Wenn höchste Präzision gefordert wird: HLS- und Seismik-Messungen in Felslabor

Edi MEIER, Rudolf WIDMER-SCHNIDRIG und Christophe NUSSBAUM

1 Zusammenfassung

Im Felslabor „Mont Terri“ wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, die unter anderem den Einsatz eines hochpräzisen Hydrostatischen Messsystems (HLS) untersuchte, das schon seit über 10 Jahren im Teilchenbeschleuniger SLS am Paul Scherrer Institut PSI in Betrieb ist, und dort zur Erfassung von differentiellen Höhenänderungen zwischen einzelnen Magneten des Beschleunigers eingesetzt wird. Das Messsystem vom Typ PSI-SLS wurde im Jahr 2000 speziell für das PSI entwickelt, dies in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, geomETH (Zürich), dem Stanford Linear Collider SLAC (USA) und der Firma Edi Meier + Partner AG (Winterthur). Um auch kleinste seismische Erschütterungen identifizieren zu können, wurde zusätzlich das neueste Breitband Seismometer „STS 2.5“ aus dem Hause Streckeisen installiert. Die Daten beider Systeme wurden mit einer High End seismischen Datenerfassung „Quanterra Q330S+“ registriert. Es zeigte sich, dass das HLS System – das für Laborbedingungen gebaut wurde - auch unter den rauen Bedingungen im belüfteten Mont Terri Untertage Labor hochpräzise Daten bis in den seismischen Frequenzbereich liefern kann, und welche weit über der am PSI geforderten Performance liegen.

2 Einführung

Das internationale Felslabor „Mont Terri“ liegt im schweizerischen Jura bei St. Ursanne am Fluss Doubs. Man untersucht dort den Opalinuston, der als Wirtgestein für ein zukünftiges Tiefenlager für radioaktive Abfälle vorgesehen ist. Das Labor steht unter dem Patronat der „Swisstopo“, dem Bundesamt für Landestopografie. Der Zugang zum Labor erfolgt über den Sicherheitsstollen des Mont Terri Tunnels der Autobahn A16. In einem im Jahr 1998 parallel zur Autobahn ausgebrochenen Untersuchungsstollen wurde Ende 2012 ein 50 Meter langes hydrostatisches Messsystem (HLS) vom Typ PSI-SLS mit 2 Präzisionshöhensensoren installiert. Dieses Messsystem basiert auf der Messung des Wasserstandes in einem halb mit Wasser gefüllten Rohres. Es wurde zur Überwachung des Synchrotrons Swiss Light Source (SLS) für das PSI entwickelt und ist dort seit über 10 Jahren mit 192 Sensoren in Betrieb.

Am südlichen Ende des Stollens im Felslabor befindet sich eine geologische Scherzone. Diese belegt, dass dort Gesteinsschichten verschoben wurden. Es ist jedoch nicht klar, ob dieser Verschiebungsprozess immer noch aktiv ist.

Im Sinne einer Machbarkeitsstudie wurde untersucht, ob das Hydrostatische Messsystem auch unter den im Felslabor vorliegenden Untertage-Bedingungen einsetzbar ist.

Dazu wurde zusätzlich zum HLS ein Barometer und ein Breitband-Seismometer STS-2.5 der Firma Streckeisen installiert, mit dem kleinste lokale Bewegungen bis zu einer Dauer von einigen Stunden dokumentiert werden können. Beide Signale wurden mit einer hoch auflösenden seismischen Datenerfassung der Firma Quanterra (USA) aufgenommen. Die Kombination beider Instrumente erlaubt es, Nutzsignale von Störsignalen zu unterscheiden. Störsignale können beispielsweise von Entlastungen der Wand-Montage der HLS-Sensoren und der Rohrbefestigung verursacht werden.

2.1 Zielsetzung und Messkonzept

Die geologische Scherzone schneidet den Versuchsstollen wenige Meter vom Südeingang entfernt. Ein Ziel ist es, herauszufinden ob diese Scherzone heute noch aktiv ist. Erwartet werden allenfalls Verschiebungen im Mikrometerbereich. Ein anders Ziel bestand darin, herauszufinden, ob das HLS unter den Bedingungen in einem künstlich belüfteten Stollen sinnvolle Resultate liefern kann. Eine künstliche Reaktivierung der Störung ist in 2014/2015 geplant. Mit der vorliegenden Studie soll auch untersucht werden, ob das HLS geeignet ist, solche, auf der Scherzone induzierte Bewegungen, zu erfassen. Die eingesetzten Messgeräte sind in Abbildung 1 zusammengestellt.

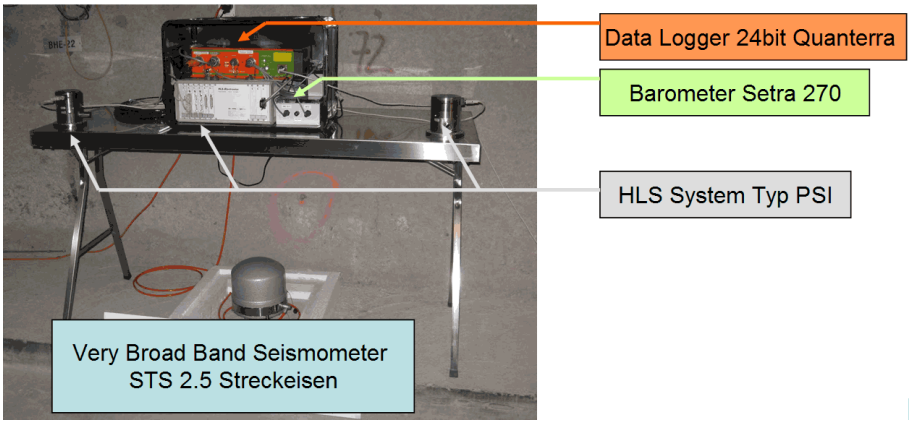

Abb. 1: Eingesetzte Messgeräte: 2 HLS Sensoren mit HLS Elektronik, 1 Drei-Komponenten Breitband Seismometer, 1 Barometer und eine hochauflösende seismische Datenerfassung.

Es sind dies die beiden HLS Sensoren am Rand des Tisches mit der HLS Elektronik in der Bildmitte. Die beiden HLS Sensoren wurden mit einem 50m langen Acrylglas-Rohr von 21mm Innendurchmesser auf +/- 5mm genau horizontal an der hinteren Wand montiert. Unter dem Tisch wurde das Breitband-Seismometer STS2.5 der Firma Streckeisen so auf-

gestellt, dass die eine Achse Bewegungen in Richtung des Stollens aufnimmt und die andere die Bewegungen 90 Grad zum Stollen. Alle Signale wurden in der schwarzen Box auf dem Tisch aufbereitet und im hochauflösenden seismischen Datalogger „Quanterra Q330S+“ (orange) digitalisiert und gespeichert. Der HLS Sensor auf der rechten Seite wurde etwa 10m vom Seismometer entfernt auf der südlichen Seite der geologischen Scherzone montiert. Der linke HLS Sensor und das Seismometer wurden auf der nördlichen Seite der Scherzone installiert. Zusätzlich wurde der Luftdruck mit einem sehr hochauflösenden Barometer aufgezeichnet.

3 Die Messgeräte

3.1 Das Hydrostatische Messsystem HLS

Das HLS System wurde für die Präzisionsüberwachung des Elektronenstrahls am Beschleuniger des Synchrotrons „Swiss Light Source“ am Paul Scherrer Institut (PSI) entwickelt. Es arbeitet mit Sensoren, welche über ein halbgefülltes Rohr miteinander verbunden sind. Der Füllstand wird in den Sensoren kapazitiv über eine Elektrode erfasst, wobei der Kondensator durch die Wasseroberfläche und die Sensorplatte gebildet wird.

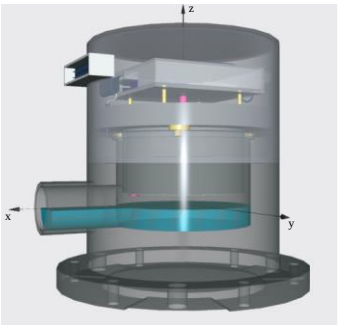

Abb. 2: Schnitt durch einen HLS Sensor. Der Füllstand wird kapazitiv über eine Elektrode erfasst.

Es gibt also keine beweglichen mechanischen Teile, die altern können wie z.B. eine Druckmembran. Bei Berührung der Elektrode mit dem Flüssigkeitsspiegel sorgt ein Ablaufring für das vollständige Abtropfen des Wassers. Die Berührung des Flüssigkeitsspiegels mit dem Berührpunkt kann durch die automatische Füllstation gezielt herbeigeführt werden. Der Berührpunkt hat einen festen Abstand von der Elektrode. Mit dem Berührpunktdetektor kann der Nullpunkt des Sensors bei Bedarf während dem Betrieb der Anlage erneut geeicht werden. Die Füllstation hat zudem die Aufgabe, den Wasserverlust, der durch Verdunstung entsteht, wieder auszugleichen. Diese Füllprozedur ist beim PSI-HLS vollständig automatisiert und kann über das Internet gesteuert werden.

Bei der Anwendung im Felslabor wurde auf die automatische Befüllung verzichtet und als Rohre wurden Acrylglas-Rohre anstatt Edelstahl-Rohre verwendet.

3.2 Seismometer STS2.5

Das Seismometer STS2.5 der Firma Streckeisen GmbH, Pfungen (Schweiz) ist ein „High Performance portables triaxiales sogenanntes „Very Broad Band"-Seismometer" (VBB). Es ist das Nachfolgemodell des Weltstandards STS 2. Dank dem Dynamikumfang von 145dB, können damit sowohl sehr grosse als auch sehr kleine Ereignisse aufgenommen werden. Die VBB Seismometer sind weltweit im Einsatz. Sie werden vor allem dann eingesetzt, wenn sehr genaue Daten gefordert werden, wie beispielsweise beim weltweiten Überwachung-Programm unterirdischer Atomexplosionen. Die VBB Seismometer geben die Bodenbewegungen wieder von ca 80Hz bis zu einer Periode von mehreren Stunden. Von 50Hz bis 120 s ist das Ausgangssignal mit 1500 V/(m/s) genau proportional zur Bodengeschwindigkeit.

Abb. 3: Triaxiales Very Broad Band Seimometer „STS 2.5" der Firma Streckeisen GmbH, Pfungen (Schweiz).

3.3 Seismische Datenerfassung Q330S+

Die seismische Datenerfassung Q330S+ ist ein hochauflösender 6 Kanal Recorder mit 24Bit Dynamikumfang. Die kleinste Signalveränderung, die registriert werden kann, wird als Count bezeichnet. Der Eingangsspannungsbereich beträgt 40Volt. Somit können kleinste Änderungen von $40V/2^{24}$Counts = 40V/16 777 000 Counts = 2.4 Mikrovolt/Count registriert werden. Es können bis zu 1000 Samples pro Sekunde gespeichert werden. Der Stromverbrauch ist mit ca. 2W sehr gering, sodass für eine gewisse Zeit auch Batteriebetrieb möglich ist. Die Zeitsynchronisation wird über einen GPS Empfänger gemacht. Dazu wur-

de das GPS Signal einer externen GPS Antenne über einen single mode Lichtleiter von 2km Länge in den Tunnel hineingeführt.

3.4 Barometer

Das eingesetzte Präzisionsbarometer besteht aus einer hochauflösenden Setra 270 Zelle. Der Kalibrationsfaktor ist 7000 Counts / hPa. Die Barometermessung wird oft bei einer seismischen Breitbandstation aufgestellt, da sich der lokale Untergrund unter einem Seismometer als Folge von Luftdruckänderungen leicht neigen kann. Diese Neigungsänderungen erzeugen bei den Seismometern scheinbare horizontale Beschleunigungen, die als Folge einer Neigung, also einer Richtungsänderung zur Schwerkraft (=Beschleunigung) entstehen.

4 Die Installation

4.1 Einbau des Hydrostatischen Messsystems

Die beiden HLS Sensoren wurden auf Edelstahl-Konsolen (siehe Abb. 4) montiert, die mit je zwei M20 Gewindestangen von 1m Länge in den Fels (Opalinuston) eingeklebt wurden. Dazu wurde zuerst mit einem grösseren Durchmesser 50cm tief durch den Spritzbeton gebohrt und dann geschaut, dass die Gewindestangen den Spritzbeton nirgends berühren. Der Hohlraum zwischen Spritzbeton und Gewindestange wurde anschliessend mit Silikon abgedichtet.

Abb. 4: Montage des nördlichen HLS Sensors auf einer Edelstahl-Konsole. Zwei M20 Gewindestangen wurden hinter der Spritzbetonverkleidung in den Opalinuston-Fels eingeklebt.

Anschliessend wurde das Verbindungsrohr aus 2m Einzelrohren montiert, die mit Silikonschlauch-Stücken verbunden wurden. Mit einem Baulaser wurde das Rohr auf ca. +/- 5mm genau horizontal ausgerichtet (siehe Abb. 5).

Abb. 5: Einbau des Verbindungsrohres. Mit einem Baulaser wurden die Rohre auf +/- 5mm genau horizontal ausgerichtet.

Die Befüllung des Rohres auf die Hälfte des Rohres zeigte sich zeitaufwändiger als angenommen. Im Gegensatz zu den Edelstahl-Rohren am PSI wurden am Mont Terri Acrylglasrohre verwendet. Während die Flüssigkeit in den Edelstahl-Rohren eine konkave Oberfläche aufweist, ist die Flüssigkeits-Oberfläche bei den Acrylglas-Rohren konvex. Dies führte dazu, dass das Rohr an gewissen Stellen immer wieder voll gefüllt wurde. Dank den transparenten Rohren konnte dies zwar leicht erkannt werden, doch es dauerte anschliessend mehrer Stunden bis sich die Flüssigkeit wieder ausgeglichen hatte.

4.2 Installation des Seismometers

Die Installation des Seismometers ist mit wenig Aufwand verbunden. An 3 Schraubfüssen wird das Instrument horizontiert und ist nach wenigen Minuten betriebsbereit. Das Seismometer wurde auf dem gemauerten Sockel an der Seite des Stollens aufgestellt und anschliessend mit einer Styroporbox thermisch isoliert.

5 Messergebnisse

5.1 Registrierung eines Fernbebens mit HLS und Seismometer

Ein Erdbeben der Magnitude 7.8 ereignete sich am 28.10.2012 bei Masset in Kanada. Abbildung 6 zeigt, die Auswirkungen dieses Bebens im Mont Terri in der Schweiz.

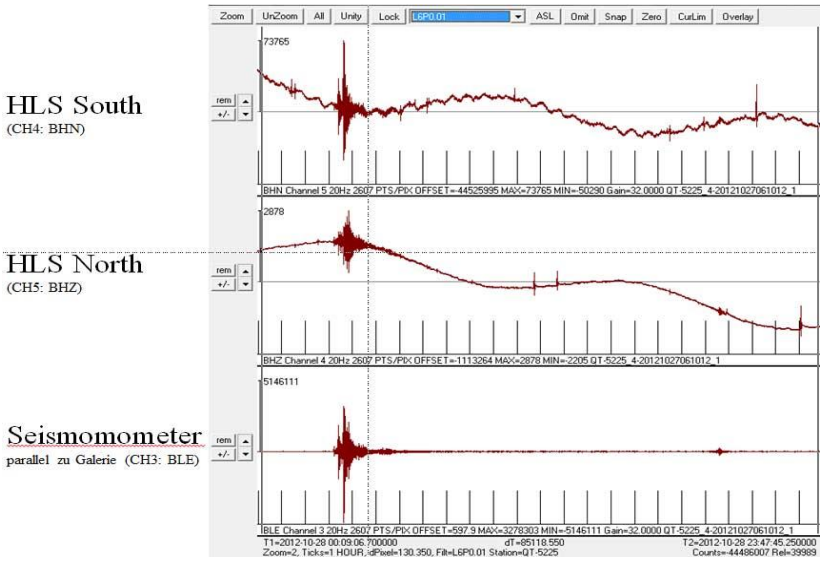

Abb. 6: Erdbeben der Magnitude 7.8 bei Masset, Kanada, aufgenommen am Mont Terri mit den beiden HLS Sensoren und mit dem Seismometer.

Die Ausschläge des Bebens sind sowohl auf den HLS Kanälen als auch auf dem Seismometerkanal (Horizontalkomponente parallel zum Stollen) deutlich zu sehen. Die dargestellte Grafik zeigt eine Aufzeichnung von 24 Stunden. Während das Seismometer eine horizontale Linie zeichnet, sind den HLS Signalen zwei gegenläufige grosse Wellen mit einer halbtäglichen Periode überlagert. Aus den Erfahrungen des HLS Systems am PSI wissen wir, dass es die Gravitation des Mondes ist, die diese habtäglichen Wellen erzeugt. Zudem erkennen wir bei beiden HLS Kanälen eine Bewegung nach rechts unten. Diese ist auf die Verdunstung der Flüssigkeit im Messrohr zurückzuführen. Da für die Auswertung die Differenz beider HLS Kanäle gebildet wird, ist die Verdunstung unproblematisch, sie ist sogar als absolutes Eichsignal sehr wertvoll.

5.2 Online Registrierung: Fernbeben in Alaska und Meeresmikroseismik

Ein wenig schwächeres Erdbeben der Magnitude 7.5 ereignete sich am 5.1.2013 in Alaska. Abbildung 7 zeigt, die Registrierung der Quanterra Datenerfassung, die es erlaubt, 120 Sekunden Online darzustellen. Die schwarze Scheibe links oben zeigt die momentan erfassten GPS Satelliten (weisse Punkte), mit denen eine millisekundengenaue und UT-synchrone Zeiterfassung ermöglicht wird. Die oberen drei Kanäle bilden die seismischen Signale (Bodengeschwindigkeit) ab: die Vertikalkomponente, die Komponente senkrecht zum Stollen und die Komponente längs zum Stollen. Die unteren beiden Kanäle zeigen die Wasserhöhe gemessen vom HLS Sensor Nord und vom HLS Sensor Süd.

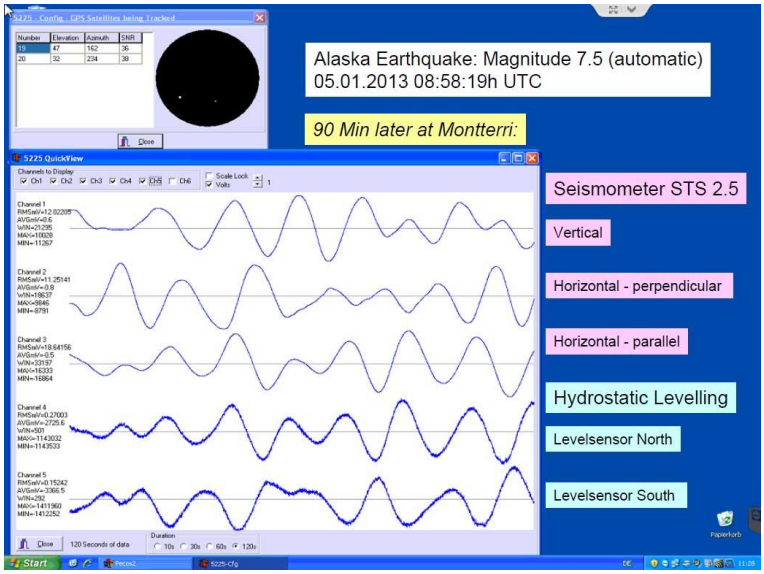

Abb. 7: Online Registrierung des Alaska Bebens mit der Magnitude 7.5. Es zeigt einen 120 Sekunden Ausschnitt, der 90min nach dem Beben mit den 3 Komponenten des Seismometers und mit den beiden HLS Sensoren am Mont Terri aufgenommen wurde.

Erwartungsgemäss sind die beiden HLS Kanäle wiederum gegenläufig. Es ist hingegen auffallend, dass der HLS Sensor Nord - der etwa 40m vom Seismometer entfernt montiert ist – fast genau synchron läuft mit der Horizontalkomponente des Seismometers.

Sieben Stunden später hat sich die Erde wieder beruhigt. Abbildung 8 zeigt wiederum einen Zeitausschnitt von 120 Sekunden. Zusätzlich ist noch der Barometerkanal mit dem Luftdruck abgebildet.

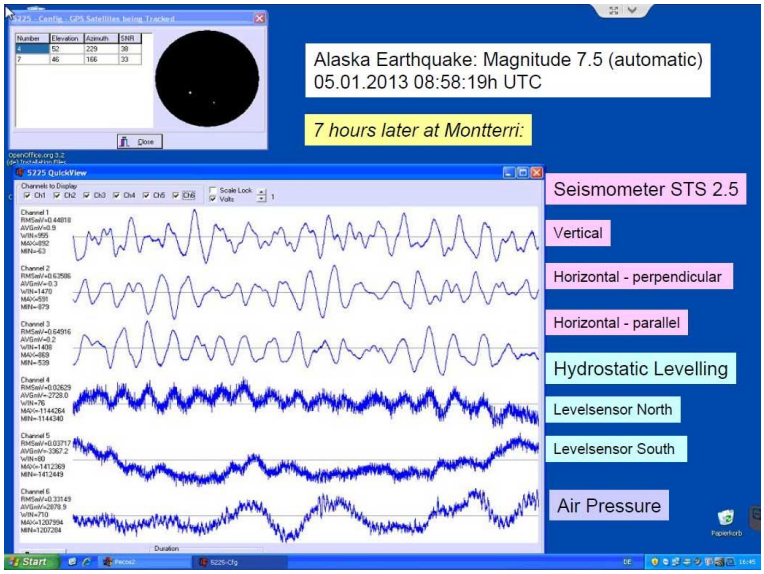

Abb. 8: Online Registrierung des Alaska Bebens nach 7 Stunden. Zusätzlich ist der Luftdruck abgebildet. Der HLS Sensor Nord zeigt nach wie vor ähnliche Signale wie der Seismometer Kanal längs des Stollens, wobei Wellen von ca. 7 Sekunden Dauer dominieren. Die Ursache dieser Bewegungen ist der Wellengang im Atlantik.

Der HLS Sensor Nord zeigt nach wie vor ein vergleichbares Verhalten wie die Längskomponente des Seismometers. Die Signalverstärkung ist in Abbildung 8 deutlich höher als in Abbildung 7. Es dominieren nun Wellen von etwa 7 Sekunden Dauer. Erfahrungsgemäss ist die Ursache dieser Bewegungen im Wellengang des Atlantiks zu suchen. Dabei führt der Seegang zu einem variablen Wasserdruck am Meeresboden, welcher seismische Wellen in der festen Erde anregt: die sog. Meeresmikroseismik. Der Rauschpegel bei beiden HLS Kanälen ist nun deutlich höher als beim Seismometer, welches thermisch gut isoliert und vom Luftzug geschützt ist. Das HLS System hingegen ist nicht isoliert an der Stollenwand montiert und ist somit den Temperaturänderungen und Luftdruckschwankungen des belüfteten Stollens ausgesetzt. Der gleichzeitig dargestellte Luftdruck in der untersten Kurve, zeigt jedoch, dass die seismischen und die HLS Signale kaum vom Luftdruck beeinflusst werden. Die vom Seismometer gemessene rms-Amplitude der Meeresmikroseismik schwankt von Tag zu Tag und beträgt im oben betrachteten Zeitfenster ca. 400nm oder 40µgal in allen drei Komponenten. Mit 600 Counts Amplitude kann sie immer noch sehr gut abgebildet werden.

5.3 Vergleich von Theorie und Praxis

Aus der Elastizität der Erde kann berechnet werden, welchen Einfluss (Deformation) die Anziehungskraft des Mondes auf die Erde ausübt. Besser bekannt ist dies am Meer, wo 2 mal täglich die Meeres-Gezeiten die Kraft des Mondes erkennen lassen. Abbildung 9 zeigt deutlich, dass auch im Mont Terri Felslabor Gezeiten mit dem HLS System messbar sind, die sogenannten Erd-Gezeiten.

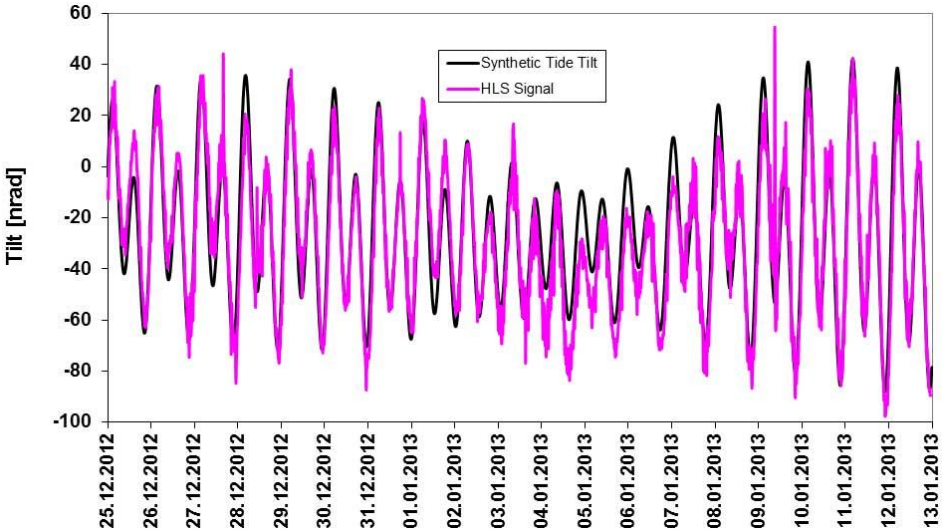

Abb. 9: Überlagerung einer 3 Wochen Registrierung des HLS Neigungs-Signales (rot) über der theoretisch berechneten synthetischen Neigungs-Kurve (schwarz).

Die rote Kurve ist das HLS Neigungs-Signal, das aus den beiden über drei Wochen gemessenen HLS Signalen gebildet wurde. Darunter - in schwarzer Farbe geplottet - ist die synthetisch erzeugte Neigungs-Kurve, die aus den Elastizitätszahlen der Erde und der Stellung zueinander von Erde, Mond und Sonne berechnet wurde. Es ist auffallend, dass die schwarze Kurve nur an wenigen Stellen zu Vorschein kommt, d.h. die Übereinstimmung von Theorie und Praxis ist sehr gut. Klar ersichtlich ist, dass die Amplitude dieser Erdgezeiten stark schwankt. Dies rührt daher, dass der Einfluss von Sonne und Mond dann am grössten ist, wenn sie in einer Linie zueinander stehen, also bei Vollmond und bei Neumond. Die Gezeiten führen in den installierten HLS Sensoren zu einer Wasserpegelschwankung von 2.5 μm.

6 Fazit

- Die Messresultate zeigen, dass auch unter den im Felslabor Mont Terri vorliegenden Bedingungen, in einem durchlüfteten Stollen, sehr hohe Genauigkeiten erzielt werden können.
- Die Montage auf den Edelstahl-Konsolen war genügend stabil, um in der Grössenordnung der Erdgezeiten messen zu können.
- Die Registrierung der Fernbeben mit dem HLS System hat erstaunt, da dies in den über 10 Jahren Beobachtungszeit am PSI nie gesehen wurde. Dies liegt wohl an der linearen Anordnung des Messrohres im Gegensatz zur ringförmigen Anordnung beim PSI.
- Die gute Korrelation der Horizontalkomponente des Seismometers mit dem HLS Signal belegt, dass das HLS im kurzperiodischen Bereich die Bodenbewegung längs des Messrohres wiedergibt. Im langperiodischen Bereich hingegen ist es ein Neigungsmesser, der auf die Veränderung der Vertikal-Beschleunigung (Höhenunterschied) reagiert.
- Es kann mit Sicherheit gesagt werden, dass die Scherzone während der Beobachtungszeit keine Bewegung erfahren hat.

7 Ausblick

Die vorliegende Machbarkeitsstudie hat zwar eine sehr grosse interne Genauigkeit erbracht, doch die Verankerung zum Fels sollte genauer betrachtet werden. Solange kein Höhenunterschied detektiert wird, kann die Methode als sicher bezeichnet werden. Bei einer beobachteten Verschiebung während einer Langzeitüberwachung müsste es hingegen möglich sein, die Position der HLS Sensoren nachträglich mit einer redundanten Methode wieder genau einzumessen.

Literatur

INGENSAND, H., MEIER, E. (2001): Neuere Entwicklungen von hydrostatischen Messsystemen für permanente Überwachungsmessung. 11. Internationale Geodätische Woche, 18.-24.2.2001, Obergurgl, in Proceedings des Instituts für Geodäsie, Innsbruck: Institutsmitteilungen Heft 19, 191-194.

MEIER, E. , DETZNR, K., WIDMER-SCHNIDRIG, R., WIELANDT, E., BLASCHECK, P., JOSWIG, M., NUSSBAUM, C. und THEURILLAT, T. (2013): Technical Note TN 2013-03: SM-B Experiment: High resolution seismic monitoring. Record of seismic fingerprint-Feasibility study using highest precision seismic (STS-2.5) and deformation tools (HLS-PSI-SLS).

WEI, F.Q., MEIER, E., RIVKIN, L., WRULICH, A., (2004) Paul Scherrer Institut PSI, Scientific Report 2003 / Volume VII, Swiss Light Source, ISSN 1423-7369, March 2004, 26-27.