

Geodätisches Grundlagen- und Deformationsnetz für das Felslabor Mont Terri, in St. Ursanne

Tunnelvermessung mit höchster Präzision

Im Felslabor Mont Terri in St. Ursanne wird seit 1996 ein internationales Forschungsprogramm durchgeführt mit dem Ziel, die spezifischen Eigenschaften des Opalinustons hinsichtlich Machbarkeit und Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle abzuklären. Ein seit 2007 laufend weiter entwickeltes, hochpräzises geodätisches Grundlagen- und Deformationsnetz bietet die Basis, um kleinste dreidimensionale Veränderungen bedingt durch natürliche und/oder künstlich (durch Bauprojekte und Experimente) erzeugte Veränderungen zu detektieren; zudem sollen geochemische und geotechnische Sensoren damit georeferenziert werden. Der vorliegende Bericht beschreibt die bisher durchgeführten Arbeiten und dokumentiert die erreichten Resultate und Erkenntnisse.

Au laboratoire souterrain du Mont Terri à St-Ursanne est conduit depuis 1996 un projet de recherche international ayant comme objectif l'étude des caractéristiques de l'argile à Opalinus en ce qui concerne la faisabilité et la sécurité d'un entreposage en couches géologiques profondes de déchets radioactifs. Un réseau géodésique de base et de déformation de haute précision a été continuellement développé depuis 2007. Ce réseau fournit la base pour la détection des plus petites variations tridimensionnelles dues aux événements naturels et/ou artificiels (lors des projets de construction ou d'expériences); de surcroît, les capteurs géochimiques et géotechniques y sont géoréférencés. Ce rapport décrit les travaux effectués à ce jour et documente les résultats obtenus ainsi que les enseignements tirés.

Nel laboratorio sotterraneo di Mont Terri a St. Ursanne viene gestito dal 1996 un programma di ricerca internazionale che ha lo scopo di definire le qualità specifiche dell'argilla opalina. Il programma rientra nel contesto dello studio di fattibilità e della relativa analisi della sicurezza di un deposito di scorie radioattive in strati geologici profondi. Una rete geodetica di alta precisione allestita nel 2007 e susseguentemente estesa, permette il monitoraggio di minimi movimenti tridimensionali dovuti a cause naturali e/o artificiali (progetti edili e esperimenti). La stessa rete permette inoltre di inquadrare i vari sensori geochimici e geotecnici disposti nell'area di ricerca. Il presente rapporto illustra i lavori fin qui eseguiti, documenta i risultati ottenuti e gli insegnamenti tratti.

Peter Mahler, Matthias Kistler,
Senecio Schefer

Einleitung

Die Lagerung und Entsorgung von radioaktivem Abfall, insbesondere die Brennstäbe aus Atomkraftwerken, sind für

unsere Gesellschaft und Wirtschaft eine der grossen zukünftigen Herausforderungen, welche wissenschaftlich und technisch höchste Ansprüche stellt. Das 2003 von der Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft eingeführte Kernenergiegesetz regelt den Umgang mit radioaktiven Abfällen (Art. 30, 34). Es besagt unter anderem,

dass die anfallenden radioaktiven Abfälle im Inland entsorgt werden müssen. Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) hat im Auftrag des Bundesrates den Nachweis zu erbringen, ob eine Entsorgung von hochradioaktiven Abfällen in einem geologischen Tiefenlager möglich ist. Dabei steht der so genannte Opalinuston als Wirtsgestein im Fokus. Durch den Bau des Autobahntunnels Mont Terri (Transjurane A16) zwischen St. Ursanne und Courgenay im Kanton Jura, welcher 1998 eröffnet wurde, konnte der Opalinuston im Untergrund zugänglich gemacht werden und damit den Aufbau eines gut zugänglichen Felslabors ermöglichen (Abb. 1).

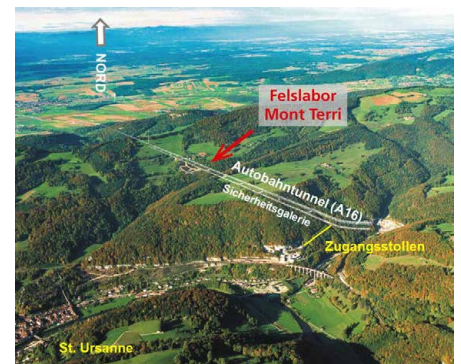


Abb. 1: Luftansicht des Mont Terri mit Strassentunnel und Felslabor (Quelle: www.mont.terri.ch).

Das Felslabor Mont Terri wurde als reines Forschungslabor konzipiert. Es befindet sich 300 m unter der Erdoberfläche und ist vom Südportal des gleichnamigen 4.3 km langen Autobahntunnels 1200 m entfernt. Man erreicht es von St. Ursanne her über einen separaten Zugangsstollen via den parallel zum Autobahntunnel führenden Sicherheitsstollen. Das Felslabor selber besteht heute aus 700 m Galerien und Nischen, in welchem Forscher, Ingenieure und Techniker ihre mannigfaltigen Experimente durchführen. Ein geologischer Querschnitt entlang des Autobahntunnels zeigt die Lage des Labors in der Gesteinsschicht des Opalinustons, der 175 Millionen Jahre alt ist, zusammen mit dem vertikalen Lüftungsschacht (Abb. 2).

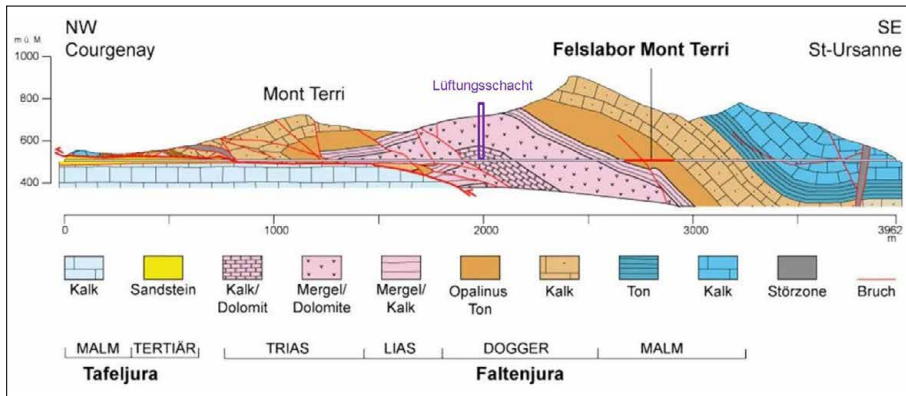


Abb. 2: Geologischer Querschnitt durch den Mont Terri entlang des Autobahntunnels (Quelle: www.mont.terri.ch).

Das Mont Terri Projekt ist ein internationales Forschungsprojekt, an welchem heute zusammen mit der Schweiz neun Staaten mit über 130 Kontraktoren (Vertragspartner) und über 40 Forschungsinstituten beteiligt sind. Nach dem Start 1996 wurde das Felslabor bis 2012 kontinuierlich ausgebaut und erweitert, damit genügend Platz für die vielen Experimente vorhanden ist (Abb. 3). Im Zentrum steht die hydrogeologische, geochemische und geotechnische Charakterisierung und Erforschung des Opalinustons, dessen Eigenschaften sich für ein geologisches Tiefenlager besonders gut eignen. Im Felslabor Mont Terri werden keine radioaktive Abfälle zwischen- oder endgelagert und es werden auch keine Experimente mit radioaktivem Material durchgeführt. Die Projektleitung und das Management liegen beim Bundesamt für Landestopographie swisstopo (Landesgeologie). Sie ist mit der Organisation und Durchführung der bisher 138 Experimente (wovon 93 bereits abgeschlossen und 45 noch am Laufen sind; Stand Juni 2015)

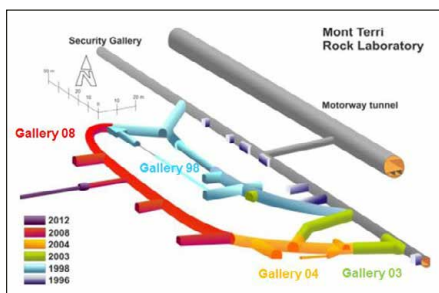


Abb. 3: Bauliche Entwicklung des Felslabors von 1996–2012.

beauftragt sowie verantwortlich für den Betrieb im Labor.

Um eine Grundlage zu schaffen, damit für Bauvorhaben und Experimente eine georeferenzierte Anbindung möglich ist und um dreidimensionale Deformationen im Felslabor detektieren zu können, wurde ein geodätisches Grundlagen- und Deformationsnetz aufgebaut. Zudem verläuft quer durch das Felslabor eine tektonische Bruchzone (Mainfault), welche es zu überwachen gilt. 2007 startete man im Rahmen des so genannten MH-Experiment (Long-term Monitoring of Heaves) mit einer ersten geodätischen Bestimmung (Nullmessung). Von Anfang an war jedoch klar, dass in Zukunft nicht nur Hebungen, sondern dreidimensionale Deformationen entlang einer möglichst langen Zeitachse erfasst werden sollen. Darum steht das MH-Experiment heute für Long-term Monitoring of Displacements (4D). Im Rahmen dieses Experiments wurde seither sukzessive ein umfangreiches, geodätisches Vermessungsnetz aufgebaut und dieses stetig verbessert und erweitert. Es gehört heute zu einem der präzisesten Tunnelvermessungsnetze der Schweiz.

2010 wurde zwischen der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Institut Vermessung und Geoinformation, und der swisstopo, Bereich Geodäsie, eine Zusammenarbeit für das geodätische Grundlagen- und Deformationsnetz Mont Terri vereinbart, um den zukünftigen Ingenieurinnen und Ingenieuren im Rahmen der Nachwuchsförderung die

Mitarbeit in einem interessanten und anspruchsvollen Präzisionsvermessungsprojekt zu ermöglichen. Da die Arbeiten im Felslabor sehr personal- und zeitintensiv sind sowie sehr viel Instrumentarium und Vermessungsmaterial benötigt werden, bietet die Zusammenarbeit für die beiden beteiligten Institutionen viele Vorteile: Seit 2011 führt die FHNW mit Studierenden im Rahmen von Ausbildungsprojekten die Folgemessungen durch und entwickelte dabei das Tunnelvermessungsnetz stetig weiter, während dem swisstopo die Vermessungskurse logistisch und personell unterstützt, Bachelorarbeiten mitbetreut sowie für die multiepochale Gesamtausgleichung aller Beobachtungen und die Deformationsanalysen verantwortlich zeichnet.

Motivation/Ziele

- Geodätische Erschließung des Felslabors mit dem Ziel, ein Überwachungskonzept für zukünftige Tiefenlager zu erarbeiten und auszutesten.
- Optimierung und Erweiterung der Netzanlage sowie der Messverfahren für ein hochpräzises geodätisches Grundlagen- und Deformationsnetz.
- Die absolute erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Punktbestimmung ausserhalb und innerhalb des Felslabors soll unter Berücksichtigung eines durchdachten geodätischen Netzes, der adäquaten Definition der Modelle und mit den heutigen auf dem Markt erhältlichen Präzisions-Vermessungssensoren inkl. Zubehör ausgelotet werden.
- Überwachung der Stabilität des bestehenden Felslabors, insbesondere während und nach Bohr- und Erweiterungsarbeiten und speziell entlang der tektonischen Bruchzone (Mainfault).
- Erkennen und Minimieren von systematischen Abweichungen, wie z.B. Verdrehung Polygonzug, Refraktion, Additionskonstanten, Prismenkonstanten u.a.
- Untersuchungen bezüglich des Einsatzes verschiedener geodätischer, geochemischer und geotechnischer Sensoren.

ren und den dazugehörigen Messverfahren sowie deren georeferenzierte Einbindung.

- Die Planung, Messung, Auswertung und Interpretation der Resultate des Grundlagen- und Deformationsnetzes eignen sich aus Sicht der FHNW und der swisstopo ideal als Ausbildungsprojekt und somit zur Förderung des Berufsnachwuchses insbesondere im Bereich der Ingenieurgeodäsie.

Das geodätische Netz

Das geodätische Netz besteht aus einem Aussen- und einem Innennetz. Das Aussenetz beinhaltet heute 14 Portal- und Anschlusspunkte, die mit Pfeilern (beim Nord- und Südportal) und Kappenbolzen (analog den LV95-Punkten) materialisiert sind. Sie werden mit GNSS langstatisch (mindestens 24 Stunden) und mit zwei verschiedenen Empfängern (Leica und Trimble) gemessen. Zusätzlich besteht ein Höhenanschluss an die HFP1-Fixpunktgruppe in St. Ursanne. Das Innennetz besteht aus polygonartigen Strukturen und beinhaltet heute rund 80 Punkte. Für das Präzisionsnivellement wurden zusätzliche Punkte speziell versichert, wobei aus Effizienzgründen sämtliche Umstellpunkte mit einem Bolzen versehen wurden. Das Netz wurde seit der Erstellung im 2007 bis 2015 ständig weiter entwickelt (Abb. 4). 2007 bestand das geodätische Netz lediglich aus einem alten Portal-Pfeiler beim Zugangsstollen aus der Bauzeit des Auto-



Abb. 5: GNSS-Referenzstation MTTI – eingebunden ins AGNES-Netz CH.

bahntunnels (1995–1998) und einem Richtungsanschluss auf drei Anschlusspunkte. Die Hoffnung, Messdaten aus der Bauzeit des Autobahntunnels vom alten Pfeiler mitintegrieren zu können, zerschlug sich jedoch bald, da die Daten teilweise unvollständig oder nicht mehr auffindbar waren.

2010 wurde durch swisstopo eine GNSS-Referenzstation (MTTI) gebaut, in Betrieb genommen und in die Auswertung des AGNES-Netzes integriert, um den Bezug zu einem übergeordneten, permanent

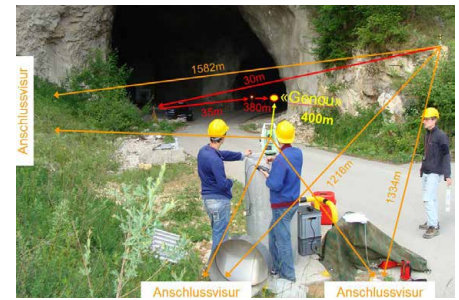


Abb. 6: Neuer und alter Pfeiler beim Portal Süd, Zugangsstollen zum Felslabor.

beobachteten und absoluten Referenzrahmen zu gewährleisten (Abb. 5).

2011 wurde auf der Autobahnbrücke ein zweiter Süd-Portal-Anschlusspunkt erstellt. Zudem konnte durch den Neubau eines Portalpfeilers beim Zugangsstollen, der eine 400 m lange Visur direkt in den Tunnel erlaubt, die Genauigkeit erheblich gesteigert und die unvorteilhafte Geometrie im Portalbereich, bedingt durch den alten Messpfeiler, eliminiert werden (Abb. 6). Insgesamt konnte so die Genauigkeit und Zuverlässigkeit wesentlich gesteigert werden (Verkleinerung der grossen Halbachsen der Konfidenzellipsen im Felslabor im Mittel um 233 %).

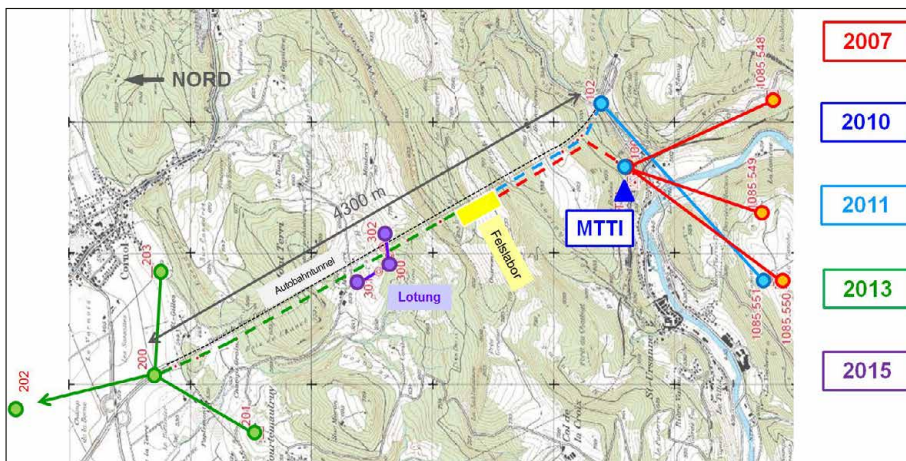


Abb. 4: Geodätischer Netzaufbau und Weiterentwicklung von 2007–2015.

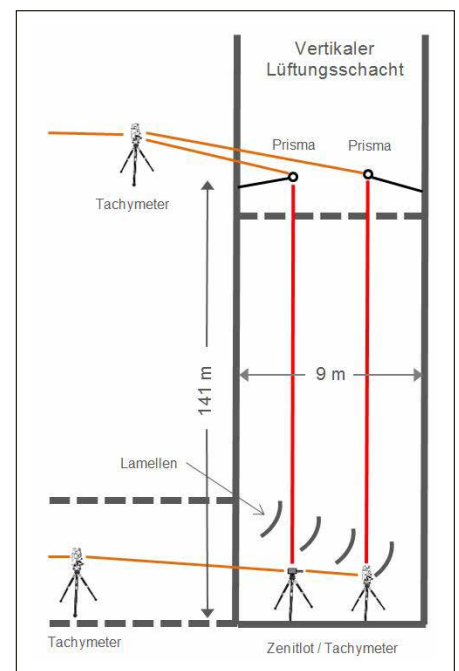



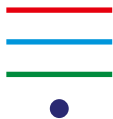


Abb. 7: Situation der Lotung durch den vertikalen Lüftungsschacht des Mont Terri Autobahntunnels.

Jahr	Netzvariante	Symbol	mfa (1 σ) theoretisch [mm]	mfa (1 σ) empirisch [mm]
2007 2009	Mit altem Pfeiler beim Südportal		13.8	8.0
2011	Mit neuem Pfeiler beim Südportal plus zweiter Anschluss Südportal Autobahn		4.6	2.4
2013	Mit neuem Pfeiler beim Südportal plus zweiter Anschluss Südportal Autobahn plus dritter Anschluss Nordportal		3.0	1.2
2015	Mit neuem Pfeiler beim Südportal plus zweiter Anschluss Südportal Autobahn plus dritter Anschluss Nordportal plus Lotung durch den Lüftungsschacht		0.9	1.3

Tab. 1: Theoretische und empirische Standardabweichungen (mfa = grosse mittlere Halbachse der Konfidenzellipsen) der Vermessungspunkte im Felslabor (Berechnung eines Konfidenzintervalls von 95% = 2.45 \times mfa).

2013 erschloss man das Felslabor vermessungstechnisch auch von Norden her mit einem entsprechenden Portalnetz und erreichte eine zusätzliche Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit (Genauigkeitsgewinn: 100%).

2015 wurde netztechnisch die letzte Möglichkeit ausgeschöpft, die Koordinatengenauigkeit in der Lage im Felslabor nochmals zu steigern (Ziel: Grosse mitt-

lere Halbachse der Konfidenzellipsen mfa < 1 mm bei einem Konfidenzintervall von 1 σ mit 39.4 % Wahrscheinlichkeit). Mittels einer Lotung durch den vertikalen Lüftungsschacht (Lotdistanz: 141 m) wurde versucht, den Hauptpolygonzug in der Mitte des Tunnels zusätzlich zu stützen (Abb. 7). Leider zeigten die durchgeführten Messungen und Auswertungen bisher nicht die erhofften Resultate. Grund dafür ist, dass einerseits die angenommene Lotungsgenauigkeit in der Präanalyse gemäss den Angaben der Instrumentenhersteller nicht erreicht wurde (Tab. 3) und andererseits die Mess-Bedingungen bisher alles andere als ideal waren. Diese Unsicherheiten in der Lotung führten bedingt durch die kurze Basislinie von nur 4 m für die Richtungsübertragung zum Hauptpolygonzug in der Mitte der Sicherheitsgalerie zu Koordinatendifferenzen, die grösser waren als erwartet und somit zu keiner Genauigkeitssteigerung im Felslabor beitragen.

Tabelle 1 zeigt die Genauigkeitsentwicklung der verschiedenen Netzerweiterungen detailliert auf, welche zuvor mit einer

sorgfältigen Präanalyse berechnet wurden. Die Resultate der Messungen zeigen, dass die Werte der Präanalyse jeweils dank umsichtiger Planung und Modellierung, dem richtigen Einsatz der vorab sorgfältig kalibrierten Mess-Sensorik sowie den qualitativ sehr gut arbeitenden Messteams deutlich unterschritten wurden. Einzig die Lotung hat in der bisherigen Form noch zu keinem Genauigkeitsgewinn bei den Punkten im Felslabor beigetragen. Sie könnte jedoch mit Hilfe eines noch zu erstellenden Verbindungsstollens (Länge: 21 m, Durchmesser ca. 20 cm), der die Distanz zum Hauptpolygonzug in der Sicherheitsgalerie wesentlich verkürzen würde (von 220 auf 30 m), doch noch gesteigert werden, so dass die «Schallmauer» von 1 mm Koordinatengenauigkeit (mfa) unterschritten würde. Erste Planungsarbeiten dazu haben im Rahmen einer Projektarbeit mit Studierenden bereits stattgefunden. Mit Hilfe von Scanaufnahmen wurde ein georeferenziertes 3D-Modell erstellt (Abb. 8), welches die Situation zwischen dem vertikalen Lüftungsschacht und der Sicherheitsgalerie exakt darstellt.

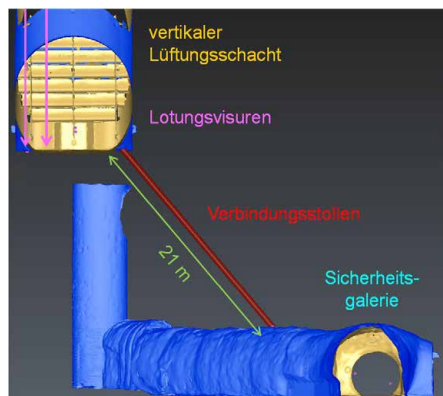


Abb. 8: Georeferenziertes 3D-Modell zur Planung eines Verbindungsstollens zwischen dem vertikalen Lüftungsschacht und der Sicherheitsgalerie

Messkampagnen, Instrumentarium und Messmethodik

Folgende Messkampagnen wurden bisher durchgeführt:

swisstopo	2007.09 - 11	Nullmessung
	2008.04 - 11 2009.05	Fünf Nivellement-Messkampagnen im Labor während und nach dem Bau der Gallery08
	2009.02	1. Folgemessung (Winter)
	2009.07	2. Folgemessung (Sommer)
metas	2009.08	Absolute Schweremessungen (Nullmessung)
swisstopo	2010.02	Bau- und Inbetriebnahme der permanenten GNSS-Referenzstation MTTI mit Integration ins AGNES-Netz
FHNW	2011.05	3. Folgemessung mit 13 Studierenden (6. Semester)
	2013.05	4. Folgemessung mit 17 Studierenden (6. Semester)
	2015.05	5. Folgemessung mit 13 + 15 Studierenden (6. + 2. Semester)

Tab. 2: Übersicht über die bisherigen Messkampagnen.

Die nächste Messkampagne findet im Mai 2017 statt, so dass vor der geplanten Laborerweiterung im 2018 vorgängig sozusagen eine erneute «Nullmessung» vorliegt. Bisher wurde folgendes Messinstrumentarium eingesetzt:

- GNSS-Systeme Leica, System 1200 und Viva (FHNW) sowie Trimble 5700 (swisstopo)
- Präzisions-Tachymeter, Leica TC2002, TDA5005, TS30, Mekometer (swisstopo) und TM30 (FHNW)
- Präzisions-Nivellement, Leica DNA03 (swisstopo) und Trimble DiNi03 (swisstopo und FHNW)



Abb. 9: Präzisionszentrierung über Vermessungspunkt im Labor mit Zentrierschlitten und Nadirlot.

- Präzisions-Kreisel DMT Gyromat 2000 mit Leica T1600 (swisstopo)
- Lotungsgeräte NL (swisstopo, für Nadirlotung) und ZL (FHNW, für Zenitlotung)
- Schweremessungen mit Absolut-Gravimeter FGS (metas)



Abb. 10: Überwachung der Messungen mit TM30 – im Hintergrund die Betonit-Hinterfüllmaschine für die Einlagerung der simulierten atomaren Abfallbehälter.

Ein spezielles Augenmerk wurde auf die vorgängige Kalibrierung der Instrumente und dessen Zubehör gelegt, insbesondere der verwendeten Prismen. Da ab 2011 von Seite swisstopo zu wenig Präzisionsprismen vom Typ GPH1P zur Verfügung standen, um zwei parallel arbeitende Messteams autonom auszurüsten, wurden 21 Prismen vom Typ GPR121 von Leica (mit und ohne Beleuchtung) eingesetzt. Diese wurden zu eigentlichen Präzisionsprismen «verbessert», indem man individuell die Prismenkonstante bestimmte und daraus so genannte Prismengruppen bildete (mit nahezu identischen Konstanten). Anschliessend erfolgte eine Additionskonstantenbestimmung mittels der eingesetzten Tachymeter und einem ausgewählten Prisma pro Prismengruppe. Die Zuweisung des Prismas pro Zielpunkt erfolgte bei der Messkampagne mit Hilfe der Feldsoftware manuell und wurde somit bei der Auswertung berücksichtigt. Erstaunlicherweise betrug die individuellen Abweichungen bis zu 1.2 mm (Leica garantiert gemäss Spezifikation für diesen Prismentyp eine maximale Abweichung von 1.0 mm). Der «Toleranzwert» wird hier also voll ausge-

schöpft, was für Leica-Instrumentarium mit grundsätzlich konservativen Genauigkeitsangaben eher ungewöhnlich ist. Ohne Berücksichtigung dieser individuellen Prismenkonstanten ist der Einfluss auf die Polygonzüge systematisch und somit auch auf die Koordinatenbestimmung.

Die Nivellierlatten-Kalibrierung (Lattenmassstab und absoluter Lattennullpunkt) fand im Auftrag von swisstopo und der FHNW vorgängig im Messlabor der ETHZ statt.

Die Kalibrierung der verwendeten Meteorgeräte (GFTB200) erfolgte anhand eines zertifizierten Gerätes (HM30).

Für jede Stationierung (Tachymeter oder Prisma) wurde eine Präzisionszentrierung mit Hilfe eines Nadirlots mit Zentrierschlitten ausgeführt (Abb. 9).

Es wurden konsequent zwei Stationierungen und mindestens drei Satzmessungen mit ATR durchgeführt, bis die Richtungs-genauigkeit am Satzmittel ≤ 0.15 mgon betrug.

Für die Datenspeicherung und die Datenaufbereitung wurden die Feldsoftwareprodukte PCTRI2 und PCNIV2 (auf Notebooks und PSION) sowie das geodätische Programmpaket GeoSuite von swisstopo verwendet (Abb. 10).

Wie eine Präanalyse zeigte, leisteten die von swisstopo durchgeführten Kreiselmessungen bis 2011 nebst der Kontrolle der Richtungsübertragung auch einen Beitrag zur Genauigkeitssteigerung. Als der Nordanschluss 2013 realisiert wurde, konnte

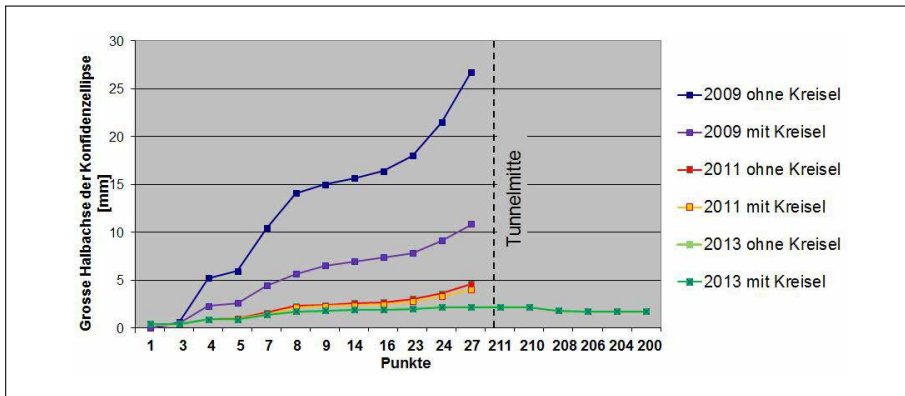


Abb. 11: Vergleich der theoretischen Genauigkeiten mit und ohne Kreiselmessungen.

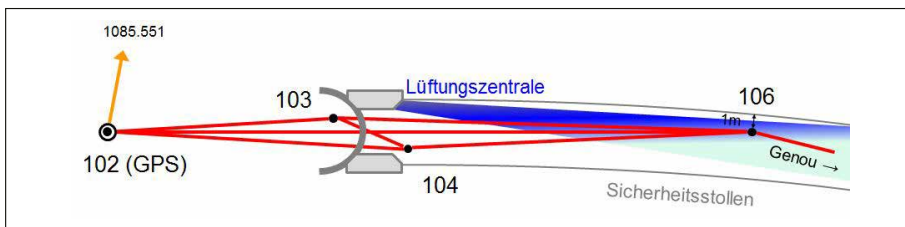


Abb. 12: Messsituation beim Portal Süd, Autobahnanschluss St. Ursanne.

damit keine Steigerung der Genauigkeit mehr erzielt werden, da der Tunnel dafür zu kurz ist resp. die Kreiselmessungen zu ungenau sind (Abb. 11). Trotzdem macht es Sinn, auch weiterhin zur Kontrolle der Richtungsübertragung mit Tachymetern und zum Abschätzen des Langzeitverhaltens des Kreisel (Orientierungsunbekannte) sowie aus didaktischen Gründen diese Messungen durchzuführen.

Im Sicherheitsstollen herrscht ein permanenter Überdruck, der durch eine Lüftung an beiden Portalen realisiert wird. Er soll verhindern, dass bei einem Brandfall im Autobahntunnel Rauch in die Sicherheitsgalerie (Rettungsstollen) dringen kann. Allerdings ist die Luftzufuhr bei den Portalen so stark, dass die Luftverwirbelungen in diesem Bereich eine Messung mit ATR verunmöglichen (Abb. 12); aus diesem Grunde musste das Gebläse während der Dauer der Messungen abgeschaltet werden. Abbildung 12 zeigt auch, dass bei den Portalen konsequent immer von innen und aussen auf die Anschlusspunkte gemessen wurde, um den kritischen atmosphärischen Einfluss in diesem Bereich unter Kontrolle zu haben. Die Richtungsmessungen im Portalbereich sind beson-

ders sorgfältig zu planen und durchzuführen, denn hier wird ein wichtiger Grundstein für die zu erreichende Genauigkeit im Tunnel gelegt, welche später nicht mehr verbessert werden kann.

Auswertungen

Auswertekonzept

Für die Auswertung der GPS/GNSS-Messdaten kamen LGO (Leica Geo Office) und die Bernese Software (UNI Bern) zum Einsatz. Zusätzlich zu den mobilen GPS/GNSS-Empfängern wurden die Daten der AGNES-Referenzstationen MTTI und BOUR/BOU2 verwendet. Die Ausgleichung des umfangreichen Datensatzes (über 5000 Beobachtungen bis 2015) erfolgte mit der Netzausgleichungs-Software LTOP von swisstopo. Nachdem die Messdaten jeder einzelnen Messepoche bereinigt und auf die geprüften Referenzpunkte ausgeglichen wurden (klassischer Ansatz), werden sie nachträglich einer so genannten Multiepochalen Ausgleichung (MEA) zugeführt (Abb. 13). Eine MEA führt eine Ausgleichung der Daten über mehrere Epochen durch, welche folgende drei wesentliche Vorteile besitzt:

- Die Koordinaten der Anschlusspunkte können in der Ausgleichung mit jeder zusätzlichen Messepoche grundsätzlich neu bestimmt werden. Oder es kann über mehrere oder alle Epochen eine Koordinate invariant geschätzt werden. Damit kann die Bestimmung der Anschlusspunkte mit jeder zusätzlichen Epoche implizit verbessert werden.
- Durch die Punktbestimmung in mehreren Epochen lassen sich zwischen den einzelnen Epochen relative Konfidenz-ellipsen und -intervalle zur direkten Beurteilung der Signifikanz von Verschiebungen berechnen.
- Ein Kennzahlenvergleich (Koordinaten, Genauigkeiten usw.) in der Deformationsanalyse über alle Epochen hinweg ist bei einer MEA einfacher, als wenn jedes Mal nur epochal ausgewertet wird.

Um die Resultate aus der Deformationsanalyse grafisch darzustellen, wird die von swisstopo entwickelte GIS-Fachschale LTOP2ArcGIS verwendet, welche die Kennzahlen aus der Multiepochenausgleichung, wie z. B. Verschiebungsvektoren und Konfidenz-ellipsen, direkt in eine File-Geodatabase einlesen kann.

Mathematisches Modell

Das funktionale Modell verwendet als Referenzrahmen LV95 und LN02, wobei

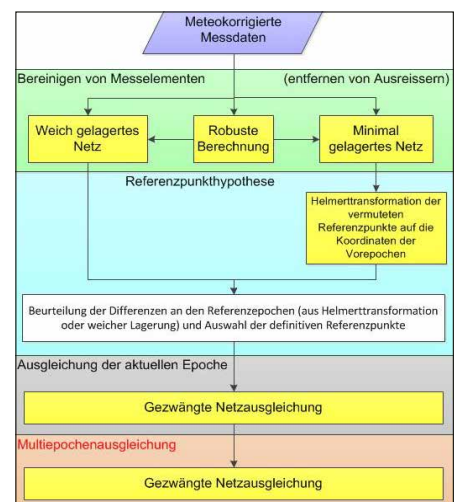


Abb. 13: Ablauf einer Multiepochenausgleichung mit LTOP (Quelle: Benutzeranleitung swisstopo, Condamin 2013).

für den Höhenbezugsrahmen ein lokaler Anschluss in St. Ursanne (ohne Berücksichtigung der Verzerrungen der Gebrauchshöhen gemäss HTrans) verwendet wird. Für die Berücksichtigung der Geoid- und Lotabweichungen wurde das Geoid von Marti (CHGeo2004) verwendet. Die Schwere wurde nicht berücksichtigt. Die Meteodaten (Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit) wurden an den Stations- und den Zielpunkten erfasst und anschliessend gemittelt. Die Auswertung der GPS-Messungen erfolgte innerhalb des Netzes mit einer L1-Lösung, der Anschluss an AGNES mit L3-Basislinien. Nebst den GPS-Koordinaten, welche nach Sessionen getrennt ausgeglichen werden, wurden die Richtungen als Satzmittel aufgrund der einzelnen Stationierungen und die meteorokorrigierten Distanzen nach Hin- und Rückmessung getrennt in die Ausgleichung eingeführt. Ebenso wurden die geometrisch (Nivellement) und trigonometrisch bestimmten Höhendifferenzen nach Hin- und Rückweg getrennt in die Ausgleichung eingeführt. Das stochastische Modell wurde wie folgt festgelegt (Tab. 3):

Die Gegenüberstellung der theoretischen und empirischen Standardabweichung (1σ) zeigt, dass die empirischen Werte (mit einer Ausnahme bei der Lotung) viel besser sind als erwartet. Dies spricht für die hohe Qualität des eingesetzten Instrumentariums, den richtigen Umgang damit sowie die sehr gute Arbeit der Messoperateure. Letztendlich führten diese empirisch erreichten Standardabweichungen zu den erreichten hohen Koordinatengenauigkeiten im Felslabor.

Die Netzlagerung in der Lage erfolgte in zwei Varianten: Die erste Variante besteht aus einer «absoluten» Lagerung auf dem Aussennetz, d.h. auf den Portal- und Anschlusspunkten (inkl. MTTI, BOUR/BOU2). Nachteil: Aufgrund des langen Polygonzuges und der damit verbundenen grösseren Unsicherheit können in der Lage nur grössere Veränderungen signifikant nachgewiesen werden. Die zweite Variante verwendet dieselbe Lagerung wie bei der ersten, jedoch werden die Koordinaten der stabilen Punkte in der Sicherheitsgalerie invariant geschätzt. Es versteht sich von selbst, dass die Wahl der stabilen Punkte vorgängig mit einer sorgfältigen Überprüfung der Festpunkthypo-

these abgesichert werden muss. Durch die invariante Schätzung dieser Punkte ausserhalb der Überwachungszone in der Multiepochen-Ausgleichung können die systematischen Abweichungen wie «PP-Zug-Verdrehung», «Restunsicherheiten in den Additions- und Prismenkonstanten» und bei der «Meteodatenerfassung» weitgehend eliminiert werden. Letztere dient als Basis für die Deformationsanalyse in der Lage der Punkte im Felslabor.

Resultate

Mit den Messkampagnen 2013 und 2015 wurden sehr hohe Koordinatengenauigkeiten ($mfa = 1.2 \text{ mm}$) bei den Punkten im Felslabor erreicht. Hauptverantwortlich dafür ist insbesondere die erreichte hohe Richtungsgenauigkeit mit den TS30 und TM30 von 0.10 mgon , welche empirisch aus insgesamt rund 320 Richtungsmessungen, welche ausschliesslich im Messmodus Automatic Target Recognition (ATR) für den Distanzbereich von 3 bis 2000 m nachgewiesen wurde. Da viele Distanzen im Laborbereich relativ kurz sind, wurde speziell im Distanzbereich zwischen 2 und 30 m die erreichbare Genauigkeit mit ATR im Vergleich zur manuellen Messung im Messlabor an der FHNW untersucht. Es konnten keine signifikanten Abweichungen gegenüber dem von Leica spezifizierten Wert von 0.15 mgon festgestellt werden. Überraschenderweise konnten mit der TS30, welcher für ATR nur bis 1000 m homologiert ist, Richtungen im Tunnel bis 1400 m problemlos gemessen werden.

Angeregt durch die hohe Durchschlagsgenauigkeit beim Gotthard Basis Tunnel (GBT) wurde auch beim Mont Terri in der Tunnelmitte die Längs-, Quer- und Höhenabweichungen fiktiv bestimmt, um diese mit den Resultaten aus dem GBT vergleichen zu können (Tab. 4).

Der Vergleich bezogen auf einen Kilometer zeigt, dass die Abweichungen im Mont Terri Tunnel sehr klein sind. Allerdings lassen sich die Rahmenbedingungen in den beiden Tunnels mitnichten miteinander vergleichen, da die Absteckung des GBT nur schon aufgrund seiner

		Standardabw. (1σ) theoretisch	Standardabw. (1σ) empirisch
GPS/GNSS-Koordinaten:	Lage	3.0 mm	1.8 mm
	Höhe	10.0 mm	6.4 mm
Richtungsgenauigkeiten:	TC2002 manuell	0.15 mgon	0.08 mgon
	TDA5005 halbautomatisch	0.15 mgon	0.09 mgon
	TS30 ATR	0.15 mgon	0.10 mgon
	TM30 ATR	0.15 mgon	0.10 mgon
Distanzmessgenauigkeit:	TC2002	2.0 mm	0.8 mm
	(auf 1 Km) TDA5005	3.0 mm	0.5 mm
	TS30	1.6 mm	0.5 mm
	TM30	1.6 mm	0.7 mm
	Mekometer 5000	1.0 mm	0.2 mm
Zentriergenauigkeit (auf dem Stativ):		0.2 mm	0.1 mm
Zentriergenauigkeit (über dem Punkt):		0.5 mm	0.3 mm
Kreislazimute		1.5 mgon	0.8 mgon
Höhengenauigkeit (Doppelnivellement)		0.3 mm/Km	0.25 mm/Km
Lotungsmessungen		0.5 mm/100 m	0.7 mm/100 m
Lotabweichungen		0.1 mgon	

Tab. 3: Vergleich zwischen den für die Präanalyse verwendeten theoretischen mit den empirischen Standardabweichungen.

	Quer- abweichung [mm]	Längs- abweichung [mm]	Höhen- abweichung [mm]
Gotthard Basis Tunnel (57 km)	162	135	27
Auf einen Kilometer:	2.8	2.4	0.5
Mont Terri Tunnel (4.3 km)	4.7	2.1	0.7
Auf einen Kilometer:	1.1	0.5	0.2

Tab. 4: Vergleich der Quer-, Längs- und Höhenabweichungen zwischen dem Mont Terri Tunnel (2013) und GBT (beim GBT sind alle vier Durchschläge unter Berücksichtigung des Vorzeichens aufaddiert).

Refraktionsprofile	2011-05-20	2011-07-20	2012-02-10	2012-06-18
1	1.48		6.03	1.05
2	3.37	2.69	0.34	4.92
3		0.77	1.52	
4	0.12		0.37	
5			6.12	3.88

Tab. 5: Empirisch bestimmte Werte für die Refraktionskoeffizienten im Felslabor und dem Sicherheitsstollen Mont Terri.

Dimensionen und den schwierigen Bedingungen während der Bauphase weitaus anspruchsvoller war als im Mont Terri Tunnel. Ausserdem war die Bestimmung und Berücksichtigung der Modelle (Geoid, Schwerefeld) und den damit verbundenen Unsicherheiten beim GBT viel komplexer als im Mont Terri.

Ein spezielles Augenmerk galt auch der Refraktionsproblematik: Den horizontalen Refraktionseinflüssen wurde weitgehend damit begegnet, dass die Punkte konsequent in der Mitte des Tunnels versichert wurden. Nur 11 von 320 Visuren weisen Tunnelwandabstände von unter einem Meter auf. Befürchtete Seitenrefraktionseinflüsse konnten jedoch bisher erstaunlicherweise nicht festgestellt werden; die Visuren passten alle sehr gut ins Netz. Mehr Probleme gab es bei der vertikalen Refraktion. Insbesondere bei den langen Visuren (> 100 m) passten erwartungsgemäss Hin- und Rückmessung praktisch nie zusammen. Organisatorisch ist es unmöglich, während den Polygonzugmessungen gegenseitig und gleichzeitig die Vertikalwinkel zu messen, um einerseits daraus den Refraktions-

koeffizientenwert (k) zu bestimmen und andererseits diesen Einfluss dadurch nahezu eliminieren zu können. $k = 1 - (Z_1 + Z_2 - 200^{son}) \cdot \frac{R}{d_0} \cdot \frac{\pi}{200}$; Z = Zenitwinkel, R = Erdradius, d_0 = Projektionsdistanz [Quelle: Korth 2004]

Als weitere Methode bietet sich die Bestimmung des Refraktionskoeffizienten (k) mithilfe von Temperaturgradienten an. $k = 503 \cdot \frac{p}{T^2} \cdot (0.0342 + \frac{dT}{dT})$; p = Luftdruck [hPa], T = Temperatur [Kelvin], dT/dh = vertikaler Temperaturgradient [Quelle: Ingensand 2011]

Diese Methode wäre zwar organisatorisch zu bewältigen, jedoch erreicht sie nicht die Genauigkeit der erstgenannten Methode. Da LTOP nur einen vorgegebenen k -Wert zulässt, stand die Frage im Raum, ob der Refraktionskoeffizient im Tunnel örtlich und zeitlich stabil ist, denn dann könnte man einen empirisch bestimmten mittleren Wert immer wieder verwenden. Um dieser Frage nachzugehen wurden fünf Refraktionsprofile in separaten Messkampagnen zu verschiedenen Zeitpunkten mit Hilfe der gegenseitigen, gleichzeitigen Vertikalwinkelbeobachtung durchgeführt (Abb. 14).

Die Resultate zeigen, dass die Refraktionskoeffizienten örtlich und zeitlich sehr unterschiedlich sind $\rightarrow 0.12 < k < 6.12$, $m_k = 0.12$ (Tab. 5). Nur beim Profil 4 zeigt sich eine gewisse Konstanz, wobei wir relativ nahe am Standardwert von 0.13 sind, welcher bei bodennahen Visuren aber auch nicht repräsentativ ist. Wenn wir den grössten bestimmten Refraktionskoeffizientenwert (6.12) nehmen, so beträgt dieser Einfluss auf die Höhe 7 cm auf 100 m (!). Da jedoch die Höhen hauptsächlich mit einem Präzisionsnivellement bestimmt werden, haben die trigonometrisch bestimmten Höhendifferenzen keinen negativen Einfluss auf das Resultat. Sie müssen jedoch durch eine Anpassung des stochastischen Modells heruntergewichtet werden. Wichtig ist ausserdem, dass zur Reduktion der Distanzen nicht die durch den Refraktionskoeffizienten verfälschten Vertikalwinkel verwendet werden, sondern die – dank Nivellement – präzisen Punkthöhen.

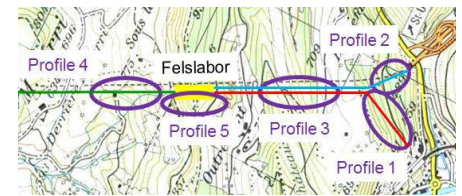


Abb. 14: Refraktionsprofile im Mont Terri Tunnel zur Untersuchung des vertikalen Refraktionskoeffizienten.

Deformationsanalyse

Um kleinste Deformationen im Millimeterbereich detektieren zu können, ist es wichtig, höchste Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten in der Koordinatenbestimmung zu erreichen. In der Lage wurden die signifikanten Verschiebungen mit Hilfe der in der MEA bestimmten relativen Konfidenzellipsen (Lage: Signifikanzniveau 95 % = $mfa \times 2.45$) von Epoche zu Epoche pro Punkt bestimmt. Wenn ein Verschiebungsvektor über die relative Konfidenzellipse hinausragt, so liegt eine effektive Verschiebung vor (Irrtumrisiko: 5 %). In Abbildung 15 sind die relativen Konfidenzellipsen in der Periode 2013–2015 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich in dieser Periode nur vereinzelt Punk-

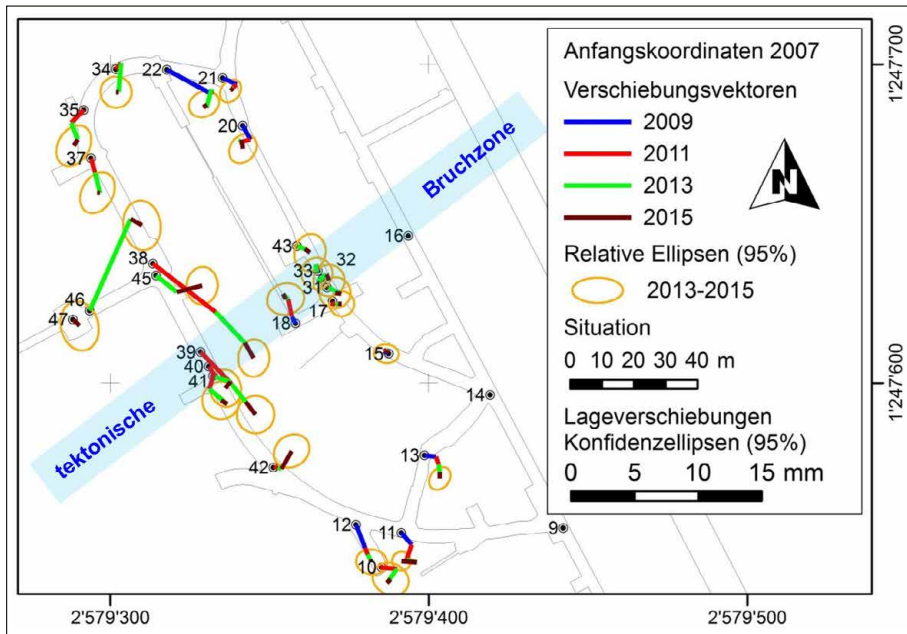


Abb. 15: Multivektoren Lage 2007–2015 mit relativen Konfidenzellipsen 2013–2015 (Netzlagerung beim Aussennetz sowie implizit über die invariante Schätzung der Koordinaten 2007–2015 für die stabilen Punkte in der Sicherheitsgalerie beim Felslabor).

te um mehr als 2.0 mm (Signifikanzgrenze) verschoben haben (mit invarianter Lagerung in der Sicherheitsgalerie). Der Grund dafür liegt in der Bautätigkeit in diesen Bereichen für andere Experimente (Bohrungen, Gleisverlegungen etc.): Sie wurden also «künstlich» verursacht. Eine

natürliche, d. h. geologisch bedingte Lageverschiebung konnte seit 2007 nicht festgestellt werden.

In der Höhe wird das Signifikanzniveau (95 %) mit $m_{fh} \times 1.96$ festgelegt. Aufgrund der hohen erreichbaren Genauigkeit der Punkte im Felslabor von 0.23 mm

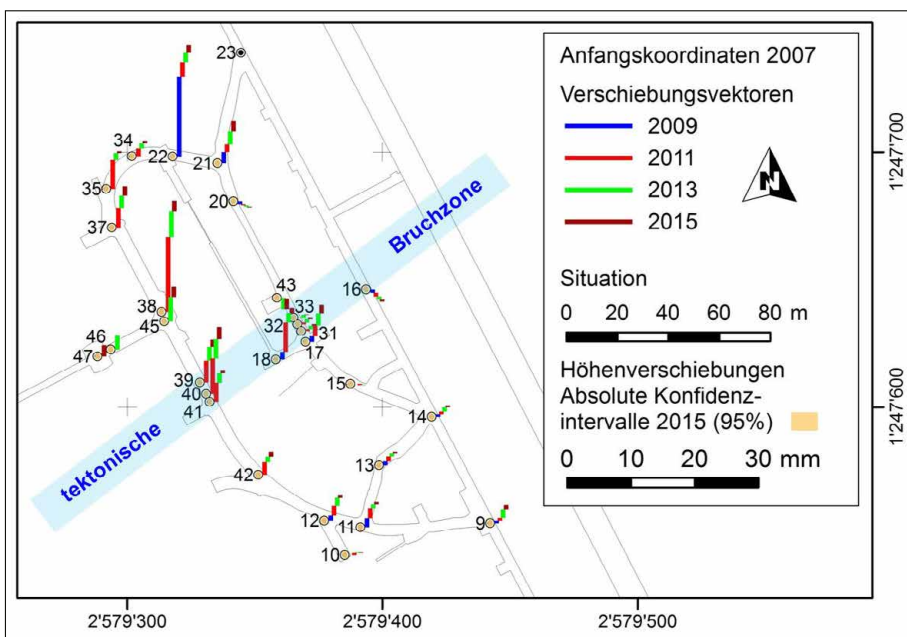


Abb. 16: Multivektoren Höhe 2007–2015 (Netzlagerung beim Bahnhof und im Städtchen St. Ursanne).

(1σ , Lagerung beim Bahnhof St. Ursanne, Streckenlänge bis Felslabor: 2.0 km) ergibt sich eine Signifikanzgrenze von 0.45 mm. Die generelle Hebung nördlich der tektonischen Bruchzone im Felslabor von bis zu 1 mm pro Jahr kann damit signifikant detektiert werden. Dieser Trend ist seit 2007 zu beobachten. In einzelnen Perioden waren sehr grosse Hebungsraten festgestellt worden, welche durch die Erweiterung mit der Galerie08 und anderen Bauaktivitäten hervorgerufen wurden (Abb. 16). Es wird interessant sein, ob man unabhängig von den geometrischen Höhenbestimmungen mittels Präzisionsnivellement mit Hilfe des Absolut-Gravimeters FGS des metas' die Hebungen im nördlichen Teil des Felslabors ebenfalls nachweisen kann. Allerdings braucht es dazu eine erste Folgemessung (Nullmessung im 2009), welche bis heute unter anderem wegen den hohen Kosten von Absolutmessungen noch nicht erfolgen konnte. Ob aufgrund des sich verändernden Schwerefeldes die Hebungen unabhängig nachgewiesen werden können, wird sich dann zeigen.

Erkenntnisse aus zehn Jahren Erfahrung

- Eine durchdachte Netzanlage zusammen mit der sorgfältigen Wahl der Sensorik und die adäquate Berücksichtigung der Modelle ist für den Erfolg essentiell
- Mit jeder Epoche und der damit verbundenen Netzoptimierungen und Netzerweiterungen konnten systematische Abweichungen eliminiert oder minimiert werden:
 - Verdrehung Polygonzug mit Kreiselmessungen stützen und/oder kontrollieren
 - Eliminierung von kurzen Visuren im Portalbereich
 - Individuelle Kalibrierung der Prismen für die Distanzmessung
 - Bestimmung von individuellen Refraktionskoeffizienten ($0.12 < k_{\text{Mont Terri}} < 6.12$) für die Höhenwinkel
 - Helmert-/Invariant-Lagerung beim Felslabor auf den stabilen Punkten für

- den Nachweis von signifikanten Lagerverschiebungen
- Stationierung mit Präzisionszentrierung ist zwar aufwendig aber zwingend
- Die Anbindung von geochemischen und geotechnischen Sensoren in den geodätischen Bezugsrahmen erfordert die konstruktive Entwicklung von Ad-aptoren
- Vermessungspunkte in der Mitte des Tunnels versichern (wegen Seitenrefraktion!), jedoch nicht in einer Linie im Polygonzug (Abdeckung der Prismen)
- Lotungsmessungen sind aufwändig und anspruchsvoll
- Für alle Beteiligten ist das Beherrschen der Sensorik und Messtechnik sowie gewissenhaftes und präzises Arbeiten unabdingbar

Schlussbemerkungen und Ausblick

Die Grundlagen- und Deformationsmessungen von swisstopo und der FHNW werden in den folgenden Jahren (2017 und 2019) fortgesetzt, nicht zuletzt auch weil 2018 eine grosse Erweiterung des

Felslabors in Angriff genommen wird, um zusätzlichen Platz für neue Experimente zu schaffen. Zudem wird versucht, die Lotungsmessungen mit Hilfe eines Verbindungsstollens, der vom vertikalen Lüftungsschacht den direkten Zugang zum Hauptpolygonzug in der Sicherheitsgalerie wesentlich verkürzt, doch noch nutzbringend umzusetzen. Mit Hilfe dieser Stützung des Polygonzuges in der Mitte des Tunnels liesse sich gemäss Präanalyse die Koordinatengenauigkeit auf unter 1 mm im Felslabor steigern. Allerdings muss für den Bau eines solchen Verbindungsstollens zuerst noch die Finanzierung geklärt werden. Letztlich steht jedoch ein Grundlagen- und Deformationsnetz für ein geologisches Tiefenlager im Fokus, so wie es die NAGRA aktuell plant (Abb. 17). Es ist unschwer zu erkennen, dass aus geodätischer Sicht der lange Zugangstunnel alles andere als ideal ist, um ein geologisches Tiefenlager messtechnisch mit hoher Genauigkeit zu überwachen. Hingegen sind die beiden vertikalen Zugangsschächte interessant und eröffnen verschiedene geodätische Möglichkeiten. Wenn sich der bestehende vertikale Lüf-

tungsschacht im Mont Terri zu einem Versuchsschacht für Lotungen ausbauen liesse, könnte man bestehende Methoden und Techniken hinsichtlich der Überwachung eines Tiefenlagers austesten und weiter verfeinern. Für ein zukünftiges geologisches Tiefenlager braucht es ein umfassendes Monitoringkonzept, das aufgrund der bisherigen Erfahrungen und Erkenntnisse verfeinert und noch weiter entwickelt werden muss. Dabei werden sicher bestehende geodätische Sensoren wie GNSS, Tachymetrie, Nivellement, Lotungen, Kreisel etc. eine Rolle spielen und spezielle Messtechnologien wie die Inertialmesstechnik für Richtungsübertragungen, wie sie beim GBT im Schacht bei Sedrun als Weltpremiere erfolgreich eingesetzt wurde, zur Anwendung kommen. Diesen georeferenziert messenden Sensoren (1/10 – Millimeterbereich) stehen zur Ergänzung die nicht georeferenziert messenden Sensoren (1/10 – 1/100 Millimeterbereich, relativ messend), wie sie in der Geotechnik eingesetzt werden, zur Verfügung (Beispiele: Faseroptische Sensoren, Ultraschallsensoren, Potentiometer, Extensometer, Hydrostatische Messsystems u.a.m.). Die Kombination der verschiedensten Sensoren und deren Integration in geodätische Netze mittels Georeferenzierung, eine weitgehende Automatisierung und Digitalisierung sowie ein zentrales Daten-Management werden in diesem Monitoringkonzept von zentraler Bedeutung sein.

Die fortschreitende Digitalisierung und die Forschung im Bereich der Sensorik werden uns bis zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers sicher noch weitere Möglichkeiten und Techniken eröffnen. Ein Beispiel: US-Forscher vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) gelang es im 2015 mit einem Art Röntgenblick mit Hilfe von Radiosignalen durch Mauern hindurch Bewegungen zu detektieren. Vielleicht wird es eines Tages möglich sein, auch damit kleinste geologische Veränderungen berührungslos im Fels zu erfassen. Techniken und Sensoren, von denen wir heute noch gar nichts wissen oder nur aus Sciencefiction-Filmen bekannt sind, könnten so in naher Zu-

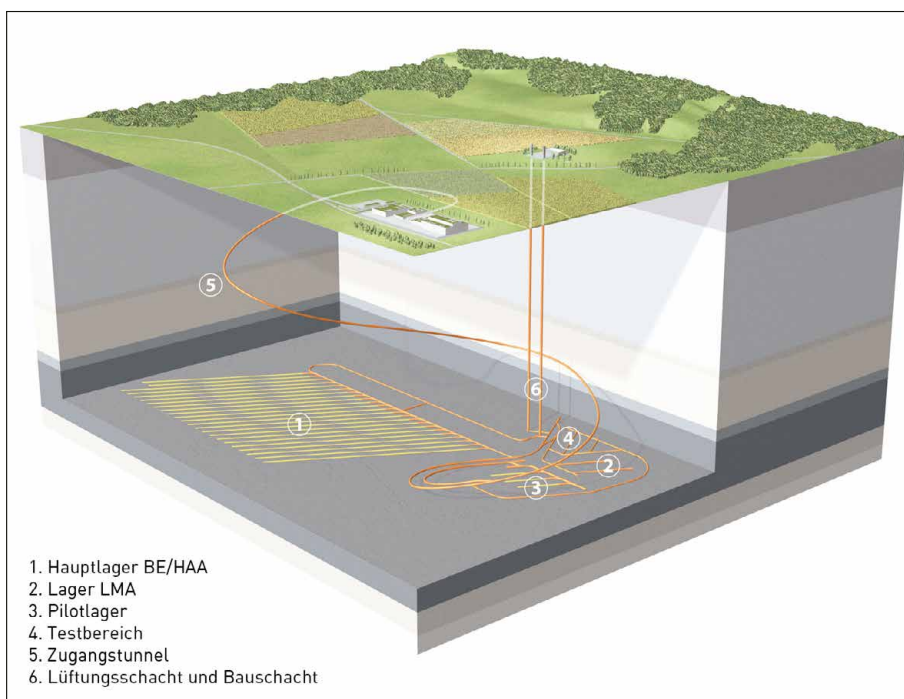


Abb. 17: Modell eines zukünftigen geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle (400–900 m tief) (Quelle: www.nagra.ch/de/mdeiendossierss1.htm).

kunft Realität werden und so auch in einem geologischen Tiefenlager zur Anwendung kommen.

Dank

An dieser Stelle möchten wir verschiedenen Institutionen und Organisationen danken, denn ohne ihre Unterstützung wäre ein solch umfangreiches Vermessungs-Projekt nicht durchführbar. Zu erwähnen sind die Firmen Leica Geosystems AG, Jauslin+Stebler AG und die ristag ag, die uns mit Vermessungsmaterial im GNSS-Bereich und mit beleuchtbaren Prismen unterstützt hatten. Ein Dank geht an die ETHZ, welche uns ebenfalls mit Vermessungsmaterial unterstützte und uns ihre Kalibrierungseinrichtungen zur Verfügung stellte. Danke auch dem Team des Mont Terri Konsortium in St. Ursanne, welches uns vor Ort bei den Messkampagnen tatkräftig unterstützte. Nicht zuletzt geht ein besonderer Dank an die Studierenden, die mit grosser Motivation und ihrem Wissen und Können sowie zuverlässiger und präziser Arbeit im Rahmen von Blockkursen die anspruchsvollen Vorbereitungen und Messkampagnen durchführten. Weiter haben sie in Bachelor-Thesen die Datenauswertung und deren Analyse und Interpretation vorgenommen und damit die Arbeit der swisstopo wesentlich erleichtert.

Literaturverzeichnis:

Baumann 2015. Mont Terri – MH Experiment: Gesamtausgleichung 2007–2013. Ergänzung zur Technical Note 2008-02.

Baumann und Kistler 2016. Mont Terri – MH Experiment: Gesamtausgleichung und Defor-

mationsanalyse 2007–2015. Verifikation und Integration der Vermessungsarbeiten 2015. swisstopo Report 16-14.

Deuber & Kamer, 2012. ATR im Nahbereich – Untersuchung der TS30, swisstopo und TM30, FHNW für den Einsatz im Mont Terri Projekt 2013. Projektarbeit an der FHNW, IVGI (unveröffentlicht).

Haldi & Koch, 2016. Prüfung und Kalibrierung der geodätischen Messmittel von FHNW, ristag ag, Jauslin + Stebler AG und swisstopo für den Einsatz im Mont Terri Projekt 2017. Projektarbeit an der FHNW, IVGI (unveröffentlicht).

Hüssy & Järmann, 2016. Präanalyse Lotung Felslabor Mont Terri. Projektarbeit an der FHNW, IVGI (unveröffentlicht).

Kaufmann & Schär, 2014. Prüfung und Kalibrierung der geodätischen Messmittel von IVGI, ristag ag und swisstopo für den Einsatz im Mont Terri Projekt 2015. Projektarbeit an der FHNW, IVGI (unveröffentlicht).

Kistler et al. 2011: Geodetic monitor network in the rock laboratory Mont Terri – The MH experiment – Long Term monitoring of heaves. swisstopo report 10-21/ technical note 2008-02 Mont Terri rock laboratory.

Mont Terri Projekt: www.mont-terri.ch/inter-net/mont-terri/de/homepage.html

NAGRA: www.nagra.ch/de

Neuhierl, Ryf, Wunderlich, Ingensand, 2006. 06. AlpTransit Sedrun: Weltpremiere mit inertialer Messtechnik. Geomatik Schweiz.

Salvini, Stengele, Ryf, 2014. Geodätisches Datum untertage: Eine Konstante über Zeit und Raum? Herbert Wichmann Verlag, Ingenieurvermessungskurs 2014, A. Wieser (Hrsg.).

Schätti, Ryf, 2004.07. Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. Geomatik Schweiz.

Stengele, Schätti, 2010.12. Grundlagen- und Hauptkontrollmessung im Gotthard-Basistunnel. Geomatik Schweiz.

chi / sda, 26.12.2015. US-Forscher entwickeln den Röntgenblick. Basler Zeitung.

Birrer, 29.01.2015. Die Krux mit den 360 000 Tonnen Atommüll. Basler Zeitung.

Hänngi, 30.02.2009. Im Felslabor wird die Ewigkeit simuliert. Basler Zeitung.

Scrucci, 2013.09.25. Auch der neue Tiefenlager-Prototyp löst die Konflikte nicht. Neue Zürcher Zeitung.

Peter Mahler

Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Institut Vermessung und Geoinformation
Gründenstrasse 40
CH-4132 Muttenz
peter.mahler@fhnw.ch

Matthias Kistler

Bundesamt für Landestopographie
swisstopo
Bereich Vermessung
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern
matthias.kistler@swisstopo.ch

Senecio Schefer

Bundesamt für Landestopographie
swisstopo
Bereich Landesgeologie
Mont Terri Project, Route de la Gare 63
Fabrique de Chaux
CH-2882 St. Ursanne
senecio.schefer@swisstopo.ch