Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement

Band: 108 (2010)

Heft: 12: AlpTransit

Artikel: Zur Messunsicherheit von Kreiselmessungen im Gotthard-Basistunnel

Autor: Heister, Hansbert / Liebl, Wolfgang

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-236729

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

Zur Messunsicherheit von Kreiselmessungen im Gotthard-Basistunnel

Bei grossen Tunnelprojekten wie dem Gotthard-Basistunnel (GBT) sind Kreiselmessungen unverzichtbarer Bestandteil geodätischer Messungen. In diesem Beitrag wird nochmals die ungünstige Fehlerfortpflanzung in lang gestreckten Polygonzügen im Verhältnis zu Zügen mit Kreiselmessungen dargestellt. Schwerpunkt liegt jedoch einerseits auf der Diskussion von systematischen Einflussgrössen bei diesen Orientierungsmessungen, andererseits auf einer zusammenfassenden Darstellung der durchgeführten Kreiselmessungen im GBT einschliesslich einer repräsentativen Abschätzung der hierbei erreichten Messunsicherheit. Weiterhin wurde auch nachgewiesen, dass diese Messungen nicht nur zu Genauigkeitssteigerungen, sondern auch zur Aufdeckung von systematischen Messabweichungen wie z.B. der Horizontalrefraktion herangezogen werden konnten.

Pour de grands projets de construction de tunnels tels que le tunnel de base du Saint-Gothard les mesures au gyroscope font partie intégrante et indispensable de mesures géodétiques. Dans cet article on mentionnera encore une fois la propagation défavorable des erreurs dans des polygonales tendues par rapport à celles mesurées au gyroscope. Le point essentiel réside cepedant d'une part dans la discussion des grandeurs systématiques influant sur ces mesures d'oriention et d'autre part dans une présentation résumant les mesures gyroscopiques exécutées dans le tunnel de base y compris une appréciation représentative de l'insécurité de mesure atteinte dans ce contexte.De plus il a été démontré que ces mesures n'ont pas seulemment contribué à augmenter la précision mais également à la découverte de déviations systématiques de mesures telles que la réfraction horizontale.

Nei grossi progetti di gallerie – come quello della galleria di base del Gottardo (GBG) – le misurazioni col giroscopio sono una componente imprescindibile delle misure geodesiche. In quest'articolo si presenta ancora una volta la svantaggiosa propagazione dell'errore sulle poligonali rispetto ai tratti ottenuti con la misurazione col giroscopio. L'accento viene posto, da una parte, sulla discussione dei parametri sistematici in queste misurazioni d'orientamento e, dall'altra, su una rappresentazione riassuntiva delle misurazioni col giroscopio nella GBG, ivi compresa una stima rappresentativa dell'insicurezza di misurazione ottenuta. In aggiunta si è anche dimostrato che queste misurazioni possono essere impiegate non solo per aumentare la precisione ma anche per individuare le differenze sistematiche di misurazione, come, per es., della rifrazione orizzontale.

H. Heister, W. Liebl

Kreiselmessungen sind heute bei grösseren Tunnelbauprojekten unverzichtbarer Bestandteil der geodätischen Messungen zur Kontrolle des Vortriebs. Dies liegt zum einen daran, dass Tachymetermessungen bei der unvermeidbar lang gestreckten Messkonfiguration eine ungünstige Fortpflanzung zufälliger und systematischer Messabweichungen haben, zum anderen, dass die systematischen Messabweichungen – insbesondere die Horizontalrefraktion – durch eine veränderte Messanordnung kaum kompensiert werden können.

Wenn auch über die Anordnung von Kreiselmessungen bereits in den früheren Jahren ausführlich berichtet wurde (Tárczy-Hornoch, 1935, Halmos, 1971, 1972), so sei hier doch noch einmal exemplarisch die unterschiedliche Fehlerfortpflanzung dargestellt. Es gilt für den einseitig angeschlossenen, gestreckten Polygong mit n gleichen Seitenlängen d und einer gesamten Länge L der Näherungsausdruck für die statistische Unsicherheit der Querabweichung

$$q_w \approx L \frac{s_w}{\rho} \sqrt{\frac{n}{3}} \quad ,$$

wobei die Standardabweichung einer Polygonwinkelmessung bedeutet.

Entsprechend gilt für den Kreiselzug, bei dem jede Seite durch eine Kreiselmessung mit einer Standardabweichung orientiert wurde

$$q_k = L \frac{s_k}{\rho} \frac{1}{\sqrt{n}} \quad .$$

In der nachfolgenden Abbildung 1 wurden für einen speziellen, aber doch typischen Fall die statistischen Querabweichungen für jeweils gleiche Seitenlängen von $d = 250\ m$ für unterschiedliche Polygonzuglängen graphisch dargestellt. Dabei soll nochmals hervorgehoben werden, dass bei der Vorgabe der Standardabweichungen sowohl für die Richtungs- als auch Kreiselmessungen nur zufällige Messabweichungen angenommen wurden. Somit ist den nach den o. a. Formeln bestimmten statistischen Grössen auch nur eine Wahrscheinlichkeit von $p=68\%$ zuzuordnen. Für weitere Wahrscheinlichkeiten von $p=95\%$ und $p=99\%$ können die entsprechenden Werte ebenfalls der Grafik entnommen werden, wobei dem letzten Fall besondere Bedeutung zukommt, da das hierdurch bestimmte Intervall $\pm\ q$ einer Messtoleranz gleichgesetzt werden kann.

Zusammenfassend ist jedoch aus den Graphiken abzulesen, dass sich die beiden Messverfahren in der zu erwartenden Querabweichung bis zu einem Faktor 20 unterscheiden; folglich ist festzuhalten, dass selbst bei nur zufälligen Messabweichungen in den Polygonwinkelmessungen bei längeren Tunnelbauwerken die vorgegebenen Messtoleranzen nicht mehr eingehalten werden können. Somit wird eine Stützung durch Kreiselmessun-

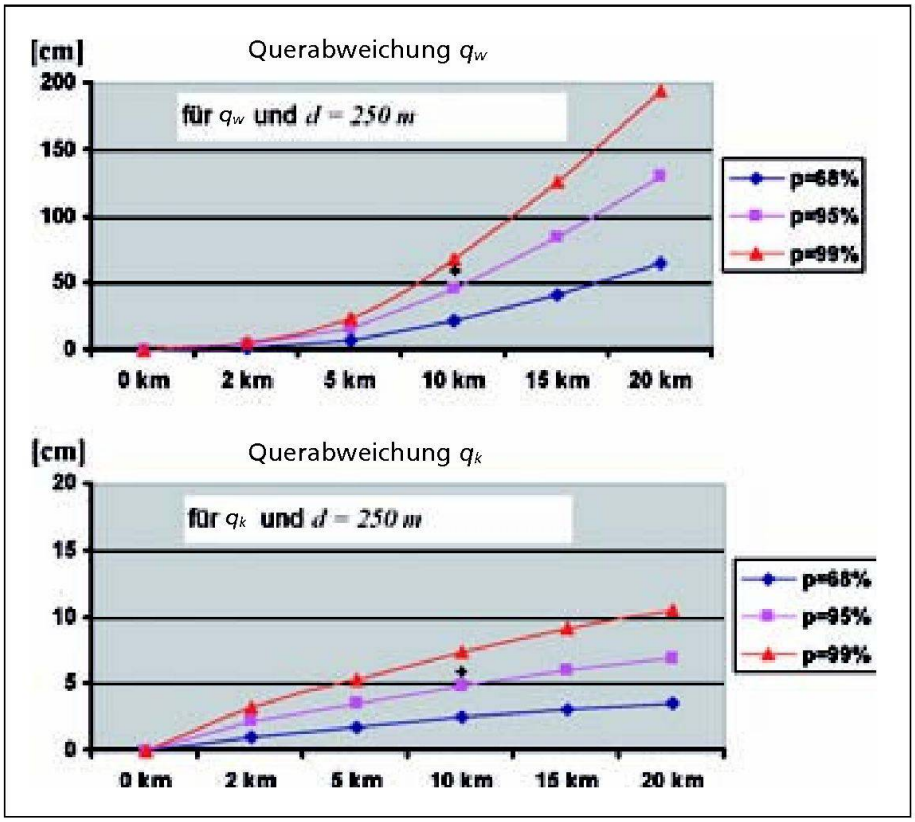


Abb. 1: Statistische Querabweichungen q_w und q_k bei gestreckten Polygonzügen ohne und mit Kreiselmessungen.

gen unumgänglich, zum einen um die Genauigkeit zu steigern, zum anderen aber auch aus Zuverlässigkeitsaspekten.

Nun wird es aus unterschiedlichen Gründen nicht praktikabel sein, jede Polygonseite durch Kreiselmessungen unabhängig zu orientieren. Deshalb erhebt sich häufig die Frage, wie oft und an welchen Stellen Kreiselmessungen durchgeführt werden sollen. Diese Frage ist prinzipiell nur projektbezogen korrekt zu beantworten. Jedoch gibt es auch hierzu theoretische Überlegungen, die zumindest eine Entscheidungshilfe sein können.

Nach Halmos, 1972 ergibt sich für dieses Optimierungsproblem folgende Lösung: Grundsätzlich ist das Optimum nur dann zu erreichen, wenn die Orientierungsmessungen symmetrisch auf die Gesamtlänge L verteilt werden. Danach ergibt sich für die Bereiche eines freien Polygonzuges, in denen eine Kreiselmessung durchgeführt werden sollte, folgende allgemeine Regel, wenn mit *z* die Anzahl der geplanten Orientierungsmessungen bezeichnet wird:

$$\frac{L}{2z}, \frac{3L}{2z}, \frac{5L}{2z}, \frac{7L}{2z}, \ldots$$

Ist *z=1*, also nur *eine* Kreiselmessung geplant, dann liegt der Bereich bei *L/2*, demnach in der Mitte des Zuges; für *z=2* liegen die Bereiche bei $^1/_4\,L$ und $^3/_4\,L$; für *z=3* können schliesslich die Bereiche $^1/_6\,L$, $^1/_2\,L$ und $^5/_6\,L$ angegeben werden usw.

Bereits durch *eine* Kreiselorientierung der letzten Polygonseite (vor der Ortsbrust) eines einseitig angeschlossenen Polygonzuges kann der Wert von q_w auf die *Hälfte* reduziert werden. Wird dann zusätzlich noch in der *Mitte eine weitere* Orientierungsmessung durchgeführt, dann vermindert sich bei grossem *n* die Querabweichung nochmals um den *Faktor 0,5,* bei um *zwei* symmetrisch angeordnete Kreiselmessungen gar um den *Faktor 1/9* (s.a. Jordan, Eggert, Kneissl, 1967, S.582). Somit wird deutlich, dass durch relativ wenige aber genaue Kreiselmessungen die statistische Querabweichung, selbst bei einer Wahrscheinlichkeit von *p=99%,* innerhalb der vorgegebenen Vermessungstoleranz, erheblich vermindert werden kann.

Diese nicht neuen Überlegungen und Schlussfolgerungen beruhen jedoch nur auf einer Berücksichtigung von *zufälligen Messabweichungen* und der damit verbundenen experimentellen Standardabweichungen s_w und s_k.

Schwerpunkt der nachfolgenden Ausführungen ist es deshalb, die gerade in der Tunnelvermessung auftretenden systematischen Einflussgrössen, die sowohl im Instrument als auch im Umfeld der Messungen wirksam werden können, zusätzlich im Genauigkeitsbudget zu berücksichtigen.

Das Konzept der Messunsicherheit

Seit einigen Jahren setzt sich auch in der geodätischen Messtechnik das Konzept der *Messunsicherheit* nach dem «Guide to the expression of uncertainty in measurement» (GUM) zunehmend durch (BIPM, 2008). Die Definition des Begriffs Messunsicherheit besagt, dass das Messergebnis nach Korrektur aller bekannten systematischen Einflüsse immer nur ein *Schätzwert* der Messgrösse ist, der mit einer *Unsicherheit* behaftet ist, die sich aus *zufälligen Messabweichungen* und *unvollkommener Berichtigung* des Ergebnisses bezüglich der *systematischen Einflussparameter* ableitet. Wurden in der vorangegangenen Betrachtung für die Ermittlung der zu erwartenden Querabweichung nur zufällige Messabweichungen berücksichtigt, erlaubt dieses Konzept die Einbeziehung von systematischen Messabweichungen.

Die *quantitative* Ermittlung der *Messunsicherheit* setzt sich grundsätzlich aus mehreren Komponenten zusammen. Dabei unterscheidet der GUM zwei Kategorien:

A: Komponenten, die mit statistischen Methoden berechnet werden.

B: Komponenten, die auf andere Weise ermittelt werden.

Die *Komponenten der Kategorie A* werden durch die empirische Standardabweichung s_i sowie ihren Freiheitsgrad

v_i angegeben. Berechnungsmethoden (Fehlerfortpflanzungsgesetz, Methode der kleinsten Quadrate) einschliesslich ihrer Zusammenfassung sowie die Berücksichtigung von Korrelationen sind dem Geodäten wohlbekannt. Die auf dieser Basis ermittelte Unsicherheit $u_{Ai} = s_i$ wird auch *Standardunsicherheit* genannt.

Die *Komponenten der Kategorie B* werden als *Näherungen* entsprechender Standardabweichungen betrachtet. Sie sind durch Grössen u_{Bi} zu charakterisieren. Dieses Vorgehen wird leider bisher bei geodätischen Messverfahren wenig angewendet. Hier besteht aber erstmals die Möglichkeit, eine *Messunsicherheit abzuschätzen*. Dabei sollen alle verfügbaren Informationen – also auch die in langjähriger Messerfahrung erworbenen – über die Streuung einfliessen.

Alle Standardunsicherheiten, die auf dieser Weise einer Messgrösse zuzuordnen sind, können nach dem *Unsicherheitenfortpflanzungsgesetz* wie Standardabweichungen quadratisch zur *kombinierten Standardunsicherheit* u_c zusammengefasst werden:

$$u_c = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \ldots + u_{An}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \ldots + u_{Bm}^2}\,.$$

Die Messunsicherheit u bzw. u_c wird dabei als Mass einer Streuung immer als positiver Wert (ohne Vorzeichen) zusammen mit dem Messwert angegeben. In der Regel wird diese Genauigkeitsangabe ausreichen. Dort aber, wo eine höhere Sicherheitswahrscheinlichkeit gefordert ist, oder auch die Beziehungen zu Toleranzen herzustellen sind wie z.B. auch im Tunnelbau, ist es vorzuziehen, einen *Bereich* für die Messunsicherheit festzulegen. Somit gelangt man über die Festlegung eines *Erweiterungsfaktors k* zur *erweiterten Messunsicherheit*

$U = k \cdot u_c$.

Häufig wird dabei $k = 2$ gewählt, was zu einem Intervall $\pm U$ (Angabe immer mit Vorzeichen) führt und in statistischer Analogie einen Vertrauensbereich von ca. 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit festlegt.

Die Beschreibung aller Einflussgrössen erfordert umfassende Kenntnisse über den Messprozess im Instrument, die Konzeption des Messverfahrens und schliesslich die Auswirkungen des Messumfeldes. Da die klassischen, statistischen Verfahren hierbei weitgehend keine Lösungsansätze zur Quantifizierung der Genauigkeitsaussage ermöglichen, sind Verfahren zur realistischen *Abschätzung* der Messunsicherheit (vom Typ B) gefordert. Diese können auch dann notwendig werden, wenn die Überbestimmung der Messgrösse gering ist und somit die empirische Standardabweichung mit einer grossen Varianz behaftet ist.

Der GUM sieht hierfür verschiedene Ansätze vor, nämlich Eingangsgrössen unterschiedlicher Verteilung und Wahrscheinlichkeiten zuzulassen, z.B.

- Normalverteilung bei einer Wahrscheinlichkeit von 50%, 68% und 100%;
- Gleichverteilung in einem Intervall a_- bis a_+; symmetrische oder unsymmetrische Lage in Bezug auf den Schätzwert x_i der Eingangsgrösse;
- symmetrische Trapezverteilung;
- u.a.

Dieser kurze Abriss über die Angabe und Bestimmung der Messunsicherheit zielte darauf ab, das Konzept und die Übertragung auf das Problem der Tunnelvermessung und speziell der Kreiselmessung ohne Ausbreitung eines theoretischen Hintergrundes zusammenfassend darzustellen.

Eine ausführliche Darstellung zur Berechnung der aus unterschiedlichen Verteilungs- und Wahrscheinlichkeitsvorgaben resultierenden Standardunsicherheiten ist in Heister, 2005a und 2005 b sowie BIPM (GUM), 2008 gegeben.

Unsicherheitskomponenten bei Kreiselmessungen

Mit dem Gyromat der Westfälischen Berggewerkschaftskasse (WBK, heute DMT, Essen) wurde Ende der 70er Jahre (Eichholz und Schäfler, 1978) der erste automatisierte und auf dem zivilen Markt erhältliche Präzisions-Kreiseltheodolit vorgestellt. Er hat sich als Referenz bei allen grossen Tunnelbauwerken durchgesetzt und wurde deshalb auch bei den später beschriebenen Messungen des Projektes Gotthard-Basistunnel (GBT) von verschiedenen Institutionen eingesetzt. Obwohl dieses Gerät einen hohen Automatisie-

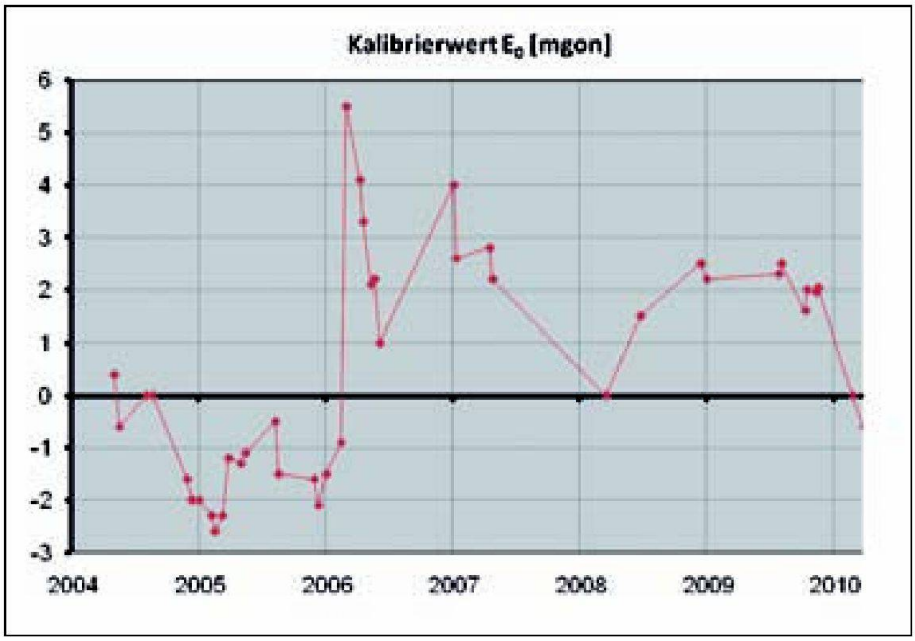


Abb. 2: Änderung des Kalibrierwertes des Gyromat 2000, Ser. Nr. 225 über die Zeitachse des Einsatzes beim GBT.

rungsgrad erreicht hat und auf eine lange Entwicklungshistorie zurückblicken kann, verbleiben doch noch einige Einflussgrössen, die Messabweichungen hervorrufen können, die teilweise korrigiert werden können oder/und zusätzlich im Genauigkeitsbudget berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich sind die Unsicherheitskomponenten zu unterscheiden in

- Instrumentenbezogene Komponenten,
- Komponenten durch Reduktionen der Messgrösse,
- Einflussgrössen des Messumfeldes.

Lassen sich diese Einflüsse im Einzelnen in diesem Beitrag nicht alle diskutieren – es sei hierzu z.B. auf folgende Literaturstellen verwiesen Halmos, 1971, Heister u.a., 1990, Heister, 1992, Korritke, 1997, Grillmayer, 2003 – so sollen doch einige wesentliche Einflussgrössen kurz angesprochen werden:

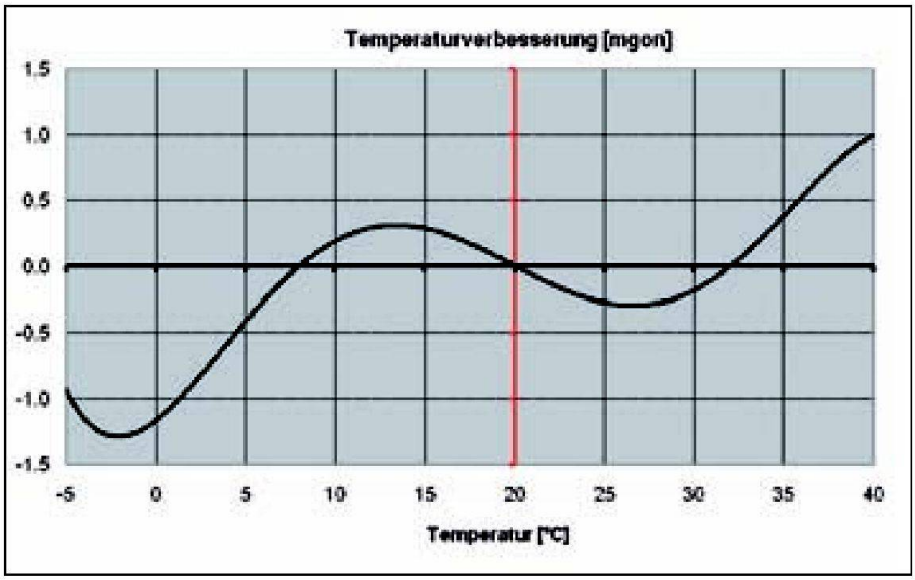


Abb. 3: Änderung der Messgrösse des Gyromat 2000, Ser. Nr. 225 in Abhängigkeit der Instrumententemperatur.

Kalibrierwertstabilität

Obwohl der bandgehängte nordsuchende Kreiseltheodolit ein absolut messendes System ist, erfolgt über die Instrumentenkonstante, dem Kalibrierwert *E*, der numerische Zusammenhang zwischen der Ableseeinrichtung des Kreiselmesssystems und Teilkreis «Null» des damit verbundenen Theodoliten. Durch Montage, Transport und Stoss sowie Wartung und Alterung kann sich dieser Wert ändern. Deshalb ist zum einen eine regelmässige Überprüfung bzw. Neubestimmung notwendig, zum anderen sind Möglichkeiten der Veränderung auch in das Messkonzept mit einzubeziehen. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt die Kalibrierwertänderung des vom Geodätischen Institut der UniBw beim GBT eingesetzten Gyromat 2000.

Temperatureinfluss im Instrument

Der Gyromat ist ein komplexes opto-elektronisches aber auch mechanisches Messsystem, bei dem in unterschiedlichen Komponenten Temperaturänderungen Messabweichungen bewirken können. Dies hat beim Hersteller ein umfangreiches Kalibrierprogramm zur Folge, so dass temperaturabhängig bereits intern Korrekturwerte berücksichtigt werden. Intensive Untersuchungen (Heister, 1992, Grillmayer, 2003) haben aber gezeigt, dass durchaus noch signifikante Restverbesserung – je nach Instrument unterschiedlich – bestimmt werden können. Deshalb wurde der Gyromat des Geodätischen Instituts der UniBwM nochmals einer unabhängigen Temperaturkalibrierung unterzogen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 3 graphisch dargestellt. Die daraus bestimmte Kalibrierfunktion ermöglicht für jeden Messwert die Berechnung einer Verbesserung in Abhängigkeit der aktuellen, internen Temperatur; Referenztemperatur ist dabei 20 °C. Die Graphik zeigt auch, dass insbesondere bei hohen Temperaturunterschieden, wie sie z.B. im Winter zwischen den Messungen im Portalnetz und im Tunnel auftreten können, diese Temperaturverbesserungen nicht vernachlässigt werden sollten.

Horizontalrefraktion

Die durch den horizontalen Temperaturgradienten verursachte Ablenkung des Zielstrahls stellt bei nahezu allen geodätischen Messungen eine Einflussgrösse dar, die erhebliche systematische Messabweichungen bewirken kann. Insbesondere im Tunnel muss bei extremen Temperaturverhältnissen diesem möglichen Fehlereinfluss besondere Beachtung geschenkt werden. Umfangreiche praktische Untersuchungen in Heister, 1997, haben gezeigt, dass Messabweichungen im Horizontalwinkel von mehreren mgon hierbei keine Seltenheit sind. Grundsätzlich kann dieses Phenomen durch eine entsprechende Messanordnung minimiert werden. Dabei gelten folgende Hinweise:

- Wandnahe Zielungen sind i.d.R. in hohem Masse refraktionsgefährdet;
- in unmittelbarer Nähe der Tunnelachse herrscht ein thermisch stabiler Bereich vor, der nahezu refraktionsfreie Messungen ermöglicht;
- diagonale Visuren sind ca. 70% geringer refraktionsbehaftet als die wandnahen Zielungen;
- bei der Richtungsübertragung im Portalbereich sollte die thermisch unruhige Mischzone weiträumig überbrückt werden.

Zur Abschätzung möglicher Refraktionseinflüsse $\delta(t)$ kann folgende Näherungsformel genutzt werden:

$$\delta(t)_{[mgon]} = 0{,}033 \cdot d_{[m]} \cdot grd\ t_{[°C/m]}\ .$$

Z. B. bei einer $d = 300\ m$ langen Visur und einem horizontalen Temperaturgradienten von $grd\ t = 0{,}3\ °C / m$ ergibt sich bereits ein $\delta(t) = 3{,}0\ mgon$.

Dies mag nochmals verdeutlichen, dass es sich bei der Horizontalrefraktion einerseits um eine Einflussgrösse handelt, die die Genauigkeitserwartungen beim Durchschlag erheblich mindern kann; andererseits ist der Refraktionswinkel aber auch eine Funktion von Parametern, die in der Praxis nicht mit der Schärfe und Dichte erfasst werden können, um eine Korrekturgrösse zur Horizontalwinkelmessung bestimmen zu können.
Erwähnt werden sollte schliesslich noch, dass bei gegenseitigen Kreiselmessungen Refraktionseinfluss messbar wird; die bei der Hin- und Rückmessung auftretende Differenz kann u.a. auch auf den zweifachen Wert $\delta(t)$ zurückgeführt werden (Heister, 1992). Somit sind Kreiselmessungen auch dazu geeignet refraktionsbehaftete Visuren zu lokalisieren.

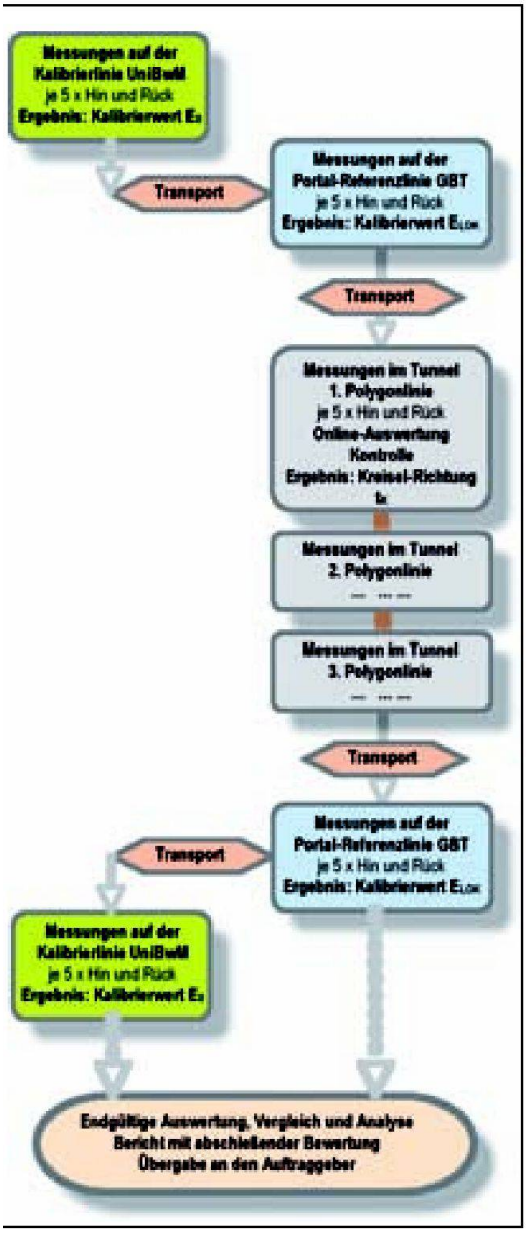


Abb. 4: Ablaufplan einer Kreisel-Messkampagne im GBT.

Kreiselmessungen im GBT

Im Rahmen des Jahrhundert-Projektes Gotthard-Basistunnel (GBT) wurde dem Institut für Geodäsie der UniBwM neben anderen Institutionen die Durchführung von Orientierungsmessungen bei den Hauptkontrollmessungen mit Hilfe des Präzisionskreisels Gyromat übertragen. Hierbei konnte bei der Erstellung des Messkonzeptes auf Erfahrungen beim Lötschberg-Basistunnel zurückgegriffen werden. Insgesamt fanden Kontrollmessungen in allen Portalnetzen Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido und Bodio sowie Messungen in den entsprechenden Tunnelabschnitten im Zeitraum August 2004 bis April 2010 in sechs Messkampagnen statt. Innerhalb dieses Zeitraums wurden mit dem eingesetzten Gyromat 2000, Ser. Nr. 225 ständig Referenzmessungen auf der Azimut-Kalibrierlinie des Geodätischen Labors der UniBwM und vier Temperaturkalibrierungen durchgeführt.

Messkonzept und durchgeführte Messungen

Der Messablauf für die Orientierungsübertragung wurde so konzipiert, dass

- eine angestrebte Messunsicherheit von < 1 mgon garantiert,
- die Messungen in sich kontrolliert,
- Änderungen des Kalibrierwertes identifiziert und lokalisiert,
- Refraktionseinflüsse erkannt und
- die Stabilität der lokalen Referenzlinien überwacht werden konnten.

Der daraus resultierende Ablaufplan einer Messkampagne ist aus dem in Abbildung 4 dargestellten Blockdiagramm ersichtlich.
Die Kreiselmessungen selbst wurden dabei «wireless» über einen PDA gesteuert, so dass keine manuellen Interventionen am Gerät während des Messprozesses

Abb. 5: Kreiselmessungen mit dem Gyromat 2000, Version UniBwM (Drahtlose Steuerung, Datenübertragung und Auswertung über PDA).

statt fanden (Abb. 5). Die anschliessende Datenübertragung sollte zum einen Übertragungsfehler der Messwerte ausschliessen, zum anderen aber auch eine direkte Auswertung einschliesslich aller Korrektionen und Reduktionen bis hin zur Kreiselrichtung t_K im Projektionssystem der Schweizerischen Landesvermessung ermöglichen:

$$t_K = A + E_0 + \Delta E + v_T - dA + da - c + dT$$

Hierin bedeuten

A	das Rohazimut (Kreiselmessung)
E_0	Kalibrierwert, bestimmt auf der Kalibrierlinie der UniBwM
ΔE	lokale Kalibrierwertkorrektur $E_{LOK} = E_0 + \Delta E$
v_T	Temperaturverbesserung, Referenz 20 °C
dA	Korrektur wegen Lotabweichungen
da	Reduktion wegen Zielpunkthöhe
c	Meridiankonvergenz
dT	Richtungsreduktion ins ebene Projektionssystem

Insgesamt wurden im Rahmen dieses Projektes 1383 einzelne Kreiselmessungen durchgeführt, die sich wie folgend aufteilen:

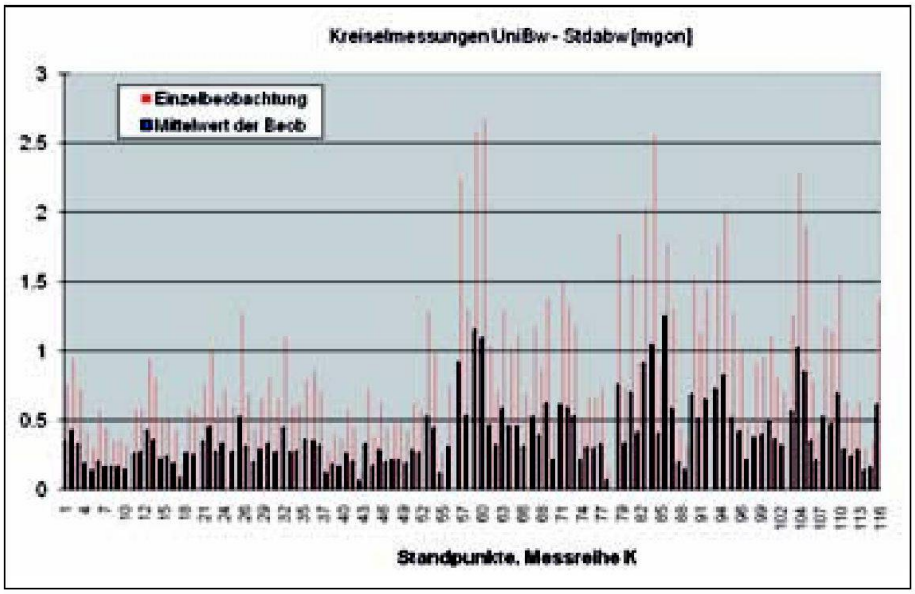


Abb. 6: Standardabweichungen der einzelnen Kreiselmessungen und des Mittelwertes der 116 Messreihen.

Standardabweichungen	Mittel [mgon]	Minimum [mgon]	Maximum [mgon]
eines Rohazimutes a : s_a	1,03	0,13	2,66
des Mittelwertes A : s_A	0,46	0,06	1,25
des Mittelwertes aus Hin- und Rückmessung $\overline{A}$: $s_{\overline{A}}$	0,33	0,04	0,88

Tab. 1: Standardabweichungen der Rohazimute.

	Kreisel-Temperatur [°C]		Temperaturverb. v_T [mgon]	
	Portalnetz	Tunnel	Portalnetz	Tunnel
Maximum	26,6	31,9	0,68	1,45
Minimum	–5,5	12,7	–1,22	–0,12
Mittelwert	10,2	25,1	–0,27	0,45

Tab. 2: Kreiseltemperaturen und Temperaturverbesserungen.

Differenzen der Kreislrichtungen t_K aus Hin- und Rück	Mittel [mgon]	Minimum [mgon]	Maximum [mgon]
Portalnetze	0,36	0,01	1,36
Tunnellinien	0,32	0,01	1,60

Tab. 3: Differenzen der ebenen Kreiselrichtungen aus Hin- und Rückmessungen.

- 130 Messungen auf der Azimut-Kalibrierlinie der UniBw (vor und nach jeder Messkampagne am GBT)
- 555 Messungen zur Temperaturkalibrierung in der Klimakammer des Geodätischen Labors der UniBwM
- 100 Messungen auf der Azimut-Kalibrierlinie der UniBwM (vor und nach jeder Temperaturkalibrierung)
- 598 Messungen am und im GBT in 116 Messreihen

Diese hohe Anzahl an Messungen erlaubt natürlich einige statistische Aussagen über Genauigkeit und Messumfeld. Abbildung 6 zeigt zunächst graphisch die Verteilung der Standardabweichungen der Einzelmessungen und des Mittels der 116 Messreihen.
Über alle Messreihen gemittelt, lassen sich dann die nachfolgende Genauigkeitsaussagen machen (Tab. 1).
Das Messumfeld kann zum einen durch die vorherrschenden Temperaturen beschrieben werden; sie und die daraus resultierenden Restverbesserungen sind in Tabelle 2 für die Messungen am und im GBT zusammengestellt.
Zum anderen können aus den Differenzen der Hin- und Rückmessungen Aussagen über mögliche horizontale Temperaturgradienten sowohl auf den Referenzlinien als auch auf den Polygonlinien im Tunnel abgeleitet werden.
Die Zusammenstellung in Tabelle 3 zeigt, dass es im Mittel bis auf wenige Ausnahmen keine signifikanten Hinweise auf mögliche Horizontalrefraktion gegeben hat. Dies deutet sowohl auf eine gute Auswahl der Referenzlinien hin als auch auf eine gute Anlage des Tunnelpolygons; hierbei wurde die Anordnung in Tunnelmitte bevorzugt, die ja, wie bereits oben erwähnt, i.d.R. minimal refraktionsbelastet ist. Dies hat sich auch im GBT deutlich gezeigt und dürfte sich auf die Fehlerfortpflanzung bei den Horizontalwinkelmessungen positiv ausgewirkt haben.

Abschätzungen der Einflussgrössen

Um zu einer realistischen Bestimmung der Messunsicherheit einer Kreiselrichtung gemäss GUM zu kommen, ist es von be-

sonderer Bedeutung, die Standardunsicherheiten von Typ A und B möglichst umfassend abzuschätzen. Gemäss den im vorangegangenen Abschnitt diskutierten wichtigsten systematischen Einflussgrössen kommt man zu folgender Zusammenstellung:

1. Messungen auf der Referenzlinie im Portalnetz und Bestimmung des lokalen Kalibrierwertes E_{LOK}

Kreiselmessung aus Hin und Rückmessung (aus Tab. 1)
$u_{\bar{A}\,ref}$ = 0,35 *mgon* (Typ A)

Temperaturverbesserung v_T
(aus Kalibrierprotokoll)
u_{v_T} = 0,2 *mgon* (Typ A)

Lotabweichungskorrektur *dA*
mit s_η = 0,5″ gilt näherungsweise $s_\eta \approx u_{dA}$
u_{dA} = 0,15 *mgon* (Typ B)

Lokale Vergleichsrichtung t_R
u_{t_R} = 0,4 *mgon* (Typ B)

Zentriergenauigkeit *e*
e = ± 0,3 mm (Gleichverteilung)
u(e) = 0,58 *e* = 0,17 mm (s. Heister, 2005 a,b)
für 500 m Visur gilt für Stand- und Zielpunkt
u_e = 0,03 *mgon* (Typ B)

Horizontaleinfluss kann vernachlässigt werden, da er bei allen Messungen beim GBT als nicht signifikant erkannt wurde. Somit ergibt die Unsicherheitenfortpflanzung für E_{LOK}

$$u_{E_{LOK}} = \sqrt{0{,}35^2 + 0{,}2^2 + 0{,}15^2 + 0{,}4^2 + 0{,}03^2} = 0{,}59\ mgon\ .$$

2. Messungen auf den Polygonlinien im Tunnel (analog zu unter 1.)

Kreiselmessung aus Hin und Rückmessung
$u_{\bar{A}}$ = 0,35 *mgon* (Typ A)

Temperaturverbesserung v_T
(aus Kalibrierprotokoll)
u_{v_T} = 0,2 *mgon* (Typ A)

Lotabweichungskorrektur *dA*
mit s_η = 1,0″ gilt näherungsweise $s_\eta \approx u_{dA}$
u_{dA} = 0,3 *mgon* (Typ B)

Zentriergenauigkeit *e*
e = ± 2,0 mm (Gleichverteilung)
u(e) = 0,58 *e* = 1,2 mm (s. Heister, 2005 a,b)
auf 350 m Visur gilt für Stand- und Zielpunkt
u_e = 0,31 *mgon* (Typ B)

3. Genauigkeitsbudget für die Orientierungsübertragung auf eine Tunnellinie, Bestimmung der Kreiselrichtung t_K gemäss o.a. Formel

Hiernach gilt für die kombinierte Standardunsicherheit für die Kreiselrichtung t_K

$$u_c(t_K) = \sqrt{u_A^2 + u_{E_{LOK}}^2 + u_{v_T}^2 + u_{dA}^2 + u_e^2}$$

Unter Beachtung der unter 1. und 2. ermittelten numerischen Werte ergibt sich

$$u_c(t_K) = \sqrt{0{,}35^2 + 0{,}59^2 + 0{,}2^2 + 0{,}3^2 + 0{,}31^2}$$

und somit

$u_c(t_K)$ = 0,84 *mgon*.

Ordnet man noch der Kreiselrichtung im Tunnel einen Grad des Vertrauens von 95% zu (analog zum statistischen Vertrauensintervall) gelangt man mit *k* = *2* zur *erweiterten Messunsicherheit:*

$U(t_K) = k \cdot u_c(t_K) = 2 \cdot 0{,}84$ *mgon*

Die *erweiterte Messunsicherheit* einer aus dem Portalnetz *übertragenen Kreiselrichtung* kann schliesslich für das GBT-Projekt angegeben werden zu

$U(t_K) = \pm\ 1{,}68$ *mgon*.

Diese Genauigkeitsangabe ist als Intervall zu betrachten, in dem sich mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von ca. 95% der angegeben Messwert (Messergebnis) befindet.

Abschliessende Bewertung

Es wurde dargelegt, dass bei grossen Tunnelprojekten, wo eine lang gestreckte Messkonfiguration unumgänglich ist, Kreiselmessungen aus Gründen der Genauigkeitssteigerung aber auch aus Zuverlässigkeitsaspekten nicht verzichtbare Messgrössen sind. Zusätzlich gibt dieses spezielle und autonome Verfahren der Richtungsübertragung noch wichtige Informationen über das Messumfeld bezüglich systematischer Einflussgrössen.
Die beim Projekt Gotthard-Basistunnel durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die dort verfolgte Messanordnung zur Orientierungsübertragung zu zuverlässigen Messergebnissen geführt hat und über die lange Zeitachse der Projektdurchführung selbst Orientierungsänderungen in den Portalnetzen detektieren konnte. Das angestrebte Ziel, eine Standardunsicherheit für die autonome Richtungsbestimmung einer Polygonlinie im Tunnel von < 1 mgon, konnte deutlich erreicht werden. Durch die hohe Messgenauigkeit konnte auch signifikant nachgewiesen werden, dass durch die bewährte Messanordnung in Tunnelmitte (Heister, 1992, Korittke 1997) im GBT nur in Ausnahmefällen mit dem systematischen Einfluss von Horizontalrefraktion zu rechnen war.
Abschliessend sei noch bemerkt, dass die Aufstellung eines Unsicherheitenbudgets nach GUM neben der Berücksichtigung von statistischen Grössen auch die Beachtung anderweitiger Informationen einschliesslich der Einbringung von Erfahrenswerten ermöglicht. Somit ist eine weitaus umfassendere und repräsentativere Genauigkeitsabschätzung möglich. Zusätzlich ist noch der Übergang auf ein Genauigkeitsintervall vorgesehen, das insbesondere den mit statistischen Genauigkeitsangaben nicht so vertrauten Fachkollegen die Interpretation wesentlich erleichtert.

Literatur:

BIPM (GUM) (2008): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100.

BIPM (2008): Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of the distributions using the Monte Carlo method, JCGM 101.

Eichholz, K. und Schäfler, R. (1978): «Gyromat», ein automatischer Vermessungskreisel hoher Genauigkeit und kurzer Messzeit. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, Jg. 85, S. 281–293.

Grillmayer, E. (2003): Untersuchungen systematischer Fehlereinflüsse bei Messungen mit dem Kreisel DMT Gyromat 2000. In: Brunner, F.K., (Hrsg.): Schriftenreihe des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme der technischen Universität Graz, Shaker Verlag, Aachen.

Halmos, F. (1971): Systematic and random errors of direction measurements with gyrotheodolites. MOM Review, 4, S. 24–32.

Halmos, F. (1972): Zeitbedarfs- und Genauigkeitsuntersuchungen bei Polygonierungen mit Orientierungs- und Winkelmessungen. Das Markscheidewesen in den Sozialistischen Ländern, Bd. 6, S. 59–67.

Heister, H., Lechner, W., Schödlbauer, A. (1990): Zur Genauigkeit und Kalibrierwertstabilität automatisierter Vermessungskreisel. In Schödlbauer, A.: Moderne Verfahren der Landesvermessung, Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 38-2, S. 501–528.

Heister, H. (1992): Zur Anordnung von Kreiselmessungen unter besonderer Berücksichtigung von systematischen Fehlereinflüssen. In: Matthias, H.J., Grün, A.: Ingenieurvrmessung 92, Beiträge zum XI. Internationalen Kurs für Ingenieurgeodäsie, Bd. 1, Ferd. Dümmler´s Verlag, Bonn, S. I 7/1-7/14.

Heister, H. (1997): Experimentelle Untersuchungen zur Horizontalrefraktion im Tunnelbau. In: IX. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 1997 – Fachvorträge, Institut für Geodäsie, Universität Innsbruck, Institutsmitteilungen, Heft 17, S. 79–91.

Heister, H. (2005a): Zur Messunsicherheit im Vermessungswesen (I). Geomatik Schweiz, Geoinformation und Landmanagement, 11/2005, S. 604–607.

Heister, H. (2005b): Zur Messunsicherheit im Vermessungswesen (II). Geomatik Schweiz, Geoinformation und Landmanagement, 12/2005, S. 670–673.

Jordan/Eggert/Kneissl (1963): Handbuch der Vermessungskunde. Band II, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 572 ff.

Korittke, N. (1997): Zur Anwendung hochpräziser Kreiselmessungen im Bergbau und Tunnelbau. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 14.

Tárzcy-Hornoch, A. (1935): Die durch den Einrechnungszug erzielbare Orientierungsgenauigkeit. Mitteilungen der Berg- und Hüttenmännischen Abteilung, Sopron.

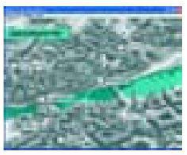
Prof. Dr.-Ing. habil. Hansbert Heister
Dipl.Ing. Wolfgang Liebl
Institut für Geodäsie der UniBwM
DE-85577 Neubiberg
H.Heister@unibw.de

GeomatikShop
Shop Géomatique

Jetzt bestellen!
Commandez maintenant!

Neue Faltblätter
Geomatiker/in
Geomatikingenieur/in

Geomatik-CD
neu: online



Fahnen

Mustervorträge
Publikationen

Sonderhefte Geomatik Schweiz

www.geomatik.ch