

Paper-ID: VGI\_198706



## Eine Optimierungsstrategie für Tunnelnetze

Klaus Hanke <sup>1</sup>, Albert Grimm-Pitzinger <sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck*

<sup>2</sup> *Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **75** (2), S.  
45–52

1987

Bib<sub>T</sub>E<sub>X</sub>:

```
@ARTICLE{Hanke_VGI_198706,  
Title = {Eine Optimierungsstrategie f{"u}r Tunnelnetze},  
Author = {Hanke, Klaus and Grimm-Pitzinger, Albert},  
Journal = {"0sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessungswesen und  
Photogrammetrie},  
Pages = {45--52},  
Number = {2},  
Year = {1987},  
Volume = {75}  
}
```



## Eine Optimierungsstrategie für Tunnelnetze

Von K. Hanke und A. Grimm-Pitzinger, Innsbruck

### Zusammenfassung

Es wird eine praxisbezogene Methode zur Beurteilung und Optimierung von Beobachtungsplänen der oberirdischen Teile von Tunnelnetzen gezeigt, wobei vorgegebene Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsschranken eingehalten werden.

Im gezeigten Beispiel ergibt sich durch Anwendung der Methode eine Ersparnis von 60% der oberirdischen Messungen gegenüber dem vollen Beobachtungsplan.

### Summary

A practical method for evaluation and optimization of tunnelling networks is shown. Given limits of accuracy and reliability remain observed.

Its application to the example "Roppen" leads to a reduction of 60% of measurements compared to the full observation plan.

### 1. Einleitung

Österreich ist infolge seiner Topographie seit jeher intensiv mit den Problemen des Tunnelbaues konfrontiert. Die Folge war eine Reihe von Pioniertaten und Neuerungen, für die österreichische Ingenieure verantwortlich zeichnen. Als Beispiel sei die „neue österreichische Tunnelbauweise“ genannt, die weltweit ständig an Bedeutung gewinnt. Die Stellung des Tunnelbaues in Österreich wird durch die unvermindert hohe Anzahl von Projekten demonstriert, die sich in Bau oder Planung befinden. Die Tendenz, aus Gründen des Umweltschutzes Verkehrswege unter Tag zu verlegen, läßt eine Fülle von neuen Projekten ungewohnter Ausmaße erwarten.

Es ist daher abzusehen, daß der Tunnelbau auch weiterhin, und vielleicht noch in verstärktem Maße an den Geodäten hohe Anforderungen in diesem Aufgabengebiet stellen wird.

In diesem Artikel wird eine Methode vorgestellt, Tunnelnetze zu entwerfen, die sowohl hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit als auch bezüglich Wirtschaftlichkeit den vorgegebenen Erwartungen entsprechen. Geplante Tunnelnetze können bezüglich dieser Kriterien beurteilt und optimiert werden. Optimierung soll als Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Reduktion des Beobachtungsplanes verstanden werden, wobei vorgegebene Qualitätsschranken zu beachten sind (5).

Das Verfahren betrifft nur den Beobachtungsplan. Dabei wird darauf verzichtet, die Beobachtungsgenauigkeiten mittels Wiederholungszahlen zu verändern. Die Entscheidung fällt nur zwischen Beibehalten und Streichen der einzelnen Beobachtungen. Dies deshalb, da der größte Anteil der Kosten bei der Messung von Netzen im Gebirge aus Anfahrtszeiten besteht. Demgegenüber ist der Zeit- und Kostenaufwand, etwa durch Verringerung der Anzahl von gemessenen Richtungssätzen auf den einzelnen Standpunkten, nicht spürbar zu senken. Die Konfiguration der Punkte wird als „fix“ angesehen, da sie durch Topographie und Vegetation meist vorgegeben ist.

Die Optimierung erfolgt nach der Erkundung im Feld und vor dem Beginn der Meßarbeiten. Benötigt werden die Punktkonfiguration inklusive der möglichen Sichtverbindungen, die zu erwartenden Meßgenauigkeiten und die Zielvorstellungen bezüglich Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Netzes.

Die Reduktion erfolgt sequentiell. Nach jedem Schritt hat der Bearbeiter die Möglichkeit, spezielle Wünsche bezüglich Meßanordnung in die Reduktion einfließen zu lassen. Als Ergebnis liegt ein reduzierter Beobachtungsplan vor, der dennoch ein genaues und sicheres Tunnelnetz realisiert.

Falls die Vorausberechnung auf Grund eines vollen Beobachtungsplanes Schwachstellen aufzeigt, die den Qualitätsansprüchen nicht genügt, müssen Konfiguration bzw. Beobachtungsplan dementsprechend abgeändert werden. Dies kann durch eine neuerliche Erkundung, den Einsatz höherwertiger Instrumente (genauere Meßverfahren) oder auch durch die Einbeziehung von Kreismessungen geschehen.

In den folgenden Abschnitten werden die Beurteilungskriterien (3) und die Optimierungsstrategie dargestellt. Am Beispiel des Tunnelnetzes für ein Autobahnteilstück wird der wirtschaftliche Nutzen der Netzoptimierung gezeigt.

Sämtliche Berechnungen wurden mit dem am Institut für Geodäsie der Universität Innsbruck entwickelten Programm TUNNETZ durchgeführt.

### 2. Geodätische Beurteilungskriterien

Tunnelnetzweisen bezüglich Genauigkeit eine scharf definierte Zielfunktion auf, nämlich die prognostizierte Durchschlagsgenauigkeit quer zur Tunnelachse. Ein entsprechender Vertrauensbereich (z. B. 95%) ist wahrscheinlichkeitstheoretisch wesentlich aussagekräftiger als der mittlere Fehler (ca. 68%). Die beiden Größen unterscheiden sich um einen aus der standardisierten Normalverteilung stammenden Faktor.

Eine Möglichkeit, diesen Querfehler abzuschätzen besteht darin, in den Netzentwurf zwei aus den beiden Vortriebsrichtungen entstehende Durchstoßpunkte mit identen Näherungskordinaten einzuführen. Aus der Fußpunktskurve der relativen Fehlerellipse zwischen diesen beiden Punkten kann die Durchschlagsgenauigkeit in Querrichtung abgeleitet werden (6).

$$\sigma_q^2 = A_R^2 \sin^2(t - \theta) + B_R^2 \cos^2(t - \theta)$$

- $\sigma_q$  ..... Standardabweichung („mittlerer Fehler“) der Nullstrecke zwischen den Durchschlagspunkten quer zur Tunnelachse
- $t$  ..... Richtung der Tunnelachse
- $\theta$  ..... Richtung der großen Halbachse der relativen Fehlerellipse
- $A_R, B_R$  ..... Halbachsen der relativen Fehlerellipse

Der mittlere Durchschlagsfehler setzt sich aus einem durch den oberirdischen und einen aus dem unterirdischen Netzteil resultierenden Anteil zusammen. Der unterirdische Teil ist dabei im allgemeinen wegen ungünstiger Konfiguration der Meßanordnung und wegen der schwierigen Meßbedingungen der weitaus überwiegender. Der oberirdische Anteil ist im mittleren Durchschlagsfehler enthalten, wenn der Netzausgleich in einem Guß erfolgt oder der unterirdische Teil „dynamisch“ eingehängt wird (4).

Eine wichtige Frage ist die nach dem Beitrag jeder einzelnen Messung zur Durchschlagsgenauigkeit. Wie erhöht sich  $\sigma_q$ , wenn die Beobachtung  $L_i$  aus dem Beobachtungsplan gestrichen wird? Es kann die Matrix  $\Delta Q^i$ , die Änderung der Kofaktorenmatrix der Unbekannten  $Q_{xx}$  auf Grund der Streichung der Beobachtung  $L_i$ , berechnet werden:

$$\Delta Q^i = Q_{xx} a_i^T a_i Q_{xx} \frac{p_i}{1 - a_i^T Q_{xx} a_i p_i}$$

- $a_i^T$  ..... zu  $L_i$  gehörender Zeilenvektor der Koeffizientenmatrix
- $p_i$  ..... Gewicht der Beobachtung  $L_i$

Die Änderung des der Querabweichung entsprechenden Kofaktors ergibt sich nach dem Gewichtfortpflanzungsgesetz mit

$$\Delta Q_q^i = f_q^T \underline{\Delta Q}_B^i f_q, \quad f_q = \begin{bmatrix} \sin t \\ \cos t \\ -\sin t \\ -\cos t \end{bmatrix}$$

$\underline{\Delta Q}_B^i$  ..... 4 x 4 Submatrix aus  $\underline{\Delta Q}^i$  bezüglich der zwei fiktiven Durchschlagspunkte

Ein Weglassen der Messung  $L_i$  ändert demnach den prognostizierten Querfehler auf:

$$\sigma_q^i = \sqrt{\sigma_q^2 + \sigma_o^2 \Delta Q_q^i}$$

$\sigma_o^2$  ..... Varianzfaktor („mittlerer Gewichtseinheitsfehler“)

Alle angeführten Formeln gelten sinngemäß auch für den Durchschlagsfehler in Längsrichtung. Beide Werte können für jede Beobachtung berechnet werden.

Ein wichtiges Kriterium für alle ingenieurgeodätischen Netze und besonders für Tunnelnetze stellt deren Zuverlässigkeit dar. Also hier im speziellen deren Vermögen, grobe und systematische Meßfehler zu entdecken bzw. deren Einfluß auf den Querfehler klein zu halten. Diese „Netzsicherheit“ läßt sich, setzt man voraus, daß die Meßdaten einer Suche nach groben Fehlern gemäß Baarda unterzogen werden, mittels folgender Größen quantifizieren:

– der *Redundanzanteil*

Er gibt den Anteil der jeweiligen Messung am Gesamtfreiheitsgrad  $r$  des Netzes an. Er gibt Aufschluß darüber, welcher Prozentsatz eines groben Fehlers sich in der zugehörigen Verbesserung niederschlägt und stellt somit ein Maß für die gegenseitige Kontrolle der Messungen dar.

Die Redundanzanteile können der Hauptdiagonale der idempotenten Matrix  $\underline{Q}_{vv}P$  entnommen werden, es gilt:

$$r = \sum_{i=1}^n r_i = \text{spur}(\underline{Q}_{vv}P)$$

$n$  ..... Anzahl der Beobachtungen

$\underline{Q}_{vv}$  ..... Kofaktorenmatrix der Verbesserungen

Zwei Sonderfälle: eine Strecke zwischen zwei Festpunkten erhält den Redundanzanteil 1, Beobachtungen zu einem nicht überbestimmt eingemessenen Punkt hingegen weisen einen Redundanzanteil gleich 0 auf.

– die *innere Zuverlässigkeit*

Wird nun eine Suche nach groben Fehlern durchgeführt, stellt sich die Frage nach dem groben Fehler, der in der jeweiligen Beobachtung gerade nicht mehr entdeckt werden kann. Dieser als innere Zuverlässigkeit bezeichnete Wert hängt vom Nichtzentralitätsparameter  $\lambda_o$  ab, der wiederum eine Funktion des vorzugebenden Signifikanzniveaus  $1 - \alpha$  und der ebenfalls wählbaren Testgüte  $\gamma_o$  ist.

$$\nabla_o l_i = \sigma_{l(i)} \sqrt{\frac{\lambda_o}{r_i}}$$

$$\lambda_o = \lambda_o(\alpha, \gamma_o)$$

– die *äußere Zuverlässigkeit*

Sie schätzt den Einfluß ab, den ein solcher, gerade nicht mehr entdeckter grober Fehler  $\nabla_o l_i$  auf die geschätzten Unbekannten hat.

Es ist

$$\underline{\nabla_{oi}x} = (\underline{A}^T \underline{P} \underline{A})^{-1} \underline{A}^T \underline{P} \underline{\nabla_{oi}l_i}$$

mit

$$\underline{\nabla_{oi}l_i} = [0 \dots 0 \nabla_{oi}l_i 0 \dots 0]^T$$

der Vektor der Verfälschungen der Unbekannten, die aus  $\nabla_{oi}l_i$  resultieren.

– die *Auswirkung der äußeren Zuverlässigkeit auf die Querabweichung*

Bei Tunnelnetzen interessiert nicht die Auswirkung eines groben Fehlers auf alle Koordinaten, sondern nur auf eine Funktion der Durchschlagspunkte, nämlich den Querfehler.

Man betrachtet die maximale Auswirkung eines nicht erkannten groben Fehlers auf die Durchschlagspunkte ( $D_1, D_2$ )

$$\underline{\nabla_{oi}x_D} = \underline{Q}_{xx} \underline{a}_i^T \rho_i \underline{\nabla_{oi}l_i}$$

und als deren Funktion die Auswirkung auf den Querfehler

$$\nabla_{oi}f_q = \cos t (\nabla_{oi}x_{D2} - \nabla_{oi}x_{D1}) - \sin t (\nabla_{oi}y_{D2} - \nabla_{oi}y_{D1})$$

Wie beim Genauigkeitskriterium gilt auch diese Formelsinngemäß für die Abweichung in Längsrichtung.

Diese Werte können für jede Beobachtung gerechnet werden. Das Maximum dieser Verfälschungen stellt ein Maß für die Zuverlässigkeit des Durchschlages dar.

Im Zusammenhang mit Netzprognosen ist die Frage nach der Lagerung des Netzes von großer Bedeutung, da sowohl alle absoluten wie relativen Genauigkeitsmaße als auch z. B. die äußere Zuverlässigkeit der Punktkoordinaten von der Wahl des Datums abhängen. Die Beurteilung und Optimierung von Netzen sollte sich aber möglichst auf netzeigene, datumsinvariante Größen stützen. Neben dem Redundanzanteil und der inneren Zuverlässigkeit einer Messung sind dies im speziellen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaße, die auf die Nullstrecke  $D_1 - D_2$  bezogen sind. Somit sind sowohl der prognostizierte Querfehler aus der relativen Fehlerellipse der fiktiven Durchschlagspunkte als auch die äußere Zuverlässigkeit des Querfehlers datumsunabhängig und als geeignete Kriterien zu betrachten, solange kein äußerer Zwang auf das Netz ausgeübt, der Netzausgleich also zwangsfrei berechnet wird.

### 3. Optimierungsstrategie

Die Konfiguration des ober- und des unterirdischen Netzes und die a-priori-Annahmen für die Meßgenauigkeiten liegen vor. Damit wird ein simulierter Ausgleich zur Berechnung aller in Kapitel 2 angeführten Beurteilungskriterien durchgeführt. Es wird vom maximalen Beobachtungsplan ausgegangen, d. h., es werden alle in der Natur möglichen Beobachtungen zwischen den erkundeten Punkten berücksichtigt.

Die Optimierung des Beobachtungsplanes erfolgt in drei Phasen:

- Die Berechnung zeigt in einem ersten Durchlauf etwa vorhandene Netzschwachstellen auf. Das sind Bereiche, bei denen die lokale Redundanz (Kontrollierbarkeit) der Beobachtungen nicht genügt, um grobe Fehler mit signifikanter Auswirkung auf den Durchschlagspunkt abzudecken.

Da von einem „vollen“ Beobachtungsplan ausgegangen wird, lassen sich Schwachstellen nicht durch zusätzliche Beobachtungen zwischen den vorgegebenen Punkten, sondern nur durch ergänzende Erkundung beheben.

- Im zweiten Schritt werden Messungen zu solchen Punkten betrachtet, die wegen ihrer exponierten Lage den Meßablauf stören oder die Meßkosten (-zeit) überproportional erhöhen würden. Anhand der vorliegenden Größen, die den Einfluß jeder Messung auf den

Durchschlagsfehler quantifizieren, ist es möglich, eine Entscheidung über das Streichen einzelner Beobachtungen und in der Folge ganzer Punkte zu treffen.

- Sind diese störenden Messungen eliminiert, werden unter dem Blickwinkel der weiteren Reduzierung des Meßaufwandes noch sukzessive jene Beobachtungen gestrichen, die keine signifikante Erhöhung der Durchschlagsgenauigkeit oder deren Zuverlässigkeit erbringen.

Der so optimierte Beobachtungsplan enthält nur noch jene Messungen, die für die Einhaltung der vorgegebenen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsschranken notwendig sind.

Allgemein ist festzustellen, daß die Zuverlässigkeitsmaße sensibler auf Veränderungen des oberirdischen Beobachtungsplanes reagieren als das Genauigkeitskriterium, wenn von gravierenden Veränderungen in den Portalbereichen abgesehen wird. Meistens sind es daher die Zuverlässigkeitsschranken, die die Reduktion zum Stillstand bringen.

#### 4. Beispiel

Im Zuge der Fortführung der Inntalautobahn A12 in Richtung Arlberg ist im Bereich Roppen-Imst ein sechs Kilometer langer Straßentunnel zur Durchquerung des Tschirgantmassives geplant. Auf den maximalen Beobachtungsplan zwischen den erkundeten Punkten des oberirdischen Netzteiles wird die im vorhergehenden Kapitel dargestellte Optimierungsstrategie angewendet. Für den unterirdischen Netzteil sind zwei fliegende Polygonzüge zwischen den Portalpunkten und dem Durchschlagspunkt angesetzt. Die Punktabstände der Polygonpunkte entsprechen dabei den vorgegebenen Krümmungsradien und dem Tunnelquerschnitt.

Als stochastisches Modell für die Berechnungen werden angenommen:

$$\sigma_R = 4^{cc}$$

$$\sigma_S = 3 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$$

Die Beobachtungen im Tunnel erhalten das halbe Gewicht (6). Eine erste Berechnung ergab, daß die vorgegebene Netzkonfiguration keine Netzschwachstellen aufweist. Damit kann an diesem vollen Beobachtungsplan (Abb. 2) eine Reduktion durchgeführt werden. Die Netzreduktion erfolgt unter der strengen Vorgabe, daß sich die Werte für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Durchschlages nicht signifikant verschlechtern.

Infolge der schwierigen Zufahrt über abgelegene Forststraßen zu den hochgelegenen Punkten 4 und 5 sollen Anfahrten zu diesen Punkten möglichst vermieden werden (Abb. 1). Weiters sind die Richtungen und die Strecken 3–131, 59–9, 59–8, 7–5 und 7–4 wegen bodennaher Zielungen bei der Reduktion vordringlich zu berücksichtigen.

Das optimierte Netz ist in Abb. 3 dargestellt.

Tabelle 1 stellt den Aufwand und die Netzgüte in beiden Versionen gegenüber. Die maximalen Verfälschungen des Durchschlagsortes resultieren in beiden Fällen aus einem nicht aufdeckbaren groben Fehler der Richtung 13–5.

Tabelle 1 zeigt, daß durch die Anwendung der gezeigten Optimierungsstrategie der Meßaufwand im oberirdischen Netz in diesem Beispiel auf 42% des vollen Beobachtungsplanes reduziert werden kann, ohne daß sich die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte verschlechtern. Der Punkt vier erwies sich als unverzichtbar und wird somit im Netzverband belassen.

#### Dank

Die Verfasser danken der Vermessungsabteilung des Amtes der Tiroler Landesregierung für die freundliche Unterstützung bei der praktischen Erprobung der vorgestellten Methode.

## Literatur

- (1) *Bähr, H.-G.*: Reihenfolge für Messungen und Punkte eines geodätischen Netzes nach Gesichtspunkten der Genauigkeit und Zuverlässigkeit. AVN 10, 1983
- (2) *Benning, W.*: Zuverlässigkeitskriterien und deren Anwendung in Tunnelabsteckungsanalysen. Vermessungswesen und Raumordnung 44, 1982
- (3) *Hanke, K. / Grimm-Pitzinger, A.*: Genauigkeits- und Zuverlässigkeitskriterien für die Planung von Tunnelnetzen. Mitteilungen des Institutes für Geodäsie der Universität Innsbruck Nr. 12, 1987
- (4) *Krüger, J.*: Abstecknetze, speziell für Tunnelabsteckungen. In: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985
- (5) *Pelzer, H.*: Einige Aspekte der Genauigkeitsoptimierung in geodätischen Netzen. AVN 9, 1972
- (6) *Rinner, K.*: Über die zweckmäßige Anlage von Tunnelnetzen. VII. Internationales Symposium für Ingenieurvermessung hoher Präzision. Vol. 2, Darmstadt, 1976
- (7) *v. Mierlo, J.*: Hypothesentests und Zuverlässigkeitsaussagen in Tunnelnetzen. In: Ingenieurvermessung 80, Vol. 1, B II, Verlag Dümmler, Bonn, 1980

Manuskript eingelangt im Feber 1987.

oberirdisches Netz	Ausgangsversion	optimierte Version	Ersparnis
Punkte	17	13	4
Richtungen	94	44	50
Strecken	47	12	35
Messungen gesamt	141	56	85 = 60%
Vertrauensbereich des Querfehlers (95%)	$\pm 19,3$ cm	$\pm 19,5$ cm	
Zuverlässigkeit max. ( $\sqrt{v_{01} f_q}$ )	5,5 cm	5,6 cm	

Tabelle 1

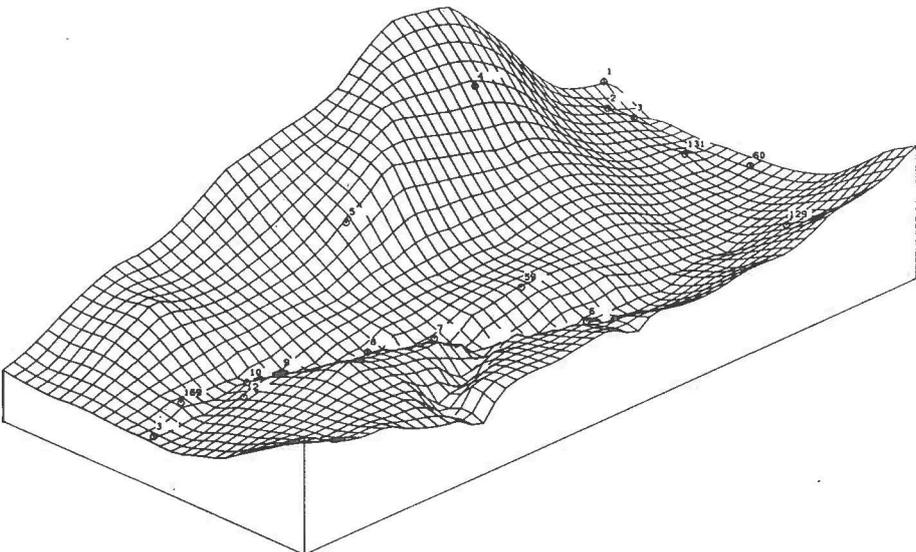
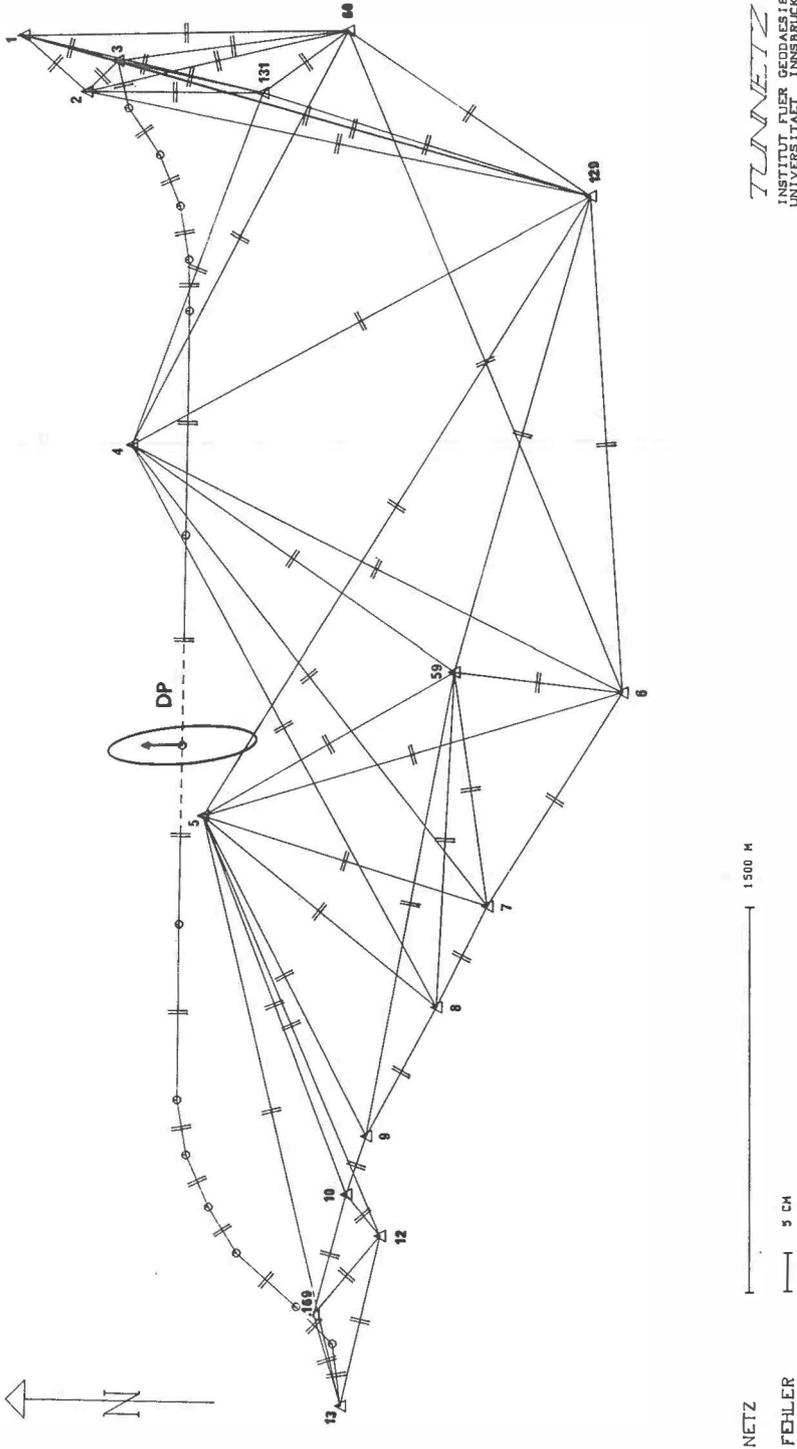


Abb. 1: Digitales Höhenmodell für den Bereich des Tunnelnetzes Roppen.

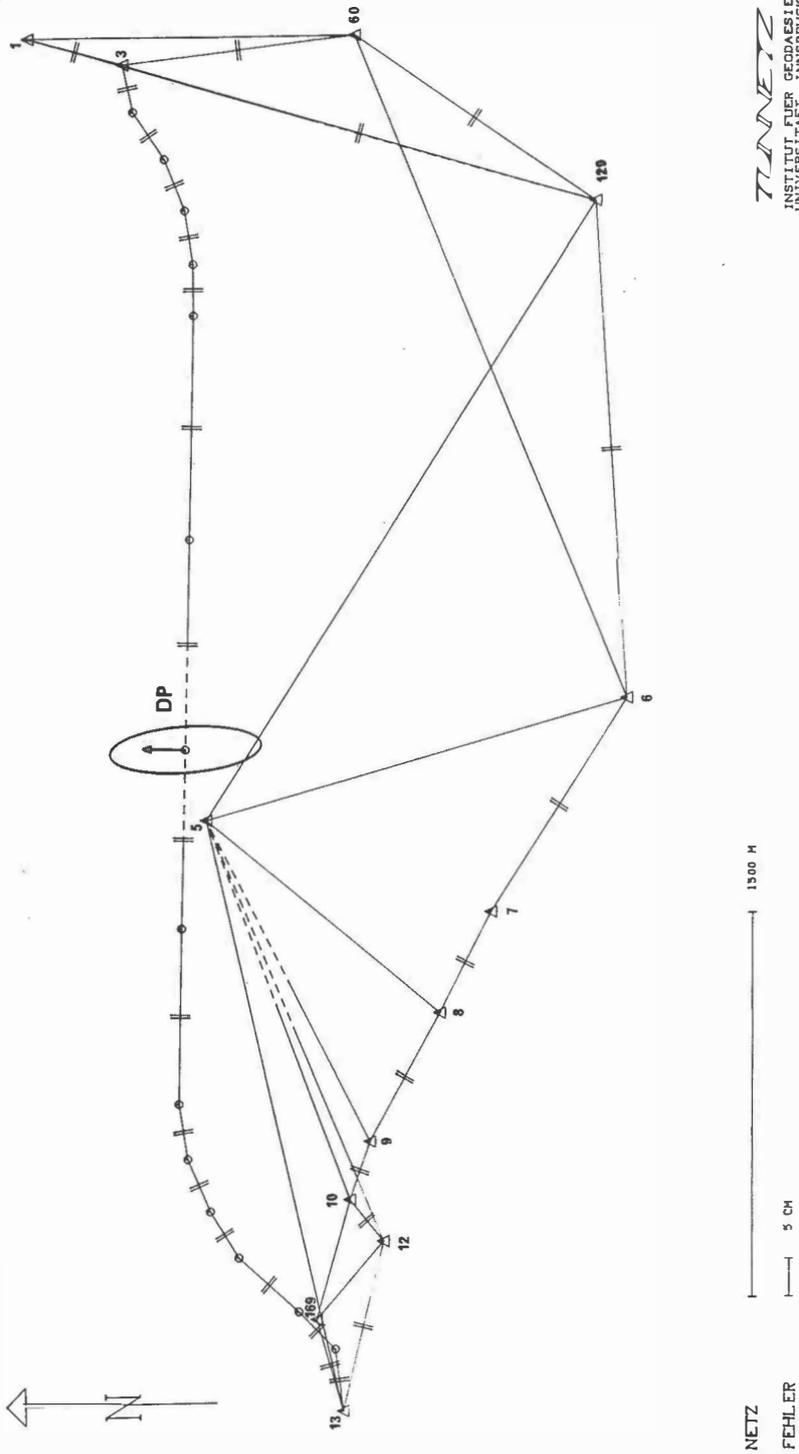
TUNNELNETZ ROPPEN



TUNNELNETZ  
INSTITUT FÜR GEBÄUDE-  
UNIVERSITÄT INNSBRUCK

Abb. 2: Voller Beobachtungsplan mit relativer Fehlerellipse im Durchschlagspunkt und maximaler Auswirkung eines nicht entdeckten groben Fehlers im Datenmaterial auf den Durchschlag.

TUNNELNETZ ROPPEN



TUNNELNETZ  
INSTITUT FÜR GEODÄSIE  
UNIVERSITÄT INNSBRUCK

Abb. 3: Reduzierter Beobachtungsplan mit relativer Fehlerellipse im Durchschlagspunkt und maximaler Auswirkung eines nicht entdeckten groben Fehlers im Datenmaterial auf den Durchschlag.