

TLS zur Bestimmung von absoluten 3-d Verschiebungen an Spritzbetonoberflächen - Beispiel eines Mess- und Auswertesystems für den Tunnelbau

Klaus Chmelina
Geodata Ziviltechnikergesellschaft mbH
Hütteldorferstr. 85
A-1150 Wien
klaus.chmelina@geodata.at

Josef Jansa
Department für Geodäsie und Geoinformation
TU Wien
Gusshausstr. 25-29
A-1040 Wien
jj@ipf.tuwien.ac.at

Gerd Hesina und Christoph Traxler
VRVis – Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung
Forschungs-GmbH
Donau-City-Strasse 1
A-1220 Wien
hesina@vrvis.at; traxler@vrvis.at

1 Einleitung

Die tägliche Erfassung der Tunnelschalengeometrie während des Tunnelvortriebs bildet heute eine Routineaufgabe der Bauvermessung. Die erfassten Daten dienen dabei mehreren Zielen. Die Wichtigsten sind

- die laufende Profilkontrolle, worunter der Vergleich der hergestellten Tunnelschalen (Ausbruch, Spritzbetonlagen, Innenschale) mit ihren jeweiligen Sollgeometrien verstanden wird;
- die Ebenflächigkeitskontrolle, womit insbesondere für Spritzbetonoberflächen der Nachweis ausreichender Ebenflächigkeit als Vorbedingung für den nachfolgenden Einbau der Innenschale erbracht wird;
- die Massenermittlung, worunter die Berechnungen von Ausbruchs- und Betonkubaturen für die Abrechnung verstanden wird und
- die Tunnel(schalen)dokumentation, welche allgemein der möglichst vollständigen (Bild)dokumentation aller temporären und endgültigen Tunneloberflächen dient.

Für die Datenerfassung werden seit mittlerweile zehn Jahren terrestrische 3-d Laserscanner (für die Tunneldokumentation auch Digitalkameras) erfolgreich eingesetzt. Sie haben mehrheitlich die Verwendung der früher für die genannten Ziele genutzten Totalstationen abgelöst, sodass auf modernen Tunnelbaustellen 3-d Laserscanner(systeme) Teil der Standardmessausrüstung geworden sind. Totalstationen werden weiterhin für Zwecke der Netzmessung, Vortriebssteuerung, Absteckung und, ganz wesentlich, für die Optische 3-d Verschiebungsmessung täglich benötigt. Dies hat für die Bauvermessung insofern logistische und organisatorische Konsequenzen, als mehrmals täglich zwischen beiden Instrumententypen gewechselt werden muss. Oftmals muss mit ihnen auch von verschiedenen Messoperateuren gleichzeitig an verschiedenen Stellen im Tunnel gemessen werden, um die nötigen Arbeiten innerhalb vertraglich festgelegter Messzeiten bewältigen zu können. Darüber hinaus müssen nun beide Instrumente gelagert, gewartet, an- und abtransportiert, etc. werden. Ein Universalinstrument, welches für alle untertägigen Vermessungsaufgaben genutzt werden kann, ist heute leider nicht mehr (oder noch nicht wieder) vorhanden.

Aufgrund der bereits seit Jahren bewiesenen Praxiseignung von 3-d Laserscannern für untertägige Anwendungen, der mittlerweile erzielbaren hohen Genauigkeiten, Messgeschwindigkeiten und Auflösungen sowie „zurückgekehrter“ Theodolitfunktionen stellt sich die Frage, ob nicht bald wieder ein solches Universalinstrument verfügbar sein könnte.

In einem österr. FFG-Forschungsprojekt (Orthos plus, 2010-2012) sowie im Rahmen eines Projekts im österr. Christian Doppler Labor „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ (2010) wurde untersucht, ob das 3-d

Laserscanning auch für die Aufgabe der Optischen 3-d Verschiebungsmessung eingesetzt werden kann. Für das Anwendungsgebiet Tunnelbau würden folgende Vorteile gesehen:

- Die bisher nötige Anzahl im Spritzbeton zu vermarkender Messprismen (fünf bis sieben Folientargets pro zehn Tunnelmeter sind typisch) könnte erheblich reduziert oder, je nach Methode der Georeferenzierung, auch ganz eingespart werden. Dies würde Kosten und Aufwand für Material, Montage und Wartung der Targets erheblich einsparen.
- Erstmals könnten die für die geotechnische Interpretation gewünschten tatsächlichen 3-d Verformungen der Tunneloberfläche direkt anstatt über den Umweg räumlicher Verschiebungen künstlicher Targets gemessen werden. Dies würde die häufig vorkommenden Probleme zufolge baubedingt verschobener, beschädigter, verschmutzter oder zerstörter Targets vermeiden und darauf basierende Fehlinterpretationen verhindern. Erfahrungsgemäß spiegeln Bewegungen von auf Konvergenzmessbolzen angebrachten Messprismen nicht immer zuverlässig die tatsächlichen Verschiebungen der Tunnelschale wider.
- Erstmals könnten die Verschiebungen der gesamten Schale vollflächig erfasst werden anstatt nur an einzelnen wenigen Messpunkten. Dies würde einen enormen Informationsgewinn für die geotechnische Interpretation bedeuten und die auftretenden Verschiebungen zwischen den Targets müssten nicht mehr wie bisher aufwendig und spekulativ interpoliert werden.

In den folgenden Kapiteln wird über die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse in den Forschungsprojekten berichtet. Näher beschrieben werden darin das entwickelte mobile Multisensorsystem Orthos Plus, die entwickelte Methode zur Berechnung absoluter 3-d Verschiebungen aus Laserscandaten und die Ergebnisse von Testmessungen in einem Tunnelvortrieb. Den Abschluss bildet ein kurzer Blick auf neue Möglichkeiten der integrativen Visualisierung geotechnischer Messdaten im Tunnelbau.

2 Mobiles Multisensorsystem Orthos Plus

2.1 Anforderungen an das Messsystem

Hauptziel des Projekts Orthos Plus war die Entwicklung eines möglichst effizienten, vor allem schnellen und tunneltauglichen, automatisierten Messsystems zur Ausführung und unmittelbaren Vorort-Auswertung von Tunnelschalenscans samt Bildaufnahmen. Ein Operateur sollte in der Lage sein, mehrere Aufnahmefolgen im Stop-and-Go Modus mit möglichst geringem Bedienaufwand und innerhalb weniger Minuten auszuführen. Das System sollte sowohl vortriebsbegleitend in konventionellen Vortrieben aber vor allem auch für Messungen in bereits fertiggestellten Tunnelbauwerken flexibel einsetzbar sein. Die erfassten Scandaten sollten ausreichende Qualität aufweisen, um aus ihnen mit einem geeigneten Berechnungsverfahren absolute 3-d Verschiebungen der Schale ableiten zu können. Diese sollten mit einer Genauigkeit bestimmt werden, welche möglichst an die im Tunnelbau geforderte Genauigkeit von ± 1 mm (1σ) heranreicht. Hierfür wurde vorweg eine Genauigkeit von $\pm 2-3$ mm als derzeit machbar und auch für die geotechnische Interpretation als gerade noch akzeptabel eingeschätzt. Das Mehr an Informationsdichte würde ein Weniger an Genauigkeit - so die Überlegung - rechtfertigen. Die für das System angepeilten groben Leistungsdaten waren:

- Messzeit pro Aufstellung: < 5 min (inkl. Aufbau)
- Reichweitenbereich für das Scannen der Tunnelwand: 1 – 10 m
- Reichweitenbereich für die Messungen zur Georeferenzierung: 1–200 m
- Reichweitenbereich für die Bilderfassung mit Blitzgerät: 1 – 10 m

2.2 Aufbau des Messsystems

Der im Projekt entwickelte Prototyp (Abb. 1) besteht aus folgenden Sensoren:

- ein 3-d Laserscanner für das Scannen der Tunnelschale (Instrumente der Hersteller Riegl und Faro werden unterstützt),
- eine Digitalkamera zur Bilddokumentation der Tunnelschale (Typ Nikon D90 mit externem Blitzgerät) und
- eine Totalstation für die Anschlussmessungen (Leica TPS1201).

Laserscanner und Totalstation sind über einen Leichtmetallrahmen (Abb. 1 links) konstruktiv starr miteinander verbunden, welcher wiederum auf einer

mobilen Messplattform (Abb. 1 rechts) montiert werden kann. Die Plattform trägt die weiteren Teile, im Wesentlichen sind dies Akku und Steuerrechner. Die Onboard-Software steuert den Messprozess, welcher die Anschlussmessungen der Totalstation und die Tunnelwandmessungen des Laserscanners umfasst. Um Zeit zu sparen, wird das System vor der Messung nicht horizontalisiert und es werden die automatischen Zielsuch- und -erkennungsfunktionen der Totalstation (Power Search, ATR) sowie die Kenntnis der Koordinaten der im Tunnel vorhandenen Anschlusspunkte genutzt. Die Anschluss- und Scannermessungen werden vom System vollautomatisch ausgeführt.

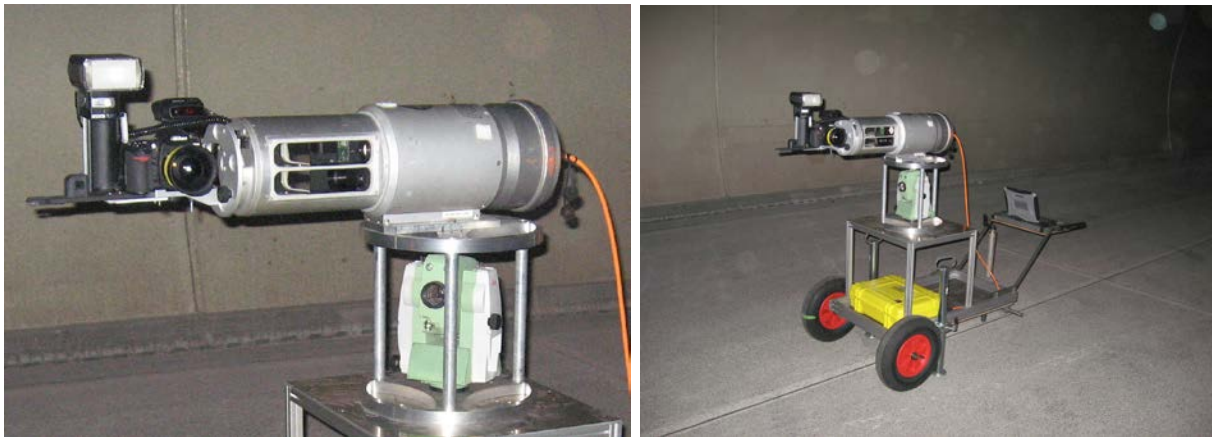


Abb. 1: Messsystem Orthos Plus

Um die Qualität der Messergebnisse sofort beurteilen zu können, werden Qualitätsparameter der automatisch berechneten Anschlussmessergebnisse und ein 2-d Tunnelband im Steuerrechner angezeigt (Abb. 2).

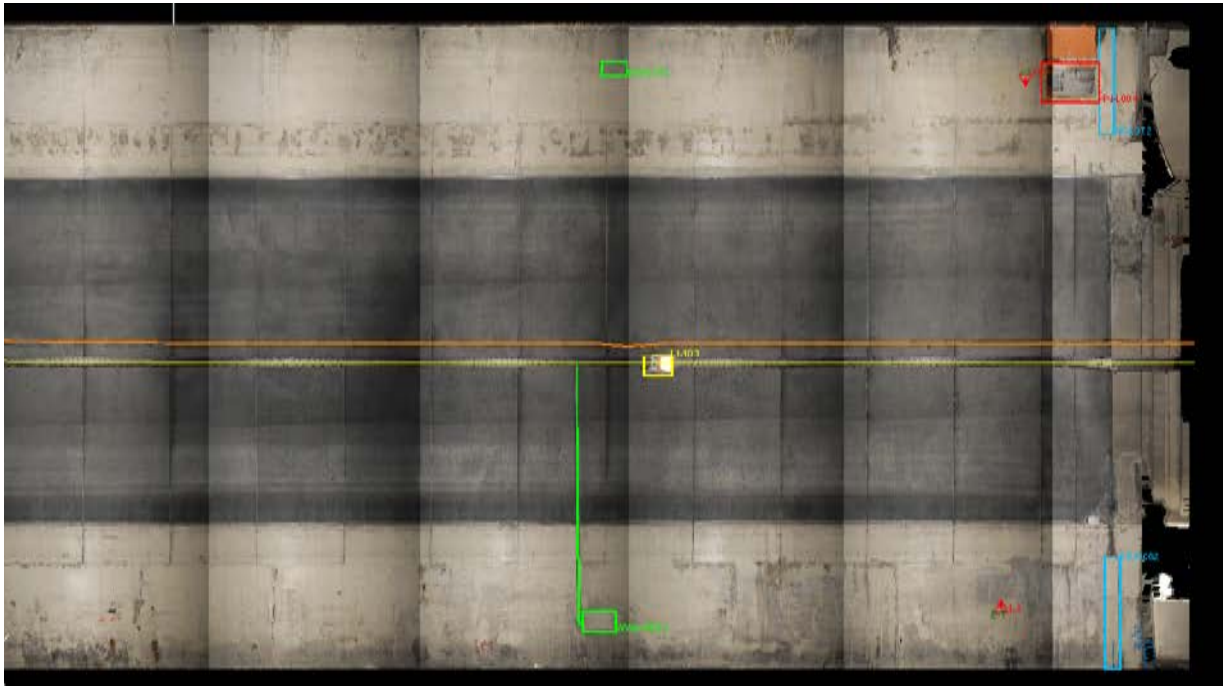


Abb. 2: Darstellung eines 35m Tunnelbands in der Onboard-Software, zusammengefügt aus 6 aufeinanderfolgenden Scanneraufstellungen.

2.3 Test des Messsystems

Um die Tauglichkeit des entwickelten Messsystems für die Tunnelwanddokumentation beurteilen zu können, wurde zunächst ein Einsatztest in einem fertigen Tunnelbauwerk ausgeführt. Dabei wurden die Einzelteile des Systems auf der Testbaustelle zusammgebaut, das System durch gleichzeitiges Messen spezieller Kalibriertargets mittels Scanner und Totalstation vor Ort kalibriert, in den Tunnel transportiert, zur Messung eines 700m langen Tunnelabschnitts eingesetzt, anschließend wieder aus dem Tunnel transportiert, erneut die Vorort-Kalibrierung wiederholt und abschließend wieder in seine Einzelteile zerlegt. Der Test lieferte zufriedenstellende Resultate hinsichtlich der benötigten Mess- und Aufbauzeiten, der Stabilität der Kalibrierung sowie der erreichten Genauigkeiten der Anschlussmessungen. Der Anschluss erfolgte durch eine 7-Parameter-Helmert-Transformation der Totalstationmessungen zu umliegenden Referenzpunkte des untertägigen Tunnelnetzes.

In einem weiteren Praxistest wurde nun die Eignung des Messsystems zur Erfassung absoluter 3-d Verschiebungen untersucht. Hierfür wurden in

mehreren Messepochen zu verschiedenen Zeitpunkten Tunnelwandscans an identen Bereichen in einem Tunnelvortrieb durchgeführt. Die 3-d Tunnelwandverschiebungen wurden aus den georeferenzierten Scandaten nach einer neuen Methode (siehe Kapitel 3) prozessiert und die Ergebnisse mit Resultaten der traditionellen Optischen 3-d Verschiebungsmessung verglichen. Bei diesem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass die traditionelle Methode nicht als fehlerfrei betrachtet werden kann und die gemessenen Bewegungen der Messprismen nicht mit aller Sicherheit auch die Verschiebungen der Tunnelwand im Umgebungsbereich der Messprismen repräsentieren. Aus den durchgeführten Vergleichsmessungen können daher noch keine allgemein gültigen Aussagen über die Genauigkeit des neuen Verfahrens getroffen werden. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse beider Verfahren in Form von Verschiebungsvektoren in einem ausgewählten Messquerschnitt.

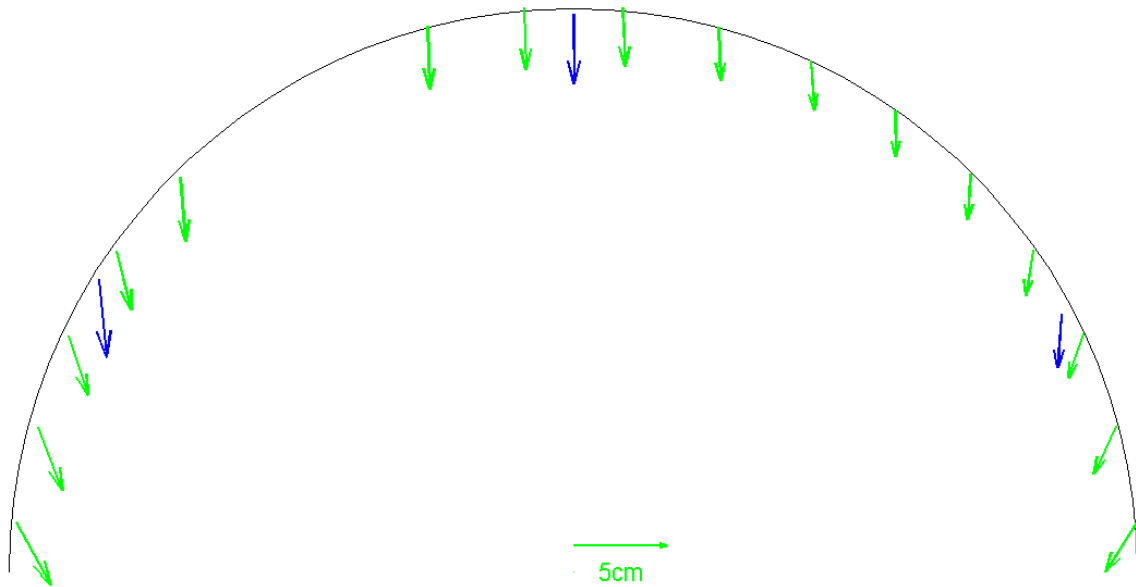


Abb. 3: Messquerschnitt mit Darstellung der mit Totalstation gemessenen Prismenverschiebungen (blau) und mittels Messsystem Orthos Plus gemessenen Tunnelwandverschiebungen (grün).

3 Ein Verfahren zur Bestimmung der 3-d Verschiebungen an Tunnelwänden

Um eine gute räumliche Verteilung der Verschiebungsvektoren zu erhalten, wurde ein Konzept entwickelt, welches auf einem regelmäßigen Gitter aufbaut. Man stelle sich eine abwickelbare Fläche vor, wie z.B. einen perfekten Zylinder. Durch die Definition eines regelmäßigen Gitters auf der abgewickelten Oberfläche erhält man eine optimale 3-d Verteilung von Oberflächen-Elementen auf dem räumlichen Gebilde. Durch Änderung der Gittermaschenweite kann die Dichte der Verteilung an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden. Diese Idee kann auf Tunnelwände übertragen werden, da zumindest in kleinen Abschnitten eine Tunneloberfläche einer abwickelbaren Fläche nahe kommt, was wiederum ausreichend ist für das Auffinden einander entsprechender Oberflächenausschnitte aus aufeinanderfolgenden Epochen. Diese Ausschnitte (in der Folge *Patches* genannt) werden dann im Sinne einer Deformationsanalyse verglichen.

3.1 Oberflächenmatching mittels ICP

Wenn man zylinderförmige Flächen in einer Zeitreihe vergleicht, kann die zeitabhängige Oberflächendeformation über die Deformationen an diskreten Punkten angenähert werden, indem man also die dreidimensionalen Abweichungen an im Raum verteilten, auf der Oberfläche liegenden Gitterpunkten beobachtet. In der Praxis geschieht die Abweichungsanalyse durch Vergleich von differenziell kleinen Flächenausschnitten, den *Patches*, die um die Gitterpunkte herum ausgeschnitten werden. Die sinnvolle kleinste Ausdehnung dieser *Patches* hängt im Wesentlichen von der Oberflächentopographie ab, welche wiederum abhängig ist von der räumlichen Auflösung der Datenerfassung, z.B. von der Erfassungsdichte eines Laser Scans. Um *Patches* vergleichen zu können, sollte deren topographische Form eine eindeutige Zuordnung erlauben und zwar in allen Richtungen und es sollte eine hohe Genauigkeit erreichbar sein. Sich wiederholende topographische Formen oder auch sehr glatte Formen führen zu mehrdeutigen und falschen oder sehr ungenauen Ergebnissen oder die Zuordnungsprozedur kann vielleicht sogar gänzlich versagen.

Nachdem das regelmäßige Gitter auf der Oberfläche eines Referenzzyllinders ausgebreitet wurde, wird in einem weiteren Schritt die Größe und Lage der *Patches* definiert. Die tatsächliche Oberfläche wird durch die mittels Laser

Scanning erhaltene Punktwolke definiert. Abbildung 4 zeigt solche Patches, welche in der Folge für die Deformationsbestimmung mit Hilfe eines Zuordnungsverfahrens, einem Matching, verwendet werden. In diesem Fall formen die Patches ein lückenloses Kachelmuster, aber sie könnten auch kleiner gewählt werden, sodass Lücken zwischen den Ausschnitten bleiben, oder aber sie könnten sogar größer definiert werden, wodurch sich die Patches dann überlappen würden. Was immer man wählt, die weitere Vorgehensweise bleibt die gleiche.

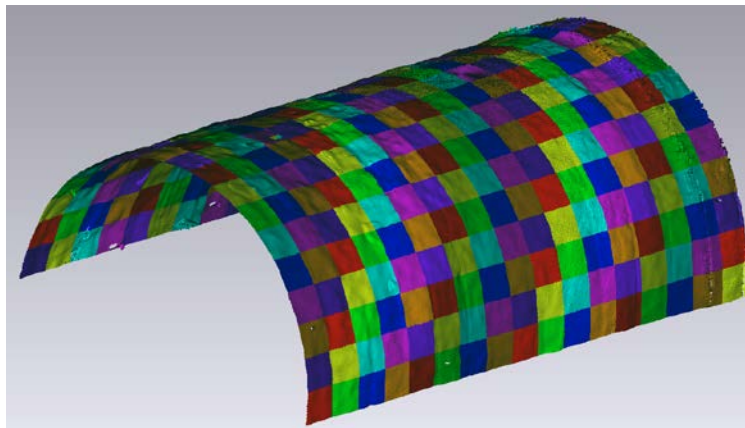


Abb. 4: Ausschneiden der Oberflächen-Patches aus der Punktwolke.

Für das Matching der 3-d Oberflächen-Patches kommt der Iterative Closest Point-Algorithmus (ICP) zur Anwendung (Besl and McKay, 1992; Chen and Medioni, 1992). Er wurde leicht adaptiert, um die Forderungen nach Genauigkeit und Geschwindigkeit erfüllen zu können. Zu Beginn der Iteration benötigt man eine erste ungefähre Startposition, vom welcher weg man sich der endgültigen, optimal passenden Position Schritt für Schritt durch Anwendung einer räumlichen orthogonalen Transformation nähert. Da die Deformationen von einer Epoche zur nächsten als klein angesehen werden können, stellt das Auffinden geeigneter Näherungspositionen kein Problem dar. ICP liefert als Ergebnis Werte für die Parameter der räumlichen Transformation. Für jeden Patch werden sieben Unbekannte bestimmt, das sind ein Maßstabsfaktor, eine orthogonale Drehmatrix, welche die drei Komponenten einer räumlichen Drehung repräsentiert, und schließlich die drei Komponenten einer räumlichen Verschiebung. Im gegenwärtigen Fall, wo angenommen wird, dass die Deformationen zwischen zwei Epochen sehr klein sind, kann eine Maßstabsänderung und eine Drehung vernachlässigt werden, womit der Maßstabsfaktor mit "1" festgesetzt wird und als Drehmatrix die Einheitsmatrix verwendet wird. Es werden dann in der Folge nur mehr die drei

Verschiebungskomponenten berücksichtigt, was zu einer deutlichen Beschleunigung des Verfahrens führt. Weiters wird angenommen, dass sich die Transformationsparameter auf den Schwerpunkt der jeweiligen Patches beziehen. Um eine bessere Interpretation zu ermöglichen, werden schließlich noch die räumlichen, auf ein Tunnelkoordinatensystem bezogenen Verschiebungen umgerechnet in zwei tangentielle Verschiebungen (in die Richtungen parallel und orthogonal zur Tunnelachsrichtung) und eine radiale Verschiebung (orthogonal zur Tunneloberfläche).

3.2 Qualitätskontrolle

Wenn auch der ICP-Algorithmus auf einem Kleinste-Quadrate-Ausgleich aufbaut, so sind die erhaltenen Genauigkeitswerte doch nicht unmittelbar auf die endgültigen Deformationsvektoren anwendbar. Auch das Konvergenzverhalten des Verfahrens zeigt nicht notwendigerweise an, wie gut und wie zuverlässig die Deformationsvektoren erhalten werden konnten. Außer für den Fall, wo die Konvergenz gänzlich versagt (z.B. weil zu wenig Oberflächentextur in einem Patch vorhanden ist), können mehrere Gründe angeführt werden, warum zusätzliche Qualitätstests durchzuführen sind:

- In Ausnahmefällen kann es vorkommen, dass von einer zur anderen Epoche eine merkliche Rotation stattgefunden hat, sodass die zuvor erwähnte Annahme nicht mehr gegeben ist.
- Es kann zu bedeutenden Deformationen innerhalb eines Patches gekommen sein, sodass ein verdächtig großes σ_0 nach dem Ausgleich, also dem Matching erhalten wird.
- Das ICP-Ergebnis kann eventuell sehr stark von der genäherten Startposition abhängen, was besonders dann der Fall sein kann, wenn sich wiederholende Mikrostrukturen im Oberflächenausschnitt vorhanden sind. Dann kann der Iterationsvorgang zu einer falschen "optimalen" Position konvergieren.

Eine Abfolge von drei empirischen Tests wird ausgeführt, um eine Aussage über die erreichte Qualität zu erhalten:

- Nachdem das Matching anscheinend erfolgreich beendet werden konnte, wird noch eine 6-Parameter-Transformation angehängt. Die Translationen wurden ja schon gefunden und die Patches befinden sich an der richtigen Position. Daher werden jetzt alle Werte für die Translations- und auch Rotationskomponenten auf 0 gesetzt. Wenn also bei diesem Folge-Matching-Prozess die Werte der Transformationsparameter innerhalb eines sehr kleinen

Schwellwertes bleiben, wird der Patch als richtig zugeordnet betrachtet, und die erhaltenen Deformationsvektoren werden als korrekt akzeptiert.

- σ_0 nach dem ICP wird mit einem Schwellwert σ_{0max} verglichen. Die Wahl dieses Schwellwertes hängt von der Datenqualität ab und kann im Allgemeinen mit der Messgenauigkeit des Laser Scannings, also mit dem Messrauschen, gleichgesetzt werden. Man kann einen brauchbaren Wert auch finden, wenn man alle σ_0 -Werte des Projektes vergleicht.
- Durch Ändern der genäherten Position vor dem Iterationsstart des ICP-Prozesses (z.B. Wahl von vier unterschiedlichen Positionen) kann das Konvergenzverhalten studiert werden. Im idealen Fall liefern alle vier Startpositionen schließlich denselben Verschiebungsvektor, was beweisen soll, dass die Startposition keine Rolle gespielt hatte und offensichtlich die richtige Position gefunden werden konnte. Unterschiedliche Verschiebungsvektoren würden zeigen, dass es eine Startpositionsabhängigkeit gibt und somit das Ergebnis nicht zuverlässig bestimmt werden konnte.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse des Verschiebungstests. Für jeden Ausschnitt wurde der Verschiebungsvektor im Zentrum eingezeichnet (in grüner Farbe), während die Ergebnisse, die durch die vier anderen Startpositionen erhalten wurden, in anderen Farben (aus Visualisierungsgründen leicht versetzt) gezeichnet wurden. In den meisten Fällen waren die Matches erfolgreich, ein Ausschnitt in der Mitte der zweiten Reihe von oben zeigt deutlich unterschiedliche Verschiebungen, und somit muss dieses Ergebnis verworfen werden.

Um einen ersten Qualitätscheck zu erleichtern, wird jedem Patch eine farbige Markierung zugewiesen. Ein rotes Kreuz deutet auf einen erfolglosen Match hin, entweder, weil nicht ausreichend Daten vorhanden waren (wie in Abbildung 5) oder weil der Matching-Prozess divergierte. Ein orangefarbiges Kreuz zeigt an, dass unerwartet hohe Rotationen zwischen zwei Epochen festgestellt wurden, oder, weil ein zu großes σ_0 aufgetreten war. Ein gelber Marker deutet auf nicht eindeutiges Konvergenzverhalten hin, somit auf eine hohe Abhängigkeit des Ergebnisses von der Startposition. Nur wenn ein grüner Verschiebungsvektor eingezeichnet wurde, ist das ein Zeichen, dass alle Qualitätstests erfolgreich bestanden werden konnten.

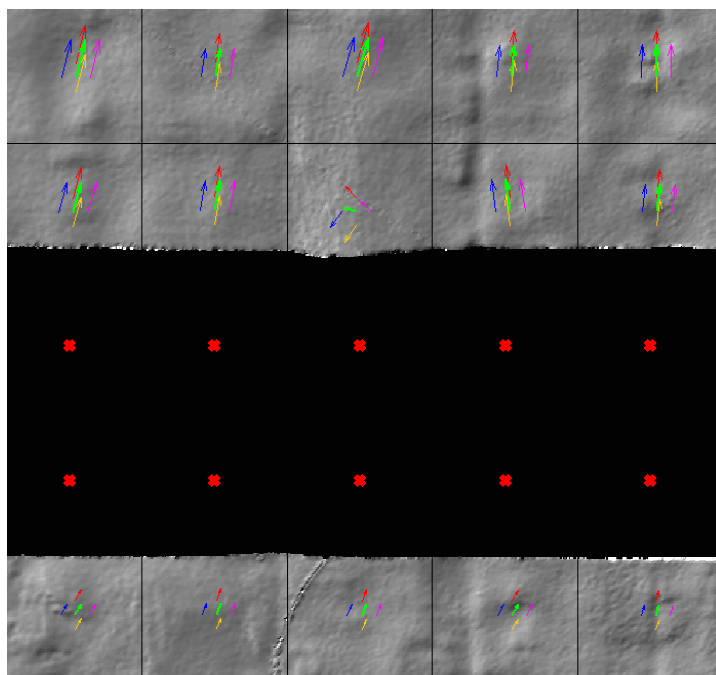


Abb. 5: Unterschiedliche Verschiebungsvektoren aufgrund unterschiedlicher Startwerte für den ICP-Prozess.

Es muss hier erwähnt werden, dass jeder Patch separat und unabhängig von benachbarten Patches berechnet wird. Die Vektoren werden also nicht überprüft, ob sie konsistent sind mit einem zu erwartenden Gesamtdeformationsverhalten oder ob zumindest die Vektoren der unmittelbaren Nachbarn zu einem Trend passen und ob das gesamte Vektorfeld einer physikalischen Erklärung standhalten kann. Trotzdem ermöglicht das Ergebnis mit den farbkodierten Qualitätsindikatoren eine ausgezeichnete Grundlage für eine erste visuelle Kontrolle und für ein rasches Erkennen von Anomalien. Abbildung 6 zeigt einen Teil einer solchen Prüfdarstellung. Die grünen Vektoren zeigen, dass die meisten Patches im Zentrum des untersuchten Gebietes verlässlich bestimmt werden konnten. Außerdem wirkt das Vektorfeld konsistent und entspricht den Erwartungen und nur entlang des Randes haben die Patches unterschiedliche Fehlermarken zugewiesen bekommen.

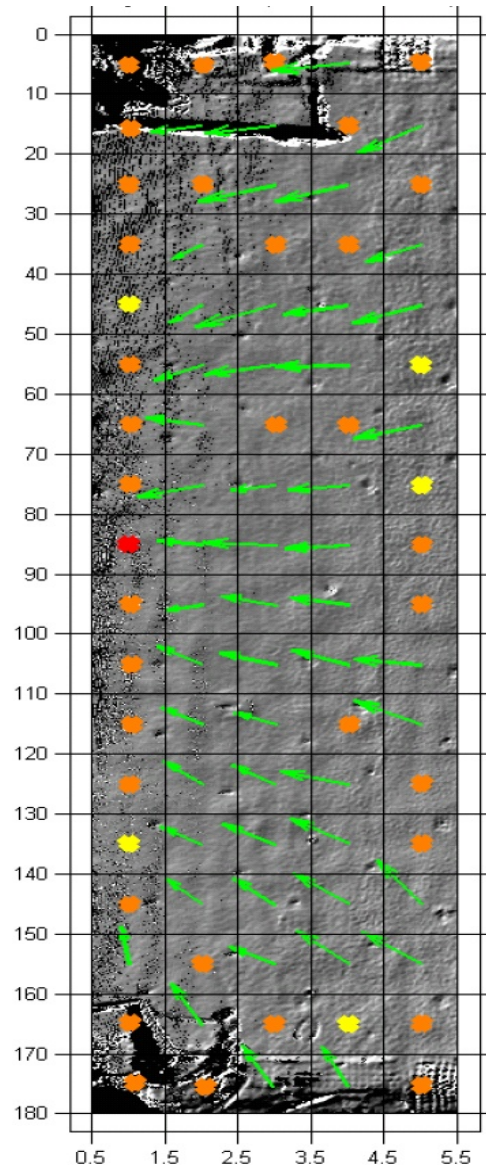


Abb. 6: Die Verschiebungsvektoren (tangentielle Komponenten) aller 1m x 1m Patches in einem 5m-Abschnitt des Tunnels. Die farbigen Kreuze deuten auf Matching-Probleme hin.

4 Virtual Reality zur Unterstützung der Dateninterpretation

Um die gemessenen 3-d Verschiebungen natürlich und interaktiv betrachten zu können, wurde eine eigene Virtual Reality Anwendung (VR-Viewer) in

Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung VRVis entwickelt. Die Anwendung erlaubt auch die gleichzeitige Darstellung weiterer geotechnischer Daten. Durch sie kann der Fortschritt der Tunnelkonstruktion und eine Vielzahl an Messungen in Form einer 3-d Echtzeitvisualisierung nachvollzogen werden, wobei die Rekonstruktion des Tunnels den zentralen Teil bildet. Ingenieure können auf intuitive Art und Weise durch Raum und Zeit navigieren und beobachten, wie sich kritische Messwerte entwickeln. Der geographische Bezug ist dabei immer klar, weil die Visualisierungen an der Stelle erscheinen, wo die entsprechenden Daten auch gemessen wurden.

Der VR-Viewer ist eine wesentliche Unterstützung bei der Analyse und Interpretation der Daten. Die Benutzerschnittstelle erlaubt es, unterschiedliche Kategorien von Visualisierungen ein- und auszuschalten, sodass sich Ingenieure auf die für ihre Analyse gerade relevanten Messungen konzentrieren können.

Ein Beispiel sind Stangen-Extensometer (Abb. 7), die in Bohrungen installiert werden, um die Deformation in den geologischen Schichten rund um den Tunnel zu erfassen. Typischerweise werden mehrere Bohrungen rund um einen Tunnelquerschnitt durchgeführt, wobei in jedem Bohrloch ein oder mehrere Extensometer unterschiedlicher Länge installiert werden. Diese verlaufen von einer bestimmten Position auf der Tunnelhülle in eine bestimmte Richtung nach außen und durchdringen so den umgebenden Baugrund. Im VR-Viewer sind sie an ihrer korrekten räumlichen Position zu sehen und alle Extensometer für einen Tunnelquerschnitt können ein- oder weggeblendet werden.

Wir haben mit einigen visuellen Metaphern experimentiert, um Extensometer-Werte einfach verständlich darzustellen. Dies führte zur Verwendung von Fahnen, deren Längen sich entsprechend der zeitlichen Abfolge der Messungen ändern. Sie erscheinen am Ende jeder Extensometer-Stange und zwei weitere darunter zeigen die vorherigen Messungen an, womit eine kurze Historie der Werte wiedergegeben wird. Um mit einem Blick zwischen Kontraktion und Expansion der geologischen Schichten unterscheiden zu können, werden blaue bzw. rote Fahnen verwendet und jeweils links oder rechts von der Extensometer-Stange positioniert. Wenn der Blickwinkel sich ändert, drehen sich die Fahnen um die Stange, sodass sie immer von vorne zu sehen sind und die Bedeutung ihrer Anordnung (links Kontraktion, rechts Expansion) erhalten bleibt.

Wenn auf ein 3-d Modell eines Extensometers geklickt wird, werden numerische Werte neben den Fahnen eingeblendet, um die aktuellen Messwerte ablesen zu können. Mit einem weiteren Klick verschwinden die numerischen Angaben wieder. Wenn mit voranschreitender Zeit die Messwerte veralten und irrelevant werden, erscheinen die entsprechenden Fahnen transparent.

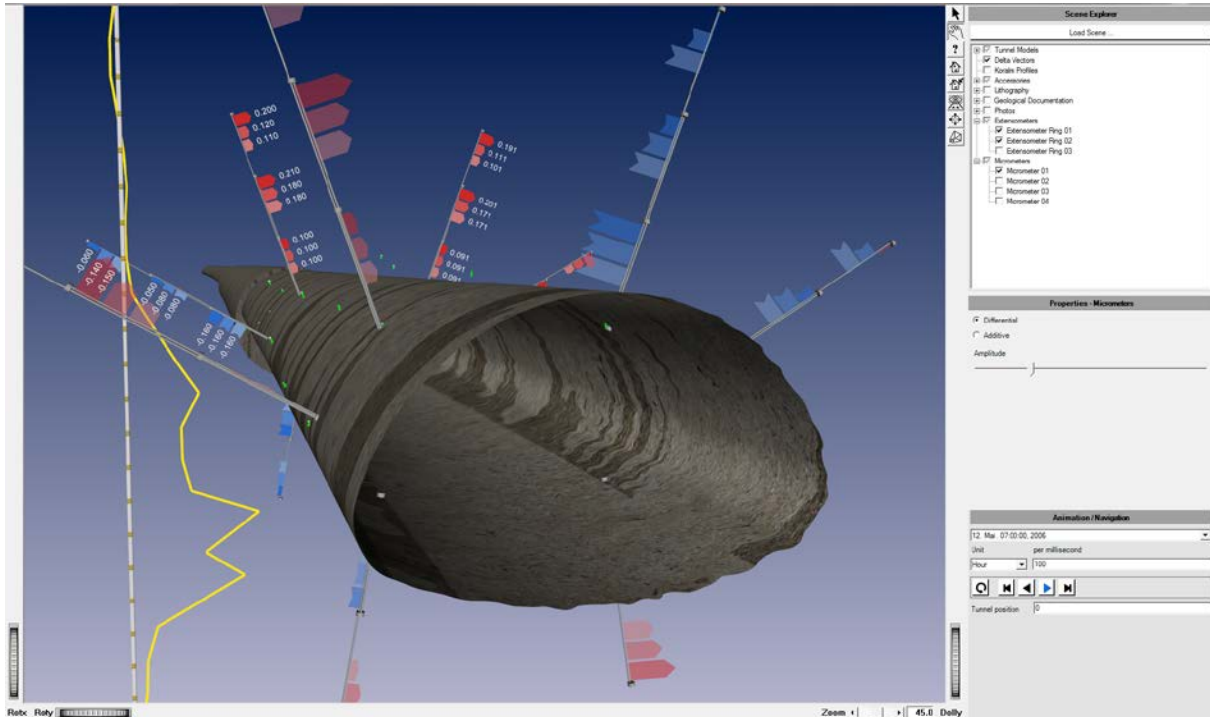


Abb. 7: Der VR-Viewer mit einem rekonstruierten Tunnel, Extensometern mit blauen und roten Fahnen und Gleitmikrometern mit gelben Kurven.

Weitere wichtige Messwerte, die im VR-Viewer dargestellt werden, sind die der Gleitmikrometer. Dabei wird eine Messsonde eine tiefe vertikale Bohrung herabgelassen (30-40m) und in Abständen von einem Meter werden Messungen durchgeführt, um geologische Deformationen präzise zu erfassen. Die Messungen werden zu verschiedenen Zeitpunkten wiederholt, wodurch sich eine Zeitreihe ergibt. Die Gleitmikrometerrohre werden ebenfalls an der korrekten Position im VR-Viewer als 3D-Modell repräsentiert. Da hier Messwerte in wesentlich geringeren Abständen auftreten, wurde eine Darstellung mittels einer kontinuierlichen Kurve gegenüber Fahnen bevorzugt. Zudem kann dadurch auch die Akkumulation der Werte gezeigt werden, wie von Analysten gewünscht. Ähnlich wie bei der Extensometer-Darstellung können exakte numerische Werte durch Klick auf das 3D-Modell ein- oder ausgeschaltet werden. Zudem erlaubt die Benutzerschnittstelle die Skalierung der Amplitude der Kurve und die Umschaltung zwischen Einzelmessungen und akkumulierten Werten. Die einzelnen 3-d Modelle der Gleitmikrometer lassen sich ein- oder wegblenden. Abb. 7 zeigt auch eine Gleitmikrometermessung (gelbe Kurve).

Erste provisorische Benutzertests haben gezeigt, dass diese Art der Visualisierung einen leicht verständlichen Überblick mehrerer Extensometer- oder Gleitmikrometer-Messungen ermöglicht. Ingenieure können auf ein beliebiges 3-d Modell eines Messinstruments heran zoomen und mit einem einfachen Klick die konkreten Werte abfragen. Durch temporale Navigation kann die gesamte Zeitreihe an Messungen veranschaulicht werden. Dies erlaubt eine visuelle und interaktive Überwachung der Dynamik von Deformationen im Baugrund.

Um nun auch die Darstellung der 3-d Verschiebungen der Tunnelwand zu ermöglichen, kann zwischen mehreren Darstellungsarten der Tunneloberfläche gewählt werden. Verschiebungsdaten, die mittels Laserscanner aufgezeichnet wurden, können z.B. in einer Falschfarbendarstellung auf der Tunnelhülle visualisiert werden. Abb. 8 zeigt eine solche Darstellung nun zusammen mit Extensometern und Gleitmikrometern.

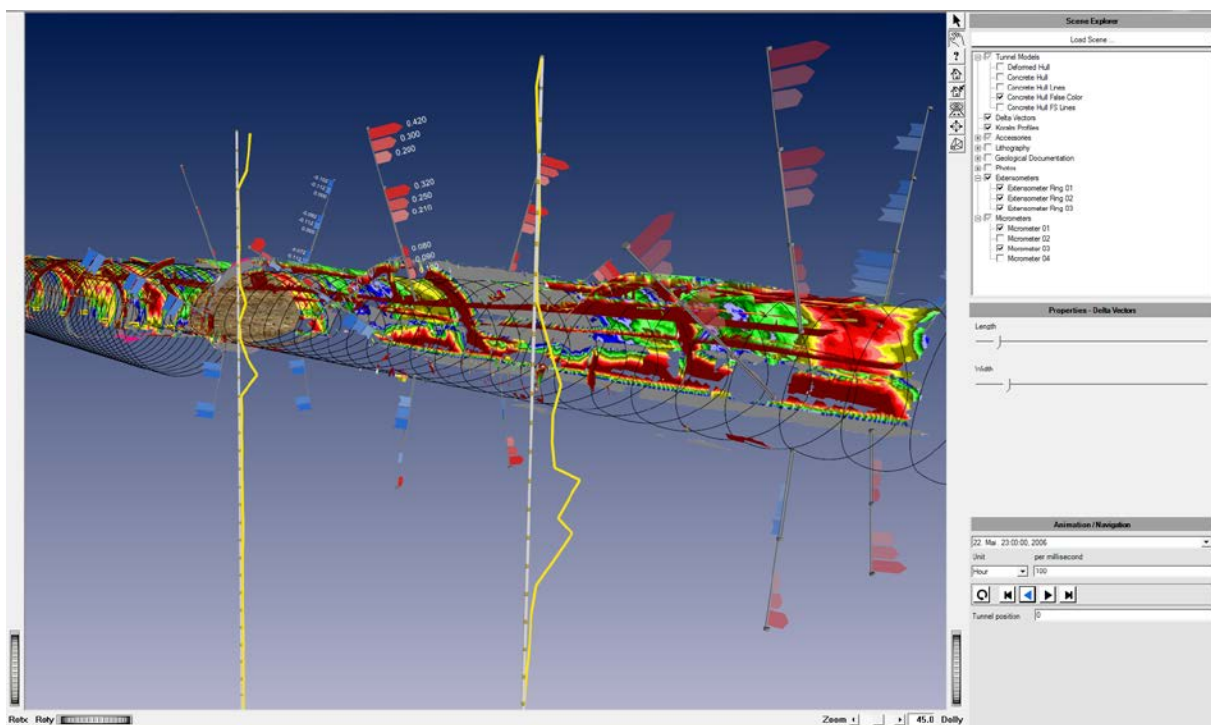


Abb. 8: Der VR-Viewer mit einer Falschfarbendarstellung von Tunnelwandverschiebungen, Extensometer- und Gleitmikrometermessungen.

Die Interpretation einer kombinierten Darstellung kann auch für erfahrene geotechnische Ingenieure zur Herausforderung werden, da die visuelle Informationsdichte sehr hoch ist. Dies wird durch die Dynamik der Daten und

die damit ablaufenden Animationen noch verschärft. Ein Training für den Umgang mit dem VR-Viewer für kombinierte Analysen ist daher notwendig.

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerung

Im Beitrag werden ein neues Messsystem Orthos Plus, ein neues Auswerteverfahren zur Bestimmung von 3-d Tunnelwandverschiebungen mittels Laser Scanning und neue VR-Visualisierungen für Tunnelmessdaten vorgestellt. In der Tunnelvermessung ist die Nutzung von Laserscanner seit bereits zehn Jahren eingeführt und es existieren mehrere Systemanbieter (z.B. Geodata, dicit Messtechnik, Amberg). Aufgrund von praktischen Nachteilen (insb. der große Zeitbedarf, der aufgrund der vielen Instrumentenaufstellungen zur Erfassung eines längeren Tunnelabschnitts benötigt wird) aber auch mangels einer geeigneten Auswertemethodik kommen diese Systeme bisher jedoch nicht für die routinemäßige, vortriebsbegleitende Erfassung von 3-d Verschiebungen an Spritzbetontunnelwänden als echte Alternative zur traditionellen Methode basierend auf Messungen mit Totalstationen in Frage. Trotz der beschriebenen Vorteile (höhere Informationsdichte, realistischere Verformungsergebnisse, Reduktion der Zahl an Messprismen) und dem daher zu erwartenden Mehrwert für die geotechnische Interpretation bleibt ein Paradigmenwechsel zunächst weiterhin ein Traum geotechnischer Ingenieure. Zwar hat sich die Laserscanner-Technik in den vergangenen Jahren erheblich verbessert und es steht mit dem gezeigten ICP-Verfahren nunmehr auch eine geeignete Auswertemethode zur Verfügung, jedoch muss die traditionelle Methode insgesamt noch als praxistauglicher, weil vor allem schneller und genauer, angesehen werden.

Mit dem entwickelten System ist nun aber bereits ein erster Schritt gelungen. Es können nämlich für den kritischen, ortsbrustnahen Bereich, in dem das Laser Scanning ohnehin bereits standardmäßig zur Abschlagsdokumentation eingesetzt wird, nunmehr auch gleichzeitig 3-d Verschiebungen aus den Messdaten bestimmt werden (zumindest für einen ersten Zeitraum von ein paar Tagen).

Literatur

- Besl, P.J., McKay, N. (1992): A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), pp. 239–256.
- Chen, Y., Medioni, G. (1992). Object modeling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3), pp. 145–155.
- Chmelina, K., Jansa, J., Traxler, C., Hesina, G. (2011): A 3-d Laserscanning system and scan data processing method for the monitoring of tunnel deformations. *Proc. zum Joint Int. Symposium on Deformation Monitoring*, Hongkong, China.
- Paar, G., Bauer, A., and Kontrus, H., (2005). Texture-Based Fusion between Laser Scanner and Camera for Tunnel Surface Documentation. *Proc. of 7th Int. Conf. on Optical 3-D Measurement Techniques*, Vienna, Austria.
- Paar, G., Kontrus, H. (2006): Three-Dimensional Tunnel Reconstruction Using Photogrammetry and Laser Scanning. *Proc. of 9. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten*, Berlin, Germany.
- Nuttens, T., De Wulf, A., Bral, L., De Wit, B., Carlier, L., De Ryck, M., Stal, C., Constales, D., De Backer, H. (2010): High Resolution Terrestrial Laser Scanning for Tunnel Deformation Measurements. *Proc. of the FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity*, Sydney, Australia.
- Van Gosliga, R., Lindenbergh, R., Pfeifer, N. (2006): Deformation Analysis of a bored Tunnel by means of Terrestrial Laser Scanning. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume: XXXVI, Issue: September, Publisher: Universität Karlsruhe, pp. 167-172.