

# Weshalb sind die „besten“ Koordinaten nicht immer die „richtigen“?

Stefan KRUMMENACHER und Ivo SCHÄTTI

## 1 Stand „Neue Eisenbahn-Alpentransversale (NEAT)“

### 1.1 Gotthard-Basistunnel (GBT)

Nach der Eröffnungsfeier vom 1. Juni 2016 wurde am 11. Dezember 2016 der fahrplanmäßige Betrieb durch den Gotthard-Basistunnel (GBT) aufgenommen. Die Abschlussarbeiten und die Phase der Inbetriebsetzung (Testfahrten) in den Jahren 2015 und 2016 tangierten die Vermessung nur noch am Rande. Die Hauptarbeiten des Konsortiums „Vermessungsingenieure Gotthard-Basistunnel“ (VI-GBT) wurden mit der Kontrolle der Gleislage und einem letzten Nivellement durch den gesamten Tunnel (Deformationsmessung) Ende 2014 respektive anfangs 2015 abgeschlossen.

### 1.2 Ceneri-Basistunnel (CBT)

Die Arbeiten am Gesamtprojekt der „Neuen Eisenbahn-Alpentransversale“ (NEAT) auf der Gotthard-Achse sind jedoch noch nicht abgeschlossen. Für den zweiten und deutlich kürzeren Basistunnel, den Ceneri-Basistunnel (CBT) zwischen Bellinzona und Lugano, starteten die Vortriebsarbeiten deutlich später (im Jahr 2008) und wurden anfangs 2016 abgeschlossen. Bis im Sommer 2017 finden die letzten Arbeiten am Rohbau statt. Die letzten Innengewölbeblöcke werden betoniert und die Bankette vervollständigt. Anschließend wird das Bauwerk für den Einbau der Geleise und der Bahninfrastruktur den Unternehmern Bahntechnik übergeben.

Die Vortriebsarbeiten wurden in drei Abschnitte unterteilt. Ausgehend vom Nord- (Vigana) respektive Südportal (Vezia) mussten die Vortriebe aus logistischen Gründen auf weniger

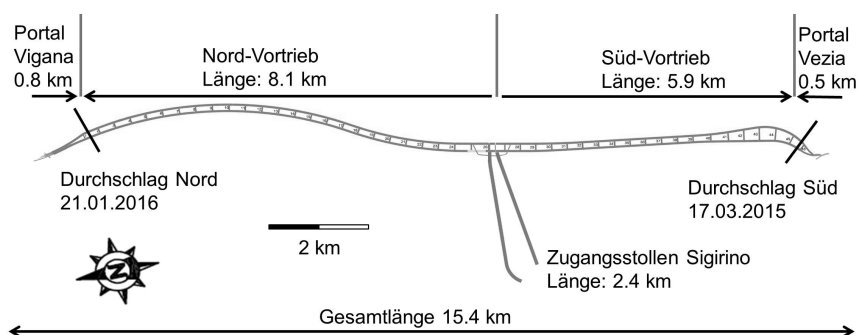


Abb. 1: Schema Ceneri-Basistunnel, Projektstand per Januar 2017

als 1 km beschränkt werden. Die Hauptvortriebsarbeiten des Basistunnels wurden ausgehend von einem Zwischenangriff in Sigirino in Nord- und Südrichtung ausgeführt. Über einen 2.4 km langen Zugangsstollen wurde ca. die Mitte des 15.4 km langen Tunnels erreicht. Für weitere Erläuterungen zum Projekt des CBT wird auf SCHÄTTI et al. (2014) verwiesen.

Der erste Durchschlag im CBT fand am 17.03.2015 in Südrichtung statt. Acht Monate später konnte am 21.01.2016 der Hauptdurchschlag in Nordrichtung gefeiert werden.

## 2 Vortriebsvermessung am CBT

Für die Bauherrenvermessung am CBT ist das Konsortium „Consorzio Geodetico Sud“ (COGESUD) verantwortlich. Für die Vortriebsvermessung waren die beiden Firmen Studio Meier SA und Bernasconi e Forrer SA zuständig. Die beiden Firmen sind gleichzeitig Partner im Konsortium VI-GBT. Damit war sowohl in der Projektleitung, als auch bei den Messequipen das gleiche Personal in der Verantwortung wie am GBT. Die Firmen konnten vom Erfahrungsschatz aus über 200 Vortriebskontrollen am GBT profitieren.

### 2.1 Vermessungskonzept

Die ersten erfolgreichen Durchschläge am GBT bestätigten das gewählte Vermessungskonzept. Aus diesem Grund wurde dieses im Wesentlichen auf den CBT übertragen und nur punktuell angepasst. Die wichtigsten Anpassungen waren:

- **Verkürzung der Abstände zwischen den Vermessungshauptpunkten (VHP)** von 400 m auf 160 m (Nord-Vortriebe) respektive 250 m (Süd-Vortriebe). Die kurvenförmige Achse und die Förderbandinstallationen zum Abtransport des Ausbruchmaterials schränkten die Sichtweiten deutlich ein.
- **mehr Vortriebskontrollen:** Vortriebskontrolle nach jeweils ca. 320 m Vortrieb pro Röhre. Es wurde im Normalfall nach jedem zweiten neuen VHP eine Kontrolle durchgeführt.
- **mehr Verbindungsmessungen durch Querschläge:** zur Steigerung der Zuverlässigkeit und besseren Anbindung des zweiten Polygonzuges an die Kreismessungen in der ersten Röhre (siehe Kapitel 2.2).
- **deutlich mehr Kreiseleinsätze** (siehe Kapitel 2.3).

Die Vermessungskonzepte und die stochastischen Modelle für den GBT und CBT wurden in anderen Berichten bereits im Detail erläutert (STENGELE 2007, SCHÄTTI et al. 2014, SALVINI et al. 2014).

Neben den vermessungstechnischen Aufgaben sind für eine erfolgreiche Auftragserfüllung auch die organisatorischen Aspekte von großer Wichtigkeit. Die Erfahrungen vom GBT halfen den Bauherrenvermessern insbesondere bei folgenden Punkten:

- bei der raschen Beurteilung im Tunnel, ob trotz störenden Installationen, die Messungen mit der geforderten Genauigkeit ausgeführt werden können. Das Vermessungskonzept gab vor, dass sich keine Hindernisse in den Visurlinien befinden.
- bei den Verhandlungen am Tisch, um die notwendigen Messbedingungen zu erreichen (Durchsetzungsvermögen).

- Generell: Gratwanderung zwischen Kompromissbereitschaft und Durchsetzen des genehmigten Vermessungskonzeptes. Der Vermesser muss sich immer des Sprichworts „Gib ihm den kleinen Finger und er nimmt die ganze Hand“ bewusst sein.

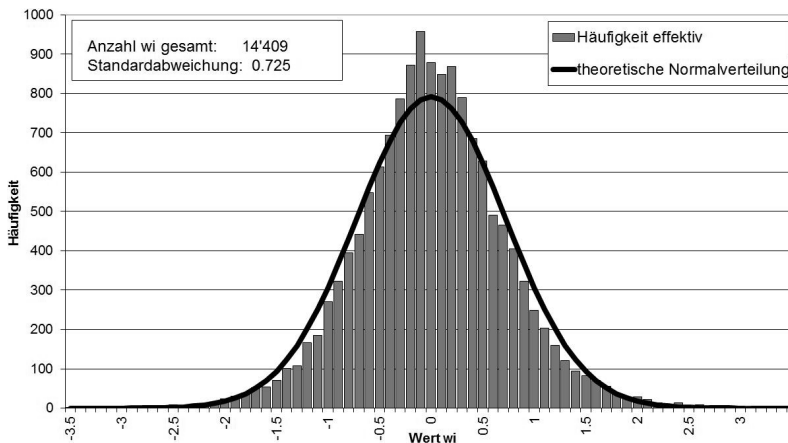
## 2.2 Vortriebskontrollen

Zwischen 2007 und 2016 wurden insgesamt 72 Kontrollen im Zugangsstollen und den vier Hauptvortrieben, sowie 10 (Nord) respektive 5 (Süd) Kontrollen in den je zwei Gegenvortrieben ab den Portalen durchgeführt.

Eine Mehrheit der Einsätze musste während der Bauunterbrüche an Ostern, im Sommer und Weihnachten/Neujahr ausgeführt werden. Die Vermessungsequipen konnten dafür meist von guten Messbedingungen profitieren und die Kontrollen von zwei oder gar vier Vortrieben miteinander kombiniert durchführen. Meist arbeiteten zwei Messequipen in den beiden Einspurröhren parallel nebeneinander. Infolge dieser Rahmenbedingungen konnten lange und durch mehrere Querschläge miteinander verbundene Polygonzüge gemessen werden.

Alle Messelemente der Vortriebskontrollen wurden in einer einzigen Gesamtausgleichung (GA) zusammengefasst und gemeinsam über den gesamten CBT ausgeglichen. Insgesamt wurden 1'526 Einzelazimute, 20'658 Distanzen respektive Richtungen und 1'050 nivellierte Höhendifferenzen für die GA über den gesamten CBT verwendet.

Das Histogramm in Abbildung 2 zeigt den Vergleich zwischen den in Klassen eingeteilten, normierten Verbesserungen aller Lagemessungen mit Visurdistanz länger als 40 m und der Normalverteilung. Das Histogramm bestätigt visuell, dass die angenommenen A-priori-Genauigkeiten klar eingehalten werden konnten und die Messungen mit der geforderten Sorgfalt ausgeführt wurden.



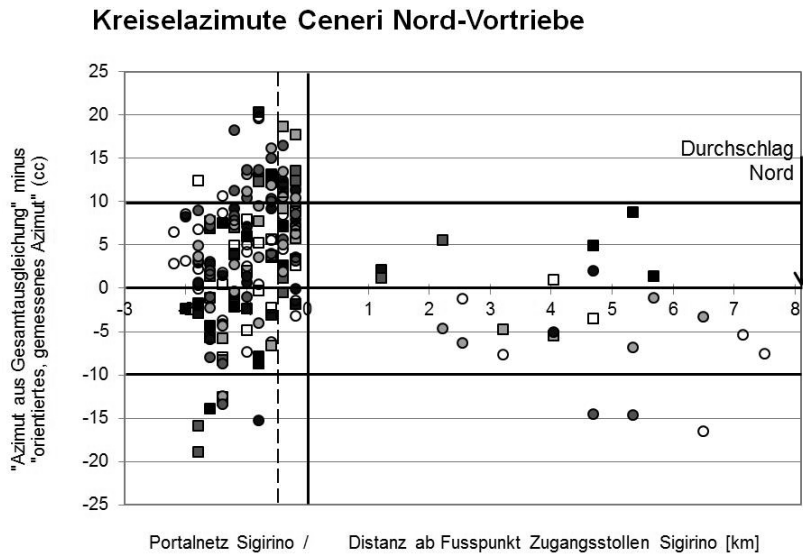
**Abb. 2:** Histogramm der normierten Verbesserungen ( $w_i$ ) der Azimut-, Richtungs- und Distanzmessungen mit Visurdistanz länger als 40 m (ohne Messungen zu Rückversicherungen)

### 2.3 Kreismessungen

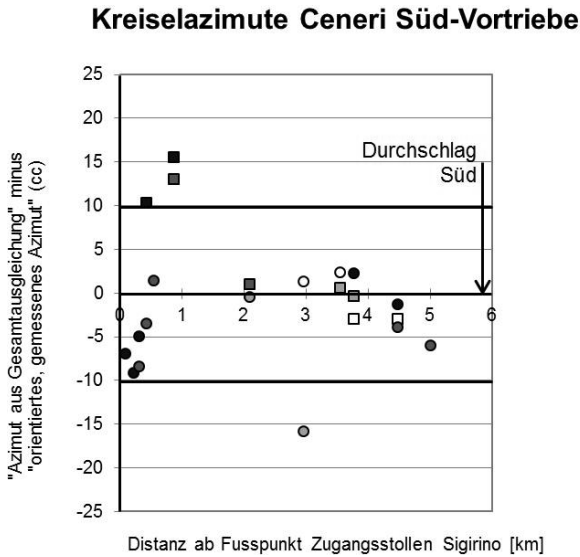
Die Bedeutung von Kreismessungen für lange Tunnelprojekte ist unbestritten. Nur dank dieser unabhängigen Messmethode können die Genauigkeiten der langen Polygonzüge verbessert und die notwendige Zuverlässigkeit in den Vortriebsnetzen erreicht werden.

Bei insgesamt 13 Vortriebskontrollen am CBT wurden Kreismessungen durchgeführt. Bei 8 Einsätzen fanden Kreismessungen sowohl in den Nord- als auch in den Südvortrieben statt. Bestand die Notwendigkeit eines Kreiseinsatzes in einer Vortriebsrichtung, wurde immer auch ein Einsatz in der entgegengesetzten Vortriebsrichtung durchgeführt. Dank dieser Kombination der Kreiseinsätze in beiden Vortriebsrichtungen konnten mehr Messungen als ursprünglich geplant durchgeführt werden. Im Durchschnitt wurde alle ca. 600 m in der vorausseilenden Röhre (Hauptrohre) „gekreist“.

Für die Abbildungen 3 und 4 wurden die Azimute der Kreiselstrecken aus den Koordinaten der GA nach dem Durchschlag berechnet und den um die Orientierungsbekanntes korrigierten, gemessenen Azimuten (Mittel aus Hin- und Rückmessung) gegenübergestellt. Die Verbesserungen an den gemessenen Azimuten sind als Abweichungen gegenüber der horizontalen Achse in Abhängigkeit der Distanzen zum Fußpunkt des Zugangsstollens dargestellt (Länge des Zugangsstollens nicht inklusive). Im linken Teil der Abbildung 3 sind zudem die Azimute auf den Referenzstrecken im Portalnetz Sigirino ersichtlich.



**Abb. 3:** Verbesserungen an den gemessenen Kreiselazimuten in den Nord-Vortrieben



**Abb. 4:** Verbesserungen an den gemessenen Kreiselazimuten in den Süd-Vortrieben

Die Erkenntnisse nach KRUMMENACHER et al. (2014) wurden nach Abschluss der Arbeiten bestätigt. Die A-priori-Genauigkeiten von 1.5 mgon für eine Einzelmessung wurden durch die Schlussquotienten zwischen a posteriori und a priori für alle Kampagnen als kleiner 1.0 ausgewiesen (0.45 – 0.96). Nur die Messungen auf sieben untertägigen Kreiselstrecken wiesen Verbesserungen von mehr als  $\pm 1.0$  mgon auf (max. 1.7 mgon). Auffällig bleibt, dass einzelne Kreiseinsätze weniger gut zur GA passten als andere. Sie wiesen auf allen in der gleichen Kampagne gemessenen Kreiselstrecken Verbesserungen mit gleichem Vorzeichen auf und beeinflussten den Polygonzug eher negativ. Erst durch Wiederholungsmessungen in einem separaten Einsatz wurde die notwendige Zuverlässigkeit erreicht.

## 2.4 Durchschlagsergebnisse

### 2.4.1 Zusammenstellung GBT und CBT

23 Jahre nach der Aufnahme des ersten Vortriebs am GBT für den Erkundungsstollen Piora (1993) wurden im Januar 2016 die Vortriebsarbeiten am CBT und somit auch die Vortriebskontrollen für das gesamte NEAT-Projekt abgeschlossen. Die beiden Hauptdurchschläge am CBT fanden praktisch gleichzeitig in den beiden Einspurröhren statt (21.01.2016 respektive 26.01.2016).

Tabelle 1 fasst alle Durchschlagsergebnisse des GBT und CBT zusammen. Die Tabelle wurde gemäß SALVINI et al. (2014) ergänzt. Die Reihenfolge der Auflistung erfolgt von Nord nach Süd und ist nicht chronologisch.

**Tabelle 1:** Zusammenstellung der Durchschlagsergebnisse am GBT und CBT in [mm]

| von                         | nach     | Datum    | Länge [km] |      | dQ         | dL    | dH         |    |                 |
|-----------------------------|----------|----------|------------|------|------------|-------|------------|----|-----------------|
| <b>Gotthard-Basistunnel</b> |          |          |            |      |            |       |            |    |                 |
| Erstfeld                    | Amsteg   | 03.09.09 | 8.1 / 2.0  | 10.1 | <b>14</b>  | E ö A | <b>34</b>  | zl | <b>5</b> E h A  |
| Amsteg                      | Sedrun   | 19.10.07 | 13.4 / 3.9 | 17.3 | <b>137</b> | A ö S | <b>21</b>  | zk | <b>3</b> A h S  |
| Sedrun                      | Faido    | 20.10.10 | 8.3 / 15.1 | 23.4 | <b>81</b>  | S w F | <b>136</b> | zk | <b>8</b> S t F  |
| Faido                       | Bodio    | 21.10.06 | 4.1 / 15.7 | 19.8 | <b>92</b>  | F ö B | <b>12</b>  | zk | <b>17</b> F t B |
| <b>Ceneri-Basistunnel</b>   |          |          |            |      |            |       |            |    |                 |
| Vigana                      | Sigirino | 21.01.16 | 0.8 / 10.5 | 11.3 | <b>15</b>  | V w S | <b>62</b>  | zk | <b>4</b> V t S  |
| Sigirino                    | Veza     | 17.03.15 | 8.3 / 0.5  | 8.8  | <b>23</b>  | S w V | <b>10</b>  | zl | <b>9</b> S t V  |

Legende: ö: östlich, w: westlich, zl: zu lange, zk: zu kurz, t: tiefer, h: höher

#### 2.4.2 Beurteilung der Durchschlagsergebnisse am CBT

Die Resultate am CBT reihen sich in die ausgezeichneten Ergebnisse des GBT ein. Zu den drei Komponenten der Abweichungen sind folgende Aspekte hervorzuheben:

- **Quer zur Achse**  
Die Querabweichungen von jeweils 2 cm sind deutlich besser als die Erwartungen.
- **Längs zur Achse**  
Die „Lücke“ von 6 cm Länge (Distanzen zu kurz) beim Hauptdurchschlag ist größer als erwartet. Wie schon beim Hauptdurchschlag am GBT zwischen Sedrun und Faido resultierte auch beim CBT eine größere Abweichung in Längs- als in Querrichtung (siehe Kapitel 2.4.3).
- **Höhe**  
Über alle Durchschläge betrachtet, resultierte nur eine einzige Abweichung über 1 cm. Möglich wurden diese hervorragenden Resultate dank dem durch das „Bundesamt für Landestopographie“ verdichteten Landesnivellement. Diese Verdichtungen wurden eigens für das NEAT-Projekt ausgeführt. Zudem wurden die notwendigen Korrekturen (siehe Ausführungen zu den verschiedenen Korrekturen in RYF et al. (2000)) genau berechnet und korrekt angewendet. Systematische Effekte bei der Messung konnten mit geeigneten Maßnahmen weitgehend eliminiert werden.

#### 2.4.3 Maßstab der Distanzmessung

Die unerwartet große Längsabweichung von 136 mm beim Hauptdurchschlag des GBT im Jahr 2010 wurde in der Folge detailliert untersucht. In SALVINI et al. (2014) wurden die Untersuchungen vorgestellt, eine eindeutige Aussage zur Entstehung der „Lücke“ im GBT war jedoch nicht möglich. Der Aspekt der Distanzmessungen und der verschiedenen Maßstabgruppen wurde bei Beginn der Hauptvortriebsarbeiten im Jahr 2010 im CBT ebenfalls mit Aufmerksamkeit untersucht. Folgende Kontrollen wurden durchgeführt:

- **Relativer Vergleich der Distanzmesser**  
Die eingesetzten Distanzmesser wurden untereinander laufend verglichen. Als relative Differenz der Maßstabsunbekannten der Distanzmesser resultierte ein Wert von 2.4 ppm. Für den eingesetzten TCA2003 resultierten kürzere Distanzen als für jene der neueren Geräte TM30/TS30 (+1 bis +2.4 ppm).

- **Überprüfung Projektmaßstab bei GNSS-Überprüfung der Portalpunkte im 2014**  
Für die GNSS-Session mit Lagerung auf den bestehenden Portalpunkten aller drei Portale resultierte ein Maßstab von  $-10.8$  ppm.
- **Vergleich der Maßstäbe von GNSS-Sessionen und Distanzgruppen in GA**  
Nach dem ersten Durchschlag (Süd-Vortriebe) wurden alle bisher im Projekt ausgeführten GNSS-, sowie tachymetrischen Messungen in den Portalnetzen und im Tunnel in einer GA ausgewertet und alle Maßstäbe ausgehend von den Punkten des Basisnetzes neu berechnet. Für die tachymetrischen Distanzen resultierte ein durchschnittlich um  $2$  ppm größerer Maßstab als bei den GNSS-Sessionen.

**Tabelle 2:** Aus GA nach Durchschlag errechnete Maßstabskorrektur GBT und CBT

|   | <b>GBT</b>                   | <b>CBT</b>                   |
|---|------------------------------|------------------------------|
| Länge der summierten Längsabweichungen („Gesamt-Lücke“) | 135 mm                       | 52 mm                        |
| Projektmaßstab  | $-1.6$ ppm                   | $-14.0$ ppm                  |
| Masstab aufgrund GA nach Durchschlag                    | $+0.8$ ppm                   | $-10.8$ ppm                  |
| <b>Masstabskorrektur aufgrund der „Lücke“</b>           | <b><math>+2.4</math> ppm</b> | <b><math>+3.2</math> ppm</b> |

Aufgrund der guten Übereinstimmung der Maßstabsdifferenzen von je  $2 - 3$  ppm aus den Kontrollen (siehe Aufzählung) und den Korrekturen aus der GA nach dem Durchschlag (Tabelle 2) stellt sich die Frage, ob die Maßstäbe der beiden unabhängigen Methoden GNSS und Tachymeter genügend genau übereinstimmen oder ob eine Masstabsdifferenz zwischen dem zugrunde liegenden Landesvermessungsnetz LV95 und den „Geräte“-Maßstäben besteht (SALVINI et al. 2014). Eine abschließende Beantwortung der Fragestellung ist auch nach den vorliegenden Resultaten des CBT nicht möglich. Es ist jedoch zu beachten, dass die Maßstabsdifferenzen relativ klein sind und nur bei langen Tunneln zum Tragen kommen.

## 2.5 Erkenntnisse

- Das Vermessungskonzept wurde auch im Falle des CBT bestätigt. Die eingegangenen Kompromisse bezüglich bauseitiger Erschwernisse waren zulässig.
- Die Polygonzug- und Nivellementmessungen wurden mit großer Sorgfalt und Genauigkeit durchgeführt. Durch die mehrfach wiederholte Messung der Polygonseiten in verschiedenen Einsätzen und die gemeinsame Ausgleichung aller Messungen in einer einzigen GA erhöhte sich die Genauigkeit und Zuverlässigkeit in den Vortrieben.
- Kreismessungen aus mehreren unabhängig durchgeführten Einsätzen sind unerlässlich für lange Tunnelvortriebe.
- Der Aspekt der Distanzmessung (Längsabweichung) ist nicht zu vernachlässigen. Der Maßstab des Werkkoordinatensystems ist präzise zu bestimmen und die Übereinstimmung mit den Maßstäben der Distanzmessgeräte zu prüfen (SALVINI et al. 2014).

## **3 Koordinatenänderungen während Vortrieb**

### **3.1 Ausgangslage**

Bei den Machbarkeitsstudien für den GBT stand aus Sicht der Vermessungsfachleute immer im Zentrum, ob die geforderten Durchschlagstoleranzen von 25 cm in der Lage in allen Durchschlagspunkten erreicht werden können. Der Umgang mit Koordinatenänderungen während des Vortriebs wurde zu diesem Zeitpunkt nicht diskutiert.

Für den Vermessungsfachmann ist klar, dass dank der Überbestimmung in den Vortriebsnetzen durch mehrere Polygonzüge und den Einsatz von Vermessungskreiseln eine Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht wird. Koordinatenänderungen im laufenden Vortrieb sind die logische Konsequenz.

Auf Seite der Bauingenieure ist das Verständnis für Koordinatenänderungen nur beschränkt vorhanden. Meist ist deren Bild von Vermessungsfachleuten stark vereinfacht: „Vermesser bestimmen mit ihren exakten Geräten perfekte Koordinaten.“ Änderungen von Koordinaten sind daher aus Sicht der Baustelle nicht zu erwarten. Treten dennoch Koordinatenänderungen auf, werden sie in einer ersten Betrachtung oft als Fehler des Vermessers interpretiert.

### **3.2 Koordinatenänderungen nach erstem Kreiseleinsatz**

#### **3.2.1 Problemstellung**

Beim Ausbruch des GBT wurden Tunnelbohrmaschinen (TBM) erstmals im Teilabschnitt Bodio (ab Südportal) eingesetzt. Nach Abschluss der Vorbereitungsarbeiten im Sprengvortrieb startete die erste TBM am GBT-Projekt am 07.11.2002 und erreichte bis zum Weihnachtsunterbruch 2003/2004 einen Vortriebsstand von 4.3 km ab Portal. Im Rahmen einer großen Vortriebskontrolle wurde zum ersten Mal ein Kreiseleinsatz durchgeführt. Aus vermessungstechnischer Sicht war ein Kreiseleinsatz zu einem früheren Zeitpunkt nicht zwingend, da zu Beginn des Polygonzuges der Einfluss von Kreiselmessungen klein ist und eine Kreiselmessung bei längerem Vortrieb eine größere Genauigkeitssteigerung mit sich bringt.

Aus der GA mit Berücksichtigung der Kreiselazimute ergaben sich beim vordersten VHP hinter der TBM maximale Koordinatenänderungen quer zur Achse von ca. 6 cm. Bis zur Ortsbrust, welche ca. 400 – 500 m weiter vorne lag, stiegen diese Änderungen auf ca. 10 cm an. Die Resultate wurden sehr unterschiedlich beurteilt:

#### **3.2.2 Sicht Bauherrenvermesser**

- Aus der neuen GA resultieren die „besten“ Koordinaten (wahrscheinlichste Koordinaten). Sie bilden die bestmögliche Grundlage zur Erreichung einer minimalen Durchschlagsabweichung.
- Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit wird durch die neuen Messungen gesteigert.



### 3.2.3 Sicht Unternehmervermesser

- Eine plötzliche Änderung der Koordinaten führt zu einem unzulässigen „Versatz“ des bisher ausgebrochenen Tunnels.
- Im Projekt sind (mit Ausnahme der Durchschlagsbereiche) keine Spielräume für die Vermessung vorgesehen.
- Die definitive Sohle wurde wenige Meter hinter der TBM betoniert. Sie bildet konstruktiv die Basis für das Innengewölbe. Sohle und Innengewölbe müssen mit den „gleichen“ Koordinaten abgesteckt werden.
- Die Koordinatenänderung ist deutlich über der Bau-Toleranz von 2 cm des Unternehmers. Änderungen bis 2 cm gehen in der Bau-Toleranz „unter“, größere Änderungen sind nicht zulässig.
- Der Umgang mit unterschiedlichem Koordinaten-Datum ist nicht Sache des Unternehmers. Der Bauherr hat ein verzerrungsfreies Netz zur Verfügung zu stellen.
- Die Einbaugenauigkeit des Unternehmers wird durch den Bauherrenvermesser kontrolliert. Der Bauherrenvermesser darf das mit anderen Grundlagen gebaute Bauwerk nicht mit veränderten Koordinaten kontrollieren.

## 3.3 Umgang mit Koordiantenänderungen

### 3.3.1 Anpassung Achse an „beste“ Koordinaten

Um mit den „besten“ Koordinaten weiterarbeiten zu können, wurde evaluiert, ob eine Anpassung der Achse an die neuen Koordinaten umgesetzt werden könnte. Mit der Anpassung der Tunnelachse um die gleiche Größenordnung wie jene der Koordinatenänderung hätten einige der in Kapitel 3.2.3 erwähnten negativen Effekte eliminiert werden können. Diese Lösung hätte aber auch verschiedene Nachteile mit sich gebracht:

- Achsanpassungen nach Einsätzen mit Kreiseinsätzen (weitere Koordinatenänderungen) praktisch immer notwendig.
- Komplexität bei der Achsberechnung bei Hochgeschwindigkeits-Bahnprojekten unerwünscht (Einschränkungen Fahrdynamik etc.)
- Grosser Anpassungsaufwand auf Seite der Projektierung (Anpassung verschiedener Pläne mit Achsbezug)
- Grosses Verwechslungsrisiko bei allen Projektbeteiligten bezüglich Verwendung der richtigen Achse und Plangrundlagen
- Grosser Informationsbedarf bei vielen Projektbeteiligten im laufenden Projekt

Die Bauherrin AlpTransit Gotthard AG (ATG) schloss wegen dieser verschiedenen Risiken Achsänderungen im laufenden Vortrieb aus.

### 3.3.2 Einführung von zwei Bezugsrahmen

Es war ein Anliegen der Bauleitung, dass das Problem „vermessungsintern“ gelöst werden konnte und dadurch möglichst wenige Projektbeteiligte mit der Problematik tangiert wurden. An Sitzungen wurde formuliert: „Die Baustelle braucht exakte und definitive Koordinaten, also muss sich der Vermesser entsprechend organisieren.“

Die verschiedenen im Projekt involvierten Vermessungsfachleute bei ATG, Bauherrenvermessung und Unternehmervermessung erarbeiteten gemeinsam eine Lösung. Man entschied sich, zwei unterschiedliche Bezugsrahmen für die Bauherren- respektive Unternehmervermessung einzuführen, um so den unterschiedlichen Anforderungen und Bedürfnissen gerecht zu werden.

## 4 NetzVermessung und NetzBau

Die beiden Bezugsrahmen wurden als Folge der großen Koordinatenänderungen beim ersten Kreiseinsatz (siehe Kapitel 3.2.1) in allen Teilabschnitten am GBT und später am CBT geführt, sobald größere Koordinatenänderungen auftraten. Die Eigenschaften der beiden Bezugsrahmen werden in der Folge beschrieben (siehe auch SALVINI et al. 2014).

### 4.1 NetzVermessung

- Es handelt sich um den vermessungstechnisch optimierten Bezugsrahmen mit den „besten“ (wahrscheinlichsten) Koordinaten.
- Der Bezugsrahmen ist dynamisch. Größere Koordinatenänderungen sind nach Vortriebskontrollen mit Kreiseinsatz wahrscheinlich und bei neuen Querschlagsmessungen möglich.
- Die Grundlage bildet die GA aller bisherigen Vortriebskontrollen.
- Der Bezugsrahmen gilt nur intern für den Bauherrenvermesser. Die Koordinaten dieses Rahmens werden nie an die Baustelle abgegeben. Die Dokumentation erfolgt nur in den technischen Berichten gegenüber dem Bauherrn (ATG).
- Es ist maßgebend für die vertraglichen Durchschlagstoleranzen von 25 cm.
- Nach erfolgtem Durchschlag hat das NetzVermessung für das Bauwerk keine Bedeutung mehr (nur theoretischer Natur für Vermessungsfachleute, SALVINI et al. 2014).

### 4.2 NetzBau

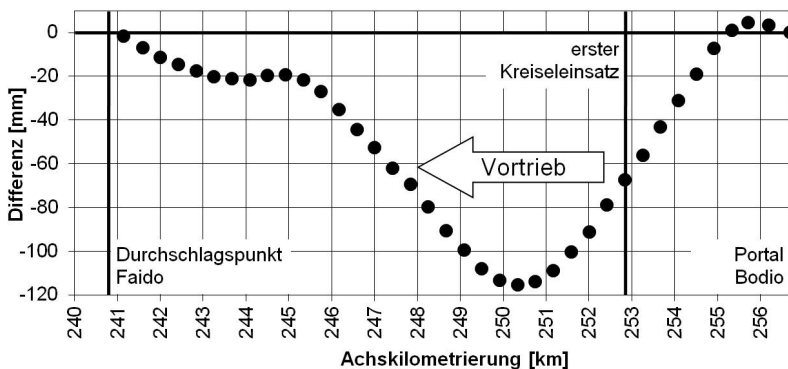
#### 4.2.1 Eigenschaften

- Es handelt sich um ein verzerrtes Bezugssystem mit folgenden Vorgaben:
  - maximal 2 cm Querdifferenz zu den ersten publizierten Koordinaten.
  - Azimutkorrekturen zwischen zwei VHP in der Größenordnung der Richtungs-Genauigkeit (maximal 0.3 mgon; 2 mm bei 420 m Punktabstand). Änderungen der Vortriebsrichtung werden dadurch über große Strecken verteilt kompensiert.
  - Nachbarschaftsgenauigkeit der VHP eingehalten, Netz ohne Koordinatensprünge.
- Der Bezugsrahmen ist in einer ersten Phase (Vortrieb und Sohleneinbau) dynamisch im Rahmen der 2 cm Bau-Toleranz, in einer zweiten Phase (vor Einbau Innengewölbe) wird der Rahmen statisch. Die Koordinaten dürfen anschließend nicht mehr geändert werden. Sie werden „fixiert“. Ausnahmen sind nur unmittelbar vor (letzter Kreiseinsatz) respektive nach erfolgtem Durchschlag und nur in Absprache mit dem Bauherrn möglich.

- Das NetzBau basiert auf einer separaten Ausgleichsrechnung.
  - Lagerung auf fixierten VHP im untertägigen Netz.
  - Aufgrund der GA im NetzVermessung werden die Azimute zwischen den VHP berechnet. In Excel werden Azimutkorrekturen von maximal 0.3 mgon pro Polygonseite eingeführt und kontinuierlich aufsummiert.
  - Die resultierenden fiktiven Azimute aus Excel werden zusätzlich mit sehr hohem Gewicht in die Ausgleichung eingeführt.
- Es liefert die gültigen Koordinaten für die Baustelle.
- Es dient zur Berechnung der definitiven Fixpunkte im Tunnel (Gleisversicherungen) und ist somit Basis für alle weiteren Arbeiten nach dem Durchschlag.

#### 4.2.2 Teilabschnitt Bodio (GBT)

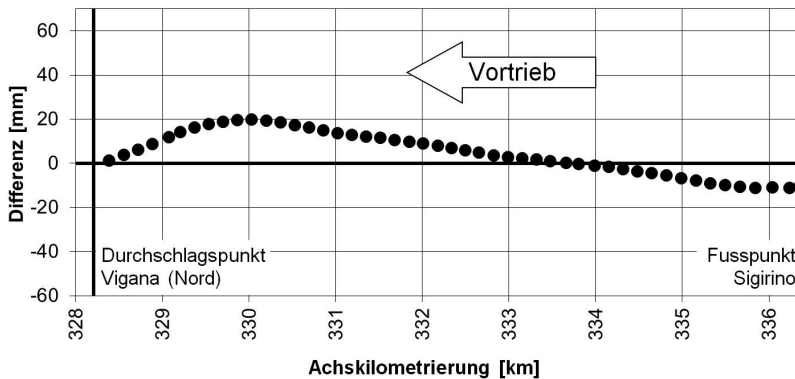
Die Abbildung 5 zeigt die Differenzen zwischen den beiden Bezugsrahmen im Teilabschnitt Bodio. Der Zeitpunkt des ersten Kreiseleinsatzes nach 4.3 km Vortrieb gemäß Schilderung in Kapitel 3.2.1 ist markiert. Die Grafik zeigt die Kontinuität im NetzBau in den Netzen der beiden Einspurröhren, aber gleichzeitig auch die Trägheit des Systems. Die Azimutkorrekturen erfolgen über mehrere Polygonseiten verteilt und entfalten ihre Wirkung erst nach mehreren Kilometern. Die maximale Differenz beträgt beinahe 12 cm bei ca. 6.5 km ab Portal.



**Abb. 5:** Differenz zwischen NetzBau und NetzVermessung im Teilabschnitt Bodio nach dem Durchschlag; Länge 15.4 km zwischen Portal Bodio und Durchschlagspunkt Faido

#### 4.2.3 Nord-Vortriebe CBT

Aufgrund der Erfahrungen im Teilabschnitt Bodio und den weiteren Teilabschnitten am GBT wurden für den CBT Maßnahmen ergriffen, um Änderungen an Koordinaten im laufenden Vortrieb minimal zu halten. Praktisch alle in Kapitel 2.1 aufgelisteten Anpassungen des Vermessungskonzepts sind hauptsächlich dadurch motiviert. Wichtigster Aspekt hierbei ist die laufende Durchführung von Kreiseleinsätzen in den Vortrieben (siehe Kap. 2.3). In Bezug auf die geforderte Durchschlagstoleranz wären weniger Kreiseleinsätze ausreichend gewesen.



**Abb. 6:** Differenz zwischen NetzBau und NetzVermessung in den Nord-Vortrieben (CBT) nach dem Durchschlag, Länge 8.9 km zwischen Portal Nord und Fußpunkt Sigirino

Abbildung 6 zeigt die Differenz zwischen NetzBau und NetzVermessung nach dem Durchschlag in den Nord-Vortrieben des CBT. Zwar ist die Vortriebslänge insgesamt deutlich kürzer als im Vergleichsbeispiel des GBT, dennoch ist ersichtlich, dass die Abweichungen zwischen den beiden Bezugsrahmen deutlich kleiner (maximal 2 cm) sind. Gleiches gilt für die Süd-Vortriebe des CBT.

## 5 Schlussfolgerungen bezüglich Koordinatenänderungen

- Folgt der Innenausbau in nur wenigen hundert Metern Distanz dem Vortrieb, sind beliebige Koordinatenänderungen in den Vortrieben aus bautechnischen Gründen nicht mehr möglich. Wird parallel zum Vortrieb nur eine provisorische Sohle eingebaut, ist die Problematik weniger brisant.
- Die Lösung mit den beiden Bezugsrahmen führt dazu, dass sich hauptsächlich der Bauherrenvermesser mit der Thematik auseinandersetzen muss. Das Risiko von Verwechslungen und Missverständnis ist auf ein Minimum reduziert.
- Eine erhöhte Vortriebsgenauigkeit führt schlussendlich zu einem weniger stark verzerrten NetzBau und somit auch zu einer guten Ausgangslage für die Bestimmung der definitiven Fixpunkte im Tunnel (Gleisversicherungspunkte).
- Wünscht der Bauherr Baugenauigkeitskontrollen des ausgeführten Bauwerks, um die vertragliche Einhaltung der Bautoleranz von 2 cm zu prüfen, ist die Auswertung mit dem NetzBau nicht zulässig. Für eine korrekte Beurteilung der Bautoleranzen müssen von Seite Bauherrvermesser die Koordinaten mit gleichem Datum angewendet werden, wie sie dem Unternehmervermesser zum Einbaupunkt zur Verfügung standen.
- Die Längskomponente hat im laufenden Vortrieb eine untergeordnete Bedeutung gegenüber der Querkomponente. Bei speziellen Tunnelgeometrien wie z. B. beim Zwischenangriff Sigirino (rechtwinklig zu den Einspurröhren) haben jedoch Kreismessungen auch einen Einfluss auf die Längskomponente. Durch leichte lokale Maßstabsanpassungen lassen sich diese aber einfacher verteilen.
- Die Höhen müssen bezüglich Koordinatenänderungen bei regelmäßig durchgeführten Nivellementmessungen nicht speziell betrachtet werden. Die erreichten Genauigkeiten

sind deutlich höher als diejenigen in der Lage und die Änderungen sind im Normalfall innerhalb der Bautoleranz (Deformationen ausgenommen).

- Die weiteren Projektbeteiligten sind dennoch früh im Projekt für die Problematik zu sensibilisieren. Spätestens bei den Durchschlägen resultieren im Normalfall Koordinatenänderungen, die über der Größenordnung der Bautoleranz liegen.
- Bei Durchschlagsdifferenzen von mehreren Zentimetern können diese nicht mehr nur mit dem Netzbau aufgefangen werden. Je nach Einbaustand der Innenschale und der Gleisgeometrie sind lokale Anpassungen der Achse über einige hundert Meter notwendig (z. B. S-Kurve mit großen Radien).
- Dank der sehr guten Durchschlagsergebnisse am CBT war die Verteilung der Durchschlagsabweichung trotz des weitfortgeschrittenen Innenausbaus relativ einfach. Die weiteren Projektbeteiligten mussten sich schlussendlich in der Praxis kaum mit der Thematik der Koordinatenänderung befassen.
- Der aufgebaute Erfahrungsschatz vom GBT und der Know-how-Transfer aller beteiligter Vermessungsfachleute (Bauherr (ATG), Bauherren- und Unternehmervermesser) wirkten sich sehr positiv auf den Umgang mit Koordinatenänderungen am CBT aus.

## Literatur

- KRUMMENACHER, S., SCHÄTTI I. & SALVINI D. (2014): Die Bedeutung von Kreiselmessungen für die Vortriebsvermessung am Gotthard- und Ceneri-Basistunnel. XVII. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Zürich.
- RYF, A., HAAG, R. & SCHÄTTI, I. (2000): AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Aktueller Projektstand, ingenieurgeodätische Aspekte. XIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München.
- SALVINI, D., STENGELE, R. & RYF, A. (2014): Geodätisches Datum untertage: Eine Konstante über Zeit und Raum? XVII. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Zürich.
- SCHÄTTI, I., BREITENMOSER, P. & BERNASCONI, C. (2014): Vermessung Ceneri-Basistunnel. XVII. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Zürich.
- STENGELE, R. (2007): Erster Hauptdurchschlag im Gotthard-Basistunnel: Tunnelvermessung in Theorie und Praxis. XV. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.