

Kinematisches Laserscanning in einem absoluten Koordinatensystem

Im Gotthard-Basistunnel, Los Amsteg, wird durch die Unternehmungsvermessung die Spritzbetonoberfläche der beiden Hauptvortriebe mit kinematischem Laserscanning erfasst. Die Scanausrüstung ist auf einer Stollenlok montiert und erfasst den Tunnel flächenhaft in einem absoluten Koordinatensystem. Beschrieben werden die Problematik der Fixpunkte bei einem Tunnelvortrieb, das kinematische Erfassungssystem sowie die diversen Berechnungen und Resultatdarstellungen.

Dans le lot Amsteg du tunnel de base du St-Gotthard, la surface gunité des deux percements principaux est saisie par un scannage cinématique au laser. Le dispositif de scannage, monté sur une locomotive de minage, saisit la surface du tunnel dans un système de coordonnées absolues. Les auteurs décrivent la problématique des points fixes dans l'avancement du tunnel, le système de saisie cinématique ainsi que les divers calculs et présentations des résultats.

Nella galleria di base del Gottardo, e più precisamente nel lotto di Amsteg, è operativo uno scanner laser cinematico che rileva la superficie di calcestruzzo spruzzata dai due macchinari di avanzamento. Lo strumento è montato su una locomotiva e rileva la superficie del tunnel in un sistema di coordinate assolute. Qui di seguito viene descritta la problematica dei punti fissi nell'avanzamento nella galleria, il sistema di rilevamento cinematico, i vari calcoli e le rappresentazioni dei risultati.

U. Müller, Th. Sochert

Fixpunkte/ Koordinatensystem

Der Vermessungsingenieur des Bauherrn (VI) ist für die termingerechte Erstellung und die Qualität des Hauptfixpunktnetzes verantwortlich. Direkt hinter dem letzten Nachläufer der Tunnelbohrmaschine, das heisst ca. 500 m hinter der Tunnelbrüst, misst der VI jeweils einen neuen Fixpunkt, sobald dies der vordefinierte Regelabstand von 420 m zwischen zwei Hauptpunkten zulässt. Ab diesen Punkten liegt die Verantwortung beim Vermesser der Bauunternehmung. Dieser verdichtet die Fixpunkte bis zu einem Regelabstand von 40 m, um die täglichen Bedürfnisse der Baustelle auch unter Vortriebsbedingungen stets gewährleisten zu können. Die Versicherung dieser Punkte erfolgt im Gleisbereich der Stollenbahn durch Dübel

mit Schutzschrauben. Kurze Prismenadapter erlauben die direkte Montage handelsüblicher Prismen ohne Behinderungen der anderen Tätigkeiten während des Vortriebs. Die signalisierten Punkte sind auch für das Überfahren mit Zügen ausgebildet.

Mit dieser Definition scheint die Aufteilung und damit auch die Verantwortung zwischen den beiden Vermessungsaufgaben klar. Im praktischen Leben ist dies jedoch nicht immer ganz so einfach. Die Hauptaufgabe des VI ist, das Hauptfixpunktnetz vom Portal bis jeweils direkt hinter die Tunnelbohrmaschine (TBM) vorzuziehen und zu unterhalten. Eine absolute Kontrolle dieser Vermessungen und damit eine definitive Festlegung der Koordinaten kann erst nach dem erfolgten Durchschlag ausgeführt werden. Alle diese Messungen unterliegen diversen Fehlereinflüssen und führen nach jeder Neubestimmung zu geänderten Koordinaten. Selbstverständlich sind diese Abweichun-



Abb. 1: Scan-Ausrüstung auf Stollenlok montiert.

gen relativ gering und liegen bei kurzen Vortrieben normalerweise im Bereich von wenigen Millimetern, können aber bei Vortriebslängen von über 10 km und teilweise sehr schwierigen Anschlussvisuren auch wenige Zentimeter betragen.

Die Bauunternehmung hat die Aufgabe, den Vortrieb der TBM mit einer maximalen Abweichung von 10 cm, basierend auf den Fixpunkten des VI, zu garantieren. Der Bauunternehmungsvermessung werden davon aber nur 3 cm zugestanden, die übrigen 7 cm werden für die Fehlererflüsse bei der Steuerung der TBM reserviert. Die Genauigkeit der während des Vortriebs im Bereich der TBM zu erstellenden Betonsohle darf nicht schlechter als 2 cm sein. Gegenüber welchen Koordinaten gelten nun aber diese Abweichungen, wenn die Fixpunktkoordinaten nach jeder Vortriebskontrolle ändern können? Wie vergleicht man eine Profilkontrolle direkt hinter dem TBM-Schild mit einer späteren Kontrolle hinter der TBM? Die Lösung liegt in der klaren Definition, welcher Fixpunkt während welcher Periode welche Koordinaten hat oder einfacher ausgedrückt wie lange eine definierte Koordinate Gültigkeit hat. Damit ist

eine faire Qualitätskontrolle aller Vermessungsarbeiten garantiert.

Flächenhaftes Erfassen der Spritzbetonoberfläche

Eine weitere Aufgabe der Bauunternehmung ist, die Qualität der erstellten Spritzbetonoberfläche über die ganze Tunnellänge nachzuweisen. Eine stichprobenartige Kontrolle genügt hier nicht, denn zwischen Spritzbeton und betoniertem Innengewölbe wird eine Schutzfolie gegen eindringendes Wasser eingezogen, die bei grösseren Unebenheiten reissen könnte.

Zur Erfassung der Querschnitte haben wir konventionelle, statische Laserscanner eingesetzt. Diese erfassen die Oberfläche in einem sehr dichten Messraster von 1 bis 2 cm. Hier zeigten sich die grossen Nachteile der statischen Messung bei dieser Aufgabenstellung. Die Qualität der einzelnen Punkte ist sehr unterschiedlich. Nahe beim Instrument, mit beinahe rechtwinkligem Auftreffen der Laserpunkte auf die Oberfläche, haben wir sehr gute Qualität. Bei Messdistanzen über 20 m sinkt die Qualität massiv ab, da der gemessene Punkt nicht mehr eindeutig identifizierbar ist. Durch die inhomogene Spritzbetonoberfläche treten bei diesen doch relativ kurzen Visurlängen schon erste «Messlöcher» durch Abschattungen auf. Aus diesen Gründen hat sich die terra entschlossen, das für den swiss trolley entwickelte, kinematische Laserscanverfahren auch für diese Aufgabenstellung einzusetzen. Der Aufbau des Systems ist relativ einfach. Auf einer Plattform (Abb. 1) werden zwei Laserscanner etwas nach vorne verschwenkt montiert. Diese messen je ca. 75 Profile pro Sekunde vom Zenit bis zum Nadir. Die obere und untere Überlappungszone der beiden Scanner erlauben zusätzliche Qualitätskontrollen. Die verschwenkte Anordnung der Scanner erlaubt auch die Erfassung von nicht direkt der Tunnelmitte zugewandten Objekten, was die Datenqualität entscheidend verbessert. Durch Beifügen von Neigungssensoren und einer absoluten Posi-

tionsbestimmung, verbunden mit einer entsprechenden Software, erhalten wir ein kinematisch messendes, dreidimensionales System.

Betrachten wir nun die kinematische Positionsbestimmung etwas genauer, denn sie stellt einen sehr wichtigen Teil der Messausrüstung dar. Aus heutiger Sicht erfüllt nur ein entsprechend modifiziertes Tachymeter die gestellten Anforderungen. Was ist denn hier aber so speziell, heute kann doch jeder motorisierte Tachymeter ein Prisma verfolgen? Das Problem liegt in der zeitlichen Korrelation der Messwerte. Ein Tachymeter misst horizontale und vertikale Winkel mit sehr hoher Geschwindigkeit. Bei modernen Geräten sind dies 20 bis zu mehreren Hundert Messungen pro Sekunde. Auch die Anzielung des Prismas erfolgt sehr schnell, wie ein kurzer Blick durch die Optik eines modernen Tachymeters bei der Verfolgung eines sich bewegenden Prismas zeigt. Die elektro-optische Distanzmessung zum Prisma stellt ein viel grösseres Problem dar, denn die Messzeit ist relativ gross und von vielen nicht beeinflussbaren Faktoren abhängig. Je nach Gerät dauert eine Distanzmessung zwischen 0.1 und 0.5 Sekunden. Für statische Messungen ist dies nicht von Belang. Bewegen wir nun aber das Prisma mit

langsamer Schrittgeschwindigkeit, was etwa einem Meter pro Sekunde entspricht, legt das Prisma während der Distanzmessung eine Strecke zwischen 10 und 50 cm zurück. Welchen Punkt haben wir denn jetzt gemessen und welche Winkel gehören zu welchen Distanzen? Auf den Computerdisplays sehen wir schön in Reih und Glied aufgeführte Koordinaten, aber was stellen sie dar und wie genau sind sie?

Ausführliche Tests, teilweise in enger Zusammenarbeit mit der ETH Zürich, zeigten Abweichungen bis zu 30 cm von den Sollwerten. Dies lag weit ab von unseren Spezifikationen von maximal 5 mm Abweichung bei der dreidimensionalen Positionierung. Die Lösung des Problems lag in der Verwendung von speziell für die Baumaschinensteuerung entwickelten Tachymetersystemen. Wir entschlossen uns für den Einsatz des ATS600 Systems von Trimble (Automatic Tracking System). Dieses liefert kinematische Positionsgenauigkeiten von etwa 3 bis 4 mm, sofern die Distanzen unter 150 m liegen.

Ein weiterer Knackpunkt ist die zeitgerechte Verarbeitung der grossen Datenmenge der Laserscanner und die Korrelation mit dem Positionierungssystem und den Neigungssensoren. Dafür kommt die seit über zwei Jahren bei der terra mit grossem Erfolg im Einsatz stehende Erfassungssoftware des swiss trolleys zum Einsatz.

Praktischer Ablauf der Messung im Tunnel

Zur wirtschaftlichen Optimierung der Messungen werden zwei Trimble ATS600 Tachymeter eingesetzt. Das erste Instrument wird nahe an der Tunnelwand aufgebaut und mittels «Freier Stationierung» bezüglich des offiziellen Koordinatensystems eingemessen. Anschliessend wird die aktive Zielerfassung auf das Prisma des Scansystems eingestellt und auf «robotic mode» gewechselt. Alle weiteren Steuerungen erfolgen per Funkmodem vom Scansystem aus.

Der Vermesser hat nun Zeit, die zweite



Abb. 2: 3D-Punktwolke der Spritzbetonoberfläche.

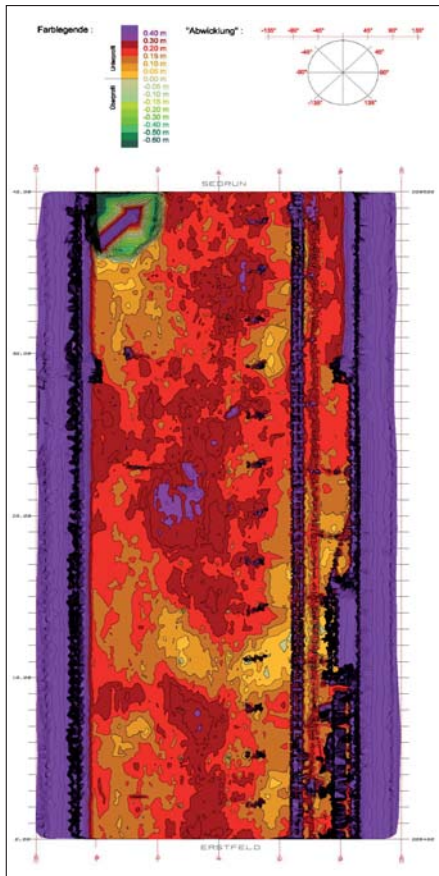


Abb. 3: «Geklappte» Tunneloberfläche mit Linien gleicher Abweichungen.

ATS600 etwa 350 m weiter im Tunnel aufzubauen und einzumessen. Der zweite Vermesser betätigt sich als Lokführer und bedient die Scanausrüstung. Etwa 200 m vor der ATS600 wird das Scansystem initialisiert und einige interne Tests durchgeführt. Sobald sich alle Werte im grünen Bereich befinden, setzt sich die Lok in Bewegung und fährt mit ca. 1 m pro Sekunde eine ca. 400 m lange Strecke, an der ATS vorbei, ab. Nach nur sieben Minuten Messzeit ist dieser Abschnitt mit einem Profilabstand von ca. 13 mm flächenhaft erfasst.

Die Lok wird nun ca. 30 m zurückgesetzt und das Scansystem auf die zweite ATS eingestellt. Nach wenigen Minuten wird die Messfahrt fortgesetzt. Durch das Zurücksetzen der Lok entsteht eine Überlappungszone von 20 bis 30 m. Dies ermöglicht eine gute Kontrolle und Überwachung der einzelnen Arbeitsschritte. Während der Messfahrt wird die hintere

ATS demontiert und weiter vorne wieder aufgebaut. Die Leistung einer Schicht mit zwei Vermessern bei einer produktiven Einsatzzeit von etwa sechs Stunden liegt bei etwa 2500 Tunnelmetern.

Die Daten aller Messwerte liegen auf einem Notebook, für jede Teilstrecke gesondert, vor. Die Protokolle der «Freien Stationierungen» werden jeweils vom Scansystem über Datenfunk abgefragt und ebenfalls mitgespeichert.

Auswertearbeiten

Als Erstes werden die einzelnen Files einer Qualitätskontrolle unterworfen. Anschliessend erfolgt die Korrelation der einzelnen Sensordaten in ein zeitlich und räumlich einheitliches Bezugssystem pro gemessenen Abschnitt. Das Zusammenfügen der einzelnen Abschnitte stellt kein Problem mehr dar, da der Bezug über die «Freien Stationierungen» schon hergestellt ist. Als Ergebnis liegt eine homogene, georeferenzierte Punktwolke mit sehr hoher Punktdichte vor, die mit entsprechender Software betrachtet werden kann (Abb. 2).

Diese Punktwolke ist wohl sehr umfangreich, da sie schnell viele Millionen von Punkten enthält, sie eignet sich jedoch hervorragend zur Weiterverarbeitung mit beliebigen Softwaretools, denn hier handelt es sich um sehr einfache ASCII-Files. Diese enthalten nebst den dreidimensionalen Koordinaten nur einfache Attribute wie Remission oder Farbinformation.

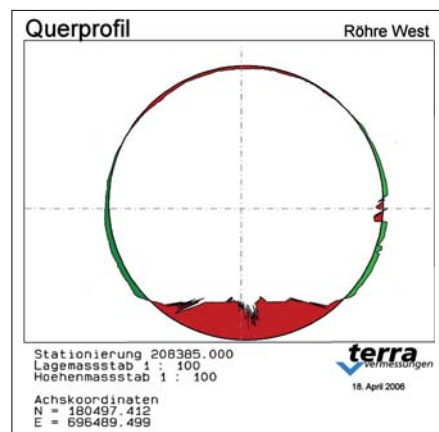


Abb. 4: Aus Punktwolke abgeleitetes Querprofil.

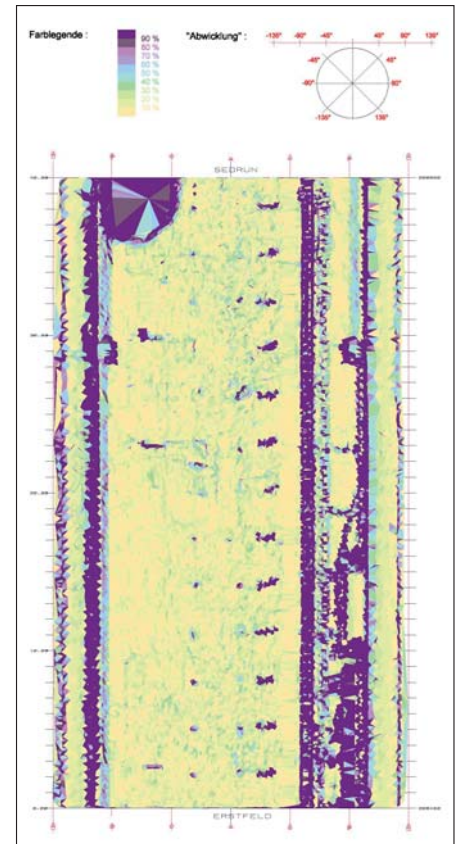


Abb. 5: «Geklappte» Tunneloberfläche mit Neigungen.

Ausser zur Visualisierung der Tunneloberfläche und aller Einbauten, selbstverständlich auch der für unsere Aufgabenstellung störenden Teile, wie Förderanlagen, Beleuchtung etc., bringt die nicht weiter verarbeitete Punktwolke keinen direkten Nutzen.

Bevor die Daten der Punktwolke mit der Sollgeometrie der Oberfläche verglichen werden können, müssen alle Punkte, die nicht zur Definition der Spritzbetonoberfläche verwendet werden können, eliminiert werden. Theoretisch könnten jetzt die Einzelpunkte einer CAD-Software übergeben und weiterverarbeitet werden. Dies ist aber nicht zielführend, denn die weiteren Bearbeitungsschritte bedürfen dreidimensionaler, digitaler Geländemodelle. Diese Berechnung wird keine brauchbaren Resultate liefern, da die Flächendefinition aus den Einzelpunkten in einem zylindrischen Objekt nie eindeutig sein wird und sich die Software mit ewigem Nachdenken weiter beschäftigen wird, sofern sie nicht vorher abstürzt.

AlpTransit Gotthard

Zielführend ist hier die Projektion der echt dreidimensionalen Einzelpunkte in eine «geklappte» Hilfsfläche. Dazu stellen wir uns ein Rohr vor, das wir am untersten Punkt der Länge nach aufschneiden, nach aussen ziehen und plattdrücken. Ähnlich verfahren wir mit der Punktwolke. Wir klappen die Punktwolke sowie die Solldefinition der Oberfläche über den Firstpunkt als Basispunkt in eine horizontale Ebene. Liegt ein Einzelpunkt ausserhalb des Sollprofils, also im Überprofil, liegt der geklappte Punkt über der geklappten Solllinie. Berechnen wir nun die Abstände aller Einzelpunkte gegenüber der Sollfläche und berechnen daraus einen «Höhenkurvenplan» erhalten wir eine flächenhafte Darstellung der Abweichungen. Diese Linien gleicher Abweichungen und die Flächen dazwischen werden in einem weiteren Arbeitsschritt farbcodiert und können so sehr anschaulich Unter- oder Über-

profil darstellen (Abb. 3). Zur besseren Auffindbarkeit dieser Stellen vor Ort im Tunnel werden zusätzlich eine Tunnelkilometrierung und eine Winkeleinteilung, ausgehend vom Firstpunkt, den Darstellungen überlagert.

Querprofile in beliebiger Dichte sowie in beliebigen Richtungen sind aus diesem Datenmaterial ebenfalls mit konventionellen Softwaretools leicht zu erzeugen (Abb. 4). Selbst inhomogene Zonen der Spritzbetonoberfläche (Erhebungen oder Vertiefungen) sind aus diesem «geklappten» Datensatz mit wenig Aufwand zu lokalisieren. Dafür wird die Neigung jedes einzelnen Dreiecks, gebildet aus Nachbarpunkten, berechnet, mit den Nachbardreiecken verglichen und entsprechend farbcodiert, flächenhaft dargestellt (Abb. 5).

Die hier beschriebenen Verfahren haben sich in der Praxis bewährt. Sie garantie-

ren eine sehr kurze Verweilzeit im Tunnel und behindern die täglichen Arbeiten auf der Baustelle wenig. Die erreichte Genauigkeit eines Einzelpunktes beträgt ca. 7 mm und ist über den ganzen Messbereich nahezu homogen. Durch entsprechende Filterung und Glättung der Einzelpunkte ist die hier beschriebene Methode den Genauigkeiten konventioneller Einzelpunktmessungen mit Tachymetern überlegen. Detaillierte Information über kinematisch messende Systeme sind auf der Homepage www.terra.ch ersichtlich.

Urs Müller
Thomas Sochert
IG Stump / terra, Los Amsteg
c/o terra vermessungen ag
Obstgartenstrasse 7
CH-8006 Zürich
terra@terra.ch