

Grundlagennetze für extrem lange Tunnel am Beispiel des Gotthard-Basistunnels (Länge: 57 km)

René Haag, Adrian Ryf, Roland Stengele (Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel, VI-GBT c/o Grünenfelder und Partner AG, CH-7013 Domat/Ems)

Zusammenfassung

Die Schweizerischen Bundesbahnen SBB planen für die effizientere Abwicklung des Schienenverkehrs durch die Alpen eine neue Bahnlinie von Arth Goldau nach Lugano. Das Projekt nennt sich Alptransit Gotthard. Kernstück ist der 57 km lange Gotthard-Basistunnel. Als Generalunternehmung für alle Vermessungsarbeiten wurde das „Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel“ VI-GBT (siehe Beilage1) beauftragt. Im Winter 1995/96 erfolgten die ersten Messarbeiten. Zusammen mit dem für den Südteil zuständigen „Consorzio Geodetico Sud“ hat VI-GBT mittels GPS einen Lage-Bezugsrahmen zwischen dem Nordportal des Gotthard-Basistunnels und Lugano geschaffen. Im Sommer 1996 folgen die Feldmessungen der Nivellemente für den Höhenbezug. Diesen Arbeiten und weiteren Vermessungsaspekten dieses interessanten Bauprojektes sind die folgenden Seiten gewidmet.

1 Das Bauprojekt

Das Projekt Alptransit Gotthard sieht einen Basistunnel vor, der von Erstfeld im Kanton Uri über 57 km nach Bodio im Kanton Tessin führt. Aus Gründen der Gebirgsüberlagerung, der Geologie und der Zwischenangriffsstellen ist der Tunnel nicht geradlinig, sondern stellt ein langgestrecktes „S“ dar. Um eine möglichst kurze Gesamtbauteilzeit zu erreichen, wird der Tunnel von mehreren Stellen aus gleichzeitig vorgetrieben (siehe Beilage2). Zu den beiden Portalen an den Enden des Tunnels gesellen sich so drei Zwischenangriffsstellen in Amsteg bei km 7.5, in Sedrun bei km 21 und in Faido bei km 40. Während in Amsteg und Faido jeweils Fensterstollen von 2 und 2.5 km gebaut werden, erfolgt der zweiseitige Vortrieb in Sedrun von einem 800 m tiefen Schacht aus.

2 Die Anforderungen an die Vermessung

2.1 Die Vorgaben des Auftraggebers

Die wichtigste, bzw. eindeutigste Vorgabe des Auftraggebers an den Vermesser ist die Durchschlagsgenauigkeit. Sie bildet die Grundlage für das vermessungstechnische Vorgehen und zieht einen ganzen Katalog von Anforderungen nach sich. Für den Gotthard-Basistunnel fordern die SBB bei allen Durchschlägen eine einfache Standardabweichung von höchstens 10 cm in Querrichtung und 5 cm in der Höhe. Lagekoordinaten sollen zudem mit einer Zuverlässigkeit von 25 cm, Höhen mit einer Zuverlässigkeit von 12.5 cm bestimmt werden.

Die SBB machen zudem klare Vorgaben an den Vermesser bezüglich Qualitätsmanagement im Sinne von ISO 9001.

2.2 Interne Zielsetzungen des Vermessungskonsortiums VI-GBT

Um die Anforderungen des Auftraggebers zu erfüllen, hat sich das Vermessungskonsortium seine internen Ziele vorgegeben. Diese betreffen einerseits die notwendige Genauigkeit der Ausgangskordinaten an den Angriffsstellen, andererseits die Vorgehensweise bei der Absteckung im Tunnelinnern. Eine a priori-Rechnung zeigt, dass mit geeigneten Mitteln und einem entsprechenden Vorgehen die geforderte Durchschlagsgenauigkeit erreicht werden kann. Einen wesentlichen Beitrag werden dabei Kreiselmessungen leisten. Diese haben neben der Kontrolle und Verbesserung der Azimute der Polygonseiten unter Tag den grossen Vorteil, dass sie eine unabhängige Messmethode darstellen und damit die Zuverlässigkeit stark steigern.

Um systematische Fehler auszuschliessen, hat sich das Vermessungskonsortium den Einsatz von unabhängigen Messmethoden als oberstes Ziel gesetzt. Diese sollen beispielsweise auch bei der Ablotung im 800 m tiefen Schacht in Sedrun die Zuverlässigkeit erhöhen.

3 Ausgangslage, vorhandene Grundlagen

3.1 Lage

Die Landesvermessung der Schweiz erlebt zur Zeit einen Umbruch. Die alte Landesvermessung, LV03 bezeichnet, weil sie aus den Anfängen des Jahrhunderts (1903) stammt, wird in den nächsten Jahren durch LV95 abgelöst. LV03 weist Zwänge auf, die auf tektonische Bewegungen und unterschiedliche Basen der Triangulation zurückzuführen sind. Diese Zwänge erkennt man insbesondere auch auf der Gotthardachse. Die neue Landesvermessung LV95 stützt sich auf ca. 100 über die ganze Schweiz verteilte, mit GPS bestimmte Punkte.

3.2 Höhe

Die offiziellen Gebrauchshöhen des schweizerischen Landesnivellements basieren noch auf Knotenwerten des alten „Nivellement de précision“ von 1864-1891 (LN02).

Anlässlich der Projektteam-Präsentation im Auswahlverfahren hat die Projektleitung VI-GBT vor der SBB-Expertenkommission AlpTransit festgestellt, dass diese alten Höhen (LN02) nicht brauchbar sind als Grundlage für das Durchschlagsnetz Gotthard-Basistunnel. Vorgeschlagen wurde eine Landesnivellement-Neumessung über den Gotthardpass oder die kostengünstigere strenge Neuausgleichung der vorhandenen Originalmessungen, kombiniert mit lokalen Anschlussnivellements bei den Portalen und Zwischenangriffsstellen.

Das alte „Nivellement de précision“ wird in den nächsten Jahren (1996 bis 2001) durch ein neues Landeshöhennetz LN95 abgelöst. Ausgewählte Teile davon werden für den Gotthard-Basistunnel bereits ab Mitte 1997 zur Verfügung stehen.

4 Der Lagebezugsrahmen

Mit GPS steht heute eine Messtechnologie zur Verfügung, die es erlaubt in kürzester Zeit die relative Lage von weit auseinander liegenden Punkten zu bestimmen. Für Tunnelbauten bietet diese Technologie enorme Vorteile.

4.1 Anlage und Versicherung der Punkte

Die Netzpunkte wurden so gewählt, dass sie einerseits eine gute Übertragung der Orientierung und des Massstabes des Aussenetzes ins Tunnelinnere ermöglichen und andererseits für GPS-Messungen geeignet sind. Sie müssen zudem die Verbindung sowohl mit der bestehenden als auch mit der neuen Landesvermessung ermöglichen. Wichtiges Kriterium bei der Wahl der Punkte war deren Dauerhaftigkeit. Sie wurden an Stellen gewählt, wo die Gefahr der Zerstörung in den nächsten 10 bis 20 Jahren gering ist. Bei jedem Portal, bzw. bei jeder Zwischenangriffsstelle wurden deshalb die folgenden Punkte rekognosziert und falls notwendig, neu versichert:

- ein Messpfeiler, von dem sich der Portalbereich überblicken lässt und von dem aus alle Absteckungen und Kontrollen vorgenommen werden können. Dieser Punkt ist in der nahen Umgebung rückversichert. Zum Schutz vor Sonneneinstrahlung und mechanischen Einwirkungen sind die Pfeiler doppelwandig ausgebildet.
- drei Fernzielpunkte im Abstand von 2 bis 6 km vom Messpfeiler. Diese liegen nach Möglichkeit im Fels und können signalisiert werden. Mindestens zwei der Punkte eignen sich für die Eichung des Kreisels, das heisst sie liegen auf ungefähr gleicher Höhe wie der Pfeiler.
- drei Punkte der bestehenden Landesvermessung LV03

Zu diesen Punkten gesellen sich die entlang von Alptransit liegenden LV95-Punkte Altdorf, Amsteg, Disentis, Oberalp, Dalpe und Biasca (siehe Beilage3 "GPS-Netz").

4.2 Die GPS-Messungen

Die GPS-Messungen erfolgten an zwei Tagen im November 1995. Gearbeitet wurde mit 14 Instrumenten des Typs Wild-System-200 von LEICA, bestimmt wurden insgesamt 31 Punkte. Die GPS-Geräte arbeiteten im statischen Modus mit einer Registrierrate von 30 Sekunden. Während der ganzen Messdauer wurden 4 Geräte auf den LV95-Punkten Biasca, Dalpe, Disentis und Altdorf permanent betrieben. Die übrigen zehn Geräte „wanderten“ von Punkt zu Punkt. Die Messungen auf den übrigen Punkten dauerten zweimal zwei Stunden. Alle Punkte konnten problemlos bestimmt werden.

Die Auswertung der Messungen erfolgte mit der Software SKI der Firma LEICA. Verwendet wurden dabei die Standard-Auswerteparameter. Einzige Ausnahme davon bildeten die präzisen Satellitenbahnen, die jedoch keine signifikanten Unterschiede zur Auswertung mit den Broadcast-Ephemeriden ergaben. Der Beizug von speziellen Ionosphären- und Troposphärenmodellen erübrigte sich. Die Ionosphäre beeinflusst den Netzmassstab, der wegen der anschließenden Lagerung auf einen existierenden Bezugsrahmen unwichtig ist. Die Troposphäre beeinflusst die Höhengenaugigkeit, die im vorliegenden Fall eine untergeordnete Rolle spielt, da ja das Landesnivellement (LN95) den Höhenbezug für die Tunnelabsteckung bildet.

Die Auswertung erfolgte in zwei Schritten: Erst die vier Stationen, die ununterbrochen betrieben wurden, anschliessend die restlichen Punkte gegenüber der jeweils nächsten ständig betriebenen Station. Die so bestimmten Koordinatensätze wurden anschliessend miteinander ausgeglichen. Aus der Ausgleichung resultierte eine Standardabweichung der Lagekoordinaten von ca. 7 mm; diejenige der Höhen betrug ca. 2 cm. Der Vergleich der errechneten Koordinaten der LV95-Punkte mit den offiziellen Koordinaten der Landesvermessung LV95 ergab die folgenden Differenzen (Restklaffungen einer Helmerttransformation):

	dY (mm)	dX (mm)
Biasca	-4	-4
Dalpe	1	3
Disentis	5	-2
Altdorf	-2	3

Der Massstabsunterschied betrug lediglich 0.002 ppm, der Orientierungsunterschied 0.002 mgon.

4.3 Die terrestrischen Messungen

Zur Bestimmung der Rückversicherungen der Pfeiler und weiterer Hilfpunkte dienen ergänzende konventionelle Messungen mit Theodolit und Distanzmesser. Diese stimmten gut mit GPS überein. Die erreichte Richtungsgenauigkeit beträgt ca. 0.3 mgon, die Distanzgenauigkeit ca. 1 - 2 ppm.

4.4 Die Wahl des Bezugsrahmens

Dass bei der Wahl eines Bezugsrahmens für die Absteckung eines Tunnels das gemessene Grundlagennetz nicht verformt werden darf, ist offensichtlich. Dass ein beliebiges Werknetz bei einer Bahnlinie, die in ein bestehendes Eisenbahnnetz und eine besiedelte Landschaft eingefügt werden soll, nicht in Frage kommt, versteht sich ebenso klar. Als mögliche Bezugsrahmen stehen für Alptransit Gotthard somit die aktuelle Landesvermessung LV03 oder die neue Landesvermessung LV95 zur Verfügung. LV95 hat dabei den grossen Vorteil, dass für alle Absteckungsarbeiten einheitlich gearbeitet werden kann. Zwänge sind nicht zu erwarten. Dies bedingt aber, dass noch vor Baubeginn alle bestehenden Vermessungswerke, die tangiert werden, in LV95 umtransformiert werden. Betroffen wären davon sowohl die gesamte Bahnvermessung, als auch die Katastervermessungen der betroffenen Gemeinden. Dies verursacht natürlich Zusatzkosten. Die Wahl von LV03 hat diesen Nachteil nicht, denn es lässt sich eine Lagerung des freien Netzes auf die existierende Landesvermessung bei den Portalbereichen finden, die minimale Restklaffungen zur Folge hat. Die Differenzen, die dadurch bei den Zwischenangriffsstellen auftreten, können in Kauf genommen werden, da dort keine Anschlüsse an bestehende Bahnanlagen geplant sind. In der Beilage 5 sind diese Differenzen graphisch dargestellt. Bei der Wahl von LV03 würde nach Fertigstellung des Bauwerkes eine Transformation aller Daten in LV95 notwendig werden.

Der definitive Entscheid über die Wahl des Bezugsrahmens ist zur Zeit der Entstehung des vorliegenden Textes noch nicht gefallen. Die Vor- und Nachteile werden noch abgewägt. Ein Entscheid ist für Mitte 1996 vorgesehen.

5 Der Höhenbezug

Die Zielsetzungen für das projektbezogene Höhennetz des Gotthard-Basistunnels der VI-GBT und für das neue, gesamtschweizerische Landeshöhennetz LN95 der Landestopographie (L+T) liegen sehr nahe beisammen. Deshalb wurde ein gemeinsames Konzept ausgearbeitet und die Realisierung im Frühling 1996 gestartet.

5.1 Neubearbeitung von Original-Nivellementdaten

Alle archivierten Originalmessungen des Landesnivellements seit 1903 sollen vorerst für den im Einflussbereich des Gotthard-Basistunnels liegenden Teil neu erfasst und als strenges, kinematisches Höhennetz neu ausgeglichen werden. Dabei werden auch die Schweremessungen der letzten Jahrzehnte ausgewertet und integriert.

Das Höhennetz Gotthard-Basistunnel beziehungsweise analog dazu das neue LN95 unterscheiden sich somit wie folgt vom alten „Nivellement de précision“ LN03 :

- durch strenge orthometrische Reduktion der Höhen (Schwere-Einflüsse)
- durch Berücksichtigung der tektonischen Bewegungen (seit den Originalmessungen)
- durch strenge Ausgleichung (Methode kleinste Quadrate statt Knoten-Zwängung)
- durch Verwendung des neuen cm-Geoides und der ellipsoidischen Höhenunterschiede aus dem GPS-Netz LV95

Die beschleunigte Aufarbeitung der einschlägigen Daten des alten Landesnivellements erfolgt in Zusammenarbeit zwischen L+T und VI-GBT und läuft seit Januar 1996. Dadurch kann auf ein sehr aufwendiges neues Präzisionsnivellement über den Gotthardpass verzichtet werden.

5.2 Ergänzungsmessungen 1996

Der Anschluss der beiden Tunnelportale Erstfeld und Bodio sowie aller Zwischenangriffsstellen in Amsteg, Sedrun und Faido erfolgt durch lokale Ergänzungsmessungen bis zu den jeweils nächstgelegenen, solide fundierten Höhen-Fixpunktgruppen des alten Landesnivellements. Dies ergibt total knapp 30 Kilometer Nivellementmessungen. Die Rekognoszierung wurde im Mai 1996 abgeschlossen, die Feldmessungen erfolgen im Juni 1996.

6 Durchschlagsprognosen

Ein wesentliches Kriterium bei der Vergabe des Vermessungsmandates durch die SBB, war der Nachweis, dass mit der vorgeschlagenen technischen Lösung, die geforderte Genauigkeit für alle Durchschläge (± 10 cm quer zur Tunnelachse) erreicht werden kann. Dieser Nachweis wurde durch eine Simulationsberechnung erbracht, die sich auf verschiedenen Modellannahmen abstützt.

• Die wesentlichen Merkmale des *Funktionalen Modells* sind:

- offene Polygonzüge in Tunnelmitte
 - übergreifende Polygonmessungen in geraden Streckenbereichen
 - 430 m lange Polygonseiten. Somit liegt jeder 3. Polygonpunkt auf Höhe eines Querschlags zur Doppelröhre. Reduktion der Längen in Kurvenbereichen, damit ein minimaler Abstand der Visurlinie von der Tunnelwand von 1.5 m (bzw. 1.0 m bei engen Kurven in Zwischenangriffen) eingehalten wird.
 - In der Regel auf jeder 8. Polygonseite ein gegenseitiges Kreiselazimut.
- Das *Stochastische Modell* beschreibt das Verhalten der gemessenen Grössen infolge der unvermeidlichen, zufälligen Messfehler. A priori werden für die einzelnen Messelemente die folgenden mittleren Fehler ('Standardabweichung', σ) angenommen:
- Richtungen ± 3 cc
 - Kreiselazimute ± 15 cc
 - Distanzen $\pm (0.5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$
 - Zentrierung ± 0.3 mm
 - GPS-Koordinaten ± 10 mm
 - Lotung in Vertikalschächten $\pm 3.0 \text{ mm} / 100 \text{ m}$

Modelle sind geeignet, um komplexe Sachverhalte mit mathematischen Methoden zu beschreiben. Die Realität wird in aller Regel jedoch vereinfacht und deshalb nur approximativ in Modellen abgebildet. Zum Beispiel erfordert der Übergang eines gemessenen Kreiselazimutes (astronomische, physikalische Grösse) in ein ebenes (geometrisches) Azimut im Projektionssystem der Schweizerischen Landesvermessung mehrere Reduktionsschritte, in die Geoidannahmen im topographisch extremen Alpengebiet einfließen. Aus diesen Gründen wurden die a priori Messgenauigkeiten eher etwas pessimistisch angenommen, die aber gesamthaft als durchaus realistisch zu betrachten sind.

Eine Durchschlagsprognose konzentriert sich auf den sogenannten Durchschlagsfehler quer zur Tunnelachse, der sich aus der relativen Fehlerellipse der jeweils letzten Vermessungspunkte in beiden Vortriebsrichtungen ergibt. Die folgende Tabelle weist jeweils für die Hauptdurchschläge die zu erwartenden Durchschlagsfehler aus.

Durchschlag	Station	Jahr	Vortriebe	Länge Anz. Polygonpunkte	Durchschlagsfehler	
Faido - Bodio - Pilotstollen - Hauptstollen	142.200	1999 2001	Faido	5.0 km, 16 PP	10.9	27
			Bodio	14.9 km, 35 PP	3.3	8
Erstfeld - Amsteg	107.505	2001	Erstfeld Amsteg	7.6 km, 19 PP 2.0 km, 8 PP	6.9	17
Amsteg - Sedrun	119.200	2003	Amsteg Sedrun (Sch.f.)	13.6 km, 35 PP 0.8 km, 3 PP	8.3	21
Sedrun - Faido	125.633	2004	Sedrun (Sch.f.) Faido	5.7 km, 10 PP 16.8 km, 41 PP	7.8	19

Durchschlagsprognosen (nur Lage) für Hauptdurchschläge

Bemerkungen zur Tabelle:

- Im vermessungstechnisch kritischen Durchschlag des Pilotstollens Faido - Bodio ergibt sich bei einer Genauigkeit der Kreiselazimute von ± 12 cc ein Durchschlagsfehler (1σ) von 92 mm (anstatt 109 mm).
- Das 2.5-fache Konfidenzintervall kann mit einer Wahrscheinlichkeit von 98.8 % eingehalten werden und ist somit faktisch einem Maximalfehler ('worst case') gleichzusetzen.

Die bautechnischen Fehlergrössen werden für den Bau des Gotthard-Basistunnels wie folgt angenommen:

- ± 5 cm für die Genauigkeit des Ausbaus
- ± 5 cm für die Steuerungsgenauigkeit der Tunnelbohrmaschinen
- ± 10 cm für zusätzlichen bautechnischen Nutzraum

Der daraus resultierende Gesamtfehler von + 18 cm wurde bei der Gestaltung der Normalprofile in vollem Umfang berücksichtigt. *Der Durchschlagsfehler auf Grund der Vermessung (siehe Tabelle) wurde dagegen bei der Profilgestaltung nicht berücksichtigt.* Vielmehr wird in Kauf genommen, dass der tatsächlich realisierte Durchschlagsfehler durch nachträgliche Profilerweiterungen im Durchschlagsbereich vollständig ausgeglichen werden muss. Das bedeutet zum Beispiel, dass bei 27 cm Durchschlagsfehler das Profil über eine Länge von ca. 250 m angepasst werden muss um eine fahrdynamisch akzeptable Gleisverziehung zu realisieren. Bei geschätzten Kosten von 2'000 Fr. pro Meter Nachprofilieren liegt die wirtschaftliche Bedeutung eines möglichst kleinen Durchschlagsfehler und mithin einer exakten Vermessung auf der Hand.

7 Ablotung im Schacht Sedrun

Die Ablotung im 800 m tiefen Schacht Sedrun ist zum Zeitpunkt dieser Manuskriptverfassung noch Gegenstand von ausgedehnten Abklärungen. Resultate sind auf Herbst 1996 zu erwarten.

8 Ausblick

Der Bau des Gotthard-Basistunnels wird sicher noch manche interessante vermessungstechnische Aspekte hervorbringen. Die Verfasser werden die Gelegenheit ergreifen und in vier Jahren bei der nächsten Tagung zum Thema Ingenieurvermessung über die Fortschritte und neuen Aspekte berichten.



Bild 1. Gotthard-Basistunnel (57 km), Linienführung

Grünenfelder und Partner AG

Denter Tumas 6
7013 Domat / Ems
Tel. 081 650 30 50
Fax 081 650 30 51

Swissair Photo + Vermessungen AG

Bahnhofstr. 9
6460 Altdorf
Tel. 044 720 50
Fax 044 720 55

COGETI

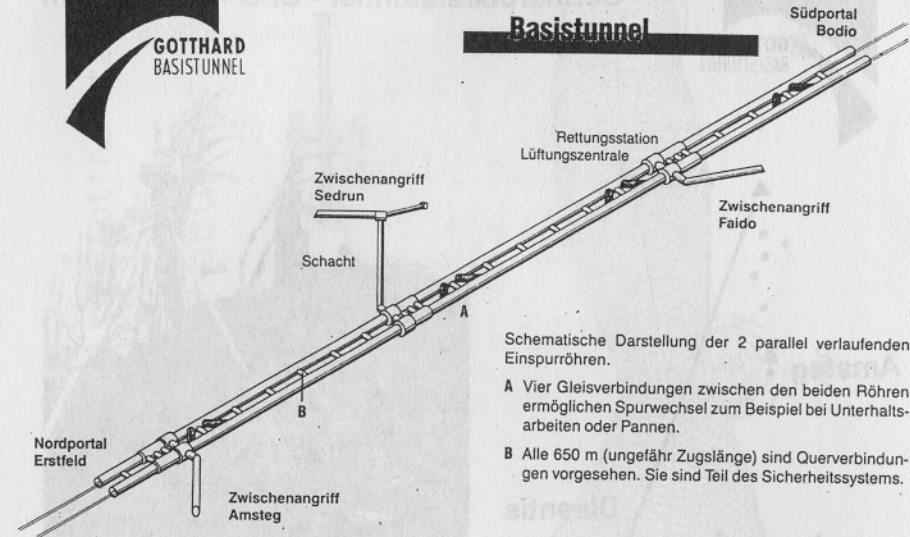
c/o A. Gisi
Via Lugano 2a
6924 Sorengo
Tel. 091 967 39 77
Fax 091 966 32 31

c/o U.Meier

Via Vignascia 7
6648 Minusio
Tel. 091 743 56 66
Fax 091 743 94 52



Der Gotthard-Basistunnel

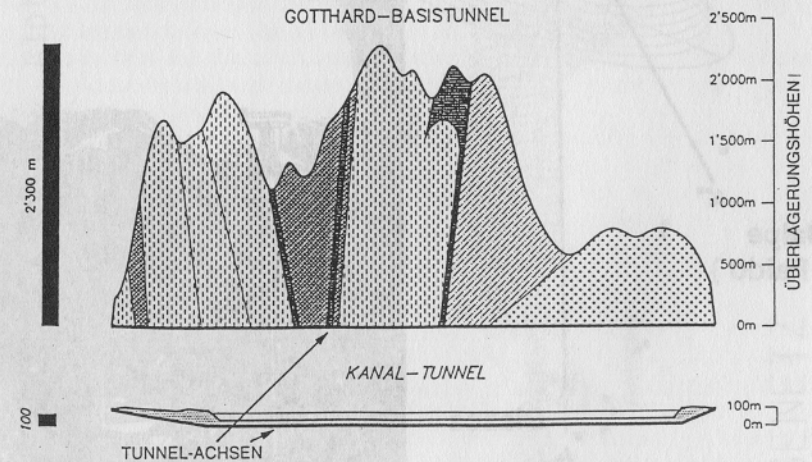


Schematische Darstellung der 2 parallel verlaufenden Einspürrohren.

A Vier Gleisverbindungen zwischen den beiden Röhren ermöglichen Spurwechsel zum Beispiel bei Unterhaltsarbeiten oder Pannen.

B Alle 650 m (ungefähr Zuglänge) sind Querverbindungen vorgesehen. Sie sind Teil des Sicherheitssystems.

Überlagerungen Gotthard-Basistunnel/Kanaltunnel



Grünenfelder und Partner AG

Denter Tumas 6
7013 Domat / Ems
Tel. 081 650 30 50
Fax 081 650 30 51

Swissair Photo + Vermessungen AG

Bahnhofstr. 9
6460 Altdorf
Tel. 044 720 50
Fax 044 720 55

Dorfstr. 53
8105 Regensdorf
Tel. 01 871 22 22
Fax 01 871 22 00

COGETI

c/o A. Gisi
Via Lugano 2a
6924 Sorengo
Tel. 091 967 39 77
Fax 091 966 32 31

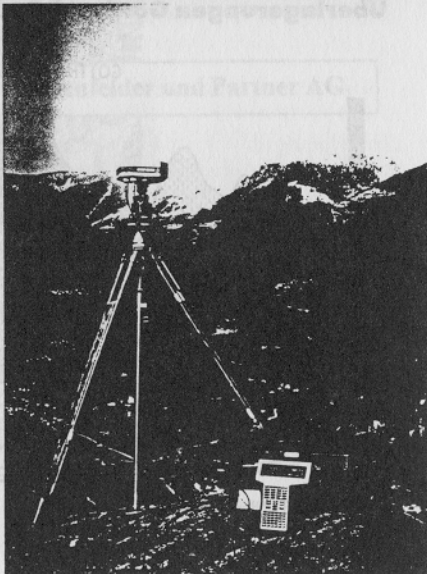
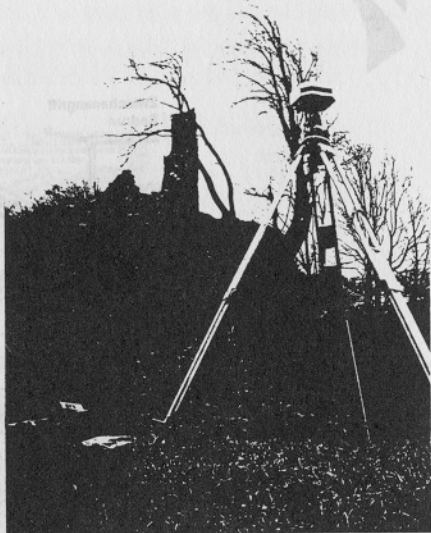
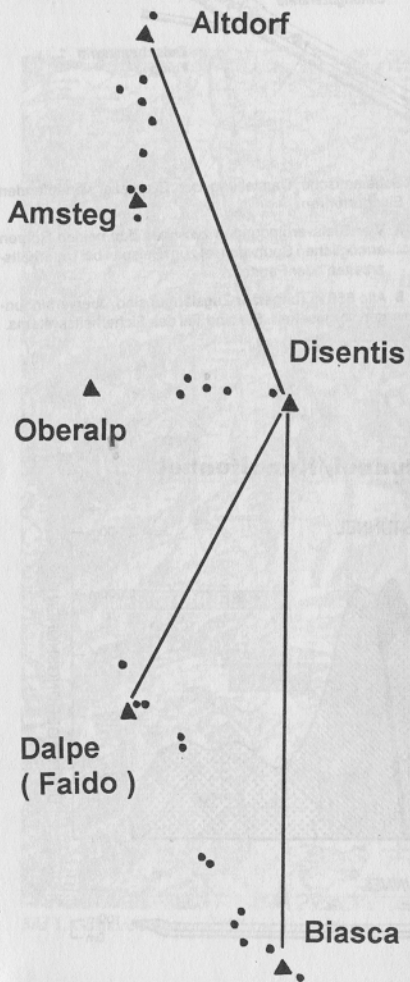
c/o U.Meier

Via Vignascia 7
6648 Minusio
Tel. 091 743 56 66
Fax 091 743 94 52

Gotthardbasistunnel - GPS - Netz 60 Km

KONSORTIUM
VERMESSUNG

GOTTHARD
BASISTUNNEL



Grünenfelder und
Partner AG

Swissair Photo +
Vermessungen AG

Denter Tumas 6
7013 Domat / Ems
Tel. 081 650 30 50
Fax 081 650 30 51

Bahnhofstr. 9
6460 Atdorf
Tel. 044 720 50
Fax 044 720 55

Dorfstr. 53
8105 Regensdorf
Tel. 01 871 22 22
Fax 01 871 22 00

COGETI
c/o A. Gisi

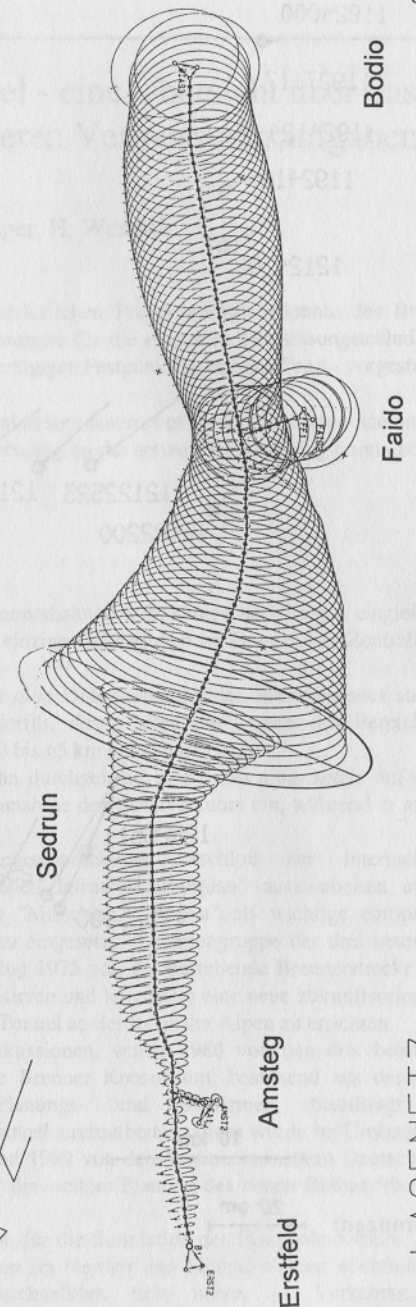
c/o U. Meier

Via Lugano 2a
6924 Sorengo
Tel. 091 967 39 77
Fax 091 966 32 31

Via Vignascia 7
6648 Minusio
Tel. 091 743 56 66
Fax 091 743 94 52

Alptransit: Praeanalyse Gotthardtunnel Durchschlag Sedrun-Faido

Situation Massstab 10 Km
 Fehlerellipsen Massstab 10 cm



Bodio

Faido

Sedrun

Amsteg

Erstfeld

LAGENETZ

KONSORTIUM
VERMESSUNG

GOTTHARD
BASISTUNNEL



11924000

11927117

11924124

11924145

12124102

**Gotthard Basistunnel
Transformation GPS -> LV03
Differenzen**

12122824

12122523

12122627

12322200

12525511

12525617

12525600

12525815

12735116

12735333

12735443

12735500



10 km

Netz:

20 cm

Differenzen: