Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 82 (1984)

Heft: 3

Artikel: Ein Beitrag zur Theorie und Praxis moderner weitreichender IR-Distanzmesser in Landesvermessung und Tunnelnetzen

Autor: Ammann. K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-232089

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ein Beitrag zur Theorie und Praxis moderner weitreichender IR-Distanzmesser in Landesvermessung und Tunnelnetzen

K. Ammann

Mit der neuesten Generation weitreichender IR-Distanzmesser können Distanzen bis 15 km mit der hohen relativen Genauigkeit von 1 mm/km (= 1 ppm) gemessen werden. In einem Triangulationsnetz wird mit einer Richtungsgenauigkeit von 3^{cc} lediglich eine relative Lagegenauigkeit von 5 mm/km erreicht. Die höhere EDM-Genauigkeit bringt eine viel höhere Lagegenauigkeit, und sie erlaubt mehr Freiheit in der Netzgestaltung.
Voraussetzung ist die zuverlässige Bestimmung aller Hilfsgrössen (Geräte- und Prismenhöhen, Höhenwinkel, Geräte-Korrekturen, Meteo, Exzentrumselemente usw.) und die hinreichende Elimination von Modellfehlern (Refraktion, Lotabweichungen).
Zwei konkrete Netzbeispiele im Kanton Jura (Schweiz) werden ausführlich erläutert. Einige Hinweise betreffen die Berechnung der Durchschlaggenauigkeit in Tunnelnetzen.

Grâce à la nouvelle génération d'appareils de mesure électronique des distances à onde infrarouge de longue portée, des distances jusqu'à 15 km peuvent être mesurées avec une précision relative de 1 mm/km (= 1 ppm).
Dans un réseau de triangulation, avec une précision sur les directions de l'ordre de 3^{cc}, on ne peut atteindre une précision planimétrique relative que de 5 mm/km. La haute précision de la mesure électronique des distances donne de meilleurs résultats et permet plus de liberté dans l'élaboration du réseau.
Cela exige une détermination soigneuse des mesures auxiliaires (hauteur de l'instrument et des prismes, angles verticaux, corrections d'instruments, météo, mesures excentriques, etc.) et une élimination suffisante des erreurs du modèle (réfraction, déviation de la verticale).
Deux exemples concrets de réseaux dans le canton du Jura (Suisse) sont amplement décrits. Quelques indications concernent le calcul de la précision de percement dans les réseaux de tunnels. (Une traduction française du texte intégral peut être obtenue chez le géomètre cantonal du Jura, rue du 24. Septembre 2, 2800-Delémont.)

1. Einleitung

Die Diplomklasse der Ingenieurschule beider Basel (Vermessungsabteilung) löste im Feldkurs 1983 die folgenden Aufgaben:

- Erstellung, Messung und Berechnung eines Kontrollnetzes III. Ordnung im Raum Bassecourt–Les Rangiers–St-Ursanne–Pruntrut zwecks Überprüfung der alten Triangulation von 1903 (Abb. 1).
- Erstellung, Messung und Berechnung eines Absteckungsnetzes für zwei Tunnels der geplanten Nationalstrasse ‹Transjurane› zwischen Courgenay, St-Ursanne und Glovelier (Abb. 6).
- Kalibrierung aller eingesetzten EDM-Geräte, insbesondere der drei Distomaten DI 20 Nr. 11, 12 und 13.

Beim grossräumigen *Kontrollnetz III. Ordnung* ging es darum, die mit einem modernen weitreichenden Distanzmesser *erreichbare Lagegenauigkeit* im Netz III. Ordnung *exemplarisch* zu ermitteln und gleichzeitig darum, die *Qualität der offiziellen Koordinaten* von 1903 in einem zentralen Teil des Kantons Jura schlüssig zu untersuchen.
Beim kleineren *Tunnelnetz ‹Transjurane›* ging es darum, die technischen Grundlagen für eine *konkrete Tunnelabstekkung* zu schaffen. Diese Netzanlage soll die speziellen Kriterien wie Durchschlaggenauigkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erfüllen.
Beiden Vorhaben gemeinsam ist die *EDM-Problematik,* auf die ausführlich eingegangen wird.
Im konkreten Fall überdecken sich die beiden Netze teilweise und enthalten gemeinsame Punkte. Die messtechnische Bearbeitung der beiden Aufgaben erfolgte deshalb organisatorisch im gleichen Arbeitsgang.
Die Feldrekognoszierung erfolgte im Juni (drei Tage), und die Messkampagne fand Ende August (zwei Wochen) statt. Die Büro-Auswertungen waren Gegenstand von drei Diplomarbeiten.

2. Zusammenfassung der wichtigsten Resultate

a) Lagegenauigkeit im Kontrollnetz III. Ordnung von 1983

In einem coupierten und stark bewaldeten Jura-Gelände von ca. 10 x 15 km Ausdehnung und Höhendifferenzen bis 500 m wurde ein *Trilaterationsnetz* erstellt mit Seitenlängen von 3–10 km. Unter Praxisbedingungen konnte mit den Geräten Wild DI 20 eine Distanzgenauigkeit a posteriori von 3 mm + 0,5 ppm erreicht werden. Die relative Lagegenauigkeit benachbarter Netzpunkte übertrifft mit maximalen Halbachsen der relativen Fehlerellipsen von 6 mm bei weitem die mit reiner Richtungsmessung erreichbare Lagegenauigkeit von 2–3 cm auf 5 km.

b) Lagegenauigkeit im Triangulationsnetz III. Ordnung von 1903

Die Koordinaten von 1903 weisen keine groben Fehler auf. Der etwas grosse mittlere Koordinatenfehler von 5 cm war zu erwarten, wenn man den Aufbau des alten Netzes (schwierige Topographie!) berücksichtigt.

c) Hoher Stand der EDM-Technologie

Die Gründe für die ausserordentlich hohe Genauigkeit im Lagenetz von 1983 sind: Die grosse *Reichweite,* die einen optimalen Netzaufbau ermöglicht, die hohe *Phasenmessgenauigkeit* und *Frequenzstabilität* der Distomaten DI 20, der hohe Messkomfort und schliesslich die genaue Erfassung der massgebenden *Lufttemperatur* durch die Beobachter. Die Kontrolle der Modulationsfrequenz mit der *Frequenzmessausrüstung* von Wild ist problemlos und ermöglicht den Einsatz *mehrerer Geräte* mit einheitlichem Massstab. Für die Ermittlung der ‹Additionskonstanten› wird ein Verfahren mit wenigen unbekannten Teilstrecken empfohlen.

d) Massstabsgenauigkeit bei älteren Geräten

Auch mit den Geräten der älteren Generation wie DI 4 und DM 501 lässt sich eine Genauigkeit von 3 mm + 1 ppm erreichen, wenn die Frequenz im Feld überprüft wird. Bei der Büroüberprüfung ist die Einschaltzeit vor der Messung zu definieren (Änderung bis 3 ppm in 10 Minuten) und die Abhängigkeit von der Aussentemperatur zu

berücksichtigen (ca. 2–4 ppm pro 10 °C). Weitere Details vgl. auch [2].

e) Einfache Tunnelnetze; Durchschlagsprognose

Mit dem Einsatz moderner weitreichender Distanzmesser können auch in schwierigem Gelände einfache, d. h. besonders wirtschaftliche Tunnelnetze entworfen werden. Am konkreten Beispiel wird gezeigt, dass auch Polygonzüge, die *weit ausserhalb* der Tunnelachse verlaufen, die Genauigkeitsanforderungen erfüllen. Für die Abschätzung der Durchschlaggenauigkeit genügt die *einfache Fehlertheorie des offenen Polygonzuges.*

3. Netzanlage, EDM-Konzept

3.1 Kontrollnetz III. Ordnung

Das Netz verbindet das Becken von Bassecourt (450 m ü. M.) mit dem Becken der Ajoie in etwa gleicher Meereshöhe. Dazwischen erhebt sich die stark bewaldete und zerrissene Jurakette von Les Rangiers mit dem weithin sichtbaren Sendeturm (995 m ü. M.). Von den 21 Netzpunkten sind 14 Altpunkte III. Ordnung und 6 Altpunkte IV. Ordnung. Neu ist einzig ein Dachpunkt auf einem Getreide-Silo (Punkt 401.4) (Abb. 1 und 2).

Es handelt sich um ein Trilaterationsnetz in dem Sinne, dass die grossräumig lagebestimmenden Elemente durchwegs Distanzen sind. Die Richtungsmessung tritt nur bei der lokalen Einmessung von Exzentren oder zur Ermittlung eines Brechwinkels auf einem Hilfspunkt wie z. B. Punkt 749 in Erscheinung, ferner bei der zusätzlichen Einmessung von Hochpunkten (Kirchtürme) vom Bodenpunkt aus.

Die Maschenweite im Netz beträgt ca. 4 km. Die gemessenen Strecken variieren von 1–11 km und betragen durchschnittlich etwa 6 km.

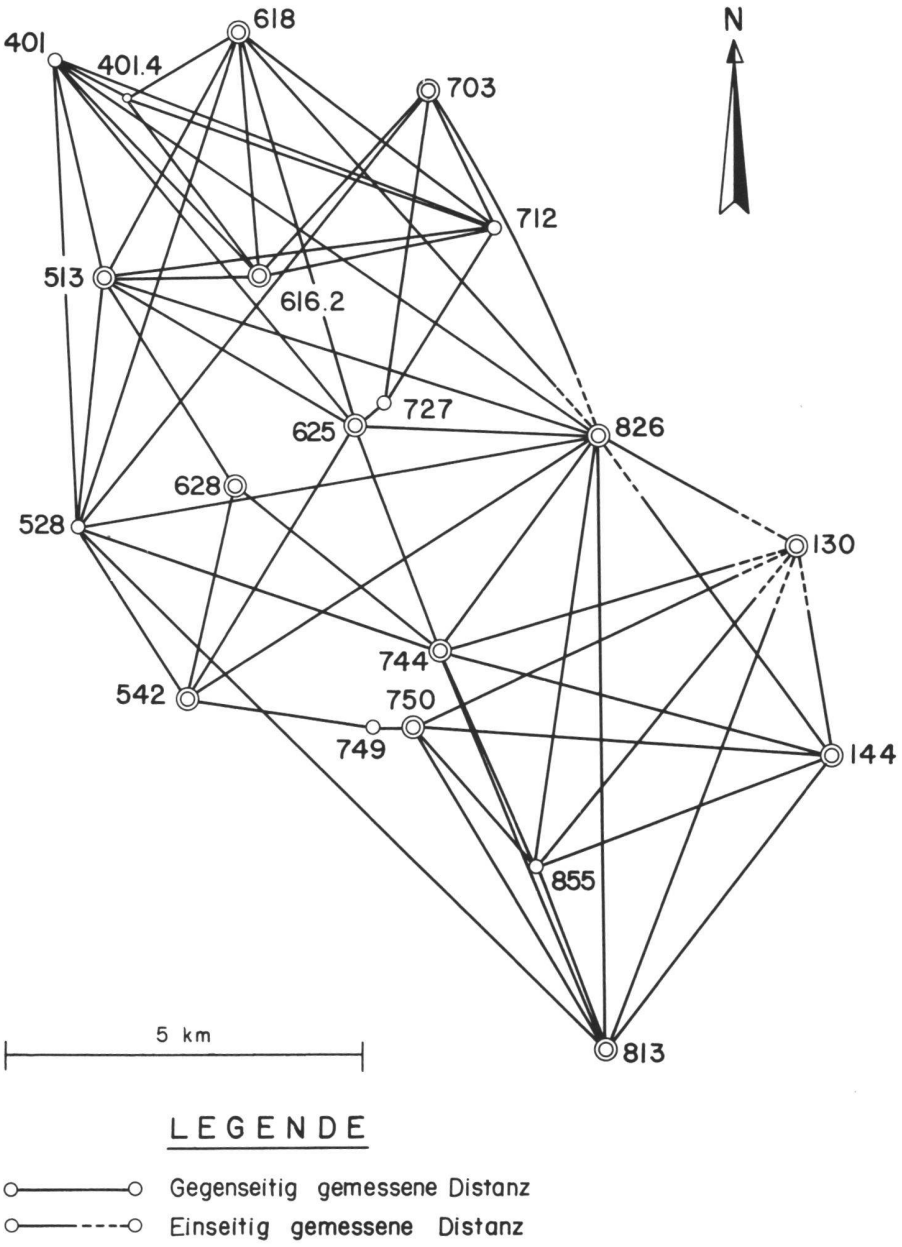

Abb. 1 Kontrollnetz III. Ordnung

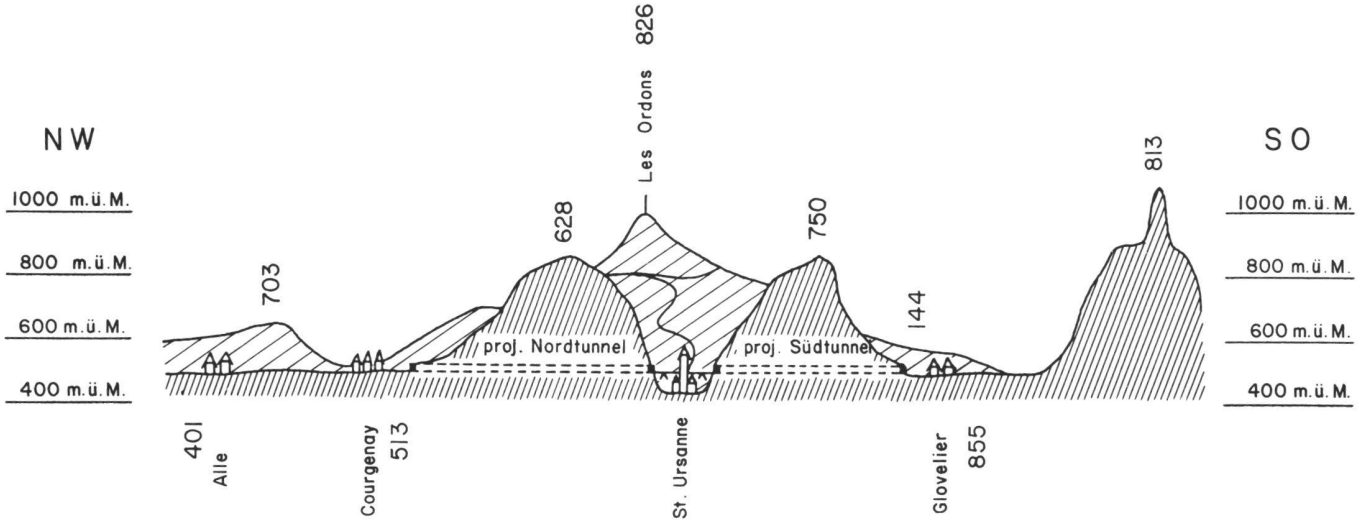

Abb. 2 Zwei Geländeprofile: 401–513–628–750–855–813 und 703–826–144

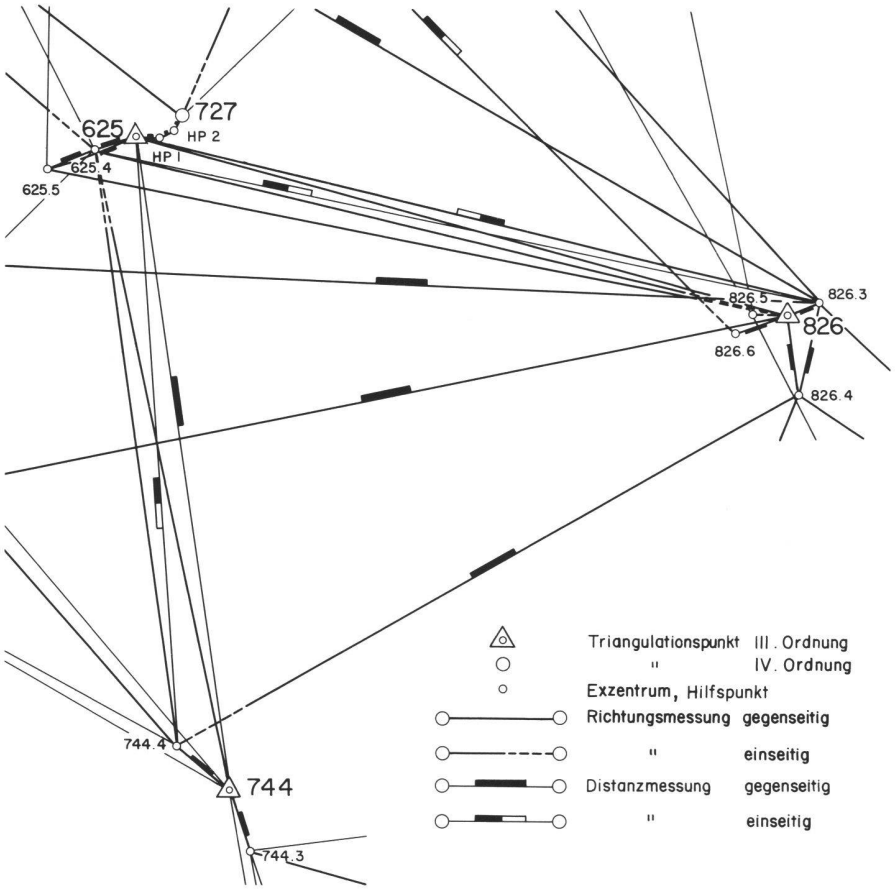

Abb. 3 Netzausschnitt mit eingezeichneten Hilfspunkten

Das Kontrollnetz weist eine hohe Nachbargenauigkeit auf und ist auch als Ganzes durch die grossen Dreiecke (Distanzen!) 528 – 826 – 401, 618, 703 und 528 – 826 – 813 stabil aufgebaut. Ein erster Netzentwurf mit einer A-priori-Distanz-Genauigkeit von 5 mm + 1 ppm ergab Fehlerellipsen mit Halbachsen von etwa 10 mm, maximal 15 mm bezüglich der gewählten ‹Festpunkte› 528 und 826. (Das offizielle Netzausgleichungsprogramm LTOP des Bundesamtes für Landestopographie [L + T] verlangt mindestens zwei Festpunkte.)

In Abbildung 1 nicht eingezeichnet sind ca. 25 Hilfspunkte (Exzentren, kurze Polygonzüge), die notwendig waren, um die geplanten Netzverbindungen zu realisieren. Abbildung 3 gibt ein Bild von den tatsächlichen Verhältnissen. Zusätzlich waren umfangreiche maschinelle Holzarbeiten notwendig (ca. 20 Bäume) und einige waghalsige Kletteraktionen zum Freilegen von Sichten. Es muss hier betont werden: Der grosse Aufwand für Rekognoszierung und Einmessung von Hilfspunkten ist nicht eine negative Folge des Konzeptes ‹Distanznetz›. Es ist umgekehrt: Der Aufwand für ein gutes Richtungsnetz wäre in diesem Gelände viel grösser (Messtürme, Abholzen ganzer Waldflächen). Das Distanznetz ist also hier umweltfreundlicher, genauer und kostengünstiger.

3.2 EDM-Konzept. Eichwerte, Reduktion ins Projektionssystem

Wir haben vorgesehen, drei Distomaten DI 20 (Leihgeräte) und je ein Gerät DI 4 und DI 4L einzusetzen. Damit wird die genaue Bestimmung der individuellen Gerätekorrekturen (Additionskonstante, Frequenzkorrektur) zu einem wichtigen Bestandteil des Messprogrammes. Weitere Punkte sind die genaue Erfassung der Meteorologie (Temperatur), die Beschaffung der Höhengrundlagen für die Distanzreduktion (Höhennetz, Geoidhöhen, Lotabweichungen) und die Kontrolle aller Hilfsgrössen (Exzentrumseinmessungen).

3.2.1 EDM-Prüfung

Das Prüfprogramm umfasst drei Teile:

a) Bestimmung der Additionskonstanten
b) Bestimmung der Frequenzkorrektur
c) Validierung der ermittelten Eichwerte durch spezielle Parallelmessungen mit allen Geräten.

Die *Additionskonstante* wird durch Unterteilung einer unbekannten langen Strecke in drei Teilstrecken bestimmt (Abb. 4).

Die Gesamtstrecke soll eher lang sein, damit die ermittelte Additionskonstante für den späteren Einsatzbereich repräsentativ ist. Durch die Verdoppelung der Messpunkte (Exzentren) und Messung in allen Kombinationen erhalten wir folgende Charakteristik: Anzahl Messungen 24, Anzahl Unbekannte 4, Freiheitsgrad 20. Genauigkeit der Additionskonstanten: $\sigma_c = 0{,}5 \cdot \sigma$. Der grosse Freiheitsgrad ermöglicht auch eine zuverlässige Abschätzung der Messgenauigkeit σ.

Die Messungen erfolgen zwangszentriert. Die Exzentrumsdistanzen sind kurz (1–20 m). Sie werden mit Messband oder Basislatte ohne Mühe auf 1 mm genau bestimmt. Die Auswertung erfolgt durch vermittelnde Ausgleichung.

Auf eine gesonderte Prüfung bezüglich *zyklischer Fehler* wird verzichtet. Unsere Erfahrungen der letzten fünf Jahre zeigen, dass die Geräte Wild und Kern der neueren Generation minime zyklische Fehler aufweisen mit Amplituden unter 2–3 mm.

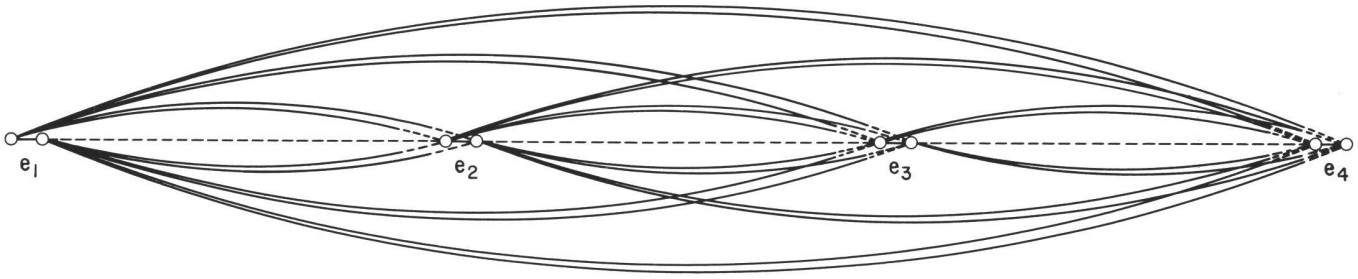

Abb. 4 Bestimmung der Additionskorrektur eines EDM-Gerätes mit Hilfe von drei unbekannten Teilstrecken

Wir bestimmen den Einfluss zyklischer Fehler indirekt bei der Ermittlung der Additionskonstanten. Durch Variation der Exzentrumsdistanzen e_1, e_2, e_3 kann eine Verteilung der Messwerte über den Bereich des Feinmassstabes erreicht werden. Eine grosse Abweichung zwischen dem ermittelten Genauigkeitsmass a posteriori m und dem Erfahrungswert σ ist ein Hinweis auf zyklische Fehler. In diesem Fall ist es zweckmässig, den Anteil durch (Fabrik-)Justierung zu verkleinern, statt aufwendige Korrekturkurven zu ermitteln.

Die *Ermittlung der Frequenzkorrektur* ist heute einfach. Wir verwenden die Empfangsdiode von Wild und ein Präzisions-Frequenzmessgerät von Philips mit einer Genauigkeit von 10^{-7}.

Die Resultate der Frequenzprüfung seien hier vorweggenommen: Die Distomaten DI 20 zeigen praktisch keine Abhängigkeit von der Einschaltzeit. Nach 60 Minuten Einschaltzeit betrug der Frequenzgang weniger als 0,5 ppm. Die Abweichungen von den Sollfrequenzen betrugen höchstens 0,3 ppm. Auch der Einfluss von der Aussentemperatur ist gering. Die Frequenzstabilität im erfassten Temperaturbereich von 10–30 °C scheint besser als 1 ppm. Wir haben uns deshalb darauf beschränkt, die Frequenzen im Büro (bei etwa 22 °C) vor und nach der Messkampagne zu ermitteln.

Die Distomaten DI 4/L wie auch die Geräte Kern DM 501 weisen eine kleine Abhängigkeit von der Einschaltzeit auf (Frequenzgang 1–2 ppm in den ersten 10 Minuten). Der Einfluss der Aussentemperatur kann 2–4 ppm betragen pro 10 °C. (Quelle [2]). Hier wäre es zweckmässig, die Frequenzen im Felde simultan zu ermitteln. Weil aber die betreffenden Distanzen unter 2 km liegen und die Mess-Temperatur im Bereich 10–30° liegen wird, begnügen wir uns auch hier mit der Frequenzprüfung im Büro bei mittlerer Temperatur.

3.2.2 Meteorologie

Nachdem heute die Ist-Frequenz mit einer Genauigkeit von etwa 0,2 ppm vom Benutzer ermittelt werden kann, liegt die grösste Unsicherheit in der Erfassung der massgebenden Lufttemperatur. Die Taschenbarometer und Thermometer wurden vorgängig abgeglichen und korrigiert. Die Meteo-Daten werden an beiden Streckenendpunkten erhoben. Gefährlich sind grobe Ablesefehler. Durch ein Testprogramm werden sämtliche Meteo-Daten der Kampagne auf Plausibilität überprüft und in einem Grafikon übersichtlich dargestellt. Es erfolgt keine Übermittlung per Funk, sondern Eintrag ins Gehilfenprotokoll.

Die Variation der Luftfeuchtigkeit von 20% bis 80% bewirkt im Temperaturbereich von 0–30 °C maximal 1 ppm (Quelle [3]). Die mittlere Unsicherheit infolge Luftfeuchtigkeit dürfte etwa 0,5 ppm betragen und ist gegenüber der Temperaturunsicherheit von ca. 1 ppm zu vernachlässigen. Es wird deshalb auf die systematische Messung der Luftfeuchtigkeit verzichtet.

3.2.3 Distanzreduktion, Höhennetz

Das Konzept sieht vor, die langen Distanzen mit den Punkthöhen zu reduzieren. Von allen Altpunkten sind Meereshöhen vorhanden. Es ist aber nicht zu verantworten, diese Höhen einfach zu übernehmen. Kleinere oder grössere Fehler in den Höhengrundlagen stellen das gesamte Konzept ‹Distanznetz› in Frage. Der Einfluss eines Höhenfehlers sollte kleiner als 3–5 mm bleiben. Damit ergibt sich die geforderte Höhengenauigkeit von 2–3 cm. Das spezielle Höhennetz (Abb. 5) verbindet benachbarte Netzpunkte trigonometrisch mit möglichst kurzen Visuren (gegenseitige Höhenwinkel). 8 Netzpunkte sind nivellistisch oder trigonometrisch an Fixpunkte des eidgenössischen und kantonalen Nivellementsnetzes angeschlossen. Durch diese Messanordnung werden sowohl die Messungen als auch die verwendeten Höhengrundlagen wirksam kontrolliert. Für die Reduktion der Höhenwinkel bzw. der Distanzen auf das Ellipsoid stehen von der Landestopographie berechnete Geoidhöhen und Lotabweichungen zur Verfügung. Der Unterschied zwischen Geoid-Höhendifferenz und Ellipsoid-Höhendifferenz beträgt zum Beispiel 12 cm zwischen Punkt 826 und 855 und bewirkt einen Reduktionsfehler von 10 mm an der Distanz von 6 km, was etwa dem mittleren zufälligen Messfehler entspricht.

3.2.4 Hilfsmessungen

Die Exzentrumsvektoren und Polygonzüge werden doppelt gemessen und noch im Feld berechnet, um Fehler auszuschliessen. Die Lage- und Höhenbeziehung zwischen Zentrum und Exzentrum soll genauer als 3 mm sein.

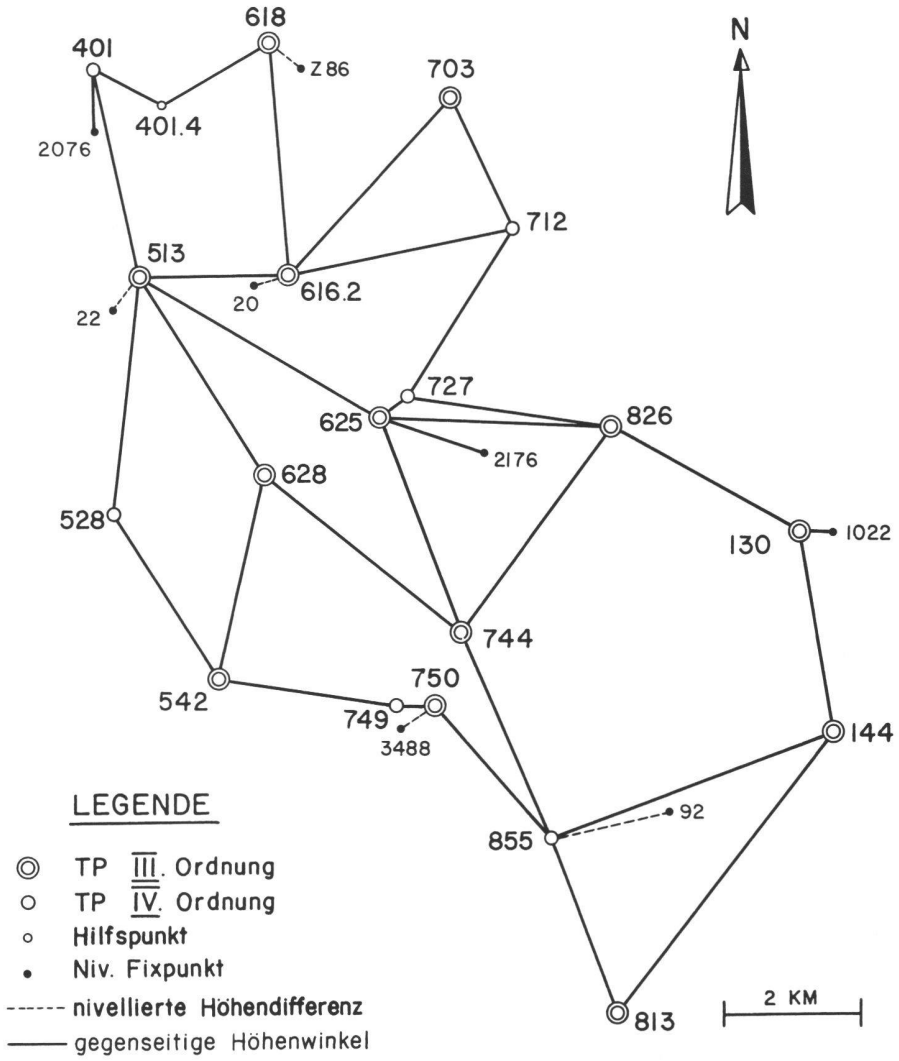

Abb. 5 Höhennetz zur Reduktion der EDM-Distanzen

3.2.5 Distanzgenauigkeit a priori

Wir rechnen mit einer Genauigkeit der reduzierten Distanz von (5 mm + 1 ppm). Im ersten Term sind enthalten: Messgenauigkeit, Unsicherheit der Additionskonstanten, Zentrierfehler, Reduktionsfehler wegen Höhe. Im zweiten Term ist im wesentlichen die Temperaturunsicherheit mit ca. 1 °C abgeschätzt.

3.3 Tunnelnetz ‹Transjurane›

Die geplante Nationalstrasse unterfährt die Jurakette von Les Rangiers in zwei ca. 5 km langen Tunnels von Courgenay nach St-Ursanne und weiter nach Glovelier. Die Tunnels verlaufen 1–2 km östlich der bestehenden Eisenbahnlinie, welche fünf Tunnels und zwei grössere Viadukte aufweist (Abb. 6).

Die Portalpunkte Nord und Süd liegen zufällig gerade in der Nähe der Triangulationspunkte 513 und 855 des Kontrollnetzes III. Ordnung. Es ist nur noch der Portalraum St-Ursanne zusätzlich zu erschliessen, was wegen der Topographie sehr schwierig ist. Der Portalpunkt 656 kann nur als Vektor von Punkt 639 aus abgesteckt werden. Die Absteckung wird also dannzumal an Punkt 639 anschliessen. Dieser ist im Tunnelnetz zuverlässig bestimmt und weist drei Anschlussrichtungen auf. Auch die Portalpunkte 513 und 855 verfügen über drei oder vier Anschlussvisuren für den Stollenvortrieb.

3.3.1 Netz-Charakteristik

Die zwei Tunnels ‹Nord› und ‹Süd› werden mit einem beide Abschnitte überdeckenden Tunnelnetz ‹Transjurane› erschlossen. In diesem Netz spielen neben den Distanzen auch die Richtungen eine bestimmende Rolle, vor allem im polygonalen Netzteil von St-Ursanne. Der Nordteil enthält im Osten die ideale Polygonzug-Verbindung 513–826.3–639, der Südteil die fast ideale Verbindung 639–826.3–826.4–855 mit einem nicht vermeidbaren zusätzlichen Brechpunkt 826.4. Die Polygonzüge im Westen folgen zwar besser der projektierten Tunnelachse, sie enthalten aber mehr Brechpunkte und sind fehlertheoretisch etwas ungünstiger. Die an sich günstigen Polygonverbindungen über die drei Punkte 628, 625 und 744 werden wegen der vielen unvermeidlichen Exzentren wertlos hinsichtlich Richtungsübertragung. Hingegen tragen die Distanzverbindungen dieser drei Punkte zur Versteifung des Tunnelnetzes bei, und wir gewinnen zusätzliche Anschlussrichtungen auf den Portalpunkten.

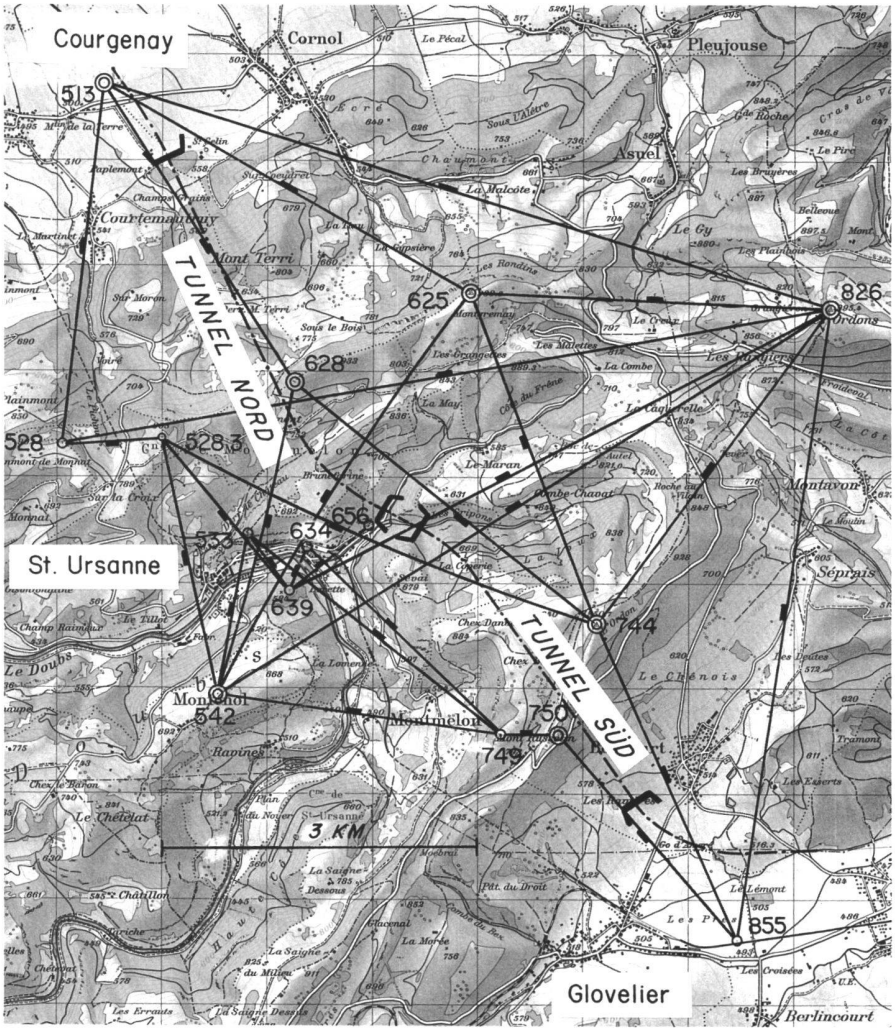

Abb. 6 Tunnelnetz Transjurane

3.3.2 Genauigkeit des Tunnelnetzes, Durchschlagfehler a priori

Die strenge A-priori-Berechnung des mittleren Durchschlagfehlers bietet keine Schwierigkeit. Neben dem Tunnelnetz sind die Polygonzüge im Stollen mit realistischen Seitenlängen und A-priori-Genauigkeiten einzusetzen. Das Triangulationsprogramm LTOP berechnet relative Fehlerellipsen zwischen beliebigen Netzpunkten.

Wir führen deshalb im Koordinatenverzeichnis einen Punkt D1 und einen Punkt D2 mit identischen Koordinaten.

Es sei z. B. D1 der Endpunkt des Vortriebes von 656 aus und D2 der Endpunkt des Vortriebes von 855 aus.

Die Durchschlagfehlerellipse ist die relative Fehlerellipse zwischen Punkt D1 und D2. Diese Durchschlagellipse ist unabhängig von der Wahl der drei Lagerungsparameter. Es ist nicht notwendig, irgendwelche fiktiven Strecken zwischen D1 und D2 einzuführen oder verschiedene Koordinaten für die Durchschlagpunkte D1 und D2.

Für die Berechnung der relativen Fehlerellipsen werden ja nur die Gewichtskoeffizienten der Koordinaten von D1 und D2 benötigt und nicht etwa das (nicht definierte) Azimut (D1–D2).

Leider ist beim Netzausgleichungsprogramm LTOP die Definition von zwei Festpunkten zwingend. Wir lösen das Problem ohne Verlust an Strenge am einfachsten durch folgende Lagerung:

Der erste Festpunkt ist ein beliebiger Punkt des Tunnelnetzes. Hier führen wir zusätzlich eine Richtungsbeobachtung zu einem beliebigen fiktiven Festpunkt ein, um eine eindeutige Orientierung zu erreichen. Diese ‹Netzerweiterung› ergibt eine eindeutige Lagerung, bleibt aber ohne Einfluss auf die innere Netzgeometrie und den Durchschlagfehler.

Es ist bekannt, dass wegen der ungünstigen Fehlerfortpflanzung im Stollen (viele kurze Seiten) die Stollenabsteckung den Hauptanteil des Durchschlagfehlers verursacht und demgegenüber der Anteil des äusseren Netzes gering bleibt.

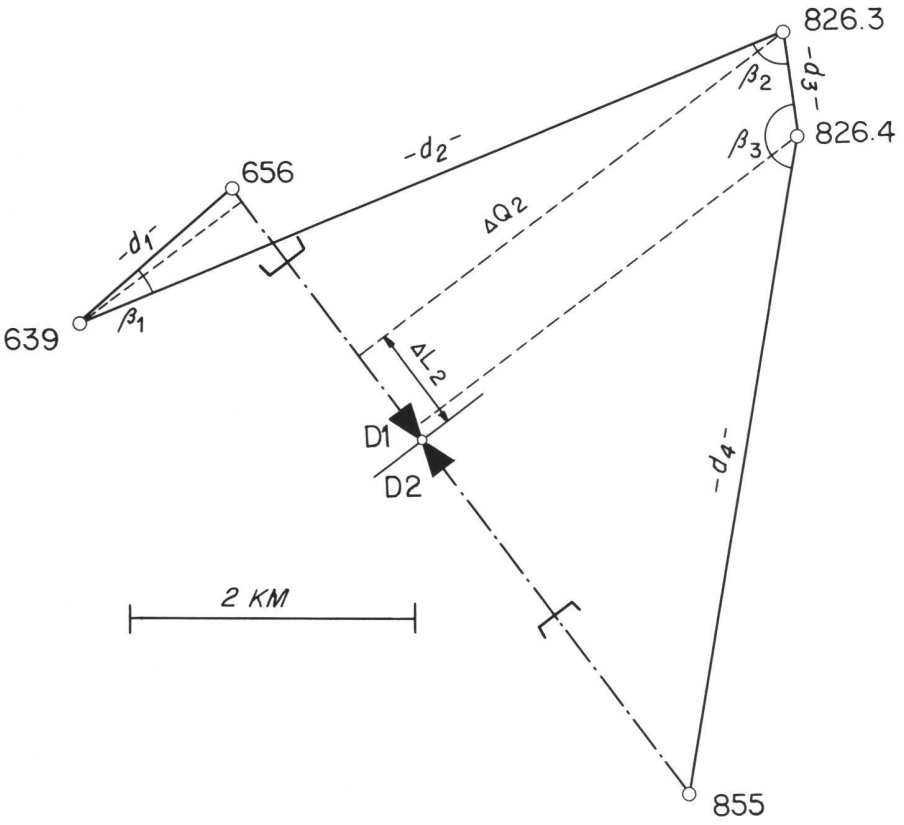

Abb. 7 Tunnel Süd, Berechnung Durchschlagfehler

Dieser *Anteil des äusseren Netzes* am Durchschlagfehler wird bequem dadurch erhalten, dass die Elemente der Stollenabsteckung fehlerlos oder praktisch mit sehr hohem Gewicht eingesetzt werden. Noch einfacher ist es, die Stollenabsteckung durch nur zwei (fehlerlose) Vektoren, nämlich 656 – D1 und 855 – D2, zu simulieren. Damit fällt bei aller Strenge die mühsame Definition der Stollenzüge ganz weg.

Über den konkreten Tunnelvortrieb sind noch keine Details bekannt. Wir rechnen mit einem bauseits geforderten mittleren Durchschlagfehler von etwa 5 cm Querrichtung und 3 cm in Höhe. Wir betrachten das (äussere) Tunnelnetz als gut, wenn der Fehleranteil in Querrichtung und Höhe unter 2 cm bleibt. In Längsrichtung wäre ein Anteil von 5 cm zulässig.

Für die erste Beurteilung eines solchen Tunnelnetzes bezüglich Durchschlagfehler benötigt man eigentlich keinen Computer. Es genügt der Netzplan und etwas ‹Kopfrechnen›. Grundlage ist die *Fehlertheorie des offenen Polygonzuges.* Das Vorgehen wird am Beispiel des Südtunnels (Abb. 7) gezeigt.

Abbildung 7 zeigt den östlichen Polygonzug. Es wird der Anteil dieses Zuges am Durchschlagfehler berechnet (Tab. 1).

Die A-priori-Annahmen sind:
$md = 5\,mm + 1\,ppm$;
$mr = 5^{cc}$, $m_\beta = 7^{cc}$.

Beob.	m. F.	(ΔL)	MQ	(ΔQ)	ML
d_1	6,4 mm		6,4 mm		0,5 mm
d_2	10,3 mm		9,9 mm		2,6 mm
d_3	5,7 mm		3,0 mm		4,8 mm
d_4	9,7 mm		7,0 mm		6,7 mm
β_1	7^{cc}	2080 mm	22,9 mm	1420 m	15,6 mm
β_2	7^{cc}	720 mm	7,9 mm	3750 m	41,2 mm
β_3	7^{cc}	100 m	1,1 mm	3390 m	37,3 mm

Tab. 1 $m_Q = 28{,}0$ mm $m_L = 58{,}3$ mm

Die partiellen Fehleranteile MQ und ML erhalten wir wie folgt:
a) Einfluss Distanzfehler = Projektion auf Quer- und Längsachse
b) Einfluss Winkelfehler:

$MQ_\beta = \Delta L \cdot m_\beta$
$ML_\beta = \Delta Q \cdot m_\beta$

$\left.\begin{matrix}\Delta L \\ \Delta Q\end{matrix}\right\}$ = Längs- und Querabstand des Stationspunktes vom Durchschlagpunkt.

Resultat: Der einfache Polygonzug erfüllt mit einem Anteil von 28 mm quer und 58 mm längs fast die Genauigkeitsanforderungen. Erhöhen wir die Winkelgenauigkeit auf Station 639 (β_1) von 7^{cc} auf 4^{cc}, sinkt der partielle Anteil von 22,9 mm auf 13 mm, und der Durchschlagfehleranteil des äusseren Netzes sinkt auf 21 mm.

Die A-priori-Berechnung mit dem Programm LTOP liefert genau das selbe Ergebnis in Form der relativen Fehlerellipse D1–D2, nämlich: A = 58 mm, B = 28 mm, AZ = 160 gon.

Die Erweiterung des Polygonzuges zum vollständigen (redundanten) Tunnelnetz dient Zuverlässigkeitsansprüchen und der Kompensation von Modell-Restfehlern (Refraktionen, Lotabweichungen).

Die A-priori-Ausgleichung des *vollständigen Tunnelnetzes* (Programm LTOP) ergibt folgende Prognose:

	Variante 1	Variante 2	Varianten 1, 2
Durchschlag Nord	$m_Q = 23$ mm	$m_Q = 17$ mm	$m_L = 10$ mm
Durchschlag Süd	$m_Q = 24$ mm	$m_Q = 18$ mm	$m_L = 10$ mm

Tab. 2 Durchschlagfehler a priori (äusseres Netz)

Resultat: Die Verbesserung in Längsrichtung ist markant und plausibel. Der mittlere Querfehler bleibt auch im vollständigen Tunnelplatz über 20 mm! (Variante 1.) Der Grund liegt darin, dass die nicht redundante Richtung 639–656 mit einem Einfluss von über 20 mm bestimmend bleibt. Erst die lokale Erhöhung der Beobachtungsgenauigkeit von 5^{cc} auf 3^{cc} auf Station 639 (Variante 2) ergibt Querfehler unter 20 mm.

3.3.3 Höhenbestimmung im Tunnelnetz

Eine optimale trigonometrische Höhenübertragung darf wegen der langen Distanzen nicht einfach über Punkte vom Lagenetz erfolgen. Spezielle Höhenzüge mit kürzeren Seiten wären notwendig. In unserem Fall verzichten wir auf ein spezielles Höhennetz, weil bei allen drei Portalen offizielle Nivellements-Fixpunkte bestehen, die mit einem Nivellement durch die alten Eisenbahntunnels wirksamer kontrolliert werden.

4. Rekognoszierung

Der Einsatz von sieben motorisierten Zweiergruppen ermöglichte die simultane Belegung mehrerer Netzpunkte, so dass schon nach drei Tagen die wichtigsten Abklärungen getroffen waren und ein bereinigter Netzentwurf vorlag. Die *Zielscheinwerfer* (auch Autoscheinwerfer) erwiesen sich als unumgänglich.

5. Messkampagne

Den 15 Studenten des Diplomsemesters standen nur zehn Arbeitstage zur Verfügung. Das Wetter war meist sonnig, aber sehr dunstig. An drei Tagen erlebten wir starke Gewitter. Nur einmal herrschte klare Sicht bis 30 km. Im Gebiet von St-Ursanne lag oft Nebel bis gegen Mittag. Der Arbeitsaufwand war etwa wie folgt:

Bereinigung Netzplan, Holzarbeiten	1 Tag
Einmessung Exzentren, Polygonzüge	2 Tage
Höhenanschlüsse an Nivellements-Fixpunkte	2 Tage
Höhenwinkel, Horizontalwinkel (Tunnelnetz)	2 Tage
EDM-Kampagne	3 Tage

Die Horizontalrichtungen und Höhenwinkel wurden in zwei Sätzen gemessen. Damit wurde eine Genauigkeit am Mittel von 3–5^{cc} erreicht. Die Punkte waren mit den rotweissen Plastiksignalen der L + T signalisiert. Diese sind bei solch langen und schwierigen Visuren ungeeignet. Die Hälfte der Visuren erforderten Beleuchtung mit *Zielscheinwerfern.*

Für die Einmessung der Exzentren verwendeten wir spezielle Formulare mit vorgeschriebener doppelter Berechnung der Koordinaten- und Höhendifferenzen, damit die vollständige und fehlerlose Erfassung der Daten sichergestellt war.

Das Gesamtnetz (III. Ordnung + Tunnel) enthält ca. 75 Distanzverbindungen. Wir haben grundsätzlich alle Distanzen hin und zurück gemessen. Damit wird die Zuverlässigkeit wesentlich erhöht, vor allem bei lokalen Schwächen der Netzgeometrie. Unmöglich ist dies nur für drei Visuren nach 826, weil das Prisma am Sendemast in 50 m Höhe über Boden montiert werden musste, eine Stationierung also unmöglich war. Auf Punkt 130 verhinderten Probleme mit dem Besitzer des Grundstückes eine Stationierung.

Während der EDM-Kampagne waren gleichzeitig drei DI 20-Messtruppen und vier Prismenequipen à zwei Mann im Einsatz.

Ein sorgfältig ausgearbeitetes Drehbuch sorgte dafür, dass die gesamte EDM-Kampagne in drei Tagen bewältigt wurde trotz Unterbrüchen wegen Nebel und Gewitter. Auch bei optimaler Organisation war es aber unvermeidlich, dass jeder Punkt zwei- bis viermal aufgesucht werden musste.

Innerhalb von drei Tagen wurden ca. 140 lange Distanzen gemessen. Die grösste Tagesleistung betrug 70 Distanzen trotz Blitz und Donner. Gerade bei diesen rasch wechselnden Bedingungen erwies sich der hohe Messkomfort der Ausrüstung als grosse Hilfe. Wir verwendeten immer 11er Prismen mit Zielscheinwerfer unabhängig von der Distanz, so dass auch bei schlechten Sichtbedingungen genügend Messsignal da war. Erstaunlich war, dass der DI 20 auch Messungen ausführte, wenn die visuelle Sichtweite eher kürzer war als die Messdistanz. Mit dem DIL-Programm wurde eine Serie von 10–16 Messungen ausgelöst. Der mittlere Fehler am Mittel lag bei allen Distanzen unter 4 mm und betrug im Durchschnitt etwa 2 mm. Die Temperatur schwankte zwischen 15 und 30 °C.

Analyse der Meteo-Daten ergab ein erstaunlich homogenes Bild ohne Ausreisser. Die Genauigkeit der Barowerte beträgt ca. 1 mbar, und die Temperaturgenauigkeit ist besser als 1 °C. Das Programmsystem LTOP erlaubt leider keine vorgängige Höhenausgleichung aus den schiefen Distanzen und Höhenwinkeln. (Es verlangt Lagekoordinaten.) Das Höhennetz wurde vorgängig von Hand bedingt ausgeglichen und in die nivellierten Höhen eingepasst. Damit war die Grundlage für eine genaue Distanzreduktion gegeben. Das bekannte Phänomen, dass die gegenseitigen Höhendifferenzen schlecht, die Mittel aber gut stimmen, zeigt sich auch hier. Die Ursache dürfte auch diesmal bei der Refraktions-‹Konstanten› (0,13) zu suchen sein.

Die Analyse der Differenzen von 55 gegenseitigen unabhängigen DI 20-Distanzen (drei Geräte) zeitigt keine Ausreisser und ergibt das unerwartet günstige Fehlergesetz (im Bereich bis etwa 10 km)

$$\sigma = 2\,\text{mm} + 0{,}5\,\text{ppm}$$

Offensichtlich konnte die Meteorologie zutreffend erfasst werden.

Gruppe	Distanzbereich	Anz. Diff.	Formel	m. F.
1	1–3 km	13	$m = \sqrt{\frac{[dd]}{2n}}$	1,9 mm
2	3–5 km	18		3,4 mm
3	5–7 km	14		4,3 mm
4	7–10 km	10		5,7 mm
1–4	1–10 km	55	$m = \sqrt{\frac{[pdd]}{2n}}$	$m_{5\,km} = 3{,}8$ mm

Tab. 3 Distanzgenauigkeit DI 20 aus Differenzen Hin-/Rückmessung

6. Berechnungen, Resultate

6.1 Distanzreduktion, Genauigkeit aus Differenzen

An den Distanzen wurden die Additionskonstanten und Frequenzkorrekturen angebracht. Die Parallelmessungen ergeben eine sehr gute Übereinstimmung für alle fünf Geräte, für die nun ein einheitlicher Massstab vorliegt. Die

6.2 Resultate Kontrollnetz III. Ordnung

Eine freie Netzausgleichung (mit den zwei Festpunkten 528 und 826) ermöglicht eine Beurteilung des Datenmaterials und der Koordinatengenauigkeit von 1983. Die anschliessende Helmerttransformation gibt Aufschluss über die Qualität der alten Koordinaten von 1903.

Lagenetz	Beob.	Anz.	m. F. a priori	a posteriori	Quotient
total Beob. 279	DI 20	122	3 mm + 0,5 ppm	3,7 mm	1,06
total Neupunkte inkl. Hilfspunkte 42	DI 4/DI 4L	27	3 mm + 0,5 ppm	1,6 mm	0,46
total Unbekannte 137	Bala/Band	6	3 mm	2,8 mm	0,94
Freiheitsgrad 142	Richtungen*	124*	5^{cc} (– 200^{cc})	4,2 ^{cc}	0,84

Tab. 4 Kontrollnetz III. Ordnung 1983, Freie Netzausgleichung

* Die hohe Anzahl Richtungen ist bedingt durch die hohe Redundanz bei der Bestimmung aller Exzentren und Hilfspunkte. Der m. F. a priori berücksichtigt einen Zentrierfehler von 3 mm.

Die unter 6.1 ermittelte hohe Distanzgenauigkeit zeigt sich wieder, auch für

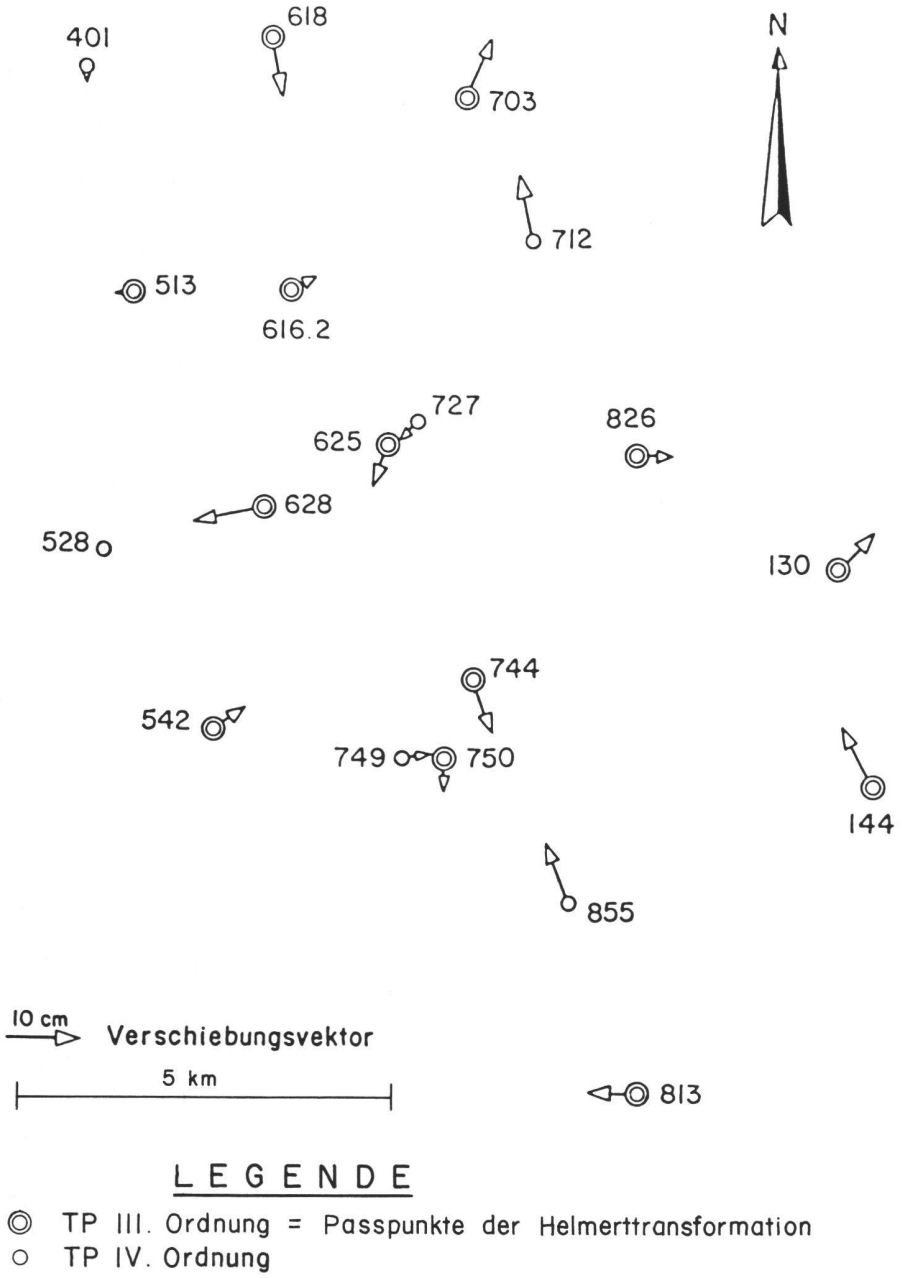

Abb. 8 Kontrollnetz III. Ordnung: Differenzvektoren 1903–1983 nach Helmerttransformation

DI 4/L, und ist mit einem Freiheitsgrad der Distanzen von etwa 70 gut gesichert.

Die *Fehlerellipsen* sind ziemlich rund. Die grosse Halbachse ist in allen Punkten kleiner als 6 mm (!) mit Ausnahme des Randpunktes 813 mit den Halbachsen 8 und 4 mm. Auch die relativen Fehlerellipsen sind kleiner als 6 mm zwischen beliebigen Netzpunkten im Abstand von 5 km.

Der Einbezug von Lotabweichungen bzw. Geoidhöhen bei der Distanzreduktion blieb praktisch ohne Einfluss auf die Lagekoordinaten. Die Differenzen betragen nur wenige mm, eine einzige erreicht 10 mm. Dieses Resultat war bei den relativ flachen Visuren zu erwarten und bestätigte sich auch im Tunnelnetz.

Abbildung 8 zeigt die Differenzvektoren zwischen der Bestimmung von 1983 und 1903. Die mittlere Koordinaten-Klaffung beträgt 5 cm und ist *dem alten Netz anzulasten.* Eine Systematik ist nicht erkennbar.

Der Massstabunterschied zwischen dem alten Netz von 1903 und dem DI 20-Netz beträgt 15 mm/km. (Die alten Distanzen sind zu lang.)

6.3 Resultate Tunnelnetz

Die erreichten Distanzgenauigkeiten a posteriori entsprechen denen im Kontrollnetz, was nicht verwundert, da das Beobachtungsmaterial zum Teil identisch ist. Auch hier liegen die (für den Durchschlag bedeutungslosen) Fehlerellipsen aller Netzpunkte unter 7 mm, bezogen auf die Lagerungspunkte 528 und 826.

Der im gleichen Rechengang ermittelte A-posteriori-Anteil am Durchschlag beträgt für

Tunnel Nord	$m_Q = 16$ mm	$m_L = 8$ mm
Tunnel Süd	$m_Q = 17$ mm	$m_L = 9$ mm

und liegt damit gut innerhalb der Zielsetzung.

7. Empfehlungen für die Praxis

Zum Schluss stichwortartig einige Empfehlungen für ähnliche Arbeiten:

Hin- + Rückmessung: Damit ist das *genaue* Distanzelement auch *zuverlässig*

Frequenzmessung: Heute die einfachste Methode, den Gerätemassstab zu beherrschen

Meteo: 1 °C ist erreichbar. Plausibilitätstest für Baro- und Thermo

Feuchtigkeit: spielt unter 10 km unwesentliche Rolle

Prismen: nicht sparen, Sichtreserve

Scheinwerfer: Für alle grossräumigen Rekoarbeiten, Winkel- und Distanzmessungen ideal

EDM-Gerät: Mehrere Geräte (Ausleihe) bringen grossen Zeitgewinn

Hilfsmessungen: *Rigorose Formulare* mit zwingenden Kontrollen verwenden

Höhennetz: Vorgehen für Distanzreduktion sorgfältig planen.

8. Dank

Den Herren vom Kantonalen Vermessungsamt Jura und vom Bundesamt für Landestopographie sowie meinen Diplomanden spreche ich Dank aus für die erfreuliche Zusammenarbeit. Ebenso danke ich der ETH Lausanne, der Ingenieurschule Yverdon und der Firma Wild für die grosszügige Ausleihe der DI 20-Ausrüstungen.

Literatur

[1] H. Dupraz, J. Bonjour: Réseaux géodésiques et mesure des distances. VPK 4/83

[2] F. Chaperon u. a.: Ein Beitrag zur Prüfung der Frequenz an elektronischen Distanzmessgeräten. VPK 12/82

[3] R. Scherrer: Distanzreduktion bei Infrarot-Distanzmessern. Wild Heerbrugg AG, Sonderdruck 1/82

[4] H. Ehbets, B. Stöckli: Le Distomat Wild DI 20. VPK 4/83

[5] W. Benning: Tunneldurchschlagsprognosen mittels Pseudostrecken. ZfV 1983, S. 220 ff.

Adresse des Autors:
Karl Ammann, dipl. Ing. ETH
Ingenieurschule beider Basel HTL
Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz