

Kontinuierliche Verformungsmessung vor der Tunnelbrust mit dem RH-Extensometer (RHX) und dem Modularen RH-Extensometer (M-RHX)

Patrick R. Steiner, Solexperts AG, (11-2008)

1 Zusammenfassung

Das RH-Extensometer (Reverse Head Extensometer) wurde entwickelt, um kontinuierliche Verformungsmessungen vor der Tunnelbrust während des Vortriebs zu ermöglichen. Das Auslesen von Messdaten ist trotz des Rückbaus des Messgestänges während des Vortriebs möglich. Dies wird durch die Platzierung des Messkopfes, der die Sensoren und die Datenaufzeichnung enthält, im Bohrlochtiefsten ermöglicht. Das heisst, der Messkopf ist am weitesten von der Brust entfernt und wird somit während des Vortriebs zuletzt erreicht. Während einer Auslesung werden die Messdaten durch Funk oder Datenkabel im zentralen Mittelrohr an die Ortsbrust übertragen. Die grossen Vorteile des RH-Extensometers gegenüber dem klassischen Gleitmikrometer sind die kontinuierlichen Messdaten und die geringere Störung des Vortriebs. Das Modulare Reverse Head Extensometer (M-RHX) ist die Weiterentwicklung zu einem modularen System, welches einen geringeren Bohrlochdurchmesser benötigt.

Sehr gute praktische Erfahrungen wurden beim Einsatz des RHX beim Bau des Gotthard Basistunnels gesammelt. Bei diesem 57 km langen Basistunnel durch die Schweizer Alpen werden kontrollierte Deformationen zwischen 0.5 und 0.7 m bei Ausbruch der 13m grossen Tunnelröhren zugelassen.

2 Einleitung

Heutzutage werden immer häufiger Tunnels mit sehr grossen Überlagerungen, schlechterem Fels und immer komplexerer Geologie aufgeföhren. Um unter diesen Bedingungen effizient und sicher zu arbeiten, wird der Vortrieb häufig mit der «Beobachtungsmethode» gesteuert. Diese erfordert eine ständige messtechnische Überwachung des Vortriebs und die Anpassung des Ausbausystems an die jeweiligen geologischen Bedingungen. (Lunardi P., 1998). Die Elemente des

Ausbausystem, die dabei variiert werden können, sind unter anderem: Ankerungssystem, Abstand zwischen den Stahlbögen, Einsatz von hochdeformierbaren Betonelementen (hiDCon) in der Spritzbetonschale, Spritzbetonstärke, Vorbehandlung der Ortsbrust, Abschlagslänge, usw. Die Überwachung der «Extrusion», d.h. die axiale Verschiebung der Ortsbrust, ist eine sehr wichtige Messgröße, um Aussagen über das Gebirgsverhalten zu treffen. Die klassische Instrumentierung hierfür beinhaltet das Gleitdeformometer für weichen Untergrund und das Gleitmikrometer für Messungen im Festgestein (Kovári, et al, 1979). Für den Einsatz dieser Messsysteme müssen Messrohre in die Ortsbrust eingebaut werden. Die manuelle Auslesung erfolgt durch Herausziehen der Messsonde aus dem Bohrloch, wobei die Messpositionen nacheinander angefahren werden.

3 Messprinzip des RH-Extensometers

Das RHX wurde entwickelt um kontinuierliche, automatische Messungen der Deformation der Ortsbrust und des noch auszubrechenden Gebirges davor zu erhalten. Das Gestänge und der Messkopf werden in ein Bohrloch in der Ortsbrust einzementiert. Da der Messkopf, welcher den Datenspeicher und die Sensoren enthält, sich an der tiefsten Stelle des Bohrlochs befindet, sind Messungen möglich, wenn Gestänge und Sensoren des RH-Extensometers während des Vortriebs ausgebrochen und dabei zerstört werden. Aktuelle RH-Extensometer sind zwischen 30 und 40 m lang und verfügen über 6 Messpunkte (siehe Abbildung 1).

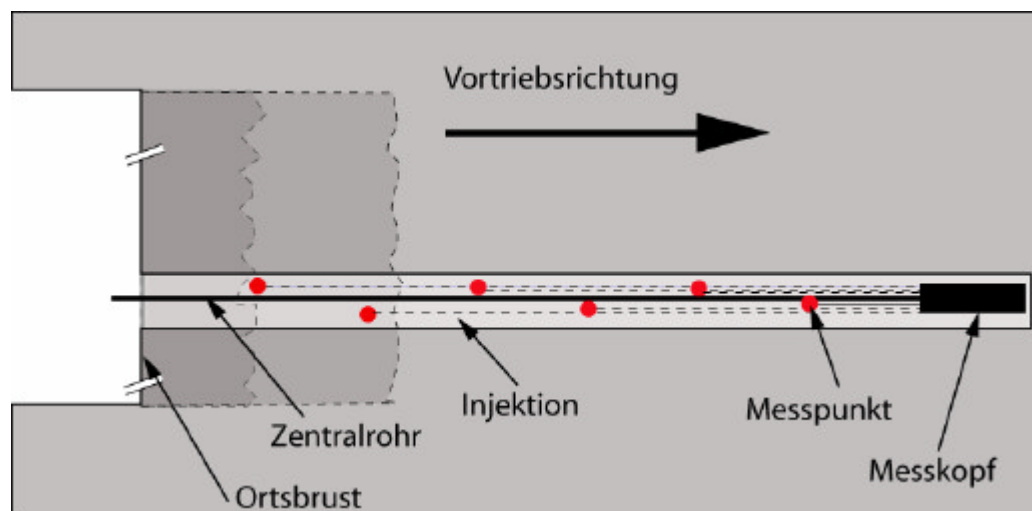


Abbildung 1: Messprinzip des RH Extensometers

Der Messkopf besteht aus zwei Teilen (Abbildung 2 & 3):

- 1) Messeinheit mit 6 Wegaufnehmern, einem Temperatursensor und einer optionalen Porenwasserdruckmesszelle
- 2) Dateneinheit, mit der die Messdaten gespeichert und per Funk weitergeleitet werden.

Der Weg der Wegaufnehmer beträgt 500 mm mit einer Genauigkeit von ± 0.1 mm.

Die Dateneinheit besteht aus einem Datenlogger, einem Funkmodul mit einer externen Antenne und einer Batterie zur Stromversorgung. Die Batterie versorgt das System für 3 bis 4 Monate mit Energie. Die Dauer der Energieversorgung ist abhängig von der Umgebungstemperatur und der Aufzeichnungsgeschwindigkeit der Messdaten. Der Messtakt des Datenloggers kann von einer Messung pro 10 Sekunden bis zu einer Messung pro Tag eingestellt werden. Die Aufzeichnungsrate kann angepasst werden, wenn eine Verbindung mit dem Auslesegerät zum Auslesen der Daten hergestellt ist. Durch die grosse Speicherkapazität des Datenloggers (bis zu 16'000 Messwerte) verlängert sich das Intervall, in welchem die Messdaten ausgelesen werden müssen. Bei einer Messung pro Stunde und Kanal können Messdaten über einen Zeitraum von 80 Tagen ohne Auslesung gespeichert werden.

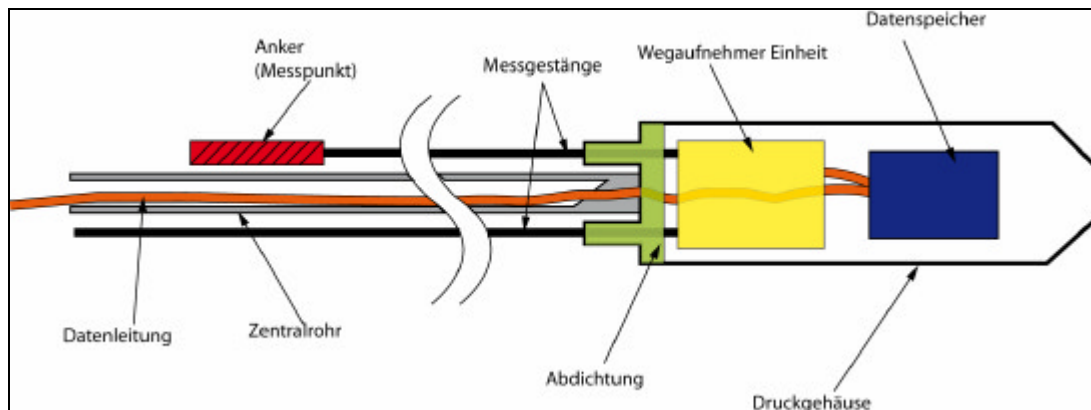


Abbildung 2: Schema des RH-Extensometer Messkopfes

Die Datenübertragung kann auf zwei unterschiedlichen Wegen realisiert werden. Innerhalb des Zentralen Mittelrohres verläuft ein Kabel, welches die Datenleitungen sowie eine Antenne enthält. Das Kabel ist mit dem Messkopf verbunden und liegt lose im zentralen Mittelrohr. So wird das Risiko eines Kabelbruches während des Vortriebs minimiert. Im Funkmodus dient das Kabel als Antenne. Nach einigen Abschlägen wird das Zentralrohr freigelegt. Die Antenne des Auslesegerätes, welches ein Funkmodul enthält, wird bei dem zentralen Mittelrohr

platziert und die Daten können per Funk ausgelesen werden. Als zweite, redundante Möglichkeit wird das Auslesegerät direkt an das Kabel angeschlossen und die Daten herunter geladen. In der Praxis zeigt sich, dass die zweite Möglichkeit praktischer und zuverlässiger ist.

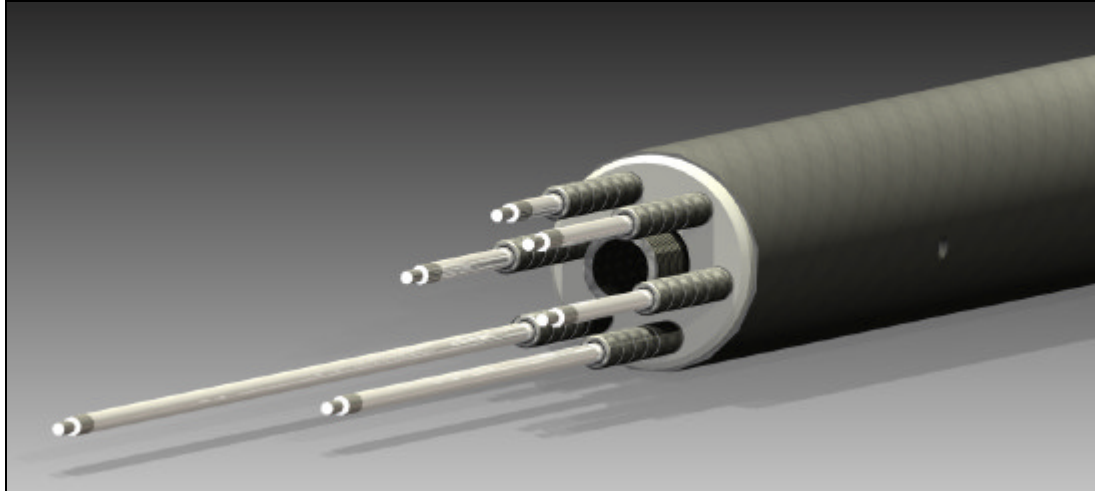


Abbildung: 3 Detailansicht des RHX Messkopfes

Im Gotthard Basistunnel (Baulos Sedrun) wurden Messdaten alle 2 bis 4 Tage ausgelesen, je nachdem wie das Zentralrohr an der Ortsbrust zugänglich war. Der Auslesevorgang erfolgt sehr rasch und der Aufenthalt an der Tunnelbrust dauert im Normalfall weniger als 10 Minuten.

4 Prinzip des M-RHX

Beim M-RHX, dem Modularen Reverse Head Extensometer handelt es sich um die Weiterentwicklung des RHX. Der M-RHX verfügt über eine höhere Anzahl an Messpunkten und kann in kleineren Bohrlochdurchmessern als der RHX eingebaut werden. Hierfür wurde das M-RHX in zwei Systemkomponenten aufgeteilt. Die erste Komponente beinhaltet die Weg-Messmodule, die modular hintereinander platziert werden können. Diese Module sind teleskopartig aufgebaut, wobei die Relativverschiebung zwischen den einzelnen Messstellen gemessen wird. Die Messstellen enthalten neben dem Wegaufnehmer auch einen Datentransferchip, in dem die Daten gespeichert und weitergegeben werden. Im zentralen Mittelrohr verlaufen die Datenleitung, über welche auch ausgelesen wird, und das Gestänge, welches die einzelnen Messstellen mechanisch miteinander verbindet.



Abbildung 4: Weg-Messmodul

Die zweite Komponente ist der Messkopf. Im Messkopf befinden sich der Hauptspeicher, der Datenprozessor und die Stromversorgung. Von hier aus werden im eingestellten Messtakt die einzelnen Wegmessmodule abgefragt; vom Bohrlochtiefsten nach vorne. Zum Auslesen wird das Auslesegerät an die Datenleitung angeklemt und die gespeicherten Daten aus dem Datenspeicher ausgelesen. Das ganze System ist so aufgebaut, dass bei einem Kurzschluss durch den Vortriebsprozess nur das nächste Modul betroffen ist und die Kommunikation mit den restlichen, dahinter liegenden, Modulen nicht betroffen ist.

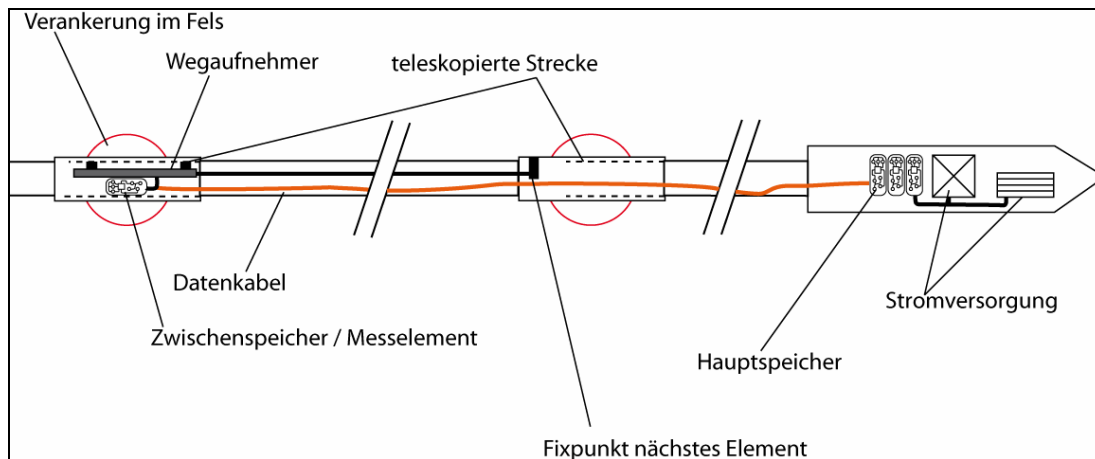


Abbildung 5: Prinzip M-RHX

Es können bis zu 16 Weg-Messmodule hintereinander eingebaut werden. Durch unterschiedliche Distanzstücke kann der Abstand zwischen den Messmarken variiert werden.

Im weiteren Text wird immer vom RHX gesprochen, Abweichungen des M-RHX dazu werden angegeben.

5 Verlauf des Einbaus

Die 6 Messpunkte sowie die Länge und der Verschiebungsbereich des teleskopierten Zentralrohres werden bei der Herstellung festgelegt. Beim M-RHX sind die einzelnen Wegmessmodule identisch, die Distanzstücke werden angepasst.

Das RH-Extensometer wird aufgerollt auf die Baustelle geliefert. Das Zentralrohr sowie das M-RHX werden als Paket mit einer maximalen Länge von 3 m geliefert.

Für das RHX wird ein Bohrlochdurchmesser von 101 mm, für das M-RHX von 64 mm benötigt. Das Bohrloch kann vor dem Einbau zur geologischen Vorauserkundung genutzt werden. Das System wird vor dem Bohrloch entrollt und zusammengesteckt. Anschliessend wird die Datenaufzeichnung gestartet, das System in das Bohrloch eingeschoben und der Ringraum ausinjiziert. Nach dem Aushärten des Injektionsmaterials werden die Wegaufnehmer auf Null gesetzt und die Nullmessung durchgeführt.

Die weiteren Messungen werden in der benutzerdefinierten Frequenz aufgezeichnet. Das gesamte System wird auf die Bedürfnisse der Baustelle angepasst. Die Länge des Systems richtet sich nach den Bedingungen auf der Baustelle, den vorhandenen Möglichkeiten horizontale Bohrlöcher zu erstellen, dem eingesetzten System (RHX

bis etwa 40 m und M-RHX bis etwa 80 m) und der gewünschten Anzahl Messpunkte (RHX bis 6 Punkte, M-RHX Standard bis 16 Punkte)

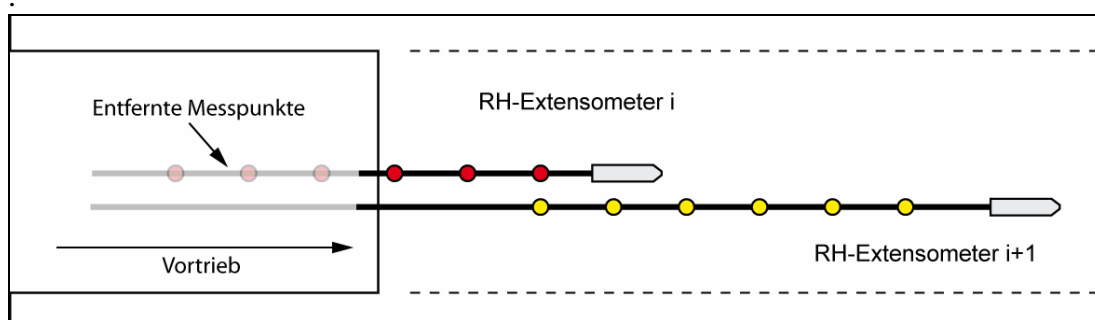


Abbildung: 6 Überlappende eingebaute RH-Extensometer für kontinuierliche Messungen

Um kontinuierliche Messungen während des Vortriebs zu gewährleisten und die Deformationen der Ortsbrust lückenlos zu überwachen, werden mehrere Messsysteme überlappend eingebaut. (siehe Abbildung 6). Für den überlappenden Einbau gibt es zwei Möglichkeiten. Bei der ersten Variante werden zwei Systeme gleichzeitig installiert, eines um den näheren Bereich der Ortsbrust zu überwachen, eines um den entfernten Bereich zu messen. Das zweite System wird hierbei mit einem langen Zentralrohr installiert, so dass der erste Messpunkt des tieferen Systems sich mit dem letzten Messpunkt des flacheren Systems überschneidet. Bei der zweiten Variante wird das Bohrloch für das tiefere System nach einem gewissen Fortschritt des Vortriebs erstellt. Bei dieser Variante werden insgesamt weniger Bohrmeter benötigt. Im Baulos Sedrun wurde der ersten Variante gegenüber der zweiten Variante aus Kostengründen der Vorzug gegeben. Beim M-RHX bietet sich die zweite Variante an.

6 Messungen und Ergebnisse

Die Messergebnisse, die mit dem Modularen oder normalen Reverse Head Extensometer gewonnen werden, unterscheiden sich in mehreren Punkten von der klassischen linienweisen Verschiebungsmessung mit dem Gleitmikrometer oder vergleichbaren Systemen. In Abbildung 7 sieht man die typische Anwendung eines Gleitmikrometersystems in der Tunnelbrust (Rossi, 1995). Die Gleitmikrometer-Messrohre werden in ein Bohrloch in der Tunnelbrust eingebaut.

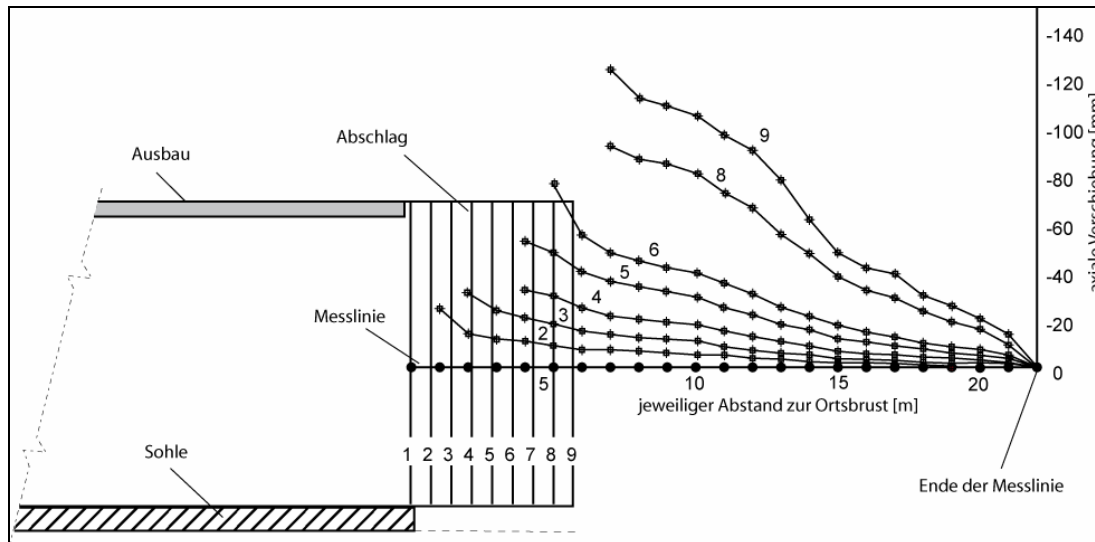


Abbildung 7: Gleitmikrometer Messungen: Die Variation der axialen Verschiebung der Tunnelbrust als Funktion zum Abstand zur Ortsbrust.

Der Abstand der Messmarken in den Rohren beträgt einen Meter, hieraus ergibt sich ein dichtes Messgitter. Mit jedem Meter Vortrieb geht jeweils ein Messpunkt verloren. Jede Messung ist eine Momentaufnahme der aktuellen Bedingungen. Das obige Diagramm (Abbildung 7) zeigt den Zusammenhang zwischen dem Vortrieb und der Extrusion der Ortsbrust. In diesem Beispiel wird nach jedem Meter Abschlag eine Gleitmikrometer-Messung durchgeführt. Jeder Vortriebsschritt und die dazugehörige Messung sind mit der gleichen Nummer versehen. Die Messungen werden durchgeführt, indem die Messmarken im Messrohr einzeln angefahren werden und die Distanz gemessen wird. Dies erfordert die Anwesenheit eines Messtechnikers an der Tunnelbrust für einige Zeit (ungefähr 1 Stunde für eine 30 m lange Messserie). Während dieser Zeit können nur wenige andere Arbeiten an der Ortsbrust durchgeführt werden.

In der Abbildung 8 sind RH-Extensometer-Messungen in der Basisdarstellung zu sehen. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten beträgt in diesem Fall 3 m; dies führt zu einer geringeren Auflösung in Tunnellängsrichtung im Vergleich zu den Gleitmikrometer-Messungen. Während beim Gleitmikrometer nur eine Messung pro Abschlag vorliegt sind die Messungen mit dem RHX kontinuierlich. Durch die höhere zeitliche Auflösung (z.B. 1 Messung pro Stunde) stehen auch bei weniger Messpunkten mehr Informationen zur Verfügung. Die mit dem RHX gewonnenen Informationen stellen nicht eine Momentaufnahme dar, sondern geben vollständigen Aufschluss über die Reaktion des Gebirges auf jedweden Eingriff. So steigt zum Beispiel sofort nach einem Abschlag die Verformungsgeschwindigkeit an, um sich

dann wieder nach einiger Zeit zu verlangsamen. Auch das Bohren von Ankern beschleunigt die Verformungen durch die Auflockerung während des Bohrens. Später, wenn die Anker gesetzt sind, kommen die Verformungen im Verankerungsbereich ganz zum Erliegen. Mit diesen zeitabhängigen Informationen kann die Ankerlänge, deren Anzahl sowie die Behandlung der Tunnelbrust optimiert werden.

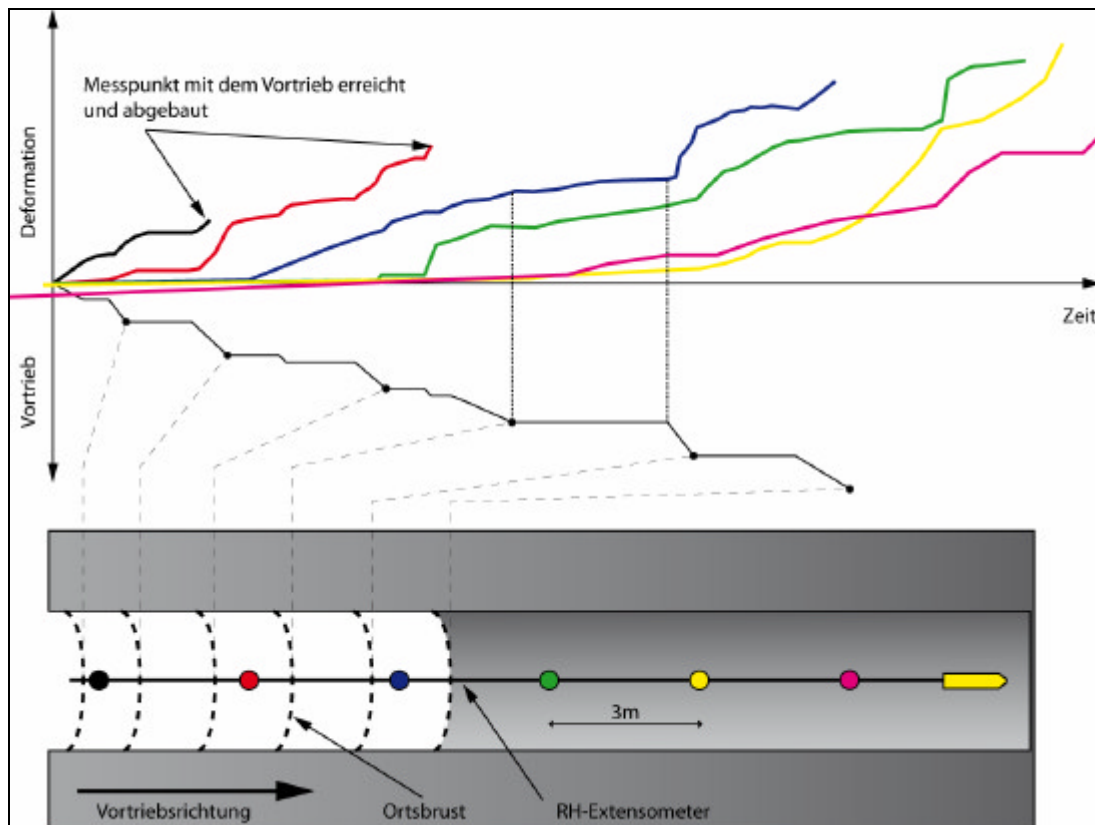


Abbildung 8: RH-Extensometer-Messungen

Der Einsatz von überlappend eingebauten RX-Extensometern erlaubt gute Prognosen bezüglich den geologischen und felsmechanischen Eigenschaften des Gebirges hinter der Ortsbrust. Zusätzlich können Störzonen frühzeitig genug erkannt werden, um angemessene Gegenmassnahmen zu ergreifen. Um das Verhalten des Gebirges während längerer Stillstandszeiten (z.B. Weihnachtsferien) zu erfassen, kann das RH-Extensometer auch an ein Langzeit Monitoring System (Geomonitor) angeschlossen werden.

Abbildung 9 zeigt die Messungen von vier überlappend eingebauten RH-Extensometern im Gotthard Basistunnel. Der Zusammenhang zwischen Vortrieb und Extrusion ist deutlich zu erkennen. Je näher die Ortsbrust dem Messpunkt kommt, desto grösser und schneller werden die Deformationen. Aus längeren Zeiträumen

ohne Vortrieb resultiert eine Verlangsamung der Deformationen. Die maximale Extrusion beträgt in diesem Beispiel 430 mm, die Messköpfe waren auf eine maximale Deformation von 600 mm ausgelegt.

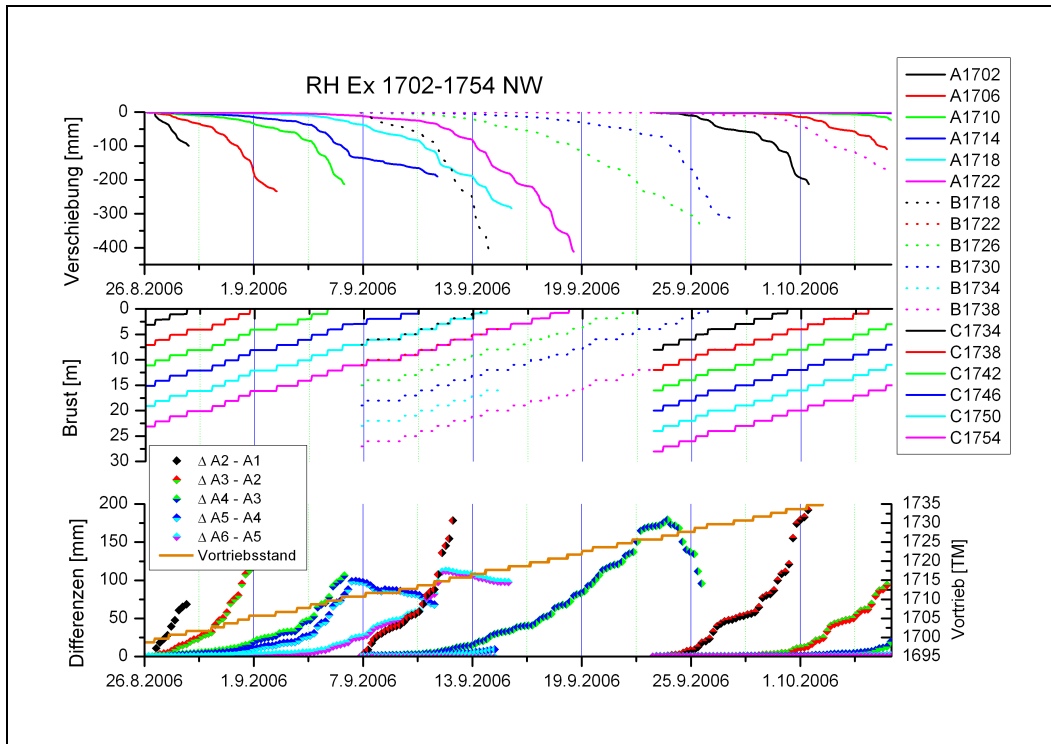


Abbildung 9: Messungen von überlappend eingebauten RH-Extensometern (RHX1699 – RHX1747) Sedrun

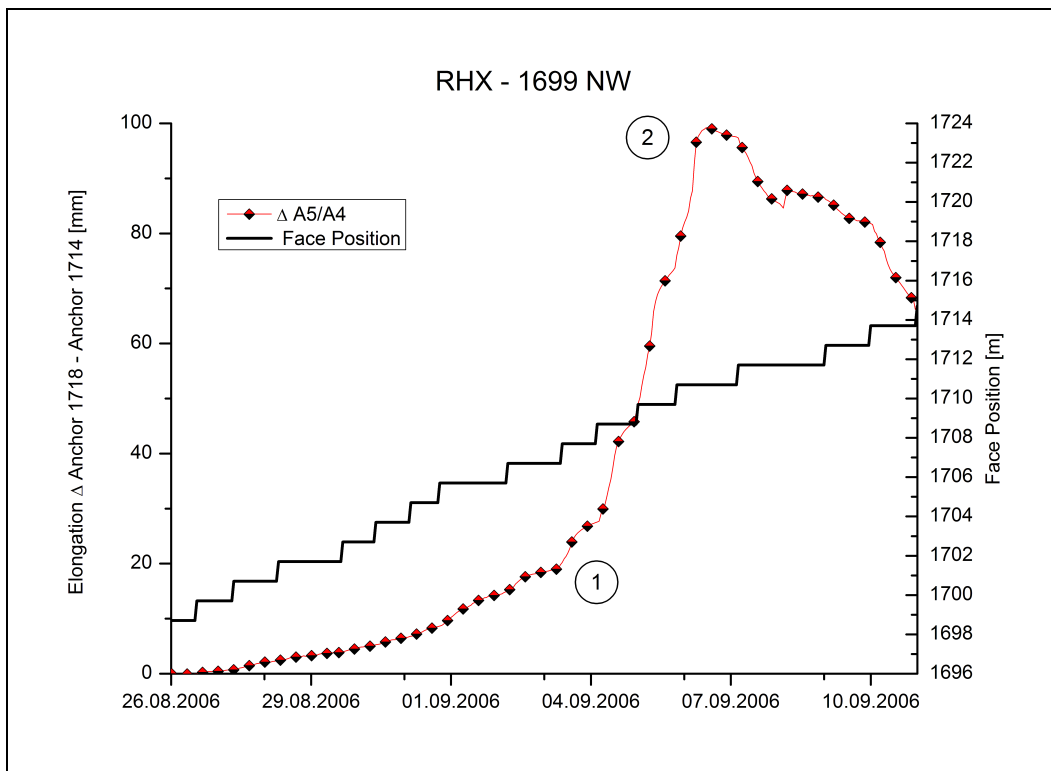


Abbildung 10: Detail; Differenzieller Abstand zwischen zwei Messpunkten von RHX1699-NW

Der Einfluss einer neuen Ankerlage kann man in Abbildung 10 erkennen. Bei Punkt 1 beschleunigt sich die Extrusion der Ortsbrust, da der zeitliche Abstand zwischen zwei Abschlüssen klein ist (die durchgezogene Linie zeigt den Vortriebsstand). Gleichzeitig ist die Wirksamkeit der letzten Ankerlage erschöpft, die Ortsbrust bewegt sich sehr schnell im Verhältnis zum tieferen Fels. Um einen Kollaps der Ortsbrust zu vermeiden, werden bei Punkt 2 neue Anker installiert und die Extrusion verlangsamt sich. Die Ortsbrust wird in diesem Fall sogar wieder konsolidiert, da sie durch die Anker und den Spritzbeton am tieferen Fels rückverankert wird.

Das Modulare Reverse Head Extensometer ist ein neues Instrument, das viele Vorteile bietet. Es kann einfach eingebaut werden und ist auch bei ungünstigen geologischen Bedingungen geeignet. Im Gotthard Basistunnel wurde das Reverse Head Extensometer im druckhaften Gebirge bei Überlagerungen von bis zu 2300 m und Wasserdrücken 160 bar erfolgreich eingesetzt. Die hier gewonnenen Erfahrungen flossen in das M-RHX, welches seine Praxistauglichkeit bei Exkavationsversuchen in Felslaboren für die Standorterkundung nuklearer Endlager gezeigt hat.

RH-Extensometer ermöglichen eine kontinuierliche Überwachung der Ortsbrust und stellen einen Schritt in Richtung eines vollständig überwachten Vortriebs dar.

Für die nächste Generation der Reverse Head Extensometer ist eine kabellose Datenübertragung vorgesehen. An der Umsetzung wird derzeit gearbeitet; erste Versuche zeigen sehr gute Ergebnisse.

7 Referenzen

Kovári K., Amstad, Ch. (1979)

Fundamentals of Deformation Measurements, Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich (edit. K. Kovári), Balkema Rotterdam.

Kovári K. (1998)

Tunneling in Squeezing Rock, Tunnel 5/98.

Lunardi P. (1998)

Convergence-confinement ou extrusion-préconfinement?, Colloque «Mécanique et Géotechnique», Laboratoire de Mécanique des Solides- École Polytechnique, Paris.

Rossi P.P. (1995)

«Il ruolo del monitoraggio negli interventi di miglioramento e rinforzo dei terreni e delle rocce», XIX Conegno Nazionale dell'Associazione Geotechnica Italiana, Pavia, Settembre.

Dipl. Bauing. Patrick R. Steiner

patrick.steiner@solexperts.com

Solexperts AG

info@solexperts.com

Mettlenbachstrasse 25

www.solexperts.com

8617 Mönchaltorf

Tel.: +41 44 806 29 29

Schweiz

Fax +41 44 806 29 30
