

# Aktuelle Tunnelbauverfahren und ihre Messtechnik

## Current Tunnel Construction Methods and Related Surveying Tasks

Hilmar Ingensand, Klaus Chmelina

Mit diesem Beitrag werden die wichtigsten Bauweisen, Vortriebstechniken sowie Stütz-, Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen im modernen Tunnelbau und die mit ihnen verbundene ingenieurgeodätische Messtechnik in einer Übersicht zusammengefasst. Es werden sowohl jahrelang erprobte als auch neuere Messlösungen angeführt. Schwerpunkt bilden speziell die vielfältigen Aufgaben, welche die Ingenieurgeodäsie im unmittelbaren Vortriebsbereich heute vorfindet und zu leisten hat. Ziel ist es, sowohl einen allgemeinen Überblick als auch ein interdisziplinäres Verständnis zu schaffen, da bei den im Tunnelbau beteiligten Fachleuten mit anderem Vokabular, Denkstrukturen, Qualitätsanforderungen etc. gearbeitet wird.

**Schlüsselwörter:** Tunnelbau, Tunnelvermessung, Tunnelbohrmaschine, Teilschnittmaschine, Neue Österreichische Tunnelbaumethode

*The contribution summarizes the most relevant tunnel construction methods, excavation techniques and support techniques, and lists the related surveying tasks and methods. Both well-approved and newer methods are described. Special focus is put on the different measuring tasks needed to control the tunneling processes right at the tunnel face. The goal is to provide a comprehensive overview and, further, to improve the interdisciplinary understanding, as tunneling experts have different vocabulary, way of thinking, quality requirements, etc.*

**Keywords:** Tunneling, tunnel survey, tunnel boring machine, roadheader, New Austrian Tunneling Method

### 1 EINLEITUNG

Im Zusammenhang mit spektakulären Tunnelprojekten der letzten drei Jahrzehnte ist auch eine Vielzahl von neuen Bautechnologien entstanden bzw. verbessert worden. Damit ist ebenso die Entwicklung von neuartigen Ausbruchs- oder Vortriebsmaschinen verbunden. Der Messtechnik und im Speziellen der Vermessung kommt dabei eine immer größere Bedeutung zu. Sie liefert nicht nur die Vermessungsgrundlagen, sondern übernimmt auch Aufgaben der Navigation, Qualitätssicherung bis zur integralen Überwachung zum Schutz von Infrastrukturen. Es darf auch nicht vergessen werden, dass neben dem eigentlichen Tunnelbau spezielle messtechnische Anforderungen bei Zwischenangriffen mit bis zu 800 Meter tiefen Vertikalschächten und geneigten oder spiralförmigen Zugangsstollen gelöst werden mussten. Das gilt auch für den Bau von unterirdischen Kavernen, die bei Bahntunneln als Evakuierungsräume und für den Spurwechsel notwendig sind. Eine besondere Heraus-

forderung stellen ganz allgemein die fortschreitende Mechanisierung und Automatisierung der Arbeitsprozesse durch den Einsatz von Tunnelbaumaschinen dar.

In diesem Beitrag werden der aktuelle Stand der Technik und neuere Entwicklungen bei den heute angewandten Tunnelbaumethoden vorgestellt. Des Weiteren wird auf die Messtechnik infolge der zahlreichen Technologievarianten im Tunnelbau eingegangen.

### 2 TUNNELBAUWEISEN UND IHRE VORTRIEBSTECHNIKEN

Im modernen Tunnelbau kommen heute verschiedene Bauweisen, Vortriebstechniken sowie auch Stütz-, Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen zur Anwendung. Auch wenn zwischen ihnen wesent-

liche Unterschiede existieren, so sind sie nicht zwingend voneinander unabhängig, sondern werden in Projekten häufig kombiniert. Die wesentlichen Entscheidungsparameter für die Wahl des Bauverfahrens und der Vortriebstechnik sind nach /Kovari & Amstadt 1993/:

- die geologischen Verhältnisse einschließlich der erwarteten Felsmechanik (z. B. Konvergenz, tektonische Verschiebungen etc.),
- die hydrologische Situation,
- Designparameter (Länge, Querschnitt, Gefälle des Tunnels),
- der Zeit- und Kostenrahmen.

Die geologische Bandbreite geht dabei vom festen Fels bis zum Lockergestein. Zusätzlich können bei Tunnelprojekten geologische Störzonen durch tektonische Verschiebungen ein entscheidendes Kriterium für die Wahl des Vortriebsverfahrens sein. Ebenso spielen auch Grund- und das sogenannte Kluftwasser /Zangerl et al. 2008/ eine wichtige Rolle, da mit dem eingelagerten Wasser zusätzliche Deformationsprozesse verbunden sein können.

Weiterhin bestimmen der Zweck des Bauwerks sowie die heutigen Sicherheitsanforderungen das Design des Tunnels. Bei Verkehrstunneln sind richtungsgetrennte Röhren mit Verbindungstunneln in einem Abstand von 300 m bis 500 m zu einem Standard geworden. Ebenso gibt es Tunnelbauwerke mit gleichzeitiger Nutzung als Eisenbahn- und Straßentunnel, die als Multitunnel bezeichnet werden.

Ein weiteres Entscheidungskriterium ist der Zeit- und Kostenrahmen. Bei langen Tunneln ist man zur Optimierung der Bauzeit dazu übergegangen, das Bauwerk von mehreren Zwischenangriffen in der Form von seitlichen gestreckten Stollen, spiralförmigen Stollen (Abstiegsbauwerken) oder von Schächten aufzufahren. Oftmals werden Zwischenangriffe auch so angelegt, dass sie zunächst als Pilotstollen zur Erkundung von Störzonen dienen und später für

den Abtransport des Aushubmaterials verwendet werden. Für die Vermessung ergibt sich bei den Zwischenangriffen der Vorteil einer zusätzlichen Richtungs- und Koordinatenkontrolle.

Bei den Tunnelbauweisen kann grob folgende Unterteilung getroffen werden:

- offene Bauweise,
- halb offene Bauweise,
- geschlossene oder bergmännische Bauweise.

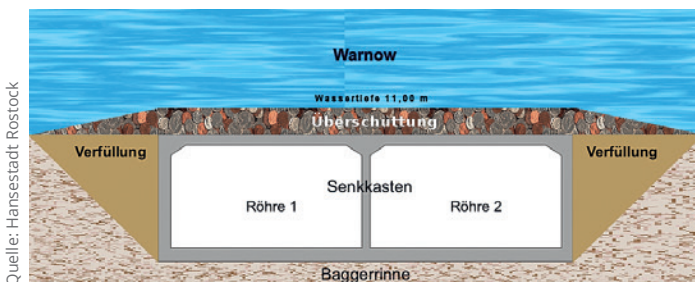
## 2.1 Offene Bauweise

Bei der herkömmlichen offenen Bauweise (auch Cut-and-Cover-Bauweise) wird der Tunnel mit Verfahren des Hochbaus oder mittels Tunnelschlagwagen an der Erdoberfläche oder in einer Baugrube erstellt (Abb. 1 links). Der Außenraum wird dann üblicherweise wieder zugeschüttet. In den allermeisten Fällen ist eine geringe Überlagerung ausschlaggebend für die Entscheidung, nach dieser vergleichsweise technisch einfachen und auch kostengünstigen Methode zu bauen. Neuerdings gibt es Entwicklungen, bei denen Tunnel oberirdisch aus Betonfertigelementen bereits teilautomatisiert hergestellt werden. Tunnel in offener Bauweise werden beispielsweise häufig für Zwecke des Lärmschutzes oder für sicheren Wildwechsel erbaut. Tunnelportalbauwerke (Abb. 1 rechts) werden üblicherweise ebenfalls in offener Bauweise erstellt.

Eine Sonderform der offenen Bauweise ist die Einschwimm- und Absenktechnik zur Errichtung von Unterwasser-Tunneln (Abb. 2 links). Hierbei werden an Land gefertigte und dann schwimmfähig gemachte Tunnelsegmente (Abb. 2 rechts) mit einem Hubschiff in die vorgegebene Position gefahren und dann abgesenkt. Die angewandten Vermessungsverfahren



Abb. 1 | Links: Tunnel in offener Bauweise /Beton GmbH; rechts: Tunnelportal /Alptransit AG/



Quelle: Hansstadt Rostock



Foto: Frank Thiele

Abb. 2 | Prinzip Unterwasser-Tunnel /Hansstadt Rostock/ und Fertigung der Tunnелеlemente im Trockendock

# Fokus auf Produktivität ...

umspannen hierfür GNSS für die Navigation der Schiffe und Tunnelsegmente bis zur Absenkeposition, Neigungsmess-, Echolot- und Sonarverfahren für die Navigation unter Wasser sowie taktile Verfahren für die Herstellung der passgenauen Verbindung der Segmente am Gewässergrund. Als neuere instrumentelle Entwicklung im Bereich der Ingenieurvermessung unter Wasser können Unterwasserlaserscanner angeführt werden. Sie ermöglichen die Erfassung von 3D-Punktwolken von Unterwasserobjekten im Nah- bis mittleren Entfernungsbereich.

## 2.2 Halboffene Bauweise

Bei der halboffenen Bauweise (auch Deckelbauweise) werden zunächst die Seitenwände des Tunnels von der Geländeoberfläche aus als vertikale Bohrfahlwände oder Schlitzwände errichtet. Danach wird seitlich abgestützt auf den Seitenwänden (evtl. auch an Zwischenstützen) an der Oberseite ein Deckel betoniert (Abb. 3 oben). Anschließend wird das Material unter dem Deckel ausgehoben (Abb. 3 unten) und der Tunnel mit einer Sohle versehen. Diese Tunnelbauweise wird auch als invertierte oder Top-Down-Bauweise bezeichnet. Sie ergibt in der Regel einen rechteckigen Querschnitt. Nach Abschluss der Deckelbauarbeiten kann die Baugrube bereits wieder verfüllt werden. Vorteil dieses Verfahrens ist somit, dass die Geländeoberfläche rasch wieder (noch während des Aushubs) z. B. für den Verkehr zur Verfügung steht.

Sowohl bei der Herstellung von Tunneln in offener als auch halboffener Bauweise

kommen die heute gängigen Standardmessverfahren und -instrumente (GNSS, Tachymeter) der Ingenieurgeodäsie zum Einsatz.

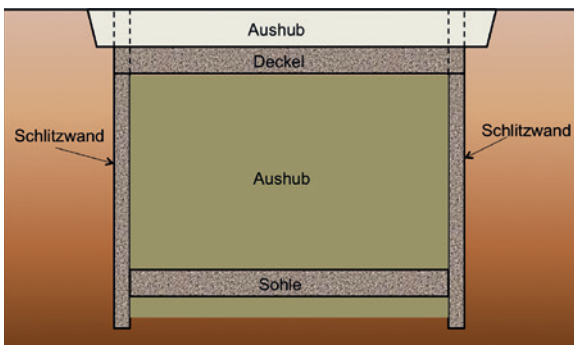
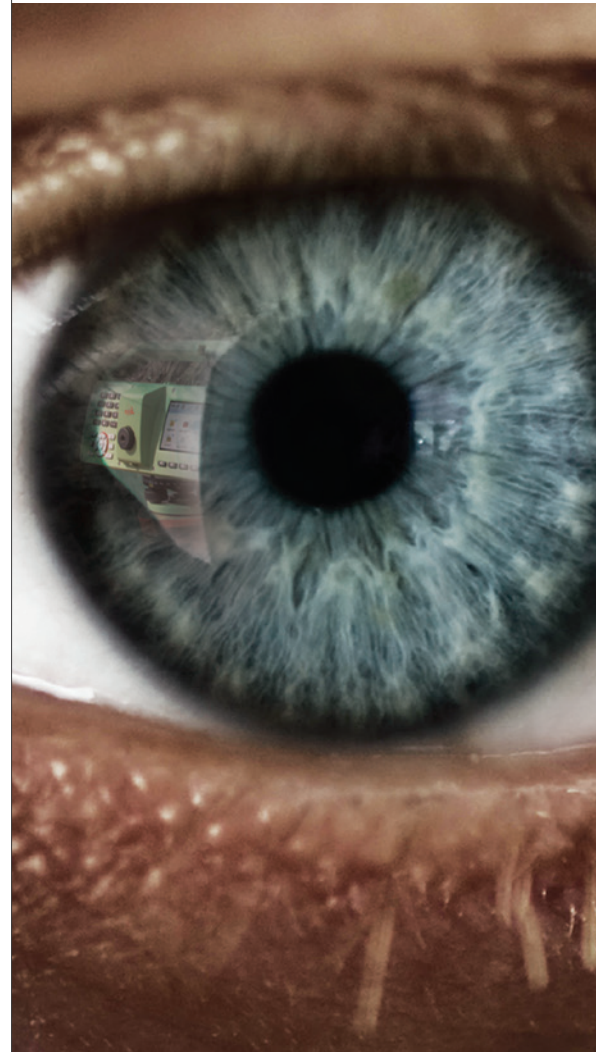


Abb. 3 | Deckelbauweise mit Schlitzwänden und Aushub unter dem Deckel /Verlag Hochparterre AG/

## 2.3 Geschlossene oder bergmännische Bauweisen

Die geschlossenen oder bergmännischen Tunnelbauweisen haben ihre technologischen Wurzeln im Stollen- und Kavernenbau des traditionellen Bergbaus. Aufgrund der vielen Entwicklungen mit neuen Bautechnologien, Maschinentypen etc. ist eine große Zahl von Varianten entstanden, von denen im Weiteren die heute Wichtigsten vorgestellt werden sollen.



### ... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Dem Innovationsführer und Erfinder der Digitalnivelliere - Leica Geosystems - ist es gelungen, neue Digitalnivelliere zu entwickeln, die Ihren Arbeitsablauf deutlich beschleunigen.

Möglich wird dies durch das Zusammenspiel der neuen Autofokus Funktionalität, der neuen großen Farb-Touch Anzeige, der hochwertigen Weitwinkel-Kamera und dem neuen Digitalkompass.

### 2.3.1 Tunnel-im-Tunnel-Bauweise

Eine spezielle und relativ junge Form geschlossener Bauweise ist die Profilaufweitung bestehender Tunnel mit der sogenannten Tunnel-im-Tunnel-Bauweise. Bei der Rhätischen Bahn AG wird diese Entwicklung auch als Normalbauweise (Abb. 4 oben) bezeichnet, bei der die Sohle zunächst abgesenkt und danach das bestehende Tunnelprofil mittels Sprengvortrieb erweitert wird. Anschließend werden neue Betonfertigtelemente eingesetzt. Aufgrund geänderter Vorschriftenlagen sind insbesondere bestehende zweigleisige Bahntunnel von dieser Notwendigkeit betroffen, wobei die Baumaßnahmen unter bestimmten Voraussetzungen bei laufendem Bahnverkehr durchgeführt werden können. Technisch wird dies durch ein im Tunnel auf Behelfsschienen längerschiebbares Tunnelerweiterungsportal (Abb. 4 unten) ermöglicht.

Für die messtechnische Steuerung der Portale werden klassisch-terrestrische Messverfahren unter Verwendung von Tachymetern eingesetzt.

### 2.3.2 Microtunneling

Ebenfalls eine Sonderstellung bei den geschlossenen Bauweisen nimmt das Microtunneling ein, mit dem Tunnel für Kanäle und Leitungen hergestellt werden. Dies geschieht heute beim Kanalbau meist durch Press-Vortrieb (Abb. 5) oder bei Leitungen mittels

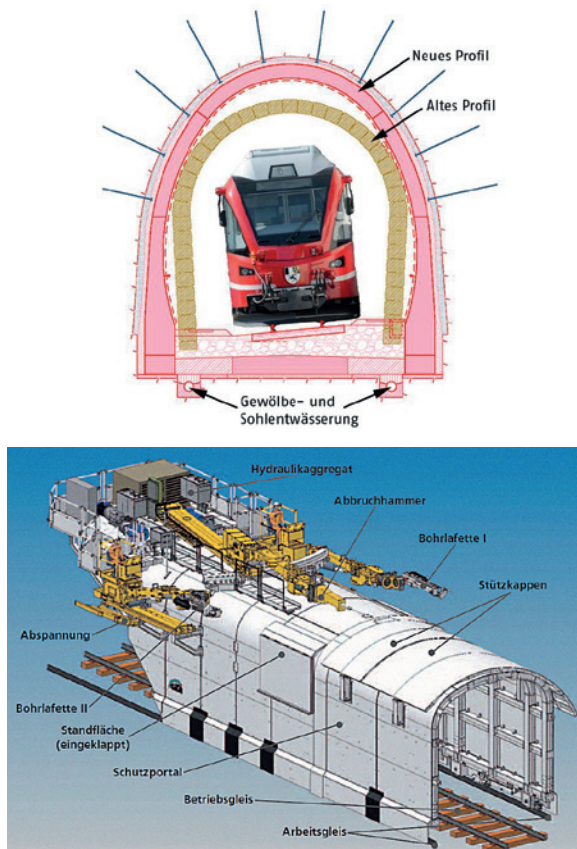


Abb. 4 | Oben: Normalbauweise /Rhätische Bahn AG/; unten: Tunnelerweiterungsportal /GTA/

Mikrotunnelbohrmaschinen. Mit diesen Techniken ist inzwischen das Auffahren des Tunnels entlang einer 3D-Trajektorie möglich.

Die Vortriebssteuerung erfolgt mit automatischen, nordsuchenden Kreiseln sowie Tachymeter- und Laserrichtsystemen zusammen mit Neigungsmesssystemen. Eine Besonderheit bildet der Umstand, dass das Tachymeter im vorgepressten Tunnel mitfährt.

### 2.3.3 Kontinuierliche Vortriebe mittels Tunnelvortriebsmaschinen (TVM)

Bei den kontinuierlichen Vortrieben wird der Tunnel mittels Tunnelvortriebsmaschinen im Vollausschnitt hergestellt. Die Vorteile des Vollausschnitts, insbesondere bei der Verwendung von hoch technisierten Tunnelbohrmaschinen (TBM), liegen in einem höheren Automatisierungsgrad und einer kürzeren Bauzeit. Bei wechselnden oder unvorhergesehenen geologischen Bedingungen (z.B. Störzonen) können jedoch Situationen auftreten, die zu Bauverzögerungen bis hin zu längeren Bauunterbrechungen führen. Es existieren heute zahlreiche unterschiedliche TVM-Typen, darunter Maschinen, die einen Vollschnitt mit einem Durchmesser von bis zu 20 m leisten. TVM können allgemein in offene Tunnelbohrmaschinen und Schildmaschinen unterteilt und im Fels sowie auch im Lockergestein eingesetzt werden. In Abhängigkeit von der angewandten Lösetechnik können die Systeme als Teil- oder Vollschnittmaschinen ausgeführt sein. Hauptbestandteil einer modernen Vollschnitt-TBM ist der Bohrkopf mit seinen Abbauwerkzeugen (Rolldisken, Reißer, Cutter), der mit Motoren angetrieben und mittels Hydraulikzylindern

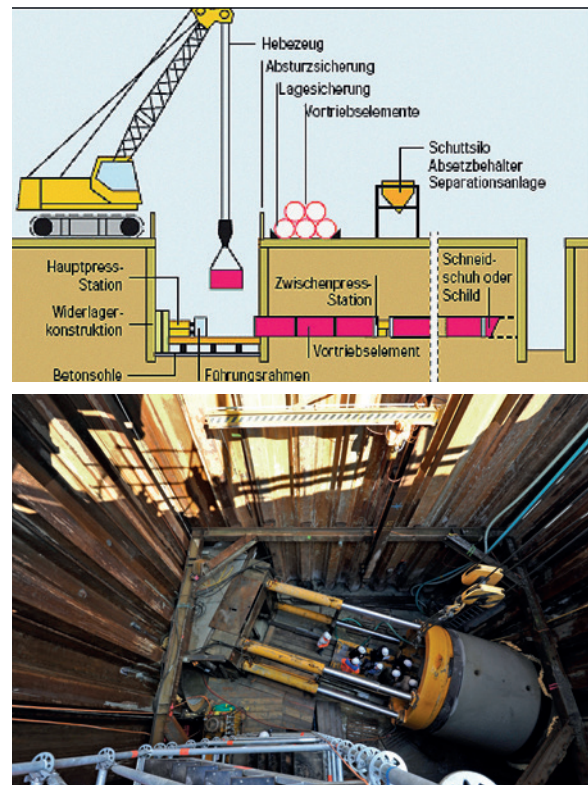


Abb. 5 | Prinzip der Rohrvorpressung und Blick in den Startschacht /Staatskanzlei Kanton Basel-Stadt/

vorgepresst wird. Bei einer Gripper-TBM (Abb. 6 oben) verspannt sich hierfür die Maschine im ausgebohrten Profil. Eine alternative Technik ist die Abstützung an den zuletzt eingebauten Tübbingringen. Besondere Typen von TBM bilden Hydro-, Erddruck- oder Druckluftschildmaschinen, bei denen im Schildbereich ein Überdruck erzeugt wird, um einen Einbruch von Wasser zu verhindern oder auch Doppelschild-TVM (Abb. 6 unten), bei denen sowohl ein hinteres Gripperschild als auch ein vorderes Frontschild vorhanden sind. Schildmaschinen können mit sogenannten Erektoren ausgerüstet sein, die vorgefertigte Betonelemente (Tübbinge) einbauen, welche den Tunnel gleichzeitig sichern, stützen und auskleiden. Tunnelbohrmaschinen werden auch bei Vertikal- und Schrägschächten eingesetzt, wobei als Besonderheit das Aufweitungsverfahren (Raise Boring) zu erwähnen ist, bei dem der Schacht zunächst mit einem kleineren Durchmesser von oben nach unten gebohrt und dann mit einem größeren Durchmesser von unten nach oben erweitert wird.

Tunnelvortriebsmaschinen, insbesondere moderne Schild-TBM, sind heute mit einer Vielzahl von Messeinrichtungen ausgestattet. Ein zentrales Element bildet das Navigationssystem, welches alle benötigten Daten zur Steuerung der Maschine entlang der vorgegebenen Tunneltrasse bereitstellt.

### 2.3.4 Zyklische oder konventionelle Vortriebe

Prominentester Vertreter zyklischer Vortriebe ist die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) (auch Spritzbetonbauweise), bei der in einer vorgegebenen und flexibel anpassbaren Reihenfolge typischerweise nur Teile des Querschnitts ausgebrochen, gesichert

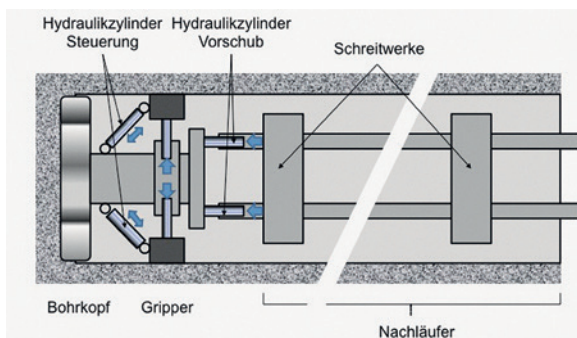


Abb. 6 | Grundprinzip einer Gripper-TBM und Doppelschild-TVM /Aker Wirth/

und gestützt werden (Abb. 7a). Die NÖT folgt einem Konzept, welches das den Hohlraum umgebende Gebirge (Fels oder Lockergestein) durch Aktivierung eines Gebirgsringes zu einem tragenden Bauteil macht. Die Methode bedient sich dabei heute eines großen Repertoires unterschiedlicher und variabel einsetzbarer Ausbruchtechniken (Baggern, Sprengen, Fräsen) sowie Sicherungs- und Stützmittel (Spritzbeton, Stahlmatten, Rohrschirm, Spieße, Pfändbleche, Anker, Ausbaubögen). Herausragendes Kennzeichen der NÖT ist die begleitende messtechnische Überwachung des Verformungsgeschehens (Abb. 7b). Ihre besondere Stärke liegt in ihrer Flexibilität und Fähigkeit, schwierige und rasch wechselnde Gebirgsverhältnisse bewältigen zu können. /Vavrovsky 1995/ charakterisiert diese Methode treffend: „Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode besteht somit darin, den Hohlraumrand unter weitgehender Nutzung der Tragfähigkeit des Gebirges mithilfe von Spritzbeton und sonstigen Ausbauelementen sowie unter Einsatz messtechnischer Beobachtungen auf möglichst wirtschaftliche und sichere Art zu stabilisieren.“

Bei der NÖT kommen zur Vortriebssteuerung Richtlaser und tachymeterbasierte Motorlasersysteme zum Einsatz. Motorlasersysteme werden dabei heute flexibel für unterschiedliche Messaufgaben genutzt, so z.B. auch zur Profilkontrolle, Steuerung von Tunnelbaumaschinen wie Teilschnittmaschinen, Bohrwagen, Rohrschirmbohrgeräten etc.

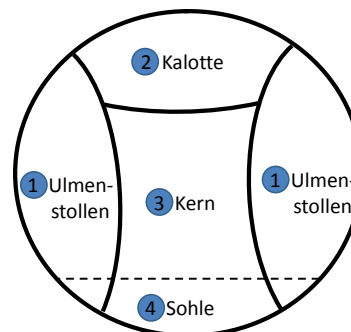


Abb. 7a | Beispiel einer Ausbruchreihenfolge bei der NÖT



Abb. 7b | Messtechnische Unterstützung der NÖT, Absteckung eines Rohrschirms /Amberg Technologies/

### 3 SICHERUNGSVERFAHREN UND STÜTZMITTEL

Bei den verschiedenen Tunnelbauweisen werden entsprechende Sicherungsverfahren vor, während oder unmittelbar nach dem Ausbruch ergriffen. Die Sicherungsverfahren sind in den meisten Fällen Teil des Bauprozesses und oftmals in die Vortriebstechnik integriert, da sie synchron mit dem Vortrieb erfolgen müssen. Das Einbringen der Sicherungs- und Stützmittel wird heute in zunehmendem Maße vermessungstechnisch gesteuert.

#### 3.1 Sicherungsverfahren vor dem Ausbruch

Bei geringen Überdeckungen wird das Gefrierverfahren eingesetzt, bei dem der Boden im Tunnelbereich vereist wird. Dieses Verfahren wird jedoch nur in Spezialfällen wie z. B. in dicht besiedelten Gebieten bei einer geringen Bodenüberdeckung eingesetzt, da es sehr energieaufwendig ist. Daneben gibt es das DSV-Verfahren (Düsenstrahlverfahren) zur Bodenstabilisierung, bei dem mit einer rotierenden Injektionslanze der Boden ausgespült und eine Bindemittelsuspension eingespült wird, die mit dem Boden einen betonartigen Körper bildet. Ein weiteres Verfahren zur vorauseilenden Sicherung des Bodens, oberhalb des Tunnels oder den zukünftigen Tunnel umfassend, ist der sogenannte Rohrschirm (*Abb. 8*). Dabei werden Beton- oder Stahlrohre von speziellen Bohrgeräten schräg und überlappend in den Untergrund gebohrt bzw. durch Pressvortrieb eingebracht und bilden einen Schutzschirm, unter dem anschließend der Tunnel vorgetrieben werden kann.

Zur seitlichen Absicherung einer Baugrube hat sich das Schlitzwandverfahren (*Abb. 3 oben*) bewährt. Die Schlitzwand wird vertikal mit einem Seilbagger, der mit einem speziellen Greifer oder einer Schlitzwandfräse ausgerüstet ist, hergestellt. In anderen Fällen kommen Bohrpfehlwände oder Spundwände zum Einsatz, die später als Tunnelwand dienen.



Abb. 8 | Herstellung Rohrschirm über der Tunnelanschlagwand /Dywidag/

#### 3.2 Sicherungsverfahren während des Vortriebs

Beim Schildvortrieb, welcher bereits von Brunel und Cochrane für den von 1825–1843 gebauten Themse-Tunnel entwickelt wurde, schützt ein zylinderförmiges Schild den Vortrieb. Im Schutze dieses Schildes können weitere Sicherungsmittel wie Anker und Spritzbeton appliziert werden. Bei wasserführendem Gestein oder der Unterquerung eines Gewässers wird das sogenannte Hydroschildverfahren (*Abb. 9*) eingesetzt, bei dem ein Überdruck erzeugt wird, um ein Eindringen von Wasser zu verhindern. Im Fall eines Tübbingausbaus hinter dem Schild bilden letztlich die Tübbinge die finale Sicherungs- und Auskleidungsschale.

Bei der Produktion von Tübbingungen gibt es hohe Toleranzanforderungen an die Formqualität. Diese Forderungen liegen im Millimeterbereich oder an den Längsfugen sogar bei  $\pm 0,3$  Millimetern /Ril 853, 2012/. Heutzutage werden neben photogrammetrischen oder Laserscanverfahren auch zunehmend Lasertracker für die Tübbing-Toleranzprüfung eingesetzt /Messing 2010/.

Bei zyklischen Vortrieben (z. B. der NÖT) wird die Tunnelwand (fallweise auch die Ortsbrust) in den meisten Fällen unmittelbar nach dem Ausbruch durch Spritzbeton und Stahlmatten gesichert. In Abhängigkeit von den Gebirgsverhältnissen werden weitere Sicherungs- und Stützmittel (Anker, Ausbaubögen etc.) flexibel manuell oder maschinenunterstützt eingebracht.

Im druckhaften instabilen Gebirge wird auch auf das im Bergbau entwickelte Verfahren einer Profilabstützung durch Teleskop-Spannbögen aus Stahl (*Abb. 10*) zurückgegriffen /Ehrbar 2008/. Das Tunnelprofil wird erweitert ausgebrochen und die Spannbögen geben dem Gebirgsdruck nach, bis ein Gleichgewicht zwischen Gebirgsdruck und Widerstand der Spannbögen hergestellt ist. Im Idealfall wird dabei das Sollprofil erreicht.

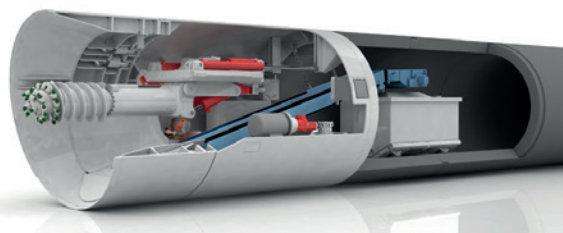


Abb. 9 | Hydroschild in Verbindung mit einer Teilschnittmaschine /Herrenknecht/

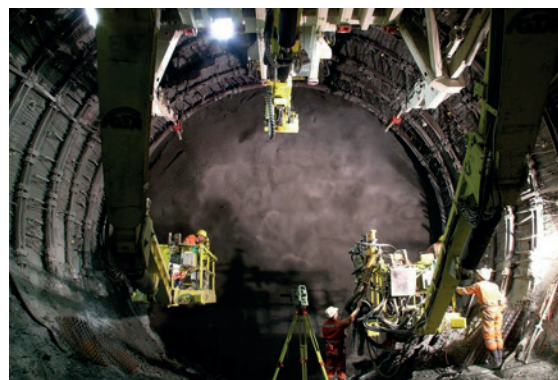


Abb. 10 | Teleskop-Stahlspannbögen und ihre messtechnische Überwachung /Alpransit AG/

# Fokus auf Präzision ...

## 4 MESSTECHNIK BEIM TUNNELVORTRIEB

Zu den Hauptaufgaben der Messtechnik während und im Bereich des Tunnelvortriebs zählen:

- die Navigation von Tunnelbaumaschinen,
- die Messungen zur Steuerung zyklischer Vortriebe,
- Deformationsmessungen sowie
- Messungen zur Qualitätssicherung.

### 4.1 Navigation von Tunnelbaumaschinen

Die Navigation und Steuerung von Tunnelbaumaschinen (insbesondere Tunnelbohrmaschinen, Teilschnittmaschinen, Bohrwagen für den Sprengvortrieb) entspricht ihrem Wesen nach der Steuerung/Navigation von Baumaschinen über Tage. Da Satelliten- Navigationsverfahren (GNSS) nicht eingesetzt werden können, erfolgt die Orts- und Lagebestimmung standardmäßig heute mit Tachymetern und Messungen auf Spezialreflektoren. Für die Neigungs- und azimutale Richtungsbestimmung werden zusätzlich je nach Maschinentyp weitere Messeinrichtungen eingesetzt. Die Positionen der kinematischen Maschinenteile (Werkzeuge, Arme) werden über geeignete Relativsensoren ermittelt.

#### 4.1.1 Besonderheiten bei Tunnelbohrmaschinen (TBM)

Bei Messaufgaben im Bereich von Tunnelbohrmaschinen ist der freie Bereich zwischen Maschine und Tunnelwand hinter dem Bohrkopf sehr gering. Zusätzlich muss mit Refraktionseffekten durch Wärme abstrahlende Maschinenteile gerechnet werden. Das heute von mehreren Herstellern angebotene Standardmessverfahren zur Navigation einer TBM beruht auf einem automatischen Tachymeter, welches an der Tunnelwand (im sogenannten Lasersichtfenster) hinter dem Bohrkopf installiert wird (Abb. 11). Die Instrumentenposition wird zunächst ausgehend von den rückliegenden Punkten des Tunnelpolygons eingemessen. Zur Navigation der TBM misst das Tachymeter ein oder mehrere Spezialprismen (Klappprismen oder Shuttertargets) am rückwärtigen Teil des Bohrkopfs in regelmäßigen Zeitintervallen ein. In ebenso regelmäßigen Abständen erfolgt eine Orientierungskontrolle des Tachymeters durch Messung zu einem oder mehreren rückliegenden Referenzprismen. Nach einer gewissen Vortriebsstrecke erfolgt der Tachymetervorbau. Je nach Maschinentyp werden nun zusätzliche Messeinrichtungen, wie elektronische Zieltafel, Zweiachs-Inklinometer, Schildkameras, Weggeber an den Zylinderpressen etc., verwendet, um die erforderlichen Navigationsdaten vollständig zu ermitteln. Es existieren abweichende Varianten, beispielsweise jene, bei der ein mit der TBM mitfahrendes Tachymeter auf einer selbsthorizontierenden Plattform über die Methode der Freien Stationierung permanent seinen Standort selbst bestimmt. Die Messdaten werden via Funk an das Steuerleitsystem übermittelt

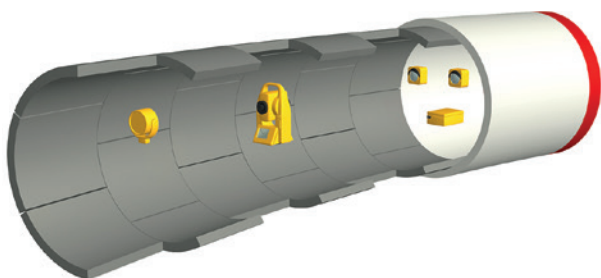
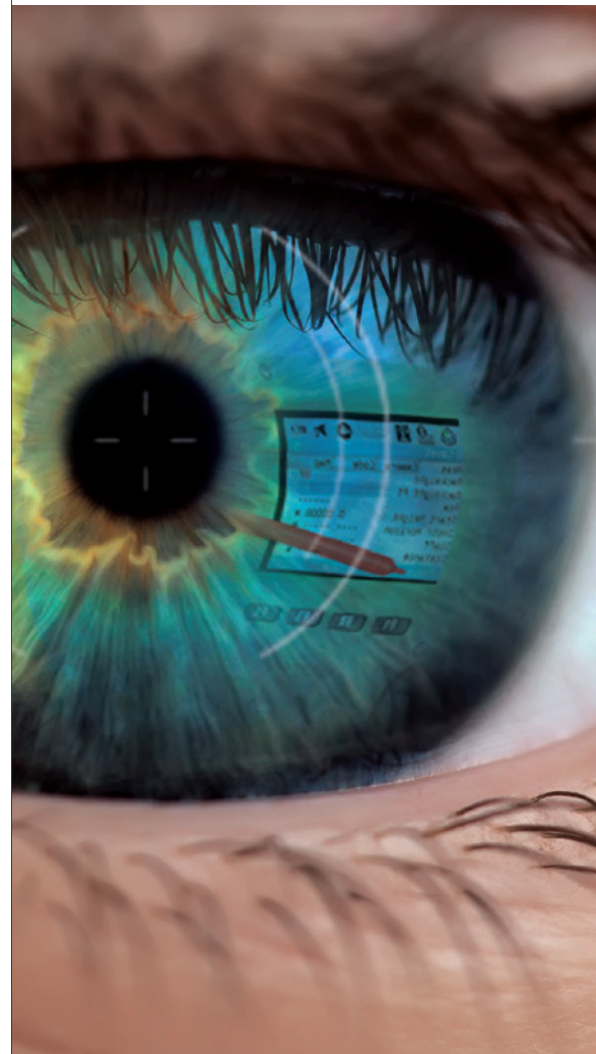


Abb. 11 | Komponenten eines TBM-Navigationssystems /NMT/



#### ... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Automatisierte Funktionen und eine branchenführende Genauigkeit von 0,2 mm mit Standard Invar-Nivellierlatten liefern höchste Präzision.

Mit nur einem Tastendruck werden vor jeder Messung automatisierte Neigungsprüfungen durchgeführt. Dank dem integrierten Autofokus wird nicht nur Ihr Ziel schneller erfasst, sondern auch die Messgenauigkeit erhöht, indem der Kontrast der Latte maximiert wird.

und prozessiert, der Maschinenführer kann die Lage der TBM zur Sollachse sowie Historie und Trend der TBM-Fahrt auf einem Steuerbildschirm ablesen (Abb. 12). Bei der heute bereits zum Standard gewordenen Netzwerkanbindung vieler TBM kann auf die Daten des Navigationssystems via Internet zugegriffen werden.

Abb. 11 zeigt beispielhaft das Messkonzept der Firma VMT GmbH (Messing & Deike 2010). Es sieht einen ortsfesten Tachymetersandort hinter der Maschine vor, von dem aus ein Reflektor am Bohrkopf angemessen wird, ein weiterer dient der Orientierungskontrolle. Zusammen mit einem biaxialen Neigungssensor kann daraus bereits die Position sowie Längs- und Querneigung der Maschine bestimmt werden. Ergänzend wird eine elektronische Zieltafel angemessen, die zusätzlich die azimutale Ausrichtung der Maschine kontrolliert. Die Zieltafel erfasst hierfür in zwei hintereinanderliegenden Ebenen den Durchstoßpunkt und den Auftreffpunkt des auf die Zieltafel gerichteten Laserstrahls des Tachymeters oder Richtlasers.

Es ist zu erwähnen, dass bei manchen TBM-Typen das Tachymeter sehr starken Vibrationen ausgesetzt wird und durch entsprechende Schutzvorkehrungen (Einhausung, Türen u. a.) vor Verschmutzung geschützt werden muss /Messing 2010/.

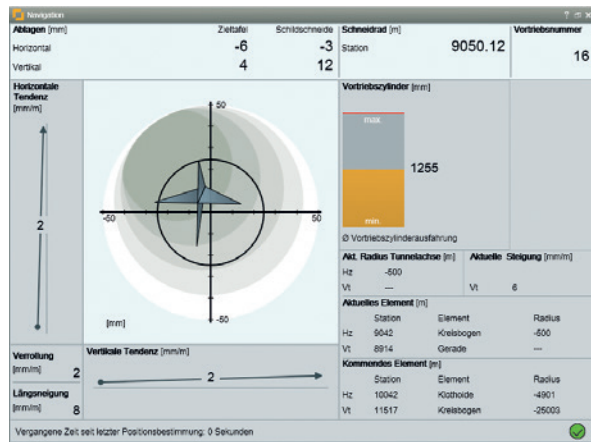


Abb. 12 | Navigationsbildschirm einer TBM /VMT/

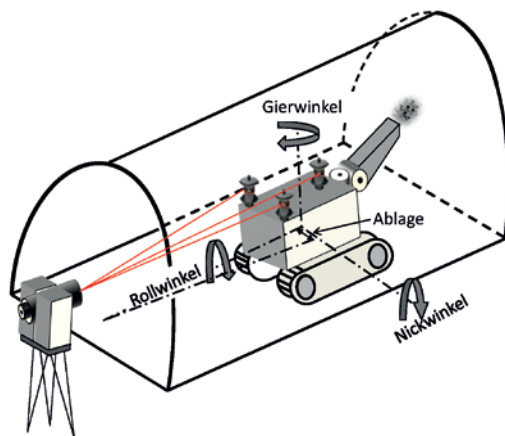


Abb. 13 | Links: Navigationsprinzip einer Teilschnittmaschine; rechts: moderner Roadheader /Sandvik/

#### 4.1.2 Besonderheiten bei Teilschnittmaschinen (TSM)

Bei Teilschnittmaschinen (Roadheader) wird bei den allermeisten Systemen die Position und Lage des festen Maschinenkörpers in seinen sechs Freiheitsgraden durch Tachymeter-Messungen auf zumindest zwei bis drei Maschinenprismen (Klappprismen, Shuttertargets) und zusätzlichen biaxialen Neigungsmessungen (Zweiachs-Inklinometer) für die Quer- und Längsneigung bestimmt (Abb. 13 links). Die augenblickliche Position und die Raumlage des sich kontinuierlich bewegenden horizontalen oder axialen Schrämkopfs werden mittels Längen-, Rotationswinkel- und Neigungssensoren in den Gelenken der Maschine in Echtzeit bestimmt. Die Berechnung der Navigationsdaten erfolgt nach der Funkübertragung vom Tachymeter im Steuerleitsystem der Maschine. Die Daten werden in der Fahrerkabine angezeigt. Bei modernen Roadheadern (Abb. 13 rechts) bilden sie heute Eingangsgrößen für die Steuerung vollautomatischer Schneidprozesse. Abb. 14 veranschaulicht die Einzelkomponenten eines modernen Navigationssystems.

#### 4.1.3 Besonderheiten bei Bohrwagen

Für mehrarmige Bohrwagen existieren spezielle Systeme, bestehend aus festinstallierten Richtlasern, auf der Maschine montierten aktiven oder passiven Lasertargets und wiederum Winkel- und Weggebern an den Gelenken und Ausfahrzylindern. Für die Positionierung werden die auf der Lafette befindlichen Lasertargets zunächst vom Fahrer in den Laserstrahl bewegt, somit mit einer bekannten Ausgangslage zur Deckung gebracht. Danach kann die Lafette über ihre Relativsensoren die geplante Bohrung automatisch einstellen. Moderne teilautomatisierte Bohrwagen (Abb. 15) werden bereits mittels eines Tachymeters gesteuert, welches Prismen am Bohrwagen und den Bohrarmen misst, und sind in der Lage, ihre Arme automatisch nach einem vordefinierten Bohrplan auszurichten.

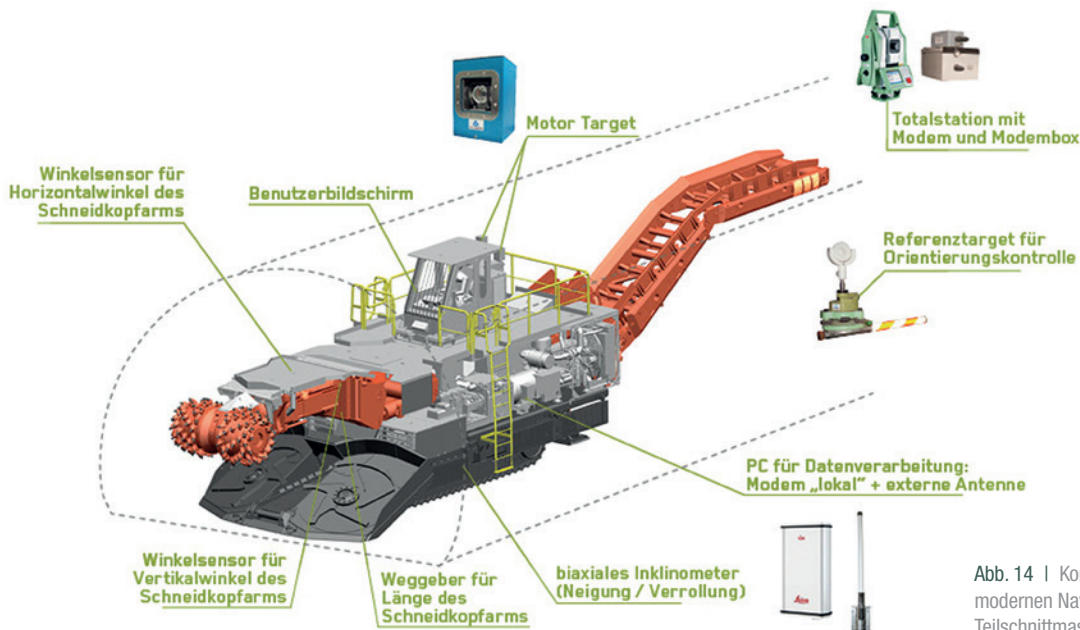


Abb. 14 | Komponenten eines modernen Navigationssystems für Teilschnittmaschinen /Geodata/



Abb. 15 | Moderner Bohrwagen und Navigationss-Tachymeter /Atlas COPCO/

## 4.2 Steuerung zyklischer Vortriebe

Zur Steuerung zyklischer bzw. konventioneller Vortriebe (z. B. nach der NÖT) werden heute nach wie vor noch Richtlaser, jedoch vermehrt auch Motorlasersysteme eingesetzt. Bei Richtlasern (Abb. 16 oben) wird die Vortriebsrichtung über ein oder mehrere sichtbare Laserlinien samt zugehöriger Abstichlisten vorgegeben. Tachymeterbasierte Motorlasersysteme (Abb. 16 unten) ermöglichen hingegen sowohl die Signalisierung als auch Aufnahme achsbezogener Punkte (z. B. Bohransetzpunkte, Bogenstellpunkte, Punkte des Ausbruchsrands) direkt an der Ortsbrust. Sie sind heute weitgehend automatisiert, benutzerfreundlich und werden von den Tunnelvortriebsmannschaften über Tablet-PC fernbedient. In weiterer Folge werden sie auch zur Steuerung/Einmessung von Maschinen (z. B. von Rohrschirmbohrgeräten) genutzt.

## 4.3 Deformationsmessungen im Bereich des Vortriebs

Zu den wichtigsten Deformationen zählen beim Tunnelvortrieb die Querschnittsänderungen (Konvergenzen), die während oder unmittelbar hinter dem Ausbruch auftreten. Diese sind im unmittelbaren Bereich des Ausbruchs am größten und klingen im Normalfall mit der Zeit und mit dem fortschreitenden Vortrieb ab. Eine besondere Stellung nimmt die Konvergenz-Messtechnik bei zyklischen Bauverfahren wie der NÖT ein, da sie integrierter Bestandteil des Bauprozesses ist und aufgrund der Messungen wichtige Entscheidungen unmittelbar abgeleitet werden. Deformationsmessungen dienen bei der NÖT im Einzelnen der Verifikation, laufenden Aktualisierung und Prognose des Systemverhaltens Gebirge – Tunnel, der Früherkennung von kritischen Entwicklungen und der Optimierung der Bauphase (z. B. des Stützmitteleinsatzes). Als Standardverfahren hat sich bei der NÖT die optische 3D-Verschiebungsmessung etabliert,



Abb. 16 | Richtlaser und Motorlasersystem zur Steuerung konventioneller Vortriebe /Geodata/



Abb. 17 | Konvergenzmessungen mit dem System tShape nach Tübbingebau /Terravermessung/

bei der mittels Tachymeter in regelmäßigen Messquerschnitten montierte Reflektoren (Folientargets) beobachtet werden. Aus den (im Standardfall einmal täglichen) Messungen können neben den relativen Konvergenzen insbesondere auch die Absolutverschiebungen ausgewertet und der geotechnischen Interpretation zugeführt werden. Eine Vielzahl von Auswertetechniken und Diagrammdarstellungen der Messergebnisse wurde für das Verfahren entwickelt.

Bei oberflächennahen Tunnelprojekten (insbesondere in städtischen Bereichen) begleitet zusätzlich ein umfangreiches obertägiges Monitoringprogramm die untertägigen Aktivitäten. Bei den größten Tunnelprojekten kommt es heute zur Installation von tausenden Messpunkten an der Geländeoberfläche, an Gebäuden etc., welche von weit über hundert Tachymetern automatisch beobachtet werden /Chmelina et al. 2016/. Eine große Zahl weiterer geodätischer und geotechnischer Sensoren und Messverfahren ist im Einsatz.

Bei kontinuierlichen Bauverfahren mittels TBM ist im unmittelbaren Vortriebsbereich hinter dem Bohrkopf der TBM der Sichtbereich stark eingeschränkt. Für die Deformationsmessung können geotechnische Messverfahren wie z.B. Mehrfach-Extensometer eingesetzt werden, welche die Bestimmung von Längenänderungen entlang von Bohrlöchern (z.B. in der Ortsbrust) erlauben. Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung von Konvergenzen bieten Systeme, die auf der Basis von biaxialen Neigungssensoren oder zweidimensionalen Brechungswinkelmessungen in den Gelenken einen Polygonzug entlang der Tunnelaibung bestimmen (Abb. 17). Bei entsprechenden Platz- und Sichtverhältnissen werden Konvergenzmessungen fallweise auch mittels Konvergenzmaßbändern, einfachen Laserdistanzmessgeräten oder teilautomatisch mit auf der TBM montierten, mitfahrenden Tachymetern ausgeführt. In der Regel können hinter dem TBM-Schild Messdaten allerdings nur für die Dauer einiger Stunden bis weniger Tage erhalten werden, da die Messpunkte hernach im Nachläuferbereich verschwinden und unzugänglich werden. Eine abschließende Messung ist dann erst wieder hinter dem Nachläufer möglich. In jüngster Zeit werden bereits auch auf der TBM montierte, teilautomatisierte 3D-Laserscanner für diese Aufgabe verwendet, wodurch vollflächige Deformationsauswertungen der Tübbingschale erstmals möglich werden.

Ein neuartiges Messsystem zur Bestimmung von Konvergenzen ist das tShape-System /Meyer & Schütz 2013/. In starren Segmenten mit einer Länge von ca. 30 cm, die mit jeweils drei orthogonalen Inklinometern ausgestattet sind, welche auf der Basis von Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) arbeiten, wird die Deformation des Tunnelprofils erfasst. Die Auswertung ist im Prinzip ein 3D-Polygonzug.

#### 4.4 Messungen zur Qualitätssicherung

Bei zyklischen Vortrieben (z.B. nach der NÖT) bilden die Profilkontrollmessungen der verschiedenen Ausbauphasen des Tunnels (Rohausbruch, Spritzbeton) die wesentlichsten Messungen zur Qualitätssicherung. Sie finden vortriebsbegleitend statt und werden heute auf Basis von reflektorlos messenden Tachymetern (Abb. 18 oben), 3D-Laserscannern (Abb. 18 unten) oder photogrammetrischen Messsystemen durchgeführt.

Aus den Messergebnissen werden Profildiagramme und flächenhafte Tunnelaibungsabwicklungen erzeugt, in denen Angaben wie Über- und Unterprofil, Oberflächenrauheit etc. dokumentiert werden.

# Fokus auf Datenfluss ...



Abb. 18 | Profilkontrolle mit Tachymeter und fahrzeuggestütztem 3D-Laserscannersystem /Geodata/

Bei kontinuierlichen Vortrieben (TBM) kann die vollumfängliche Kontrolle der hergestellten Tunnelschale wegen mangelnder Platz- und Sichtverhältnisse auf der TBM in der Regel erst hinter der Maschine (hinter dem Nachläufer) erfolgen. Es kommen prinzipiell dieselben Messverfahren und -systeme wie bei den zyklischen Vortriebsverfahren zum Einsatz. Um einzelne Profile auch im TBM-Bereich messen zu können, werden in manchen Projekten mit großem Aufwand auch Polygonzüge durch den TBM-Nachläufer gelegt. Zu erwähnen sind auch Schildschwanzluftmesssysteme, welche knapp hinter dem Bohrkopf die Achslage der zuletzt eingebauten Tübbing gegenüber dem TBM-Schild durch radiale Distanzmessungen bestimmen können und damit einen ersten Rückschluss auf die geometrische Einbaulage der Tübbing erlauben.

## 5 AUSBLICK

Aufgrund verschiedener Nachteile (z. B. mangelnder Echtzeitfähigkeit) wird weiterhin nach einem Innenraumpositionierungssystem, das als Ersatz oder Ergänzung für trackende Tachymeter fungiert, gesucht. Lösungsansätze sind z. B. das iGPS der Firma Nikon, das auf der Auswertung von zwei durch Rotation entstehenden Laserebenen und dem Vorwärtsschnitt beruht, oder Infrarot-Trackingkameras, welche aktive Infrarot-LED über ein stereophotogrammetrisches Verfahren tracken /Chmelina et al. 2014/.

Generell ist ein Trend zur weiteren Automatisierung von Tunnelbaumaschinen zu beobachten. So wurde am Fraunhofer Institut in Bochum eine Teilschnittmaschine mit Ortsbrust-Scaneinrichtung entwickelt, mit dem die Ortsbrust im Infrarot-Spektrum



### ... die neuen Leica Digitalnivelliere!

Der Bedienkomfort der neuen Leica Digitalnivelliere endet nicht im Feld. Nach der einfachen Übermittlung Ihrer Daten ins Büro werden sie dort von der Leica Infinity Büro-Software mühelos verarbeitet. Diese intuitive Software sorgt für eine leicht verständliche Darstellung komplexer Nivellierdaten.

Kombinieren Sie Tabellen mit Grafiken oder führen Sie sogar Quervergleiche von Projektdaten in einem Fenster durch, um eine Gesamtübersicht über Nivellierungslinien, Linienberechnungen oder Ausgleichungen zu erhalten.

abgetastet wird. Aus den Messwerten gewinnt das System ein dreidimensionales Abbild der Ortsbrust /Huber 2010/.

Sowohl Teilschnittmaschinen als auch Tunnelbohrmaschinen werden inzwischen mit Georadar und Geoseismik zur geologischen Vorauserkundung ausgerüstet, um z. B. Findlinge und Störzonen im Voraus zu erkennen. Eine andere Idee ist es, die Veränderungen des Hydraulikdrucks der Gripper als Konvergenzinformation zu nutzen. In jüngster Zeit wurden für Tunnelbohrmaschinen zudem Ortsbrustkameras im Bohrkopf zur geologischen Dokumentation montiert und Diskenkraftmesssysteme zur Erfassung der Interaktion zwischen Schneiddisken und Gebirge installiert.

Bei den Tunnelbauverfahren bestehen Ideen, die Vorteile der jeweiligen Verfahren zu kombinieren. So wird sowohl über einen NÖT-Vortrieb mit anschließendem Tübbingausbau als auch über TBM-Vortriebe mit systematischem Einsatz von Ankern nachgedacht. Im Hochbau bereits angekommen, wird das Thema BIM (Building Information Modelling) nun auch im Tunnelbau intensiv diskutiert. Es gibt bereits erste Bauprojekte, für welche ein Tunnel-BIM eingerichtet wurde. An der Anbindung von Messdaten an ein solches Tunnel-BIM wird ebenfalls bereits gearbeitet.

Für die Vermessung werden sich die Anwendungsfelder im Tunnelbau sukzessive von Mess- auf Steueraufgaben verlagern und somit komplexer. Da die Messsysteme in Maschinen integriert und automatisiert werden, wird in wenigen Jahren schon kein Vermesser mehr im Tunnel anzutreffen sein. Es ist anzunehmen, dass ferngesteuerte oder autonome Roboter und Drohnen den Tunnelbau der Zukunft messtechnisch überwachen werden.

## LITERATUR

Chmelina, K. (2009): Integrated Tunnel Monitoring and Surveying supported by an Information System. Proceedings of the ITA – AITES World Tunnel Congress, 23.–28. Mai 2009, Budapest.

Chmelina, K.; Mossel, A.; Kaufmann, H. (2014): Echtzeitvermessung mit Infrarottrackingkameras – Entwicklung und Erprobung einer neuen Messtechnik für unter Tage. In: Wieser, A. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Zürich, 2014. Wichmann, Berlin/Offenbach, 3–14.

Chmelina, K.; Rabensteiner, K.; Charalambides, A. (2016): Deformation monitoring and monitoring data management at the metro project Cityringen Copenhagen. Proceedings of the Joint International Symposium on Deformation Monitoring JISDM2016, 30. März–1. April 2016, Wien.

Deicke, R. (2010): Vermessungstechnische Herausforderung beim Bau des Gotthard-Basistunnels aus Sicht des Unternehmers. In: Geomatik Schweiz, (2010)12, 568–570.

Ehrbar, H. (2008): Gotthard Base Tunnel, Switzerland, Experiences with different Tunnelling Methods. Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterâneas. Seminário Internacional "South American Tunnelling".

Girmscheid, G. (2008): Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. 2. Aufl. Ernst & Sohn, Berlin.

Huber, H. (2010): 3D-Laserscanner-System integriert, mit dem die Ortsbrust im Infrarot-Spektrum abgetastet wird. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik. <http://www.iml.fraunhofer.de>.

Ingensand, H. (2010): Moderne Technologien und Konzepte zur Lösung der messtechnischen Herausforderungen bei AlpTransit. In: Geomatik Schweiz, (2010)12, 545–547.

Ingensand, H. (2016): Wie navigiert man die Tunnelbohrmaschinen 1 000 m unter der Erde? In: Schweizerische Physikalische Gesellschaft (SPG), Mitteilungen (in Druck).

Kovári K.; Amstad, C. (1993): Decision Making in Tunneling Based on Field Measurements. In: Hudson, J. (Hrsg.): Comprehensive Rock Engineering. Vol. 4. Bergamon, 571–605.

Messing, M. (2010): Steuerung der Tunnelbohrmaschine am Gotthard. In: Geomatik Schweiz, (2010)12, 571–574.

Meyer, Ch.; Schütz, S. (2013): Risk control – online deformation monitoring inside an urban TBM-driven tunnel using the tShape measurement system. In: Proceedings World Tunnel Congress Underground – the way to the future!, 31. Mai–7. Juni 2013, Genf, 1395–1402.

Rabcewicz, L. v. (1964): The New Austrian Tunneling Method. In: Water Power, (1964)1, 19–24.

Ril 853 (2012): Richtlinie Eisenbahntunnel planen, bauen und in Stand halten. Deutsche Bahn AG.

Vavrovsky, G.-M. (1995): Die Neue Österreichische Tunnelbaumethode (NÖT) im Spannungsfeld zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. Graz.

Zangerl, C.; Evans, K. F.; Eberhardt, E.; Loew, S. (2008): Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock. Part 1 – Investigations above the Gotthard highway tunnel. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(2008)8, 1211–1225.

## INTERNETVERWEISE

Atlas Copco: <http://www.atlascopco.com>

Dywidag Systems: <http://www.dywidag-systems.com>

Geodata: <http://www.geodata.com>

GTA Maschinensysteme: <http://www.gta.eu>

Herrenknecht: <http://www.herrenknecht.com>

Nikon Metrology Europe iGPS measuring, positioning and tracking system for factory-wide deployment: <http://www.nikonmetrology.com>

Rhätische Bahn, Normalbauweise: <https://www.rhb.ch/de/unternehmen/projekte-dossiers/normalbauweise-tunnel>

tacs: <http://www.tacsgmbh.de>

VMT: <http://www.vmt-gmbh.de>

Prof. (em.) Dr. Hilmar Ingensand

ETH ZÜRICH  
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND  
PHOTOGRAMMETRIE

Stefano-Francini-Platz 5 | CH-8093 Zürich  
[hilmar.ingensand@geod.baug.ethz.ch](mailto:hilmar.ingensand@geod.baug.ethz.ch)



Dr. Klaus Chmelina

GEODATA ZIVILTECHNIKERGESELLSCHAFT  
MBH

Hütteldorferstraße 85 | A-1150 Wien  
[klaus.chmelina@geodata.at](mailto:klaus.chmelina@geodata.at)

