

Urs Müller

Kinematische Erfassung großer, linienförmiger Objekte mit Laserscanning

Große, linienförmige Infrastrukturprojekte, wie Straßen, Bahnlinien, Dämme etc. sind kontinuierlich zu unterhalten und deshalb auch entsprechend zu dokumentieren. Die kinematische Erfassung solcher Objekte mit hoher Genauigkeit steht heute erst am Anfang und wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Zugfolgen bei den Bahnen werden laufend erhöht, die Kapazitätsgrenzen sind teilweise schon erreicht. Da bleibt für Streckensperrungen für Vermessungsarbeiten und Dokumentationen immer weniger Zeit. Deshalb sind flexible und schnelle Lösungen zunehmend gefragt. Kleine, leicht transportierbare Systeme werden die mit hoher Geschwindigkeit messenden Gleismesswagen ergänzen.

Schon kurz nach Erscheinen der ersten Laserscanner auf dem Markt versuchten viele Anwender solche Objekte mit statischen Scannern zu erfassen. Der Erfolg hielt sich meist in Grenzen, da der Aufwand recht groß war, die Genauigkeit oft den Erwartungen nicht entsprach und die Wirtschaftlichkeit schlußendlich nicht gegeben war. Deshalb hat sich die Fa. „terra vermessungen ag“ (terra) schon sehr früh entschlossen, bessere und vor Allem wirtschaftlichere Messverfahren zu entwickeln.

Prinzip des Laserscanning

Die Funktionsweise eines Laserscanners ist relativ einfach. Zwei unterschiedliche Verfahren sind heute gebräuchlich. Bei den Punktscannern wird ein Laserpunkt auf das zu messende Objekt projiziert und mit weiteren Sensoren detektiert. Über ein Triangulationsverfahren wird die Raumdistanz zwischen der Laserquelle und dem Objektpunkt ermittelt. Bei den laufzeitbasierenden Lasern wird ein gepulster Strahl ausgesendet und aus der gemessenen Laufzeit des Lichts die Distanz abgeleitet.

Aus der Kombination von Laserdistanzmessverfahren mit herkömmlichen, motorisierten Tachymetern – wie in der Vermessung normalerweise verwendet – resultieren sogenannte 360° Scanner (Abb. 1). Sie werden auf einem festen Punkt aufgestellt und drehen sich langsam um die vertikale Achse und scannen dabei linienförmig alle Objekte, welche das Lasersignal reflektieren. Die Reichweiten dieser Geräte sind je nach Messverfahren sehr unterschiedlich und variieren von wenigen Metern bis zu über einen Kilometer.

Dieses auch „statisches Scanverfahren“

genannte Messprinzip hat bei der praktischen Arbeitsausführung einige gravierende Nachteile. Der Scanner kann nur die Teile eines Objektes erfassen, die von diesem festen Standpunkt aus direkt sichtbar sind. Für die Erfassung eines runden Objektes werden deshalb mindestens drei unterschiedliche Aufstellungen notwendig, damit das Objekt aus unterschiedlichen Blickwinkeln erfasst werden kann. Die einzelnen Scans bestehen aus sehr vielen Einzelpunkten, die man als „Punktwolken“ bezeichnet. Diese müssen dann nachträglich in ein einheitliches Koordinatensystem gebracht werden. Ein weiterer großer Nachteil dieses Messverfahrens ist die stark unterschiedliche Dichte der Messpunkte. Nahe beim Messinstrument liegende Objekte werden mit höherer Dichte und meist auch mit höherer Genauigkeit abgebildet als weiter entfernt liegende. Dies führt zu inhomogenen Punktwolken.



Abb. 1: Trimble Scanner



Abb. 2: swiss trolley

Die einzelnen Punktwolken können über zwei heute übliche Verfahren zusammengefügt werden. Verfügen die Scans über große Überlappungsbereiche, können diese Zonen rechnerisch übereinander transformiert werden und so eine Punktwolke an die nächste gefügt werden. Dieses Verfahren ist sehr praktisch, kann aber aus fehlertheoretischen Gründen für sehr große Objekte nicht empfohlen werden. Die zweite Methode passt die einzelnen Punktwolken über koordinatenmäßig bekannte Passpunkte zusammen. Dazu müssen diese Passpunkte vorab mit einem konventionellen Messverfahren bestimmt werden. Scannermessungen sind immer dreidimensionale Messverfahren, die Punktwolken sind deshalb auch immer dreidimensional. Für die Transformation sind pro Punktwolke mindestens drei Passpunkte, regelmässig verteilt über den ganzen Bereich, notwendig. Der Aufwand für die Bestimmung dieser Passpunkte sollte nicht unterschätzt werden.

Viele eigene Versuche für Anwendungen im Bahn- und Straßenbereich zeigten klar, dass diese Messverfahren über große Strecken oder gar für einzelne Bahnen flächendeckend nicht wirtschaftlich sind.

Der „swiss trolley“

Betrachten wir die Bedürfnisse der Bahnen etwas genauer wird schnell klar, dass innerhalb einer Bahnorganisation sehr unterschiedliche Vorstellungen über die geforderten Genauigkeiten herrschen. An die Erfassung der Gleisdaten und der Engstellen werden wesentlich höhere Anforderungen gestellt als zum Beispiel an ein Hallendach oder ein Fahrsignal. Gehen wir von einer absoluten Punktgenauigkeit von einem mit einem Laserscanner erfassten Einzelpunkt von 3 mm aus – was schon ein sehr guter Wert ist – können wir leicht erkennen, dass mit einem solchen Verfahren keine Spurweiten oder Überhöhungen mit geforderten Genauigkeiten von < 1 mm abgeleitet werden können. Deshalb hat die terra den modularen „swiss trolley“ entwickelt (Abb. 2).

Die beiden Grundprinzipien dieses Gleismesswagens sind die absolute Messung, d.h. sämtliche Messungen werden im Ko-

Der Autor

Dipl.-Ing. Urs Müller, terra vermessungen ag, Zürich

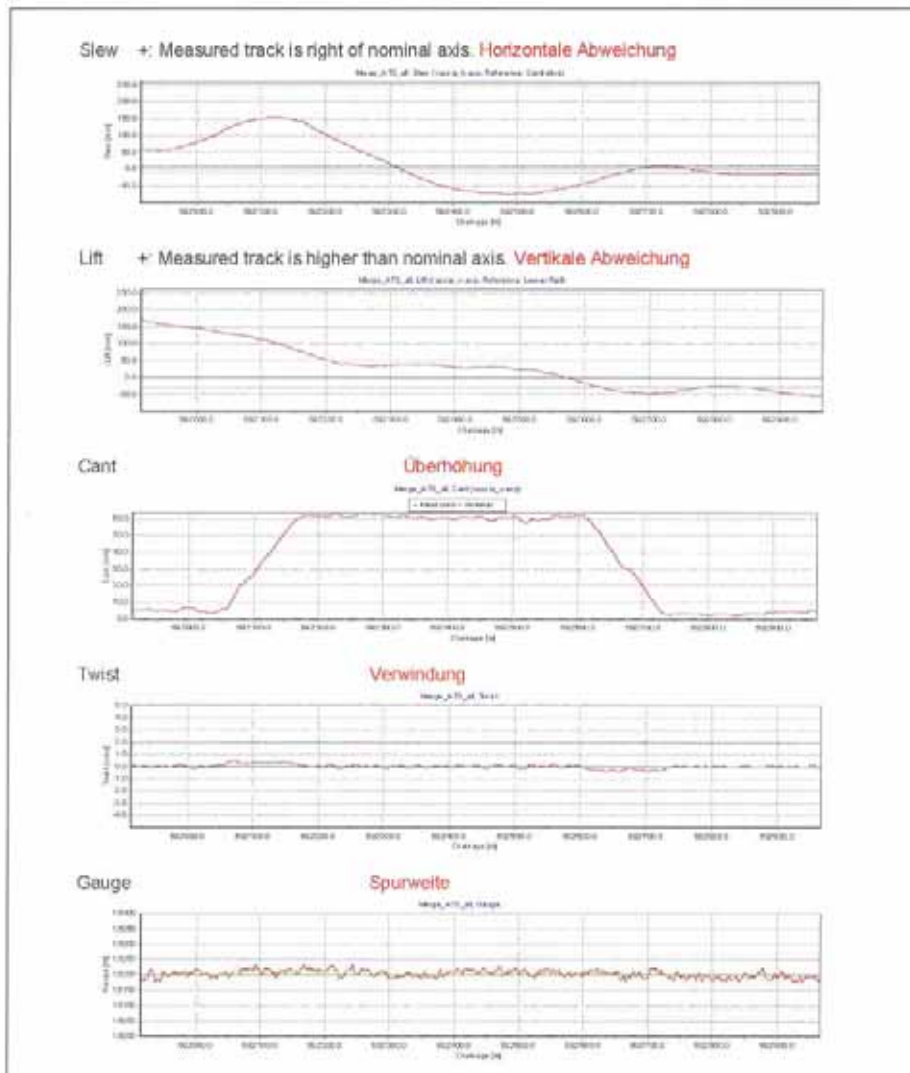


Abb. 3: Diagramme

ordinatensystem der Bahn ausgeführt und die kinematische Messweise, d.h. alle Messungen erfolgen während der Fahrt. Die heute zur Verfügung stehende trolley Version erfasst folgende Parameter:

- Spurweite,
- Überhöhung,
- Gradiente,
- Verwindung,
- Distanzmessung pro Schiene,
- Absolute Positionierung mit Tachymeter und/oder GPS/GLONASS,
- Lichtraum, Engstellen etc. mit Laserscanner,
- Drahtwerk mit Laserscanner und
- Fotos oder Video.

Die Daten werden zur Qualitätssicherung und zur Genauigkeitssteigerung redundant erfasst. Die absolute Positionierung wird mit der laufenden Distanzmessung und den Neigungssensoren zusätzlich gestützt. Für das Laserscanning werden zwei Scanner mit Überlappungsbereichen verwendet.

Durch die elektrische Isolation des Wagens ist eine Streckensperrung, sofern dies die

entsprechenden Vorschriften der Bahn erlauben, nicht notwendig. Der Messwagen wird von zwei Personen bedient und von Hand mit normaler Schrittgeschwindigkeit geschoben. Die Messleistung beträgt bei der absoluten Positionierung mit GPS ca. 5 Gleiskilometer pro Stunde. Bei der Tachymetervariante sinkt die Leistung auf ca. 400 m pro Stunde, da der Tachymeter nach ca. 350 bis 400 m umgestellt und neu eingepasst werden muss. Der trolley erlaubt auch die Kombination beider Positionierungsverfahren. Damit kann in Zonen mit erhöhten Genauigkeitsanforderungen, z.B. in Bereichen mit Weichen, Bahnsteigen, Brücken etc. zusätzlich ein Tachymeter mitverwendet werden.

Ziel einer Messfahrt ist immer die Erfassung und Speicherung aller möglichen Daten in einem Arbeitsgang, um die Behinderungen des laufenden Bahnverkehrs möglichst gering zu halten und das Gefahrenpotenzial für das Messpersonal zu minimieren. Während der Auswertung im Büro werden die benötigten Daten aus der großen Datenmenge extrahiert und weiterbearbeitet.

Berechnungen / Auswertungen

Die Auswertung der Messwerte erfolgt ausschließlich im Büro. Während der Messung auf dem Gleis überprüft die Software den kontinuierlichen Dateneingang der definierten Messsensoren und alarmiert bei Unregelmäßigkeiten sofort die Messmannschaft. Mit Hilfe einer Kalman Filterung und einer kombinierten Ausgleichung aller Messwerte für diesen Gleisabschnitt werden zuerst Einzelpunkte der dreidimensionalen Gleisachse oder – je nach Spezifikation der Bahn – der tieferen Schiene bzw. beider Schienenstränge berechnet. Die Punktdichte liegt je nach Fahrtgeschwindigkeit bei ca. 15 bis 20 cm. Liegt eine Sollgeometrie des Gleises vor, können die horizontalen und vertikalen Ablagen sowie die Abweichungen der Überhöhung und der Spurweite ausgewiesen werden. Die Resultate werden als ASCII-Files oder als Diagramme (Abb. 3) geliefert. Selbstverständlich können auch direkt Korrekturfiles für Gleisstopfmaschinen wie Plasser&Theurer, Palas etc. geliefert werden. Die Genauigkeit der absoluten Gleislage liegt bei ca. 3 bis 4 mm in Lage und Höhe, der Überhöhung bei ca. 1 mm und der Spurweite bei ca. 0.5 mm.

Liegt keine Sollgeometrie vor oder soll diese optimiert werden, können aus der, durch die dichte Einzelpunktfolge sehr detailliert beschriebenen aktuellen Gleislage, mittels entsprechender Regressionsanalysen optimierte, dreidimensionale Gleisachsen abgeleitet werden. Dies kann auch bei Untersuchungen für Geschwindigkeitssteigerungen sehr hilfreich sein. Dazu sind jedoch weitere Informationen über Engstellen, Fahrdrahtpositionen etc. notwendig.

Hier kommen die Daten der Laserscanner zum Einsatz. Aus den oben beschriebenen Berechnungen resultieren die absolute Position und die Ausrichtung des Gleismesswagens zu jedem Zeitpunkt. Daraus kann die Ausrichtung der fest montierten Scanner berechnet werden. Mit einer Geschwindigkeit von bis zu mehreren 100 Hz scannen die nach außen geschwenkten Scanner Profile mit einer sehr hohen Punktdichte ab. Durch die Vorwärtsbewegung des Gleismesswagens werden diese gemessenen Profile mit nach „vorne“ geschoben und erfassen detailliert alles was in Gleisnähe liegt.

Damit wird eine sehr homogene Punktwolke erzeugt, deren Punkte in Gleisnähe eine höhere Genauigkeit als weiter entfernte Punkte ausweisen. Durch die Verschwenkung der Scanrichtung gegenüber einer Querprofilmessung, die aus der Gleisachse verschobene Montage der Scanner und dem gleichzeitigen Einsatz mehrerer Scanner, wird die Datenqualität zusätzlich erhöht. Als Resultat liegt eine über die ganze Streckenlänge homogene Punktwolke im Koordinatensystem der Bahn vor.

Als Option können zusätzlich Kameras für

die bildliche Erfassung montiert werden. Die Bildauslösung wird mit dem trolley System koordiniert. Damit sind die dreidimensionale Position der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt sowie auch die Ausrichtung bekannt. Die Bilder können rechnerisch der Gleis- oder Bahnachse zugeordnet werden und sind somit leicht auffindbar. In naher Zukunft wird auch die Entzerrung der erfassten Bilder mit Hilfe der Punktwolke möglich sein.

Anwendungsbeispiele

Erfassung der Tunneloberfläche

Bei der Erstellung der neuen Alpentransversale durch das Gotthardmassiv führt die terra sämtliche Vermessungsarbeiten im Auftrag der Bauunternehmung Murer/Strabag aus. Darin enthalten ist auch die Erfassung der Spritzbetonoberfläche vor dem Einbringen der Folie zum Schutz vor eindringendem Wasser. Die Länge der zu messenden Strecke beträgt ca. 19 km.

Für die ersten Arbeiten wurde ein statischer Laserscanner eingesetzt. Es zeigte sich sehr schnell, dass dieses Verfahren die Arbeitsabläufe an der Baustelle zu stark einschränkte, da die Stationierung des Scanners nur im Gleisbereich der Werksbahn erfolgen konnte. Die Oberfläche des Spritzbetons erlaubte nur eine Messdistanz bis maximal 20 m. Bei größeren Einsatzdistanzen zeigten sich nicht tolerierbare Abschattungen in den zu messenden Einbuchtungen.

Zur rationellen Arbeitsausführung wurden die auch auf dem swiss trolley verwendeten Komponenten an eine Lokomotive der Strabag (Abb. 4) montiert und so die Tunneloberfläche mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 m/s erfasst. Für die absolute Positionierung kam eine zielverfolgende Tachymeterstation von Trimble zum Einsatz. Während einer Schicht von 8 Stunden konnte mit diesem System bis 3 km Tunneloberfläche erfasst werden.

Mit der haus eigenen Software erfolgte die Berechnung der Punktwolke (Abb. 5). Mit Hilfe einer Standardsoftware zur Bearbeitung von Scandaten können diese Punkte weiterbearbeitet werden. Entsprechend der Aufgabenstellung wurde die Tunneloberfläche über die Firstpunkte auf eine horizontale Ebene abgewickelt und die Differenzen zu dem Sollprofil berechnet. Mit konventioneller Software werden diese Abweichungen farblich abgestuft dargestellt (Abb. 6) und sind damit sehr leicht interpretierbar. Basierend auf der Punktwolke können Querprofile in beliebiger Dichte oder auch Schnitte in jeder beliebigen Richtung extrahiert werden.

Erfassen des Drahtwerks

Für die Erneuerung eines kompletten Drahtwerks über eine Streckenlänge von ca. 35 km



Abb. 4: Scanausrüstung Tunnel

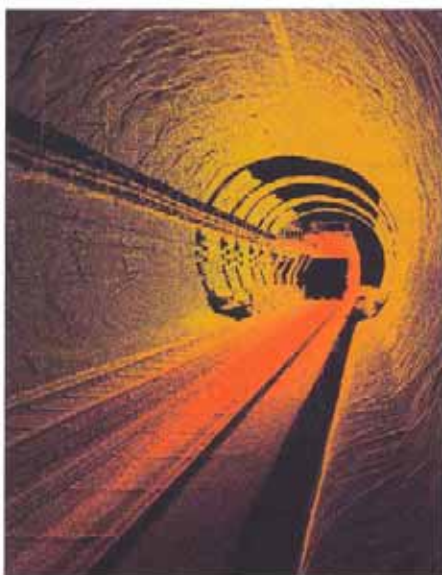


Abb. 5: Punktwolke im Tunnel

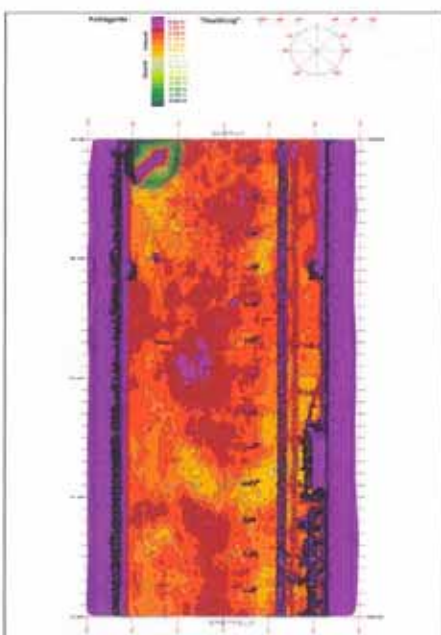


Abb. 6: Differenzplot

fehlten die entsprechenden Grundlagen. Da die aktuelle, absolute Gleislage für diese Aufgabenstellung nicht von Belang war, erfolgten alle Messungen relativ zum Gleis. Mit dem swiss trolley wurde die ganze Strecke nachts mit ca. 5 km/h abgefahren. Zwei Scanner erfassten die ganze Gleisumgebung inkl. aller Drähte und Masten. Das Ergebnis ist wiederum eine zusammenhängende Punktwolke über die ganzen 35 km (Abb. 7). Damit die Datenmenge für die Weiterverarbeitung durch den Auftraggeber reduziert werden konnte, wurden bei jedem Mast ein ca. 1 m breiter Streifen aus der Punktwolke geschnitten und als einzelnes File abgeliefert. Damit war die Bearbeitung mit einem normalen CAD-Programm möglich.

Erfassen und Dokumentieren eines Straßenbahntunnels

Die Verkehrsbetriebe Zürich nutzen einen ca. 2 km langen Tunnel unter dem Expressstraßensystem. Da die Dokumentation dieses Bauwerks und den darin montierten Gleisen mangelhaft war, erfolgte eine neue Bestandsaufnahme mit dem swiss trolley. Dazu musste eine Version mit einer Spurweite von 1 m eingesetzt werden. Da auch kein den modernen Anforderungen genügendes Fixpunktnetz vorhanden war, sind in einem ersten Arbeitsgang im Abstand von ca. 80 m neue Fixpunkte in die Tunnelwände versichert und eingemessen worden.

Während zwei je 3 1/2 stündigen nächtlichen Betriebspausen wurden die 4 km Gleis abgefahren und mit einem zielverfolgenden Tachymeter positioniert. Als Ergebnisse stehen neben den schon oben beschriebenen Diagrammen der Gleise auch die Tunneloberfläche und alle im Tunnel vorhandenen Objekte als Punktwolke zur Verfügung. Zusätzlich sind die Fahrleitungsdaten und Querprofile (Abb. 8) im Abstand von 2 m ausgewertet worden.

Erfassen von Straßenoberflächen

Als moderne Planungsgrundlage sind heute dichte, digitale Geländemodelle gefordert. Die Erfassung solcher Modelle ist oft mit sehr großem zeitlichem Aufwand oder mit starker Gefährdung des Messpersonals durch den Straßenverkehr verbunden. Auch hier kann das kinematische Laserscanning gute Dienste leisten.

Das swiss trolley Messsystem kann auch auf einem Straßenfahrzeug montiert werden. Die terra setzt dazu einen geländegängigen Landrover ein (Abb. 9). Je nach Genauigkeitsanforderung erfolgt die Positionierung mit GPS oder Tachymeter. Bei GPS-Aufnahmen sind Messgeschwindigkeiten bis zu 80 km/h erreichbar. Diese Messmethode kann zur Erfassung von Lärmschutzwänden, Leitplanken etc. sehr hilfreich sein, vor allem wenn man



Abb. 7: Drahtwerk

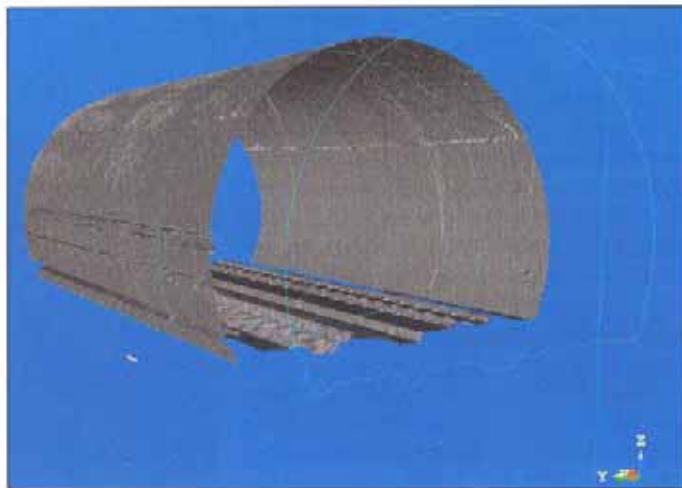


Abb. 8: Querprofile Straßenbahntunnel

sie mit Fotos oder Videofilmen kombiniert. Die georeferenzierte Punktwolke ist auch sehr hilfreich bei der Erfassung von GIS-Daten. Aus der dichten Punktwolke können im klimatisierten Büro am Bildschirm alle notwendigen Objekte angeklickt, extrahiert und mit dem entsprechenden Code versehen im GIS gespeichert werden (Abb. 10). Dieses Verfahren eignet sich auch bestens für die Nachführung bestehender Datensätze.

Arbeitsteilung

Grundsätzlich kann das Laserscanning in zwei Hauptarbeiten unterteilt werden. Erstens in die Erfassung der georeferenzierten Punktwolke und zweitens in die Auswertung und Weiterbearbeitung der Punktwolken. Für den ersten Teil ist ein umfassendes geodätisches Fachwissen notwendig, für den zweiten Teil steht das Fachwissen des Infrastrukturbetreibers im Vordergrund. Deshalb hat sich die terra auf die Datenerfassung bis zur georeferenzierten Punktwolke spezialisiert und bietet für die Weiterbearbeitung der Daten in der Regel nur noch die Mithilfe an. Diese Aufteilung hat sich sehr bewährt, da damit auch das Fachwissen bei den Bahnbetrieben erhalten bleibt.

Ausblick

Die kinematische Erfassung von großen Objekten mit hoher Genauigkeit steht

heute erst am Anfang und wird zunehmend an Bedeutung gewinnen. Kleine, leicht transportierbare Systeme werden die mit hoher Geschwindigkeit messenden Gleismesswagen ergänzen.

Die Zugfolgen bei den Bahnen werden laufend erhöht, die Kapazitätsgrenzen sind teilweise schon erreicht. Da bleibt für Streckensperrungen für Vermessungsarbeiten und Dokumentationen immer weniger Zeit. Deshalb sind flexible und schnelle Lösungen zunehmend gefragt. Moderne Gleisstopfmaschinen richten über 2 km Gleis pro Stunde. Messtrupps mit konventionellen Messmethoden kommen unter optimalen Bedingungen auf eine Tagesleistung von 2 km. Dass die Vermesser hier herausgefordert werden, leistungsfähigere Methoden zu entwickeln, liegt auf der Hand.

Die automatischen Steuerungen von Baumaschinen verlangen zusätzlich nach detaillierten Planungsgrundlagen, die mit den vorgestellten Messsystemen einfach und wirtschaftlich geliefert werden können. Auch die Kontrolle und die Endabnahme neu erstellter Bauwerke werden so stark vereinfacht.

Das swiss trolley System ist flexibel aufgebaut und kann leicht an spezielle Bedürfnisse angepasst werden. Weitere Ausbauschritte sind zurzeit in Arbeit.

Summary / Résumé

Kinematic recording of large linear objects using laser scanning

Large linear infrastructure projects such as roads, railway lines, embankments, etc. require ongoing maintenance and thus need corresponding documentation. Highly accurate kinematic recording of such objects is still in its infancy but is set to gain increasingly in importance. With train headway being constantly reduced, railways are already in some cases running up against capacity limits. Less and less time is left for line closures to carry out surveying and documentation work. Hence there is a growing need for fast, flexible solutions. Small, easily transportable systems will supplement high-speed track recording cars.

Saisie cinématique de grands objets linéaires par balayage au laser

Les grands objets d'infrastructure linéaires, tels que les routes, voies ferrées, remblais etc., doivent être entretenus en permanence et donc être documentés en conséquence. La saisie cinématique de tels objets avec une grande précision n'en est qu'à ses débuts et prendra de plus en plus d'importance. Aux chemins de fer, la densité des trains augmente sans cesse et les limites de capacité sont parfois déjà atteintes. Il reste donc de moins en moins de temps pour interrompre la circulation et permettre d'effectuer les travaux de topographie et de documentation. Aussi, des solutions souples et rapides sont-elles demandées de plus en plus. Des systèmes petits et faciles à transporter compléteront les voitures d'auscultation circulant à grande vitesse.



Abb. 9: Landrover



Abb. 10: Grundlagen für GIS