben. Die Wahl dieser Bausteine und deren mathematische Handhabungsmöglichkeiten stellen dabei einen wichtigen Punkt bei der Formdefinition des gesamten Störkörpers dar. Der Einbezug der Lotabweichungen, deren Maxima am Rande der Strukturen und nicht im Zentrum auftreten, erzwingt dabei eine streng dreidimensionale Behandlung der Geometrie, da sich grossräumige laterale Krümmungen des Störkörpers, wie sie im Ivrea- Gebiet auftreten, störend auswirken. Eine lediglich zweidimensionale Interpretation in Form der früher oft angewandten Profilbearbeitung ist daher ausgeschlossen. Zudem wird die Berechnung des Regionalfeldes über das ganze Messgebiet erschwert und kann nur lokal, d. h. profilweise erfolgen.

3.4.2 Berechnung von Anziehungen und deren Zuordnung zum Schweizerischen Projektionssystem mit Rotationsmatrizen

Die Darstellung mittels senkrechten Quadern erschien im Ivrea- Gebiet infolge der geneigten Lage des Störkörpers als zu aufwendig und wenig Vorteile bietend, da schiefe Flächen viele abgestufte Quader zur Darstellung erfordern. Wenn man hingegen Quader und Dreiecksprismen zulässt, deren räumliche Orientierung durch Drehungen und Kippungen beliebig ausgerichtet sein dürfen, lässt sich das Problem bedeutend eleganter lösen. Dieser Vorteil ist vor allem bei tiefliegenden Massenanteilen spürbar. Damit wird verhindert, dass die Anzahl der Quader und damit die Anzahl der Unbekannten zu gross wird. Die für Körper in achsparalleler Lage gültigen Formeln müssen vorerst dahingehend erweitert werden, dass sie auch für Körper in allgemeiner Lage gültig sind. Dies lässt sich grundsätzlich durch 3 räumliche Rotationen des im körperparallelen Koordinatensystem¹⁾ berechneten Störvektors erreichen (Abbildung 28). Der im Projektionssystem gegebene Ortsvektor x ist für jeden Aufpunkt (also für jede Messstation) im körperparallelen System auszudrücken. Die 3 Rotationen sind folgende:

- Rotation um die H- Achse im System der Projektionskoordinaten (Drehwinkel α):
 Damit werden die x-H und die x'-H' Ebenen parallel ausgerichtet.
- 2. Rotation um die mitgedrehte x'- Achse (Drehwinkel β): Parallelstellung der y'- und der y"- Achse.
- 3. Rotation um die zweimal mitgedrehte y"- Achse (Drehwinkel γ): diese Rotation bewirkt die Parallelstellung der x"- mit der x"'- sowie der H- mit der H"'-Achse.

¹⁾ Im Schweizerischen Projektionssystem sind die Richtungen der Kordinatenachsen folgendermassen definiert: Die x- Achse weist nach Norden und stimmt im Ursprung in Bern mit der Richtung des geographischen Ortsmeridians überein. Für westlich oder östlich des Ortsmeridians gelegene Punkte stimmt die x- Achse nicht mit der geographischen Nordrichtung überein; der richtungsmässige Unterschied, der durch das Projektionssystem bedingt ist, wird als Meridiankonvergenz bezeichnet und wächst mit zunehmender West/Ost-

Entfernung vom Ursprung, da die Nord/Süd- Netzlinien parallel zum Meridian im Ursprung verlaufen. Die y-Achse steht rechtwinklig auf der x- und der H- Achse und weist nach Osten. Die H- Achse fällt mit der Richtung der Lotlinie im Ursprung zusammen. Durch die Festlegung der Lotabweichung auf einen bestimmten Wert (z. B. Null) im Ursprung wird die räumliche Orientierung der Normalen zum Bezugsellipsoid definiert. Diese an sich willkürliche Festlegung wirkt sich daher auch auf die Lotabweichungen aus (s.a. Abschn. 3.2.1).

Die Definition der Drehwinkel erfolgt gemäss Abb. 27, die zeigt, dass eine Rotation im Uhrzeigersinn, mit Blickrichtung von der Drehachse zum Koordinatenursprung, stets positiv definiert ist:

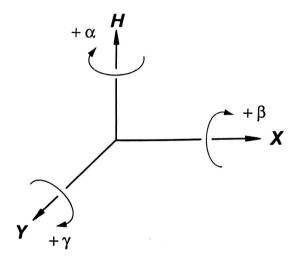


Abbildung 27: Zur Definition der Drehwinkel und des Vorzeichens bei den Rotationen.

Seien R_{α} , R_{β} , R_{γ} die Rotationsmatrizen bezüglich der x-, y- und z- Achse mit den Drehwinkeln α , β und γ . Mit Hilfe der zusammengesetzten Drehmatrizen lässt sich die beschriebene Transformation folgendermassen darstellen:

$$\underline{\mathbf{x}}^{"} = \mathbf{R}_{\gamma} \mathbf{R}_{\beta} \mathbf{R}_{\alpha} \cdot \underline{\mathbf{x}} \tag{3.23}$$

Damit liegt für jeden zu berechnenden Aufpunkt (Messstation) der Ortsvektor im körperparallelen Koordinatensystem vor, was den Gebrauch der Formeln 3.18 - 3.20 ermöglicht.

Da es sich hier um Linkssysteme handelt, muss bei der Höhenkomponente H''' das Vorzeichen gewechselt werden, um das Koordinatensystem in ein Rechtssystem zu transformieren. Nun können die drei Komponenten des Störvektors in diesem System berechnet, und nach der Rücktransformation ins Projektionssystem, komponentenweise in die nachfolgend beschriebene Ausgleichung eingefügt werden.

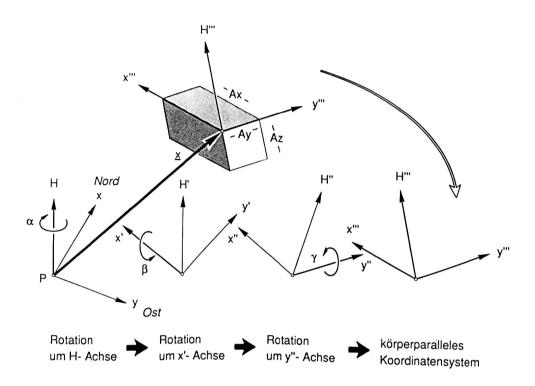


Abbildung 28: Abfolge der Rotationen des Aufpunktvektors x vom System der Projektionskoordinaten ins körperparallele System.

3.4.3 Funktionales Modell

Das funktionale Modell des Ausgleichungsverfahrens besteht in der Formulierung der Beobachtungsgleichungen, die die analytische Verknüpfung zwischen dem Beobachtungsvektor <u>u</u> der unbekannten Parameter ausdrücken:

$$\underline{1} = F(\underline{u}) \tag{3.24}$$

l besteht in unserem Fall aus den 3 beobachteten Komponenten des Residualfeldes:

$$\underline{l}^{T} = (\Delta g_{Res}, \xi_{Res}, \eta_{Res})$$
 (3.25)

(Der Einfachheit halber wird für den weiteren Gebrauch der Residualwerte auf die Indices _{Res} verzichtet, da keine Gefahr der Verwechslung besteht).

Der Vektor $\underline{\mathbf{u}}$ der Unbekannten kann aus folgenden Komponenten bestehen :

$$\underline{u}^{T} = (\Delta g_{0}, \Delta \xi_{0}, \Delta \eta_{0}, \frac{\partial g_{0}}{\partial x}, \frac{\partial g_{0}}{\partial y}, \frac{\partial \xi_{0}}{\partial x}, \frac{\partial \xi_{0}}{\partial y}, \frac{\partial \eta_{0}}{\partial x}, \frac{\partial \eta_{0}}{\partial y}, \dots$$

$$\dots, \Delta \rho_{i}, A_{x_{i}}, A_{y_{i}}, A_{z_{i}}, x_{i}, y_{i}, z_{i}, \alpha_{i}, \beta_{i}, \gamma_{i}) \qquad (3.26)$$

(der Index i bezeichnet die laufende Nummer der Elementarkörper)

Ausser dem Trend, der nur einmal berücksichtigt wird, können die Unbekannten prinzipiell für jeden Körper separat eingeführt werden. Sie haben folgende Bedeutungen:

- Δg_0 , $\Delta \xi_0$, $\Delta \eta_0$, $\partial g_0/\partial x$, $\partial g_0/\partial y$, $\partial \xi_0/\partial x$, $\partial \xi_0/\partial y$, $\partial \eta_0/\partial x$ und $\partial \eta_0/\partial y$ stellen die neun Parameter dar, die den Regionaleffekt des Schwerefeldes in den drei gemessenen Komponenten beschreiben (nähere Details dazu folgen in Kap. 7).
- $\Delta \rho_i$ ist der Dichtekontrast eines einzelnen Elementarkörpers i gegenüber der Dichte ρ_0 des Umgebungsgesteins
- Δρ_i kann auch als Dichtekontrast einer zusammengefassten Gruppe von Elementarkörpern mit einheitlicher (unbekannter) Dichte eingesetzt werden.
- A_X, A_y, A_z l_i sind die Dimensionen eines Elementarkörpers i
- x,y, z i sind die Lagekoordinaten der Bezugsecke des Elementarkörpers i
- α , β , γ | entsprechen den drei Drehwinkeln der räumlichen Orientierung des Elementarkörpers i im Projektionssystem der schweizerischen Landeskoordinaten.

Die Beobachtungsgleichungen kann man damit folgendermassen formulieren :

$$\underline{1}_{gem.} + \underline{v}_1 = F(\underline{u}) \tag{3.27}$$

 \underline{v}_1 = Vektor der Verbesserungen an den Beobachtungen $\underline{l}_{gem.} = \underline{l}$

und $\underline{1} = \underline{1} + \underline{v}_1$ = Vektor der ausgeglichenen Beobachtungen (in neuerer Literatur auch als Schätzwert bezeichnet)

F (\underline{u}) repräsentiert hier die Summe aller geschätzten Wirkungen \overline{w}_i der n Teilkörper :

$$F(\underline{u}) = \underline{T} + \sum_{i=1}^{n} \overline{w}_{i}$$
 (3.28)

mit
$$\overline{w}_i^T = \overline{w}_i^T (\overline{\Delta g}_i, \overline{\Delta \xi}_i, \overline{\Delta \eta}_i)$$
 (3.29)
 $\overline{w}_i^T = \text{Vektor mit den 3 geschätzten Wirkungen des Körpers und}$
 $\underline{T} = \text{Trend des Regionalfeldes}$

Zur Formulierung der Verbesserungsgleichungen wird (3.27) nach den Verbesserungen aufgelöst und (3.5) nach Taylor linearisiert :

$$\underline{\mathbf{v}}_{l} = \mathbf{F}_{0}(\underline{\mathbf{u}}) + \mathbf{T} + \sum_{j=1}^{\mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{w}_{j}}{\partial \mathbf{u}_{j}} d\mathbf{u}_{j} - \underline{\mathbf{1}}$$

$$|\underline{\mathbf{u}}_{j}|$$

$$|\underline{\mathbf{u}_{j}|$$

$$|\underline{\mathbf{u}_{j}|$$

$$|\underline{\mathbf{u}_{j}|$$

$$|\underline{\mathbf{u}_{j}|$$

$$|\underline{\mathbf{u}$$

wobei $F_0(\underline{u}) = \sum_{i=1}^n w_{i_0}$ der Wirkung der als Näherung eingeführten Struktur des Störkörpers entspricht.

Ein besonderes Problem besteht bei der numerischen Bestimmung der Einflusskoeffizienten aj, da hierfür nicht in allen Fällen analytische Ausdrücke vorhanden sind. Zweckmässigerweise werden daher die aj durch numerische Differenzierung berechnet. Für jeden Aufpunkt werden dazu die Wirkungen der einzelnen Elementarkörper jeweils in einer zweiten, um 100 m veränderten, verschobenen oder um 5 Grad gedrehten Lage, neu berechnet, und der resultierende Unterschied durch die Veränderung dividiert. Testrechnungen haben ergeben, dass die so berechneten aj den tatsächlichen Koeffizienten genügend genau entsprechen, sofern die nichtlineare Funktion nicht über zu grosse Bereiche durch die Tangente ersetzt wird. Da aber die Interpretation iterativ erfolgt, fallen die durch die numerische Bestimmung der Koeffizienten verursachten Fehler nicht ins Gewicht.

In Matrizenschreibweise lässt sich die Ausgleichung in die bekannte Form bringen:

$$\underline{\mathbf{v}} = \mathbf{A} \cdot \underline{\mathbf{u}} - \underline{\mathbf{f}} \tag{3.31}$$

wobei A die Matrix mit den Einflusskoeffizienten und \underline{f} den Vektor der Absolutglieder "gemessen minus berechnet" darstellen.

Die Lösung der Ausgleichung erhält man schliesslich durch die Inversion der Normalgleichungsmatrix (A^TPA) :

$$u = (A^{T}PA)^{-1} A^{T} P f$$
 (3.32)

P = Gewichtsmatrix

Der Ausgleichungsprozess liefert damit die geometrischen und physikalischen Zielgrössen des Massenmodells sowie deren Genauigkeiten. Die von der Ausgleichung "gewünschten" Veränderungen gilt es, richtig zu interpretieren und konstruktionsmässig in ein neues, verbessertes Modell einzubauen, das im nächsten Interpretationsschritt wiederum in eine Ausgleichung einfliessen kann. Dabei kann man von mehreren Möglichkeiten ausgehen: In einer ersten Variante kann man die Geometrie als bekannt voraussetzen und die Dichtekontraste bestimmen. In einer zweiten Variante kann man die Dichtekontraste festsetzen und Änderungen an der Geometrie zulassen. Auch Kombinationen sind möglich. Ausserdem besteht die Möglichkeit, das Programm flexibel, also nicht nur für Ausgleichungen einzusetzen, sondern auch für die Berechnung der Wirkung von beliebigen Strukturen, was a priori keine Messwerte erfordert und somit einer unbestimmten Auflösung des Gleichungssystems entspricht.

Für die Interpretation erhebt sich dabei jedoch die Frage, wie viele Unbekannte sinnvollerweise einzuführen sind, da die Resultate mit zunehmender Anzahl Unbekannter an Signifikanz verlieren. Daher ist es nicht sinnvoll, alle gesuchten Grössen in einem Durchgang zu berechnen. Die Berücksichtigung von geologischen und geophysikalischen Zusatzangaben, wie zum Beispiel die geologische Karte, die Lage von bekannten Bruchzonen oder seismisch belegte Schichthorizonte müssen hier weiterhelfen.

3.4.4 Stochastisches Modell

Das stochastische Modell beschreibt die Eigenschaften und Hypothesen, die die verwendeten Zufallsvariablen statistisch charakterisieren. Darunter sind in erster Linie die Genauigkeiten, d. h. die mittleren Fehler der Zufallsvariablen, deren Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie allfällig vorhandene Korrelationen zu verstehen.

Die Genauigkeit der Beobachtungen bezieht sich auf die in der Interpretation als Zufallsvariablen eingeführten Residual- Lotabweichungen resp. -Schwereanomalien. Die Auswertungen der Zenitkamera- und Gravimetermessungen liefern zuverlässige Anhaltspunkte über die erreichten Genauigkeiten der an der Oberfläche gemessenen Werte.

Die Genauigkeit der (reduzierten) Residual - Lotabweichungen resp. - Schwereanomalien wird im wesentlichen durch die folgenden Faktoren bestimmt :

- Genauigkeit der Lotrichtungsbestimmungen mit Zenitkamera- Messsystemen. Sie wird vor allem durch die Fehler bei der Zeit-, Libellen- und Filmausmessung sowie durch die Fehler der Sternkataloge bestimmt.
- Genauigkeit der mit Doppler- Empfängern oder mit klassischen Vermessungsverfahren bestimmten geodätischen Koordinaten.
- Genauigkeit der Schweremessungen. Hier wirken sich hauptsächlich die Ablesefehler, Fehler in der Driftkorrektur (Nichtlinearitäten, Sprünge) und die instrumentellen Massstabsfehler aus.
- Genauigkeit der topographischen Reduktion. Sie ist einerseits von der Maschenweite und der Güte (d. h. den mittleren Fehlern der Höhen) des digitalen Geländemodells abhängig. Daneben spielen aber auch die Fehler an der verwendeten Reduktionsdichte eine wichtige Rolle. Weitere mögliche Einflüsse von Seiten der numerischen Behandlung wird durch die Verwendung der Quaderformel im Nahbereich vermieden.
- Genauigkeit der Moho- Reduktion. Das Problem bei dieser langwellig wirkenden Trennfläche besteht einerseits im Dichtekontrast vom Krusten- zum Mantelmaterial und anderseits in der Unsicherheit der Ausgleichstiefe. Die Angabe eines mittleren Fehlers stösst hier auf Schwierigkeiten, da die Moho eher einen systematischen Fehler an den Residuen bewirkt, als einen zufälligen. Eine Änderung der Ausgleichstiefe bewirkt einen Offset über das ganze Messgebiet, und eine Änderung des Dichtekontrastes entspricht einem zum Dichtekontrast proportionalen Massstabsfaktor, der zumindest teilweise durch die Trendabspaltung aufgenommen wird.
- Genauigkeit der Reduktion der Po- Sedimente. Bei dieser ebenfalls langwelligen Anomalie spielt die Reduktionsdichte und vor allem deren Zunahme mit der Tiefe eine entscheidende Rolle.
- Genauigkeit der Reduktion der quartären und tertiären Talfüllungen (Sedimente). Insbesondere die Abschätzung der Sedimentationstiefen sowie wiederum die Dichtekontraste sind bei diesem Reduktionsschritt entscheidend.

- Genauigkeit der Berücksichtigung der Seemassen. Dieser Schritt dürfte die sichersten
 Werte liefern, da die untere Begrenzungsfläche bekannt und zumindest auf der
 Landkarte sichbar ist, und zudem die Amplituden klein bleiben.
- Genauigkeit kleinräumiger, oberflächennaher geologischer Störzonen. Sie ist äusserst schwer im Sinne eines mittleren Fehlers anzugeben, da sie nur lokal wirkt, dabei aber grosse Amplituden erreichen kann, die sich örtlich als systematische Fehler auswirken und zu Fehlinterpretationen führen können.

Zusammenfassend gibt Tabelle 2 eine Übersicht über die geschätzten Fehleranteile :

Fehlerquelle	m(ξ) ["]	m (η) ["]	m (Δg) [mgal]
Genauigkeit der Lotrichtung, respektive der Absolutschwere	0.4	0.6	0.07
Genauigkeit der geodätischen Position	0.1	0.15	0.80
Genauigkeit der topographischen Reduktion	1.0	1.0	1.50
Genauigkeit der Moho- Reduktion	1.0	1.0	3.5
Genauigkeit der Reduktion der Po- Sedimente	0.3	0.3	0.8
Genauigkeiten der Talfüllungen und der Seen			
sind bereits in der topographischen Wirkung			
eingerechnet			
Genauigkeit des Residualfeldes	15	16	4.0 mgal

Tabelle 2: Übersicht über die Fehleranteile der geschätzten Gesamtgenauigkeit der Residualanomalien.

Neben diesen Genauigkeiten wurden die beobachteten Residuen als normalverteilt und statistisch unabhängig, d. h. unkorreliert betrachtet und entsprechend eingeführt, obwohl zwischen den Messgrössen, insbesondere zwischen den Lotabweichungskomponenten ξ und η , Korrelationen vorhanden sind: Die ursprünglich beobachteten Werte stellen gemäss (3.2) die Summe aller wirkenden Elementarkräfte dar. Als Beobachtung interessiert aber nur der vom Störkörper herrührende Anteil. Sämtliche übrigen Einflüsse sind deshalb vom beobachteten Signal abzuspalten. Durch die mehrstufigen Reduktionsrechnungen erhalten die Komponenten funktionale Korrelationen und verlieren dadurch ihre Unabhängigkeit. Die Abschätzung dieser Korrelationen ist aber äusserst schwierig, da sie sich nicht analytisch darstellen lassen. Zudem sind neben den mathematischen auch physikalische Korrelationen vorhanden, die die Messgrössen gegenseitig beeinflussen. Zu diesen physikalischen Abhängigkeiten sind unter anderem folgende verfahrensbedingte Einflüsse zu zählen:

- Einflüsse der Wetterlage, wie zum Beispiel Neigung von Luftschichten, die eine systematische Verfälschung der Zenittrichtung bewirken können.
- Fehler in den Sternkoordinaten Rektaszension und Deklination. Sie können in jeder beliebigen Richtung auftreten und sich somit in Länge und Breite gleichermassen auswirken.
- Dasselbe gilt für fehlerhafte Libelleneich- und Messwerte.
- Eine weitere Abhängigkeit entsteht durch Filmschrumpfung während dem Trocknungsprozess.
- Etwaige kleine Unterschiede in der Ausmessgenauigkeit am Komparator (höhere Genauigkeit quer zur Sternspur als in Richtung derselben) wirken sich in der Regel auf beide Komponenten aus.

Der Entschluss, die Beobachtungen als statistisch unabhängig zu betrachten, kann folgendermassen begründet werden: Eine korrekte quantitative Erfassung der Auto- und Kreuzkorrelationen ist undurchführbar, da sie von einer Reihe von Faktoren abhängen, die sich nicht quantifizieren lassen (z. B. Verwendung unterschiedlicher Zenitkameras, Einfluss von Druck- und Temperaturschwankungen, Wind, Behandlung der Filme beim Trocknungsprozess, etc...). Der daraus folgende Einfluss auf die Resultate der Interpretation darf aber in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden, da die Aussagekraft der Ausgleichung ohnehin geringer ist, als diese vom Ansatz her etwas pragmatische Annahme zu bewirken vermag. Zur Berechnung der Gewichte erhielten die Beobachtungen, auf Grund der im Zuge der Interpretation gewonnenen Erfahrungen, folgende a priori- Genauigkeiten:

$$m(\xi,\eta) = 1.2$$
" und $m(\Delta g) = 4 \text{ mgal}$

4. Die geologische Störzone Ivrea- Verbano

4.1 Beschreibung des Messgebietes : Die Zone "Ivrea- Verbano"

Bereits 1869 wurde die Ivrea- Zone, die ihren Namen von der gleichnamigen Ortschaft am Nordrand der Po- Ebene erhalten hat, als eigenständiger Gesteinszug kartiert. Seit 1905 trägt sie den Namen Zona dioritico - kinzigitico Ivrea - Verbano. Mit Amplituden von ca. 160 mgal (1 mgal = 10⁻⁵ ms⁻²) bewirkt diese Zone neben dem Alpenkörper eine der grössten Schwereanomalien in Mitteleuropa. Die erstmalige Kartierung erfolgte auf Grund geologischer Untersuchungen von GERLACH (1869), FRANCHI (1905) und NOVARESE (1906). Die Ivrea- Zone im geologischen Sinn beginnt etwa in der Gegend der Magadino - Ebene nahe Locarno und erstreckt sich auf einer Breite von 10 bis 15 km gegen Südwesten in Richtung Ivrea - Turin. Sie folgt dabei einem markanten tektonischen Lineament, der Insubrischen Linie (IL), (GANSSER, 1968), die durch einen ca. 1 km breiten Gürtel von Myloniten aus dem Kristallin der Zentralalpen (Sesia- Zone), der Ivrea- Zone und dazwischen aus dem Canavese, gekennzeichnet ist (SCHMID et al., 1987). Vom Veltlin herkommend, wo sie Tonale- Linie genannt wird, erstreckt sich die IL von Bellinzona über Locarno in Richtung Südwesten (wo sie Canavese Linie genannt wird) bis nach Ivrea und trennt den Südalpen/Po-Ebene- Block von den alpinen Decken der Zentralalpen im Norden. Sie ist ein Teil des in Abbildung 29 eingezeichneten periadriatischen Lineaments (ROD, 1980) und bildet die nördliche Begrenzung der Ivrea- Zone. Die südliche Begrenzung der Ivrea- Zone wird im nördlichen Teil durch die Pogallo- Linie, resp. - Bruchzone gebildet (vgl. Abb. 29 und 31), die sich durch einen Gürtel von duktilen Gesteinen auszeichnet, deren Morphologie die erfolgten tektonischen Einwirkungen (relative Hebung und Abdrehung des Ivrea- Körpers gegenüber den Gesteinen des Strona- Ceneri Blocks) belegen (SCHMID et al. 1987). Die äusserst vielfältige und viele Fragen aufwerfende geologische Struktur der Ivrea - Zone und deren Umgebung kann an dieser Stelle nicht detailliert beschrieben werden. Es genügt ein kurzer geophysikalischer Abriss dieser Zone, die durch ausgeprägte Schwereanomalien und magnetische Störungen gekennzeichnet ist. Generell gesehen wird die Schwereanomalie durch den Dichtekontrast der dominanten Gesteinsserien innerhalb des Ivrea- Körpers gegenüber der normalen Krustendichte verursacht. Entsprechend den vorwiegend basischen bis ultrabasischen Gesteinen kann mit gewisser Sicherheit angenommen werden, dass ein Grossteil des Ivrea- Körpers aus Material besteht, das aus der Übergangszone Unterkruste / oberer Mantel oder aus dem oberen Erdmantel stammt. Diese Gesteine weisen herzynisches (voralpines) Alter auf. Dies bedeutet, dass die hochmetamorphen Gesteine vor der alpinen Orogenese in ihrer mineralogischen Komposition aufgebaut wurden.

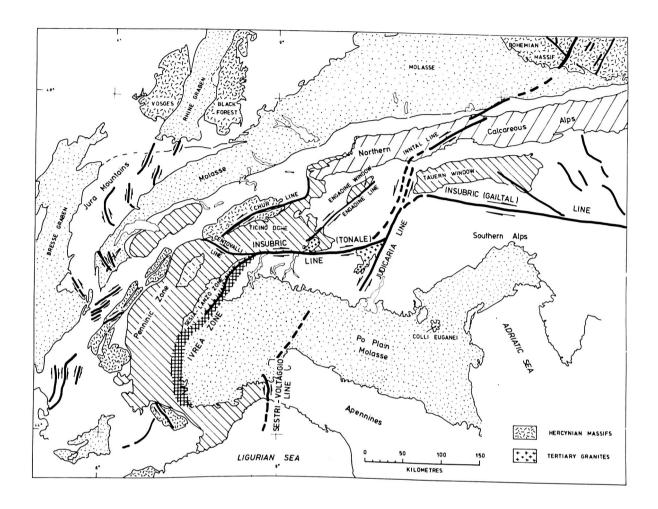


Abbildung 29: Verlauf des periadriatischen Lineaments nach ROD (1980).

Die Aufschlüsse, die in der Zone zu beobachten sind, lassen den Schluss zu, dass die Ivrea-Struktur durch eine nachträgliche (alpine) tektonische Überschiebung des adriatischen Mikrokontinents auf die Eurasische Platte entstanden ist. Dabei dürfte der Ivrea- Körper als ein "Span" der adriatischen Mikroplatte entlang der Insubrischen Linie, als Scherfläche steil nach oben obduziert worden sein (LAUBSCHER, 1984). Diese Entstehungsgeschichte scheinen auch die Peridotit- Linsen zu bestätigen, die bei Finero im Val Cannobina, bei Castellamonte und bei Baldissero aufgeschlossen sind (LENSCH, 1968). Die Dichte ρ dieser aus der Übergangszone Kruste/Mantel stammenden Ultramafitite beträgt nach KISSLING (1980) 3.0 gcm⁻³. Die horizontale Abfolge der Gesteine vom Lago Maggiore, in Richtung Centovalli bzw. Valle Melezza, zur Insubrischen Linie, entspricht somit einem vertikalen Profil durch die Erdkruste bis zumindest in die Übergangszone zum oberen Mantel. Ungeklärt bleibt dabei die

Frage, wie weit sich der Ivrea- Körper nach Süden fortsetzt. Die beobachtete Schwereanomalie deutet jedenfalls auf eine Fortsetzung bis in die Gegend von Cuneo hin (Abb. 30). Der eigentliche Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bezieht sich aber nicht auf die Abgrenzung am südlichen Ende, sondern fokussiert auf die Untersuchung des nordöstlichen Endes, wo der genaue Verlauf des Ivrea- Körpers ebenso unsicher erscheint, wie im Süden (Abb.31).

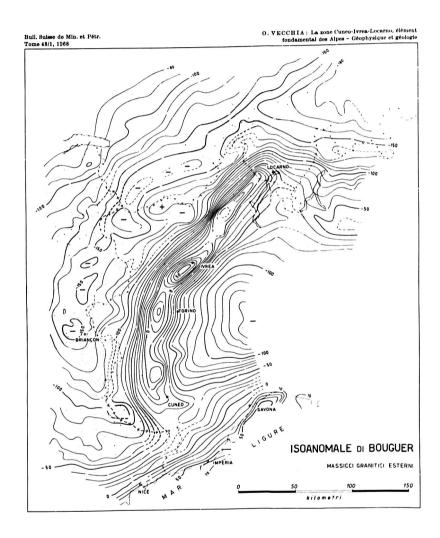


Abbildung 30 : Verlauf der Bouguer - Anomalien im Nordwesten Italiens nach VECCHIA (1968) mit dem dominanten Einfluss der Ivrea - Zone.

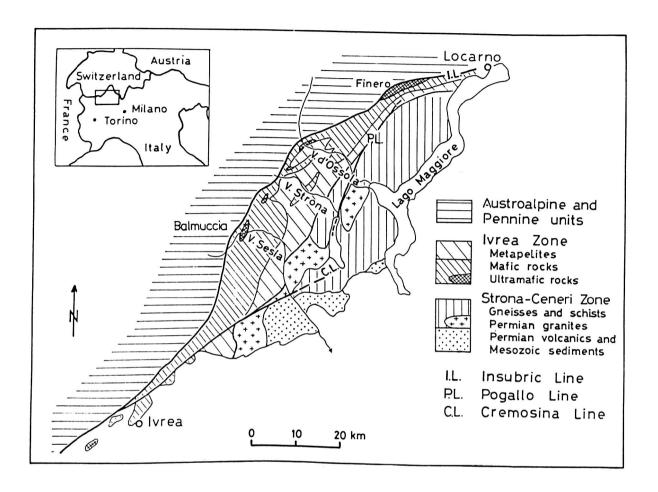


Abbildung 31: Detaillierte Darstellung der tektonischen Lineamente am nördlichen Ende der Ivrea- Zone.

4.2 Bisherige Arbeiten im Ivrea - Gebiet

Aus naheliegenden Gründen waren die Geologen die ersten, die Hinweise zur Existenz der Ivrea- Zone fanden. Da die geophysikalischen Untersuchungsmethoden von der Verfügbarkeit empfindlicher Messgeräte abhängig sind, dauerte es einige Zeit, bis geophysikalische Messungen die Existenz der erwähnten Zone bestätigen konnten (NIGGLI, 1946, WEBER et al., 1949). Die erste Kartierung einer Schwerekarte wurde durch CORON (1963) vorgenommen, die die geophysikalische Existenz der grossräumigen Ivreazone dokumentierte. Ab 1956 dehnten sich die geophysikalischen Aktivitäten auch auf seismische Untersuchungen aus (GROUPE D'ETUDES DES EXPLOSIONS ALPINES, 1963; FUCHS et al., 1963). In den sechziger Jahren wurden diese Messungen intensiviert und weiter ausgedehnt (RESEARCH GROUP OF THE GEOPHYSICAL INSTITUTIONS, 1967).

Dass die Ivrea- Zone im Brennpunkt der Geo- Wissenschaften stand (und immer noch steht), beweist die umfangreiche Literatur: Anlässlich des ersten "Symposiums Ivrea- Verbano", das 1968 in Locarno/ Stresa abgehalten wurde, erschien eine von CARRARO und SCHMID (1968) verfasste Zusammenstellung zur Bibliographie der "Zone Ivrea- Verbano". Darin sind insgesamt 336 einschlägige Literaturangaben ausgewiesen. Erste quantitative seismische und gravimetrische Interpretationen führten zu diesem Zeitpunkt zur Postulierung der bekannten "Vogelkopf"- Form des Ivrea- Körpers (GERMAN RESEARCH GROUP, 1968). Weitere Interpretationen von KAMINSKI und MENZEL (1968), GIESE (1968) und ANSORGE (1968) kamen in etwa zu ähnlichen Resultaten.

Die Vielfalt dieser Untersuchungen belegt den wissenschaftlichen Stellenwert dieses Gebietes, das für das Studium der Krusten- und Mantelstruktur aus vielerlei Hinsicht grosse Bedeutung erlangt hat. In der Folge dieses ersten Symposiums wurden die Messungen auf praktisch alle geophysikalischen Methoden ausgedehnt. Zu den seismischen und gravimetrischen Untersuchungen gesellten sich daher in den siebziger Jahren auch geothermische, paläomagnetische und geomagnetische Messungen. 1978 stand die Zone Ivrea- Verbano ein zweites Mal im Fokus eines Symposiums, das in Varallo abgehalten wurde. Bei dieser Gelegenheit wuchs die Anzahl der Publikationen bereits auf über 400 an (BORIANI und POTENZA, 1978).

Mit der wesentlich verbesserten Kenntnis des Verlaufs der Moho- Diskontinuität (MUELLER et al., 1980) ergaben sich bald neue Gesichtspunkte, die die Grundlage zu neuen Interpretationen bildeten. KISSLING (1980) erforschte den Krustenaufbau und die isostatischen Verhältnisse in der Schweiz. Er musste die Schwereanomalie des Ivrea- Körpers (Abb.34) vom Effekt des gesamten Alpenkörpers (Abb. 32) trennen, um Aussagen über den Krustenaufbau ableiten zu können. Dazu führte er unter anderem eine gravimetrische Engvermessung auf über 100 Stationen im Ivrea- Gebiet durch und realisierte eine neue gravimetrische Interpretation des Ivrea- Körpers. Abb. 33 zeigt den von ihm modellierten Ivreakörper in der Perspektive. Darin präsentiert sich der Ivrea- Körper als eine steil aufgerichtete Gesteinsplatte von ca. 10 km Dicke, die bis in eine Tiefe von 40 km hinabreicht. Diese Platte folgt oberflächlich der Insubrischen Linie nordwestlich des Lago Maggiore und läuft unterhalb der Magadino- Ebene bei Locarno keilförmig aus.

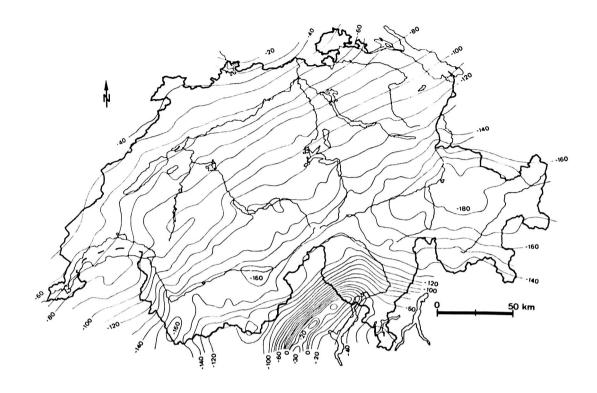


Abbildung 32: Die neue Schwerekarte der Schweiz nach KLINGELE und OLIVIER (1980) Bouguer- Anomalien, Abstand der Isolinien 10 mgal (1 mgal = 10^{-5} ms⁻²).

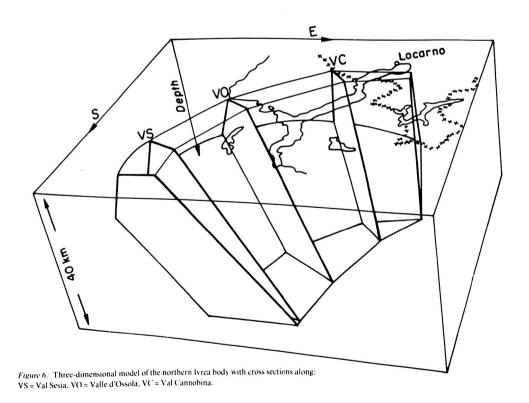


Abbildung 33: Ansicht des Ivrea - Modells nach KISSLING (1984)

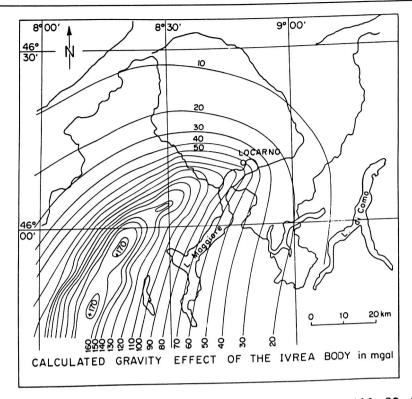


Abbildung 34: Berechneter Effekt der Ivrea - Struktur gemäss Abb. 32, (KISSLING, 1984).

Nach Abzug des Ivrea- Effekts (Abb. 34) verbleibt am nördlichen Ende des Luganersees immer noch eine Restanomalie von ca. 50 mgal, die mit den bisherigen Vorstellungen über die Massenverteilung im Widerspruch steht und deren Ursache bis anhin unklar blieb (Abb. 35).

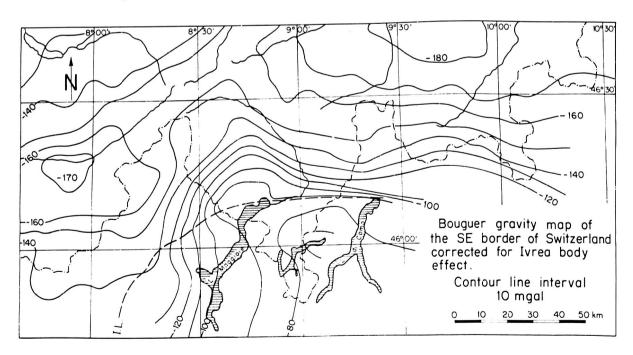


Abbildung 35: Verbleibende Restanomalie im Tessin nach Abzug der Ivrea- Wirkung (aus KISSLING, 1984).

Dass die Arbeiten im Ivrea- Gebiet für die Schweizerische Geophysikalische Kommission ein wichtiges Tätigkeitsfeld bedeuteten, beweist ein Ausschnitt des Vorworts zur Publikation "Geomagnetic and Gravimetric Studies of the Ivrea- Zone" (Editors: J.- J. WAGNER und ST. MUELLER), die 1984 im Rahmen der Reihe "Beiträge zur Geologie der Schweiz, Reihe Geophysik" publiziert wurden: "The Ivrea- Verbano Zone at the southern border of the Western Alps in northern Italy has for some time been considered as representing an important prototype structure which permits insight into the middle and lower continental crust. For that reason there is continued interest worldwide to study this anomalous region in more detail with all available techniques". In dieser einschlägigen Publikation sind die wichtigsten geophysikalischen Beiträge neueren Datums, die den aktuellen Wissensstand bezüglich des Ivrea- Körpers bilden, zusammengefasst. Umfangreiche Literaturangaben führen ausserdem den Interessierten weiter.

Eine erste **geodätische** Interpretation führte WASSOUF (1975) durch. Er benutzte dazu erstmals Lotabweichungen und Schweremessungen aus Schwerekarten. Für die Berechnungen standen ihm insgesamt 127 Lotabweichungs- Komponenten auf 60 schweizerischen und 52 talienischen Stationen zur Verfügung. Die geographisch ungünstige Verteilung der Messstationen sowie Probleme mit uneinheitlichen Datumsreferenzen schränkten die Interpretationsmöglichkeiten allerdings stark ein. Bezogen auf das Messgebiet von 230 x 260 km² ergab sich eine durchschnittliche Stationsdichte von 1 Station pro 750 km², was für zuverlässige Interpretationen an der untersten Grenze liegen dürfte. Auch aus geophysikalischer Hinsicht war das Modell unbefriedigend, weil es unter anderem auf der Hypothese des isostatischen Gleichgewichts im Alpenraum basierte.

Für aktuelle geodätische Berechnungen, insbesondere für die Prädiktion von Lotabweichungen wurde von GURTNER (1978) ein Modell der Moho- Diskontinuität sowie ein Modell des Ivrea- Körpers verwendet. Allerdings lassen sich die beiden Modelle für Reduktionsrechnungen nicht trennen, da das Modell der Moho (s. Abb. 36) auch den Ivrea- Körper bzw. dessen obere Begrenzung mit einschliesst. Die Berücksichtigung des Ivrea- Körpers an sich erfolgt durch nachträgliche Subtraktion (diesmal mit negativem Dichtekontrast) des leichteren Materials, das unterhalb des überhängenden Teils liegt. Während die Prädiktion von Lotabweichungen in den meisten Gebieten der Schweiz auf ca. 1" genau möglich ist, verschlechtert sie sich im Ivrea- Gebiet systematisch.

Da die rechentechnischen Randbedingungen der geodätischen Rechenprogramme bisher noch keine Berücksichtigung des von KISSLING (1980) ausgearbeiteten Modells erlaubten, war es sinnvoll, eine Neuinterpretation zu durchzuführen, welche die verfügbaren geophysikalischen

geophysikalischen und geodätischen Daten berücksichtigt, und für beide Seiten von Nutzen ist. Schliesslich soll damit auch der Weg für eine -noch auszuführende- kombinierte astrogravimetrische Geoidberechnung in der Schweiz geebnet werden.

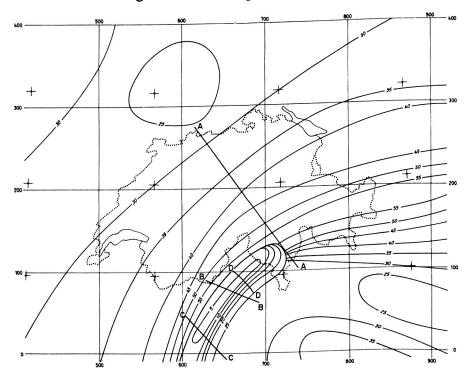


Abbildung 36: Modell der von GURTNER (1978) verwendeten Moho- und Ivrea- Struktur. Es handelt sich um Tiefenlinien mit einem vertikalen Abstand von 5 Kilometern. Die Ivrea - Struktur, die in das Tessin hineinragt, ist entsprechend dem Schnitt B - B in Abbildung 37 an der nördlichen Flanke überhängend. Zur Vereinfachung sind in dieser Karte nur die Linien für die oben liegende Begrenzung eingezeichnet.

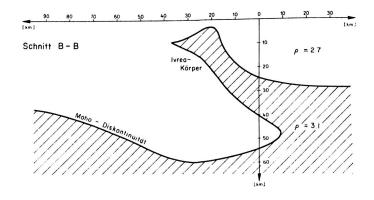


Abbildung 37: Schnitt B - B durch den Ivrea - Körper aus GURTNER (1978), basierend auf seismischen Informationen von CHOUDHURY et al. (1971) und KAHLE et al. (1976).

5. Die Messkampagnen 1983 - 86

5.1 Planung und Vorbereitung

5.1.1 Festlegung der Anzahl Beobachtungsstandorte

Ein wichtiger Planungspunkt der ersten Ivrea- Feldkampagne im Herbst 1983 bestand in der Frage, auf wieviel Stationen und in welchem Einzugsgebiet die Lotrichtung sowie die Schwere zu bestimmen seien. Da diesbezüglich noch keine einschlägigen Erfahrungswerte vorlagen, wurden in der Diplomarbeit von WIRTH (1985) Untersuchungen zur optimalen Stationsanzahl und -Dichte vorgenommen. Diese Arbeit hatte einerseits die Analyse der notwendigen potentialtheoretischen Grundlagen für die Interpretation zum Ziel, anderseits sollten die Simulationsrechnungen darüber Aufschluss geben, welche Beobachtungsanordnung der gesetzten Zielvorstellung unter Einhaltung der zeitlichen und finanziellen Randbedingungen des Projekts am nächsten kam. Die Berechnungen zeigten, dass eine minimale Anzahl von ca. 35 Stationen erforderlich war, um aus den gemessenen Signalgrössen Aussagen über die Struktur des Ivrea- Störkörpers machen zu können. Mit 50 Stationen verbesserte sich die Aussagekraft allerdings merklich, da sich mit mehr Stationen auch das Messgebiet erweitern liess. Dieser Aspekt ist für die Deutung der gemessenen Lotabweichungen wichtig, da tiefreichende Strukturen wie der Ivrea- Körper grosse laterale Wellenlängen in der Lotstörung bewirken.

Mit der Vorgabe, auf zunächst 50 Stationen astronomische und nach Möglichkeit auch gravimetrische Messungen durchzuführen, erfolgten die Vorbereitungen für die ersten Feldmessungen von 1983 (BÜRKI, 1985). Bereits die Analyse der ersten Daten deutete auf die von KISSLING (1984) beschriebene sog. "Tessinanomalie" (vgl. Abb. 35). Daneben zeichneten sich Gebiete erhöhter Gesteinsdichte im östlichen Randgebiet ab, zwischen dem Lago Maggiore und dem Comersee. Dort wies das bisherige "gravimetrische" Massenmodell des Ivrea- Körpers noch ein Massendefizit auf. Mit zusätzlichen Messungen, die den Schwerpunkt eines im Herbst 1984 beim Schweizerischen Nationalfonds eingereichten Folgeprojekts bildeten, sollten daher insbesondere die Lotrichtungsbestimmungen ausgedehnt und damit die Interpretationsgrundlagen verbessert werden. Dank den grossen Anstrengungen des Instituts für Geophysik (KLINGELE et al., 1980, KISSLING, 1980, SCHWENDENER, 1984) stand ausserdem ein umfangreicher gravimetrischer Datensatz zu unserer Verfügung. Diese Messungen bildeten einen wesentlichen Anteil am gesamten Beobachtungsmaterial. Die Notwendigkeit neu auszuführender gravimetrischer Messungen konnte daher auf die neuen Astrostationen beschränkt bleiben, was für die Durchführung der Feldmessungen grosse Vorteile erbrachte.

5.1.2 Die Beschaffung der geodätischen Koordinaten

Aus der Definition der Lotabweichung geht gemäss Darstellung (3.9) hervor, dass die Koordinaten jeweils in zwei verschiedenen Koordinatensystemen zu bestimmen sind: im geodätisch- ellipsoidischen und im astronomischen (natürlichen) System. Bei einem genügend dichten Netz von koordinatenmässig bekannten (Triangulations- oder Polygon-) Punkten spielt die Beschaffung der geodätischen Koordinaten ϕ und λ in der Regel lediglich eine untergeordnete Rolle. Ist hingegen das betreffende Gebiet vermessungstechnisch unzureichend oder uneinheitlich erschlossen, kann es vorkommen, dass die geodätischen Koordinatenbestimmungen wesentlich mehr Aufwand erfordern als die astronomischen Beobachtungen. Da sich das Projektgebiet über die schweizerische Landesgrenze hinaus nach Italien ausdehnt, bedurfte diese Frage einer besonders sorgfältigen Abklärung. Eine erste Rekognoszierung im Feld mit Protokollen der italienischen Landes- und Katastervermessung, die freundlicherweise vom IGMI (\underline{I} stituto \underline{G} eographico \underline{M} ilitare \underline{I} taliano) in Florenz zur Verfügung gestellt wurden, zeigte, dass die Beschaffung zuverlässiger Punktkoordinaten problematisch ist. Abgesehen von der Tatsache, dass die geodätischen Bezugsellipsoide in der Schweiz und in Italien nicht übereinstimmen und dass die Datumsübergange nach KOBOLD (1938) unsicher und zudem ortsabhängig sind, bestanden in Italien kaum Möglichkeiten, die vorhandenen Triangulationspunkte als Beobachtungsstationen für die Zenitkameramessungen zu benützen. Ausserdem waren die Punktversicherungen zum grössten Teil unzugänglich, da es sich um Kirchturmspitzen, Kapellen, Bahnhofsbauten, Wasserreservoirs etc. handelte. Ein Teil der Punkte war unauffindbar, zerstört, oder die Punkte waren zu ungünstig gelegen, z. B. auf Bergspitzen, an steilen Hängen in den Talflanken, zu nahe an den Häusern oder von Bäumen oder Sträuchern umwachsen. Eine für unsere Zwecke zweckmässige Lagebestimmung wäre im besten Fall nur durch unangemessen aufwendige Anschlussmessungen an das bestehende Fixpunktnetz möglich gewesen, für deren Bewältigung ein Mehrfaches an Arbeitsaufwand angefallen wäre als für die astronomischen Beobachtungen.

Ein weiteres Problem bestand in der Verfügbarkeit sowie in der Homogenität der Koordinaten, da sich das Messgebiet von insgesamt mehr als 8000 km² über mehrere Regionen der Lombardei ausdehnt und die Errichtung und der Unterhalt von Fixpunktnetzen vielerorts auf privater Basis erfolgen. Diese Einschränkungen führten schliesslich zum Entschluss, grundsätzlich alle in Italien gelegenen Stationspunkte mit Hilfe der institutseigenen Doppler-Empfänger MX1502 von Magnavox zu bestimmen. Zur Einpassung der Dopplerkoordinaten dieser Punkte ins System der schweizerischen Projektionskoordinaten sollten auch einige schweizerische Punkte mit den Satellitenempfängern bestimmt werden.

5.1.3 Feldrekognoszierung

Im nächsten Schritt erfolgte die Detailplanung der Feldmessungen. Für die definitive Festlegung der auf der Landkarte provisorisch eingetragenen Messpunkte ergaben sich reduzierte Anforderungen an die örtliche Stationswahl; denn die Loslösung von bestehenden Fixpunkten erlaubte es, die Astro- Stationen so im Gelände festzulegen, dass sie mit dem Fahrzeug direkt erreichbar waren. Für die Zenitkameramessungen sollten sich lediglich keine störenden Lichtquellen, wie Strassenlampen, Leuchtreklamen, Scheinwerfer usw. in unmittelbarer Nähe befinden, und der Untergrund sollte eine möglichst stabile Aufstellung gewährleisten. Die vorgesehenen Dopplermessungen erforderten hingegen die Beachtung der Satelliten- Empfangsbedingungen vor Ort, die infolge der tiefen Taleinschnitte nicht überall optimal waren. Dies zwang uns in einigen Fällen zu Punktverlegungen.

Einschränkungen bezüglich der Zufahrten ergaben sich im Gebiet, das durch den Lago Maggiore, das Valle d'
Ossola und das Valle Vigezzo (Fortsezung des Centovalli auf italienischer Seite) begrenzt ist. Dort handelt es
sich um eine sehr wilde Gegend mit äusserst spärlichen Zufahrtsmöglichkeiten. Dies trifft im speziellen auf das
grosse Einzugsgebiet des Valle Grande zu. Aus diesem Grund wurden in dieser Gegend 4 Helikopterstationen
geplant und durchgeführt. Aus Kostengründen erwies sich der Einsatz eines grossen Helikopters am günstigsten.
So konnten gleichzeitig zwei Kameras mitsamt Bedienungsmannschaften und Biwakmaterial an den
vorgesehenen Stationspunkten abgesetzt, am nächsten Morgen zu den nächsten Stationspunkten umgesetzt und
am darauffolgenden Morgen wieder zurückgeholt werden. Für weitere 2 Stationen auf unzugänglichen
Bergspitzen in der Nähe von Bellinzona auf Schweizer Gebiet wurde ebenfalls ein Helikopter eingesetzt. Dies
hat neben dem Vorteil einer besseren messtechnischen Erschliessung den Nachteil, dass infolge des
Nachtflugverbots für Helikopter jeweils nur eine einzige Station pro Nacht gemessen werden kann.

Als Vorbereitung für den praktischen Arbeitsablauf bewährte sich die vorgängige Feldbegehung, in deren Verlauf jede rekognoszierte Station deutlich markiert und dazu ein Versicherungsprotokoll erstellt wurde, das alle wichtigen Angaben zur Punktdefinition und zum Wiederauffinden enthält (Beispiel s. Abb. 38).

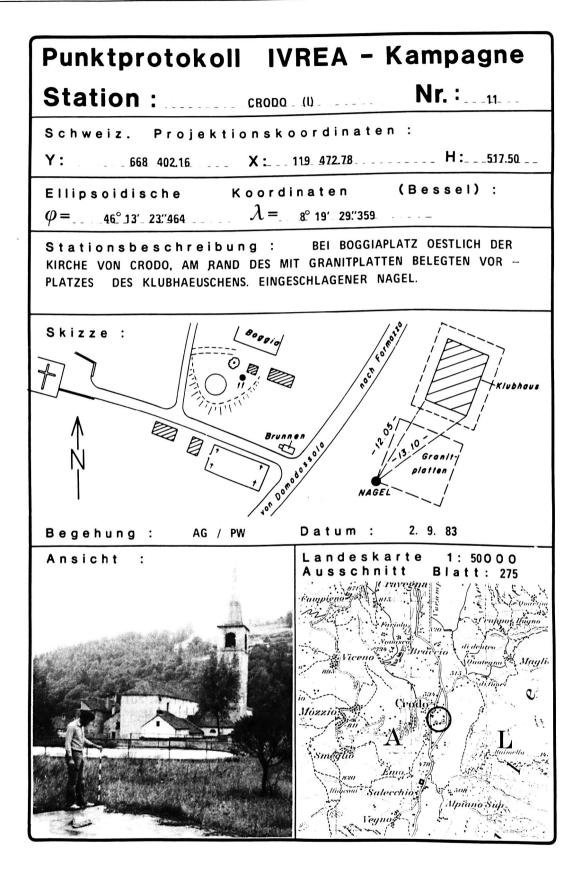


Abbildung 38: Beispiel eines Punktprotokolls für die Station Nr. 11 in der Nähe der Kirche von Crodo im Valle Antigorio (I).

5.2 Durchführung der Feldmessungen

5.2.1 Astronomische Messungen

Als Vorbereitung für den Einsatz im Ivreagebiet erfolgten einige Untersuchungen zur Funktionstüchtigkeit und zum Verhalten der Kamera bei gewissen Umgebungsbedingungen. Ein Mangel offenbarte sich anlässlich der erstenTestmessungen der TZK3 im Jahr 1982 auf dem Jungfraujoch, auf einer Höhe von 3650 m. ü. Meer, als sich infolge Auskühlung die im Kameraunterbau aufgerollten Kabel gegenseitig zu stark beeinträchtigten und sich das Objektiv nicht mehr um 180 Grad drehen liess. Diese Mängel wurden zwischenzeitlich behoben. Zudem machte der Umstand zu schaffen, dass die Kamerafokussierung von der Temperatur des Objektivtubus abhängig ist, insbesondere bei Temperaturen über 15° C. Spezielle Untersuchungen in der Klimakabine des IGP sollten deshalb darüber Aufschluss geben, wie lange die Optik zur Angleichung an die Aussentemperatur benötigt. Es kann in der recht warmen Zone des Messgebietes ohne weiteres vorkommen, dass sich die im Fahrzeug befindliche Kamera- Abdeckhaube auf 50° C erwärmt und diese Wärme auf die Optik übertragen wird. Die grosse Halbwertszeit der Abkühlkurve gemäss Abbildung 39 veranlasste uns, auf eine langwierige Temperaturanpassung im Feld zu verzichten und stattdessen nach einer einfacheren Lösung zu suchen. Diese konnte mit einer im Objektivtubus eingebauten Temperatur- Messonde mit einer digitalen Anzeige gefunden werden (s. auch Abb. 12). Mit Hilfe dieser Einrichtung kann die massgebende Temperatur im Tubus gemessen und die Fokuslänge entsprechend einem Eichdiagramm eingestellt werden.

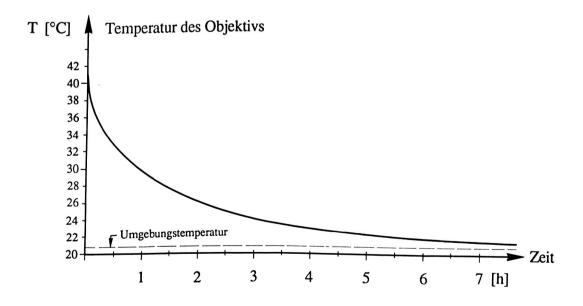


Abbildung 39 : Abkühlkurve der Zenitkamera TZK3 nach einer Erwärmung auf 40°C.

Als weitere Vorbereitungsarbeit erfolgte die Überprüfung der auf der Kamera montierten elektronischen Libellen vom Typ Talyvel II. Die analoge Auswerteelektronik dieser Neigungsmesser arbeitet nach dem Prinzip einer induktiven Brückenschaltung, deren Balance und Verstärkungsfaktor sich im Laufe der Zeit leicht ändern können. Vor den Messkampagnen erfolgte deshalb eine Neuabstimmung der Libellenelektronik. Dazu diente eine spezielle Messanordnung, die aus einem alten gusseisernen Libellenprüfer (Kippbalken) und einem HP Laser- Interferometer (Messauflösung 0.1μ) besteht (Abb. 40). Mit diesem Messprinzip können Neigungsänderungen sehr genau gemessen werden. Eine kurze Fehlerrechnung dokumentiert dies: Bei einer Kippbalkenlänge k von 997 mm und einer Messgenauigkeit dh der mit der Messspindel eingestellten vertikalen Verschiebung von $0.2~\mu$ ergibt sich eine Genauigkeit an der Neigungsänderung des Kippbalkens von:

$$d\alpha = \frac{1}{k} \cdot \rho["] \cdot dh = 0.04$$
 (5.01)

Die Genauigkeit dk der Länge des Kippbalkens k ist unkritisch. Ihr Einfluss auf die Neigungsänderung beträgt bei angenommenen 2 mm lediglich 0.0005". Damit lassen sich die Libellen- Eichfaktoren bestimmen, mit denen die gemessenen Neigungswerte zu multiplizieren sind. Diese Faktoren wirken proportional zur Neigung und bewegen sich im Bereich von 0.95 bis 1.06. Sie können eine Ablesung systematisch verfälschen. Aus diesem Grund sollten Aufnahmen mit Zenitkameras stets bei kleinen Restneigungen (≤ 5") erfolgen. Für die mittlerweile angeschaffte neue Talyvel III- Auswerteelektronik stellt sich dieses Problem nicht mehr, da die elektronische Balance und die Verstärkung automatisch kalibriert werden.

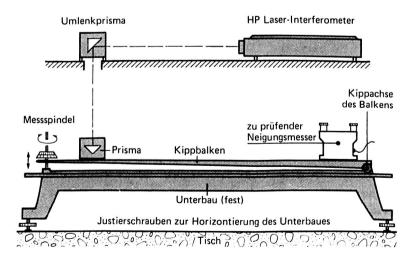


Abbildung 40: Messanordnung zur Überprüfung der elektronischen Libellen.

Als abschliessende Vorbereitungsarbeiten wurden mit der TZK3 sog. Azimutaufnahmen durchgeführt, die die Bestimmung der azimutabhängigen Instrumentenkonstanten zum Ziel hatten. Die entsprechenden Auswirkungen zeigen sich in systematischen Abweichungen der Länge und Breite. Sie betragen grössenordnungsmässig eine Bogensekunde und lassen sich durch Aufnahmen mit unterschiedlicher azimutaler Ausrichtung der Kamera auf einer Station mit bekannter Länge und Breite bestimmen. Sie sind an den ermittelten Lotrichtungen anzubringen und entsprechen einer Korrektur infolge des Nichtzusammenfallens der Drehachse mit der optischen Achse.

Die Versuchsmessungen mit der neuen Steuerelektronik der TZK3 konnten gerade rechtzeitig auf den geplanten Beginn der Messkampagne von 1983 abgeschlossen und das Messsystem der TZK3 in Betrieb genommen werden. Es war von Anfang an klar, dass ein einziges Kamerateam das Messprogramm nicht in der geplanten Frist bewältigen konnte. Es war daher nötig, Kontakte zu ausländischen geodätischen Instituten und Universitäten herzustellen, die ebenfalls über eine oder mehrere Zenitkameras verfügen. Erfreulicherweise waren vier weitere europäische Institute bereit, an den Messkampagnen teilzunehmen (s. Aufstellung unten). Aus Kostengründen wurde die Beobachtungsdauer möglichst knapp, auf zwei, bis maximal drei Wochen pro Kampagne, bemessen. Die Erfahrung zeigte, dass dieser Zeitraum in der Regel genügte, um die für jede Equipe vorgesehenen 12 bis 18 Stationsmessungen durchzuführen, wobei auch das in dieser Region meistens schöne und beständige Herbstwetter einen wichtigen Beitrag lieferte.

Bei besten Bedingungen begannen im September 1983 die astronomischen Feldmessungen mit einer Parallelbeobachtung auf dem RETrig- Triangulationspunkt Mottarone (1490 m.ü.M.) in der Nähe des Lago Maggiore in Italien. Folgende Institutionen beteiligten sich dankenswerterweise mit je einem Messsystem an den Messungen:

- Institut für Erdmessung der Technischen Universität Hannover, BRD (Proff. W. Torge / G. Seeber)
- Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Graz, A (Prof. K. Rinner).
- Institut für Topographie und Geodäsie der Universität Rom, I (Prof. G. Birardi).
- Istituto Geografico Militare Italiano (IGMI), Florenz, I
 (Gen. L. Zanetti).

Der gemeinsame Einsatz aller 5 Kameras auf dieser "Eichstation" diente dem Vergleich der Resultate und der Genauigkeiten der verschiedenen Kamerasysteme. Neben der Station Mottarone erfolgten derartige Vergleichsmessungen auch auf 3 weiteren, mit dem Fahrzeug

leicht erreichbaren Stationen. Die während dieser ersten Messkampagne gesammelten Erfahrungen erleichterten in den folgenden Jahren die Vorbereitungs- und die Feldarbeiten erheblich.

Für das Ivrea- Projekt wurden in 4 Messkampagnen auf insgesamt 126 Stationen astronomische Messungen mit Zenitkameras vorgenommen, wozu ein Aufwand von 81 Tagen genügte. Die durschnittliche Leistung betrug damit 1.6 Stationen pro Nacht, unter Einbezug der Schlechtwetterperioden und der erzwungenen Einzelbeobachtungen (Helikopter, Schiff). Dieser recht hohe Durchschnittswert konnte dank dem einwandfreien Funktionieren aller Kameras während der gesamten Beobachtungszeit sowie dank einigen optimal ausgenützten Beobachtungsnächten mit bis zu 8 Stationsbezügen erreicht werden. Abbildung 41 zeigt die geographische Verteilung der Beobachtungsstationen.

5.2.2 Schweremessungen

Entsprechend den Modellrechnungen war vorgesehen, auf den Astrostationen nicht nur die Richtung, sondern auch den Betrag des Schwerevektors, die Schwerebeschleunigung, zu messen. Aus organisatorischen Gründen war es nicht sinnvoll, diese Messungen im gleichen Arbeitsgang wie die Kameramessungen durchzuführen, da die Gravimetermessungen nach anderen Gesichtspunkten ausgeführt werden müssen. Die Schweremessungen wurden daher separat mit einem Lacoste- Romberg Gravimeter vom Typ G durchgeführt. Als Grundlage dienten einerseits Fixpunkte des Schweizerischen Schweregrundnetzes (publiziert im SGK-Band 25 der Astronomisch-geodätischen Arbeiten der Schweiz, herausgegeben von der Schweizerischen Geodätischen Kommission) sowie drei Basispunkte in Lugano, Cavigliano in der Nähe von Locarno und in Masera bei Domodossola. Die absolute Schwere dieser Basispunkte war auf Grund früherer Anschlussmessungen von KISSLING (1980) und SCHWENDENER (1984) bekannt.

Die Messpunkthöhen spielen bei der Berechnung von Lotabweichungen keine Rolle (von Reduktionsrechnungen einmal abgesehen). Für die Ermittlung von Bouguer-Schwereanomalien müssen sie hingegen bekannt sein, da verschiedene höhenabhängige Terme in die Berechnung derselben eingehen. In vermessungstechnisch unerschlossenen Gebieten, wie z. B. dem Ivrea- Gebiet, können die Stationshöhen auch mit geeichten Präzisionsbarometern mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden, sofern die Messungen mit genügender Sorgfalt erfolgen (SCHWENDENER, 1984). Anderseits kommt der Lagegenauigkeit im Fall der Schwerereduktion keine grosse Bedeutung zu (KLINGELE und

SCHWENDENER, 1984). In unserem Fall erübrigten sich zusätzliche Höhenbestimmungen, da die im nächsten Abschnitt beschriebenen Dopplermessungen dreidimensionale geozentrische Koordinaten liefern, die nach einer Transformation in das System der Projektionskoordinaten auch die Höhe ergeben.

Für die praktische Durchführung der Messungen spielte die Anzahl der notwendigen Grenzübertritte eine grosse Rolle, da es bei der Zollabfertigung leicht zu zeitlichen Verzögerungen kommt. Aus diesem Grund wurden die Schweremessungen in Italien und in der Schweiz im Zuge separater Messreihen durchgeführt. Zur Vereinfachung der Messungen erfolgte eine zusätzliche Bestimmung einer Basisstation in Italien. Die dazu vorgesehene Astrostation Nr. 8 in Pollino, nordöstlich Verbania, oberhalb des Lago Maggiore gelegen, wurde durch mehrfache Anschlussmessungen an die erwähnten Basisstationen angeschlossen. Das Vorhandensein von genügend Basisstationen war in diesem Fall besonders wichtig, da sich die Messungen über ein grosses grosses Gebiet ausdehnten und mit langen und zum Teil mühsamen Anfahrstrecken viel Zeit beansprucht wurde. Die Messungen erfolgten auf allen Astrostationen, mit Ausnahme derjeniger, für die der Zugang nur mit dem Helikopter möglich war. Der zeitliche Aufwand für die Beobachtung von 107 Stationen für die Anschlussmessungen zur Bestimmung des neuen Basispunktes betrug insgesamt 25 Tage, was einer durchschnittlichen Messleistung von 4.3 Stationen pro Tag entsprach.

Für die Interpretation standen somit insgesamt 491 Schweremessungen zur Verfügung: 107 Schweremessungen aus den Ivrea- Kampagnen sowie insgesamt 384 vom Institut für Geophysik durchgeführte Messungen.

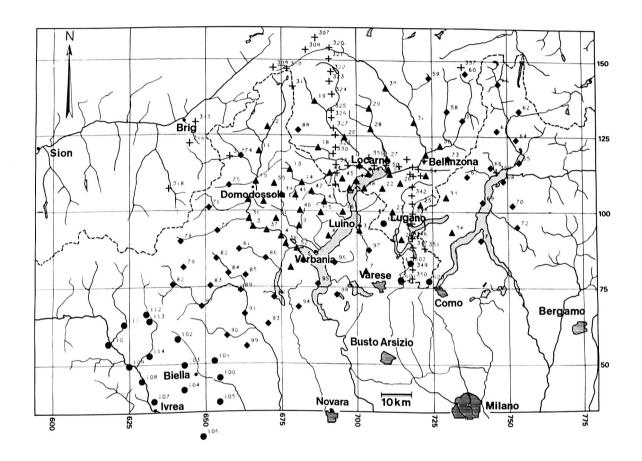
5.2.3 Geodätische Messungen

Ein wichtiger Faktor, der den Aufwand zur geodätischen Vermessung mit Dopplerempfängern massgeblich mitbestimmt, ist die geforderte Genauigkeit und damit die minimal notwendige Beobachtungszeit, respektive die minimale Anzahl von beobachteten Satellitendurchgängen pro Station. Prinzipiell sollten alle Messungen im Ivreagebiet im Translokationsmodus ausgeführt und ausgewertet werden, wobei stets einer der beiden Empfänger des IGP entweder auf der Station der Sternwarte Zimmerwald oder in Zürich- Hönggerberg, auf dem Dach des HPV-Gebäudes, betrieben wurde. Wir beschlossen, auf jeder Station ca. 5 auswertbare Satellitendurchgänge abzuwarten, die von der geräteinternen Software für eine 3D- Lösung akzeptiert wurden. Dies ergab eine mittlere Beobachtungsdauer von ungefähr 12 Stunden. Bei extrem schlechten topographischen Verhältnissen in engen Bergtälern mit ungünstiger Exposition, war es jedoch zum Teil nötig, die Messzeit auf mehr als 24 Stunden auszudehnen.

Mit Ausnahme von 2 Helikopter- Stationen wurden die geodätischen Koordinaten sämtlicher iitalienischer sowie acht zusätzlicher Messpunkte in der Schweiz im Einmannbetrieb mit der Dopplermethode bestimmt. Die Bestimmung der Stationen Nr. 17 (Alpe Corte Vecchia) und Nr. 51 (Piz Proman) erfolgte durch Rückwärtseinschnitte auf Fernziele in der Schweiz. Dazu standen hauptsächlich Triangulationspunkte höherer Ordnung mit permanenter Signalisierung zur Verfügung. Die längste Visurlinie vom Piz Proman betrug 123 km und war dank den hervorragenden Sichtbedingungen mit dem äusserst handlichen Kleintheodoliten DKM1von KERN problemlos messbar. Die astronomischen und gravimetrischen Messungen in der Schweiz bezogen sich allesamt auf bestehende Triangulationspunkte, was die zusätzlichen Arbeiten auf die Einmessung von 2 Exzentrumsvektoren von ca. 150 m Länge beschränkte, da die Zentrumskoordinaten bekannt waren. Die Dopplermessungen erfolgten teilweise parallel zu den astronomischen Messungen, da die Empfänger autonom arbeiten und die Daten automatisch registrieren.

In Abb. 41 sind die 113 im Laufe der Ivrea- Projekte 1983 - 1986 gemessenen AstroStationen sowie vier zusätzliche Stationen aus den NFP20- Messungen von 1987 eingetragen.
Daneben sind auch die von früheren Arbeiten übernommenen Sationen mit astronomischen
Beobachtungen mit kleinen Kreuzen eingetragen. Die Stationsnummern beziehen sich auf die
Verzeichnisse im Anhang. Es handelt sich im wesentlichen um Punkte im Meridian vom
Gotthard und dem Meridian von Lugano, bei denen nur Längenmessungen vorliegen, sowie
um Punkte im Parallel von Locarno, bei denen lediglich Breitenmessungrn erfolgten
(ELMIGER 1975, GURTNER 1978). Der astro- geodätische Datensatz besteht damit aus 117
Zenitkameramessungen, 19 weiteren Messungen mit gemessenen Längen und Breiten, 24
Stationen mit gemessener Breite und 6 Stationen mit gemessener Länge, was ein Total von
166 Stationen mit insgesamt 302 Komponenten der Lotabweichung ergibt.

Die geographische Verteilung der 491 gravimetrischen Stationen geht aus Abb. 42 hervor.



LEGENDE:

- ▲ TZK Messungen 1983/84
- ♦ TZK Messungen 1985
- TZK Messungen 1986/87

Abbildung 41: Geographische Verteilung der astronomischen Messstationen im Ivrea-Gebiet. Die schwarz ausgefüllten Symbole kennzeichnen Zenitkamera- Messungen, mit einem kleinen Kreuz versehene Stationen karkieren Messungen der Schweizerischen Geodätischen Kommission aus früheren Jahren. Bei diesen Stationen wurde meistens nur eine Komponente der Lotrichtung beobachtet: In den Meridianen vom Gotthard und von Lugano nur die Breiten, im Parallel von Locarno nur die Längen.

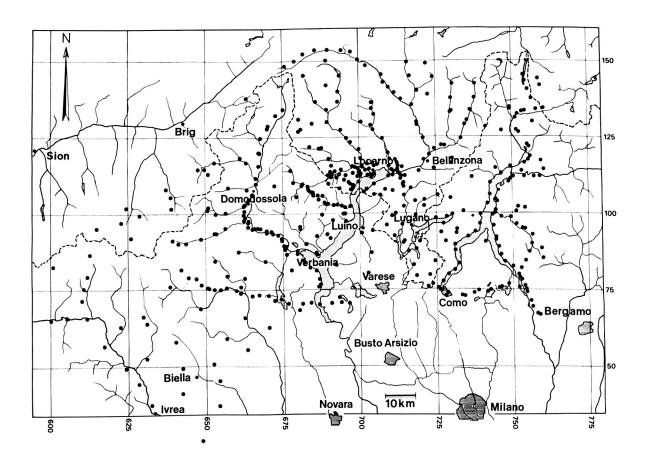


Abbildung 42: Geographische Verteilung der Schwerestationen im Ivrea - Gebiet. Von den insgesamt 491 Stationen stammen 384 aus Arbeiten des Instituts für Geophysik. Im Rahmen der geodätisch - astronomischen Messungen in den Jahren 1983 bis 86 kamen weitere 107, vom IGP vermessene Stationen dazu, die sich auf die Astrostationen gem. Abb. 41 konzentrierten.

5.2.4 Dichtebestimmung von Handstücken

Während den Feldmessungen wurden an verschiedenen Orten des Ivrea- Gebiets Handstücke eingesammelt und im Labor des Geologischen Instituts der ETHZ deren Dichte bestimmt (Abb. 43).

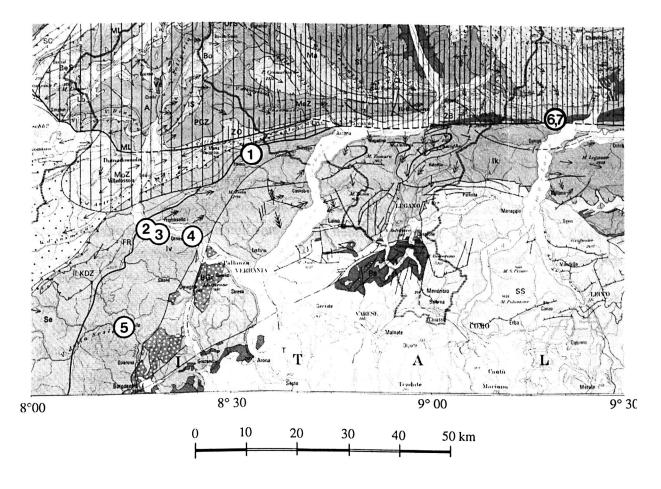


Abbildung 43: Ausschnitt aus der tektonischen Karte der Schweiz (herausgegeben von der Schweizerischen Geologischen Kommission) mit den Entnahmestellen der Handstücke.

Die gemessenen Werte lieferten Hinweise zur Oberflächendichte und deren Variationen innerhalb des Untersuchungsgebietes. Wie Tabelle 2 aufzeigt, wiesen die Handstücke 1 - 5 durchweg höhere Dichten auf, als die angenommene mittlere Krustendichte von 2.67 gcm⁻³, während die bereits ausserhalb der Ivrea- Zone liegenden Proben 6 und 7 keine signifikanten Abweichungen aufwiesen. Diese Resultate stimmen mit den von KISSLING (1980, 1984) ausgeführten umfangreichen Dichtemessungen an Handstücken gut überein, die Werte von bis zu 3.20 gcm⁻³ (für ultramafische Gesteine) erreichen (Abb. 44). Für die häufiger vorkommenden Stronalite und basischen Gesteine hat er Dichtewerte zwischen 2.95 gcm⁻³ und

3.1 gcm⁻³, für die Kinzigite 2.70 - 2.90 gcm⁻³ und für die Schiefer und Gneise, die relativ stark streuen können, einen mittleren Wert von 2.65 gcm⁻³ beobachtet. Nähere Details zu den Dichten folgen im nächsten Abschnitt, der u. a. die Reduktionen behandelt.

Probe Nr.	Entnahmeort	gemessene Dichte [gcm ⁻³]
1	nördl. Finero	2.91
2	Loro	2.86
3	Megolo	3.30
4	Teglia	3.23
5	Valmaggia	3.29
6	Livo, nördlich der IL	2.58
7	Livo, südlich der IL	2.72

Tabelle 3: Vergleich der gemessenen Dichten von ausgewählten Handstücken aus dem Ivrea-Gebiet.

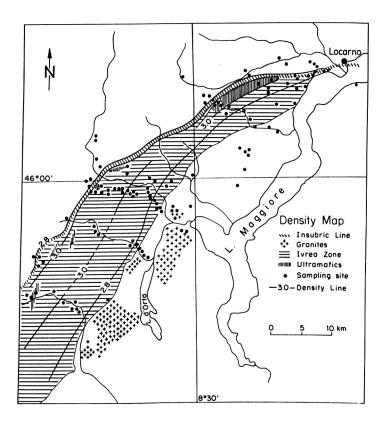


Abbildung 44: Kartierung der Oberflächen- Gesteinsdichte im Ivrea- Gebiet nach KISSLING (1984).

6. Auswertung und Reduktion der Feldmessungen

6.1 Auswertungen

6.1.1 Zenitkamera- Aufnahmen

Als erster Auswerteschritt erfolgte bereits im Feld die Entwicklung der belichteten Filme. Dieser wichtige Arbeitsgang stand in der Regel am Morgen nach jeder Beobachtungsnacht auf dem Programm. Im Büro besteht der nächste Schritt in der Übernahme der von der Elektronik abgespeicherten Daten von den Speicherkarten (vormals Tonbandkassetten) zum PC, der auch zur Steuerung des Komparators dient. Die Auswertung der Ivrea-Filme erfolgte im Anschluss an die Feldkampagnen in den beteiligten Instituten. Am IGP in Zürich erfolgte die Ausmessung mittels des umgebauten Stereokomparators STK1, dessen computergesteuerte Positionierung sich gut bewährte und die Operateure optimal zu unterstützen vermochte (s. Kap. 4). Durch die Rechnerunterstützung wird der Ausmessvorgang stets in der richtigen Abfolge durchgeführt. Auf die von WISSEL (1982) erwähnte Doppelausmessung an den Spurpunkten wurde infolge hoher Korrelationen zwischen zwei sich unmittelbar folgenden Messungen (in der Grössenordnung 0.7) und zugunsten einer Beschleunigung des Messverfahrens verzichtet.

Für die am IGP in Zürich insgesamt rund 550 ausgemessenen Filme ergaben sich schliesslich folgende charakteristische Daten:

Die durchschnittliche Ausmessdauer pro Film bewegt sich zwischen 40 Min. (für einen ungeübten) und ca. 25 Min. für einen geübten Beobachter. Die ausgewiesenen Genauigkeiten einer Einzelmessung variieren im Bereich von ca. 4.5 bis 2.5 Mikron, berechnet aus den Klaffungen aus zwei um 180 Grad gedrehten Messungen. Erfahrungsgemäss spielen Unterschiede in der Ausmessgenauigkeit am Komparator eine geringe Rolle. Für die routinemässige Auswertung hat sich folgendes Prinzip sehr gut bewährt: ca. 2.5 Stunden genügen insgesamt für die Ausmessung von 4 bis 5 Filmen (pro Station). Anschliessend werden die Daten zum Rechenzentrum übertragen und die definitiven Lotrichtungen berechnet. Auf diese Art können mit 2 Operateuren pro Tag problemlos zwei Stationen bearbeitet werden. Da bei den Bildern infolge unterschiedlicher Wetterlagen (z. B. leichte Wolkenschleier oder Dunst) Abbildungsmängel auftreten können, lassen nicht alle Filme die Ausmessung von 12 Sternen zu. Als minimal notwendige Sternanzahl hat sich eine solche von 5 Sternen ergeben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die computergestützte Steuerung des Komparators bewährt hat und die Ausmessarbeiten zügig und ohne grosse physische Belastungen (insbesondere durch erhöhte Konzentration) durchzuführen sind, und zwar auch von Beobachtern, die normalerweise nicht mit dem Umgang solcher Geräte vertraut sind.

Ebenso hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Ausmessgenauigkeiten verschiedener Operateure die erhaltenen Lotrichtungen nur in geringem Masse beeinflussen. Dies unterstreicht einerseits die Tatsache, dass die Ausmessgenauigkeit unkritisch ist und die Zenitkameraauswertungen keinen signifikanten persönlichen Einflüssen unterliegen. Da die Computersteuerung des Stereokomparators zu Beginn der Auswertephase der ersten Ivrea-Messungen noch in Entwicklung war, erfolgte die Ausmessung der ersten Filme auf dem Monokomparator des Astronomischen Instituts der Universtät Bern (AIUB). Diese am AIUB entwickelte Messmaschine ist auf die Ausmessung von Filmen der Schmidtkamera ausgelegt und ebenfalls mit einer automatischen Positionierung ausgerüstet. Die Anpassung der Software besorgte freundlicherweise Dr. W. Gurtner. Der Resultatvergleich der auf beiden Maschinen ausgemessenen Filme ergab keine signifikanten Abweichungen in den ermittelten Lotrichtungen.

6.1.2 Schweremessungen

Die im Feld erhobenen Gravimeter- Ablesewerte enthalten mehrere Effekte, die es zuerst wegzureduzieren gilt, um zu Bezugsschwerewerten in den Beobachtungspunkten zu gelangen. Es sind dies:

- 1. Der gerätespezifische Skalenfaktor, der ähnlich einem Massstabsfaktor bei Distanzmessungen die Ablesungen verzerrt. Er ist von der Ablesestelle an der Skala des Gravimeters abhängig.
- 2. Der Gezeiteneinfluss infolge der stetig wechselnden Konstellation des Sonne-Erde - Mond Systems, der eine quasi- periodische Variation der Schweremessungen bewirkt. Die Amplitude dieser Störung beträgt maximal 0.3 mgal.
- 3. Die Instrumentendrift. Das wichtigste Element der verwendeten Gravimeter La Coste- Romberg ist ein sehr empfindliches Spiralfedersystem. Darauf wird die Schwerebeschleunigung einer kleinen, auf einem einarmigen Hebel montierten Probemasse, übertragen. Das dabei auftretende Drehmoment ist proportional zu den relativen Schwereänderungen, denen das Gravimeter unterliegt. Dieses von der Probemasse bewirkte Drehmoment wird durch das Moment einer mit der Ablesevorrichtung verbundenen, verstellbaren Kompensationsfeder ausgeglichen (Nullmethode). Die Nachwirkungen des elastischen Verhaltens der Feder machen sich als Gerätedrift bemerkbar. Dieser

Drift unterliegt das Gravimeter sowohl im Ruhezustand, wie im Feldbetrieb. Bei unsachgemässer Behandlung des Instrumentes, z. B. während des Transports, können Drift- Sprünge auftreten. Durch geschickte Messanordnungen und zeitlich nicht zu ausgedehnte Schlaufen können solche Unstetigkeiten vermieden werden. Bei vernünftigen Schlaufenabschlüssen kann die Anbringung der Instrumentendrift zeitproportional auf die einzelnen Ablesungen erfolgen. Auf Grund dieser Forderungen geht hervor, dass sich die Schweremessungen nicht mit den astronomischen Messungen durchführen lassen, ohne das Messverfahren und damit die Kontrolle über die Instrumentendrift zu vernachlässigen.

Die Berechnung der Absolutschwere (Bezugsschwere) in den Messpunkten geschieht nach folgendem Ansatz:

$$\begin{array}{lll} g_{abs} = g_{Basis} + (g_{abl} - g_0) \cdot Sf + \Delta t_i \cdot D + \Delta g_{Gez} & (6.01) \\ \\ mit \\ g_{abs} & = & gemessene \ Absolutschwere \ im \ Messpunkt \\ g_{Basis} & = & Absolutschwere \ im \ Basispunkt \\ g_{abl} & = & Gravimeterablesung \ im \ Messpunkt \\ g_0 & = & Gravimeterablesung \ im \ Basispunkt \\ Sf & = & Gerätespezifischer \ Skalenfaktor \\ \Delta t_i & = & Zeitintervall \ zwischen \ der \ Ablesung \ im \ Basispunkt \ und \ im \ Messpunkt \\ D & = & Driftrate \ [mgal/h] \\ \Delta g_{Gez} & = & Gezeitenkorrektur \\ \end{array}$$

Für die praktische Durchführung der Absolutschwere- Berechnungen stand das von PD Dr. E. Klingelé entwickelte CDC- Fortran- Programm AIMO zur Verfügung, das zwischenzeitlich auf einem portablen PC installiert wurde.

6.1.3 Geodätische Messungen

Mit der Anwendung von Dopplermessungen stellten sich grundsätzlich zwei Problemkreise :

- 1. Die Frage nach der Genauigkeit der Dopplerkoordinaten und damit der notwendigen Beobachtungszeit und -Methode.
- Das zweite Problem bestand in der Beantwortung der Frage, wie die geozentrischen Dopplerkoordinaten in das System der Schweizerischen Projektionskoordinaten einzubeziehen sind, das heisst, mit welchen Parametern die Dopplerkoordinaten transformiert werden sollten.

Zur Einsparung von Arbeitsaufwand war für alle Dopplermessungen vorgesehen, nach Möglichkeit im Translokationsmodus zu arbeiten. Dazu wurde stets ein Dopplerempfänger als Masterstation entweder bei der Sternwarte in Zimmerwald oder an der ETH in Zürich betrieben, während das zweite Gerät auf den italienischen Ivrea- Stationen zum Einsatz kam. Die Auswertungen erfolgten in der Regel mit der geräteinternen Software der MX 1502-Empfänger im Translokationsmodus und in einigen Fällen, wo die Masterstation ausser Betrieb war, im single point Modus. Für diese Auswertungen stand das Auswerteprogramm von Dipl. Phys. A. Geiger zur Verfügung.

Nach der Berechnung der geozentrischen Dopplerkoordinaten im World Geodetic System von 1972 (WGS 72), bestand der nächste Schritt in der Umrechnung dieser Werte in das System der schweizerischen Koordinaten. Infolge des gegenüber 1983 erweiterten Messgebietes der Kampagnen von 1985 und 1986 hat es sich gezeigt, dass die ursprünglich verwendeten Transformationsparameter (BÜRKI, 1985) nicht für das gesamte Gebiet Gültigkeit haben (einige Stationen im Südwesten befinden sich rund 70 km ausserhalb des Projektgebiets von 1983). Es war daher nötig, die Transformationen mit besseren Parametern vorzunehmen. Dank der mittlerweile abgeschlossenen SWISSDOC- Kampagne von 1984 (WIGET, GEIGER, 1985) standen deren Resultate gerade rechtzeitig zur Verfügung. Für die Berechnung der 7 Transformationsparameter standen die single- point Messungen auf 16 über die ganze Schweiz verteilten Stationen zur Verfügung.

Die mit dem Programm ATRA (SCHMID, HEGGLI, 1978) durchgeführte räumliche Koordinatentransformation beruhte schliesslich auf folgenden Parametern (WIRTH, MARTI, 1986):

Translationsvektor Δ :

ΔX	=	- 606.18 m	rms = 22.95 m
ΔY	=	45.36 m	rms = 21.28 m
ΔZ	=	- 421.55 m	rms = 22.72 m

Drehwinkel:

α	(X- Achse)	=	- 7.96 ∞	rms = 2 cc
β	(Y- Achse)	=	6.25 cc	rms = 3 cc
γ	(Z- Achse)	=	- 2.50 [∞]	rms = 2 cc

Massstab:

$$M = -6.25 \text{ ppm}$$
 rms = 2.6 ppm

Der gegenüber 1983 wesentlich geringere Massstabsfaktor ($M_{1983} = -12$ ppm) stimmt mit dem aus Laserdistanz- und GPS- Messungen auf der Basislinie Zimmerwald- Monte Generoso resultierenden Faktor von -6.8 ppm sehr gut überein (BÜRKI et al, 1987).

Ausgehend von einem einheitlichen Satz geozentrischer Koordinaten im Schweizer Datum, wurden schliesslich alle Punkte mit dem Programm TRAFO von Dipl. Ing. M. Müller auf das Bessel- Ellipsoid mit Schweizer Datum transformiert.

6.1.4 Abschätzung der erreichten Genauigkeiten

Die Angabe von Genauigkeiten optischer Instrumente im allgemeinen und der transportablen Zenitkamera im speziellen, erfordert einige vorgängige Bemerkungen zu den Begriffen der inneren und äusseren Genauigkeit bei Lotrichtungsbestimmungen.

Unter der **inneren Genauigkeit** ist die Angabe des mittleren Fehlers zu verstehen, der sich aus den Residuen (Verbesserungen an den Beobachtungen) zwischen einer partikulären Lösung R_i eines Messsystems und einer einzelnen Beobachtung l_i berechnen lässt. R_i ist in diesem Fall das Resultat einer Lotrichtungsbestimmung aus der Auswertung eines einzelnen Films, und l_i die Ausmessung eines einzelnen Spurpunktes, bestehend aus einem Koordinatenpaar (x,y) der Komparatormessung. Diese mittlere Fehlerangabe bezieht sich auf innere Zwänge des Messsystems und lässt sich bei TZK- Auswertungen auf Grund der Restklaffungen in jedem gemessenen Spurpunkt berechnen. Die innere Genauigkeit enthält den Grossteil der mechanisch/optischen Fehler (soweit sie sich nicht systematisch auf die Zeitmessung auswirken), die Katalogfehler der Sternpositionen und die Komparator- Messfehler.

Nicht in dieser Fehlerangabe enthalten sind die Einflüsse der sich zwischen Einzelaufnahmen und zwischen Wiederholungsmessungen zu unterschiedlichen Epochen verändernden Atmosphäre, ebenso die systematisch wirkenden Fehler, wie z. B. Verschluss- oder Zeitzeichenverzögerungen oder fehlerhafte Libelleneichwerte. Diese sind in der äusseren oder absoluten Genauigkeit enthalten, die sich korrekterweise nur berechnen lässt, wenn wahre Fehler vorliegen. GESSLER (1975) und WISSEL (1982) haben diese Genauigkeiten untersucht und auf Grund von Vergleichsmessungen mit dem Photozenitrohr des Deutschen Hydrologischen Instituts in Hamburg (DHI) ausgewiesen. Wegen der hohen Genauigkeit von ca. 0.05" dieses Messsystems können beobachtete Differenzen zum DHI als wahre Fehler betrachtet werden.

An dieser Stelle geht es nicht um eine erneute Untersuchung des Fehlerhaushalts von Zenitkameraaufnahmen, sondern vielmehr um die Abschätzung der in den Ivrea-Messkampagnen tatsächlich erzielten Genauigkeiten. Unter Zugrundelegung der Formeln:

$$m_{\Phi} = \sqrt{\frac{[\Phi_i - \overline{\Phi}_i]}{n - s}} \qquad \qquad \Phi_i, \Lambda_i = \text{Breite, L\"{a}nge einer einzelnen}$$

$$\overline{\Phi}_i, \overline{\Lambda}_i = \text{Stationsmittel}$$

$$m_{\Lambda} = \sqrt{\frac{[\Lambda_i - \overline{\Lambda}_i]}{n - s}} \cdot \cos \Phi \qquad \qquad n = \text{totale Anzahl der Aufnahmen}$$

$$s = \text{Anzahl der Stationen}$$

ergab die Auswertung des Ivrea- Datenmaterials folgende Zahlenwerte für die mittleren Fehler einer einzelnen Aufnahme (Film) :

$$m_{\Phi} = 0.33$$
" und $m_{\Lambda} = 0.36$ "

Für das aus normalerweise aus 4 Aufnahmen gebildete Abend- Stationsmittel M resultieren daraus folgende innere Genauigkeiten :

$$M_{\Phi} = 0.17$$
" und $M_{\Lambda} = 0.18$ "

Die im Vergleich dazu vom Auswerteprogramm ausgewiesenen durchschnittlichen mittleren Fehler stimmen mit diesen Angaben gut überein :

$$M_{\Phi} = 0.15$$
" und $M_{\Lambda} = 0.16$ "

Zum Nachweis der äusseren Genauigkeit wurden die auf gemeinsamen Punkten parallel durchgeführten Kalibrationsmessungen aller Kameras, die vorhandenen Doppelmessungen (im Ivrea- Gebiet sind insgesamt 8 Stationen mit der TZK2 und mit der TZK3 gemeinsam beobachtet worden) sowie alle Wiederholungsmessungen mitberücksichtigt. Die sich ergebenden Klaffungen weisen folgende mittlere Fehler aus:

$$M_{\Phi} = 0.31'' \quad \text{und} \quad M_{\Lambda} = 0.45'' \quad (6.02)$$

Diese Genauigkeiten stimmen mit der Aussage von WISSEL (1982, S. 89) sehr gut überein, dass die absolute Genauigkeit einer an einem Abend durchgeführten Lotrichtungsbestimmung besser als eine halbe Bogensekunde ist.

Einschränkend muss hier allerdings vermerkt werden, dass es Situationen geben kann, in denen dies nicht vorbehaltlos übernommen werden darf. Die Erfahrungen mit verschiedenen Wettersituationen haben nämlich gezeigt, dass schnell aufkommende Wetterwechsel das Resultat einer Lotrichtungsbestimmung stark verfälschen können, insbesondere wenn sie mit Luftdruckfronten einhergehen. Es ist deshalb in solchen Situationen ratsam, die Wetterentwicklung und den Radio- Wetterbericht aufmerksam zu verfolgen und auf die eine oder andere Aufnahme zu verzichten.

Interessant ist im weiteren, dass die innere Genauigkeit einer einzelnen Aufnahme ungefähr mit der äusseren Genauigkeit eines Abend- Stationsmittels, beruhend auf der Auswertung von 4 Aufnahmen, übereinstimmt.

Die Genauigkeit der Dopplermessungen kann auf Grund der Vergleiche in den Passpunkten abgeschätzt werden:

Die Kontrolle der Restklaffungen ergab einen Mittelwert für den verbleibenden Differenzvektor von 2.60 m, was dem Zweck der Koordinatenbestimmung für astrogeodätische Anwendungen vollkommen genügt, sind doch die Genauigkeiten der astronomisch bestimmten Koordinaten im Bereich einer halben Bogensekunde. Dies entspricht einer Distanz von rund 15 m.

Die Anwendung der Formeln (3.9) auf die gemessenen Φ , Λ , ϕ und λ ergab damit die gesuchten Oberflächenlotabweichungen ξ und η , bezogen auf das Bessel- Ellipsoid im Schweizer Datum.

Die Auswertung der terrestrischen gemessenen Rückwärtseinschnitte für die beiden Heli-Stationen Nr. 17 (Alpe Corte Vecchio) und Nr. 51 (Piz Proman) ergab folgende mittlere Fehlermasse für die Lageausgleichung:

> Station 17: mx = 3.9 m my = 2.9 mStation 51: mx = 2.2 m my = 1.5 m

Die Genauigkeit der Schweremessungen ist nicht einfach zu erfassen. Das Problem besteht nicht in der Messgenauigkeit, die beim verwendeten Gravimetertyp (Modell G) grössenordnungsmässig $\pm 5\cdot 10^{-7}$ [ms⁻²] beträgt, sondern vielmehr in der Genauigkeit der reduzierten Residual- Anomalien, die letztlich in die Interpretationsrechnungen einfliessen und um Grössenordnungen schlechter als die inneren Messgenauigkeiten sind. Für die Genauigkeit der Residual- Schwereanomalien wurde gemäss den Abschätzungen in Kap. 3 ein Wert von 4 mgal eingesetzt.

6.2 Reduktion der Messwerte

6.2.1 Vorbemerkungen zur Terminologie

Die an der Oberfläche gemessenen Grössen ξ , η und g stellen die 3 Komponenten des in Abb. 22 dargestellten Schwerevektors dar. In diesem Fall wirkt aber nicht nur eine isoliert betrachtete Störmasse, sondern die tatsächliche Massenverteilung des Erdkörpers, die man sich vereinfacht aus lauter mehr oder weniger ausgedehnten Störmassen zusammengesetzt vorstellen kann. Für die isolierte Untersuchung einer ganz bestimmten Formation oder Störung müssen die gemessenen Oberflächenwerte von sämtlichen modellierbaren Einflüssen befreit werden. Dies gilt auch für die Bougueranomalien, obwohl sie bereits vom Einfluss der Topographie reduziert sind. Zur weiteren Abspaltung dieser Effekte müssen auch hier alle analytisch fassbaren Wirkungen abgespalten werden, und zwar im gleichen Sinn wie bei den Lotabweichungen. Die so berechneten Signalgrössen werden als Residual-Schwereanomalie, resp. -Lotabweichung bezeichnet.

Um terminologisch bedingte Unklarheiten mit anderen Publikationen zu vermeiden, werden zunächst einige Begriffe erläutert, die im Zusammenhang mit den nachfolgend beschriebenen Reduktionsschritten und vor allem bei der Interpretation anzutreffen sind:

Insbesondere die in dieser Arbeit oft verwendeten reduzierten Lotabweichungen sind von den bei GURTNER (1978) gleichlautend bezeichneten Grössen zu unterscheiden. Gurtner bezeichnet mit diesem Ausdruck die Differenzen zwischen beobachteten und berechneten Lotabweichungen, während sie hier als beobachtete Lotabweichungen zu verstehen sind, von denen die Wirkungen der bekannten anomalen Massenverteilung subtrahiert worden sind. Korrekterweise müsste man dabei angeben, welche Effekte wegreduziert wurden, oder aber sich auf eine einheitliche Terminologie beziehen. In diesem Sinn sind unter der Bezeichnung Moho/Po- reduzierte Lotabweichungen diejenigen Werte zu verstehen, die aus der Subtraktion aller berechneten Wirkungen vom gemessenen Wert hervorgehen. Sie sind in Abb. 45 oberhalb des Kästchens mit der Bezeichnung Moho/Po- reduz. Lotabw. dargestellt.

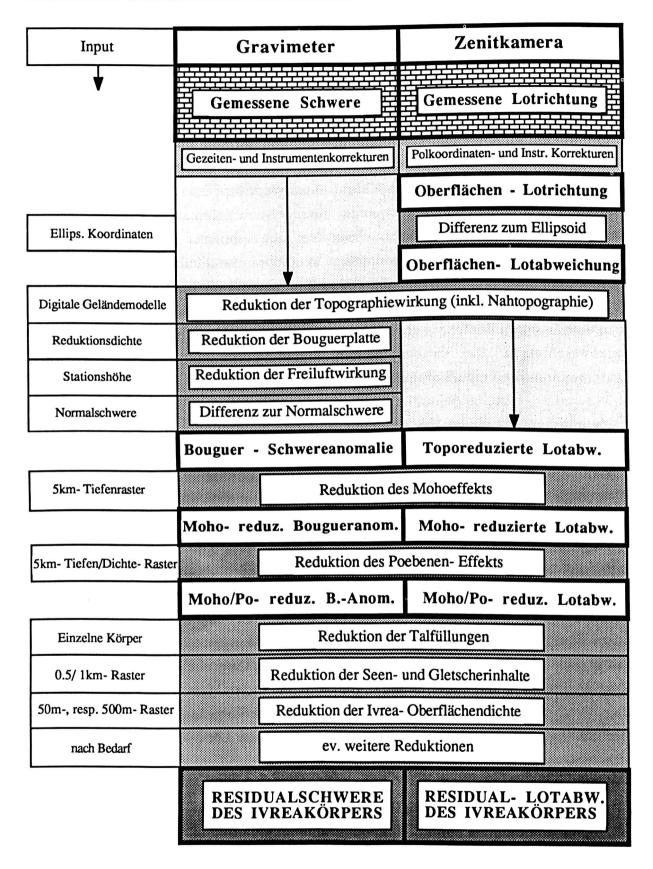


Abbildung 45: Übersicht über die verschiedenen Reduktionsschritte zur Berechnung der Ivreakörper- Residualfelder bei Schwere- und Lotabweichungsmessungen.

Im weiteren muss zur Graphik (45) vermerkt werden, dass dieses Verfahren nur für Interpretationen in der Art der vorliegenden Arbeit gültig ist, und nicht allgemein, wie z. B. für Geoidberechnungen oder für die Berechnung orthometrischer Höhen. Die Berücksichtigung von Lotkrümmungen kann hier entfallen, da im funktionalen Modell der Ausgleichung die Wirkungen der modellierten Störkörper in den Oberflächenpunkten direkt berechnet werden, und nicht in einer mehr oder weniger willkürlich gewählten Bezugsebene, auf die die Beobachtungen vorgängig zu reduzieren sind.

In den folgenden Abschnitten werden die dargestellten Reduktionsschritte einzeln erläutert. Am Schluss folgen graphische Darstellungen der aus den Messungen abgeleiteten Residualfelder; im Anhang sind entsprechende Tabellen aufgelistet.

6.2.2 Topographische Reduktion (Geländereduktion)

Mit der topographischen Reduktion werden alle im Messpunkt wirksamen Anziehungen (in Form von Lotabweichungs- und Schwereanteilen) vom Messwert subtrahiert, die von der geometrischen Beschaffenheit der Erdoberfläche herrühren. Dabei wird die Dichteverteilung der topographischen Massen als homogen betrachtet. Weitere Reduktionen, die auch die Dichteverteilung berücksichtigen, fallen nicht unter die topographische Reduktion. Mit der Anbringung dieser Wirkungen wird sozusagen der Wert berechnet, den man, unter der Voraussetzung einer korrekt eingesetzten Dichte, bei eingeebneter Topographie im Stationspunkt messen würde.

Von allen Reduktionen ist die topographische Reduktion die wichtigste, da sie die grössten Amplituden bewirkt. Bereits ihre alleinige Berücksichtigung kann das normalerweise uneinheitliche Bild von Oberflächenwerten wesentlich vereinheitlichen, da in der Topographie die kurzwelligen Anteile der nahe gelegenen Massen enthalten sind. Sie ist demnach stark von der Lage des Messpunktes in der Landschaft abhängig. So ist es zum Beispiel problematisch, und im Hochgebirge geradezu verboten, für Geoidberechnungen topographisch unkorrigierte Lotabweichungen auf Stationen zu verwenden. Dies gilt insbesondere für Stationen, die direkt neben einem ansteigenden Berg oder am Rande eines Abhangs gelegen sind. Anhand von zwei praktischen Beispielen kann diese Aussage unterstrichen werden: In der Ivrea- Zone erreichen die berechneten topographischen Reduktionen in den drei Komponenten d ξ , d η und dg folgende Beträge:

 $d\xi$: -38.6" bis +23.7"

dη: -20.1" bis +30.7"

dg:

-59.52 bis -7.58 mgal.

Anhand eines zweiten Beispiels aus der Ostschweiz lässt sich die Bedeutung dieser Reduktion graphisch dokumentieren. Abb. 46 stellt die an der Oberfläche gemessenen Lotabweichungen in Form von Strichen dar, deren Länge den Betrag, und deren Azimut die Richtung der Lotabweichung angeben. Die Lotabweichungen weisen keine einheitliche Richtung auf, und auf kurze Entfernungen können sie "umkippen", was auf die Wirkung der Topographie zurückzuführen ist. Bereits nach dem Abzug dieser Wirkung zeigen die toporeduzierten Werte eine einheitliche Ausrichtung (Abb. 47), die in diesem Fall zum Grossteil durch die Wirkung der Mohofläche bedingt ist.

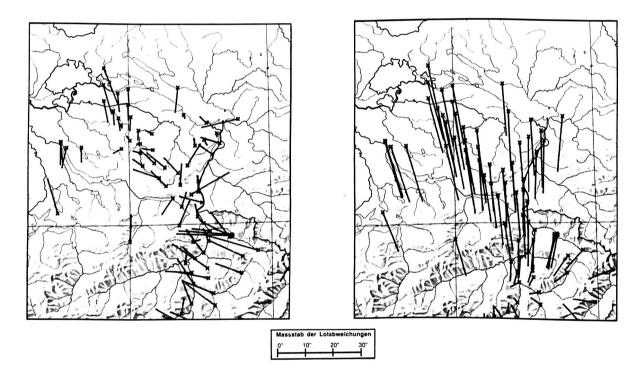


Abbildung 46 : Gemessene, nicht reduzierte Oberflächen- Lotabweichungen

Abbildung 47: Um die topographische Wirkung reduzierte Lotabweichungen.

Für die Berechnung der Gravitationswirkung bedient man sich der im dritten Kapitel und im Anhang wiedergegebenen Formeln, insbesondere für den Quader und für die Massenlinie. Das als Input dienende Massenmodell beschreibt die Topographie als Gesamtheit aller digitalisierten Quader. Es besteht aus einem Raster von mittleren Geländehöhen, die sich jeweils auf eine bestimmte quadratische Rastergrundfläche von 50, 500 oder 10'000 m Seitenlänge beziehen und zusammen mit der Höhe einen senkrecht stehenden Quader definieren. In der Reduktionsrechnung werden die einzelnen Quaderwirkungen aufaddiert. Die

resultierende Summe wird als die topographische Wirkung bezeichnet, und von den Messungen subtrahiert. Da die Wirkung von Massen mit dem Quadrat der Entfernung vom Aufpunkt abnimmt, kann ab Distanzen, die grösser als die 2.5- fache Quadergrundseite sind, ohne Genauigkeitseinbusse die Quaderformel durch die Linienformel ersetzt werden.

6.2.2.1 Zur Geländereduktion benutzte Software

Da die rechnerische Reduktion der gravimetrischen und der astrogeodätischen Daten bisher am IGP und am Institut für Geophysik (IG) mit verschiedenen Rechenprogrammen erfolgte, machten die Ivrea- Messungen mehrere Programmanpassungen und -Erweiterungen notwendig. Während am IG die Programme SCYLLA und PLOUFF (Autor PD Dr. E. Klingelé) verwendet wurden, stand am IGP das Programm LAG der Autoren Dr. A. Elmiger und Dr. W. Gurtner zur Verfügung.

Das erstgenannte Programmsystem berechnet die Geländereduktionen und die Bouguer-Anomalien auf Grund von digitalen Massenmodellen im 50m- Raster für nahegelegene Massenanteile, sowie im geographischen Raster 1' x 1', resp. 3' x 3' für den Bereich von 2.5 bis 167 km. Diese geographische Rastereinteilung ist komplizierter in der Berechnung, sie hat aber den Vorteil, dass sich die Programmanwendung nicht auf die Schweiz beschränkt, sondern auch in grösseren Operaten im internationalen Rahmen verwendbar ist. Ein Nachteil dieses Programmsystems bestand für unsere Zwecke allerdings in der Beschränkung auf die Schwere- Komponente. Der eventuelle Einbezug der Lotabweichungsberechnung fiel infolge des zu grossen Aufwandes ausser Betracht. Die Beibehaltung der Programm- Dualität erschien nicht sinnvoll, weil die beiden Programme nicht das gleiche Geländemodell verwenden. Es wurde deshalb eine Vereinfachung angestrebt, die es ermöglicht, die Berechnungen für alle drei Komponenten mit einem einzigen Programm auszuführen. Nachdem vergleichende Testrechnungen gezeigt hatten, dass die mit beiden Programmen berechneten Reduktionsbeträge praktisch identische Resultate lieferten, entschieden wir uns für eine Ergänzung des Programms LAG.

Der erste Nachteil von LAG konnte durch die Erweiterung der Berechnungsroutinen um die Schwerekomponente behoben werden. Für genauere Berechnungen verlangte das Programm zur Berücksichtigung der Nahtopographie die Eingabe der digitalisierten Höhen im 100m-Raster in der Stationsumgebung bis in eine Entfernung von 1500 m vom Berechnungspunkt: Dies im Gegensatz zu dem in der Geophysik seit ca. 1978 für gravimetrische Arbeiten routinemässig verwendeten 50 m- Raster (KLINGELE, 1978). Da bereits grosse Gebiete in

diesem Raster digitalisiert waren, erschien es sinnvoll, das Programm LAG entsprechend anzupassen, was freundlicherweise von Dr. Elmiger übernommen wurde. Mit diesem Raster berechnet das Programm den Einfluss der Nahtopographie, und zwar in einem Umkreis, der folgendermassen definiert ist:

Pro Station müssen alle km² im 50m- Raster digitalisiert vorhanden sein, die durch die horizontalen und vertikalen Tangenten an den Kreis mit 750 m Radius erfasst werden. Je nach Lage der Messstation im Kilometer- Raster, erfordert dies die Bereitstellung von 4, 6 oder 9 km². Innerhalb der erfassten Fläche ersetzt das Programm die jeweils 2 x 2 Werte des 500 m- Rasters (4 Quader pro km²) durch die 20x20 Quader des 50 m- Rasters. Nach einem etwas modifizierten Kriterium erfolgt danach die Auswahl derjeniger 10 km- Blöcke, in deren Bereich die jeweils für den ganzen Block gültige mittlere Höhe durch die 20x20 Höhen der 500 m- Felder zu ersetzen sind. Es betrifft dies alle Blöcke, deren Mittelpunkt innerhalb eines Fangradius von 20 km um die Station liegen (Abb. 48). Im dargestellten Beispiel rechnet das Programm an Stelle der 11 Blöcke (Prismen mit Kantenlänge 10 km) mit 11x(20x20) = 4400 Prismen (mit 500 m Kantenlänge). Im ausserhalb liegenden Gebiet wird bis zur äussersten Grenze des Einzugsgebiets, das insgesamt eine Fläche von 209'100 km²einschliesst, mit 10 km- Blöcken gerechnet (Abb. 48 und 49).

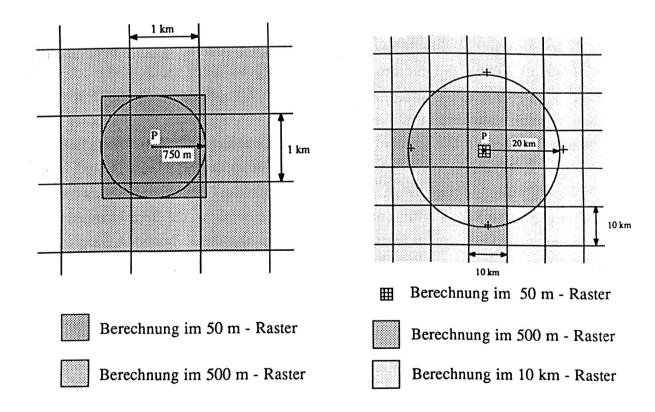


Abbildung 48: Zur Berechnung der topographischen Wirkung wird die Geländeoberfläche in der Stationsumgebung in unterschiedlichen Rastergrössen digitalisiert.

Als massgebende Höhe des zu berechnenden Quaders oder der Massenlinie wird stets der Höhenunterschied zwischen der Stationshöhe und der mittleren Höhe des Rasterfeldes eingesetzt. Im obigen Beispiel lässt sich der Rechenaufwand für die Geländereduktion etwa folgendermassen abschätzen:

Nahtopobereich

3600 Prismen (50 m)

Mittlerer Bereich

4400 Prismen (500 m)

Aussenbereich

2080 Prismen (10 km)

Die Liste zeigt die Notwendigkeit, an Stelle der Quaderfomel mit der Massenlinien- oder Punktmassenformel zu rechnen, um Rechenzeiten zu sparen. Im Programm LAG wird deshalb erst geprüft, in welchem Stationsabstand sich ein Prisma befindet und welchen Höhenunterschied es zur Stationshöhe aufweist, um anschliessend die Wirkung des entsprechenden Quaders mit der passenden Formel durchzurechnen.

Infolge dieser Anforderungen an das digitale Geländemodell, bestand der grösste Nachteil des Programms darin, dass das für die Reduktionen im Entfernungsbereich bis zu 20 km benutzte Geländemodell im 500m- Raster (MH500) im Süden nicht genügend Einzugsgebiet umfasste. Um trotzdem alle Ivrea- Messungen im gleichen Raster reduzieren zu können, bedurfte dieses Modell einer Erweiterung in südlicher Richtung um 4000 km² bis in die Gegend Turin - Mailand.

Im Zusammenhang mit den dazu notwendigen Ergänzungs- Digitalisationen, erwuchsen zusätzliche Probleme im Zusammenhang mit den italienischen Kartengrundlagen:

- 1. Sämtliche im LAG verwendeten Raster beziehen sich auf das schweizerische Projektionssystem. Sie sind in den italienischen Karten nicht eingetragen, was die rechnerisch/graphische Übertragung der Raster- Eckpunkte in das Projektionssystem der italienischen Karten nötig machte, um anschliessend die Grenzen der zu digitalisierenden Rasterfelder eintragen zu können.
- 2. Die zur Digitalisation benutzten italienischen Landeskarten 1:25'000 und 1:100'000 beruhen, je nach Gebiet und Erstellungsjahr, auf unterschiedlichen Projektionssystemen und verschiedenen Bezugsellipsoiden (vor 1940: Bessel Ellipsoid, nach 1940: Internationales Ellipsoid, mit zwei ungleichen Lagerungen). Unter Zuhilfenahme dreier Parametersätze für die Transformation der Raster- Eckpunkte gelang es schliesslich, die notwendigen Abbildungen vorzunehmen, und damit den 500 m- Höhenraster zu vervollständigen.

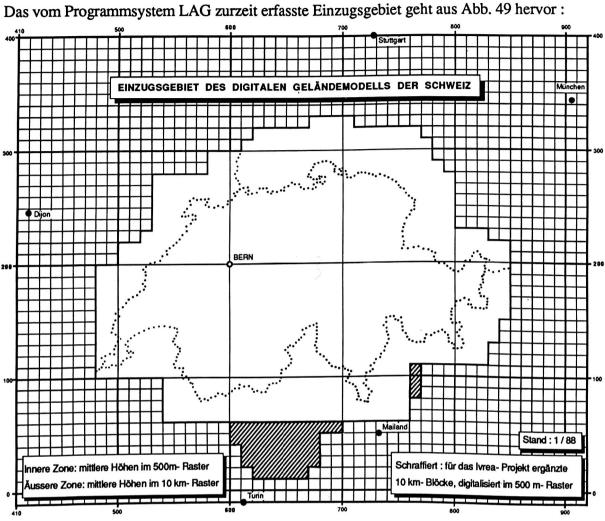


Abbildung 49: Einzugsgebiet des im Programm LAG verwendeten digitalen Geländemodells. Eingetragen sind die Begrenzungen der 500 m- und 10 km- Raster (MH500, resp. MH10), sowie die durch das Ivrea- Projekt bedingten Ergänzungen.

Moho - Reduktion 6.2.3

Während ELMIGER (1969,1975) für die Reduktionen u. a. mit einem Isostasiemodell arbeitete, konnte GURTNER (1978) für seine Geoidberechnung auf ein seismisches Modell der Moho- Diskontinuität als Grenze zwischen der Erdkruste und dem oberen Erdmantel zurückgreifen, das er aus mehreren Datensätzen von CHOUDHURY et al. (1971), EDEL et al. (1975) und KAHLE et al. (1976) zusammenstellen musste, da noch keine Darstellung vorlag, die auf neueren Daten beruhte und zudem das gesamte Gebiet umfasste. Mit der Publikation von MUELLER et al. (1980) war erstmals eine solche Darstellung verfügbar, die insbesondere auf refraktionsseismischen Auswertungen beruhte. Diese Mohokarte diente auch als Grundlage für das in unseren Berechnungen verwendete Reduktionsmodell, das zur Gebietserweiterung mit Daten von MENARD (1979) und STEIN et al. (1978) ergänzt wurde (Abb. 50).

Die Moho weist in der Nordschweiz eine Tiefe von ca. 28 km auf und senkt sich gleichmässig in Richtung Südosten unter den Alpenkörper ab. Sie erreicht unterhalb des Valle di Campo maximale Tiefen von über 56 Kilometern. Von diesem Tiefpunkt aus erstreckt sie sich in Form eines ausgeprägten Grabens in östlicher und südwestlicher Richtung fort, der dem Alpenbogen folgt und ca. 100 km südlich der Schweizergrenze wiederum anzusteigen beginnt. In der Gegend der Ligurischen Küste weist die Moho wieder ungefähr die gleichen Tiefen auf wie im Südschwarzwald. Der Dichtekontrast des obersten Mantels zum Krustenmaterial wurde in unseren Berechungen mit +0.43 [gcm⁻³] eingesetzt, ein Wert, der sich auf Grund von Interpretationen neuer astrogeodätischer Daten bestätigte (WIRTH, MARTI, 1988). Dieser Dichtekontrast mag etwas hoch erscheinen, z. B. im Vergleich mit KISSLING (1982). Es muss aber betont werden, dass es sich um den Kontrast zwischen dem oberen Mantel und einer homogenen Kruste mit 2.67 gcm⁻³ handelt, der bei Berücksichtigung einer Mittel- und einer Unterkruste entsprechend geringer ausfallen würde (siehe z. B. SCHWENDENER, 1984). Die Berechnungen beziehen sich auf eine mittlere Ausgleichstiefe von 34 km.

Mit den innerhalb der nächsten Jahre zu erwartenden Resultaten aus dem Nationalen Forschungsprogramm 20: "Geologische Tiefenstruktur der Schweiz" können für das Gebiet der Schweiz neue Erkenntnisse zur Krustenstruktur inklusive der Moho- Tiefenlage erwartet werden. Erste Resultate von Vibroseis- Profilen entlang zweier Traversen zeigen auf Grund punktueller Vergleiche eine recht gute Übereinstimmung mit den von uns verwendeten Tiefen (NFP20, 1987). Allerdings werfen die neu gewonnenen Daten auch neue Probleme auf, indem die reflektierten Signale im Bereich von Chur ein Absinken der Moho andeuten und schliesslich abbrechen (FINCKH et al., 1987). Dieser Effekt zeigt sich übrigens auch in den toporeduzierten Lotabweichungen, die in diesem Gebiet das Vorzeichen wechseln, was mit der Existenz eines lokalen Minimums gut zusammenpasst (Abb. 47). Ob die ersten Vermutungen Recht behalten werden, die annehmen, es könnte sich dort um eine Subduktionszone handeln (PANZA und MUELLER, 1978), werden möglicherweise erst tiefreichende Refraktionsmessungen oder die zur Zeit noch nicht abgeschlossenen tomographischen Berechnungen des Instituts für Geophysik bestätigen können. Gegenüber dem in Abb. 50 ersichtlichen Verlauf erscheint diese Absenkung um ca. 35 km nach Norden versetzt, was gewisse Fragen vorerst noch unbeantwortet lässt. Mit Bestimmtheit werden die noch nicht abgeschlossenen seismischen Auswertungen des NFP20- Projekts die Konstruktion eines neuen und verbesserten Moho- Tiefenmodells ermöglichen, das gegenüber dem bisherigen Modell möglicherweise in einigen Punkten etwas abweichen wird. In den groben Zügen dürfte aber

das hier verwendete Modell zutreffen und den gestellten Anforderungen genügen. In den Abbildungen 51 bis 53 sind die Wirkungen auf die drei Komponenten (Betrag und Richtungen) dargestellt. Sie zeigen, dass die Moho-Reduktionen relativ grosse Beträge erreichen, infolge der grossen Mohotiefen aber eine relativ ruhig verlaufende Fläche darstellen.

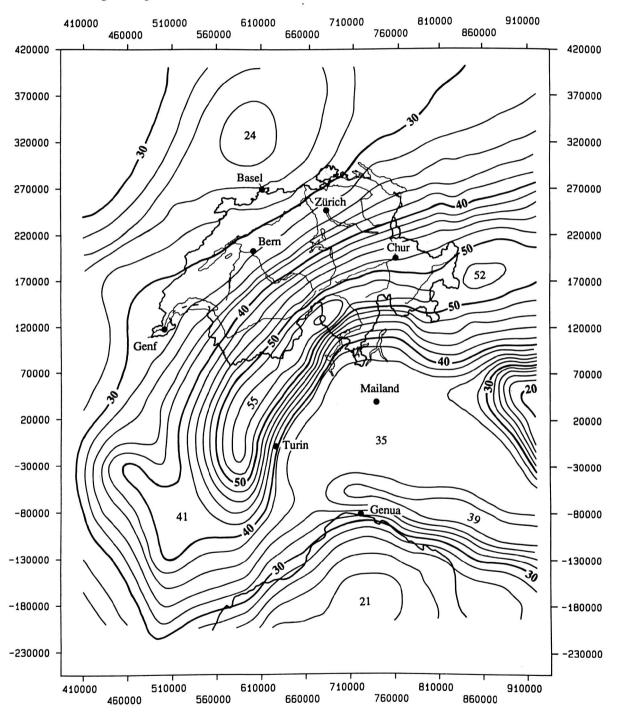


Abbildung 50: Verlauf der Moho - Tiefenlinien [km] im Bereich der Schweiz und ihrer Umgebung nach MUELLER et al. (1980), MENARD (1979) im Südwesten und STEIN et al. (1978) im Südosten.

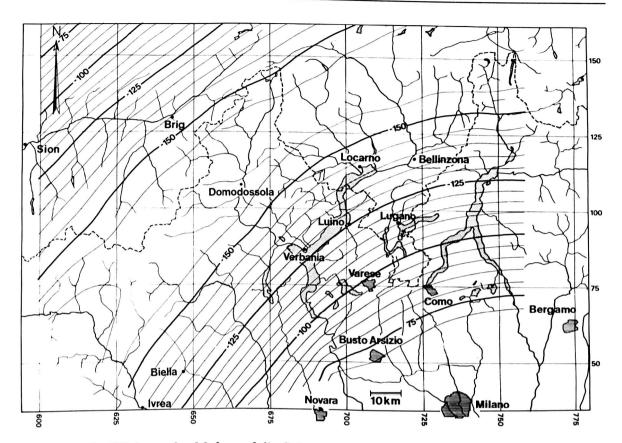


Abbildung 51: Wirkung der Moho auf die Schwere - Komponente g, in [mgal].

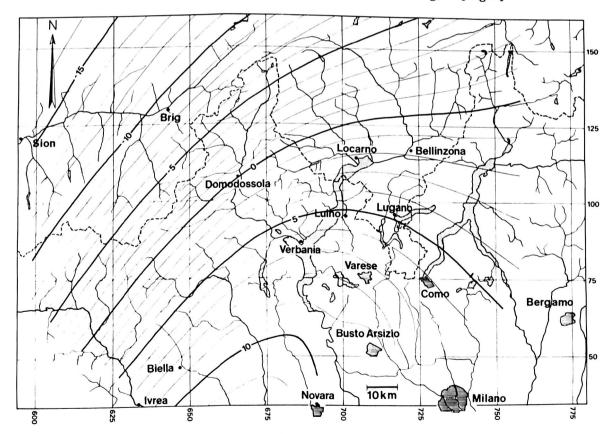


Abbildung 52: Wirkung der Moho auf die ξ -Komponente der Lotabweichung, in ["].

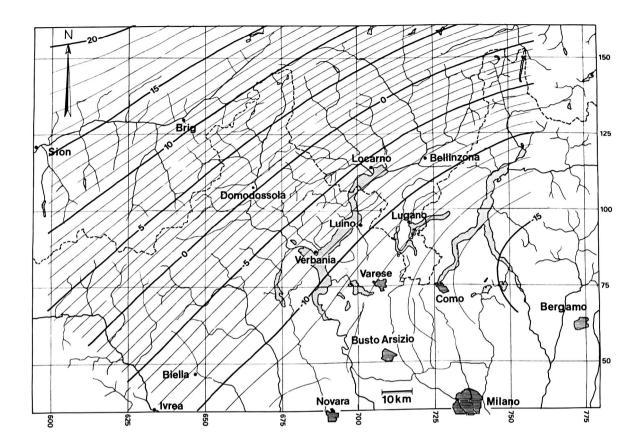
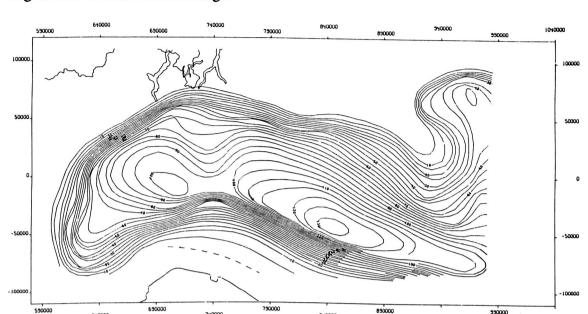


Abbildung 53: Wirkung der Moho auf die η -Komponente der Lotabweichung, in ["].

6.2.4 Reduktion der Sedimentationsgebiete

6.2.4.1 Reduktion der Po- Ebene

Die im Südosten des Ivrea- Körpers gelegene ausgedehnte Po- Ebene ist eine mächtige Überdeckung tertiärer und quartärer Sedimente, die eine maximale Tiefe von ca. 15 km erreichen und einen veränderlichen Dichtekontrast zum Krustenmaterial aufweisen. Bedingt durch die grosse Ausdehnung und oberflächennahe Lage dieser negativ wirkenden Sörmasse, erreichen die Schwerewirkungen in diesem Gebiet bis zu -130 mgal, (SCHWENDENER, 1984; Abb. 54). Ihr Einfluss äussert sich nicht nur in einem langwelligen, regional wirkenden Anteil, sondern ebenso in kurzwelligen Anteilen mit stark variierenden Amplituden, von der vor allem die am nächsten gelegenen Stationen betroffen sind. Um dem mit der Tiefe betragsmässig abnehmenden Dichtekontrast der Po- Sedimente zu entsprechen, erfolgte die Berechnung der Reduktionen mit Hilfe eines von SANTINI (1985) und A. GEIGER übernommenen und adaptierten Programms, das die Dichten entsprechend dem in Abb. 55



dargestellten Verlauf berücksichtigt.

Abbildung 54: Schwerewirkung [mgal] der Po- Sedimente nach SCHWENDENER (1984). Der Dichtekontrast der Sedimente ist infolge der Kompaktierung tiefenabhängig und beträgt zwischen -0.77 (an der Oberfäche) und -0.2 gcm⁻³ in der grössten Tiefe des Po- Flusslaufs (s. Abb. 55).

940000

Als Grundlage für die Reduktionen diente der von SCHWENDENER (1984) zur Verfügung gestellte Datensatz. Sowohl für die Moho wie für die Po- Sedimente wurden die Wirkungen mit der Formel für die Massenlinie berechnet. Diese Vereinfachung ist ohne Genauigkeitseinbusse verbunden, da sich die jeweiligen Massenanteile in grossen Entfernungen von den Messstationen befinden. Einzig die Stationen 105 in Massazza und 106 in Montemaggiore liegen im unmittelbaren Einzugsbereich der Po- Sedimente (die Po-Schwerewirkung ist bei der Station 106 mit +67 mgal am grössten, bei der Station 105 reduziert sie sich bereits auf +35 mgal). Für diese Stationen müsste sie strenggenommen mit der Quaderformel berechnet werden. Die durch die Vereinfachung in Kauf genommene geringe rechnerische Genauigkeitseinbusse von höchstens 2 mgal spielt jedoch gegenüber der letztlich resultierenden Unsicherheit des Ivrea- Modells eine lediglich untergeordnete Rolle. Ausserdem hätte die "korrekte" Reduktion für diese beiden Stationen eine erneute (infolge der variablen Dichtekontraste sehr aufwendige) Programmanpassung erfordert, deren Vorteil in keinem Verhältnis zum Aufwand gestanden hätte.

Die Reduktionswerte erreichen folgende Grenzwerte:

$$-12.0" \le d\xi_{Po} \le -2.2"$$

$$+0.3" \le d\eta_{Po} \le +16.8"$$

-67.6 mgal $\le dg_{Po} \le -0.6$ mgal

Die relativ grossen Unterschiede in den Beträgen zeigen die absolute Notwendigkeit dieses Reduktionsschritts, mit dem die in den Beobachtungen enthaltenen lokalen Einflüsse herausgefiltert werden können.

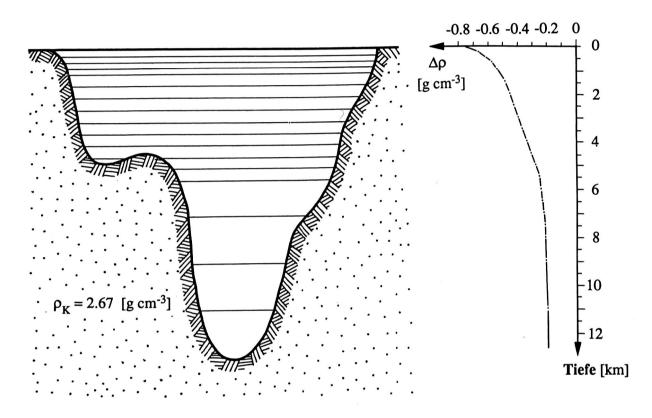


Abbildung 55 : Tiefenabhängigkeit des Dichtekontrasts der Po- Sedimente. Die rechts dargestellte Kurve entspricht dem eingesetzten Dichtekontrast $\Delta \rho$ zwischen den Sedimenten ($\rho_s = 1.90 - 2.47 \text{ gcm}^{-3}$) und dem Krustengestein ($\rho_K = 2.67 \text{ gcm}^{-3}$).

6.2.4.2 Reduktion der Talfüllungen

Mit dieser Reduktion wird dem Dichteunterschied der quartären Oberflächensedimente in den Haupttälern des Projektgebietes Rechnung getragen. Da diese Berechnungen Korrekturen ergeben, die zwar verhältnismässig kleine Amplituden aufweisen, aber dennoch weit grösser als die Messgenauigkeiten sind, können die Talfüllungen nicht vernachlässigt werden. Vor allem in Gegenden mit stark gegliederter Topographie besteht die Gefahr, dass die Messungen durch die Talfüllungen systematisch verfälscht werden. Dieser Umstand ist dadurch

begründet, dass aus naheliegenden Gründen die Messstationen normalerweise entlang den zugänglichen Talböden angelegt werden, und nicht an den steilen Talhängen oder auf den Bergrücken. Dies führt zu den typischen "profilmässigen" Flächenbelegungen in den Messgebieten, wie sie auch im Ivrea- Messgebiet zu beobachten sind (Abb. 42), wo sich Punktreihen wie Perlenketten entlang der grossen Täler abzeichnen (z. B. Valle d'Ossola, Val Strona, Tessiner Täler).

Damit besteht die Gefahr, dass die ganze Messstrecke dem systematischen Einfluss der Talfüllung unterliegt. Für die Interpretation entlang eines einzelnen Profiles spielt dies soweit keine grosse Rolle, wenn der dadurch entstehende Offset als Regionaleffekt subtrahiert wird. Bei grossflächigeren Arbeiten hingegen machen sich die Unterschiede unliebsam bemerkbar, da jeweils nur Gruppen von Stationen betroffen sind, andere wiederum gar nicht. Ein weiterer Unsicherheitsfaktor besteht in den a priori nicht bekannten Tiefen der Sedimente und in deren Dichtekontrast. Durch natürliche Talsperren wie Talverengungen, Schwellen etc. können unterschiedliche Sedimenttiefen bestehen, die unter Umständen zu erheblichen Differenzen in den Wirkungen führen, die sich in einem gemessenen Schwereprofil entlang eines Tals als kurzwellige Störungen (in der Grössenordnung von einigen hundert Metern bis zu mehreren Kilometern) bemerkbar machen.

Für die rechnerische Berücksichtigung dieser Effekte wurde auf eine Digitalisation in einem festen Raster verzichtet. Stattdessen wurden die sich auf der Karte oberflächlich gut abzeichnenden Talfüllungen der fünf wichtigsten Flussläufe digitalisiert und mit einfachen Quadern erfasst, deren Tiefe sich auf Grund von Abschätzungen über den Verlauf der topographischen Umgebung ergab. Die Sedimente folgender Täler, resp. Flussläufe, sind mit einer Dichte von 2.0 gcm⁻³ in Rechnung gesetzt worden:

- Ticino, inkl. Magadinoebene: maximale Tiefe 400 m.
- Maggia, nur im Deltagebiet: maximale Tiefe: 250 m.
- Adda (Veltlin): maximale Tiefe: 250 m.
- Mera (Piano di Chiavenna): maximale Tiefe: 290 m.
- Toce (Valle d' Ossola) : maximale Tiefe 320 m.

Die grössten Reduktionen ergaben -9.7 mgal für die Schwere und +2.0" für die Lotrichtung (Magadinoebene). Wie die Erfahrungen im Zusammenhang mit der Interpretation gezeigt haben, spielen die Talfüllungen eine weit wichtigere Rolle, als man gemeinhin annehmen könnte, deuten doch verbleibende Restklaffungen an gewissen Stellen auf entsprechende Systematiken hin. Näheres dazu folgt im nächsten Kapitel.

6.2.5 Geologische Reduktion

Die konsequente Berücksichtigung aller systematisch auf die Beobachtungen wirkenden Effekte muss auch die Dichteabweichung in jenen Gebieten umfassen, deren Oberflächendichte vom Mittelwert der topographischen Reduktion abweicht. Während die für die Toporeduktion eingesetzte Dichte von 2.67 gcm⁻³ für die meisten Gebiete als einigermassen repräsentativ betrachtet werden kann, gibt es Gebiete mit niedrigeren und solche mit höheren Dichten. Dies trifft insbesondere für die Ivrea- Zone selbst zu, wo die Oberflächendichte Werte bis zu 3.3 gcm⁻³ annehmen kann. Diese Reduktion beschränkt sich allerdings auf die oberhalb des Modells liegenden Massen:

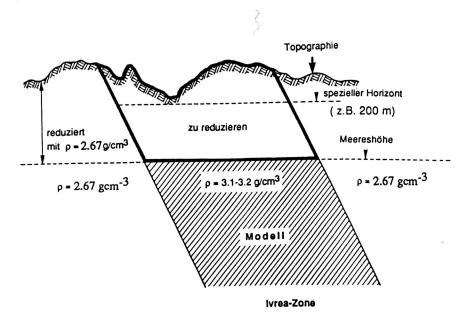


Abbildung 56: Die geologische Reduktion berücksichtigt die Dichte der Gesteine oberhalb des Bezugsniveaus.

Gemäss dem im vierten Kapitel erwähnten vielfältigen Aufbau der Ivrea- Zone ist in dieser Zone mit signifikant erhöhten Oberflächen- Gesteinsdichten zu rechnen, die innerhalb einer grossen Bandbreite schwanken können. Dies erschwert die Angabe einer repräsentativen Dichte. Um eigene Aussagen über diesen Sachverhalt machen zu können, wurden die anlässlich der Messkampagnen eingesammelten Handstücke im Labor untersucht und deren Dichte nach dem Wägeprinzip bestimmt. Wie die Darstellung in Tabelle 3 (S. 88) zeigt, liegen die aus mehreren Einzelstücken gemittelten Dichten der Proben 1-5, die aus der Ivrea- Zone stammen, deutlich über der mittleren Reduktionsdichte, während die Dichten der Proben 6 und 7 zwar unterschiedlich sind, aber im Mittel (zufälligerweise) genau der Reduktionsdichte

entsprechen. Der sich aus den Proben 1- 5 ergebende Mittelwert von ρ_m = 3.1 gcm⁻³ erschien gerechtfertigt und wurde als Einheitsdichte für die Reduktion der Ivrea- Oberflächendichte verwendet.

Die analytische Erfassung der Strukturen gestaltete sich nicht mehr so einfach wie bei den Talfüllungen, da ein bedeutend grösseres Gebiet betroffen ist. Da solche Reduktionen bisher stets in separaten Programmen oder Programmdurchläufen berechnet wurden, musste ein neuer Input- Datensatz (im 500 m-, resp. 50 m- Raster, entsprechend der Toporeduktion) erstellt werden, der nur die Daten der Ivrea- Zone enthält und alle ausserhalb liegenden Quadersäulen durch einen fiktiven Maskenwert (z. B. 999.99) von der Berechnung aussschliesst. Zur Berechnung wurde mit LAGIV eine angepasste Version des Programms LAG verwendet (vgl. WIRTH et al., 1987). Die Reduktionsbeträge lagen innerhalb folgender Grenzwerte:

$$\begin{array}{lll} -2.5" & \leq d\xi_{Iv} \leq & + \ 2.0" \\ -4.5" & \leq d\eta_{Iv} \leq & + \ 2.2" \\ -2.05 & \leq dg_{Iv} \leq & + \ 23.08 \ mgal \end{array}$$

6.2.6 Reduktion der Seen

Der letzte Reduktionsschritt hatte zum Ziel, den Einfluss der Wassermassen wegzureduzieren, der, wenngleich er auch gering ist, die Messungen lokal beeinflussen kann. Die im Zuge des digitalen Geländemodells ermittelten mittleren Geländehöhen beziehen sich im Seegebiet auf den Seegrund. Die normale Geländereduktion vernachlässigt demzufolge den Effekt der Wassermassen, was bei einzelnen, am Ufer eines Sees gelegenen Stationen, gewisse Fehler bewirkt. Der Vollständigkeit halber wurde auch dieser Effekt für jede Station berechnet, und zwar mit einem Programm von Dr. Elmiger, das ursprünglich für die Abschätzung von Gletschermassen im Berner Oberland geschrieben wurde. Das Programm wurde so angepasst und erweitert, dass mit der Seeboden- Topographie in Form eines Tiefenrasters des Lago Maggiore, Lago di Lugano, Lago di Como und Lago d' Orta als Input, die Wirkung in allen Stationen berechnet werden kann (vgl. auch Bemerkung S. 140). Erwartungsgemäss sind die Reduktionsbeträge bei den Stationen am Ufer am grössten, so wird zum Beispiel in Brissago die Lotlinie um rund 2" abgelenkt, und die Schwere um 5.8 mgal verkleinert.

6.2.7 Abschliessender Kommentar zu den Reduktionen

Die vorliegende Arbeit hat unter anderem die isolierte Bestimmung der Schwerefeldparameter $d\xi_s$, $d\eta_s$ und dg_s einer bestimmten Störzone zum Inhalt. Seit den Arbeiten von ELMIGER (1969) und GURTNER (1978) gehört die Reduktion der Oberflächen- Messwerte zu einem standardisierten Verfahren in der Schweiz, das sich mit dem operationellen Programmsystem LAG seit einigen Jahren in der Praxis bewährt hat. Die dabei abrufbaren Reduktionsschritte umfassen neben der Topographie im 500 m- Raster auch ein Modell der Moho- Diskontinuität, kombinierbar mit einem Modell für den Ivrea- Körper. Die hier beschriebenen Reduktionen gingen umfangmässig über den normalen Rahmen hinaus und benötigten die Entwicklung einiger Spezialprogramme, die zum Teil eigene Daten- Eingabeformen erfordern, die sich nicht auf das Raster der Landeskarten abstützen. Die Überlegung, einige der hier durchgeführten Reduktionen wegzulassen, wäre sicher falsch, auch wenn einzelne Schritte punktuell klein ausfallen. Letztlich entscheidend ist die Tatsache, dass bei jeder Reduktion Einzelwerte resultieren können, die wesentlich grösser als die Messgenauigkeit sind, und die kumulierte Summe aller (kleinen) Wirkungen u. U. noch mehr verfälscht sein kann.

Vom Standpunkt der Datenbehandlung her gesehen, ist die momentane Vielfalt der verfügbaren Programme noch nicht optimal. Eine diesbezügliche Weiterentwicklung der vorhandenen Software in Richtung eines umfassenden geodätisch/ geophysikalischen Programmsystems ist deshalb eine Notwendigkeit, insbesonders im Hinblick auf neue Messungen. Der Einbezug differenzierter Gesteinsdichten für die Geländereduktion dürfte eine nochmalige Verbesserung der Genauigkeiten erbringen. Diese Tendenz zeigt sich auf Grund von Lotabweichungs-Untersuchungen (WIRTH und MARTI, 1988), die für die Voralpen- gebiete eine gegenüber dem Alpengebiet reduzierte Dichte ergaben. Mit den verschiedenen Reduktionen ist vor allem bei der Datenerfassung viel Aufwand verbunden, aber die eingeschlagene Richtung scheint sich zu bestätigen. Dies belegt auch die Tatsache, dass 1987 vom Bundesamt für Landestopographie die ersten digitalisierten Kartenblätter (DIKART) der Landeskarte 1:25'000 im 25 m Höhen- Raster dem IGP für Reduktionszwecke zur Verfügung gestellt wurden (EIDENBENZ, 1988). Mit diesem sehr engmaschigen Topo- Raster können die benötigten Eingabe- Files mit 50 m- Einteilung für das Programm LAG generiert werden. Für die zukünftigen Anwendungen wird man auf genauere Modelle auf allen Stufen angewiesen sein. Das Projekt DIKART stellt in dieser Hinsicht nicht nur für die Geodäsie einen grossen Fortschritt dar. Auf der anderen Seite steigen damit auch die Ansprüche an die Programmsysteme, die enorme Datenmengen verarbeiten müssen. Dank den stets wachsenden Möglichkeiten der Personal Computer wäre die Entwicklung und Implementation eines umfassenden Softwarepaketes auf dieser Stufe bereits jetzt möglich und sinnvoll.

6.3 Resultierende Anomalien als bereinigte Ausgangsgrössen zur Interpretation

Die Berücksichtigung aller Korrekturen und Reduktionen führt schliesslich zu den gesuchten Residualeinflüssen, die als die Signale des Störkörpers zu interpretieren sind. Auf eine detaillierte Auflistung aller Reduktionsbeträge wird hier verzichtet und auf WIRTH, MARTI und BÜRKI (1987) verwiesen. Im Anhang befindet sich eine Liste mit zum Teil summarisch aufgeführten Reduktionsbeträgen.

Mit dem Einbezug aller verfügbarer gravimetrischer und astronomischer Messungen wurden für die Berechnung der Residualfelder insgesamt 162 Stationen mit mindestens einer Lotabweichungskomponente und total 464 gravimetrische Messungen miteinbezogen. Die daraus berechneten Residualfelder des Ivrea- Körpers präsentieren sich damit folgendermassen (Abb. 57 - 60):

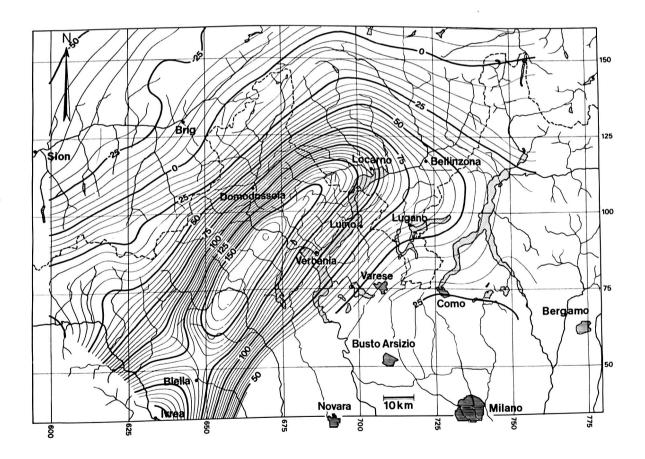


Abbildung 57: Residualfeld der Schwere [mgal] nach Abzug aller modellierbaren Wirkungen.

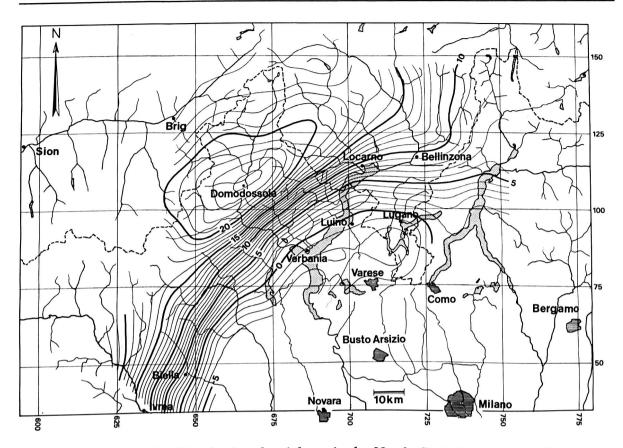


Abbildung 58: Residualfeld der Lotabweichung in der Nord - Süd - Komponente &, in ["].

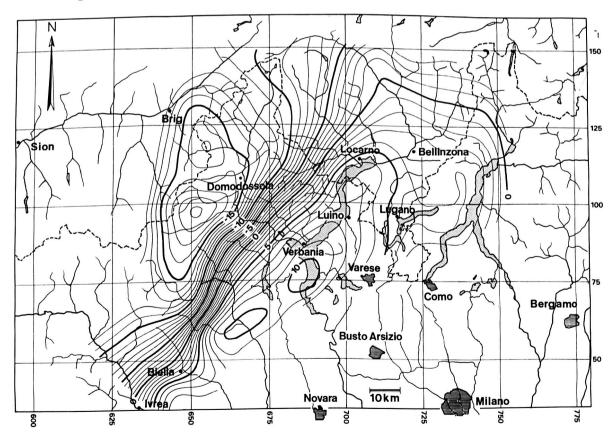


Abbildung 59 : Residualfeld der Lotabweichung in der West - Ost - Komponente η , in ["].

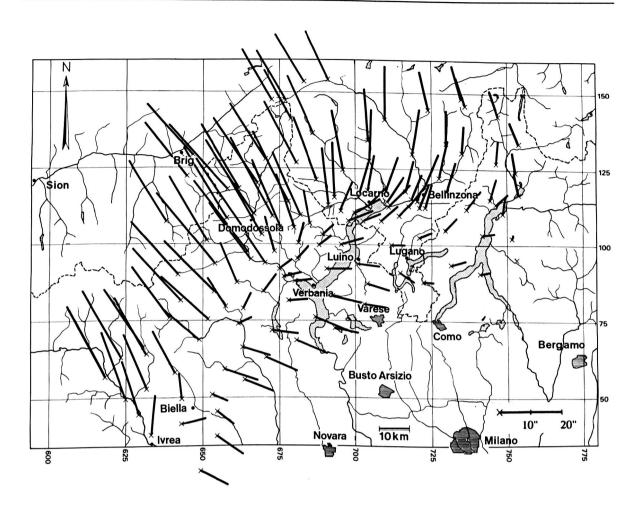


Abbildung 60: Residualfeld der Lotabweichung in Vektordarstellung. Die kleinen Kreuze markieren die Messstationen, und die Striche deuten die Richtung der Lotabweichung an. Die Länge der Striche weist auf den Betrag der Lotabweichung hin.

7. Interpretation

7.1 Überlegungen zum Regionalfeld

7.1.1 Die Wahl des Bezugsellipsoids

Nach Abzug aller modellierbaren Effekte verbleiben Residualanomalien, die man als "Pseudo-Messungen" bezeichnen kann. Sie sind aber noch nicht die letztlich gesuchten Signale der zu interpretierenden Massenstörung, sondern können von langwelligen und auch kurzwelligen Effekten überlagert und systematisch "verfälscht" sein. Zur Beurteilung solcher Störungen erhebt sich die Frage, welches die Ursachen dieser verschiedenen Anteile sind und wie sie sich auf die Messungen auswirken.

Eine erste prinzipielle Ursache beruht nicht auf der Massenverteilung, sondern ist durch die Wahl der Bezugsflächen (Ellipsoide) für die Berechnung der Lotabweichungen und Schwereanomalien begründet. Die folgenden Ausführungen zu dieser Thematik haben nicht die mathematische Behandlung der Bezugsellipsoide und der Datumsübergänge zum Inhalt, sondern sollen vielmehr aufzeigen, wie sich die Wahl des Bezugsellipsoids qualitativ auf das Regionalfeld der Residualanomalien auswirken kann. Für weitergehende Ausführungen zur analytischen Darstellung der Datumstransformationen wird auf TORGE (1975), S.171-172, TORGE (1980), S. 131 - 140 sowie auf HEISKANEN und MORITZ (1967), S. 204 - 210 verwiesen.

Es ist einleuchtend, dass die Messgrössen ξ , η und Δg durch eine translative Veränderung der ellipsoidischen Koordinaten φ , λ und h, um einen konstanten Betrag (Offset) verändert werden. Mit der Wahl eines lokalen Bezugsellipsoids und der Festlegung des Datums in einem beliebigen Bezugspunkt erfahren die Messwerte gegenüber einem globalen, im Massenschwerpunkt gelagerten Erdellipsoid, das eigentlich für die Untersuchung von Massenverteilungen verwendet werden sollte, entsprechende Veränderungen. Das Festlegen des frei wählbaren Ellipsoid- Datums (z. B: grosse Halbachse a, Abplattung f, Lotabweichungen ξ_0 und η_0 , Geoidhöhe N_0) in einem Bezugspunkt hat zur Folge, dass die Lotabweichungen im betreffenden Datum definiert sind, und daher nur als relative Lotabweichungen angesehen werden können. Die astronomisch bestimmten Lotrichtungsparameter Φ und Λ sind von der Datumsdefinition nicht betroffen. Die Lotabweichungen sind hingegen auch Funktionen der geodätischen Koordinaten. Sie werden daher von einer Änderung des Datums in erster Näherung alle gleich beeinflusst und um einen konstanten Betrag gekippt (Abb. 61):

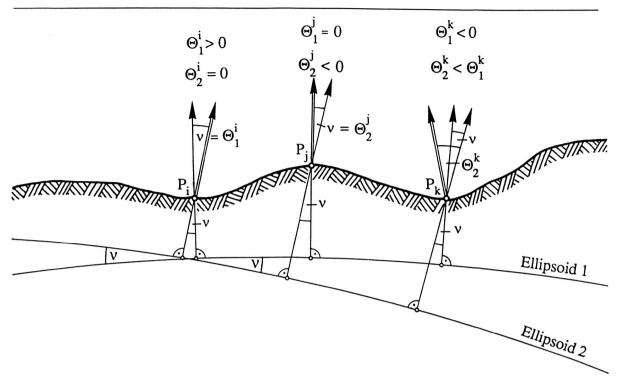


Abbildung 61: Vereinfachte Darstellung des Einflusses der Ellipsoidlagerung auf die Lotabweichungen Θ . Die in den Punkten P_i , P_j und P_k gemessenen Lotrichtungen (markiert mit doppelt ausgezogenen Pfeilen) sind von der Wahl des Bezugsellipsoids unabhängig. Die berechneten Lotabweichungen $\Theta^{i,j,k}$ hingegen erfahren bei einer Kippung v des Ellipsoids in erster Näherung einen konstanten Offset vom Betrag v:

$$\Theta_{2}^{i} = \Theta_{1}^{i} + \nu \quad ; \quad \Theta_{2}^{j} = \Theta_{1}^{j} + \nu \quad ; \quad \Theta_{2}^{k} = \Theta_{1}^{k} + \nu$$
 (7.01)

 $\begin{array}{lll} \text{mit} & \Theta_1 &=& \text{Lotabweichung bezüglich des Ellipsoids 1} \\ & \Theta_2 &=& \text{Lotabweichung bezüglich des Ellipsoids 2} \end{array}$

Von einem Höhenoffset des Ellipsoids sind die Lotabweichungen nur durch die Normal-Lotkrümmung betroffen, allerdings mit weit geringerer Amplitude als durch eine Kippung. Ein Höhenoffset von einem km bewirkt eine Richtungsänderung der Lotlinie von lediglich 0.17" (TORGE, 1975, S. 156). Veränderungen der Ellipsoidparameter a und f bewirken durch den damit veränderten Krümmungsverlauf auf dem Ellipsoid eine zusätzliche Deformation des Lotabweichungsfeldes. Diese kann für kleine Gebiete genähert als linearer Massstab angesetzt werden (die Ausdehnung des Messgebiets beträgt ca. 1° in N/S und ca 2° in W/O- Richtung). Die berechneten Schwereanomalien sind von einem Datumsübergang in ähnlicher Art betroffen: Durch die damit veränderten Höhen über dem Ellipsoid werden sie um einen konstanten und zusätzlich um einen linearen Anteil verändert, der sich sowohl bei der Berechnung der Normalschwere nach (3.13), wie auch bei der Berechnung der Bouguerplatten- und Freiluft-Wirkungen bemerkbar macht (Abb. 62).

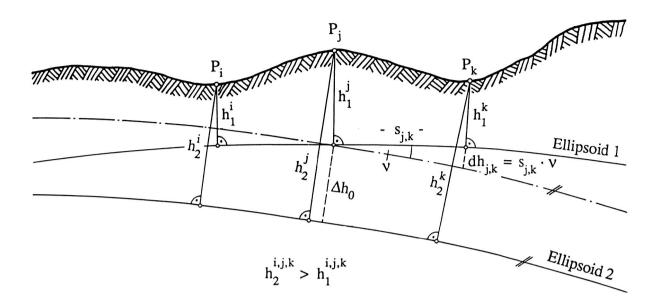


Abbildung 62: Zum Einfluss der Ellipsoid-Lagerung auf die Schwereanomalien.

Während eine Höhenverschiebung Δh_0 einen konstanten Offset

$$\Delta g_0 = \Delta h_0 \cdot \frac{\partial g_{\text{Norm}}}{\partial h}$$
 (7.02)

zur Folge hat, bewirkt die Kippung v des Ellipsoids eine lineare Änderung im Betrag von :

$$\Delta g_{\text{Norm}}(v) = \Delta g_0 + \frac{\partial g_{\text{Norm}}}{\partial h} \cdot dh$$
 (7.03)

 $mit dh = s \cdot v folgt$:

$$\Delta g_{\text{Norm}}(v) = \Delta g_0 + s \cdot v \cdot \frac{\partial g_{\text{Norm}}}{\partial h} \cong \Delta g_0 + s \cdot \text{konst}$$
 (7.04)

Auch der Übergang vom Erdellipsoid von 1930 zum System 1980 bewirkt in erster Linie einen Offset in der Grössenordnung von 10 mgal (die weiteren Terme, die von der Breite abhängig sind, bewirken im Ivrea- Gebiet lediglich differentielle Änderungen von 0.02 mgal).

Diese Ausführungen zur Ellipsoidlagerung zeigen, dass die Wahl der Bezugsellipsoide das Regionalfeld mitbestimmt und bei Nichtbeachtung zu Fehlinterpretationen führen kann. Obwohl sich diese geometrischen Effekte nicht von den nachfolgend beschriebenen Effekten von Massen- Inhomogenitäten trennen lassen, wurden sie durch einen später noch beschriebenen Trendansatz praktisch vollständig beseitigt.

7.1.2 Einfluss tiefgelegener Masseninhomogenitäten

Weitere langwellige Regionalfeldanteile entstehen durch grossräumige Dichteunregelmässigkeiten im Krusten- resp. Mantelaufbau. Während eine konzentrische Struktur mit Schichten unterschiedlicher Dichte nur zu einem konstanten Offset führt, können laterale Masseninhomogenitäten Verkippungen und Deformationen des Regionalfelds verursachen. Sie bedürfen sowohl qualitativ wie quantitativ der näheren Betrachtung. Als mögliche Ursache für einen langwelligen Regionaleffekt kommt die oft zitierte Verschluckungs- oder Subduktionszone unter der Alpenkette in Betracht, wo die Lithosphäre in die Asthenosphäre eintaucht (PANZA und MUELLER, 1978, PANZA et al., 1979). Zur Berechnung der Wirkung dieser hypothetischen Kontaktzone zwischen der eurasischen und der afrikanischen Platte wurde ein Ouader von 100 km Breite angenommen, der von 50 km bis in 250 km Tiefe hinabreicht und sich längs der Alpen über eine Länge von 300 km erstreckt. Als Dichtekontrast zwischen der abtauchenden dichteren Lithosphäre und der Asthenosphäre wurde ein Wert von +0.05 gcm⁻³ eingesetzt (s. z. B. GIRDLER, 1985). Die dreidimensional berechneten Wirkungen sind in Abb. 63 entlang eines quer zu den Alpen angelegten Profils aufgetragen. Bei der angenommenen Ost / West- Ausrichtung der abtauchenden Platte sind nur die ξ - und die dg-Komponente betroffen, während die η - Komponente entlang des Profils unbeeinflusst bleibt. Die Verschluckungszone bewirkt eine sehr langwellige Anomalie mit ca. 400 km Wellenlänge und rund +70 mgal Amplitude. Die entsprechenden Lotabweichungen erreichen einen maximalen Wert von -6.2 Bogensekunden in einer Entfernung von rund 90 km von der Quadermitte. Wenn man das Messgebiet unserer Untersuchungen in den Profilquerschnitt einzeichnet, lässt sich folgendes feststellen: Sowohl in der Schwere wie in der Lotabweichung bewirkt diese Störung einen Offset und einen Gradienten, die in die Messungen eingehen. Mit einer linearisierten Darstellung der Kurve ergibt das Beispiel folgende Zahlenwerte:

Offsets :
$$\Delta g_0 = +63 \text{ mgal}$$

$$d\xi_0 = +2.0 \text{ "}$$
Gradienten : $\frac{\partial dg}{\partial x} = \frac{+1.8 \text{ mgal}}{10 \text{ km}}$

$$\frac{\partial d\xi}{\partial x} = \frac{-1".1}{10 \text{ km}}$$

Diese Werte sind nicht als physikalische Realität zu interpretieren, da Veränderungen in der Geometrie oder im Dichtekontrast entsprechende Änderungen in der Wirkung hervorrufen. Sie sollen lediglich die mögliche Grössenordnung aufzeigen, mit der etwa zu rechnen ist.

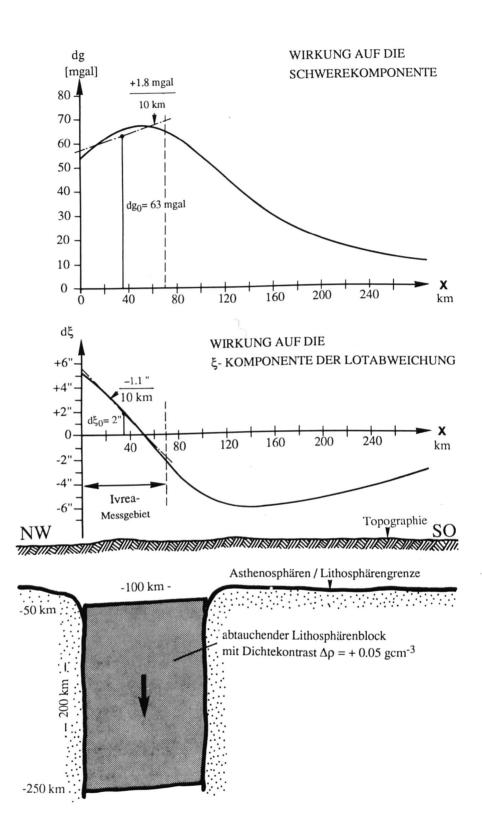


Abbildung 63: Wirkungen in dg und d ξ einer abtauchenden Lithosphärenplatte mit einem Dichtekontrast von + 0.05 gcm⁻³. Als positive x- Achse wird in dieser Abschätzung eine von NW nach SO quer zu den Alpen verlaufende Linie angenommen.

Während in unserem Beispiel die η- Komponente nicht betroffen ist, bleibt die mögliche Existenz weiterer Masseninhomogenitäten, die sich ähnlich auswirken wie die Subduktion, offen. So könnte zum Beispiel die noch wenig erforschte Lithosphären-/Asthenosphärenstruktur in den Ostalpen die Wirkung der angenommenen Subduktionszone überlagern und vorwiegend die η- Komponente beeinflussen.

Zusammenfassend kann man folgende Schlüsse ziehen:

- Die Abspaltung eines Regionalfelds kann auf verschiedene Arten erfolgen. Das Problem besteht darin, dass die Ursachen nicht genau bekannt sind. Es überlagern sich mehrere unabhängige Effekte, deren Ursachen vorerst noch unbekannt sind.
- Falls derartige oder ähnliche Massenstörungen in der realen Massenverteilung tatsächlich existieren, kann deren Wirkung in Form von Trendebenen mit einiger Zuverlässigkeit approximiert werden. Auch höhere Entwicklungen, z. B. Polynome dritter oder vierter Ordnung, wären denkbar, wobei allerdings die Gefahr der Überreduktion besteht, was zur ungewollten Wegfilterung eines Teils der zu interpretierenden Wirkung führen kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Regionalfeld- Effekt mit "Trendebenen" wegreduziert. Das Ausgleichungsprogramm wurde dahingehend erweitert, dass die 9 Trendparameter (3 Offsets und 6 Gradienten) als Unbekannte eingeführt, und, zusammen mit allen anderen Unbekannten, in einem Durchgang berechnet werden.

- Das Regionalfeld ist nicht ausschliesslich durch die regionale Massenverteilung bestimmt, sondern hängt auch vom Datum des verwendeten Referenzellipsoids ab. Eine a priori-Modellierung dieser Datumsübergänge ist aber nicht ohne weiteres möglich, da es sich um Ortsfunktionen handelt, deren Parameter zu wenig bekannt sind.
- Die Wahl der Ausgleichstiefen und Dichtekontraste für die Reduktionen beeinflusst das Regionalfeld ebenso: Die Annahme einer falschen Ausgleichstiefe für die Reduktion der Moho führt zu einem Offset, und ein fehlerhaft eingesetzter Dichtekontrast bewirkt eine in erster Näherung lineare Massstabsänderung in den Auswertungen der Messungen.
- Auf der anderen Seite wäre es sicherlich falsch, die im Zusammenhang mit der Modellierung des Ivrea- Körpers berechneten und abgespaltenen Trendwerte so zu interpretieren, dass daraus zum Beispiel die Geometrie der Subduktionszone abgeleitet werden könnte. Im Kapitel 7.1 ging es in erster Linie darum, das Vorgehen bei der Regionalfeld-

möglichst plausibel zu begründen. Schliesslich müsste auch die Frage geklärt werden, ob Betrag und Vorzeichen der berechneten Trendparameter mit den erwähnten Hypothesen verträglich sind.

7.2 Erste Interpretation

Als Start für die erste Modellierung des Ivrea- Körpers diente das von WIRTH et al.(1987) konstruierte Modell, das in Abb. 64 in der Perspektive dargestellt ist. Diese Interpretation beruhte auf ersten Teilmessungen im Rahmen des Ivrea- Projektes, die die östliche Fortsetzung des Ivrea- Körpers bereits erahnen liessen.

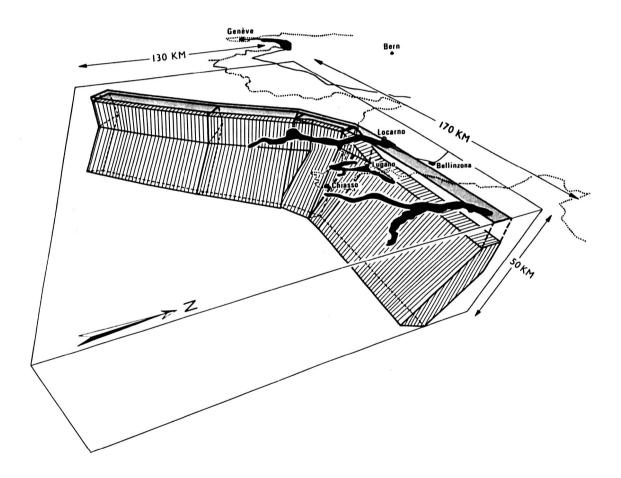


Abbildung 64: Ansicht des Ivrea-Körpers aus der ersten Interpretation von WIRTH, MARTI und BÜRKI (1987). Die zur Interpretation verwendeten Daten waren noch unvollständig, zeigten aber bereits die Fortsetzung der Ivrea-Struktur in östlicher Richtung.

Das Modell setzt sich aus 8 Rechtecks- und 20 Dreiecksprismen zusammen. Aus der Ausgleichung, die für das Regionalfeld noch keine Trendabspaltung enthielt, resultierten folgende 3 Offsetparameter und 7 Dichtekontraste:

Offsets:
$$\Delta g_0 = 4.3 \text{ mgal}, \text{ rms} = 1.0 \text{ mgal}$$
 $d\xi_0 = 4.0 \text{ "}, \text{ rms} = 0.26 \text{"}$ $d\eta_0 = 4.8 \text{ "}, \text{ rms} = 0.27 \text{"}$

Dichtekontraste: variierend von - 0.106 bis + 0.605 gcm⁻³, rms von 0.011 bis 0.056 gcm⁻³

Erreichte Genauigkeiten, berechnet aus den verbleibenden Restklaffungen "gemessen" minus "Modellwirkung" (R = Redundanz : Anzahl Messungen - Anzahl Unbekannte) :

$$s(\xi)$$
 = 2.8" R = 104
 $s(\eta)$ = 2.3" R = 85
 $s(\Delta g)$ = 7.8 mgal R = 358

Wie die in Abb. 65 eingetragenen Restvektoren der Residual- Lotabweichungen zeigen, weist das Modell Gebiete auf, die sich durch grosse und systematisch beeinflusste Restvektoren hervorheben. Dies gilt insbesondere für die Umgebung von Biella, Domodossola und Lugano / Bellinzona, die es genauer zu untersuchen galt.

Eine "Neukonstruktion" des Modells mit ersten Anpassungen an das Residualfeld ergab zunächst unbefriedigende Resultate: Die verbleibenden Residuen wiesen in einigen Gebieten in den 3 Signal- Komponenten deutliche Systematiken auf. Die bisherigen Interpretationen hatten diese Effekte wegen der unvollkommenen Trendabspaltung noch nicht aufgezeigt. Sie müssen durch bisher nicht beachtete Störungen verursacht sein, da sich die Gebiete bis zu ca. 40 km ausserhalb des unmittelbaren Wirkungsgebietes des Ivrea- Körpers befinden. Die festgestellten Wellenlängen lassen im weiteren auch erkennen, dass sowohl tiefgelegene, wie auch oberflächlich eingelagerte Störungen in Frage kommen können.

Ein Vergleich mit der von ANSORGE et al. (1987) durchgeführten Neubearbeitung einer Karte der Krusten/ Mantelgrenze, basierend auf allen verfügbaren refraktionsseismischen Messungen bestätigte in der Folge, dass die zwischen Locarno und dem Bedretto- Tal festgestellten positiven Residuen teilweise mit einer erhöhten Tiefenlage der Moho erklärbar sind. Die positiven Anomalien zeigen dort eine sehr gute Koinzidenz mit der um bis zu 6 km geringeren Moho - Rinne. Die relative Hochlage zeigt sich als Unterbruch des in Abbildung 50 dargestellten markanten Grabens. Im anschliessenden südwestlichen Teil dürfte die Moho dagegen wahrscheinlich um 4 bis 5 km tiefer liegen als dargestellt. Abbildung 65 zeigt die Differenzen in den Lotabweichungen zwischen dem beschriebenen (Start-) Modell und den beobachteten Werten:

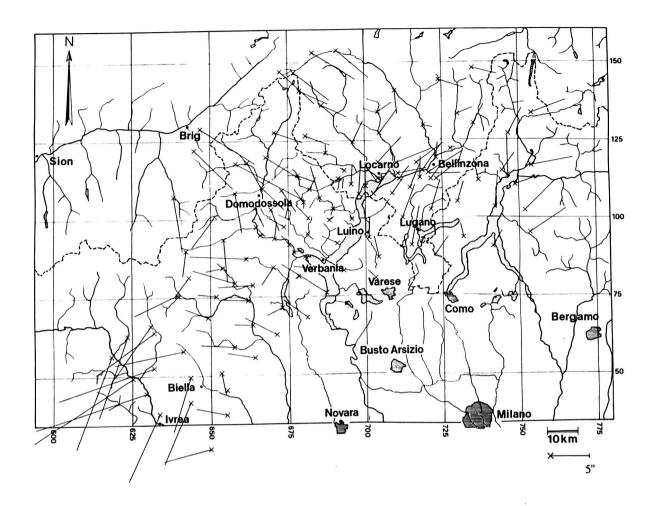


Abbildung 65: Residual-Lotabweichungen des Ivrea-Modells von WIRTH et al.(1987) nach Abzug aller Effekte wie Topographie, Moho, Po-Sedimente, Seen etc.

7.2.1 Weitere Erkenntnisse

Das wichtigste Ergebnis aus der ersten Interpretation war u. a. die Erkenntnis, dass die verbleibenden Residuen durch langwellige Störungen, z. B. verursacht durch eine Subduktionszone, geprägt sind. Nach schrittweise verbesserten Modellierungen, insbesondere durch Anpassung der Mohotiefen, verkürzten sich die Wellenlängen der Residualanomalien, konnten aber nicht vollständig zum Verschwinden gebracht werden. Die Residuen zeigten nun eine auffallende Korrelation mit den geologischen Strukturen. Da man diesen Residuen nicht eindeutig bekannte Krusteninhomogenitäten zuordnen kann, bleibt nur die Möglichkeit von bisher nicht erkannten Dichteanomalien oberflächennaher geologischer Einheiten übrig. Die geologischen und tektonischen Karten zeigten die wahrscheinlichen Ursachen in einigen Fällen auf den ersten Blick. Auffallend waren zum Beispiel die Anteile mit Amplituden bis zu 10 mgal in den Sedimentgebieten der grossen Taleingänge:

- Talebene zwischen Chiavenna und dem nördlichen Ende des Comersees (Piano di Chiavenna), zeigten die Residuen "Modellwirkung minus ausgeglichener Messwert" auf Grund der positiven Werte eine zu grosse Wirkung des Modells. Dies kann als Hinweis auf eine ungenügende Reduktion der quartären Sedimente aufgefasst werden, was sich durch Aufzeichnen der entsprechenden Talquerschnitte und Vergleich mit den eingesetzten Quadertiefen auch bestätigte. In beiden Fällen vermochte jedenfalls eine besser angepasste zusätzliche Reduktion der Talfüllungen mit differentiell geändertem Dichtekontrast die Amplituden der Residuen auf das Niveau des "normalen Rauschens" zu reduzieren¹⁾.
- In unmittelbarer Nachbarschaft, östlich von Chiavenna, am Eingang zum Val Bregaglia, zeigten einige Messwerte eine lokale Störung mit einer negativen Amplitude von ca. 8 bis 12 mgal an. Die Konsultation der geologischen Karte zeigte, dass die betreffenden Stationen genau in einer kleinen Einlagerung mesozoischer Ophiolite (z.B. Serpentinite, Peridotite) liegen, die sich in der ansonsten von Gneisen dominierten Region deutlich abheben. Die mittleren Dichten der Ophiolite liegen mit 2.66 (Serpentinit) bis 3.24 gcm⁻³ (Peridotit) deutlich über der verwendeten mittleren Reduktionsdichte von 2.67 gcm⁻³ und der Dichte der Gneise (WAGNER und BARBLAN, 1986). Eine entsprechende lokale Modellierung mit einem Dichtekontrast von + 0.10 gcm⁻³ dieser sehr kleinräumigen Einlagerung führte ebenfalls zu deutlich besser passenden Residuen.
- Ähnliche Systematiken wurden auch in anderen Gebieten festgestellt, wo Messpunkte im Bündnerschiefer liegen: z. B. in der Gegend der nördlichen Leventina (bei Airolo), im Bedrettotal und entlang der südlichen Begrenzung des Gotthardmassivs bis in die Gegend von Visp.
- Die genaue Analyse aller Systematiken führte in nahezu allen Fällen zum Ergebnis, dass die Effekte fast ausschliesslich im Zusammenhang mit der lokalen Geologie erklärt werden können. Unter Berücksichtigung der geologischen Karte gelang es, mit Ausnahme der Gebiete, in denen zu wenig Messungen vorliegen, die Residualanomalien durch Modellierung der Dichteverteilung wesentlich zu reduzieren.

¹⁾ Unter "normalem Rauschen" ist die in etwa zu erwartende Genauigkeit (Standardabweichung) der Residuen zu verstehen. Gemäss den Ausführungen zum stochastischen Modell im dritten Kapitel würde sie im Idealfall die Grössenordnung von ca. 4 mgal erreichen.

Unter die erwähnten Ausnahmen fällt ein Gebiet, das durch die Linie der südlichsten gravimetrischen Messungen begrenzt wird und entlang den Südenden der beiden grossen Seen Lago Maggiore und Lago di Como verläuft. Versuche, den 15 mgal erreichenden Effekt durch die Zone der Südalpensedimente zu erklären, scheiterten aus zwei Gründen: Erstens sind die Dichten der Südalpensedimente im Durchschnitt eher geringer als die Reduktionsdichte. Zweitens ist innerhalb der gleichen geologischen Formation ein Gradient in den Residuen von mehr als 3 mgal pro km feststellbar. Dies schliesst die Südalpensedimente als Urheber der kurzwelligen Störungen aus, denn die Dichtevariationen dürften innerhalb dieser weitläufigen Zone kaum gross genug sein, um derart grosse Effekte zu verursachen. Auch eine hypothetisch höhere Lage der Moho kommt für diesen Effekt nicht in Frage, da sie den Verlauf der Residuen wegen der grossen Entfernung mit zu grossen Wellenlängen beeinflusst. Eine plausiblere Erklärung dürfte in einer ungenügenden Reduktion der Po-Sedimente begründet sein. Die nördliche Begrenzung der Po- Sedimente stösst unmittelbar an die Südalpensedimente. Auch hier liess sich der verbleibende Effekt durch entsprechende Anpassung einer "Korrekturzone" auf ein normales Mass reduzieren.

Es würde zu weit führen, jeden einzelnen Schritt in allen Einzelheiten zu erläutern. Wichtig bleibt dagegen die Feststellung, dass die Oberflächengeologie, und damit verbunden die lateralen Dichtevariationen, einen sehr wichtigen Faktor darstellen, den es bei der Beurteilung des Schwerefeldes zu beachten gilt. Auf diese Art konnte die resultierende Genauigkeit der Interpretation, die nicht nur den Ivrea- Körper selbst, sondern auch dessen Umgebung im ganzen Messgebiet einschliesst, um rund 30 Prozent verbessert werden.

7.3 Das definitive Modell : Beschreibung des Ivrea- Körpers

Der Aufbau eines neuen Modells für den Ivrea- Körper ist aufwendig und kann nicht in einem einzigen Berechnungsgang erfolgen. Er ist eher mit einem mehrstufigen Lernprozess vergleichbar, in dessen Ablauf aus jedem Schritt neue Erkenntnisse gewonnen werden, die es einerseits richtig zu interpretieren und anderseits für den nachfolgenden Durchgang in möglichst zutreffender Art zu berücksichtigen gilt. Dieser iterative Prozess wird so lange durchgeführt, bis sich die Varianz der Residuen auf einem Niveau konsolidiert, das im Idealfall mit den abgeschätzten Genauigkeiten zur Übereinstimmung gekommen ist. Einschränkend muss allerdings betont werden, dass es rechnerisch zwar möglich, geophysikalisch aber wenig sinnvoll sein dürfte, das Modell so lange abzuändern, bis jeder verbleibende Restvektor zum Verschwinden gebracht worden ist. Dieses Vorgehen würde letztlich nur eine falsch verstandene Modellgenauigkeit vortäuschen, die mit der Wirklichkeit

nicht viel Gemeinsames aufweist, oder sich zumindest nicht begründen lässt.

Es würde an dieser Stelle ebenfalls zu weit führen, die insgesamt über 80 durchgeführten Ausgleichungen zu beschreiben. Öfters musste eine Teilstruktur wieder verworfen und neu modelliert werden, da die "Antwort" der Ausgleichung anders ausfiel als ursprünglich angenommen.

Für die Dokumentation und Präsentation des definitiven Modells erschien es mir nicht nötig, den ganzen Werdegang mit allen Änderungen und Variationen des Modells in aller Detailtreue wiederzugeben. Interessanter dürfte dagegen eine ausführliche, mit Abbildungen ergänzte Beschreibung sein, die die wichtigsten Merkmale des neuen Modells hervorhebt, und mit Hilfe einiger typischer Querschnitte einen Einblick in den möglichen Aufbau dieser ungewöhnlichen Krustenstruktur vermittelt. Als Hilfsmittel eignet sich am besten eine Unterteilung des Modells in 7 Abschnitte (A bis G), deren Grundriss in Abbildung 66 dargestellt ist. Darin ist ersichtlich, dass die Form des Ivrea- Körpers im Bereich der Abschnitte A - E, entsprechend den Ausführungen im vierten Kapitel, durch die Insubrische Linie im Norden, und die Pogallo- Linie im Süden abgegrenzt wird.

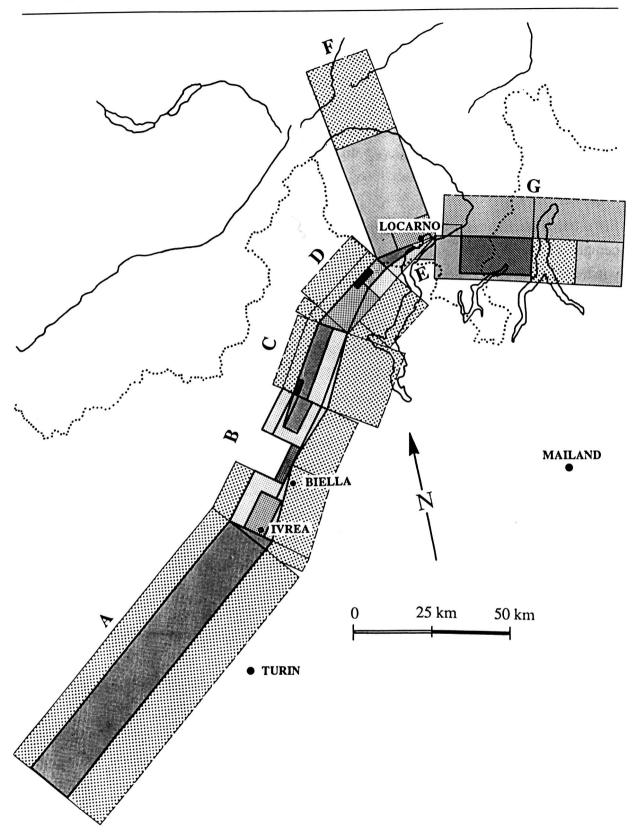


Abbildung 66: Grundriss des erarbeiteten Ivrea- Modells. Dick ausgezogen sind die Begrenzungen der jeweils zuoberst liegenden Teilkörper, deren Oberflächen, je nach Tiefenlage, verschieden gerastert sind. Die Abgrenzungen tiefer liegender Strukturen sind schwächer gezeichnet, während auf Moho-Niveau liegende Linien gestrichelt sind.

Bedingt durch die etwas einschränkenden geometrischen Darstellungsmöglichkeiten mit Rechtecks- und Dreiecksprismen, wurde der Verlauf des Modells entlang der erwähnten Lineamente nicht bis in alle Einzelheiten nachvollzogen, da dies nur eine unnötig grosse Anzahl Elementarkörper nach sich gezogen hätte.

Im Bereich der Abschnitte A bis D basiert der generelle Querschnitt des Modells auf einer einfachen Basis- Geometrie (s. Abschnitt) als Grundkonstruktion, die nach Bedarf örtlich in horizontaler oder vertikaler Richtung ergänzt oder reduziert wurde. Das Modell umfasst den Bereich von der Höhe Null bis in eine Tiefe, die durch die Moho- Diskontinuität gemäss Abb. 50 gegeben ist.

7.3.1 Die Abschnitte des Modells im einzelnen

7.3.1.1 Abschnitt A

Der Abschnitt A liegt ausserhalb des Messgebietes. Die Geometrie beruht nicht auf einer expliziten Interpretation, sondern ist an die in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Körper angepasst. Er dient lediglich der lateralen Verlängerung des Modell in Richtung Südwest, wobei der Querschnitt, soweit es möglich war, dem Verlauf der Insubrischen Linie und demjenigen der grossräumigen Bougueranomalien angepasst wurde (VECCHIA, 1968). Auf diese Weise wird ein unrealistisches Umbiegen der Isolinien am Modellrand vermieden. Die Länge des Körpers hat auf die Interpretation des Ivrea- Nordendes keinen Einfluss und ist mit 100 km festgelegt. Die Breite beträgt im ganzen Abschnitt 15 km.

Der auf 10 km Tiefe eingezeichnete Zwischenhorizont ist durch die Definition der einzelnen Körper bedingt und ist nicht von besonderer Bedeutung. Der als unbekannt in die Ausgleichung eingeführte und mit den übrigen Unbekannten ausgeglichene Dichtekontrast wurde für die Körper 1 - 5 (Gruppe 1) mit +0.24 gcm⁻³ berechnet. Der "Unterbau" (Körper 6) bildete zusammen mit den entsprechenden Körpern der anschliessenden Abschnitte eine separate Gruppe (Nr. 6), für die ein gemeinsamer Kontrast von +0.395 gcm⁻³ resultierte. Den Querschnitt durch Abschnitt A zeigt Abbildung 67.

Bemerkung zu den angegebenen Nachkommastellen bei den Dichtekontrasten:

Normalerweise hat es keinen Sinn, einen berechneten Dichtekontrast auf drei Stellen nach dem Komma anzugeben, da die Genauigkeit weit geringer ist. Im Folgenden wird es trotzdem so gehandhabt. Dies dient der Unterscheidung zu den in der Ausgleichung festgehaltenen und somit unveränderten Dichtekontrasten, die nur mit einer Nachkommastelle angegeben sind.

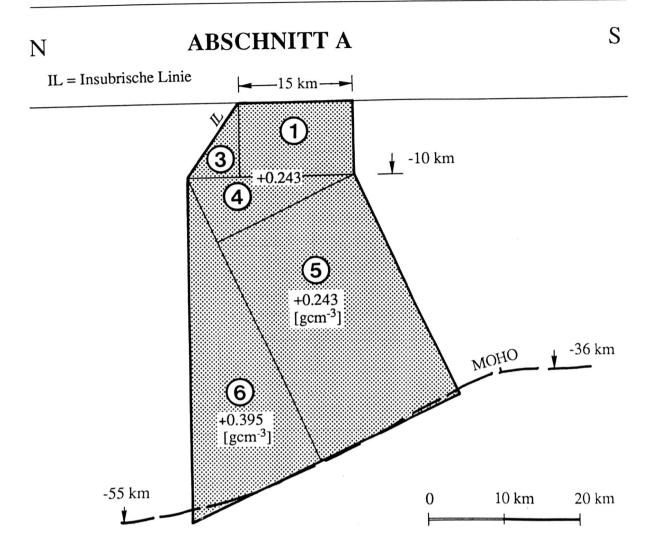


Abbildung 67: Querschnitt durch den Abschnitt A (s. a. Abb. 66). In den Kreisen stehen die Körpernummern, die zu den im Anhang ergänzten numerischen Tabellen korrespondieren.

7.3.1.2 Abschnitt B

Dieser Abschnitt liegt bei der Einschnürung der Isolinien nördlich von Biella, die sich auf den Abbildungen 57 und 59 deutlich abzeichnet. Weiter ist eine Korrelation mit dem Verlauf der Insubrischen Linie feststellbar, die an dieser Stelle nach Süden ausbeult. Für die Interpretation bot dieser Teil gewisse Schwierigkeiten, da die Messungen im unmittelbaren Einzugsgebiet etwas knapp sind. Das wichtigste Merkmal dieses Abschnitts besteht in der Einengung, die sich sowohl in einer Grundrissverengung wie in einer Absenkung der Körperoberfläche bemerkbar macht. Für eine aussagekräftigere Modellierung der bei Ivrea/Biella absteigenden, und anschliessend in Richtung Norden wieder ansteigenden Körperflanken, wären hier noch weitere Messungen vonnöten; Die grobe Form lässt sich aber dennoch einigermassen abschätzen.

Neben der erwähnten Einengung verlangte die Ausgleichung zusätzliche Massen am südlichen Rand, was zumindest teilweise auf die Abweichung des südöstlichen Randes des Modellkörpers von der Pogallo - Linie zurückzuführen ist. Die Erfüllung dieser Forderung musste unter Beachtung der Isolinienform in Abb. 57 erfolgen, die auch auf dieser Seite des Ivrea- Körpers eine Verengung zeigen, wenn auch eine geringere als auf der Nordseite. Obwohl sich hier die Restriktionen der Modellierbarkeit mit lediglich zwei Grundelementen deutlich zeigten, konnte mit zwei senkrecht stehenden, in einem Tiefenbereich von 7 bis 12 km plazierten Keilen (Körper 84 und 85), die den Abschnitt am süd- und nordöstlichen Ende um 5, resp. 2 km verbreitern, sowie einem dritten, schief aufgesetzten Keil in grösserer Tiefe (Körper 8), eine vertretbare Lösung gefunden werden.

Die Abbildungen 68 und 69 zeigen den Abschnitt im Grundriss und im Querschnitt. Die darin mit einem hochgestellten Minuszeichen (z. B. 57⁻) versehenen Körpernummern deuten an, dass es sich um einen "Reduktionskörper" mit negativem Dichtekontrast handelt, der zum Modellieren einer bestimmten Form dient. So kann bei einem Körper mit einem im allgemeinen zutreffenden, aber örtlich zu hohen Dichtekontrast, dieser Massenüberschuss lokal wieder wegreduziert werden (Superposition zweier Störkörper).

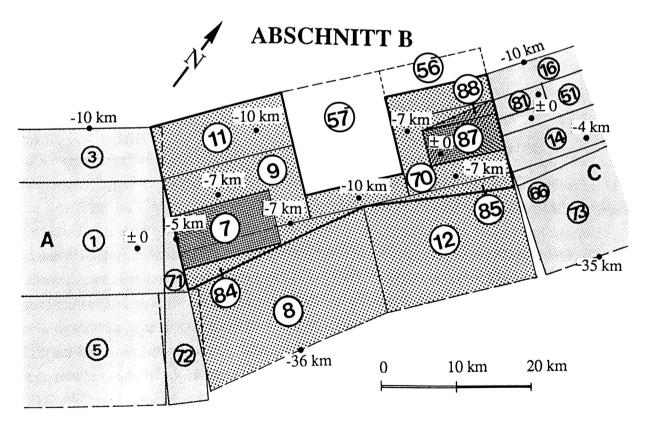


Abbildung 68: Grundriss des Abschnitts B. Die Koten bezeichnen die Tiefenlage der Körperoberflächen in [km].

Im gleichen Sinn kann auch partiell eine Kumulation positiver Kontraste erreicht werden (z. B. durch Modellierung lokal hoher Dichteintrusionen, wie bei den Peridotitlinsen innerhalb des "normalen" Ivrea- Gesteins). Die berechneten Dichtekontraste sind: Gruppe 2 (Körper 9, 11, 12): +0.388 gcm⁻³. Die übrigen Dichten sind mit +0.4 gcm⁻³ festgehalten.

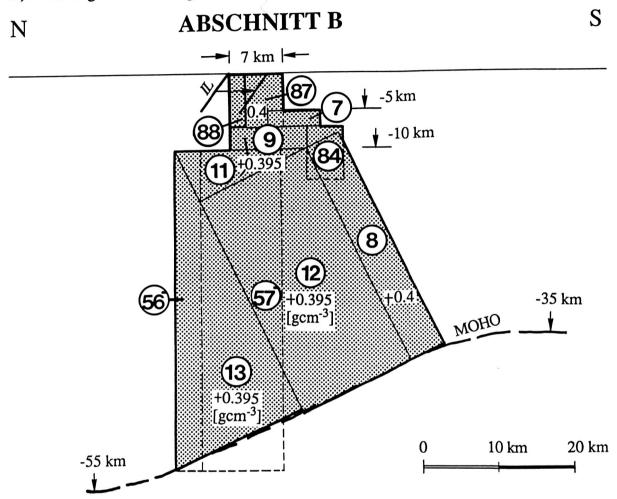


Abbildung 69: Querschnitt durch Abschnitt B.

Interessant ist auch ein Quervergleich mit den Ergebnissen geomagnetischer Studien in diesem Gebiet. Wenngleich aus potentialtheoretischen Gründen gezeigt werden kann, dass die ersten Ableitungen des magnetischen Potentials in ihrer mathematischen Struktur proportional zum Schweregradienten sind (BARANOV, 1975), so ist doch die direkte Verknüpfung zwischen geomagnetischen und Schwereanomalien nicht notwendigerweise auf ein- und dasselbe Massenelement beziehbar. Gemessenene magnetische Feldstärke- Variationen müssen daher nicht unbedingt von entsprechenden Variationen des Schwerefeldes begleitet sein (WAGNER und BARBLAN, 1986). Ein Vergleich mit der Arbeit von WAGNER et al (1984) zeigt aber trotzdem gute Übereinstimmung, da die Oberfläche des Ivrea- Körpers zwischen Ivrea und Omegna sowohl eine Anomalie in der Magnetisierung wie in der Dichteverteilung aufweist und

in ähnlicher Art abgesenkt wird (Abb. 70):

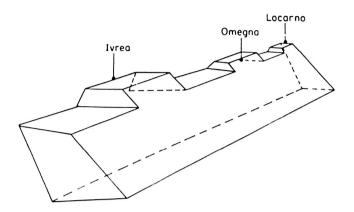


Abbildung 70: Ansicht des aus der Interpretation geomagnetischer Messungen gewonnenen Ivrea- Körpers nach WAGNER et al (1984).

7.3.1.3 Abschnitt C

Dieser Abschnitt weist gegenüber der Basis-Geometrie einige Anpassungen auf:

- Erstens wurde ab diesem Abschnitt der Einfallswinkel der Insubrischen Linie von rund 55° auf rund 80° erhöht. Die genaue Bestimmung stösst auf Schwierigkeiten; denn die Messungen sind statistisch nicht aussagekräftig genug. Testrechnungen mit der Neigung der Nordbegrenzung (Winkel β von Körper 16, Abb. 71) als unbekanne Grösse, ergaben grosse mittlere Fehler für den Drehwinkel.
- Zweitens liegt die Oberfläche auf Höhe Null, allerdings nur auf der nordwestlichen Seite des Abschnitts, auf einer Breite von 5 km. Die südöstliche Hälfte wurde um 4 km abgesenkt, da die Residuen im Gebiet Varallo Strona einen massiven Massenüberschuss im Modell anzeigten. Für die Existenz einer Stufe in diesem Gebiet spricht vor allem der festgestellte grosse NW-SO Schweregradient. Es ist möglich, dass die positiven Residuen zumindest teilweise durch unterkompensierte Talfüllungen verursacht sein könnten; denn die Ausgleichung weist immer noch positive Residuen aus. Auch hier wären zur Detailabklärung weitere Messungen nötig. Wie aus der Querschnittsdarstellung (Abb. 71) hervorgeht, musste auch bei diesem Abschnitt, wie schon im vorhergehend beschriebenen Abschnitt, ein kleiner, senkrecht stehender Korrekturkeil (Körper 66) angefügt werden, um damit der Pogallo- Linie östlich Varallo besser folgen zu können. Die ausgeglichenen Resultate zeigten ausserdem die generelle Tendenz einer Verbreiterung des Querschnitts, und zwar im Süden wie im Norden. Dies bedingte weitere Ergänzungen: Im Süden durch ein auf die Moho gesetztes Dreiecksprisma (Körper 73), dessen Grundfläche an den grossen Block (Körper 18) angelehnt

ist. Im Norden durch die Verschiebung der Basislinie der senkrechten Abgrenzung unterhalb der Insubrischen Linie um ca. 2.5 km in nordwestlicher Richtung. Zur Berücksichtigung der Wirkung der Peridotite bei Balmuccia, Val Sesia (LENSCH, 1968), wurde ein zusätzlicher Elementarkörper (Nr. 81) modelliert.

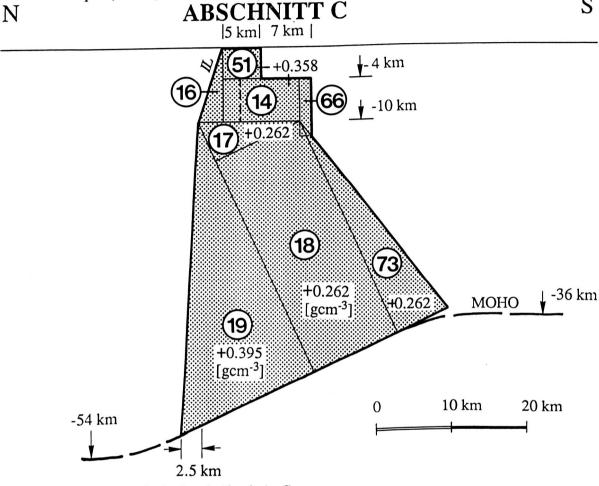


Abbildung 71: Querschnitt durch Abschnitt C.

Bedingt durch die geometrischen Grundelemente und durch Richtungswechsel zwischen benachbarten Abschnitten, entstehen Klaffungen oder "Massenverdopplungen", die im Falle der Nichtberücksichtigung in den Berechnungen unbeachtet bleiben. Bei kleinen Massenanteilen sind diese Einflüsse unter Umständen tolerierbar, bei grösseren bleibt die Wirkung zu gross, und die Spalten müssen mit Füllkörpern erfasst werden. Während dies beim Übergang zwischen den Abschnitten A und B durch zwei Füllprismen (Körper 71 und 72) geschah, erübrigt es sich beim Übergang von B zu C. Der Übergang zwischen den Abschnitten C und D hingegen ist besonders stark ausgeprägt und deshalb nicht vernachlässigbar. Die Kompensation der grossen Klaffungen erfolgte an dieser heiklen Stelle mit mehreren Füllkörpern: Nr. 52 (von -2 bis -5 km), Nr.30 (-5 bis -10 km), Nr. 26 (-10 km bis zur Moho), Nr. 86 (-10 km bis Moho) und Nr. 82 (Keil, ebenfalls von -10 km bis Moho).

7.3.1.4 Abschnitt D

Im Gebiet dieses Abschnitts sind wohl viele Daten vorhanden, sie konzentrieren sich aber meistens auf die Täler, wo sie oft in sehr kurzen Abständen gemessen sind. Eine bessere flächenhafte Stationsverteilung wäre zwar mit mehr Messaufwand verbunden, würde aber anderseits mehr Information einbringen. Die "Verjüngung" des Ivrea- Körpers entlang der Pogallo- Linie (PL) erforderte zur "Aushöhlung" der parallelen Quaderformen negative Reduktionsmassen. Die Körper Nrn. 74 und 75 ermöglichten diese Anpassungin Form einer Stufe bis in 5 km Tiefe. Derselbe Effekt wäre auch durch ein stetiges Einfallen der Pogallo-Linie in südlicher Richtung erklärbar. Die Modellierung dieser in sich gekrümmten Fläche wäre aber mit den Prismen recht mühsam. Die Oberfläche des Abschnitts liegt im Südwesten in einer Tiefe von 1.0 km (Nr. 53) und sinkt anschliessend auf 1.5 km ab. Im nördlichen Teil sind wiederum Peridotit- Linsen modelliert (bei Finero), die einen Dichtekontrast von 0.6 gcm⁻³ aufweisen. Wie der Querschnitt hier aussieht, zeigt Abbildung 72:

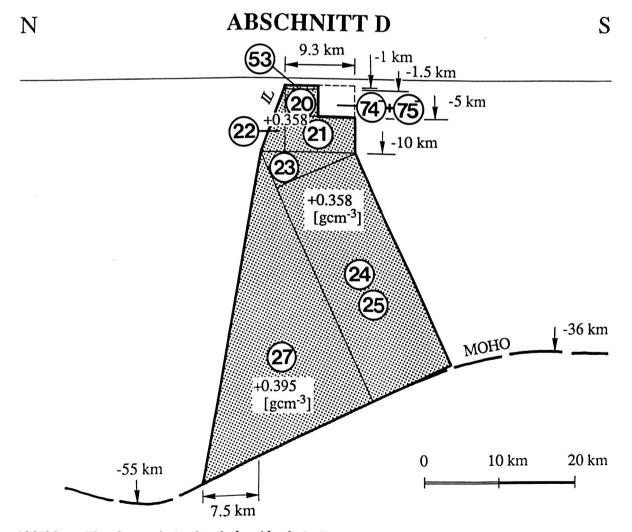


Abbildung 72: Querschnitt durch den Abschnitt D.

Ein wichtiges Interpretationsergebnis dieses Abschnitts besteht im markant nach Norden vordringenden Körper 27, dessen Nordflanke somit einer Fortsetzung der Insubrischen Linie bis zur Moho entsprechen könnte.

7.3.1.5 Abschnitt E

Der Aufbau dieses Abschnitts ist einfach: Der senkrecht stehende Keil (Nr. 32) folgt mit seiner längsten Seite der Insubrischen Linie von der Landesgrenze (Centovalli) bis in die Gegend von Magadino. Da der Keil 32 (Dichtekontrast + 0.311 gcm⁻³) einen grösseren Öffnungswinkel aufweist, als zwischen der Insubrischen- und der Pogallo- Linie zu beobachten ist, musste auch in diesem Abschnitt der südöstliche Teil mit "negativen" Massen entfernt werden (Körper 76), der die Tiefenlage der Oberfläche von Null auf -2.5 km absenkt. Im Gebiet des Maggia- Deltas zeigten die Residuen die Notwendigkeit eines weiteren Absenkens der Dreiecksspitze um 2 km mit Hilfe eines weiteren negativen Keils (Nr. 77). An der Ostseite besteht ein schmaler Verbindungskeil (Nr. 33, Dichtekontrast +0.211 gcm⁻³) zum Abschnitt G, für den die Messungen eine massive Senkung bis auf die Tiefe von -18 km

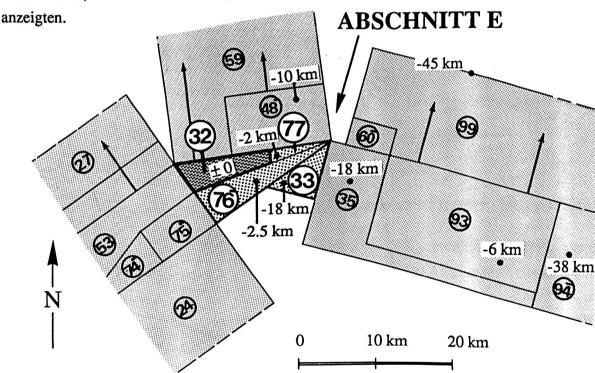


Abbildung 73: Grundriss des Abschnitts E (Körper 32, 76, 77 und 33) sowie der umgebenden Gebiete. Abschnitt E stellt den Übergang zu den in dieser Arbeit postulierten Fortsetzungen des Ivrea- Körpers in nördlicher und östlicher Richtung dar. Die angegebenen Tiefenwerte (z. B. -6 km) beziehen sich auf die Tiefenlage der Oberfläche der entsprechenden Teilkörper (weitere Details s. Querschnitte).

7.3.1.6 Abschnitt F

Auch dieser Abschnitt lässt sich mit wenig Aufwand beschreiben. Die darin enthaltene Aussage ist etwas kontrovers, durch die Messungen aber gut belegt: Die vorgeschlagene Massenverteilung steht im Widerspruch zu den bisherigen Auswertungen (z. B. SMPM Vol. 48/1). In einem Nord/Süd- Profil durch den Abschnitt F zeigen sich zwei Charakteristika: Erstens ist die bisherige Tiefenlage der Moho lokal, das heisst im westlichen Tessin zu tief und muss angehoben werden. Dies steht im Einklang mit der von ANSORGE et al (1987) durchgeführten Neubearbeitung der verfügbaren refraktionsseismischen Messungen. Im weiteren erfährt der Ivrea- Körper in Nordrichtung eine Gebietsausdehnung in Form eines in rund 50 km Tiefe auf die Moho laufenden Keils, dessen Breite fast 40 km beträgt. Der ausgeglichene hohe Dichtekontrast von +0.375 gcm⁻³(±0.008) spricht nicht gegen die Vermutung, dass es sich um Gesteine des Ivrea- Körpers handeln könnte. In Abbildung 74 ist ein N-S Längsschnitt dargestellt:

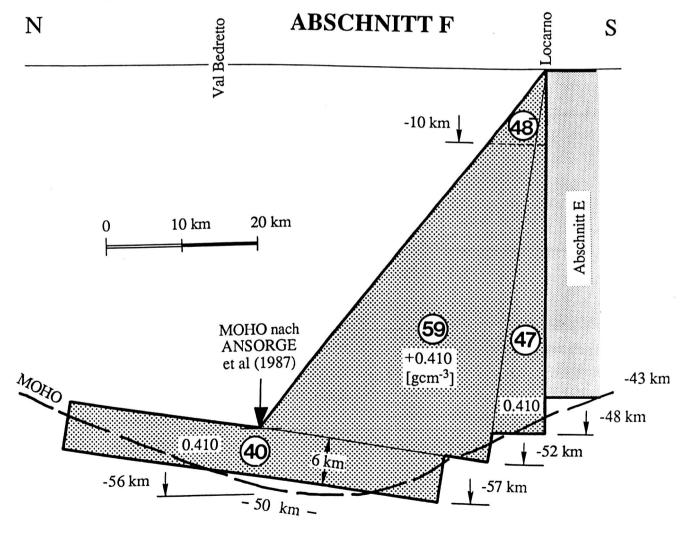


Abbildung 74: N-S Schnitt durch Abschnitt F vom Val Bedretto (links) zur Insubrischen Linie.

7.3.1.7 Abschnitt G

Wie in Abschnitt F, zeigen sich auch im Abschnitt G neue Gesichtspunkte: Einerseits scheint der Ivrea- Körper eine östliche Verlängerung von mindestens 14 km Breite unterhalb der Sprödbruchgebiete in der Umgebung der Tonalen Linie aufzuweisen. Der berechnete Dichtekontrast ist aber mit +0.1 gcm⁻³ gering. Anderseits ist kein Anzeichen einer Korrelation mit dem tektonischen Lineament auszumachen, da sich die Achsrichtung der Struktur in einem Azimut von 105° abzeichnet, während die Tonale Linie praktisch genau in östlicher Richtung verläuft. Im weiteren lässt sich aus den Messungen eine Undulation der Verlängerung in der Längsachse feststellen, die im Gebiet des Comersees eine tiefe, praktisch bis zur Moho hinunterreichende, Stufe bildet, die anschliessend wieder hochsteigt (Abb. 75 und 76). Auch wenn die Reduktionstiefen für den Comersee zu gering angesetzt sein sollten (FINCKH, 1978), lässt sich diese ausgeprägte Stufe nicht mit einer ungenügenden Seereduktion erklären. Dazu ist die beobachtete Amplitudenvariation zu gross.

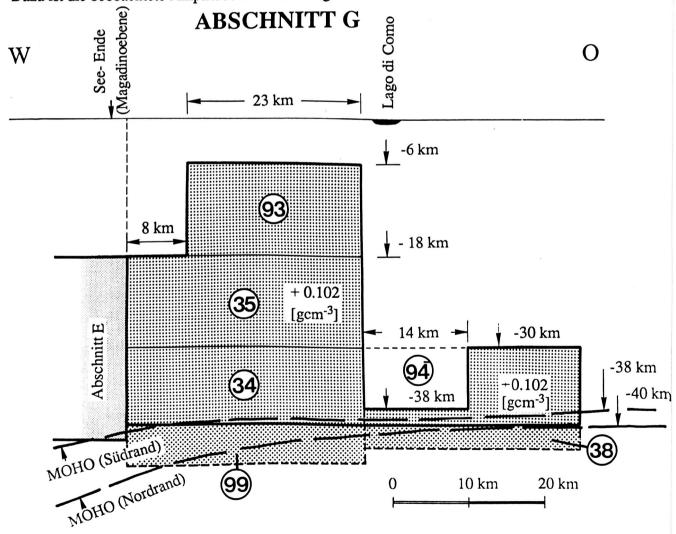


Abbildung 75: Schnitt entlang des Abschnitts G von der Magadinoebene in östlicher Richtung.

N ABSCHNITT G

S

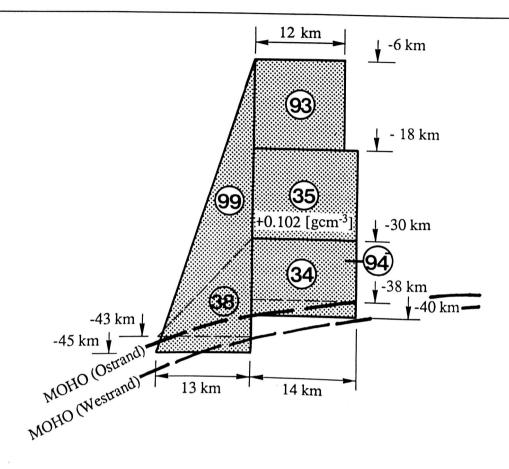


Abbildung 76: Querschnitt durch den Abschnitt G.

7.3.2 Zusammenfassung der Interpretationsresultate

Bei der Umrissdefinition an der Oberfläche des neuen Modells gab es soweit keinen Grund, von den geologisch zuverlässig kartierten Lineamenten der Insubrischen und der Pogallo-Linie abzurücken. Dies scheinen auch die Messungen zu bestätigen, die zwar immer noch gewisse systematische Residuen zeigen. Die Amplituden sind aber zu gering, um auf grössere Modellverfälschungen hinzuweisen. Es fällt dagegen auf, dass sich in den verbleibenden Residuen immer noch grosse Gradienten abzeichnen können, wie zum Beispiel im Valle d' Ossola. Die Residualschwereanomalien ändern sich dort innerhalb eines Kilometers um bis zu 13 mgal (!). Die Frage, ob die festgestellten Effekte duch eine extreme Gliederung der quartären Sedimentationsbecken, durch grosse Dichteschwankungen oberflächennaher geologischer Strukturen oder durch die Überlagerung mehrerer Effekte verursacht sind, lässt

sich durch weitere Modellierversuche nicht schlüssig beantworten. Wie die Arbeit von CAGIENARD et al. (1982) gezeigt hat, stösst die rein gravimetrische Modellierung in solchen Fällen an die Grenzen ihrer Anwendbarkeit, und die Lotabweichungen sind in zu grossen Abständen gemessen, um bei derart kurzwelligen Signalen noch etwas beitragen zu können.

Auch in andern Regionen zeichnen sich kleine Systematiken ab, die durch das Modell nicht vollumfänglich erfasst wurden; z. B. zwischen Bellinzona und dem Comersee. Sicherlich wäre es möglich, das Resultat durch Hinzufügen weiterer (Phantasie-) Strukturen noch weiter zu verbessern. Die Frage, wie sinnvoll ein solches Vorgehen ist, bliebe allerdings offen. Wie die Analyse der erreichten Genauigkeiten zeigt, ist die Varianz der Residuen in die Grössenordnung der im stochastischen Modell geschätzten Werte (s. Tabelle 2, Seite 64) gerückt. In Anbetracht des grossen Messgebietes und der speziellen topographischen Verhältnisse, die sowohl ebene, wie auch sehr gebirgige Gegenden mit einschliesst, scheinen diese Genauigkeiten als glaubwürdig und vernünftig. Eine wesentliche Steigerung ist kaum denkbar ohne neue Erkenntnisse weiterer quantitativer Untersuchungen (insbesondere seismischer Reflexionsmessungen).

Interessant war, festzustellen, wie sich die Genauigkeit der Ausgleichung im Laufe der Arbeit entwickelte: Für die erste Neukonstruktion, die auf dem Modell von WIRTH et al. (1987) aufbaute, und an einigen Stellen noch etwas "holprig" war, resultierte eine erste Genauigkeit von 3" bis 3.5" in der Lotabweichung und ca. 9 mgal in der Schwere. Die Ursache für die grossen Standardabweichungen war vor allem durch noch nicht berücksichtigte (d. h. bis dahin nicht erkannte) Geologie- Effekte bedingt. Diese zeigten sich erst nach der Trendabspaltung und der Aufzeichnung der Residuen. Die iterativ erarbeiteten Modellverbesserungen, die alle beschriebenen Effekte miteinschliessen, führten letztlich zu folgenden Genauigkeiten des Schlussmodells:

A priori- Werte:

mittlerer Einheitsfehler	σ_0	=	0.40
mittlerer Fehler der Residual-	$m_0(\xi,\eta)$	=	1.2"
Lotabweichungen mittlerer Fehler der Residual- Schwereanomalie	m(Δg)	=	4.0 mgal

A posteriori- Werte:

mittlerer Einheitsfehler

$$\sigma_0 = 0.47$$

mittlerer Fehler der Residual-

Lotabweichungen

mittlerer Fehler der Residual- Schwereanomalie

$m(\xi)$	=	1.5"
m(η)	=	1.5"
$m(\Delta g)$	=	4.5 mgal

Unbekannte (geschätzte Parameter):

Regionalfeld Offsets:

$$\Delta \xi_0 = -4.54 \text{ "} \pm 0.21 \text{"}$$
 $\Delta \eta_0 = 7.19 \text{ "} \pm 0.22 \text{"}$
 $\Delta g_0 = 7.14 \text{ mgal } \pm 1.30 \text{ mgal}$

Regionalfeld Trendparameter:

$$\partial \xi/\partial x = -0.016$$
 ± 0.06 ["/10 km]
 $\partial \xi/\partial y = 0.392$ ± 0.05 ["/10 km]
 $\partial \eta/\partial x = 0.289$ ± 0.06 ["/10 km]
 $\partial \eta/\partial y = 0.293$ ± 0.05 ["/10 km]
 $\partial \Delta g/\partial x = 3.845$ ± 0.24 [mgal/ 10 km]
 $\partial \Delta g/\partial y = -3.157$ ± 0.16 [mgal/ 10 km]

Dichtekontraste pro Gruppe¹⁾ (Zuordnung der einzelnen Körper zu den Gruppen s. Abb 67 - 74 und Verzeichnis im Anhang):

Gruppe 1: (Körper 1,3,4, 5)
$$\Delta \rho_1 = -0.157 \pm 0.018 \text{ [gcm}^{-3}\text{]}$$

Gruppe 2: (Körper 14, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 30, 36, 51, 52, 53, 88)
$$\Delta \rho_2 = -0.042 \pm 0.007 \quad [gcm^{-3}]$$

Gruppe 3: (Körper 32, 33, 74, 75, 76, 77)
$$\Delta \rho_3 = -0.089 \pm 0.008 \quad [\text{gcm}^{-3}]$$

¹⁾ Unter Gruppen werden hier Körper mit gleichem Dichtekontrast zusammengefasst

Gruppe 4: (Körper 9, 11, 12)
$$\Delta \rho_4 = -0.005 \pm 0.016 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 5: (Körper 17, 18, 73, 69)
$$\Delta \rho_5 = -0.138 \pm 0.015 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 6: (Körper 6, 13, 19, 27, 56, 57)
$$\Delta \rho_6 = -0.005 \pm 0.019 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 7: (Körper 40, 47, 48, 59)
$$\Delta \rho_7 = +0.010 \pm 0.008 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 8: (34, 35, 38, 60, 93, 94, 99)
$$\Delta \rho_8 = -0.098 \pm 0.007 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 9: (Körper 39, 45)
$$\Delta \rho_9 = -0.016 \pm 0.008 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 10: (Körper 44)
$$\Delta \rho_{10} = 0.005 \pm 0.008 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 11: (Körper 95)
$$\Delta \rho_{11} = -0.006 \pm 0.007 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 12: (Körper 96)
$$\Delta \rho_{12} = -0.018 \pm 0.016 \quad [gcm^{-3}]$$
Gruppe 13: (Körper 97)
$$\Delta \rho_{13} = -0.010 \pm 0.013 \quad [gcm^{-3}]$$

Bemerkung zu den Dichtekontrasten der Gruppen 9 - 13:

Die ausgeglichenen Dichtekontraste der Gruppen 9 bis 13 beziehen sich ausschliesslich auf geologisch bedingte Korrekturen, deren Geometrie auf Grundlage der geologischen Karte modelliert wurde. Diese Zusatzreduktionen wurden teilweise fest, und teilweise als Störkörper mit unbekannter Dichte eingeführt. Das numerische Verzeichnis mit Angabe der Koordinaten

und der verwendeten geometrischen Grössen ist im Anhang aufgeführt.

Ausgehend von den Näherungswerten ergaben sich folgende ausgeglichene Dichteunterschiede für die geologischen Korrekturen:

Gruppe 9: Restkorrektur für die Reduktion der Po- Sedimente

 $\Delta \rho_0(9) = -0.05 \quad -0.016 \quad = \quad -0.066 \text{ [gcm}^{-3}$]

Gruppe 10: Paragesteine im Gebiet des Penninischen Deckenstapels

(Suretta-, Tambo- und Adula- Decken)

 $\Delta \rho_0(10) = -0.05 + 0.005 = -0.045 \text{ [gcm}^{-3}\text{]}$

Gruppe 11: Gneise der Antigoriodecke im Gebiet Val Divedro - Valle Antigorio

 $\Delta \rho_0(11) = -0.07$ $-0.006 = -0.076 [gcm^{-3}]$

Gruppe 12: Mesozoikum (Bündnerschiefer / Ophiolite) in der Gegend des

Passo S. Giacomo - Val Bedretto - Leventina

 $\Delta \rho_0(12) = +0.05 \quad -0.018 \quad = +0.032 \text{ [gcm}^{-3]}$

Gruppe 13: Bündnerschiefer/Ophiolitdecken im Gebiet Aosta - Zermatt

 $\Delta \rho_0(13) = +0.100 -0.010 = +0.090 [gcm^{-3}]$

Weitere, nicht vom Ivrea- Körper stammende Reduktionen, bei denen die Dichtekontraste festgehalten wurden:

Körper 43: Vertiefung der Moho um 5 km von 54 auf 59 km im Gebiet

Val Sesia - Domodossola - Valle Antigorio.

Dichtekontrast: 0.4 gcm⁻³.

Körper 60,61: Zusatzreduktion für die Sedimente des Toce, bei Gravellona, Valle

d' Ossola. Dichtekontrast : -0.2 gcm⁻³.

Körper 62 : Zusatzreduktion für die mesozoischen Ophiolite östlich Chiavenna.

Dichtekontrast: $+0.1 \text{ gcm}^{-3}$.

Körper 63 : Zusatzreduktion für die Sedimente der Mera, südlich Chiavenna.

Dichtekontrast: - 0.2 gcm⁻³.

Körper 64: Zusatzreduktion für die innerhalb der Bündnerschiefer /

Ophiolitdecken in der Gegend des Valpelline vorkommenden

Kinzigite (Körper 97 im Verzeichnis).

Dichtekontrast: +0.1 (von Körper 97) +0.15 gcm⁻³ = +0.25 gcm⁻³.

Körper 65 : Zusatzreduktion für die Gesteine der II. Kinzigit- Diorit- Zone.

Dichtekontrast: $+ 0.15 \text{ gcm}^{-3}$.

Jeglicher Versuch einer Zusammenfassung der Interpretationsresultate wäre unvollständig ohne Vergleich mit bisherigen Ergebnissen, insbesondere mit dem Modell von KISSLING (1980). Die Gemeinsamkeiten sowie die sich abzeichnenden Unterschiede werden deshalb in der Folge beleuchtet und näher beschrieben.

Erwähnenswert ist zunächst der generell festzustellende Unterschied im Unterbau des Ivrea-Körpers zu den bisherigen Modellen. Im neuen Modell ist keine Überschiebung des Störkörpers über leichteres Material mehr festzustellen: Im Südteil steht die nördliche Abgrenzungsfläche des Körpers ab einer Tiefe von 10 km senkrecht, gegen Norden beginnt sie sich in der Tiefe immer mehr in Richtung des Alpenbogens auszudrehen, um nördlich von Locarno (s. Abschnitt F) einen maximalen Einfallswinkel von knapp 40° zu erreichen. Hier stösst sie in der Tiefe auf die Moho, die nach neusten Erkenntnissen an dieser Stelle aufgewölbt ist (ANSORGE et al., 1987).

Dieser typische Querschnitt zeigt sich auf Grund der Messungen, wenngleich sie auch im Widerspruch zu den seismisch festgestellten Zonen verminderter Ausbreitungsgeschwindigkeiten steht (GIESE, 1968, ANSORGE, 1968). Eine gewisse Unklarheit bestand beim "alten" Modell, indem sich für die von KISSLING (1984) dokumentierte sog. Tessinanomalie vorerst keine Erklärung fand. Die von KISSLING (1984) vermutete intrakrustale Störung, die im Zusammenwirken mit einer Erhöhung der Krusten / Mantel-Grenze die Anomalie bewirkt, konnte mit unseren Auswertungen bestätigt werden. Offen bleibt immer noch die Frage der Zuordnung dieser Massen zum Ivrea- Körper oder allenfalls zu einem anderen selbständigen Komplex, der mit dem Ivrea- Körper keinen Zusammenhang aufweist. Die ermittelten Dichtekontraste liegen im Bereich der Werte des Ivrea- Körpers, was eher für eine nördliche Verlängerung desselben sprechen dürfte, auch wenn die Insubrische Linie als trennende Bruchzone den Komplex durchläuft.

Anders ist es im Falle der postulierten östlichen Verlängerung (Abschnitt G), die als eine Art

"Verbindungsrücken" zwischen dem Lago Maggiore und dem Comersee betrachtet werden kann. Da diese Struktur einen deutlich geringeren Dichtekontrast aufweist, könnte es sich hier eher um eine eigenständige Einheit handeln, die mit dem Ivrea- Körper in keinem direkten Zusammenhang steht und demnach eher als eine andersartige Krustenstruktur zu betrachten wäre. Die Modellierung wurde in diesem Teil bewusst einfach gehalten, da sich keine weiteren Anhaltspunkte anboten. Dies wird sich mit den zu erwartenden Resultaten der für Herbst 1988 geplanten reflexionsseismischen Untersuchungen im Rahmen des NFP20- Projektes möglicherweise ändern. Der geringe Dichtekontrast garantiert indessen noch keine "Sichtbarkeit" der vorgeschlagenen Struktur auf den Seismogrammen, die sich bereits in den Auswertungen von DEICHMANN et al. (1986) hätten abzeichnen müssen. Es bleibt abzuwarten, ob die seismischen Messungen auch Hinweise auf die starke Abstufung im Gebiet des Comersees (Abb. 70) geben werden. Die Abklärung der Fragen, wie sich die postulierte Massenverteilung tektonisch erklären lässt, ob es sich dabei möglicherweise um erodierte und wegtransportierte Überreste eines ehemaligen Teils des Ivrea- Körpers handelt und warum keine Korrelation der Struktur mit der Tonale- Linie festzustellen ist, muss späteren Diskussionen mit Experten der Geophysik und der Geologie überlassen werden.

Zur Abrundung der geodätisch / geophysikalischen Interpretationsresultate folgen abschliessend einige dokumentierende graphische Darstellungen: Die beiden Abbildungen 77 und 78 zeigen Ansichten des Ivrea- Körpers aus verschiedenen Perspektiven, und die Darstellungen 79-83 zeigen die berechneten Modellwirkungen in den verschiedenen Messkomponenten. Die Darstellungen des Ivrea- Geoids (Abb. 84, 85) runden schliesslich die graphische Dokumentation ab.

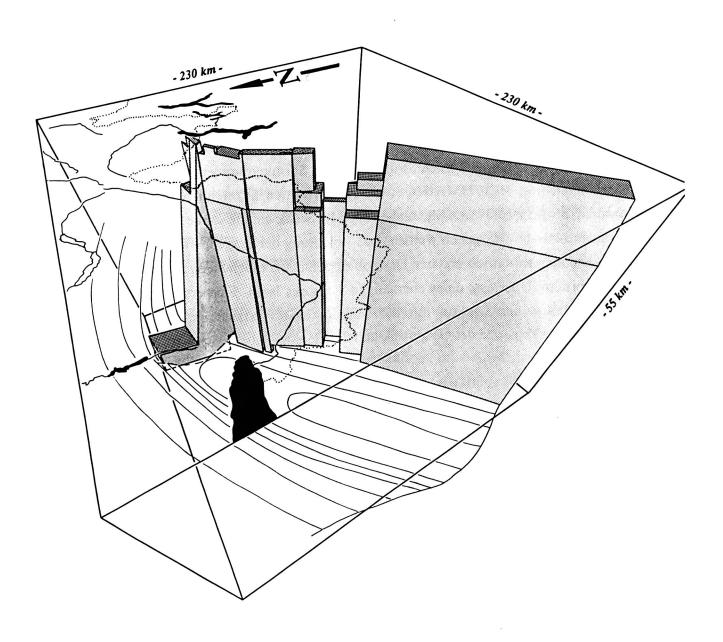


Abbildung 77: Ansicht des Ivrea- Modells aus Nordwesten. In der Bildmitte ist die im Text beschriebene Absenkung der Struktur sichtbar, und links unten schiebt sich die in Form eines liegenden Quaders modellierte MOHO- Aufwölbung über die Rinne. Darauf aufgesetzt ist die vorgeschlagene nördliche Ausweitung des Ivrea- Körpers, die mit einem Keil modelliert wurde. Als Orientierungshilfe dient der schwarze Fleck im Vordergrund, der das östliche Ende des Genfersees darstellt.

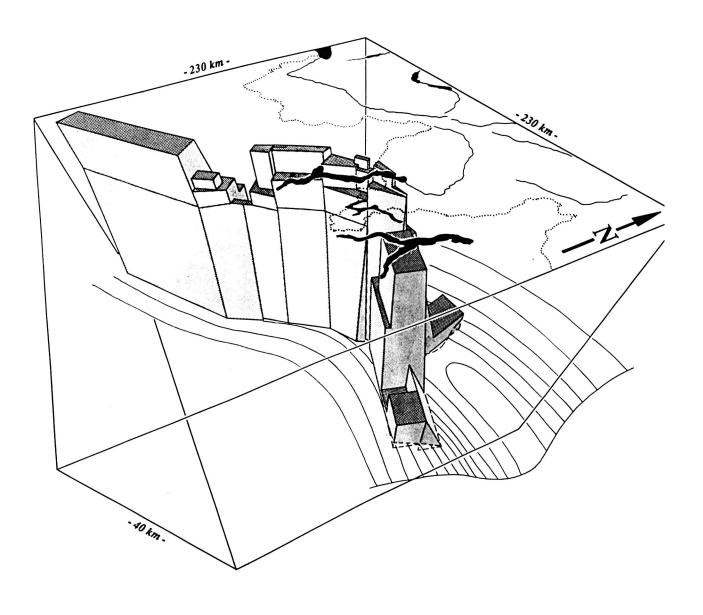


Abbildung 78: Ansicht des Ivrea-Körpers aus Osten. Im Vordergrund zeigt sich die Fortsetzung in östlicher Richtung, für die ein Dichtekontrast von +0.1 gcm⁻³ berechnet wurde.

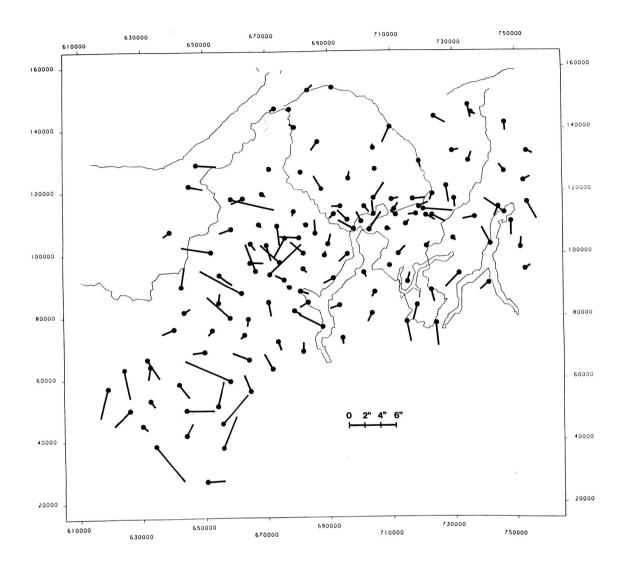


Abbildung 79: Darstellung der Differenzen zwischen den beobachteten und den berechneten Lotabweichungen des neuen Ivreakörper- Modells. Die auf jeder Messstation eingetragenen Striche markieren die Abweichung der astronomisch bestimmten Lotrichtung gegenüber dem rechnerischen Sollwert. Der Betrag der Lotabweichungen in ["] geht aus der Skala innerhalb der Figur hervor.

Wie lassen sich die in Abb. 79 dargestellten Differenzen qualitativ interpretieren? Die im südlichsten Punkt dargestellte Abweichung der Zenitrichtung zeigt z. B. nach Osten, was darauf hindeuten könnte, dass sich entweder westlich der Messstation eine Masse mit erhöhter Dichte, oder östlich davon eine mit erniedrigter Dichte befindet, die die Lotrichtung im gleichen Mass "abzustossen" vermag, wie sie die positive anzieht. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass es sich um eine positive Masse westlich der Station handeln könnte, denn die nächstgelegenen Stationen im Norden zeigen eine entsprechende Tendenz an.

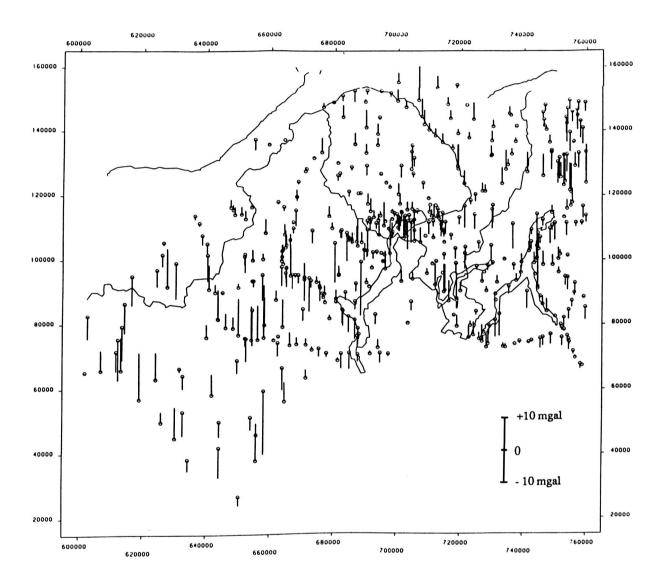


Abbildung 80: Nach der Interpretation verbleibende Differenzen in [mgal] zwischen den berechneten Schwerewirkungen des Modells und den gemessenen Residual-Schwereanomalien.

Eine positive, also nach oben eingezeichnete Schwereanomalie, zeigt einen Massenüberschuss des Modells an, während Messpunkte mit nach unten gerichteten Residuen ein Defizit markieren, wo das Modell zu wenig Massen oder zu geringe Dichtekontraste aufweist.

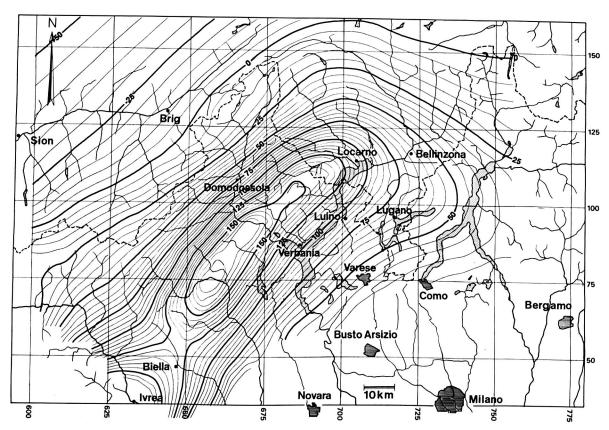


Abbildung 81: Berechnete Schwerewirkung des neuen Ivrea-Modells in [mgal].

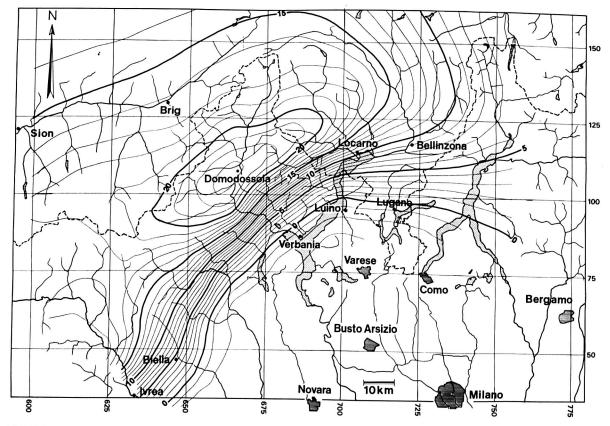


Abbildung 82: Berechnete ξ- Komponente der Lotabweichung des Ivrea- Modells in ["].

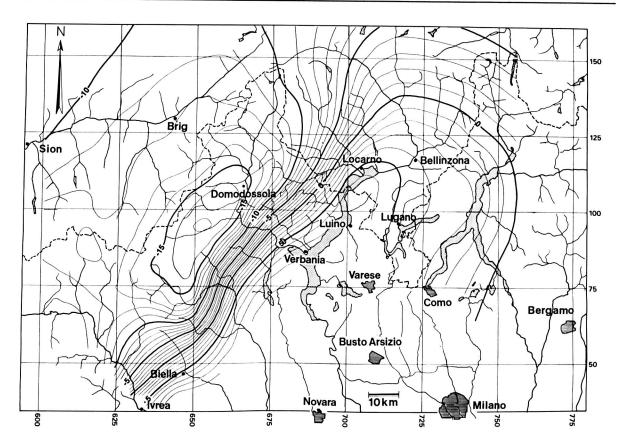


Abbildung 83: Berechnete η -Komponente der Lotabweichung des Ivrea-Modells in ["].

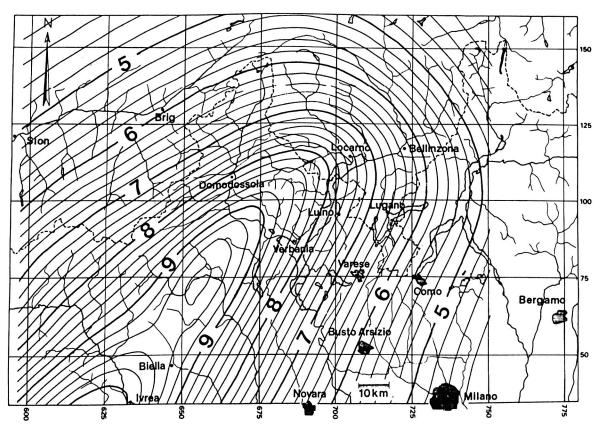


Abbildung 84: Geoid (Anteil) des Ivrea-Körpers in [m].

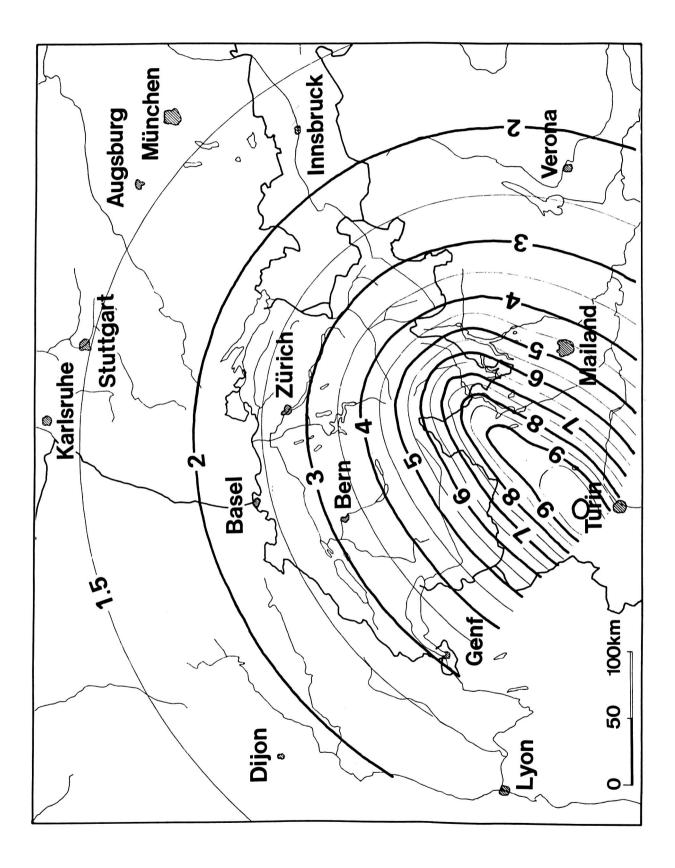


Abbildung 85 : Geoid (Anteil) in [m] des Ivrea- Körpers, über die Landesgrenzen hinaus.

8. Schlussbemerkungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezielt versucht, durch Kombination gemessener gravimetrischer und astronomischer Daten die von der prägnantesten Störmasse Europas (Zone von Ivrea- Verbano) verursachten Signale so genau wie zur Zeit möglich zu bestimmen und zu interpretieren. Der Dichtekontrast von ca. 0.4 gcm⁻³ dieses ausgedehnten Störkörpers gegenüber der ungestörten mittleren Krustendichte von 2.67 gcm⁻³ bewirkt im Betrag der beobachtbaren Schwerevektoren Änderungen bis zu 170 mgal (1 mgal = 10⁻⁵ ms⁻²). Die entsprechenden Abweichungen der Lotlinie (Lotabweichungen) von der Normalenrichtung des Referenzellipsoids erreichen Werte von rund 30 (!) Bogensekunden in beiden Komponenten.

Die Interpretation von gemessenen Schwereanomalien und Lotabweichungen ist bisher in der Literatur eher selten zu finden. Vor allem im Gebiet des Nördlinger Ries, des Rheingrabens und in Norditalien hat es solche Versuche gegeben (z. B. KAHLE, 1969, TUGLUOGLU, 1971, WASSOUF, 1975, MÖNIKE, 1981). Die meisten der sonst durchgeführten Interpretationen beschränkten sich auf bestehende Messungen der einen oder anderen Schwerefeldkomponente: Eine Bearbeitung gezielt ausgeführter Messungen mit einer anschliessenden konsequenten dreidimensionalen Kombination beider Informationen auf der Grundlage einer problemorientierten Ausgleichungsrechnung fehlte bisher weitgehend.

Obwohl mit den Integralformeln von VENING MEINESZ (1928) theoretisch die Lotabweichungen in beliebigen Punkten berechnet werden können, war man auf die Messung der tatsächlichen Lotrichtung angewiesen. Die Anwendung der erwähnten Formeln führt insbesondere im Ivrea- Gebiet zu grossen Schwierigkeiten: Das erste Problem besteht dabei in der in weiten Bereichen variierenden Abhängigkeit der Schwereanomalien von der Höhe, die in Gebieten wie in der Ivrea- Zone von einem normalerweise positiven Gradienten (zunehmende Anomalien bei zunehmender Stationshöhe) zu einem negativen Gradienten wechseln können (KUHN, 1981). Ein weiteres Problem besteht in der Anisotropie der für die Interpolation benötigten Autokorrelationsfunktion der Schwereanomalien. Diese hängt stark von der Topographie ab, und lässt sich in einem grossen, stark gegliederten Messgebiet (das Messgebiet streicht im wesentlichen entlang des Alpenbogens und umfasst unterschiedliche topographische Verhältnisse) nicht mit der benötigten Genauigkeit bestimmen. Diese beiden Erschwernisse verunmöglichen letztlich genügend genaue Interpolationen, die ihrerseits eine unabdingbare Voraussetzung zur Anwendung der Integralformeln darstellen.

Aus der Vorgabe, im Ivrea- Gebiet gezielte Messungen von allen Parametern durchzuführen, auszuwerten und für die Interpretation aufzuarbeiten, ergab sich die Formulierung mehrerer

Projekte, deren geodätisch/ geophysikalische Auswertungen mit der vorliegenden Arbeit ihren vorläufigen Abschluss findet.

- Ein erster Schwerpunkt der Arbeit bestand zunächst in der Beschaffung und Inbetriebsetzung eines geeigneten Hardwaresystems für die astro- geodätischen Lotrichtungsbestimmungen. Die am Institut für Erdmessung der Technischen Universität Hannover (Proff. Torge und Seeber) entwickelten transportablen Zenitkameras TZK1 und TZK2 zeichnen sich durch Wirtschaftlichkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit aus. Aus diesem Grund wurde 1981 in Hannover ein neues Kamerasystem in Auftrag gegeben und 1982 erstmals in Betrieb genommen.

Während der optische Teil der neuen TZK3 der Ausführung des Vorgängermodells TZK2 entspricht, wurde die Steuerelektronik der Kamera von uns in zwei Schritten verbessert und mit Mikroprozessor und Halbleiter- Datenspeicher ausgerüstet. Diese Steuerung gewährleistet einen weitgehend automatisierten Beobachtungsablauf. Grundlage zu dieser Entwicklung bildete das am IGP entwickelte Zeitmessgerät TDU (Time Digitizing Unit), das auch für die Steuerelektronik zur Zenitkamera der Universität Rom Verwendung fand. Die bisherigen Erfahrungen mit den verschiedenen Zenitkameras waren durchaus positiv und belegen die Wirtschaftlichkeit dieses modernen Instumententyps: In mehreren Nächten konnten bis zu 8 Stationen pro Kamera beobachtet werden.

Für die Ausmessung der Filme diente der am IGP (Professur Photogrammetrie) vorhandene Stereokomparator STK1 von WILD. Dieses Koordinatenmessgerät wurde im Rahmen dieser Dissertation modernisiert und mit einer Computersteuerung inkl. automatischer Positioniermöglichkeit mittels Gleichstrom- Servomotoren ausgerüstet. Durch die Computer-Unterstützung während der Ausmessung lassen sich die Zenitkamera- Filme in kurzer Zeit und ohne weitere Vorbereitung ausmessen. Damit waren die logistischen Voraussetzungen zur Durchführung der umfangreichen astro- geodätischen Feldmessungen geschaffen. Diese Feldarbeiten bildeten den Kern einer ersten internationalen Messkampagne, die unter der Mithilfe aller europäischen Institutionen, die über eine Zenitkamera verfügen, im Herbst 1983 zur Durchführung gelangte. Dank der guten Zusammenarbeit und der verdankenswerten Beteiligung der Teilnehmer bei den Auswertungen, lagen bereits 1984 die ersten Lotrichtungsbestimmungen vor.

- Eine grosse Anzahl von Schweremessungen wurde im Ivrea-Gebiet von Mitarbeitern des Instituts für Geophysik (IG) der ETHZ ausgeführt (KISSLING, 1980, SCHWENDENER, 1984). Die freundlicherweise vom IG zur Verfügung gestellten

Messungen stellten eine wichtige Grundlage des gesamten gravimetrischen Beobachtungsmaterials dar. In den Jahren 1983 - 86 folgten weitere ergänzende Schweremessungen von Seiten des IGP, die hauptsächlich auf den astronomischen Messstationen erfolgten (SANTINI, 1984). Damit stand für die Interpretation ein Datensatz von insgesamt 491 Schweremessungen zur Verfügung.

- Dass die Bestimmung der **geodätischen** Koordinaten in einem grenzüberschreitenden Gebiet besondere Probleme aufwirft, war von Beginn weg abzusehen. Aus diesem Grund erfolgte die Koordinatenbestimmung aller in Italien gelegenen Astro- Stationen mit Doppler-Empfängern vom Typ Magnavox MX 1502 im Translokations- Modus; während den Dopplermessungen in Italien war stets ein zweiter Empfänger in Zimmerwald oder in Zürich als Referenzstation in Betrieb. In der letzten Phase dieser Arbeit wurden auch bereits GPS-Empfänger getestet. Sie werden in Zukunft für diese Zwecke eingesetzt werden.
- Die Berechnung der Residual- Anomalien erfordert die Abspaltung aller Signalanteile, die die Wirkung der zu interpretierenden Struktur überlagern. Für die quantitative Berechnung solcher Effekte benötigt man aufwendige digitale Modelle. Für die Reduktion der Lotabweichungen und Schwereanomalien wurden folgende Effekte mit digitalen Modellen berechnet und von den Messwerten abgespalten: Topographie, Moho- Diskontinuität, Sedimente der Po- Ebene, quartäre Talfüllungen, Seeflächen, Geologie des Ivrea- Gebiets. Im Zusammenhang mit den Massen- Reduktionen stellt sich auch die Frage der Abspaltung des Residualfelds und, damit verknüpft, die Einflüsse der Ellipsoidlagerung.
- Die Auswertung und Analyse der ersten astro- gravimetrischen Daten hatte gezeigt, dass die Massenverteilung des Ivrea- Körpers ein weiteres Gebiet umfasst, als die bisherigen Modelle. In einem erweiterten Gebiet planten wir deshalb neue Messungen, die, wiederum mit Beteiligung des Instituts für Erdmessung der TU Hannover, im Spätsommer 1985 ausgeführt wurden. Im Herbst 1986 folgte schliesslich die letzte Ivrea- Kampagne mit der TZK3. Zusammen mit älteren Messungen der Schweizerischen Geodätischen Kommission ergab sich letztlich ein Datensatz von insgesamt 166 Stationen mit 302 Komponenten der Lotabweichung.
- Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts bestand in der Bereitstellung eines geeigneten Ansatzes zur gemeinsamen Interpretation der astronomischen und gravimetrischen Daten. Diesen Problemstellungen war ein grosser Teil der Arbeiten von WIRTH (1985) gewidmet. Das daraus entstandene Programm LOBOS (LOtabweichungen und BOuguer- Anomalien aus Störkörpern) berechnet die Wirkung beliebig gelagerter Massenstrukturen. Die Wirkungen der Störmassen, die sich aus Rechtecks- und Dreiecksprismen zusammensetzen, werden mit den

strengen Formeln für die entsprechenden Elementarkörper in jedem Messpunkt berechnet. In der Ausgleichung können sämtliche Unbekannte gleichzeitig (d. h. in einem einzigen Berechnungsgang) bestimmt werden. Zudem liefert die Ausgleichung die aus den verbleibenden Restabweichungen berechneten Genauigkeiten der Unbekannten.

Als Unbekannte können folgende Parameter in die Ausgleichung einfliessen: 9 Parameter für die Abspaltung des Regionalfeldes, zusätzlich Dichtekontraste von einzelnen oder zusammengefassten Gruppen von Körpern sowie deren Lage, Grösse und räumliche Orientierung. Die gleichzeitige Schätzung aller Unbekannten macht ein stufenweises Vorgehen (Bestimmung der Residual- Anomalien, Reduktion aller bekannter Störungen, Abspaltung des Regionalfeldes) überflüssig. Die Möglichkeit des Einbezugs zusätzlicher oberflächennaher Störkörper in die Ausgleichung zur Reduktion von geologischen Effekten hat sich bei den Interpretationen als besonders nützlich erwiesen.

Dank dem gezielten Einsatz von transportablen Zenitkameras konnte die Anzahl der astronomischen Lotrichtungsbestimmungen innerhalb weniger Jahre praktisch verdoppelt werden. Die Beobachtungsdaten bildeten einerseits die Grundlage zur Interpretation des Ivrea-Körpers, anderseits spielen sie für die Geoidberechnung eine wesentliche Rolle. Die nunmehr vorhandene Punktdichte (s. auch Karte im Anhang) erlaubt es, die Feinstrukturen des Geoids in diesem bislang heiklen Gebiet mit einer Genauigkeit von wenigen cm zu bestimmen (MARTI, 1988). Wie die Ausführungen zu den Kapiteln 3, 6 und 7 zeigen, können die verschiedenen Daten in einem geeigneten Ausgleichungsmodell problemlos kombiniert werden.

Im Hinblick auf die Interpretation der Messungen, insbesondere der Schweremessungen, muss an dieser Stelle ausdrücklich auf die Effekte der lokalen Geologie hingewiesen werden. Selbst die vielerorts vernachlässigten quartären Talfüllungen erreichen Werte, die die angestrebte Interpretationsgenauigkeit bei weitem übertreffen. Darüberhinaus zeigten sich entlang von dichtvermessenen Strecken in Tälern grosse Änderungen, die vermutlich mit der lokalen Geologie und der Form der Sedimenttröge in engem Zusammenhang stehen. Ihre Vernachlässigung kann die Güte einer Interpretation stark herabmindern. Im weiteren haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Abspaltung des Regionalfelds mit Trendflächen sinnvoll ist, da der langwelligen Wirkung der grossräumigen Massenverteilung der Effekt der Ellipsoidlagerung überlagert wird.

Die praktische Anwendung der beschriebenen Grundlagen führte zu einem Vorschlag für ein neues geodätisches Modell des Ivrea- Körpers. In dem von uns vorgeschlagenen Modell fallen

hauptsächlich zwei Eigenschaften auf:

- Die bisherige "Vogelkopfform" konnte mit unseren Messungen nicht bestätigt werden. Die Abgrenzung entlang der Insubrischen Linie verläuft ab einer Tiefe von ca. 12 km nicht nach Süden einfallend, sondern senkrecht oder nach Norden einfallend. Extrem äussert sich diese Eigenschaft in der Umgebung von Locarno, wo ein massiver Keil in Richtung Val Bedretto von der Oberfläche bis zur Moho hinunter festzustellen ist, die in dieser Region um ca. 6 km höher liegt, als die älteren Moho- Karten anzeigten.
- Ob es sich bei der im Osten festgestellten Verlängerung tatsächlich um eine Fortsetzung des Ivrea- Körpers handelt, oder ob lediglich Krustenstrukturen für die Anomalie verantwortlich sind, müsste mit weiteren Untersuchungen abgeklärt werden. Jedenfalls dürften in diesem Gebiet weitere Messungen wichtige Hinweise zur Beantwortung dieser Fragen liefern. Solche Messungen könnten zum Beispiel die Frage beantworten, ob sich die in den Residualanomalien gut sichtbare Verlängerung nach Osten bis zum Schwerehoch von Verona in Verbindung bringen lässt (MUELLER und TALWANI, 1971).

Allgemein kann gesagt werden, dass die vorgeschlagene und angewandte Methodik für geodätisch / geophysikalische Interpretationen geeignet ist. Die letztlich erhaltenen Varianzen der Differenzen zwischen den Messungen und den berechneten Modellwirkungen konnten in die Grössenordnung der im stochastischen Modell der Ausgleichung geschätzten Werte gesenkt werden. Dies deutet darauf hin, dass das Modell mit den Beobachtungen gut übereinstimmt. Der Vergleich der berechneten Modell- Wirkungen mit den beobachteten bestätigt die gute bis sehr gute Übereinstimmung (vgl. dazu die Abbildungen 57 / 81, 58 / 82 und 59 / 83).

Bei der Beurteilung des neuen Modells ist allerdings zu beachten, dass die Interpretation aus potentialtheoretischen Gründen nicht eindeutig sein muss. Aus der Sicht des Geophysikers dürfte es sich daher eher um ein Alternativmodell als um ein neues Modell handeln, das zu der seismisch beobachteten Inversionszone im Unterbau des Ivrea- Körpers im Widerspruch steht. Die vorgelegte Lösung darf allerdings den Anspruch erheben, mit den zur Zeit verfügbaren astro- gravimetrischen Daten vollumfänglich im Einklang zu stehen. Es wäre wünschenswert, das erarbeitete Modell des Ivrea- Körpers mit zukünftigen seismischen Messungen detailliert vergleichen zu können. In diesem Sinn würden neue, gezielt durchgeführte seismische Messungen quer durch die Ivrea- Zone, z. B. im Gebiet Val Strona / Val Sesia, sehr viel zur weiteren Erforschung der Struktur des Ivrea- Körpers beitragen.

•

Ausblick zu weiteren instrumentellen Entwicklungen:

Mit Ausnahme der Höhenbestimmung und in reduziertem Rahmen auch der Lagebestimmung, die nach wie vor ein Problem bei gravimetrischen Engvermessungen in messtechnisch unerschlossenen Gebieten darstellen, ist die Verwendung von Gravimetern bereits heute problemlos. Die Ablesung der Messwerte könnte mit einem geeigneten Datenerfassungsgerät auf digitaler Basis schneller und zuverlässiger erfolgen. Ein angeschlossener Kleinrechner könnte die Auswertungen inklusive den Gezeitenreduktionen bereits im Feld ausführen und so die Messungen und die Instrumentendrift kontrollieren. Erste Ansätze in dieser Richtung sind bereits auf dem Markt.

Für die Zenitkamera bestehen potentiell gute Möglichkeiten weiterer Verbesserungen. Trotz den Wetterbedingungen, die naturgemäss auch in Zukunft die Einsatzmöglichkeiten aller optischen Verfahren einschränken werden, zeichnen sich echte Verbesserungsmöglichkeiten durch den neuen Sternkatalog ab, dessen Beobachtung im Rahmen der für 1989 geplanten HIPPARCOS- Mission der ESA vorgesehen ist. Mit dem HIgh Precision PARallax COllecting Satelllite ist primär die Schaffung eines neuen hochgenauen Sternkatalogs vorgesehen. Dieser Katalog wird rund 100 000 bis 120 000 Sterne umfassen, deren Position, Eigenbewegung und Parallaxe auf ca. 0.002" genau bestimmt sind (BASTIAN, 1987). Dank diesem hochgenauen Sternkatalog, der den bisher verwendeten AGK3- Katalog ersetzen wird, ist eine Genauigkeitsverbesserung zu erwarten. Die Genauigkeit der AGK3- Positionen beträgt ca. 0.4 bis 0.5 Bogensekunden. Der Katalog weist darüberhinaus gewisse lokale systematische Fehler aus, die bereits in den Zenitkamera- Auswertungen feststellbar sind. Geichzeitig zeigt sich hier ein Vorteil der photographischen Aufnahme: die Datenträger sind auch nach Jahren noch verfügbar, und die Auswertungen können allenfalls wiederholt und mit einem neuen Sternkatalog als Bezugssystem neu ausgewertet werden.

Trotz dieses Vorteils wäre bei Neuentwicklungen die direkte Messung der Bildkoordinaten der Sternspuren wünschbar. Damit wäre die wichtigste Grundlage einer Echtzeit- Auswertung geschaffen. Auf dem Markt sind bereits mehrere Typen von Sensoren erhältlich, mit denen sich Positionskoordinaten von abgebildeten Lichtpunkten direkt messen lassen. Am einfachsten dürften sich die neuen CCD- Bausteine (Charge Coupled Devices = Lichtempfindliche Halbleiter mit sehr kleinen Elementen in Rasteranordnung) für solche Anwendungen eignen.

Aus den Bedürfnissen der Raumfahrttechnik entstanden auch andere optische Sensorsysteme, für Positionierungs- und astrometrische Aufgaben (z.B. die Image Dissector Tube (IDT), ein

im Satelliten HIPPARCOS eingesetzter hochempfindlicher Detektor (VAN DER MAREL, 1988) oder verschiedene sog. star/sun- tracker- Sensoren des französischen Herstellers SODERN. Die Verbesserung solcher elektronischer Messsysteme wird die Entwicklung von leichten Messsystemen ermöglichen. Untersuchungen in Richtung automatisierter Zenitkamerasysteme wurden von HELLER et al (1982), HELLER et al (1983) sowie von HERRING (1973) publiziert. Die bestehenden Möglichkeiten einerseits und die Bedürfnisse der Praxis anderseits dürften dazu führen, dass man in absehbarer Zeit die bis heute verwendete photographische Abbildung durch eine elektronische Abtastung des Bildes ersetzen kann. Mit dem Einsatz eines batteriebetriebenen Rechners wird die Auswertung ohne Zeitverlust durchzuführen sein. Welche Genauigkeiten erzielbar sind und wie lange die minimalen Beobachtungszeiten für die Lotrichtungsbestimmung sein werden, hängt primär von der technologischen Entwicklung der Sensoren ab und ist schwer abzuschätzen.

Im Rahmen des Ivrea- Projektes kamen zur Bestimmung geodätischer Koordinaten zwei Dopplergeräte des IGP zum Einsatz. Diese Methode erforderte viel Aufwand und ausserdem die sorgfältige Dokumentation aller Messpunkte (Abb. 38, S. 78), da die Dopplermessungen in der Regel zeitverschoben zu den astronomischen Messungen ausgeführt wurden. Zur Umgehung dieser Probleme können in Zukunft kostengünstige GPS- Empfänger eingesetzt werden. Da die Beobachtungsdauer der Zenitkameramessungen auch für die hier geforderte Genauigkeit der GPS- Messung ausreicht, wird man in Zukunft auf die Punktprotokolle verzichten können, was eine nicht zu unterschätzende Vereinfachung bringen dürfte. Die Wahl der Stationierung im Feld wird daher an keine Fixpunkte mehr gebunden sein. Auch das Problem der gravimetrischen Koordinatenbestimmung liesse sich damit sehr effizient lösen.

Das Verfahren hat gezeigt, dass die integrale Schwerefeldbestimmung nicht nur für die Interpretation von Massenstörungen, sondern auch zur Geoidbestimmung geeignet ist. Die gemeinsame Verarbeitung aller Komponenten des Schwerevektors sollte deshalb vermehrt auch in Richtung der kombinierten Geoidberechnung unter Einbezug von Massenmodellen zur Verbesserung der Interpolationsmöglichkeiten erfolgen.

9. Literaturverzeichnis

- ANSORGE, J. (1968): Die Struktur der Erdkruste an der Westflanke der Zone von Ivrea. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen (SMPM), Vol. 48/1, S. 247 254.
- ANSORGE, J., E.KISSLING, N. DEICHMANN, H. SCHWENDENER, E. KLINGELE, ST. MUELLER (1987): Krustenmächtigkeit in der Schweiz aus Refraktionsseismik und Gravimetrie. 1. NFP 20- Symposium, Bad Ragaz, Bulletin Nr. 4 des Nationalen Forschungsprojekts NFP20, Seite 12.
- BARANOV, W., (1975): Potential Fields and their Transformations in Applied Geophysics. Gebrüder Borntraeger- Berlin Stattgart, 121p.
- BASTIAN, U. (1987): HIPPARCOS der 100 000- Sterne- Satellit. In: Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft, Nr 68. Bericht über die wissenschaftliche Tagung in Oberkochen vom 13.- 15. April 1987.
- BIRARDI, G. (1971): Positional Photographic Astronomy. Bulletin de la Societé Française de Photogrammétrie, No. 40, Oktober 1970. Astronomia Fotografica di Positione. Bolletino di Geodesia e Science Affini dell' IGMI, No.1.
- BIRARDI, G. (1974): Positional Photographic Astronomy. Procedures and operational results with the IGN IGM camera. 5 th Symposium of Math. Geodesy. Florence, 1972. Bolletino di Geodesia e Science Affini dell' IGMI, No.4; Bulletin d'information de l' IGN, No. 26, 1974
- BIRARDI, G. (1976): The Establishment of a Net of Vertical Deflection Points in Italy by Means of a Photoastronomical Procedure. Bolletino di Geodesia e Science Affini dell' IGMI, No. 2, Firenze, 1976.
- BIRARDI, G.(1977): Combined Use of Doppler Devices and Photo- Astronomical Cameras for the Institution of Vertical Deflection Points. Bolletino di Geodesia e Science Affini dell' IGMI, No. 4, Firenze 1977.499-505.
- BORIANI, A. and POTENZA, R. (1978): Updated Bibliography of the Zone Ivrea- Verbano.

 Memorie Di Science Geologiche, Vol.XXXII, pp. 247-252.

 Proceedings of the second Symposium Ivrea- Verbano, Varallo.
- BRUNS, H. (1878): Die Figur der Erde. Publikation des Königlichen Preussischen Geodätischen Instituts, Berlin 1878.
- 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.
- BÜRKI, B. (1985): Die Ivrea- Messkampagne 1983. Bericht Nr. 92 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- BÜRKI, B., GEIGER, A., KAHLE, H.-G. (1987): The Swiss Trans Alpine Laser Experiment Monte Generoso Jungfraujoch Zimmerwald. Paper zum 12. NASA's Crustal Dynamics Meeting, Pasadena, 24. 26. 3. 1987.

- BÜRKI, B., GRAF, H.R., HAAG, U.und SCHERRER, R. (1987): TDU, Time Digitizing Unit. Ein digitales Zeitmessmodul für den Einsatz in der geodätischen Astronomie. Bericht Nr. 127 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- CAGIENARD, P. J. KAHLE, H. G., MUELLER, ST., KLINGELE, E. (1982): Gravimetrische Untersuchungen in der Kontaktzone Helvetikum /Aar-Massiv. Schweizerische Geodätische Kommission. Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 35.
- CARRARO, F. und SCHMID, R. (1968): Bibliographie der "Zone Ivrea- Verbano". Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen (SMPM), Vol. 48/1, S. 339-355.
- CHESI, G. (1984): Entwicklung einer tragbaren Zenitkammer und ihr Einsatz im 47. Parallel. Deutsche Geodätische Kommission. Reihe C, Nr. 287, München, 1984.
- CHOUDHURY, M., GIESE. P., DE VISINTINI, G. (1971): Crustal structure of the Alps: some general features from explosion seismology. Boll. geof. teor. ed applic. 13. No.51/52, 211-240.
- CORON, S. (1963) : Aperçu gravimétrique sur les Alpes Occidentales. Année Géophysique internationale, participation française. Série XII, Fasciul 2: Seismologie. Centre National de la Recherche Scientifique.
- DEICHMANN, N., ANSORGE, J. MUELLER, ST. (1986): Crustal Structure of the Southern Alps beneath the Intersection with the European Geotraverse. Tectonophysics, 126 (1986) S. 57-83.
- EDEL, J. B., FUCHS, K., GELBKE, C., PRODEHL, C. (1975): Deep structure of the southern Rhinegraben area from seismic refraction investigations. J. Geophys. 41, 333-356.
- EIDENBENZ, CH. (1988): Photogrammetrie und Fernerkundung als Informationsquelle zur Kartenherstellung. Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik 4/88, 145-153.
- ELMIGER, A. (1969): Studien über Berechnung von Lotabweichungen aus Massen, Interpolation von Lotabweichungen und Geoidbestimmung in der Schweiz. Mitteilungen aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eigenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nr. 12, 1969.
- ELMIGER, A. (1973): Einfluss von Lotabweichungen und Geoidhöhen auf die Absteckung des Gotthard- Strassentunnels. Schweiz. Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik. 4/73.
- ELMIGER, A. (1975): Erste Ergebnisse einer Geoidbestimmung für die Schweiz aus astronomischen und interpolierten Lotabweichungen. Bericht an die Schweizerische Geodätische Kommission.
- ELMIGER, A. (1975): Das Geoid in der Schweiz. Gedenkschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. F. Kobold. Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik, I-IV-75, 1975.

- ELMIGER, A., GURTNER, W. (1983): Astogeodätische Geoidbestimmung und Lotabweichungsinterpolation in der Schweiz. Beitrag zum Geoid-Kolloquium in Graz, 24./25. 1. 1983. Bericht Nr. 74 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- ENGI, P. und HUNZIKER, E. (1944): Das Geoidprofil im Parallelkreis der Eidgenössischen Sternwarte zu Zürich. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch- geodätische Arbeiten der Schweiz, Band 22.
- ENGI, P. und HUNZIKER, E. (1951): Die Geoidprofile im Parallelkreis von Locarno und im Meridian von Lugano. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch- geodätische Arbeiten der Schweiz, Band 24.
- ERKER, E. (1983): Das Geoid in Österreich. Berechnungen des Bundesamtes für Eichund Vermessungswesen. In: Das Geoid in Österreich. Österreichische Kommission für die Internationale Erdmessung. Geodätische Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung. Neue Folge, Band III.
- FISCHBACH, E., SUDARSKY, D., SZAFER, A., TALMADGE, C. and ARONSON, S.H. (1986): Reanalysis of the Eötvös Experiment. Physical Review Letters. Vol. 56, Nr. 1, 1986.
- FINCKH, P. (1978): Are Southern Alpine Lakes former Messinian Canyons Geophysical Evidence for Preglacial Erosion in the Southern Alpine Lakes, Marine Geology, vol. 27, p. 289-302.
- FINCKH, P., FREI, W. et coll. (1987): Reflexionsseismik Osttraverse Aufnahme, Datenverarbeitung und Ergebnisse. In: Bulletin Nr. 4 des Nationalen Forschungsprogramms NFP20: Geologische Tiefenstruktur der Schweiz.
- FRANCHI, S. (1905): Appunti geologici sulla zona diorito- kinzigitica Ivrea- Verbano e sulle formazioni adiacenti. Boll. F. Comit. Geol. Ital., 36, S. 270-298.
- FUCHS, K., ST. MUELLER, E. PETERSCHMITT, J.-P. ROTHÉ, A. STEIN, K. STROBACH (1963): Krustenstruktur der Westalpen nach refraktionsseismischen Messungen. Gerlands Beitr. z. Geophys. 72, 149-169.
- GANSSER, A. (1968): The Insubric Line, a Major Geotectonic Problem. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen (SMPM). Vol 48, Heft 1, 1968. S. 123-145.
- GERLACH, H. (1869): Die penninischen Alpen. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Nov. Mem. Soc. Helv. Sci. Nat. 23 und Lfg. 27 der Beitr. geol. Karte Schweiz, 123 S.
- GERMAN RESEARCH GROUP FOR EXPLOSION SEISMOLOGY, vorgelegt durch H. BERCKHEMER (1968): Topographie des "Ivrea- Körpers", abgeleitet aus seismischen und gravimetrischen Daten. SMPM Vol. 48/1, 235-246.
- GERSTBACH, G. (1979): Geophysikalische Interpretation von Lotabweichungen in Bruchzonen. Zeitschrift für Vermessungswesen, Jahrgang 104, Heft 2, Stuttgart 1979.

- GERSTBACH, G. (1980): Untersuchung der Tiefenstruktur des Wiener Beckens aus Lotstörungen. 2. Alpengravimetrie Kolloquium, Wien 1980.
- GERSTBACH, G. (1982): Bestimmung der Sedimentdicke aus Lotabweichungen im Testfeld "Wiener Becken". Zeitschrift für Vermessungswesen Nr. 8, 1982.
- GERSTBACH, G. (1983): Tiefenbestimmung der Laxenburger und Schwechater Senke aus Lotstörungen. 3. Alpengravimetrie Kolloquium, Wien 1983.
- GERSTBACH, G. (1983): Ein Ausgleichsmodell zur Berechnung mittlerer Gesteinsdichten in einem Lotabweichungsfeld. 3. Alpengravimetrie Kolloquium, Wien 1983.
- GESSLER, J. (1975): Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch- geodätische Ortsbestimmungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der TU Hannover, Nr. 60. Dissertation, Hannover 1975.
- GIESE, P. (1968): Die Struktur der Erdkruste im Bereich der Ivrea- Zone. SMPM, Vol. 48/1, 261-284.
- GIRDLER, R. W. (1985): Density contrast at the Lithosphere asthenosphere boundary. In:

 Bericht Nr. 102 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH
 Zürich.
- GLEINSVIK, P. (1960): Studien über die Ermittlung der Geoidform und die Bestimmung von Meereshöhen aus Höhenwinkeln. Mitteilungen aus dem Geodätischen Institut an der ETH in Zürich, Nr 7.
- GRAFAREND, E. (1987): Der Einfluss der Lotrichtung auf lokale geodätische Netze. Zeitschrift für Vermessungswesen Nr. 8, 1987, 413-424.
- GROUPE D' ETUDES DES EXPLOSIONS ALPINES (1963): Recherches Séismologiques dans les Alpes occidentales au moyen de grandes explosions en 1956, 1958 et 1960. Mémoire Collectif, Année Géophysique Internationale, C.N.R.S., Série XII, Fasc. 2.
- GROSSE, H.- D., RÖDDE, A., ZIMMERMANN, G. (1971): Astronomical observations for the geophysical investigation of the Nördlinger Ries. Nachr. a. d. Kart. u. Verm. Reihe II, No. 28, Frankfurt a. M., S. 15-21.
- GURTNER, W. (1978): Das Geoid in der Schweiz. Astronomisch- geodätische Arbeiten in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission. Band 32.
- HEISKANEN, W.A., MORITZ, H. (1967): Physical Geodesy. Freeman Verlag, San Francisco, 1967.
- HEITZ, S., SOLTAU, G. (1971): Possibilities for the geophysical research of the Nördlinger Ries by the use of astrogeodetic deflections of the vertical. Nachr. a. d. Kart. u. Verm. Reihe II, No. 28, Frankfurt a. M., 23-27.
- HELLER, W. G., LESCHAK, A. R., CUSHMAN, S. F. (1982): Assessment of means for determining deflection of the vertical. Interim Technical Report. U. S. Army corps of Engineers. Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia.

- HELLER, W. G., MAC NICHOL, K. B. (1983): Multisensor approaches for determining deflections of the vertical. Final Technical Report. U. S. Army corps of Engineers. Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia.
- HERRING, J. C. (1973): The Automated Astronomic Positioning System. Physical Sciences Research Papers, No. 543. Terrestrial Sciences Laboratory. Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Ma.
- HUNZIKER, E. (1968): I. Die Bestimmung der Azimute Gurten-Rötifluh und Rigi-Lägern. II. Die Bestimmung der Polhöhe auf Rigi- Kulm. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch- geodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 27.
- JORDAN, EGGER, KNEISSL, (1970): Handbuch der Vermessungskunde. Zehnte Ausgabe. Band III A: Geodätische Astronomie, Stuttgart 1970.
- JUNG, K., MENZEL, H., ROSENBACH, O. (1965): Gravimetermessungen im Nördlinger Ries. Zeitschrift für Geophysik Nr. 31, 1965, 7-26.
- JUNG, K., SCHAAF, H. (1967): Gravimetermessungen im Nördlinger Ries und seiner Umgebung, Abschätzung der gesamten Defizitmasse. Zeitschrift für Geophysik Nr. 33, 1967, 319-345.
- KAHLE, H.- G. (1969): Abschätzung der Störungsmasse im Nördlinger Ries. Zeitschrift für Geophysik Nr. 35, 1969, 317-345.
- KAHLE, H.- G. (1970): Deutung der Schwereanomalien im Nördlinger Ries. Zeitschrift für Geophysik Nr. 36, 1970, 601-606.
- KAHLE, H.- G., KLINGELE, E., MUELLER, ST. (1975): Zur Bedeutung der Schwerereduktion bei der Bestimmung der Figur und Massenverteilung der Erde. Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik III/IV-75.
- KAHLE, H.G., KLINGELE, E., MUELLER, ST., EGLOFF, R. (1976): The variation of crustal thickness across the Swiss Alps based on gravity and explosion seismic data. Pageoph. Vol. 114, 479-494.
- KAHLE, H.- G. (1985): Einführung in die höhere Geodäsie. Verlag der Fachvereine an den Schweizerischen Hochschulen und Techniken, Zürich. 197 p.
- KAMINSKI, W. und MENZEL, H. (1968): Zur Deutung der Schwereanomalie des Ivrea-Körpers. SMPM, Vol. 48/1, 1968, 255-260.
- KISSLING, E. (1980): Krustenaufbau und Isostasie in der Schweiz. Dissertation Nr. 6655, ETH Zürich, 165 p.
- KISSLING, E. (1982): Aufbau der Kruste und des oberen Mantels in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission. Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 35, 37-126.
- KISSLING, E. (1984): Three- dimensional Gravity Model of the Northern Ivrea- Verbano Zone. In: Geomagnetic and Gravimetric Studies of the Ivrea Zone. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Nr. 21, 53-61.

- KLINGELE, E. (1978): Un nouveau Logiciel pour les Corrections Topographiques en Gravimetrie. Bericht an die Schweizerische Geophysikalische Kommission (unveröffentlicht).
- KLINGELE, E., OLIVIER, R. und KAHLE, H.- G. (1980): Schwerekarte der Schweiz (Bouguer- Anomalien). Karte Nr. 4 der geophysikalischen Landeskarten 1:500'000. Bundesamt für Landestopographie, Wabern/ Bern.
- KLINGELE, E. (1980): A new Method for Near-Topographic Correction in Gravity Surveys. Pageoph, Vol. 119 (1980/81).
- KLINGELE, E. und OLIVIER, R. (1980): La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse. (Die neue Schwerekarte der Schweiz). Beiträge zur Geologie der Schweiz, Serie Geophysik Nr. 20. S. 54.
- KLINGELE, E., SCHWENDENER H. (1984): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz. Gravimetrische Messungen 81/82. Technischer Bericht Nr. 84-22. Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- KOBOLD, F. (1938): Die Beziehungen zwischen schweizerischen und italienischen geographischen Koordinaten Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik, Nr. 8, 1938.
- KOBOLD, F. (1951): Die Bestimmung der Lotabweichungskomponenten im Meridian des St. Gotthard aus Höhenwinkelmessungen. Procès Verbal der 95. Sitzung der Schweiz. Geodätischen Kommission in Neuchâtel.
- KUHN, W. (1981): Zur gravimetrischen Geoidbestimmung in der Schweiz. Diplomarbeit IGP ETH Zürich.
- LAUBSCHER, H. P. (1984): The tectonic problem of the Ivrea body and the insubric line. Annales Geophysicae, 1984, 2, 2, 169-170.
- LENSCH, G. (1968): Die Ultramafitite der Zone von Ivrea. SMPM, Vol. 48/1, 1968, 91-103.
- LICHTENEGGER, H., CHESI, G. (1983): Astro- geodätische Messungen zur Bestimmung des Geoides. In: Das Geoid in Österreich. Österreichische Kommission für die Internationale Erdmessung. Geodätische Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung. Neue Folge, Band III.
- MARTI, U. (1988): Astrogeodätische Geoidbestimmung in der Ivrea- Zone. Bericht Nr. 153 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- MADER, K. (1951): Das Newtonsche Raumpotential prismatischer Körper und seine Ableitungen bis zur dritten Ordnung. Sonderheft 11 der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen. Wien 1951.
- MENARD, G. (1979): Relations entre Structures Profondes et Structures Superficielles dans le Sud- est de la France. Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique, Universität Grenoble 1979, 178 p.
- MESSERSCHMITT, J. B. (1901): Polhöhen und Azimutmessungen. Das Geoid in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomischgeodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 9.

- MORITZ, H. (1980): Geodetic Reference System 1980. Bulletin Géodésique 1980, Vol. 54, Nr. 3. p. 395.
- MÖNIKE, H. J. (1981): Interpretation astronomisch- geodätischer Lotabweichungen im Oberrheingraben. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 265, München 1981.
- MUELLER, ST. and TALWANI, M. (1971): A Crustal Section Across the Eastern Alps Based on Gravity and Seismic Refraction Data. Pageoph., vol. 85, 1971/II, 226-239.
- MUELLER, ST., ANSORGE, J., EGLOFF, R. und KISSLING, E. (1980): A crustal cross section along the Swiss Geotraverse from the Rhinegraben to the Po plain. Eclogae Geol. Helv. Vol. 73, Nr. 2, 463-485.
- MÜLLER, H. (1972): Bestimmungen von astronomischen Längen, Azimuten und Breiten in den Jahren 1965 bis 1970. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch- geodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 29.
- NETTLETON, L. L. (1939): Determination of Density for Reduction of gravity observations. Geophys. 4 (1939), 176-183.
- NEWTON, I. (1685): Mathematische Prinzipien der Naturlehre. Unveränderter Nachdruck der Berliner Ausgabe von 1872, hrsg. v. J. P. Wolfers, Darmstadt. (Wissenschaftliche Buchgesellschaft) 1963.
- NFP20 (1987): Nationales Forschungsprogramm 20: Geologische Tiefenstruktur der Schweiz. Bulletin Nr. 5, herausgegeben von der Projektleitung.
- NIETHAMMER, TH. (1939): Das astronomische Nivellement im Meridian des St. Gotthard. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch- geodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 20.
- NIGGLI, E. (1946): Über den Zusammenhang zwischen der positiven Schwereanomalie am Südfuss der Westalpen und der Gesteinszone von Ivrea. Eclogae geol. Helv. 39, p. 211-220.
- NOVARESE, V. (1906): La zona d' Ivrea. Boll. Soc. Geol. Ital. 25, 176-180.
- PANZA, G.F. and MUELLER, ST. (1978): The plate boundary between Eurasia and Africa in the Alpine area. Mem. Sci. Geol. Univ. Padova, vol. 33.
- PANZA, G.F., MUELLER, ST. and CALCAGNILE, G. (1979): The gross Features of the Lithosphere Asthenosphere System in the European Mediterranean Area. Abstr. 5th EGS- Meeting, Strasbourg. EOS, vol. 60, no. 7.
- PILOWSKI, K. (1973): Zur Konstruktion und Theorie und zur Verwendung transportabler Zenitkameras für die geographische Ortsbestimmung und für die fundamentale Positionsastronomie. Veröffentlichung der Astronomischen Station der Universität Hannover, Monographie 1973.
- PILOWSKI, K. (1974): Erste geographische Ortsbestimmungen mit den transportablen Zenitameras der Astronomischen Station Hannover. Ergänzung 1 zur Monographie 1973, Hannover 1974.

- REICH, H., HORRIX, W. (1955): Geophysikalische Untersuchungen im Ries und Vorries und deren geologische Deutung. Beitr. Geol. Jb 19,1955.
- RESEARCH GROUP OF THE GEOPHYSICAL INSTITUTIONS in Hamburg (IPE), Karlsruhe (GI), Paris (ENS+CEA), Strasbourg (IPG) (1967): Structure of the crust and upper mantle in the eastern part of France. Proc. 14TH IUGG General Assembly Zürich, IASPEI 1967.
- RINNER, K., CHESI, G. und LICHTENEGGER, H. (1981): Astrogeodätische Aktivitäten im Grazer Raum. Geodätische Arbeiten Österreichs für die internationale Erdmessung. Neue Folge II, Wien 1981.
- ROD, E. (1980): Interne Mitteilung.
- SANTINI, D. (1985): Schwereanomalien und Lotabweichungen im noröstlichen Teil der Ivrea- Zone. Diplomarbeit ETH Zürich.
- SCHMID, H.H., HEGGLI, S. (1978): Räumliche Koordinatentransformation. Eine pseudolineare Formulierung als Annäherungslösung und eine strenge Ausgleichung mit entsprechendem Fortranprogramm. Mitteilung Nr. 23 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- SCHMID, S. M., ZINGG, A., HANDY, M. (1987): The kinematics of movements along the Insubric Line and the emplacement of the Ivrea Zone. Tectonophysics, 135 (1987), 47-66.
- SCHNEIDER, D. (1987): Pers. Mitteilung.
- SCHÜRER, M. (1977): Vorlesungsskript zur Satellitengeodäsie, ETH Zürich.
- SCHWENDENER, H. (1984): Ein Gravimetrisches Krusten-Mantel Modell für ein Profil vom nördlichen Alpenvorland bis an die Ligurische Küste. Geodätisch- geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. Schweizerische Geodätische Kommission. Band 36, Zürich 1984.
- SEEBER, G. TORGE, W. (1985): Zum Einsatz transportabler Zenitkameras für die Lotabweichungsbestimmung. Zeitschrift für Vermessungswesen Nr. 10, 1985.
- SIGL, R. (1978): Geodätische Astronomie.Sammlung Wichmann, Neue Folge, Band 7. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1978.
- TORGE, W. (1975): Geodäsie. Sammlung Göschen. Verlag W. de Gruyter & Co, Berlin.
- TORGE, W. (1980): Geodätisches Datum und Datumstransformationen. In: H. Pelzer (Herausg.); Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung. K. Wittwer, Stuttgart 1980.
- STEIN, A., VECCHIA, O., FROEHLICH, R. (1978): A seismic Model of a Refraction Profile Across the Western Po Valley. In: Alps, Apennines and Hellenides; CLOSS, H., ROEDER, D. and SCHMIDT, K. (eds.); E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, BRD.

- TUGLUOGLU, A. (1971): Über die Empfindlichkeit astronomisch- geodätischer Lotabweichungen gegenüber Dichte- Anomalien des Untergrundes, nebst einer Anwendung auf die Bestimmung der Tiefenstrukturen im Nördlinger Ries. Institut für Theoretische Geodäsie der Rheinischen Friedrich- Wilhelms- Universität Bonn, 1971.
- VAN DER MAREL, H. (1988): On the "Great Circle Reduction" in the Data Analysis for the Astrometric Satellite HIPPARCOS. Netherlands Geodetic Commission. Publications on Geodesy, New series, Volume 8, Number 2.
- VECCHIA, O. (1968): La Zone Cuneo Ivrea Locarno, élément fondamental des Alpes. Géophysique et géologie. SMPM, Vol. 48/, 215 226.
- VENING MEINESZ, F. A. (1928): A Formula expressing the deflection of the plumb-line in the gravity anomalies and some formulae for the gravity field and the gravity potential outside the geoid. Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap., v. 31 (3), 315-331.
- WAGNER, J. J., KLINGELE, E., MAGE, R. (1984): Regional Geomagnetic Study of the Southern Border of the Western Alps. The Ivrea Body. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Serie Geophysik, Nr. 21. S. 21-29.
- WAGNER, J. J. und MUELLER, ST. (eds.) (1984): Geomagnetic and Gravimetric Studies of the Ivrea Zone. Schweizerische Geophysikalische Kommission. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Serie Geophysik, Nr. 21., 61p.
- WAGNER, J. J., BARBLAN, F. (1986): Densités et susceptibilités magnétiques de roches de la zone d' Ivree. Auszug aus einem Bericht des Institut de Pétrophysique Université de Genève (unveröffentlicht).
- WALSER, F. (1987): Automatisation im Bereich der astro- geodätischen Mess- und Auswertetechnik. Bericht Nr. 128 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- WASSOUF, Y. (1975): Contribution a l'étude des déviations de la verticale dans la region du Tessin et du nord- ouest de l' Italie. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Dissertation Nr. 5597.
- WEBER, E. K., GASSMANN, F., NIGGLI, E. und RÖTHLISBERGER, H. (1949): Die magnetische Anomalie westlich von Locarno. Bull. suisse min. pétr., 29, p. 492-508.
- WIGET, A., GEIGER, A.(1985): Schweizerische Doppler- Messkampagne Swissdoc 84-.

 Bericht Nr. 99 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH
 Zürich.
- WIRTH, B. (1985): Störkörpervestimmung im Gebiet der Ivrea- Zone aus gravimetrischen und astrogeodätischen Messungen. Bericht Nr. 93 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- WIRTH, B., MARTI, U. (1986): Lotrichtungs- und Schweremessungen in der Ivrea- Zone.

 Messkampagnen 1985/86. Bericht Nr. 114 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.

- WIRTH, B., MARTI, U. BÜRKI, B. (1987): Lotrichtungs- und Schweremessungen in der Ivrea- Zone. Reduktion und Interpretation der Kampagnen 1983 bis 1986. Bericht Nr. 125 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- WIRTH, B., MARTI, U. (1988): Beitrag der Geodäsie zur Dichtebestimmung der geologischen Tiefenstruktur. Bericht Nr. 148 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- WISSEL, H. (1982): Zur Leistungsfähigkeit von transportablen Zenitkameras bei der Lotabweichungsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 107, Hannover 1982.
- WUNDERLIN, N. (1966): Lotabweichungs- und Geoidbestimmungen aus Höhenwinkeln in den Schweizer Alpen. Mitteilung an die Schweizerische Geodätische Kommission.
- WUNDERLIN, N. (1967): Lotabweichungen, Geoid und Meereshöhen in den Schweizer Alpen. Schweizerische Geodätische Kommission, Band 26.
- WUNDERLIN, N. (1969): Längen- Azimut- und Breitenbestimmungen 1961- 1964. Schweizerische Geodätische Kommission. Astronomisch geodätische Arbeiten in der Schweiz, Band 28.
- WUNDERLIN, N. (1981): Die Neuausgleichung des Basisvergrösserungsnetztes Giubiasco.

 Bericht Nr. 49 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH
 Zürich.

A1: Formeln für die Berechnung der Wirkungen eines Prismas mit dreieckigem Querschnitt in 3 Komponenten

(Zur Definition des Koordinatensystems s. Seite 55)

Komponente in x - Richtung:

$$\frac{U_x}{G \cdot \rho} = -y_1 \ln \frac{z_2 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}}{z_1 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_1^2}} + z_2 \ln \frac{y_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}}$$

$$- \frac{z_0}{\sqrt{1 + a^2}} \ln \frac{y_2 + a z_2 + \sqrt{1 + a^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + a z_1 + \sqrt{1 + a^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_1^2}}$$

$$- x_2 \cdot \left(a \tan \frac{y_2 z_2}{x_2 \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{y_1 z_2}{x_2 \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}} \right)$$

$$+ x_2 \cdot \left(a \tan \frac{y_2 z_0 - a x_2^2}{x_2 \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{y_1 z_0 - a x_2^2}{x_2 \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_1^2}} \right)$$

$$+ y_1 \ln \frac{z_2 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}}{z_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} - z_2 \ln \frac{y_2 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}}$$

$$+ \frac{z_0}{\sqrt{1 + a^2}} \ln \frac{y_2 + a z_2 + \sqrt{1 + a^2} \cdot \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}}$$

$$+ x_1 \left(a \tan \frac{y_2 z_2}{x_1 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{y_1 z_2}{x_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}} \right)$$

$$- x_1 \left(a \tan \frac{y_2 z_0 - a x_1^2}{x_1 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{y_1 z_0 - a x_1^2}{x_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}} \right)$$

Komponente in y - Richtung:

$$\frac{U_{y}}{G \cdot \rho} = + z_{2} \ln \frac{x_{2} + \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{2}^{2}}}{x_{2} + \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{2}^{2}}} - x_{2} \ln \frac{z_{2} + \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{2}^{2}}}{z_{1} + \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}$$

$$+ \frac{a x_{2}}{\sqrt{1 + a^{2}}} \ln \frac{y_{2} + a z_{2} + \sqrt{1 + a^{2}} \cdot \sqrt{x_{2}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}}{y_{1} + a z_{1} + \sqrt{1 + a^{2}} \cdot \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}$$

$$- \frac{z_{0}}{1 + a^{2}} \ln \frac{x_{2} + \sqrt{x_{2}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}}{y_{1} \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}} - atan \frac{x_{2} z_{1}}{y_{1} \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}$$

$$+ y_{1} \cdot \left(atan \frac{x_{2} z_{2}}{y_{1} \sqrt{x_{2}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}} - atan \frac{x_{2} z_{1}}{y_{1} \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}} \right)$$

$$- \frac{a z_{0}}{1 + a^{2}} \cdot \left(atan \frac{x_{2} (y_{2} + a z_{2})}{z_{0} \sqrt{x_{2}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}} - atan \frac{x_{2} (y_{1} + a z_{1})}{z_{0} \sqrt{x_{2}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}} \right)$$

$$- z_{2} \ln \frac{x_{1} + \sqrt{x_{1}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}}{x_{1} + \sqrt{x_{1}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}} + x_{1} \ln \frac{z_{2} + \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}{z_{0} \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}$$

$$- \frac{a x_{1}}{\sqrt{1 + a^{2}}} \ln \frac{y_{2} + a z_{2} + \sqrt{1 + a^{2}} \cdot \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{2}^{2}}}{y_{1} + a z_{1} + \sqrt{1 + a^{2}} \cdot \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}$$

$$- \frac{x_{1}}{\sqrt{1 + a^{2}}} \ln \frac{x_{1} + \sqrt{x_{1}^{2} + y_{2}^{2} + z_{2}^{2}}}{y_{1} + a z_{1} + \sqrt{1 + a^{2}} \cdot \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}}$$

$$- y_{1} \cdot \left(atan \frac{x_{1} z_{2}}{y_{1} \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{2}^{2}}} - atan \frac{x_{1} z_{1}}{y_{1} \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}} \right)$$

$$- \frac{a z_{0}}{1 + a^{2}} \cdot \left(atan \frac{x_{1} (y_{2} + a z_{2})}{z_{1} \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{2}^{2}}} - atan \frac{x_{1} z_{1}}{z_{1} \sqrt{x_{1}^{2} + y_{1}^{2} + z_{1}^{2}}} \right)$$

Komponente in z - Richtung:

$$\frac{U_z}{G \cdot \rho} = -y_1 \ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}}{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_1^2}} + x_2 \ln \frac{y_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}}$$

$$- \frac{x_2}{\sqrt{1 + a^2}} \ln \frac{y_2 + a z_2 + \sqrt{1 + a^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + a z_1 + \sqrt{1 + a^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$- \frac{a z_0}{1 + a^2} \ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$- z_2 \cdot \left(a \tan \frac{x_2 y_2}{z_2 \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{x_2 y_1}{z_2 \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}} \right)$$

$$+ \frac{z_0}{1 + a^2} \cdot \left(a \tan \frac{x_2 (y_2 + a z_2)}{z_0 \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{x_2 (y_1 + a z_1)}{z_0 \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z_2^2}} \right)$$

$$+ y_1 \ln \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_2^2}} - x_1 \ln \frac{y_2 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$+ \frac{x_1}{\sqrt{1 + a^2}} \ln \frac{y_2 + a z_2 + \sqrt{1 + a^2} \cdot \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}{y_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$+ \frac{a z_0}{1 + a^2} \ln \frac{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{x_1 y_1}{z_2 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}}$$

$$+ z_2 \cdot \left(a \tan \frac{x_1 y_2}{z_2 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{x_1 y_1}{z_2 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right)$$

$$- \frac{z_0}{1 + a^2} \cdot \left(a \tan \frac{x_1 (y_2 + a z_2)}{z_2 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} - a \tan \frac{x_1 (y_1 + a z_1)}{z_2 \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right)$$

A2: Tabelle der Rohdaten aller Zenitkamerastationen im Ivrea- Gebiet (Landeskoordinaten und Höhen in [m], Schwere in [mgal = 10^{-5} ms⁻²])

			ΙΔΝΓ	ESKOORDIN	JATEN	RESSEL	-KOORD.	ELLIPS.	ASTRON	KOORD.	ABSOLUTE
OTATION		NO									
STATION		NR	Υ	X	н	ф	λ	HOEHE	Φ	٨	SCHWERE
MOTTARONE	(1)	1	678803.70	81594.97	1490.31	45°52'57.3"	8°27'17.0"	1489.48	45°52'36.8"	8°27'46.7'	980365.08
VALPIANA	(1)	2	664882.76	103540.01	235.25	46°04'53.3"	8°16'42 3"	236.47	46°04'54.3"	8°16'47.3'	980580.98
VOGOGNA		3	666453.69	94857.86	216.13	46°00'11.6"			46°00'12.9"		980652.98
	(1)										
ORNAVASSO	(I)	4	675664.12	91696.61	211.19	45°58'25.7"			45°58'03.1"		980667.55
BAVENO	(1)	5	682957.20	84241.81	195.81	45°54'21.2"	8°30'31.2"	194.77	45°54'03.6"	8°31'09.2'	980643.85
CAMPO D. FIOR	(1)	7	703403.67	80536.56	1228.10	45°52'11.1"	8°46'16.8"	1225.49	45°51'49.2"	8°46'27.8'	980382.59
POLLINO	(1)	8	691174.61	91877.02	751.68	45°58'24.6"			45°57'52.4"		980525.44
CICOGNA		9	681554.51	95151.84	726.98	46°00'15.1"			45°59'41.9"		980561.47
	(1)										
MASERA	(1)	10	667418.90	109601.91	284.52	46°08'08.7"	8°18'43.5"	285.86	46°08'07.8"		980564.30
CRODO	(1)	11	668402.16	119472.78	517.50	46°13'28.0"	8°19'34.5"	519.07	46°13'22.1"	8°19'27.7'	980480.65
CADARESE	(1)	12	671128.51	127374.91	743.52	46°17'42.9"	8°21'46.1"	745.39	46°17'30.9"	8°21'44.3'	980416.70
ARUOGNO	(1)	13	678512.69	113557.67	1232.11	46°10'12.5"	8°27'22.7"		46°10'03.7"	8°27'17 8'	980417.04
MALESCO	_ (l)	14	682408.52	109272.42	719.69	46°07'52.0"			46°07'47.8"		980564.55
MTE. BAVARION	E (I)	15	688589.66	99458.48	1366.70	46°02'31.4"	8°35'02.8"	1367.26	46°02'08.5"		980448.72
MTE. CARZA	(i)	16	695829.73	99703.17	1062.24	46°02'35.8"	8°40'39.7"	1062.07	46°02'12.1"	8°41'12.9'	980471.09
ALPE VECCHIA	(I)	17	669962.88	102940.02	1655.00	46°04'32.0"	8°20'38.5"	1656 42	46°04'38.6"	8°20'14.4'	999999.99
VERGELETTO				120719.30		Soften and the national section	8°34'34.5"		46°13'53.8"	Commence of the Commence of th	980459.38
	(CH)	18	687671.20		943.00	46°14'00.4"					
SABBIONE	(CH)	19	686410.50	135883.89	648.19	46°22'12.0"	8°33'45.8"	650.02	46°22'04.2"		980443.50
LODANO	(CH)	20	696308.27	124078.98	337.33	46°15'44.9"	8°41'20.0"	338.67	46°15'36.2"	8°41'26.4'	980577.44
LOSONE	(CH)	21	701297.82	115051.06	223.84	46°10'49.9"	8°45'05.9"	224.50	46°10'36.3"	8°45'21.1'	980646.70
	(,										
DACCO NECCIA	(CLI)	00	700700.04	107541 00	1000 05	40000140 51	005047.0	1000.00	40000100.08	0050'54 0	980396.57
PASSO NEGGIA	,	22	708766.04	107541.90	1392.65	46°06'42.5"			46°06'33.9"		
MUGENA	(CH)	23	712076.11	99758.00	714.86	46°02'28.5"	8°53'15.2"	714.08	46°02'02.6"		980527.88
CADEPIANO	(CH)	24	714950.60	90813.60	292.00	45°57'37.2"	8°55'21.0"	290.14	45°57'16.4"	8°55'21.2'	980590.15
PAIRAGO	(CH)	25	721221.00	102184.20	659.50	46°03'41.4"	9°00'22.7"	658.79	46°03'20.3"	9°00'12.8'	980536.93
RIVERA	(CH)	26	714578.47	109277.81	472.34	46°07'35.3"	8°55'20.0"		46°07'26.3"		980570.33
HIVEIV	(01)	20	/ 143/6.4/	109277.01	4/2.54	40 07 33.3	8 33 20.0	4/2.22	40 07 20.5	6 33 Z3.Z	300370.00
	(OL 1)										
MONTI MOTTI	(CH)	27	710249.73	117222.53	1066.80	46°11'55.2"	8°52'05.1"		46°11'33.4"	-	980448.70
BRIONE	(CH)	28	704856.12	126891.19	674.72	46°17'11.4"	8°48'01.4"	676.03	46°17'02.4"	8°48'09.5'	980497.07
FRASCO	(CH)	29	704305.66	133611.30	899.57	46°20'49.3"	8°47'41.1"	901.11	46°20'40.5"	8°47'48.6"	980443.82
GIORNICO	(CH)	30	709718.72	140385.91	451.10	46°24'25.6"			46°24'25.5"	8°52'18.6"	980493.65
LODRINO	(CH)	31	718901.60	129215.93	268.95	46°18'18.2"			46°18'11.1"		980541.33
LODAINO	(0.1)	0.	710301.00	129213.93	200.93	40 10 10.2	6 36 39.0	209.91	40 10 11.1	0 00 07.0	00.17000
BELLINZONA	(CH)	32	723011.93	118652.29	232.50	46°12'33.5"	9°02'01.6"		46°12'24.6"	-	980582.87
LA CAVA	(1)	33	729671.59	104585.33	1149.24	46°04'53.5"	9°06'58.2"	1148.82	46°04'31.7"	9°07'08.6"	980434.64
A. COLONNO	(1)	34	731553.46	93296.86	1322.49	45°58'46.7"	9°08'14.4"	1320.94	45°58'21.4"	9°08'19.7"	980380.60
LUINO	(l)	35	701262.48	93586.17	199.40	45°59'14.8"	8°44'47.6"	198.17	45°58'55.2"	8°44'57.0"	980627.90
PIEDIMULERA	(i)	36	665142.74	97375.43	225.83	46°01'33.6"			46°01'36.7"		980628.75
FIEDINIOLENA	(1)	30	003142.74	37073.40	225.00	40 01 33.0	8 1031.4	220.50	40 01 00.7	0 10 42.7	300020.73
										·- -	
ANZ. D'OSSOLA	(1)	37	670958.35	93669.97	208.06	45°59'31.4"	8°21'19.7°	208.98	45°59'21.2"		980683.58
MERGOZZO	(1)	38	677173.05	89296.95	201.42	45°57'07.4"	8°26'05.9"	201.50	45°56'44.7"	8°26'41.3'	980653.90
L.DI CASTELLO	(1)	39	675743.37	105363.10	2107.03	46°05'48.3"	8°25'08.8"	2108.66	46°05'50.1"	8°25'10.5"	999999.99
A. BUSARASCA	(i)	40	681842.20	100118.13	1531.44	46°02'55.8"	8°29'49.5"	1532 61	46°02'26.4"	8°30'15 6"	999999.99
VALLE LOANA		0.0									980486.73
VALLE LOANA	(1)	41	680351.25	105153.11	1240.27	46°05'39.5"	8 28 43.2	1241.83	46°05'40.2"	8°28 52.0	900400.73
CREVES FINERO	(l)	42	685585.84	106507.44	830.03	46°06'21.1"	8°32'47.8"	831.38	46°06'08.7"	8°33'01.3"	980589.17
FALMENTA	(1)	43	689754.93	102998.63	524.68	46°04'25.5"	8°35'59.5"	525.47	46°04'03.3"	8°36'29.5"	980600.83
CADANZA	(CH)	44	691603.02	112545.36	574.14	46°09'33.8"			46°09'28.6"		
									46°08'22.9"		999999.99
PIZZO LEONE	(CH)	45	695693.85	110688.08	1659.44	46°08'31.6"					
BRISSAGO	(CH)	46	698069.90	107559.13	198.51	46°06'49.0"	8°42'29.8°	198.67	46°06'24.7"	8°43'11.0"	980656.97
ISOLINO	(CH)	47	700256.15	110043.88	200.41	46°08'08.4"	8°44'13.5"	200.75	46°07'49.0"	8°44'42.0"	980664.82
RANZO	(CH)	48	702851.03	107516.63	206.70	46°06'45.1"			46°06'36.6"		980640.21
	(CH)	49	704226.00	112290.16					46°09'02.4"		980649.64
ASCONA					199.38	46°09'18.9"					
MAGADINO	(CH)	50	710697.87	113834.97	196.46	46°10'05.2"			46°09'49.4"		
PIZ PROMAN	(1)	51	674029.67	97439.36	2095.00	46°01'32.3"	8°23'44.6"	2096.15	46°01'14.1"	8°23'57.0"	999999.99
GARLANDA	(I)	52	680763.86	87850.58	196.76	45°56'19.0"	8°28'51.7"	196.31	45°55'54.8"	8°29'21.3"	980646.92
CASTELLACCIO	(i)	53	711159.69	112165.98	196.64	46°09'10.9"			46°09'06.9"		980623.35
									46°08'54.2"		
P. CORGELLA	(CH)	54	723059.79	111916.37		46°08'55.3"					
COIMO	(1)	55	673387.30	108937.66	659.57	46°07'45.0"			46°07'47.6"		
SAN VITTORE	(CH)	56	727642.70	121513.00	263.40	46°14'03.0"	9°05'40.4"	263.94	46°13'55.4"	9°05'38.0"	980561.12
many affects engineer in 1999 to 17											

			LAND	ESKOORDIN	ATEN	BESSEL-	KOORD	ELLIPS.	ASTRON.	KOORD.	ABSOLUTE
		ND			Н		λ	HOEHE	Φ	٨	SCHWERE
STATION		NR	Υ	X	п	ф	~	TIOLITE	•	••	
	401 h		704000 47	100044 42	411.95	46°18'21.2"	0°11'20 2"	413.07	46°18'07.4"	9°11'28.5"	980493.16
LOSTALLO	(CH)	57	734936.47	129644.43 132641.37	1125.32	46°20'01.9"	9°07'33.2"		46°19'48.5"	(5) A.A. B. (19)	980373.70
CAUCO	(CH)	58	729820.38	143644.99	1088.51	46°26'02.2"	9°03'05.4"		46°25'50.1"		980356.20
MALVAGLIA	(CH)	59	723866.88 735845.82	144997.89	1627.92	46°26'37.7"	9°12'27.9"		46°26'22.4"	9°12'23.2"	980274.37
FORCOLA	(CH)	60 61	746589.24	141665.30	1084.91	46°24'41.6"			46°24'30.2"	9°20'42.4"	980358.34
CORTI	(1)	01	740309.24	141005.00	1004.01						
CHIAVENNA	(1)	62	753525.89	132719.68	410.51	46°19'46.4"	9°26'01.4"	412.03	46°19'25.4"	9°25'42.4'	980494.68
PRA PINCE	(1)	63	746174.39	126256.29	903.80	46°16'23.0"	9°20'10.4"	904.76	46°16'11.8"		980409.79
SOMAGGGIA	(i)	64	752548.89	123371.75	208.26	46°14'44.5"	9°25'04.7"	208.96	46°14'29.7"		980529.72
SAN FEDELE	(1)	65	753646.62	116028.95	210.94	46°10'45.9"			46°10'33.0"		980560.39
LIVO	(i)	66	744224.96	114388.53	626.30	46°10'00.3"	9°18'26.2"	626.29	46°09'39.2"	9°18'37.1'	980508.89
LIVO	(.,		•								
BRENZEGLIO	(1)	67	736529.89	111353.83	945.30	46°08'27.8"			46°08'06.6"		980451.37
CORTE	(i)	68	748371.44	109933.68	260.48		9°21'34.4"		46°07'31.2"		980577.32
ST.MARIA-REZZ		69	741644.40	102935.57	204.93	46°03'51.4"			46°03'28.7"		980593.35 980451.90
PIAZZO	(1)	70	751435.49	101870.73	918.42	46°03'09.3"			46°02'57.0" 45°56'58.4"		980528.63
GUELLO DI BEL.	. (1)	71	741041.33	90463.85	639.68	45°57'08.0"	9°15'32.0	637.88	45-50 56.4	9 1331.9	900320.00
						45050104.05	0004155.05	498.49	45°59'06.5"	0°24'36 3	980532.12
CORTABBIO	(1)	72	753062.66	94963.97	500.19	45°59'24.3" 46°11'40.8"	9°24 55.2	1050.49	46°11'39.9"		980270.90
CADINELLO	(CH)	73	730223.08	117175.95	1850.03	46°11'40.8" 46°12'37.1"			46°12'29.1"		980455.03
VARZO	(1)	74	662484.33	117835.03	592.09 767.69	46°07'27.9"			46°07'23.8"		980431.51
FONTI	(1)	75	658548.45	108250.59 100915.41	931.70	46°03'32.3"			46°03'31.4"		980403.47
ANTRONAPIANA	(I)	76	651943.91	100915.41	931.70	40 03 32.0	0 0000.1	000.07		(#1 /#,31 (000)00)	
	415	77	CE 4747 EE	93382.17	538.78	45°59'27.6"	8°08'46.4'	540.35	45°59'26.9"	8°08'58.7	980508.63
PONTEGRANDE	(1)	77	654747.55 642689.62	89954.65	1195.76	45°57'39.7"	7°59'25.0'		45°57'29.9"	7°59'45.0	980340.05
MACUGNAGA	(1)	78 79	643648.99	81615.38	1387.44	45°53'09.4"	8°00'06.8		45°52'53.3"	8°00'26.9	980327.87
RIMA	(1)	80	654426.94	84427.69	1095.25	45°54'37.7"	8°08'27.8	1096.70	45°54'25.4"	8°08'40.6	980468.16
STA. MARIA CAMPELLO MON	(l)	81	661943.21	87398.69	1287.17	45°56'11.5"	8°14'17.9	1288.42	45°56'02.4"	8°11'39.1	980474.53
CAMPELLOWO	411 (1)	01	001340.21	0,000.00							
RIVA	(1)	82	640105.80	76070.74	1091.66	45°50'10.6"	7°57'20.8	1093.46	45°49'54.9"		980380.48
BOCCIOLETTO	(1)	83	652480.48	75532.53	655.56	45°49'50.1"	8°06'53.9		45°49'35.2"		980564.78
FERRERA	(i)	84	658336.63	79633.74	704.06	45°52'01.2"	8°11'27.0		45°51'39.9"		980591.46
CERVAROLO	(i)	85	664036.51	78959.48	1035.24	45°51'37.5°	8°15'50.9		45°51'10.2"		980523.81
STRONA	(i)	86	670604.47	84508.72	522.36	45°54'34.9"	8°20'58.4	522.68	45°54'11.1"	8°21'33.3	980605.19
	• • •								45°45'58.3"	0004'57	980547.66
PILA	(1)	87	649718.17	68851.49	697.28	45°46'14.5"		* 697.88 * 1383.17	46°16'59.6"		2" 980349.06
CIMALMOTTO	(CH)	88	681120.13	126242.96		46°17'02.2" 45°48'58.3"			45°48'36.4"		7" 980627.73
VARALLO	(1)	89	662500.01	74025.20	449.06 470.76	45°41'02.1"			45°40'25.0"		980598.91
GRANERO	(1)	90	658053.11	59277.17 66278.95		45°44'46.9"			45°44'14.9"		5" 980614.51
ISOLELLA	(1)	91	663944.72	002/0.93	314.33	40 44 40.0	0 10 10.0	0,			
	415	00	673466.81	71760.44	294.59	45°47'41.0"	8°23'04.0	293.19	45°47'16.0"	8°23'46.5	5" 980612.96
ALZO	(I)		671579.58	63097.39		45°43'01.1"			45°42'28.2"	8°22'06.8	980508.13
CASTAGNOLA	(I)	93 94	681451.44	68615.44		45°45'55.8"			45°45'26.5"	8°29'41.9	980570.90
INVORIO	(1)	95	687672.35	76260.01	199.11	45°50'00.6"			45°49'31.6"	8°34'43.2	2" 980621.12
LESA MOMBELLO	(I) (I)		693191.50	83178.10		45°53'42.0"	8°38'25.2	218.34	45°53'16.8"	8°38'42.1	1" 980623.12
MOMBELLO	(.,	50	000101100								
FERRERA	(1)	97	704377.67	87201.48	299.20	45°55'46.4"	8°47'07.2				1" 980599.32
CADREZZATE	(i)			72691.04	271.97	45°48'01.9"	8°38'55.9	268.78			5" 980591.88
SOSTEGNO	(i)	100000		The state of the s	400.76	45°39'09.3"	8°16'06.2	398.76			1" 980573.54
COSSATO	(i)			45692.50	252.56	45°33'42.8"	8°09'13.2	2" 252.56			7" 980596.04
BIOGLIO	(i)			51123.91	526.98	45°36'39.3"	8°07'52.7	526.98	45°36'01.9"	8°08'35.0	0" 980566.33
									45040140 51	7050150.1	5" 980454.01
ROSAZZA	(1)	102	641794.28	58223.13		45°40'32.2"	7°58'33.4	905.94			3" 980434.01
FAVARO	(1)	103	644050.01	49844.79		45°36'00.4"	8°00'14.8	7/9.89	45°35'28.4"		6" 980622.34
MONGRANDO	(1)	104	644015.77	41786.74		45°31'39.5"	8°00'10.5	327.18			5" 980563.47
MASSAZZA	(1)	105	655739.30	37771.35		45°29'26.3"	8°09'09.0	232.14	45°28 54.9		7" 980533.47
MONTEMAGGIC	ORE (I)	106	650341.90	26698.36	260.67	45°23'29.3"	80456.3	200.07	45 23 01.3	0 03 34.	900500.44
						45°29'45.9"	705020 7	* 200.20	4502010 35	7°53'05	5" 980647.26
MONTALTO		107					7040121	° 269.25			8" 980599.70
TAVAGNASCO		108				45°35'58.4"	7946147	7 320 31			0" 980554.07
GRAND VERT	(1)	109	625840.65	49680.24			794050	364.82			2" 980493.46
VERRES			618982.02								0" 980374.91
TOLLEGNAZ	(1)	111	624185.86	63080.60	1043.45	40 40 12.0	, 4500.0	, ,5-55	.5 40 00.4		
			004500 70	66400.05	1309.85	45°44'59.3"	7°50'42 8	3" 1309 85	45°44'45.3"	7°50'47.	4" 980333.22
LOMATTO	(1)	112	631566.76	64163.96							6" 980351.00
PONT TRENTA			632590.31 632557.83		1255.97		7°51'25 4	1255.97			8" 980399.07
COSTEY		114		77630.88			8°54'59 2	379.34			9" 999999.99
GAGGIOLO	(CH)	601	714729.00 717901.83	83131.35			8°57'31 1	575.95			2" 999999.99
MERIDE	(UH)	002	111901.03	00101.00	5, 5.55				4000 40400 MARIE		
CHIACCO	/CLI	603	724026.76	77376.31	230.64	45°50'16.3"	9°02'09.7	7* 233.97			2" 999999.99
CHIASSO	(CL	603	709197.36								1" 999999.99
BEDIGLIORA	(UH)	004	105151.00	55.755.91	300.EE						

A3: Tabelle der berechneten Einflüsse auf Lotabweichung und Schwerebeschleunigung

(Lotabweichungs- Komponenten in["], Schweren in [mgal])

	моно	-TIEFE	PO-	SEDIN	MENTE	IVR	EA-OI	BERFL.	T/	ALFÜL	LUNGEN		SEE	N	s	UMME	
NR	ξr	dg dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg
1	07.6 -06	.5 -130.48	-07.1	03.7	-002.26	-00 5	012	2 000.56	00.0	000	-000.04	00.0	-00 9	000.18	00.0	-01.0	122.04
2		.5 -158.22			-000.76			-000.13			-006.28			000.00			
3		.7 -153.59			-000.90			-001.17			-003.84	00.0	-00.1	000.00	-00.1	-01.0	-159.50
4		.7 -144.33			-001.07						-003.44			000.01			
5	08.1 -06	.7 -130.36	-07.1	03.4	-001.43	-00.3	00.9	-000.14	00.0	0.00	000.00	-00.2	-00.9	000.35	00.5	-03.3	-131.58
7		.0 -105.69			-003.47			000.03			000.00			000.07		-03.5	-109.06
8		.6 -129.74			-001.50			000.03			-000.01			001.52			-129.70
9 10		.5 -141.39 4 -159.06			-001.23 -000.70			000.45			-000.02			000.05			
11		.5 -159.40			-000.70			000.00			-007.97			000.00			
12 13		.9 -158.16 .2 -154.37			-000.61			000.01			00.000			000.00			
14		7 -151.42			-000.90 -000.89			000.16			-000.02			000.02 000.02			
15		1 -138.65			-001.39			000.75			-000.01			000.02			
16		4 -133.78			-001.35			000.12			-000.01			001.02			
4-	04.4.04	0 450 70													200		
17 18		.3 -152.73 .3 -154.67			-001.16 -000.78			000.75			-000.31 -000.01			000.02 000.02			
19		.7 -158.01			-000.78			000.04			000.00			000.02			
20		2 -154.70			-000.66			-000.01			000.00			000.01			
21	04.9 -01.	9 -146.44			-000.76			-000.08			-004.73			000.03			
22	07.0 02	2 -133.37	05.0	04.0	004.07	00.4	00.0	000.06	00.0		000.04						
23		4 -123.04			-001.27 -001.33			000.06			-000.24 -000.02			000.24 000.06		7.0.00	-134.58 -124.32
24		5 -110.22	(5.50		-001.55			000.00			000.02			000.08			-124.32 -111.73
25		8 -121.33			-001.24			000.01			-000.02			000.04			-122.52
26		0 -133.39			-000.96			000.00			-000.19			000.02			
27	05.9 .01	6 -143.01	-04.0	01.4	-000.95	00 1	00.0	000.03	00.4	~ 4	-000.53	00 1	00.1	000.08	00.0	~ ~	144.00
28		3 -153.07			-000.93			000.03			-000.53			000.08			-144.38 -152.77
29	-00.3 01.				-000.67			000.01			-000.01			000.01			
30	-01.6 02.				-000.56			000.00			000.00			000.00			
31	03.9 00.	3 -151.93	-04.2	01.0	-000.63			000.00			-003.91			000.00			
32	07.7 -01.	5 -141.07	-04.9	01.1	-000.75	00 1	00 1	000.00	00.0	-00.3	-005.53	00.1	00.0	000.00	03.0	-00 6	147 35
33	11.3 -03.				-001.35			000.01			-000.02			000.00			
34	12.9 -04.5				-002.03			000.01			-000.01			000.19			-107.09
35	09.5 -05.0	6 -123.54	-07.0	02.3	-001.26	-00.1	00.4	-000.03	00.0	00.0	000.00	-00.4	00.6	000.16	02.0	-02.3	-124.67
36	01.8 -02.0	0 -155.65	-04.7	02.8	-000.85	01.5	-00.9	-000.43	0.00	-00.6	-003.70	0.00	-00.1	00.00	-01.4	-00.8	-160.63
37	04.0 -03.	7 -149.68	-05.3	02.9	-000.97	01.6	00.0	-002.05	00.2	00.0	-003.11	00.0	-00.1	000.00	00.5	-00.9	-155.81
38	06.2 -05.3		-06.0	03.1	-001.15	-00.4	02.2	-000.94	00.0	-00.2	-003.58	00.0	-00.2	000.01	-00.2	-00.4	146.62
39	01.9 -01.0				-001.27	01.4	-00.6	001.46	00.0	-00.1	-000.08	00.0	-00.1	000.04	-01.4	-00.1	149.96
40	04.5 -03.4				-001.34			020.65			-000.02			000.07			
41	03.1 -02.3	3 -149.03	-04.9	02.3	-001.09	02.2	-01.0	001.82	00.0	00.0	-000.02	00.1	-00.1	000.03	00.5	-01.1	148.29
42	03.9 -02.6				-000.99			012.48	00.0	00.0	-000.01			000.04			
43	05.6 -03.6				-001.01			-000.13			00.00	00.1	-00.2	000.06	-00.5	-00.2	143.29
44	03.6 -01.8				-000.84			-000.20			-000.01			000.04			149.89
45	04.7 -02.3				-001.18			013.56			-000.05			000.44			130.61
46	06.2 -03.2	: -141.30	-05.3	01.9	-000.86	-00.5	01.1	-000.58	00.0	UU.1	-000.01	8.00	8.10-	005.75	01.2	-01.9	137.00
47	06.0 -02.8							-000.38			-000.02			005.13			138.51
48	07.1 -03.3				-000.88			-000.08			-000.02			004.27			134.95
49 50	06.2 -02.5 07.0 -02.3				-000.80 -000.79			-000.05 -000.01			-006.48 -009.71			000.11			149.58
51	03.5 -03.0				-000.79			023.08			-009.71			000.02 000.05	01.7 -		
52	07.1 -05.9							-000.29						000.04			
53 54	07.4 -02.6 08.9 -02.3				-000.82 -001.28			-000.01 000.02			-004.44 -000.33				04.4 -		
55	00.6 -00.6				-001.28			000.02			-000.33			000.05	-03.0		133.16 156.62
	07.6 -01.0				-000.73			000.00			-000.02			000.00			
																	•

																	_	
	MO	но-ті	EFE	PO-S	EDIM	ENTE		A-OBI				JNGEN		SEEN	4.		MME	da
NR	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg
57	06.2	00.1	-149.43	-04.3	00.7	-000.67			000.00			-000.01			000.00			-150.11
58			-151.30			-000.75			000.01			-000.02			000.01			-152.05 -158.25
59			-157.62			-000.63			000.01 000.01			-000.01 -000.01			000.00			-157.82
60			-157.13 -156.85			-000.70 -000.66			000.00			-000.01			000.00			-157.52
61	03.5	01.2	-130.63	-03.6	00.5	-000.00	00.0	00.0										
62	07.3	00.1	-151.50			-000.64						-000.03			000.00			-152.17
63			-144.38			-000.80			000.00			-000.16 -006.76			000.01			-145.33 -149.50
64			-142.04			-000.70 -000.79	00.0	00.1	000.00	-00.3	-00.2	-004.04			000.01			-137.78
65 66			-132.96 -130.90			-000.79			000.00	0.00	00.1	-000.04			000.17	06.2	01.0	-131.70
						SI RE DEX SERVES				00.0	00.0	000 00	00.1	00.1	000.07	05.5	01.3	-128.93
67			-127.91			-001.08			000.01			-000.02 -000.05			000.12			-125.85
68 69			-125.01 -116.24			-000.91 -001.04			000.00			00.00			003.07	07.8	-03.3	-114.21
70			-113.22			-001.33	00.0	00.1	00.00	00.1	0.00	-000.02			000.10			-114.47
71			-099.11	-08.1	00.6	-001.75	00.0	00.1	000.00	00.0	0.00	000.00	00.3	-01.0	002.37	06.3	-04.3	-098.49
				07.0	00.0	004.00	00.0	00.1	000.00	00.0	00.0	000.00	0.00	00.2	000.06	07.5	-02.5	-105.11
72			-103.78 -135.36			-001.39 -001.18			000.00			-000.08	00.1	0.00	000.04	03.7	-00.6	-136.56
73 74			-159.45			-000.65			000.00	-00.1	0.00	-000.01			000.00			
75			-159.57	-03.9	02.4	-000.77			000.02			-000.04			000.00			
76	-02.1	01.5	-159.72	-03.9	02.7	-000.86	00.4	-00.4	000.05	00.0	0.00	-000.01	00.0	00.0	000.00	-05.0	03.6	-100.54
	00.5	00.0	1E0 E0	04.4	03.0	-000.92	00.7	-00 B	-000.03	00.0	0.00	-000.01			00.00			
77 78			-158.52 -159.79			-000.92			000.08	00.0	0.00	00.000			00.00			
79		500000	-157.62			-001.28	00.3	-00.7	000.19			000.00			000.00 000.01			
80	02.5	-02.6	-154.05			-001.30			000.66			-000.01 -000.02			000.01			
81	03.4	-03.4	-150.31	-05.2	03.3	-001.40	02.2	-04.5	009.43	00.0	00.0	-000.02	00.0	00.1	000.01		•	
82	01.3	-01.3	-158.09	-04.6	03.9	-001.28	00.2	-00.7	000.11			00.00			000.00			
83			-151.53			-001.40	01.0	-02.7	000.73			000.00			00.000			
84			-149.42			-001.39			010.17			000.00 -000.01			000.00 000.01			
			-143.41			-001.71 -001.36			017.09 006.07			-000.01			000.01			
86	05.8	-05.4	-142.54	-00.1	05.5	-001.50							100000000000000000000000000000000000000					
87	04.9	-04.9	-149.47			-001.63	00.6	-02.5	000.35			000.00			000.00			
88			-156.59			-000.76	00.3	00.0	000.05 006.18			-000.01 000.00			000.01			
89			-141.99			-001.60 -002.56	-00.3	01.5	000.15			000.00			000.00			
90 91			-133.92 -133.77	-08.1	05.2	-002.11	-01.3	02.8	-000.22			00.00	00.0	00.0	00.00	-01.1	00.2	-136.10
91	07.5	-07.0	100.77										00.4	00.7	000 57	00.0	00.0	100.00
92			-128.13			-002.00	-00.7	01.0	-000.13 000.07			000.00			000.57			
93			-121.17	-09.4	05.9	-003.42 -002.99						000.00			000.02			
94 95			-115.33 -116.69	-09.0	04.2	-002.13	-00.2	00.5	-000.04	00.0	0.00	00.000	-00.3	-00.6	000.19	00.4	-03.9	-118.67
96			-118.66	-08.2	03.3	-001.73	-00.2	00.5	-000.03	00.0	0.00	000.00	-00.3	00.4	000.12	01.1	-02.9	-120.30
										00.0	00.0	000.00	-00 1	00.1	000.03	02.3	-03 5	-114 92
97			-113.23			-001.71 -003.23	-00.1	00.3	-000.01			000.00			000.02		33-33-33-33	2 2 com/2/22
98 99			-105.85 -122.83			-003.59	-00.8	00.7	-000.04	00.0	00.0	00.00	00.0	0.00	00.00	-01.3	-01.7	-126.46
100		and the same	-123.86	-09.8	14.9	-010.97	-00.8	00.4	-000.06	00.0	00.0	000.00			000.00			
101			-131.05	-08.3	10.6	-004.99	-01.3	01.9	003.81	00.0	00.0	000.00	00.0	00.0	000.00	-00.9	03.9	-132.23
		05.0	440.70	00.0	06.6	-002.52	00.4	A1 2	000.34	00.0	00.0	000.00	00.0	00.0	00.00	-00.5	00.1	-150.88
102 103			-148.70 -140.59			-002.52	-01.0	00.6	012.95			000.00			000.00			
103			-134.39	-10.3	11.1	-006.11	-01.1	00.4	-000.05			000.00			000.00			
105			-115.90			-035.42		00.2	-000.02			000.00			000.00			0.00
106	11.3	-11.0	-111.69	-10.4	16.8	-067.57	-00.3	00.1	000.00	00.0	00.0	000.00	50.0	00.0	000.00	0.00	0 5.9	-179.26
107	07.4	-07 5	-142.27	-09.8	08.8	-004.34	-00.5	00.1	000.06	00.0	00.0	000.00	00.0	00.0	000.00	-02.9	01.4	-146.55
108			-150.93			-002.40	0.00	-00.8	-000.13			000.00			000.00			
109			-156.60	-06.5	05.3	-001.75	00.0	-00.5	-000.02			000.00			000.00			
			-161.79			-001.22	00.0	-00.3	000.00 000.04			000.00			000.00			-163.01
111	0.00	-00.8	-160.15	-04.9	04.3	-001.46	00.0	-00.3	000.04									
112	01.2	-01.6	-158.07	-04.9	04.8	-001.68			000.09			000.00						-159.66
113	02.0	-02.3	-157.06	-05.1	05.0	-001.80	00.1	-00.5	000.10			000.00	00.0	00.0	000.00	-03.0 -03.0	02.2	-158.76 -154.29
114			-151.91			-002.63			000.25 000.02			000.00						-112.46
			-111.90 -124.56			-000.58 -000.58			000.02			000.00	00.0	00.0	000.00	-17.9	12.8	-125.12
302	-13.7	11.4	127.50	JE.U	51.4	555.55	50.1											

-																		
ND		DHO-T				IENTE			BERFL.			UNGEN		SEEN			UMME	
NR	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg
303	-13.7	10.1	-139.33	-02.6	01.5	-000.47	00.1	00.0	000.01	00.0	00.0	000.00	00.0	00.0	000.00	-16.2	11.6	-139.79
			-138.47 -142.53			-000.61 -000.55			000.02 000.02			000.00			000.00			
			-142.33			-000.55			000.02			000.00			000.00			
307	-11.4	07.6	-145.43	-02.8	01.1	-000.58	00.1	00.0	000.01	00.0	00.0	000.00	00.0	0.00	000.00	-14.1	08.7	-146.00
			-147.49 -145.11			-000.58 -000.69			000.02 000.03			000.00			000.00			
			-148.00			-000.63			000.03			000.00			000.01			
			-149.90 -138.66			-000.82 -000.62			000.05 000.03			-000.01 000.00			000.01 000.00			
313	-12.2	09.5	-142.64			-000.55	00.1	-00.1	000.02			000.00		00.0	000.00	-14.8	11.1	-143.17
314	-11.8	09.3	-145.69	-02.7	01.8	-000.49	00.1	-00.1	000.01	00.0	00.0	000.00	00.0	0.00	00.00	-14.4	11.0	-146.17
			-146.70 -150.38			-000.68 -000.72			000.04			000.00			000.00			
			-150.38			-000.72			000.04			-000.00			000.00			
			-155.75			-000.78			000.05			000.00			000.00			
			-145.34 -151.59			-000.64 -000.52			000.02			000.00			000.00			
321	-08.3	05.8	-150.61	-03.0	01.1	-000.68	00.1	0.00	000.02	00.0	0.00	000.00	00.0	0.00	000.01	-11.2	06.9	-151.26
322	-06.8	05.0	-152.49	-03.2	01.2	-000.72	00.1	0.00	000.03	00.0	0.00	-000.01	00.0	0.00	000.01	-09.9	06.2	-153.18
			-153.36			-000.75			000.03			-000.01			000.01			-154.08
			-155.64 -155.79			-000.71 -000.75			000.03			-000.01 -000.01			000.01			-156.32 -156.51
326	-01.7	02.0	-154.78	-03.7	01.4	-000.82	00.2	00.1	000.05	00.0	0.00	-000.01	00.1	0.00	000.02	-05.1	03.5	-155.54
327	-00.4	01.1	-156.66	-03.9	01.5	-000.64	00.3	00.1	000.00	00.0	0.00	000.00	00.1	0.00	000.01	-03.9	02.7	-157.29
328 329			-153.27 -150.54			-000.87 -001.02			000.07 000.19			-000.02 -000.03			000.03			-154.06 -151.35
330			-150.37			-000.99			000.19			-000.03			000.05			-151.12
331			-148.19			-001.00			000.45			-000.03			000.09			-148.68
332			-146.89			-000.94			000.71			-000.02			000.10			-147.04
333 334			-142.20 -147.93			-001.36 -000.78			017.26 -000.14			-000.04 -000.02			000.38			-125.96 -148.83
335			-146.29			-000.76			-000.08			-004.62			000.03			-151.72
336			-143.86 -142.33			-000.78 -000.77			-000.02 -000.01			-000.23 -001.46			000.14			-144.75 -144.55
337															000.02			
338 339			-140.07 -138.16			-000.79 -000.80			-000.01 000.00			-003.49 -007.77			000.00			-144.35 -146.73
340			-134.35			-000.93	00.1	00.2	00.00	00.6	-00.3	-000.67			000.01			-135.94
341 342			-130.01 -126.48			-001.08 -001.14			000.01			-000.12 -000.04			000.03			-131.17 -127.62
									000.00			-000.02			000.04			-124.24
343 344			-123.08 -118.92			-001.18 -001.23			000.00			-000.02			000.04			-120.10
345	11.5	-04.7	-115.03	-07.2	01.5	-001.29			000.00			000.00			001.49			-114.83
346 347			-108.67 -104.79			-001.52 -001.72			000.00			00.00			001.17 000.22			-109.02 -106.29
348	12.6	-05.9	-100.68	-09.4	01.7	-002.02	00.0	00.2	000.00	00.0	00.0	00.00	-00.2	00.0	000.05	03.0	-04.0	-102.65
349			-095.89			-002.71	0.00	00.2	000.00			000.00			000.01			-098.59
350 351			-092.46 -101.82			-003.46 -002.90			000.00 000.02			-000.00			000.01			-095.91 -104.55
352			-132.89			-001.11			000.02			-000.50			000.03			-134.45
353	08.1	-01.7	-139.02	-05.0	01.1	-000.80	00.1	00.1	000.00	00.4	-01.0	-002.80	00.1	0.00	000.01	03.7	-01.5	-142.61
354	08.4	-02.5	-135.85			-000.84			000.00			-001.78			000.000			-138.47
355 356			-136.64 -139.87			-000.82 -001.06			000.00 000.02			-005.61 -000.79			000.00			-143.07 -141.66
357			-157.87			-000.67			000.01			-000.01			000.00			-158.54
358	11.8	-01.8	-129.36			-000.84			000.00			-000.02			000.20			-130.02
359			-144.75			-001.06			000.11			-000.32 -000.00			000.17			-145.85 -097.36
601 602			-094.50 -099.26			-002.87 -001.92			000.00			-000.00			000.01			-101.14
603	13.4	06.2	-088.91	-12.4	01.2	-002.79	0.00	00.1	000.00			-000.000			00.000			-091.70
604	10.1	05.0	-121.27	-07.0	01.9	-001.12	00.0	00.3	000.01	0.00	0.00	-000.01	00.0	00.1	000.06	03.1	-02.7	-122.33

179

A4: Tabelle aller Reduktionswerte und der Residual- Anomalien

(Koordinaten in [m], Lotabweichungen in ["], Schweren in [mgal])

			LAN	DESKO	ORD.	R	OHDA	TEN	то	POEIN	IFLUSS	AN	DERE	EINFL.	RES	SIDUAL	FELD
STATION		NR	=0.000	X	Н	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg
MOTTARONE	(I)		678804			-20.3	20.6	-024.41	-20.7	16.2	-032.13	00.0	-01.8	-132.04 -165.39	00.4	06.2	107.63
VALPIANA VOGOGNA	(I) (I)		664883 666454			01.0	03.5	-004.10	-16.8	16.1	-019.67	-00.1	-01.0	-159.50	18.2	-13.7	155.40
ORNAVASSO	(1)	_	675664		211	-22.6	21.8	006.38	-25.2	17.6	-015.48	-00.4	0.00	-150.36	03.0	04.2	156.74
BAVENO	(i)	5	682957	84242	196	-17.6	26.4	-022.07	-17.7	21.0	-007.58	00.5	-03.3	-131.58	-00.4	08.7	109.51
CAMPO D. FIORI	(l)	7	703404	80537	1228	-21.9	07.7	-057.52	-22.1	04.4	-031.04	01.1	-03.5	-109.06	-00.9	06.8	051.54
POLLINO	(l)	8	691175	91877	752	-32.2	25.1	-029.97	-34.1 -35.0	14.6	-017.05	-01.0	00.1	-129.70 -142.14	03.9	03.7	137.49
CICOGNA MASERA	(l) (l)	10	667419	109602	285	-00.9	-03.7	-095.01	-20.2	10.1	-017.84	-04.5	02.0	-167.69	23.8	-15.8	072.68
CRODO	(1)	11	668402	119473	518	-05.9	-04.7	-130.64	-20.3	05.3	-028.97	-06.8	04.3	-160.05	21.2	-14.3	029.41
CADARESE	(l)	12	671129	127375	744	-12.0	-01.2	-139.94	-21.5	04.8	-046.45	-08.4	05.6	-158.76	17.9	-11.6	018.82
ARUOGNO	(1)	13	678513	113558	1232	-08.8	-03.4	-066.82	-28.2	06.9	-013.60	-03.2	01.5	-155.11 -152.11	22.6	-11.8	088.29
MALESCO	(I) = (I)	14	682409	109272	1267	-04.2	02.7	003.73	-23.9 -25.9	12.0 17.8	-013.67	00.0	-00.7	-139.10	03.0	04.0	142.83
MTE. BAVARIONE MTE. CARZA	E (I) (I)	16	695830	99703	1062	-22. 3 -22.7	23.0	-026.58	-26.4	17.9	-021.15	01.4	-02.1	-134.00	02.3	07.2	107.42
ALPE VECCHIA	(1)	17	669963	102940	1655	06.6	-16.7	999.99	-14.5	-03.6	-028.44	-01.9	00.4	-153.43	23.0	-13.5	999.99
VERGELETTO	(CH)	18	687671	120719	943	-06.6	09.5	-069.64	-23.5	15.2	-029.98	-03.1	02.1	-155.40	20.0	-07.8	085.76
SABBIONE	(CH)	19	686410	135884	648	-07.8	05.9	-133.07	-18.4	09.2	-051.63	-07.9	05.1	-158.57 -155.36	18.5	-08.4	025.50
LODANO LOSONE	(CH)	20	696308	1240/9	337	-08.7	10.5	-069.65	-25.3 -29.1	05.9	-031.33	00.8	00.6	-151.98	14.7	04.0	120.39
LOSCINE																	
PASSO NEGGIA	(CH)	22	708766	107542	1393	-08.6	02.8	-047.61	-15.9	-01.7	-016.99	02.5	-01.1	-134.58 -124.32	00.1	04.7	072.77
MUGENA CADEPIANO	(CH)	24	714951	90814	292	-20.8	00.1	-063.53	-21.3	-01.1	-006.20	03.6	-03.5	-111.73	-03.1	04.7	048.20
PAIRAGO	(CH)	25	721221	102184	560	-21.1	-06.9	-051.97	-27.3	-08.6	-009.28	04.6	-02.3	-122.52	01.6	04.0	070.55
RIVERA	(CH)	26	714578	109278	472	-09.0	06.4	-056.55	-18.0	02.4	-013.24	03.6	-01.3	-134.52	05.4	05.3	077.97
MONTI MOTTI	(CH)	27	710250	117223	1067	-21.8	-00.1	-062.40	-33.6	-04.4	-020.87	00.8	00.2	-144.38 -153.77	11.0	04.1	081.98
BRIONE FRASCO	(CH)		704856														052.80
GIORNICO	(CH)	30	709719	140386	451	-00.1	12.8	-134.68	-12.5	09.1	-041.21	-05.1	03.7	-158.86	17.5	0.00	024.18
LODRINO	(CH)	31	718902	129216	269	-07.1	05.3	-120.21	-21.3	01.6	-033.88	-00.1	01.6	-156.47	14.3	02.1	036.26
BELLINZONA	(CH)	32	723012	118652	232	-08.9	00.6	-091.33	-22.4	-03.1	-019.62	03.0	-00.6	-147.35	10.5	04.3	056.02
LA CAVA	(1)				1149	-20.0	06.1	-060.78	-28.9	04.6	-010.05	05.2	-02.0	-122.06 -107.09	03.7	03.5	061.28
A. COLONNO LUINO	(I) (I)	34	731553	93297	1322	-23.4	06.5	-062.07	-29.9	01.8	-020.16	02.0	-03.2	-124.67	-00.8	07.0	077.36
PIEDIMULERA	(i)	36	665143	97375	226	03.1	-06.0	-028.33	-18.3	12.2	-021.47	-01.4	-00.8	-160.63	22.8	-17.4	132.30
ANZ. D'OSSOLA	(1)	37	670958	93670	208	-10.0	09.0	026.25	-19.5	15.9	-021.58	00.5	-00.9	-155.81	09.0	-06.0	182.06
MERGOZZO	(1)		677173			-22.7	24.6	-011.19	-23.9	19.3	-011.49	-00.2	-00.4	-146.62	01.4	05.7	135.43
L.DI CASTELLO	(1)		675743 681842			01.8	01.2	999.99	-18.5	10.3	-029.27	-01.4	-00.1	-149.96 -124.61	06.5	01.9	999.99
A. BUSARASCA VALLE LOANA	(I) (I)		680351				06.1	014.31	-16.4	12.7	-016.60	00.5	-01.1	-148.29	16.6	-05.5	162.60
CREVES FINERO	(1)	42	685586	106507	830	-12.4	09.4	031.40	-23.2	12.2	-011.49	-00.1	-00.8	-135.93	10.9	-02.0	167.33
FALMENTA	(i)	43	689755	102999	525	-22.2	20.8	-008.04	-24.9	17.5	-016.40	-00.5	-00.2	-143.29	03.2	03.5	135.25
CADANZA	(CH)	44	691603	112545	574	-05.2	13.0	001.35	-24.1	15.3	-018.16	00.6	00.1	-149.89	18.3	-02.4	151.24
PIZZO LEONE	(CH)	45	695694	10688	1659	-08.7	19.7	999.99 -011.51	-19.5	15. 4	-047.80	01.7	-01.9	-130.61 -137.00	03.4	08.2	125.49
BRISSAGO	(CH)																
ISOLINO	(CH)	47	700256	110044	200	-19.4	19.8	-012.67	-26.3	11.9	-015.85	02.1	-00.1	-138.51 -134.95	04.8	08.0	105.84
RANZO ASCONA	(CH)	48 40	704226	112200	199	-16.5	10.7	-036.30	-25.6	03.7	-009.36	02.0	-00.1	-149.58	07.1	07.1	113.28
MAGADINO	(CH)	50	710698	113835	196	-15.8	04.8	-066.43	-25.6	-00.2	-011.92	01.7	-00.6	-151.19	08.1	05.6	084.76
PIZ PROMAN	(I)	51	674030	97439	2095	-18.2	08.6	999.99	-28.6	12.8	-059.52	-00.7	-01.1	-125.07	11.1	-03.1	999.99
GARLANDA	(1)	52	680764	87851	197	-24.2	20.2	-022.61	-24.5	16.6	-006.73	-00.2	-02.1	-138.71	00.5	05.7	116.10
CASTELLACCIO	(i)	53	711160	112166	197	-04.0	05.8	-056.39	-15.3	-00.3	-015.89	04.4	-00.9	-143.93	06.9	07.0	087.54
P. CORGELLA	(CH)	54	723060	111916	1703	-01.1	-10.9	999.99	-12.7	-11.9	-047.18	-03.8 -03.8	-01.3	-133.16 -156.62	25.1	-13 A	101 12
COIMO SAN VITTORE	(I) (CH)	56	727643	121513	263	-07.6	-09.2	-102.02	-22.8	-04.4	-026.96	03.0	-00.1	-143.59	12.2	02.8	041.57
CAIT THE TOTAL	(0.1)	-	040														

			LAN	DESKO	ORD.	i	ROHDA	ATEN	то	POEIN	NFLUSS	AN	DERE	EINFL.	RE	SIDUAI	LFELD
STATION		NF	Y	X	Н	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg	ξ	η	dg
LOSTALLO CAUCO MALVAGLIA FORCOLA CORTI	(CH) (CH) (CH) (CH)	58 59 60	734936 729820 723867 735846 746589	132641 143645 144998	1125 1089 1628	-13.3 -12.1 -15.3	-05.7 -14.1 -03.3	-131.64 -153.22 -155.08	-24.4 -20.7 -22.0	-06.9 -14.6 -02.9	-027.54 -039.60 -016.23	00.4 -03.9 -02.7	01.5 03.4 02.8	-152.05 -158.25 -157.82	10.7 12.5 09.4	-00.3 -02.9 -03.2	020.41 005.03 002.74
CHIAVENNA PRA PINCE SOMAGGGIA SAN FEDELE LIVO	(1) (1) (1) (1)	63 64 65	753526 746174 752549 753647 744225	126256 123372 116029	905 209 211	-11.2 -14.8 -12.8	11.4 -09.5 -11.2	-134.97 -145.31 -116.00	-22.0 -26.8 -26.9	10.5 -07.7 -08.4	-042.18 -025.40 -026.73 -018.87 -012.91	04.0 05.4 06.5	00.4 -00.5 -01.1	-145.33 -149.50 -137.78	06.8 06.6 07.6	00.5 -01.3 -01.7	010.36 004.19 021.78
BRENZEGLIO CORTE ST.MARIA-REZZ. PIAZZO GUELLO DI BEL.	(1) (1) (1) (1)	68 69 70	736530 748371 741644 751435 741041	109934 102936 101871	260 204 918	-01.6 -22.7 -12.3	-08.5 09.4 -12.0	-089.57 -074.74 -084.01	-14.9 -31.2 -21.2	-08.8 08.8 -10.5	-021.61 -013.99 -017.94 -011.53 -008.10	07.0 07.8 07.6	-00.8 -03.3 -01.9	-125.85 -114.21 -114.47	06.3 00.7 01.3	01.1 03.9 00.4	036.28 039.47 030.46
CORTABBIO CADINELLO VARZO FONTI ANTRONAPIANA	(I) (CH) (I) (I)	73 74 75	753063 730223 662484 658548 651944	117176 117835 108251	1850 594 769	-00.9 -08.0 -04.2	-06.1 08.2 18.5	-086.10 -137.06 -118.67	-13.7 -21.0 -21.3	-08.3 15.5 28.6	-020.01 -023.21 -032.53 -032.82 -035.17	03.7 -07.8 -05.9	-00.6 05.1 04.0	-136.56 -160.11 -160.36	09.1 20.8 23.0	02.8 -12.4 -14.1	050.46 023.05 041.69
PONTEGRANDE MACUGNAGA RIMA STA. MARIA CAMPELLO MONT	(l) (l) (l) (l)	78 79 80	654748 642690 643649 654427 661943	89955 81615 84428	1198 1389 1097	-09.8 -16.1 -12.3	13.9 14.0 09.0	-107.85 -083.73 -008.99	-22.0 -29.4 -26.9	25.5 27.7 26.1	-037.76 -030.23	-05.1 -03.4 -01.5	03.7 02.0 -00.8	-160.72 -158.71 -154.69	17.3 16.7 16.1	-15.3 -15.7 -16.3	052.87 074.98 145.70
RIVA BOCCIOLETTO FERRERA CERVAROLO STRONA	(l) (l) (l) (l)	83 84 85	640106 652480 658337 664037 670604	75533 79634 78959	657 705 1036	-15.0 -21.4 -27.4	06.8 14.0 24.2	007.66 039.41 027.03	-28.3 -29.5 -30.5	25.0 22.2 22.5	-032.47 -020.97 -019.97 -010.74 -022.56	-00.5 -00.9 -01.7	-02.8 -02.2 -00.8	-152.20 -140.64 -128.03	13.8 09.0 04.8	-15.4 -06.0 02.5	159.86 180.05 155.06
PILA CIMALMOTTO VARALLO GRANERO ISOLELLA	(I) (CH) (I) (I)	88 89 90	649718 681120 662500 658053 663945	126243 74025 59277	1381 449 470	-02.6 -21.8 -37.1	07.6 28.1 34.8	-113.14 026.31 007.17	-16.2 -23.3 -30.9	14.5 24.1 24.4	-020.41 -016.73 -015.18 -008.74 -008.35	-06.2 -00.5 -02.6	03.8 -00.4 -00.4	-157.30 -137.41 -136.23	19.8 02.0 -03.6	-10.7 04.4 10.8	044.16 163.72 143.40
ALZO CASTAGNOLA INVORIO LESA MOMBELLO	(I) (I) (I) (I)	93 94 95	673467 671580 681451 687672 693192	63097 68615 76260	749 420 197	-32.9 -29.3 -29.0	24.4 21.1 26.9	-034.96 -044.86 -039.62	-27.5 -25.1 -24.5	16.5 14.8 18.8	-007.74 -006.18 -001.44 -005.58 -004.65	-00.8 -00.2 00.4	-02.3 -03.0 -03.9	-124.51 -118.31 -118.67	-04.6 -04.0 -04.9	10.2 09.3 12.0	089.55 073.45 079.05
FERRERA CADREZZATE SOSTEGNO COSSATO BIOGLIO	(1)	98 99 100	704378 694015 664610 655759 653964	72691 55861 45692	269 399 252	-23.1 -34.0 -33.6	11.6 25.1 27.7	-056.46 -035.39 -032.89	-21.2 -28.7 -28.5	07.2 17.2 16.5	-003.39 -000.99 -002.22 -002.45 -004.36	-00.4 -01.3 -00.9	-03.2 -01.7 05.7	-109.07 -126.46 -134.89	-01.5 -04.0 -04.2	07.6 09.6 05.5	052.61 091.07 102.00
ROSAZZA FAVARO MONGRANDO MASSAZZA MONTEMAGGIORE	(I) (I) (I)	103 104 105	641794 644050 644015 655739 650341	49844 41786 37771	779 327 232	-32.0 -32.4 -31.4	29.0 30.2 26.3	009.13 012.55 -064.19	-38.6 -31.8 -25.2	28.1 19.4 13.9	-023.27 -008.82 -004.09 -001.24 -001.10	-01.5 -02.7 -00.3	01.9 03.0 03.7	-131.58 -140.55 -151.34	08.1 02.1 -05.9	-01.0 07.8 08.7	140.71 153.10 087.15
MONTALTO TAVAGNASCO GRAND VERT VERRES TOLLEGNAZ	(I) (I) (I)	108 109 110	634250 630136 625840 618982 624185	44829 49680 56849	269 329 364	-19.9 -07.9 -02.4	12.0 11.4 06.9	-004.48 -036.60 -095.51	-34.3 -26.3 -20.0	17.4 18.4 16.2		-02.3 -03.2 -05.3	00.1 00.9 02.8	-153.46 -158.37 -163.01	16.7 21.6 22.9	-05.5 -07.9 -12.1	148.98 121.77 067.50
	(i) (l) (CH)	113 114 301	631566 632590 632557 641906 647119	64163 52992 155281	1244 1256 3571	-14.3 -14.9 17.4	09.1 -04.6 -14.8	-069.62 -023.50 999.99	-29.6 -30.5 23.7	17.5 02.2 -20.1	-034.12 -020.81 999.99	-03.0 -02.0 -19.3	02.2 00.7 13.9	-158.76 -154.29 -112.46	18.3 17.6 13.0	-10.6 -07.5 -08.6	089.14 130.79 999.99

LANDESKOORD. ROHDATEN TOPOEINFLUSS ANDERE EINFL. RESIDUALFELD STATION NR X ξ ξ η dq n da η (CH) 303 650390 142435 926 -11.5 04.8 999.99 -11.2 04.5 999.99 -16.2 11.6 -139.79 15.9 -11.3 999.99 **EGGISHORN RICHINEN** (CH) 304 655942 144243 2433 -19.3 04.8 999.99 -19.0 04.9 999.99 -15.5 10.9 -139.06 15.2 -11.0 999.99 BELLWALD (CH) 305 655358 141410 1539 -11.6 -03.2 999.99 -12.7 -01.9 999.99 -15.1 10.6 -143.06 16.2 -11.9 999.99 08.9 -09.3 999.99 07.9 -08.4 999.99 -14.8 09.9 -142.71 15.8 -10.8 999.99 RAFUFT (CH) 306 664697 146602 2276 ST. GOTTHARD (CH) 307 686570 156590 2093 -05.5 99.9 999.99 -06.3 03.6 999.99 -14.1 08.7 -146.00 14.9 99.9 999.99 GHEISC (CH) 308 683432 152593 1898 -12.1 09.1 999.99 -14.0 10.1 999.99 -13.4 08.4 -148.05 15.3 -09.4 999.99 NUFENENSTOCK 01.9 -00.2 999.99 -01.1 00.6 999.99 -13.4 08.7 -145.76 16.4 -09.5 999.99 (CH) 309 672934 146636 2866 02.5 04.6 999.99 -01.2 05.9 999.99 -12.6 08.1 -148.63 16.3 -09.4 999.99 SAN GIACOMO (CH) 310 677388 146311 2498 BASODINO (CH) 311 679179 140540 3273 -08.7 06.6 999.99 -13.9 08.5 999.99 -10.5 06.8 -150.67 15.7 -08.7 999.99 -15.5 02.1 999.99 -16.4 02.3 999.99 -15.2 11.4 -139.25 16.1 -11.6 999.99 RIEDERHORN (CH) 312 644425 135726 2230 ORFRRIET (CH) 313 644126 132997 1384 -18.6 02.7 999.99 -18.4 02.4 999.99 -14.8 11.1 -143.17 14.6 -10.8 999.99 (CH) 314 643568 130769 680 -05.6 -04.6 999.99 -07.0 -03.2 999.99 -14.4 11.0 -146.17 15.8 -12.4 999.99 RRIG -01.2 -19.2 999.99 -04.7 -14.2 999.99 -13.0 09.8 -147.34 16.5 -14.8 999.99 **ROSSWALD** (CH) 315 647422 128730 2088 07.0 -05.2 999.99 01.4 -00.5 999.99 -11.7 09.1 -151.06 17.3 -13.8 999 99 SIMPLON (CH) 316 645514 121866 1997 ISELLE (CH) 317 658768 117549 631 -03.2 05.1 999.99 -15.8 18.6 999.99 -08.3 05.8 -159.83 20.9 -19.3 999.99 SAAS GRUND (CH) 318 638802 107196 1579 06.8 03.6 999.99 -03.1 07.9 999.99 -09.5 07.9 -156.48 19.4 -12.2 (CH) 319 691700 157710 2777 -08.4 99.9 999.99 -11.2 04.5 999.99 -13.5 08.2 -145.96 16.3 99.9 GIUBING 999.99 (CH) 320 691256 153310 1166 -04.9 04.0 999.99 -08.1 03.6 999.99 -12.4 07.7 -152.10 15.6 -07.3 AIROLO 999.99 -00.9 99.9 999.99 -04.9 05.8 999.99 -11.2 06.9 -151.26 P. DIL CORNO (CH) 321 691112 149688 2500 152 999 999 99 -03.9 99.9 999.99 -09.8 10.4 999.99 -09.9 06.2 -153.18 15.8 99.9 ZAMBAROIDE (CH) 322 691743 145438 2484 999 99 **MASCARPINO** -15.0 99.9 999.99 -20.8 07.2 999.99 -09.0 05.6 -154.08 14.8 99.9 999.99 (CH) 323 691253 142299 2450 999.99 -13.4 14.1 999.99 -07.5 04.9 -156.32 A. LARESCIO (CH) 324 692136 138130 1721 -03.9 99.9 17.0 99.9 (CH) 325 691940 132741 1585 -02.7 99.9 999.99 -16.3 -02.4 999.99 -05.9 04.0 -156.51 LA COSTA 19.5 99.9 999.99 -08.0 99.9 999.99 -22.4 -01.8 999.99 -05.1 03.5 -155.54 19.5 99.9 999 99 (CH) 326 692015 130294 1870 COSTA PIANA 01.1 99.9 999.99 -15.1 13.5 999.99 -03.9 02.7 -157.29 20.1 99.9 999.99 PIODA NERA (CH) 327 692642 126922 471 01.6 99.9 999.99 -14.3 17.1 999.99 -03.3 02.3 -154.06 19.2 99.9 ALPE PII (CH) 328 693325 124703 1647 999 99 999 99 MTE DI LOCO (CH) 329 693414 120695 2064 -08.0 99.9 999.99 -24.1 12.8 999.99 -02.3 01.7 -151.35 18.4 99.9 S. MOSOGNO (CH) 330 692641 118672 1727 -14.6 99.9 999.99 -30.6 10.2 999.99 -01.9 01.3 -151.12 17.9 99.9 999 99 -07.9 14.8 999.99 -25.2 14.9 999.99 -00.4 00.7 -148.68 17.7 -00.8 999.99 ALIA (CH) 331 693609 115052 1416 999.99 -18.1 10.8 999.99 01.3 00.1 -147.04 14.5 99.9 RASA (CH) 332 693924 112349 923 -02.3 99.9 GRIDONE (CH) 333 693481 108705 2187 -11.5 99.9 999.99 -19.9 14.6 999.99 -00.2 00.5 -125.96 08.6 99.9 999,99 99.9 16.5 999.99 -23.7 13.4 999.99 00.5 00.4 -148.83 99.9 02.7 **INTRAGNA** (CH) 334 697564 114809 340 999 99 (CH) 335 701324 114902 224 99.9 11.7 999.99 -28.6 06.3 999.99 01.1 00.7 -151.72 99.9 04.7 999.99 LOSONE (CH) 336 706138 114888 247 99.9 12.1 999.99 -35.4 05.9 999.99 01.3 -00.1 -144.75 99.9 06.3 999.99 MINUSIO (CH) 337 710025 115147 99.9 05.5 999.99 -32.9 -00.2 999.99 00.4 -00.1 -144.55 **GORDOLA** 206 (CH) 338 714132 114759 224 99.9 03.6 999.99 -33.2 -00.4 999.99 00.7 -00.5 -144.35 99.9 04.5 CLIGNASCO (CH) 339 718626 114666 212 -16.2 02.5 999.99 -26.6 -00.4 999.99 02.4 -00.7 -146.73 08.0 03.6 **GIUBIASCO** 999 99 513 01.5 99.9 999.99 -09.8 -06.1 999.99 04.1 -01.4 -135.94 07.2 99.9 S. ANTONINO (CH) 340 718772 111719 999 99 MEDEGLIA (CH) 341 718507 108182 740 -13.0 99.9 999.99 -21.8 -06.9 999.99 04.0 -01.6 -131.17 04.8 99.9 999.99 (CH) 342 718330 105196 **LEGLIO** 666 -20.5 99.9 999.99 -28.3 -03.7 999.99 04.1 -02.0 -127.62 03.7 99.9 999.99 LUGAGGIA (CH) 343 718476 102464 541 -22.2 99.9 999.99 -28.5 -02.6 999.99 04.3 -02.3 -124.24 02.0 99.9 999.99 -27.5 -03.2 999.99 04.6 -02.8 -120.10 00.5 99.9 CANOBBIO (CH) 344 718618 99213 402 -22.4 99.9 273 -24.6 99.9 999.99 -28.4 -02.8 999.99 05.5 -03.3 -114.83 -01.7 99.9 999.99 CASSARATE (CH) 345 718350 96058 999.99 -20.8 -09.0 999.99 03.5 -02.8 -109.02 -02.2 99.9 999.99 P.D.BISSONE (CH) 346 718516 91237 273 -19.5 99.9 (CH) 347 718656 88292 -22.8 99.9 999.99 -23.4 -06.5 999.99 03.6 -03.4 -106.29 -03.0 99.9 999.99 MAROGGIA (CH) 348 718771 85108 296 -22.1 99.9 999.99 -23.6 01.9 999.99 03.0 -04.0 -102.65 -01.5 99.9 999.99 **RIVA VITALE** 395 -27.5 99.9 999.99 -27.8 02.3 999.99 02.0 -04.3 -098.59 -01.7 99.9 (CH) 349 718574 81170 999.99 RANCATE 386 -23.9 99.9 999.99 -23.7 01.9 999.99 00.8 -04.5 -095.91 -01.0 99.9 999.99 **BRUSATA** (CH) 350 718438 78234 M. GENEROSO (CH) 351 722656 87869 1703 -20.7 -05.9 999.99 -24.1 -05.4 999.99 03.6 -03.6 -104.55 -00.2 03.1 999.99 (CH) 352 721281 111913 1122 01.0 -11.5 999.99 -10.5 -13.6 999.99 03.8 -01.2 -134.45 07.7 03.3 999.99 TIGLIO **BELLINZONA** (CH) 353 722505 116760 307 99.9 -05.7 999.99 -20.8 -08.4 999.99 03.7 -01.5 -142.61 99.9 04.2 999.99 (CH) 354 717768 112348 211 -02.8 00.6 999.99 -15.0 -04.1 999.99 04.7 -01.5 -138.47 07.5 06.2 999.99 **CADENAZZO** (CH) 355 720527113971 228 -06.2 -07.5 999.99 -18.6 -06.4 999.99 04.0 -02.0 -143.07 08.4 00.9 999.99 **GIUBIASCO** MOGNONE (CH) 356 716743 117147 1465 -26.9 08.0 999.99 -38.3 05.4 999.99 01.8 -00.2 -141.66 09.6 02.8 999.99 (CH) 357 734669 147318 1613 -10.8 -02.6 999.99 -17.8 -02.7 999.99 -03.7 03.3 -158.54 10.7 -03.2 999.99 S. BERNARDINO (1) 358 746080 112992 210 -21.6 05.9 999.99 -32.2 03.0 999.99 07.0 -01.1 -130.02 03.6 04.0 999.99 DOMASO (CH) 359 704393 117489 1671 -21.6 06.8 999.99 -32.9 04.2 999.99 00.1 00.5 -145.85 11.2 02.1 999.99 CIMETTA (CH) 601 714729 77631 376 -25.1 01.9 999.99 -24.3 02.7 999.99 00.1 -04.3 -097.36 -00.9 03.5 999.99 **GAGGIOLO MERIDE** (CH) 602 717902 83131 573 -23.6 02.9 999.99 -26.3 02.6 999.99 02.4 -04.1 -101.14 00.3 04.4 999.99 (CH) 603 724027 77376 231 -27.6 -02.4 999.99 -27.1 -00.2 999.99 00.9 -04.9 -091.70 -01.4 02.7 999.99 **CHIASSO BEDIGLIORA** (CH) 604 709197 95986 566 -27.4 05.5 999.99 -29.7 03.0 999.99 03.1 -02.7 -122.33 -00.8 05.2 999.99

A5: Tabelle des neuen Ivrea- Modells

(Koordinaten und Körperdimensionen in [m], Winkel in Altgrad, Dichtekontraste in [gcm⁻³])

Art: 1= Rechteck- Quader; 2= Dreieck- Quader

Art	Nr	x	у	Н	Ax	Ay	Az	α	β	γ	dρ
1	01	-21736.	546199.	0.	100000.	15000.	10000.	52.0	0.	0.	0.243
2	03	-16220.	541889.	-10000.	100000.	10000.	7000.	52.0	90.	0.	0.243
2	04	-16220.	541889.	-10000.	100000.	19940.	9300.	52.0	25.	0.	0.243
1	05	-33556.	555434.	-10000.	100000.	32000.	19940.	52.0	-65.	0.	0.243
2	52	95551.	667039.	-5000.	5000.	5000.	2000.	55.0	0.	-90.	0.358
1	53	90032.	675378.	-1000.	9304.	15135.	500.	-35.0	0.	0.	0.358
1	51	74802.	653319.	0.	26000.	5000.	4000.	33.5	0.	0.	0.458
1	14	74704.	653241.	-4000.	25000.	10000.	6000.	33.5	0.	0.	0.358
2	88	74802.	653319.	-7000.	7000.	10000.	2000.	129,0	0.	-90.	0.358
2	16	76636.	650322.	-10000.	25000.	10000.	3500.	33.5	90.	0.	0.358
2	30	95551.	667039.	-10000.	5000.	9304.	3665.	55.0	0.	-90.	0.358
2	26	95551.	667039.	-55000.	45000.	9304.	3665.	55.0	0.	-90.	0.358
1	20	90032.	675378.	-1500.	9304.	23735.	3500.	-35.0	0.	0.	0.358
1	21	90032.	675378.	-5000.	9304.	23735.	5000.	-35.0	0.	0.	0.358
2	22	98418.	665030.	-10000.	27400.	9000.	3500.	55.0	90.	0.	0.358
2	23	100550.	668013.	-10000.	23735.	11640.	5430.	55.0	25.	0.	0.358
1	24	93126.	679800.	-10000.	18340.	30895.	11640.	55.0	-65.	0.	0.358
2	25	98670.	669329.	-14921.	11640.	30895.	5395.	55.0	-65.	-90.	0.358
2	32	111267.	689484.	0.	43000.	18261.	9304.	-35.0	0.	90.	0.311
2	33	108140.	701227.	-18000.	24000.	8000.	6713.	-75.0	0.	90.	0.211
2	74	90032.	675378.	-1000.	4000.	5000.	15135.	-125.0	0.	90.	-0.489
1	75	98683.	687796.	-1500.	5000.	8600.	3500.	-35.0	0.	0.	-0.489
2	76	107741.	691952.	0.	2500.	18261.	5000.	-35.0	0.	90.	-0.489
2	77	114119.	709779.	0.	2000.	1700.	8000.	82.0	0.	90.	-0.489
1	70	63921.	644508.	-7000.	14000.	10000.	3000.	39.0	0.	0.	0.400
2	72	27400.	633500.	-10000.	32000.	19940.	5500.	-142.5	-25.	90.	0.400
1	09	39830.	625000.	-7000.	18000.	10000.	3000.	39.0	0.	0.	0.395
2	11	44235.	619560.	-10000.	46000.	15407.	7184.	39.0	25.	0.	0.395
1	12	33537.	632772.	-10000.	46000.	31000.	15407.	39.0	-65.	0.	0.395
2	17	76636.	650322.	-10000.	25000.	12230.	5705.	33.50	25.	0.	0.262
1	18	69184.	661580.	-10000.	25000.	30895.	12230.	33.5	-65.	0.	0.262
2	73	69185.	661580.	-10000.	25000.	7000.	30895.	33.5	25.	0.	0.262
2	88	93694.	701787.	-38515.	30895.	23735.	1000.	-35.0	-180.	65.	-0.538

Art	Nr	x	у	Н	Ax	Ay	Az	α	β	γ	dρ
2	71	39830.	625000.	0.	10000.	3300.	15000.	-38.0	0.	90.	0.400
2	27	106538.	663820.	-53484.	23735.	36322.	25000.	55.0	115.	0.	0.395
2	19	78568.	647403.	-50886.	25000.	36322.	20000.	33.5	115.	0.	0.395
2	13	44235.	619560.	-52132.	46000.	38185.	17806.	39.0	115.	0.	0.395
1	56	66124.	641789.	-10000.	3500.	14000.	42000.	-51.0	0.	0.	-0.405
1	57	58224.	630888.	-10000.	13000.	14000.	42000.	39.0	0.	0.	-0.405
2	06	-16220.	541889.	-55442.	100000.	41184.	19200.	52.0	115.	0.	0.395
2	48	114119.	709779.	0.	13000.	7500.	10000.	-98.0	0.	0.	-0.390
1	40	124140.	687674.	-51000.	50000.	20494.	6000.	-8.0	0.	-8.	0.410
2	47	114119.	709779.	0.	20494.	6700.	48000.	-98.0	0.	0.	0.410
2	59	114119.	709779.	0.	20494.	30000.	52000.	-98.0	8.	0.	0.410
1	34	100607.	706158.	-30000.	14000.	60000.	10000.	15.0	0.	0.	0.102
1	35	100607.	706158.	-18000.	14000.	31000.	12000.	15.0	0.	0.	0.102
1	93	112048.	717506.	-6000.	23000.	12000.	12000.	105.0	0.		0.102
2	99	106095.	739722.	-6000.	29000.	13000.	39000.	-75.0	0.		0.302
2	60	112048.	717506.	-6000.	6000.	3692.	12000.	-75.0	0.	0.	-0.298
1	94	106095.	739722.	-30000.	14000.	14000.	8000.	105.0	0.		-0.298
2	38	98590.	767735.	-30000.	29000.	13000.	13000.	-75.0	0.		0.102
1	45	90000.	704000.	0.	60000.	40000.	4000.	98.0	0.	0.	-0.066
2	39	55260.	663773.	0.	4000.	40000.	35000.	-82.0	0.	90.	-0.066
1	44	135300.	706700.	0.	30000.	70000.	5000.	15.0	0.	0.	-0.045
1	43	55000.	600000.	-54000.	30000.	99999.	5000.	-35.0	0.	0.	-0.400
1	95	104000.	652000.	0.	15000.	47000.	7500.	-28.0	0.		-0.076
1	96	125000.	655000.	0.	12000.	48000.	5000.	-28.0	0.		0.032
1	97	55000.	618000.	0.	40000.	40000.	5000.	-45.0	0.		0.090
1	80	105000.	680500.	0.	7000.	2000.	1500.	55.0	0.	0.	0.600
1	80	105000.	680500.	-1500.	7000.	2000.	8500.	55.0	0.	0.	0.200
1	81	74704.	653241.	0.	6000.	2000.	10000.	33.5	0.	0.	0.200
2	82	100800.	668000.	-10000.	5000.	5000.	45000.	-135.0	0.	0.	0.500
2	84	52965.	648504.	-7000.	15000.	5000.	25000.	39.0	0.	90.	0.400
2	08	22137.	646803.	-38000.	31000.	25000.	5000.	-51.0	0.	-65.	0.400
2	85	52965.	648504.	-12000.	5000.	2000.	21000.	39.0	0.	-90.	0.400
2	66	68081.	663248.	-12000.	8000.	25000.	2000.	-56.5	0.	-90.	0.400
1	86	95600.	667000.	-10000.	4000.	4000.	42000.	-35.0	0.	0.	0.500
1	87	73445.	654795.	0.	5000.	10000.	7000.	129.0	0.	0.	0.400

Art	Nr	x	у	Н	Ax	Ay	Az	α	β	γ	dρ
1	07	32278.	634326.	-5000.	7000.	13000.	2000.	-51.0	0.	0. 0	.400
1	60	87500.	676300.	200.	7000.	2500.	300.	-20.0	0.	00	.200
1	61	87500.	676300.	200.	6000.	2000.	300.	70.0	0.	00	.200
1	62	132500.	749500.	400.	8500.	3000.	3000.	75.0	0.	0. 0	.100
1	63	127000.	748000.	200.	3000.	9500.	400.	43.0	0.	00	.200
1	64	81000.	594000.	1831.	22000.	7000.	5000.	53.0	0.	0. 0	.100
1	65	85000.	648000.	1301.	15000.	5000.	5000.	65.0	0.	0. 0	.150

A6: Karte der bis 1987 gemessenen Astro-Stationen

Druck: Bundesamt für Landestopographie 3084 Wabern 1988