



Der komplett überwachte Tunnel, auf dem früher die Schmalspurbahn der Britischen Post verkehrte. Eindrucksvoll die Gusseisen-Tübbinge, die noch immer tadellos ihren Dienst tun und im Londoner Untergrund noch oft anzutreffen sind.

Glasfasersensorik

Durchblick im Tunnel

Exakte Messtechnik ist im Tunnelbau aus vielerlei Gründen nötig und oft mit grossem Aufwand verbunden. Doch Sensoren aus Glasfasern, deren Entwicklung und Erprobung Schweizer Forscher der ETH vorangetrieben haben, eröffnen den Forschern und Ingenieuren ganz neue und günstige Möglichkeiten.

Von Ben Kron

Tunnelbauten sind eine der Königsdisziplinen der Ingenieurskunst. Zugleich sind Tunnelbaustellen mit einer Reihe von Risiken behaftet, weshalb die Ausschaltung dieser Risiken und damit die Sicherheit immer zuvorderst stehen. Nebst der eigentlichen Baustelle gilt es heutzutage oft auch die Umgebung vor Schäden zu sichern: Viele Untertagebau-Vorhaben finden in städtischen Grossräumen statt, womit man bestehende Röhren und Gebäude an der Oberfläche unterfährt. Damit es an diesen Anlagen nicht zu Setzungen oder sonstigen Bewegungen kommt,

benötigen Tunnelbauer heute ein umfangreiches Monitoring, sprich zahlreiche Messpunkte und Messgeräte, die eine Überwachung des Baugrundes ermöglichen.

Am Institut für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich sind Messtechniken deshalb eines der zentralen Forschungsfelder, wie der Mitarbeiter Dominik Hauswirth ausführt. Unter anderem forscht man am IGT der ETH Zürich zu Anwendungen der Glasfasersensorik in der Geotechnik. «Unsere Zielsetzungen liegen dabei nicht nur im Tunnelbau, sondern in der Geotechnik allgemein.

Wir setzen die Technologie zum Beispiel in Bohrlöchern oder in oberflächennahen Schlitzen zur Verformungsmessung im Baugrund oder bei Ankerversuchen ein. Dabei entwickeln wir die faseroptischen Messgeräte nicht selber, sondern kaufen sie von Herstellern zu und setzen sie ein, um anwendungsspezifische Lösungen zu erarbeiten.»

Begonnen haben die Forschungen am IGT unter der Leitung von Alexander Puzrin zur Glasfasersensorik etwa 2006. Glasfasersensoren ermöglichen es, entlang einer Glasfaser Temperatur oder Dehnung kontinuierlich zu messen. Doch während einigen Jahren hatte die Technologie den Nachteil, dass sie auf eine räumliche Auflösung der Dehnung oder Temperatur von rund einem Meter oder mehr beschränkt war.

Pro Zentimeter ein Sensor

Inzwischen wurde die Technologie von der Seite der Messgerätehersteller weiter entwickelt, Auflösungen im Bereich von bis unter einem Zentimeter sind möglich. Hauswirth: «Das heisst, dass man entlang einer installierten Glasfaser über jeden Zentimeter Messungen über die Dehnung oder Temperaturveränderungen vornehmen kann. Während man früher eine Strecke mit einzelnen Sensoren in grösseren Abständen mass, hat man durch die Glasfaser quasi jeden Zentimeter einen Sensor. Und das lässt sich über längere Strecken von einigen Dekameter so weiterziehen.»

Man kann auch Strecken von mehreren Kilometern beobachten, wobei dann aber die räumliche Auflösung der Messung schlechter wird und man dann nur noch etwa jeden Meter oder mehr einen Sensorpunkt hat. Je nach dahinter eingesetzten Geräten und kurzen Sensorlängen lassen sich diese Messungen in zeitlich sehr kurzen Abständen hintereinander messen, so dass die Forscher beinahe ein Abbild in Echtzeit erhalten.

Baupraktisches Kabel entwickelt

Neben der Auflösung war die Zerbrechlichkeit der Glasfasern auf dem Baustellenumfeld ein weiteres Anfangsproblem. Damals haben die Forscher des IGT via KTI-Projekt an der Entwicklung und Anwendung robuster Glasfaserkabel bei der Firma Brugg Kabel (heute Solifos) mitgewirkt. Diese Kabel sollten möglichst robust sein, also baupraktisch, auf der Baustelle gut einsetzbar, ohne das Risiko, dass der Sensor bald kaputt geht.

Zum Einsatz kamen solche Glasfasersensoren unter anderem beim Projekt «Crossrail» in London (siehe Infobox «Das 18-Milliarden-Projekt Crossrail» Seite 22). «Das IGT war dort als einer von verschiedenen Partnern beteiligt, unter Federführung des Imperial College.» Ende 2012 verlegten die Schweizer Forscher ein Glasfasersensoren-



Diverse Sensoren, auch aus Glasfasern, wurden von den Wissenschaftlern im «Royal Mail»-Tunnel verlegt, um Bewegungen zu messen, welche die Tunnelbohrmaschine verursachen könnte.

sorkabel in London direkt in den Boden, in einen rund 30 Zentimeter tiefen Schlitz. Weitere Kabel wurden in Bohrlöchern installiert. Danach beobachtete man, wie sich die Oberfläche und die tieferliegenden Schichten verhalten, wenn sie von einer Tunnelbohrmaschine unterfahren werden. Kommt es zum Beispiel zu schädlichen Setzungen oder Horizontalverschiebungen?

Etwa 25 Meter tiefer wurden zur selben Zeit in einem fast 100jährigen Tunnel diese und andere Sensortechnik getestet, in einem Mess-Objekt der besonderen Art. Der «Royal Mail»-Tunnel wurde benutzt, um Post durch London zu transportieren. Die Post betrieb im Untergrund London von 1927 bis 2003 hierfür ein eigenes Schmalspurnetz (610 mm) von selbstfahrenden Zügen, auf einer Strecke von bis zu 10,5 Kilometern.

Messungen in Echtzeit

In einem 30 Meter langen Teil installierten Ingenieure des Centre for Smart Infrastructure and Construction (CSIC) hunderte Sensoren, unter anderem Glasfaserkabel, um jede Bewegung des Tunnels zu messen. Die Wissenschaftler wollen in Echtzeit und bis ins Detail wissen, wie gross Setzungen oder sonstige Veränderungen ausfallen. Die Grössenverhältnisse der benachbarten Röhren könnten dabei unterschiedlicher nicht sein: Der alte Tunnel misst 2,5 Meter im Durch-

messer, bei den beiden neuen Röhren sind es fast 11.

Die Forscher des CSIC nutzen verschiedene preisgünstige Technologien, die zusammen Bewegungen von Hundertstel Millimetern messen und so zu jedem Zeitpunkt ein Bild des Tunnelzustands in Echtzeit wiedergeben. Gerade die geringen Kosten der angewandten Methoden, verglichen mit herkömmlichen Messtechniken, deren einfache Installation und der geringe Stromverbrauch der Geräte erweitern die Möglichkeiten von Tunnelmonitoring.

Langlebige Sensoren

Konkret wurden entlang des Tunnels neben Glasfaserkabeln auch kabellose Wegmessgeräte installiert, die Verschiebungen eines Tunnelteils gegenüber dem nächsten messen. Via einfache WLAN-Sender werden alle Daten an eine Empfangsstation gesendet. Ein Doktorand erfand zudem extrem langlebige und sparsame Sensoren, die Temperatur, Feuchtigkeit, Beschleunigung und Neigungswinkel messen und jahrelang ohne Batteriewechsel arbeiten. Photogrammetrische Bildmessungen erlauben es, wesentlich mehr einzelne Punkte zu berechnen als mit früheren Methoden. Am Ende lassen sich die Vorgänge im Tunnel anschaulich und detailliert visualisieren. FORTSETZUNG AUF SEITE 20



Bilder: Uni Cambridge (CSIC) / twitter

Nachgefragt

Haben Sie die Forschungen in London mitverfolgt und können Sie allenfalls einen fachlichen Kommentar dazu abgeben?

Die Sensortechnologie im Untertagebau hat sich rasant entwickelt. Die auf Glasfasertechnik basierende Messtechnik, die in England angewendet wird, erlaubt eine genaue und kontinuierliche Erfassung der Verformungen entlang des Glasfaserkabels. Vor allem kann man damit auch entlang einer gekrümmten und sehr langen Linie lückenlose Messungen mit hoher Präzision vornehmen. Das Prinzip ist schon länger bekannt, doch früher waren die Instrumente noch wesentlich schwieriger zu installieren und zu handhaben. Mit dem Glasfaserkabel lassen sich einfacher und wirksamer Messungen vornehmen, und das über grössere Distanzen.

Gibt es in der Schweiz überhaupt Tunnel mit einer Auskleidung aus Gusseisen-Tübbinggen wie in London?

Meines Wissens nicht. Gusseisen wurde im Tunnelbau im 19. Jahrhundert oft eingesetzt, in den Anfangszeiten der Industrialisierung. Damals war es in den USA und Grossbritannien günstig und in grossen Mengen vorhanden, während man Stahlbeton noch nicht kannte. In der Schweiz werden im Tunnelbau einzelne spezielle Stahl-Elemente verwendet, zum Beispiel bei den Querschlägen eines Zweirohr-Tunnels, und zwar dort, wo der herkömmliche Tübbingring unterbrochen wird.

Sind diese alten Metalltunnel weniger stabil als moderne mit Stahlbeton-Tübbinggen?

Das kann man so nicht sagen. Die alten Tunnel sind noch in Funktion und haben ihre Stabilität über einen langen Zeitraum behalten. So zum Beispiel der unterseeische East River Tunnel in New York, der 1909 gebaut wurde.

Wie werden in der Schweiz die Auswirkungen von Vortriebsarbeiten auf bestehende Röhren und Gebäude kontrolliert?

Die messtechnische Überwachung ist ein unabdingbares Sicherheitselement jedes Untertagebau-Projekts. Seit die Messtechnik soweit war, also seit etwa 40 Jahren, ist es bei uns Standard, während jedes Vortriebs allfällige Verformungen in der Umgebung zu überwachen. Sei dies im städtischen Gebiet, wo viele Rohre und Gebäude betroffen sind, oder auch bei benach-

barten Tunnelröhren. In speziellen Fällen überwachen wir die Umgebung auch in Realzeit, so wie in London. Die Geräte nehmen also Messungen in einem bestimmten Zeittakt vor und übermitteln die Resultate laufend selbst, ohne dass jemand vor Ort gehen muss. Solche Messungen waren zum Beispiel ein wesentlicher Bestandteil des Sicherheitskonzeptes des Weinbergtunnels der Durchmesserlinie, im anspruchsvollen Streckenabschnitt nah zum Südtakt des Hauptbahnhofs.

Gibt es aktuelle Tunnelbauprojekte, die Sie wissenschaftlich begleiten oder beraten?

Ich begleite unter anderem die Planung des Gibraltar-Tunnels, ein in politischer, wirtschaftlicher und technischer Hinsicht komplexes Projekt. Technisch bewegen wir uns an der Grenze der Machbarkeit: Wir haben es in der Mitte der Meerenge von Gibraltar mit einer Wassertiefe von 300 Metern zu tun, viel mehr als im Ärmelkanal-Tunnel. Dazu besteht der Baugrund über eine Strecke von etwa vier Kilometern aus weichem Lockergestein.

Worin genau besteht das Problem?

Wir haben es mit einem Gebirge sehr niedriger Festigkeit unter hohem Wasserdruck zu tun. Solches Gebirge hat die Tendenz, einen Hohlraum wie einen Tunnel vollständig zu schliessen. Oder aber es übt einen sehr hohen Druck aus, wenn man den Tunnel auskleidet. Wenn wir hier nun eine Tunnelbohrmaschine einsetzen, läuft sie Gefahr, durch den Druck eingeklemmt zu werden. Die hohe Druckhaftigkeit des Gebirges in Kombination mit der grossen Länge des betroffenen Streckenabschnittes und seiner Lage – in der Mitte der Meerenge – ist die technische Herausforderung. Dieser mittlere Bereich von etwa vier Kilometern ist entscheidend für die Machbarkeit des insgesamt 40 Kilometer langen Tunnels.

Auf welche Themen konzentriert sich die Arbeit in Ihrem Institut im Moment?

Es gibt zwei Themen, die seit dem Beginn meiner Arbeit an der ETH 2003 Schwerpunkte unserer Forschung bilden: quellfähiges Gebirge und druckhaftes Gebirge, was sich mit den lokalen geologischen Gegebenheiten erklärt. Vor allem in der Nordwestschweiz sind Gesteine weit verbreitet, welche die Eigenschaft haben, Wasser aufzunehmen und ihr Volumen zu vergrös-

... bei Georgios Anagnostou



Bild: ETH Zürich

Georgios Anagnostou ist Professor für Untertagebau am Institut für Geotechnik (Departement Bau, Umwelt und Geomatik), ETH Zürich.

sern. Am problematischsten sind die Anhydrit führenden Gesteine der Gipskeuperformation. Wir können in dieser Formation zwar einen Tunnel bauen, aber dies oft nicht mit der sonst üblichen Zuverlässigkeit. Aufwendige Sanierungsarbeiten sind nicht selten im Gipskeuper und zwar manchmal bereits während des Baus, wie die Beispiele von Belchentunnel oder von Chienbergtunnel zeigen. Druckhaftes Gebirge wiederum neigt nach dem Ausbruch einer Röhre zu grossen Verformungen. Es handelt sich um Gesteine geringer Festigkeit, insbesondere wenn sie in grösserer Tiefe angetroffen werden. Bekannt ist etwa das Tavetscher Zwischenmassiv, dessen Bewältigung beim Bau des Gotthard-Basistunnels innovative Lösungen erforderte. Auch bei der Umfahrung Visp kam es zu relevanten Verformungen.

Weshalb weiss man über die Eigenschaften des Gipskeupers nicht besser Bescheid?

Das Verhalten von Anhydrit führenden Gesteinen ist nur sehr schwer zu erforschen. Selbst unter Laborbedingungen dauern felsmechanische Versuche äusserst lange. Ein Beispiel: Wir haben 2007 eine Serie von Langzeitversuchen an Gipskeuperproben gestartet, um dessen Verhalten zu beobachten. Die Quellung des Gesteins ist nun aber nach über zehn Jahren immer noch nicht zu Ende. Und wir wissen auch nicht, wie lange der Versuch noch dauert. So lange Versuchsperioden aber bedeuten, dass man nicht leicht gesicherte Erkenntnisse gewinnen kann. (bk)



Bilder: SBB, Terra Vermessungen AG

Bild oben: Der Weinbergtunnel kurz vor dem Durchschlag 2010. Beim letzten Teilstück der Durchmesserlinie vor dem Bahnhof in Zürich stellten Echtzeitmessungen sicher, dass umliegende Gebäude und Tunnels keinen Schaden nahmen.



Bild rechts: Auch in neu ausgebrochenen Tunnelröhren sind zahllose Messungen vorzunehmen, wie hier mit einer mobilen Georadarausrüstung der Terra AG im Tunnel Lopper.

Gewisse Bewegungen des «Royal Mail»-Tunnels durch die Vortriebsarbeiten waren dabei unvermeidlich, allerdings handelte es sich um Bewegungen im Millimeterbereich. Die Fragen richteten sich nach der Form der verursachten Bewegungen, und ob diese sich innerhalb der Toleranzgrenzen bewegen. Die auftretenden und zu messenden mechanischen Kräfte sind dabei höchst komplex. Chris Dulake, der Crossrail-Chefingenieur, zog in einem Fachartikel eine positive Bilanz: «Die durch unsere Bohrarbeiten verursachten Bewegungen, die wir bisher beobachtet haben, sind viel geringer als angenommen.»

Zukunft der Infrastruktur

Die Ergebnisse der Versuche im «Royal Mail»-Tunnel sind nicht nur für «Crossrail», sondern für die Zukunft der Londoner Infrastruktur selbst von Bedeutung: Alte, mit Gusseisen-Tübbingen ausgekleidete Tunnel finden sich in der britischen Metropole noch jede Menge, ganz im Gegensatz zum Beispiel zur Schweiz (siehe «Nachgefragt bei Georgios Anagnostou», Seite 19). Das Verhalten dieser alten Röhren unter Belastung und damit deren Eigenschaften zu kennen, hilft beim Erhalt dieser vielen Tunnel.

Während die Glasfasertechnologie beim Crossrail-Projekt also schon vor einigen Jahren zum Einsatz kam, fand sie anfangs in unserer Baubranche kaum Verbreitung. Die Schweizer Firma Omnisens fertigte schon früh Messgeräte und setzte die Glasfasersensorik zur Überwachung entlang von Pipelines ein, unter anderem um potenzielle Bewegungen des Untergrundes zu detektieren und einen Schaden der Pipeline zu verhindern.

Neben solchen Aufgaben im Monitoring wird die Glasfasersensorik immer mehr auch für ingenieurtechnische Problemstellungen herangezogen. Die Technologie kann bei statischen Pfahlversuchen oder Ankern eingesetzt werden, generell dort, wo klassische Sensoren nicht einsetzbar sind, weil der Ort nicht einsehbar ist oder eine räumlich kontinuierliche Messung erforderlich ist. An der ETH wurden einige Basisarbeiten zu solchen Anwendungen geleistet, danach haben Doktoranden des IGT ein Spinoff-Unternehmen namens Marmota Engineering gegründet, das solche Anwendungen in der Bauindustrie begleitet. Daneben ist im Tessin die Firma Smartec im selben Segment tätig.

Am Institut für Geotechnik der ETH wird diese Form der Sensorik oft bei Laborversuchen eingesetzt, da die mögliche Auflösung der Messungen zeitlich und räumlich so weit heruntergekommen ist, dass man damit das Verhalten von Experimenten im Labor messen kann.

Messungen im Asphalt

Ein weiterer Versuch des IGT dürfte Strassenbauer interessieren: «Wir haben Glasfaserkabel direkt in den Asphalt eingebaut, um sein Verhalten unter Verkehrslast zu beobachten. Dank Weiterentwicklungen der Gerätehersteller kann man heute bei kurzen Sensoren zeitlich hoch aufgelöste Messungen vornehmen, mit hundert Messungen pro Sekunde. So sind also dynamische Messungen möglich.»

Die damaligen Messergebnisse aus London haben die Doktoranden des IGT 2014 auf einer Konferenz des CSIC vorgestellt. Dort präsentierten die ETH-Forscher noch eine sicherheitstechnische Anwendung, eine Art Trittsensor bei der sie ein Glasfaserkabel in den Boden verlegt haben um Dehnungen zu detektieren durch Personen, die den Boden um das Kabel betreten. ■

FORTSETZUNG AUF SEITE 22

DELTA BLOC®

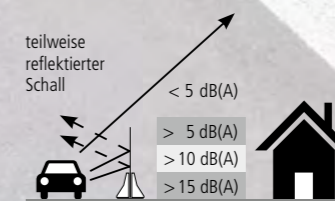
Lärmschutz und Rückhaltesystem in einem



Zwei Produkte ergeben ein perfektes System

Das Rückhalte- und Lärmschutzsystem DELTA BLOC® dient zur Sicherung des Fahrbahnrandes oder des Mittelstreifens auf Autobahnen und Schnellstrassen.

Die massgebliche Lärmquelle im Strassenverkehr ist das Abrollgeräusch von vorbeifahrenden Fahrzeugen. Der Einsatz von Lärmschutzwänden ist umso wirksamer, je näher das Lärmschutzsystem an der Lärmquelle positioniert werden kann.



Verbesserte Schallabschirmung durch das Rückhalte- und Lärmschutzsystem DELTA BLOC®.

www.creabeton-materiaux.ch
Telefon 058 458 84 84



«Crossrail» ist das grösste Infrastrukturprojekt in der Geschichte Grossbritanniens, das auch an der Oberfläche einige grosse Baustellen mit sich brachte, wie hier an der Canary Wharf.

Das 18-Milliarden-Projekt «Crossrail»

In London verkehren seit 1863 unterirdische Personenzüge, was die «Tube» zur ältesten U-Bahn der Welt macht. Ihre Entstehung verdankte sie zwei Umständen: Zum einen wuchs die britische Metropole im 19. Jahrhundert rasant an und war um 1850 mit geschätzten zweieinhalb Millionen Menschen eine der grössten Städte der Welt. Die Infrastruktur aber hielt mit diesem sprunghaften Wachstum nicht mit, denn der Ausbau der bereits bestehenden Eisenbahn war blockiert. Der zweite Grund waren also die einflussreichen Londoner Landbesitzer im britischen Parlament, die ein Verbot durchboxten, Eisenbahnlinien bis in die Innenstadt zu legen.

Aufschneiden und Zuschütten

Südlich der Themse war die Anglikanische Kirche die grösste Grundbesitzerin; dort waren neue überirdische Bahnlinien damit möglich. Im Norden gab es nur eine Lösung: unter die Erde. «Cut and Cover» lautete die Devise, in Anlehnung an die damals übliche Tunnelbauweise: Die Erde aufschneiden, die Bahnlinie in den Graben legen und alles wieder zuschütten. So wuchs die Untergrundbahn rasch heran, wobei man immer entlang öffentlicher Strassen und deshalb mitunter im Zickzack bauen musste, um Klagen von privaten Landbesitzern auszuweichen. Diese sogenannte Unterpflaster-Bahn lag dabei nur gerade fünf Meter unterhalb des

Bodens, und der in Tagbau entstandene Tunnel mass 25 Fuss (7,62 Meter) im Durchmesser.

Doch von all den Startschwierigkeiten war die Entwicklung der Tube nicht aufzuhalten. Nach der ersten Linie, der «Metropolitan», folgte schon 1864 die zweite namens «Hammer-smith & City». Bald entwickelte man auch mechanische Vortriebsmethoden im Untertagbau, wo richtungsgrenzte Röhrenbahnen entstanden, die nur noch einen Tunneldurchschnitt von 3,55 Metern benötigten.

Quantensprung Elektrifizierung

Einen Quantensprung machte das Londoner Verkehrsmittel 1890 mit der Elektrifizierung, was das Problem des Rauchs der Dampflokomotive unter der Erde beseitigte. Mit Schildvortrieben konnte man zudem in Tiefen von bis zu 50 Metern neue Tunnel ausbrechen.

Heute besitzt die «Tube» elf Linien und ein Streckennetz von gut 400 Kilometern und befördert jedes Jahr weit über eine Milliarde Fahrgäste im Metropolitanraum London. Doch die Kapazität der teilweise in die Jahre gekommenen Infrastruktur hält abermals nicht mit dem Wachstum der Stadt mit.

Deshalb wurde 2009 das Projekt «Crossrail» gestartet, nichts weniger als das grösste Untertagbau-Projekt Grossbritanniens. Mit einer Projektsumme von über 18 Milliarden Franken kann

es sich sogar mit unserem Jahrhundertprojekt Gotthard-Basistunnel messen, und auch hier reicht die Planung weit zurück. Erste Vorschläge gab es hier schon 1948.

«Crossrail» besteht im wesentlichen in einer neuen Ost-Westverbindung, welche den Grossflughafen Heathrow im Westen mit den boomenden Vorstädten im Osten verbindet, weitestgehend unterirdisch. Die neue Verbindung erhält dabei komplett eigene Gleisstrecken und Bahnhöfe, wird in London aber mit dem bestehenden Netz des öffentlichen Verkehrs verknüpft.

8 innerstädtische Haltestellen

Neben 42 Kilometern Tunnelstrecke werden im Rahmen des Projekt acht grosse Haltestellen mitten in der Stadt neu gebaut, was bei jeder einzelnen eine logistische Meisterleistung aller Beteiligten erforderte. Wer die einzigartigen Bauarbeiten mitverfolgen will, kann auf DVD die mehrteilige BBC-Dokumentation «The 15 Billion Pound Railway» erwerben (aus Grossbritannien für rund 25 Pfund); ein Augenschmaus für jeden Fan des Untertagbaus.

Wer «Crossrail» selber in Aktion erleben will, muss sich im übrigen noch gedulden. Die für dieses Jahr angekündigte Inbetriebnahme hat sich auf Herbst 2019 verschoben. Aber bei einem Jahrhundertprojekt spielen ein paar Monate keine Rolle, zumindest für den Fan. (bk)

Neu:

RACO 3300

RACO 4000

Ihr Multitalent für die Schweiz



Der RACO Dumper von Robert Aebi ist eine robuste Maschine mit Schweizer Wurzeln. Rechtzeitig zum 40. Jubiläum gibt es den zuverlässigen Begleiter neu mit bis zu 4 Kubikmetern Ladevolumen. Er ist leistungsstark, wendig und kompakt. Seine Leistung stellt er auch mit 5 t Anhängelast unter Beweis. Ein weiteres Plus: Der RACO entspricht bereits der neuen Abgasstufe 5.

Kontaktieren Sie uns und testen Sie das Multitalent RACO.

**raco@robert-aebi.com
oder +41 44 842 51 11**