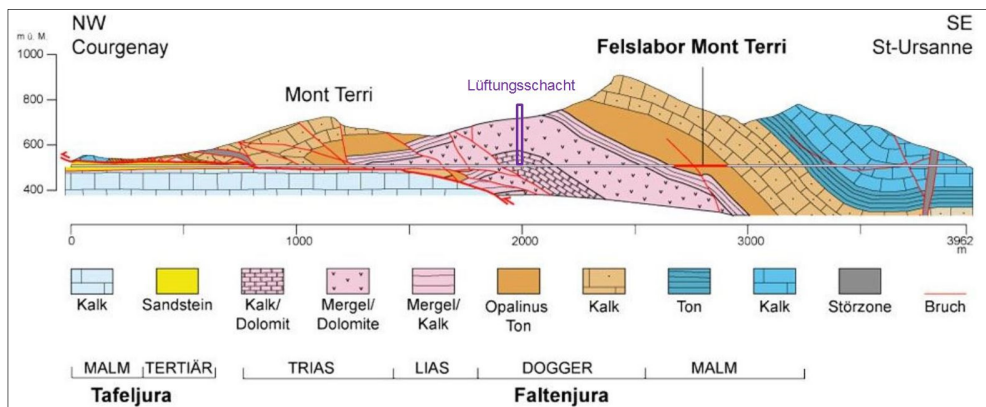


# 10 Jahre geodätisches Grundlagen- und Überwachungsnetz im Felslabor Mont Terri: Präzisions-Tunnelvermessung für die Entwicklung und Austestung eines Überwachungskonzepts für zukünftige Tiefenlager

Matthias KISTLER, Peter MAHLER, Senecio SCHEFER und Sebastian CONDAMIN

## 1 Das Felslabor Mont Terri zur Erforschung der Entsorgungsmöglichkeiten für radioaktive Abfälle in geologischen Tiefenlagern in der Schweiz

Im Felslabor Mont Terri in St-Ursanne in der Schweiz wird seit 1996 ein internationales Forschungsprogramm unter der Leitung von swisstopo durchgeführt mit dem Ziel, die spezifischen Eigenschaften des Opalinustons hinsichtlich Machbarkeit und Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle abzuklären. Durch den Bau des Autobahntunnels Mont Terri (Transjurane A16) zwischen St-Ursanne und Courgenay im Kanton Jura, welcher 1998 eröffnet wurde, konnte der als Wirtgestein für ein Tiefenlager vorgesehene Opalinuston im Untergrund zugänglich gemacht werden. Das ermöglichte den Aufbau eines gut zugänglichen Felslabors (vgl. Abb. 1).



**Abb. 1:** 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.

Beim Felslabor Mont Terri handelt es sich um ein Forschungslabor, an welchem heute über 130 Vertragspartner und über 40 Forschungsinstitute aus zehn Staaten beteiligt sind. 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. Insgesamt wurden seit 1996 138 Experimente gestartet, wovon 93 bereits abgeschlossen und 45 noch am Laufen sind (Stand 2016).

Seit dem Start wurde das Felslabor kontinuierlich ausgebaut und soll im Südteil 2018 erneut erweitert werden, damit genügend Platz für weitere Experimente vorhanden ist. Im Zentrum steht die hydrogeologische, geochemische und geotechnische Charakterisierung des Opalinustons, dessen Eigenschaften sich für ein geologisches Tiefenlager besonders gut eignen. Im Felslabor Mont Terri werden keine radioaktiven Abfälle zwischen- oder endgelagert, und es werden auch keine Experimente mit radioaktivem Material durchgeführt.

## 2 Netzanlage

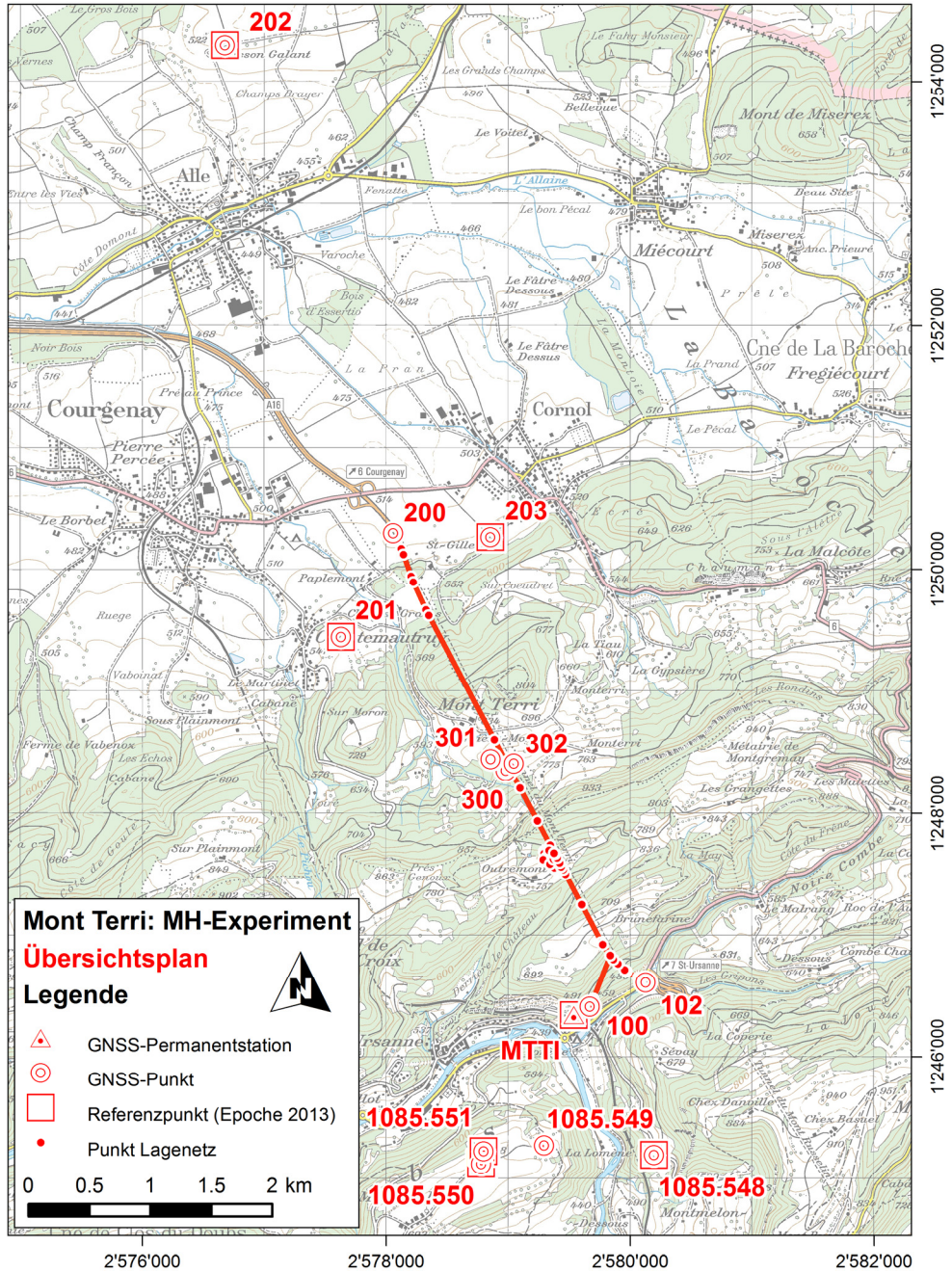
### 2.1 Äusseres Netz

Um das Felslabor für Laborerweiterung, die Georeferenzierung von Experimenten sowie für den dreidimensionalen Nachweis von Verformungen vermessungstechnisch zu erschliessen, wurde 2007 durch swisstopo ein geodätisches Grundlagen- und Überwachungsnetz aufgebaut. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf eine tektonische Bruchzone (Main Fault) gelegt, welche quer durch das Felslabor verläuft. Diese Arbeiten starteten damals unter der Bezeichnung MH-Experiment (Long Term Monitoring of Heaves), wobei das Experiment mit Long Term Monitoring of Displacements (4D) beschrieben wird, da von Anfang an neben den Höhen auch die Lageänderungen und deren zeitliche Variation beobachtet wurde.

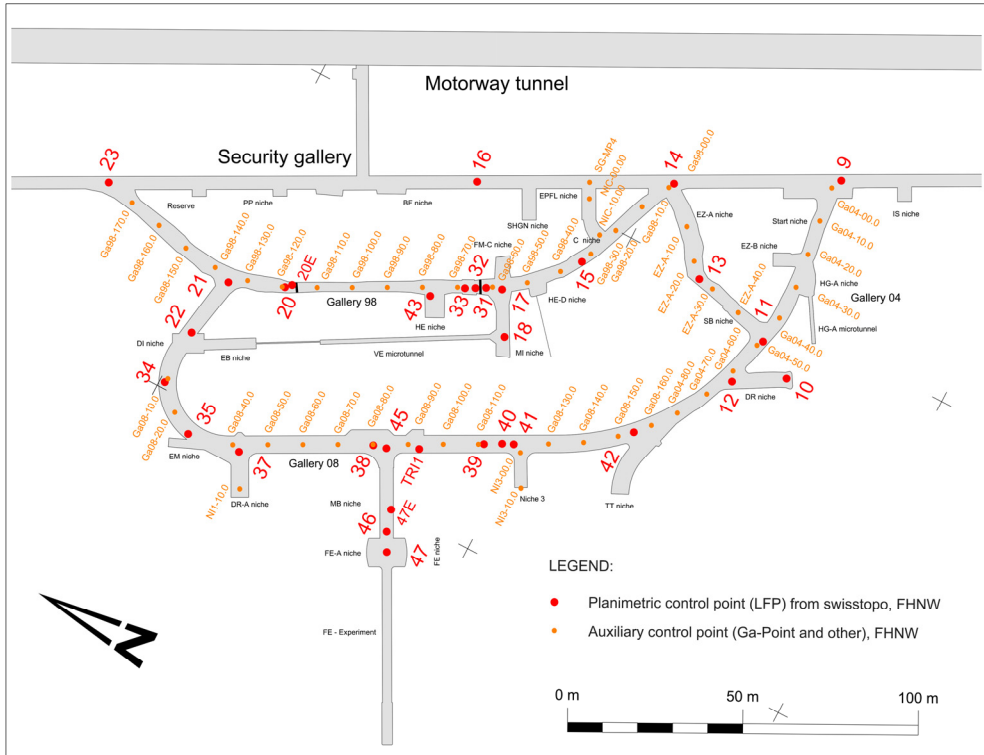
Die Netzanlage besteht aus einem mit GNSS bestimmten äusseren Netz mit 13 Anschluss- und Portalpunkten sowie der GNSS-Permanentstation MTTI (vgl. Abb. 2). Die Punkte wurden entweder mit Messpfeilern oder mit Präzisions-Kappenbolzen, wie sie für die Schweizer Landesvermessung verwendet werden, versichert. Für die Höhenmessungen besteht ein Anschluss an eine Punktgruppe des Schweizer Landeshöhennetzes in St-Ursanne.

### 2.2 Inneres Netz

Das innere Netz besteht aus Polygonzügen und einem Präzisionsnivellement durch den Sicherheitsstollen sowie einer netzartigen Struktur im Felslabor (vgl. Abb. 3). Insgesamt umfasst es heute rund 80 Hauptpunkte. Weiter wurde darauf geachtet, auch geotechnische Sensoren und die GNSS-Permanentstation terrestrisch ins geodätische Netz zu integrieren. Zu diesem Zwecke wurden spezielle Adapter konstruiert (vgl. Abb. 4), wie z. B. für den geotechnischen Sensor Trivec mit welchem relative 3D-Deformationen in einer Bohrung entlang einer Messlinie gemessen werden können.



**Abb. 2:** Das Grundlagen- und Überwachungsnetz Mont Terri mit den Referenz- und Überwachungspunkten sowie der GNSS-Permanentstation MTTI. Das Felslabor befindet sich in der Mitte zwischen den Punkten 102 (Autobahnbrücke im Süden) und 300 (Lüftungsschacht).



**Abb. 3:** Das innere Netz im Felslabor mit den Hauptpunkten und den Hilfspunkten für die verschiedenen Georeferenzierungen von Bohrloch-Einmessungen, Erweiterungsarbeiten, Konvergenzmessungen und Experimenten mit einem Raumbezug.

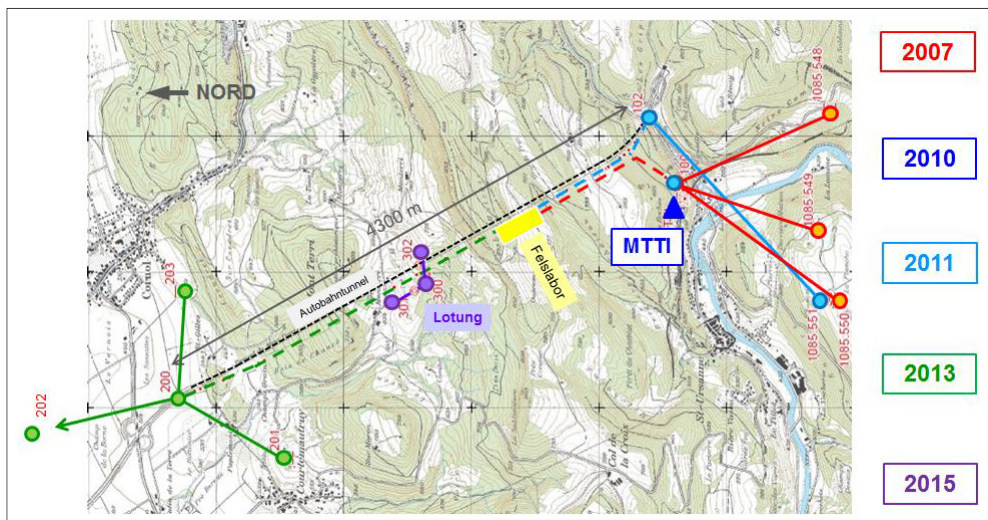


**Abb. 4:** Für die Integration der GNSS-Permanenstation MTTI in das geodätische Netz wurde ein spezieller Adapter konstruiert. Damit kann das Phasenzentrum von GNSS-Antennen direkt zentrisch über einen Steckzapfenbolzen („SBB-Bolzen“), auf welchen eine Zielscheibe oder ein Prisma invers aufgesetzt werden kann, eingemessen werden.

### 2.3 Netzerweiterungen und -optimierungen

Die ersten Messungen von 2007–2009 erfolgten vom bestehenden Portalpfeiler, welcher für den Bau des Autobahntunnels in den Neunziger Jahren errichtet worden ist, ausschliesslich von Süden aus. Ab 2010 wurde die Netzanlage in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) sukzessive erweitert und verbessert (vgl. Abb. 5):





- 2010: Bau der GNSS-Permanentstation MTTI und Integration ins geodätische Netz
- 2011: zweiter Südanschluss auf der Autobahnbrücke und Eliminierung von kurzen Visuren beim Stolleneingang durch die Errichtung eines neuen Portalpfeilers
- 2013: Erstellung eines Portalnetzes im Norden und damit Schliessung des offenen Polygonzuges
- 2015: Erschliessung des Lüftungsschachtes durch ein drittes Portalnetz und Installation zweier Vorrichtungen für die Auflotung



**Abb. 5:** Die verschiedenen Etappen der Netzerweiterung und -optimierung von 2010 bis 2015.

Mit jeder Netzerweiterung und -optimierung konnte die Genauigkeit signifikant gesteigert werden (vgl. Tabelle 1), mit einer Ausnahme: Die optische Auflotung 2015 konnte bisher nicht wie mit der Präanalyse prognostiziert zu einer besseren Netzgeometrie beitragen, da bei den Lotungsmessungen mit dem Zenitlot (ZL) die vom Hersteller spezifizierte theoretische Standardabweichung nicht ganz erreicht wurde. Zudem sind für die Richtungsübertragung vom Lüftungsschacht zur Sicherheitsgalerie aufgrund des Stollenverlaufs und der installierten Lüftungslamellen einige ungünstige kurze Visuren nicht zu vermeiden.

**Tabelle 1:** Übersicht über die verschiedenen Netzvarianten und die damit verbundenen Genauigkeitssteigerungen (Mittel der grossen Halbachsen der Konfidenzellipsen im Felslabor bei einem Konfidenzniveau von 95 %)

Jahr	Netzvariante	Symbol	Grosse Halbachsen Konfidenzellipsen 95 %	
			theoretisch	empirisch
2007 2009	Mit altem Pfeiler beim Südportal		33.8 mm	19.6 mm
2011	Mit neuem Pfeiler beim Südportal plus zweitem Anschluss über das Südportal der Autobahn		11.2 mm	5.9 mm
2013	Mit zusätzlichem Anschluss Nordportal		7.4 mm	2.9 mm
2015	Mit zusätzlicher Lotung durch den Lüftungsschacht		2.2 mm	3.2 mm

### 3 Messungen und Auswertungen

#### 3.1 Messkampagnen und eingesetztes Instrumentarium

Seit der Nullmessung im Jahre 2007 wurden alle zwei Jahre Wiederholungsmessungen durchgeführt. Inzwischen liegen insgesamt sechs Epochen vor (vgl. Tabelle 2). Zusätzlich wurde während der letzten Erweiterung im Labor 2008/2009 fünfmal ein reduziertes Höhennetz gemessen.

**Tabelle 2:** Übersicht über die verschiedenen Messkampagnen und Netzerweiterungen

Jahr.Monat	Messkampagne
2007.09–11	Nullmessung swisstopo
2008.04–11 2009.05	5 Nivellement-Messungen swisstopo im Labor während und nach dem Bau der Galerie 08
2009.02	1. Folgemessung swisstopo „Winter“
2009.07	2. Folgemessung swisstopo „Sommer“ (ohne Kreiselmessungen)
2009.08	Absolute Schwere-Nullmessungen „metas“
2010.02	Bau- und Inbetriebnahme der GNSS-Permanentstation Mont Terri (MTTI) und Integration ins automatische GNSS-Netz der Schweiz (AGNES)
2011.05	3. Folgemessung in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) mit der Netzerweiterung und -optimierung Südportal
2013.05	4. Folgemessung FHNW mit Netzerweiterung Nordportal
2015.05	5. Folgemessung FHNW mit der Netzerweiterung Lüftungsschacht (ohne Kreiselmessungen)
2017.05–06	6. Folgemessung FHNW und Bestandsaufnahme vor Laborerweiterung 2018

Für die Messungen wurden ausschliesslich kalibrierte Präzisionsinstrumente eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.2). Die Kreismessungen werden seit 2007 (abgesehen von zwei Epochen) regelmässig durchgeführt, so dass eine Zeitreihe vorliegt, welche die Richtungsübertragung in den Tunnel unabhängig kontrolliert und u. a. auch Hinweise auf das Langzeit-Stabilitätsverhalten des Gyromats 2000 gibt.

### 3.2 Auftretene systematische Abweichungen und deren Reduktion

Die möglichst frühzeitige Erkennung von signifikanten Deformationen erfordert nicht nur eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit, die durch die Verbesserung der Netzanlage sowie den Einsatz von Präzisionsinstrumenten erreicht wurde, sondern auch das Erkennen und Reduzieren von systematischen Abweichungen. Folgende systematische Abweichungen wurden seit 2007 festgestellt und reduziert:

#### Verdrehung offener Polygonzug

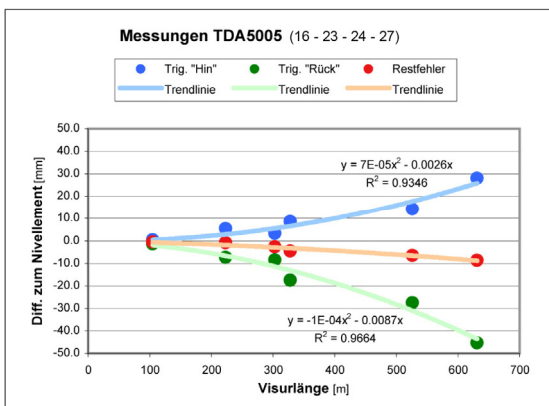
Stützung mit Kreismessungen, Optimierung der Netzgeometrie durch die Vermeidung von kurzen Visuren und Schliessen des Polygonzuges durch Netzerweiterungen (vgl. Abb. 7.1).

#### Refraktion

Bei den Höhenwinkelmessungen wurden unterschiedliche Refraktionseinflüsse festgestellt. Seitenrefraktion hingegen konnte bisher nicht nachgewiesen werden, wobei fast alle Vermessungspunkte bewusst in der Tunnelmitte versichert wurden. Die empirische Bestimmung des Refraktionskoeffizienten nach (INGENSAND 1998) mit Hilfe von Temperaturgradienten und der Formel 1 (mit  $p$  = Luftdruck [hPa],  $T$  = Temperatur [Kelvin],  $dT/dh$  = vertikaler Temperaturgradient) ergab folgende mittlere Werte: Für das Portalnetz  $\kappa = 0.11$  und für den Laborbereich  $\kappa = 1.29$ .

$$\kappa = 503 \cdot \frac{p}{T^2} \cdot \left(0.0342 + \frac{dT}{dh}\right) \quad (1)$$

Der hohe Wert im Felslabor ist darauf zurückzuführen, dass die Temperatur vom Labor in Richtung Tunnelscheitelpunkt mit ca.  $0.2^\circ\text{C}$  pro Meter Höhendifferenz zunimmt. Im Unter-



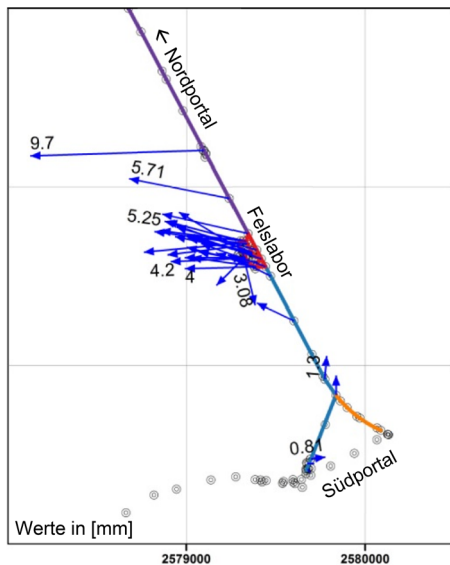
**Abb. 6:**

Höhenwinkelmessungen mit dem TDA5005 bei Verwendung des Standard-Refraktionskoeffizienten von  $\kappa = 0.13$  im Vergleich zu den mit dem Nivellement bestimmten Höhendifferenzen in Abhängigkeit der Visurlänge. Eine Restabweichung bleibt trotz Hin- und Rückmessung, was wahrscheinlich auf die Variation der Refraktion zurückzuführen ist.

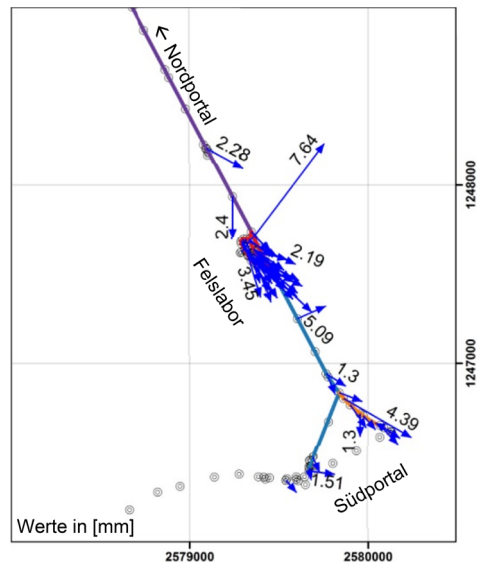
schied zu den Bedingungen in der klassischen Triangulation mit  $\kappa_N = 0.13$  steigt die Temperatur also mit zunehmender Höhe an, was bedeutet, dass die Dichte der Luft gegen oben zunimmt und die Brechung invers ist. Die Ziele werden dementsprechend wegen der Refraktion auf beiden Stationen zu tief angezielt (vgl. Abb. 6).

## Additionskonstanten

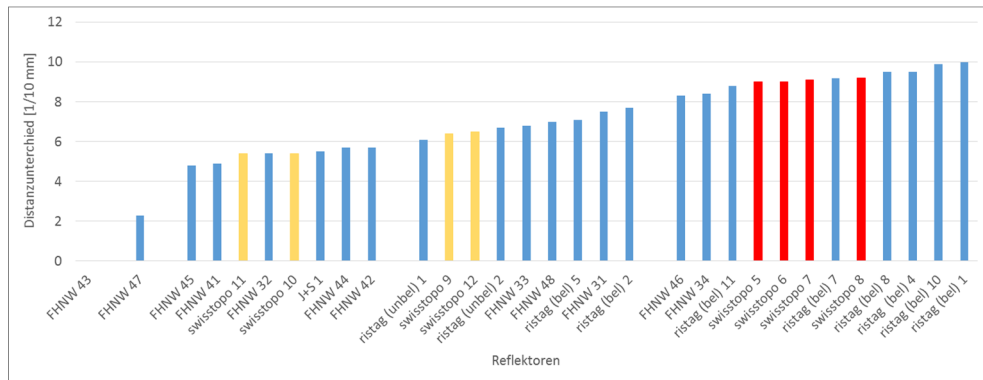
2007 bis 2009 wurden für die Messungen ausschliesslich kalibrierte Präzisionsprismen GPH1P von Leica mit einer Zentriergenauigkeit von 0.3 mm eingesetzt. Mit der ersten Netzerweiterung 2011, welche unter anderem den gleichzeitigen Einsatz von zwei Messgeräten vorsah, kamen dann auch Prismen des Typs GPR121 mit einer Zentriergenauigkeit von 1 mm zum Einsatz. Wie sich später zeigte, schöpft der Hersteller bei den Prismen die Toleranzen voll aus, was bei der Verwendung von Gruppenwerten systematische Abweichungen bei den Distanzmessungen verursacht (vgl. Abb. 7.2). Abhilfe schaffte hier die individuelle Kalibrierung und die sorgfältige Erfassung der Metadaten, wann welches Prisma auf welchem Vermessungspunkt stand.



**Abb. 7.1:**  
Systematische, netzgeometriebedingte Verdrehung des offenen Polygonzuges 2009 im Vergleich zu 2011 nach der ersten Netzerweiterung und -optimierung



**Abb. 7.2:**  
„Zu lange“ Distanzen im 2011 wegen der Verwendung von Gruppenwerten für die Additionskonstanten im Vergleich zu 2013 mit individuell kalibrierten Prismen



**Abb. 8:** Variation der Werte für die Additionskonstanten nach (HALDI & KOCH 2016): Bei den Prismen von swisstopo handelt sich um den Typ GPH1P von Leica (Zentriergenauigkeit 0.3 mm) aus zwei Serien (swisstopo 5 – 8 und 9 – 12). Alle übrigen Prismen der FHNW und der Firma ristag ag sind vom Typ GPR121 (beleuchtbar, Zentriergenauigkeit 1 mm).

Die FHNW hat neben den Additionskonstanten auch die Querabweichungen zwischen Träger und Prismen untersucht (HALDI & KOCH 2016). Dabei wurden keine grossen Unterschiede zwischen den Prismentypen GPH1P und GPR121 festgestellt. Bei den Präzisionsprismen von swisstopo wurde innerhalb der Serie die spezifizierte Zentriergenauigkeit von 0.3 mm erreicht. Hingegen traten zwischen den Serien Differenzen bis zu 0.5 mm auf.

## 4 Ausgleichsrechnung

### 4.1 Funktionales Modell

Im funktionalen Modell wird LV95 als Referenzrahmen für die Lage verwendet. Für die Höhe wurde ein lokaler Anschluss in St-Ursanne an LN02 realisiert und zusätzlich Geoidundulationen und Lotabweichungen aus dem Geoidmodell CHGeo2004 eingeführt. Schwereinflüsse auf die Nivellementsmessungen wurden nicht berücksichtigt. Die Meteodaten (Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit) wurden an den Stations- und den Zielpunkten erfasst und anschliessend gemittelt. Die Auswertung der GNSS-Messungen, welche pro Session mit je drei Translationen in die Ausgleichung integriert wurden, erfolgte innerhalb des Netzes mit einer L1-Lösung, der Anschluss an AGNES mit L3-Basislinien.

### 4.2 Stochastisches Modell

Die nachfolgende Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die verwendeten Instrumente, die für die Präanalyse verwendeten theoretischen Standardabweichungen sowie die empirisch erreichten Werte (jeweils  $1 \cdot \sigma$  resp.  $1 \cdot s$ ) nach der dritten Netzerweiterung mit Permanentstation, dem zweiten Südanschluss mit Netzoptimierung im Portalbereich und dem neuen Nordanschluss.

**Tabelle 3:** Übersicht über die verwendeten Instrumente und die theoretischen und empirischen Standardabweichungen

Beobachtungstypen / eingesetzte Instrumente	Standardabweichung	
	(1· $\sigma$ ) theoretisch	(1·s) empirisch
GPS/GNSS-Koordinaten: Lage	3.0 mm	1.8 mm
Trimble 5700 / Leica 1200 und Viva 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: Leica TC2002	2.0 mm	0.8 mm
(auf 1 km) Leica TDA5005	3.0 mm	0.5 mm
Leica TS30	1.6 mm	0.5 mm
Leica TM30	1.6 mm	0.7 mm
Mekometer ME5000	1.0 mm	0.2 mm
Zentriergenauigkeit (auf dem Stativ):	0.2 mm	0.1 mm
Zentriergenauigkeit (über dem Punkt) mit Nadirlot:	0.5 mm	0.3 mm
Kreiselazimute: Gyromat 2000 mit Leica T1600	1.5 mgon	0.8 mgon
Höhengenauigkeit (Doppelnivellement)		
Leica DNA03/Zeiss DiNi10 11/Trimble DiNi03	0.3 mm / km	0.2 mm / km
Lotungsmessungen Leica Nadirlot / Zenitlot	0.5 mm / 100 m	0.7 mm / 100 m
Lotabweichungen	0.1 mgon	–
Absolut Gravimeter FG5 #209 (metas)	bis 1 $\mu\text{gal}^1$	–

### 4.3 Festpunkthypothese / Netzlagerung

In der Lage wird das geodätische Netz auf den Permanentstationen BOUR und MTTI sowie den vorher mittels invarianter Schätzung über alle Epochen bestimmten stabilen Portalpunkten (1085.700|548|.550|.551 im Süden und 201–203 im Norden) gelagert. Da die Lotungsmessungen (vorerst) keine Verbesserung der Genauigkeit brachten, wurden diese Messungen nicht integriert und die Portalpunkte „Lüftungsschacht“ dementsprechend nicht verwendet.

Die Höhenlagerung erfolgt zwangsfrei auf dem Punkt H3H424 (JU 38) in St-Ursanne, respektive ab 2009 beim Bahnhof (D1V6094 / JU 194).

### 4.4 Common-Mode-Filterung

Trotz der ausschliesslichen Verwendung von Präzisionsinstrumenten, der sukzessiven Verbesserung der Netzanlage und der fortgesetzten Reduktion der Anteile systematischen Abweichungen blieb der signifikante Nachweis von Lageverschiebungen im Felslabor (bei einer Netzlagerung wie in Abschnitt 4.3 beschrieben und einem Konfidenzniveau von 95 %) eine Herausforderung. Denn im Unterschied zur Höhe waren die festgestellten Lageverschiebungen sehr klein (< 4 mm). Abhilfe schaffte hier eine Art Common-Mode-Filterung basierend auf den stabilen Punkten rund um das Labor: Bei dieser Filterung wird

<sup>1</sup> 1  $\mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ ms}^{-2} \sim 1$  Milliardstel der Erdschwerebeschleunigung

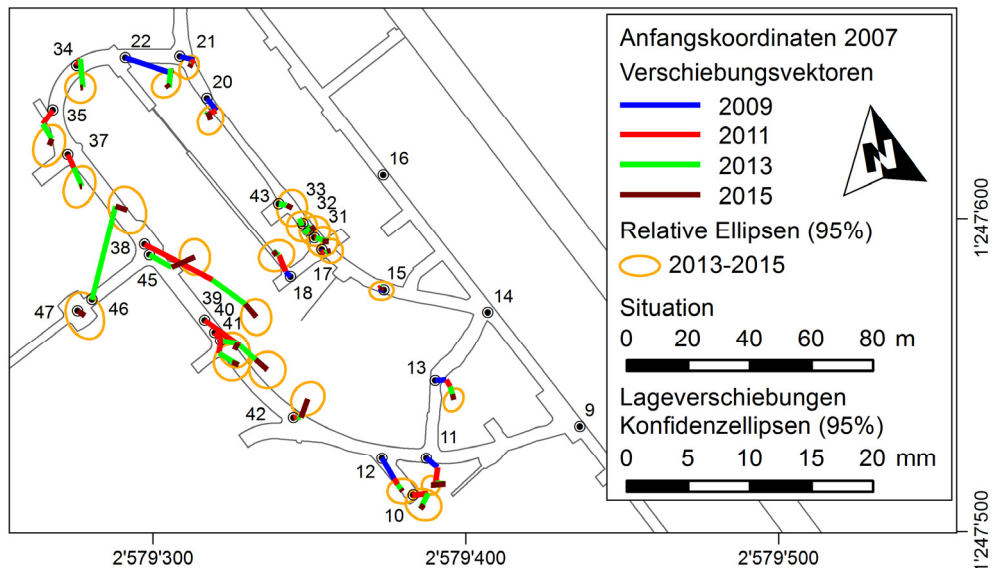
angenommen, dass Bewegungen, welche alle Punkte gleich zeigen, nicht der Realität entsprechen. Umgesetzt wurde diese Filterung, indem zuerst mittels Helmert-Transformationen zwischen den verschiedenen Epochen die stabilen Punkte in der Sicherheitsgalerie auf der Höhe des Felslabors identifiziert wurden. Anschliessend wurden dann in der multi-epochalen Gesamtausgleichung für diese Punkte mit der Ausgleichungssoftware LTOP eine invariante Koordinate über alle Epochen von 2007–2015 geschätzt. Damit konnten die Anteile der verbliebenen (mutmasslichen) systematischen Abweichungen weiter reduziert werden und relative Gesamtverschiebungen innerhalb des Felslabors in den meisten Fällen signifikant nachgewiesen werden (vgl. Abb. 9).

## 5 Deformationsanalyse

### 5.1 Lageverschiebungen

Die festgestellten Lageverschiebungen von 2007 bis 2015 (vgl. Abb. 9) traten insbesondere während und nach den Exkavationsphasen von 2008 und 2012 auf. Danach nahmen die Bewegungen wieder ab.

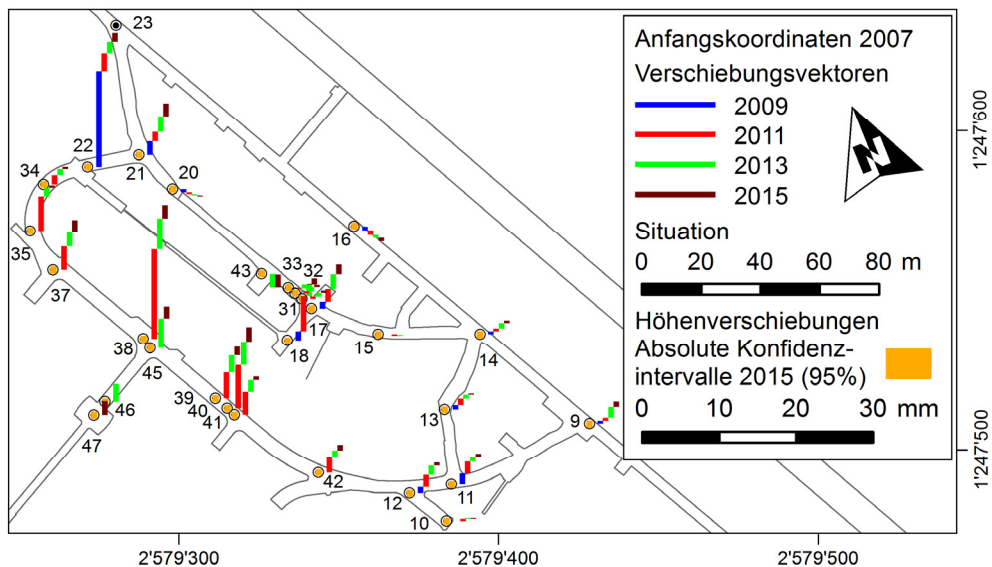
Für die Beurteilung der Signifikanz der Verschiebungsvektoren 2013 > 2015 wurden die relativen Konfidenzellipsen dargestellt. Bei den Punkten 11, 42 und 45 ragen in dieser Epoche die Verschiebungsvektoren leicht über die Konfidenzellipse hinaus und es liegt somit eine signifikante Verschiebung vor (Konfidenzniveau 95 %). Auch hier konnten die Ursachen für diese Verschiebungen meistens auf Bautätigkeiten in unmittelbarer Nähe der Punkte zurückgeführt werden.



**Abb. 9:** Lageverschiebungen 2007–2015: Die grössten festgestellten Deformationen bei den Punkten 22, 38 und 46 sind auf lokale Bauarbeiten (Exkavationen) zurückzuführen. Die tektonische Bruchzone verläuft vom Punkt 16 über 32 zum Punkt 40, deshalb die höhere Punktdichte.

## 5.2 Hebungen und Senkungen

Die festgestellten Höhenverschiebungen von 2007 bis 2015 sind in Abb. 10 dargestellt. Die hohe Genauigkeit des Nivellements kann den absoluten Konfidenzintervallen entnommen werden. Generell konnte nachgewiesen werden, dass sich die Tunnelsohle nach Abschluss der Bauarbeiten in der Galerie 08 im Jahre 2009 hob und dass sich in den letzten Jahren die Bewegungen verlangsamt haben. Weiter zeigt der Bereich nördlich der tektonischen Verwerfung (Main Fault) entlang der Punkte 16 – 32 – 40 einen Trend zu stärkeren Hebungen (max. 1 mm pro Jahr). Ein zusätzliches hydrostatisches Nivellement HLS zur hochfrequenten und permanenten Überwachung der tektonischen Verwerfung wurde 2012 zwischen den Punkten 17 und 20 installiert (MEIER et al. 2013).



**Abb. 10:** Höhenverschiebungen 2007–2015: Die grösste festgestellte Hebung trat beim Punkt 22 auf, von welchem aus die Exkavation der Galerie 08 im Westen in Angriff genommen wurde.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Nach der vermessungstechnischen Erschliessung des Felslabors Mont Terri im Jahre 2007 wurde in den vergangenen 10 Jahren die Netzanlage sukzessive verbessert, systematische Abweichungen in den Messungen reduziert und damit eine sehr hohe Genauigkeit erreicht. Damit gelang es, verschiedene Deformationen signifikant nachzuweisen. Weiter ermöglichte die Zusammenarbeit zwischen swisstopo und der FHNW verschiedene Synergien zu nutzen, den zukünftigen Ingenieurinnen und Ingenieuren die Mitarbeit in einem interessanten und anspruchsvollen Präzisionsvermessungsprojekt zu ermöglichen und damit einen Beitrag zur Nachwuchsförderung zu leisten.

Im Mai und Juni 2017 wird das Grundlagen- und Überwachungsnetz ein weiteres Mal vollständig gemessen. Im Hinblick auf die im nächsten Jahr geplante Laborerweiterung verfügen die Verantwortlichen somit über eine aktuelle geodätische „Bestandesaufnahme“. Während den Exkavationsarbeiten ist geplant, den Überwachungsrhythmus zu erhöhen und auch flächenhafte Sensoren wie z. B. terrestrisches Laserscanning (TLS) einzusetzen.

Das übergeordnete Ziel bleibt letztendlich ein Überwachungskonzept für ein geologisches Tiefenlager zu erarbeiten und auszutesten, wobei neben den geodätischen Sensoren auch geotechnische, geochemische, hydrogeologische und solche zum Nachweis von Radioaktivität zum Einsatz kommen sollen.

## Literatur

- BAUMANN, Ch. (2015): Mont Terri – MH Experiment: Global Adjustment 2007 to 2013. Supplement to Technical Note 2008-02, swisstopo Report 15-04.
- BAUMANN, Ch. & KISTLER, M. (2016): Mont Terri – MH Experiment: Gesamtausgleichung und Deformationsanalyse 2007 – 2015. Verifikation und Integration der Vermessungsarbeiten 2015, swisstopo Report 16-14.
- HALDI, C. & KOCH, A. (2016): Prüfung und Kalibrierung der geodätischen Messmittel von der FHNW, ristag ag, Jauslin Stebler AG und swisstopo für den Einsatz im Mont Terri Projekt 2017. Technischer Bericht Blockprojekt Ingenieurgeodäsie, FHNW.
- INGENSAND, H. (1998): Geodätische Messtechnik – Band 1. Vorlesungsskript Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- KAHMEN, H. (2005): Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde. De Gruyter Lehrbuch.
- KISTLER, M., MARTI, U., MATTLI, B., ET AL. (2011): Geodetic Monitor Network in the Rock Laboratory Mont Terri: The MH Experiment – Long Term Monitoring of Heaves. swisstopo Report 10-21 and Technical Note 2008-02, Mont Terri Rock Laboratory.
- MAHLER, P., KISTLER, M. & SCHEFER, S. (2017): Geodätisches Grundlagen- und Deformationsnetz für das Felslabor Mont Terri in St. Ursanne – Tunnelvermessung mit höchster Präzision. In: Geomatik Schweiz, 1-2/2017, S. 18–28.
- MEIER, E., DETZNER, K., WIDMER-SCHNIDRIG, R., et al. (2013): SM-B Experiment: High resolution seismic monitoring. Record of seismic fingerprint - Feasibility study using highest precision seismic (STS2.5) and deformation tools (HLS-PSI-SLS). Technical Note 2013-02, Mont Terri Rock Laboratory.
- THÖNY, R. (2014): Geomechanical Analysis of Excavation-Induces Rock Mass Behaviour of Faulted Opalinus Clay at the Mont Terri Underground Rock Laboratory. Dissertation No. 21415, Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zurich.