
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik Technische Universität Clausthal

**Kopplung der Softwarecodes FLAC^{3D} und TOUGH2
in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Unter-
suchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten
Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen**

(THM-Kopplung FLAC^{3D}-TOUGH2 / Tongestein)

Teil I: Untersuchungen in Feld und Labor



Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben

mit dem Förderkennzeichen 02E11041

Zeitraum: 01.10.2011 - 31.03.2015





Abschlussbericht

zum BMWi-Forschungsvorhaben

Kopplung der Softwarecodes FLAC^{3D} und TOUGH2 in Verbindung mit in situ-, laborativen und numerischen Unter- suchungen zum thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tongestein unter Endlagerbedingungen

(Berichtsteil I von II)

Förderkennzeichen: 02E11041

Zeitraum: 01.10.2011 - 31.03.2015

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux

Sachbearbeiter: Dipl.-Math. M. Rutenberg
Dipl.-Ing. R. Seeska
Dipl.-Math. J. Feierabend
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh

Clausthal-Zellerfeld, im September 2015

.....
Dipl.-Math. M. Rutenberg

.....
Dipl.-Ing. R. Seeska

.....
Dipl.-Math. J. Feierabend

.....
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh

.....
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux

Das diesem Bericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02E11041, Laufzeit 01.10.2011 bis 31.03.2015, gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.





Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Forschung und Erfahrung mit dem Tragverhalten von Hohlräumen im Tonsteingebirge haben in den vergangenen Jahren bis Jahrzehnten gezeigt, dass im Porenraum von Tongesteinsformationen bereits primär vorhandene Fluide einen wesentlichen Einfluss auf das Trag- und Deformationsverhalten von Hohlräumen in diesem Formationstyp ausüben. Porenwasserdruck, effektive Spannungen und Entsättigung mit Schrumpfrissbildungen, gegebenenfalls Re-Sättigung mit Quellvorgängen sind hier Stichworte. Dasselbe gilt für sekundäre Fluide wie die Gase, die im Rahmen der untertägigen Endlagerung radioaktiver Abfälle in verfüllten Einlagerungshohlräumen bei der Korrosion der metallenen Abfallbehälter infolge der anfänglichen Restfeuchtigkeit des Verfüllmaterials und später infolge des möglicherweise zutretenden primären Formationswassers entstehen. Die sich in den Poren- und/oder Zwischenräumen des Versatzmaterials ansammelnden Gasmengen können im Verlauf der Nachbetriebsphase des Endlagers zunächst im Versatzmaterial und dann im Wirtsgestein zu einem Druckanstieg führen, welcher seinerseits das mechanische Verhalten des Wirtsgesteins signifikant beeinflussen kann. Rissbildungen und verstärkte Fluidmigrationen in Verbindung mit einem Transport von Radionukliden aus den Abfällen können im ungünstigen Fall die Folge sein. Hinzu kommen bedingt durch die Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle thermische Effekte, die das hydraulische Strömungsverhalten beeinflussen und bei unzureichender Wärmeableitung zum Verdampfen des Porenwassers und damit zu einem zusätzlichen Ansteigen des Gasphasendrucks führen. Daher muss im Hinblick auf eine das Langzeitverhalten eines Endlagers im Tongestein behandelnde Sicherheitsanalyse das gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische (THM) Verhalten des Tongesteins untersucht sowie physikalisch modelliert werden. Prozessverständnis und physikalische Modellierung sowie numerische Simulation des Endlagersystemverhaltens bzw. seiner wesentlichen Teilkomponenten bei Ansatz thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse mit Zweiphasenfluss (TH²M) sind dann zentraler Bestandteil der Langzeitsicherheitsanalyse. Vor diesem komplexen Hintergrund ist das Forschungsvorhaben durch zwei Hauptziele geprägt:

- (1) Entwicklung eines Simulators zur Analyse TH²M-gekoppelter Prozesse im Tonsteingebirge,
- (2) Weiterführung von Bohrlochmessungen zur Analyse des Gebirgstragverhaltens in Tonsteinformationen und Vertiefung laborativer Befunde.



Im Rahmen des ersten Hauptziels dieses Forschungsvorhabens ist ein aus den beiden bewährten Simulationsprogrammen FLAC^{3D} (für geomechanische Analysen) und TOUGH2 (für thermohydraulische Analysen) gekoppelter neuer Simulator für thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesssimulationen im Bereich der untertägigen Endlagerung radioaktiver Abfälle entwickelt worden. Mit dem FLAC^{3D}-TOUGH2-Kopplungs- oder kurz FTK-Simulator ist es nun grundsätzlich möglich, für ein Endlager(teil)system sowohl das mechanische Trag- und Deformationsverhalten unter Berücksichtigung von sich ändernden Porenflüddrücken und Sättigungsgraden (Zweiphasenfluss) wie auch das durch Kompaktionen und Expansionen der Gesteinsmatrix beeinflusste thermohydraulische Strömungsverhalten numerisch zu analysieren.

Im Rahmen des zweiten Hauptziels sind auf den vorangehenden BfS- und BMWi-Forschungsvorhaben 3607R02596 bzw. 02E10427 aufbauend in situ-Untersuchungen zum zeitabhängigen Bohrlochtrag- und -deformationsverhalten in den Untertagelaboren Mont Terri (Schweiz) und Tournemire (Frankreich) durchgeführt worden. Resultate aus den genannten vorangehenden Vorhaben konnten dabei u.a. anhand von Beobachtungen und Messungen in im Rahmen dieses Vorhabens 02E11041 neu abgeteuften Bohrlöchern bestätigt und damit hinsichtlich des Einflusses des Porenwassers auf das mechanische Verhalten deutlich klarer systematisiert werden. Insgesamt sind aber auch insbesondere mit Blick auf den erst seit 2008 besser erschlossenen Bereich westlich der Hauptstörungszone der Lokation Tournemire unerwartete Entwicklungen im Gebirgsverhalten eingetreten. Darüber hinaus sind laborative Untersuchungen an Opalinustonprüfkörpern aus den neu abgeteuften Bohrlöchern der Lokation Mont Terri (tonige Fazies) durchgeführt worden, bei denen der Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf das Materialverhalten im Fokus stand. Zusätzlich konnten sowohl im Rahmen der in situ-Untersuchungen wie auch über die laborativen Untersuchungen neue Erkenntnisse über die bislang nur wenig erforschten sandigen und karbonatreich-sandigen Fazies des Opalinustons der Lokation Mont Terri gewonnen werden.

Die wesentlichen Ergebnisse aus den unterschiedlichen Bearbeitungsschwerpunkten dieses Forschungsvorhabens können wie folgt zusammengefasst werden:

- Durch die in den vergangenen fünf Jahren durchgeführten in situ-Untersuchungen in insgesamt sieben Observationsbohrlöchern innerhalb der Niche MI des URL Mont Terri, von denen vier im Rahmen dieses Vorhabens abgeteuft worden sind, ist es zum jetzigen Zeitpunkt erstmals möglich, reproduzierbare Muster bezüglich des Langzeittragver-



haltens innerhalb von identisch orientierten Observationsbohrlöchern zu identifizieren. Während sich beispielsweise die Bohrlochwand im innerhalb der karbonatreichen sandigen Fazies gelegenen Bohrlochbereich in den vier schichtungsorthogonal orientierten Bohrlöchern als standfest erweist, kommt es im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochbereich in diesen Bohrlöchern zu großen Schädigungen in der Bohrlochwand, die sich vor allem unmittelbar am Faziesübergang ereignen und sich von dort aus im Verlauf der Zeit innerhalb dieser Fazies weiter fortpflanzen. Als neues Forschungsergebnis konnten in der sandigen Fazies generell verstärkt Sickerwasserzutritte beobachtet werden, wobei sich diese Fazies im Vergleich insbesondere zur tonigen Fazies als deutlich standfester erwiesen hat.

- Die in situ-Untersuchungen im URL Tournemire haben einerseits bestehende Trends wie z.B. die schon früher beobachtete hydraulisch-mechanische Standfestigkeit der Bohrlöcher östlich der Hauptstörungszone bestätigt. Andererseits haben die Observationen in den Bohrlöchern westlich dieser Störungszone aufgezeigt, dass auch in einer verfestigten Tongesteinsformation wie dem Toarcium-Tonstein hydraulische Aktivitäten in Verbindung mit Schädigungen an Hohlraumkonturen möglich sind. Diese hydraulischen Aktivitäten, die mit einer Schwächezone im Gebirge in Verbindung gebracht werden, sind überdies mit zeitlich wechselnden Trends aufgetreten.
- An dem erhaltenen Bohrkernmaterial der Lokation Mont Terri sind laborative ein- und triaxiale Langzeituntersuchungen durchgeführt worden. In den aus den einaxialen Langzeituntersuchungen in einer Klimakammer erhaltenen Verzerrungs-Zeit-Graphen unter variierten, aber jeweils konstanten Umgebungsluftfeuchtigkeiten haben die Deformationen bei dem vorgegebenen Beanspruchungsniveau bereits nach kurzer Zeit einen augenscheinlich nahezu stationären Zustand erreicht, so dass weder Desintegrationsprozesse noch Konsolidations- oder (stationäre) Kriechprozesse aus ihnen abgeleitet werden konnten. Auch ist die Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Luftfeuchtigkeit anscheinend deutlich weniger ausgeprägt als die Abhängigkeit von der Entnahmeposition des Prüfkörpermaterials aus dem Bohrloch. Eine Ausnahme bildet hierbei der Luftfeuchtigkeitsbereich von $R_H \geq 95\%$, bei dem eine offensichtlich durch Quellungsprozesse induzierte Prüfkörperextension gemessen worden ist. Aus den Ergebnissen eines mehr als einjährigen Langzeittriaxialversuchs konnte kein eindeutiges Anzeichen für Kriechprozesse im Opalinuston gefunden werden.



- Der neu entwickelte FTK-Simulator ermöglicht numerisch effektive TH¹M- und TH²M-gekoppelte Prozessanalysen (mit Ein- bzw. Zweiphasenflussprozessen). Mit diesem Simulator wird die Benutzeroberfläche und die geomechanische Berechnungseinheit von FLAC^{3D} mit unterschiedlichen thermohydraulischen Modulen aus TOUGH2 gekoppelt, derzeit z.B. mit dem isothermen Einphasenflussmodul oder mit dem TH-gekoppelten Zweiphasenflussmodul Wasser/Luft. Erweiterungen auf andere TOUGH2-Module sind damit prinzipiell möglich, ebenso wie benutzerfreundliche thermohydraulische Simulationen, die durch die Steuerung von FLAC^{3D} überdies robuster als übliche TOUGH2-Simulationen gegenüber numerischen Instabilitäten sind. Verifizierungen mit dem Einphasenflussmodul haben dabei insgesamt die korrekte Funktionsweise des Simulators auf eine sehr zufriedenstellende Weise bestätigen können (auch mit Blick auf die Simulationsdauer bei größeren Berechnungsmodellen), während Verifizierungen bzw. Validierungen zum Zweiphasenflussmodul bislang nur ansatzweise durchgeführt werden konnten. Ein beim Vorhabensbearbeiter vorliegender weiterer Zweiphasenflusssimulator hat sich aufgrund mangelnder Leistungsfähigkeit dabei als wenig hilfreich erwiesen. Insbesondere im Bereich der hydraulischen Anisotropie ist ein bedeutendes Entwicklungspotential für den FTK-Simulator identifiziert worden. Zur umfassenden Validierung des FTK-Simulators und auch zur Erweiterung und Festigung der in diesem Vorhaben erlangten Erfahrungen sind zukünftig weitere Arbeiten erforderlich, die z.B. im Rahmen eines Simulatoren-Benchmarkings in Zusammenarbeit mit externen Partnerorganisationen denkbar wären. Erste Kooperationen mit externen Organisationen mit Kenntnissen auf dem Fachgebiet der Geohydraulik haben sich bereits als sehr förderlich für das Verständnis insbesondere hinsichtlich der Zweiphasenflussprozesse (H²-Prozesse) erwiesen.



Summary of the research findings

In the last years and decades, research and experience with the load-bearing behaviour of excavations in claystone host rock have revealed that the primary fluids already present in the pore space of argillaceous rock mass have a major influence on the load-bearing and deformation behaviour of excavations in this type of rock mass. Pore-water pressure, effective stresses, desaturation with development of shrinkage cracks as well as possible resaturation and swelling processes are keywords in this context. The same applies to secondary fluids like gases generated by radioactive waste emplaced in backfilled storage chambers in underground waste repositories: the gases arise from the corrosion of metal waste containers reacting with the initial residual moisture of the backfill material, and later on as a consequence of the possible influx of primary water from the host rock. The volumes of gas accumulating in the pore space and/or the interstitial spaces of the backfill material could lead to a rise in pressure during the course of the post-operational phase of the repository, initially in the backfill material and then in the host rock. This rise in pressure could have a significant influence on the mechanical behaviour of the rock mass. In the most unfavourable scenario, this could lead to the development of fractures and intensified fluid migration, combined with the mobilisation of radionuclides from the waste. In addition, the generation of heat by the radioactive waste gives rise to thermal effects which influence the hydraulic flow behaviour, which could in case of insufficient heat dissipation lead to the evaporation of pore water and thus to an additional rise in the pressure of the gaseous phase. The safety analysis of the long-term behaviour of a repository in argillaceous rocks must therefore include the investigation and physical modelling of the coupled thermal-hydraulic-mechanical (THM) behaviour of the argillaceous rock. Key parts of the long-term safety analysis would therefore include an understanding of the processes involved, physical modelling, and numerical simulation of the repository system behaviour and/or its main subcomponents involving coupled thermal-hydraulic-mechanical processes with two-phase flow (TH²M). Against this complex background, the research project is characterised by two main objectives:

- (1) Development of a simulator for the analysis of coupled TH²M processes in claystone host rock,
- (2) Continuation of borehole investigations to analyse the load-bearing behaviour in claystone rock mass and improvement of knowledge based on laboratory investigations.



As part of the first main objectives of this research project, a coupled new simulator for thermal-hydraulic-mechanical coupled process simulations looking at the deep geological disposal of radioactive waste was developed from the two well-established simulation programs FLAC^{3D} (for geomechanical analysis) and TOUGH2 (for thermohydraulic analysis). By using the FLAC^{3D}-TOUGH2-coupling simulator (named “FTK-Simulator”) it is now basically possible to numerically analyse the mechanical load-bearing and deformation behaviour of a modelled repository (sub)system, taking into consideration the varying pore-fluid pressures and saturations (two-phase flow), as well as the thermohydraulic flow behaviour affected by the compaction and expansion of the rock matrix.

The second main objective involved the implementation of in-situ investigations on time-dependent borehole load-bearing and deformation behaviour in the underground research laboratories (URL) Mont Terri (Switzerland) and Tournemire (France) which followed up on the previous BfS and BMWi research projects 3607R02596 and 02E10427, respectively. The findings from the aforementioned projects were confirmed by, amongst other aspects, the observations and measurements in the new boreholes drilled as part of this project (02E11041), and could therefore be much more clearly systematised with respect to the influence of the pore water on the mechanical behaviour. Overall however, unexpected developments of the rock-mass behaviour also occurred, especially in the zone to the west of the main fault zone in the Tournemire location, where better access has only been created since 2008. In addition, laboratory investigations on Opalinus Clay specimens from the recently drilled boreholes at the Mont Terri location (shaly facies) were undertaken with a special focus on the influence of air humidity on the material behaviour. Moreover, the in-situ investigations, as well as the laboratory investigations, generated new findings on the previously only slightly researched sandy and carbonate-rich sandy facies of the Opalinus Clay in URL Mont Terri.

The main findings from the various main research aspects of this research project are summarised as follows:

- Thanks to the in situ investigations carried out in the last five years in seven observation boreholes in Niche MI at URL Mont Terri, four of which have been drilled in the context of this project, it is now possible for the first time to identify reproducible patterns with respect to the long-term load-bearing behaviour within identically oriented observation boreholes. For instance, whilst the borehole walls of the part of the borehole drilled within the carbonate-rich sandy facies in the four bedding-parallel boreholes



proved to be stable, the borehole walls of the parts of these boreholes drilled within the shaly facies suffered a great deal of damage—which mainly occurs directly along the transition zones between these facies, and then propagates within the shaly facies from this starting point over the course of time. One of the new research findings was that there is a general stronger influx of percolating water within the sandy facies, even though this facies proves to be much more stable, particularly when compared to the shaly facies.

- The in situ investigations in URL Tournemire verified on the one hand the previously observed trends, such as the hydraulic-mechanical stability of the boreholes lying to the east of the main fault zone. On the other hand, the observations in the boreholes lying to the west of this fault zone revealed that hydraulic activity is also possible in connection with damage to the walls of cavities, even in consolidated argillaceous rock masses such as the Toarcian claystone. This hydraulic activity, which is associated with a zone of weakness within the rock mass, also occurred in a temporally varying manner.
- Uniaxial and triaxial long-term laboratory tests have been performed on the obtained drill-core material from URL Mont Terri. In the strain-time graphs derived from the uniaxial long-term tests under varying, but in each case constant ambient air humidity levels in a climatic chamber, the deformations for each preset load level have apparently reached almost steady state so quickly that it was not possible to use them to deduce any disintegration, consolidation, or (stationary) creep processes. The dependence of the material behaviour on the air humidity was also apparently much less than the dependence on the position from which the test specimen was extracted in the borehole, the one exception being the air humidity level of $R_H \geq 95\%$, where extension of the test specimen was measured which was obviously induced by swelling processes. Within the results of the triaxial long-term test which lasted for more than one year, no clear sign for creep processes in Opalinus Clay could be found.
- The newly developed FTK-Simulator enables numerical effective analyses of coupled TH¹M and TH²M processes (including single- and two-phase fluid flow, respectively). By means of this simulator, the user interface and the geomechanical calculation unit of FLAC^{3D} is coupled with different thermohydraulic modules from TOUGH2, e.g. currently with the isothermal single-phase flow module, or with the TH-coupled two-phase water/air flow module. Extensions to other TOUGH2 modules are therefore possible in



principle, as are user-friendly thermohydraulic simulations which become more robust against numerical instabilities compared to usual TOUGH2 simulations because of being controlled by FLAC^{3D}. Verifications with respect to the single-phase flow module overall have very satisfactorily verified the correct functioning of the simulator (also with respect to the time periods of the simulations for larger calculation models). However, verifications or validations with respect to the two-phase flow module could only be carried out to a minor extent up to now. Another two-phase-flow simulator available to the author proved to be of little use in this regard due to lack of efficiency. A considerable potential for further development of the FTK-Simulator has been identified concerning the hydraulic anisotropy. More work will be necessary in future to validate the FTK-Simulator in a comprehensive manner and to extend and strengthen the experience already acquired during the course of the present project, as may be feasible, for instance, as part of a simulator benchmarking process in cooperation with external partner organisations. First cooperations with external organisations with knowledge in the field of geohydraulics have already proved to be conducive for the understanding especially of two-phase flow (H^2) processes.



Inhaltsverzeichnis Teil I

	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	5
	Summary of the research findings	9
	Inhaltsverzeichnis Teil I	13
	Inhaltsverzeichnis Teil II	17
1	Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens	23
1.1	Zielsetzungen und Rahmenbedingungen	23
1.2	Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen des BMWi-Förderprogramms.....	27
1.3	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens.....	28
1.4	Arbeitsprogramm	30
2	Zum Stand von Wissenschaft und Technik	41
2.1	In situ- und laborative Untersuchungen	41
2.1.1	Überblick über den internationalen Wissensstand	41
2.1.2	Bisherige Arbeiten und Erfahrungen des Vorhabensbearbeiters	46
2.2	Physikalische Modellierung und numerische Simulation	56
2.2.1	Überblick über den internationalen Wissensstand	56
2.2.2	Bisherige Arbeiten und Erfahrungen des Vorhabensbearbeiters	58
3	SCHWERPUNKT „IN SITU“: Feldmessungen und Kamerabefahrungen in den Untertagelaboren Mont Terri und Tournemire.....	63
3.1	Beobachtung des Langzeittrag- und -deformationsverhaltens von Bohrlöchern im URL Mont Terri im Rahmen des DMB-Experimentes	63
3.1.1	Ziel des Experimentes	63
3.1.2	Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher	66
3.1.3	Videobeamtungen, Kalibermessungen und Luftfeuchtigkeitsmessungen im Rahmen des DMB-Experimentes in den Bohrlöchern DMB-B1 bis DMB-B4.....	68
3.1.4	Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen und der Videobeamtungen für das Bohrloch DMB-B1	71
3.1.5	Ausgewählte Ergebnisse der Videobeamtungen für das Bohrloch DMB-B2	104



3.1.6	Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen, Videobefahrungen und Luftfeuchtigkeitsmessungen für das Bohrloch DMB-B3	120
3.1.7	Ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B4	153
3.1.8	Fazit zu den im Rahmen dieses Vorhabens im URL Mont Terri mit der Dreiarmkalibersonde und der Axial-Bohrlochkamera durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten.....	165
3.2	Beobachtung des Langzeittrag- und -deformationsverhaltens von Bohrlöchern im URL Tournemire.....	186
3.2.1	Ziel der Untersuchungen.....	186
3.2.2	Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher	187
3.2.3	GEM-Bohrlöcher in der Gallery 96	197
3.2.4	GSM-Bohrlöcher in der Gallery 08	227
3.2.5	Fazit zu den im Rahmen dieses Vorhabens im URL Tournemire mit der Dreiarmkalibersonde und der Axial-Bohrlochkamera durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten.....	283
4	SCHWERPUNKT „GESTEINSMECHANISCHES LABOR“: Mechanische und hydraulische Untersuchungen an Tonsteinmaterial der Lokation Mont Terri ...	295
4.1	Übersicht über die durchgeführten laborativen Untersuchungen	295
4.2	Zwischenlagerung der Bohrkerne und Herstellung der Prüfkörper	300
4.3	Kurzzeitversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung.....	301
4.3.1	Versuchsaufbau und Versuchstechnik	301
4.3.2	Versuchsauswertung	302
4.3.3	Messergebnisse einaxialer Druckversuche	305
4.4	Kurzzeitversuche unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung.....	305
4.4.1	Versuchsaufbau und Versuchstechnik	305
4.4.2	Versuchsauswertung	308
4.4.3	Messergebnisse triaxialer Druckversuche.....	308
4.5	Diskussion der Ergebnisse uniaxialer und triaxialer Kurzzeitfestigkeitsversuche unter Kompressionsbeanspruchung	308
4.6	Dauerstandversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung mit Regelung der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit	312
4.6.1	Versuchsaufbau und Versuchstechnik	312



4.6.2	Versuchsauswertung	314
4.6.3	Messergebnisse einaxialer Dauerstandversuche mit Regelung der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit.....	315
4.7	Dauerstandversuch unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung	322
4.7.1	Versuchsaufbau und Versuchstechnik	322
4.7.2	Versuchsauswertung	325
4.7.3	Ergebnisse des triaxialen Dauerstandversuchs	325
	Literaturverzeichnis zu Teil I	331





Inhaltsverzeichnis Teil II

Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	5
Summary of the research findings	9
Inhaltsverzeichnis Teil I	13
Inhaltsverzeichnis Teil II	17
5 Physikalische Modellierung von im Tongestein auftretenden THM-Prozessen	23
5.1 Konventionen und Notationen	23
5.2 Ungekoppelte THM-Prozesse	24
5.2.1 Mechanischer Prozess	24
5.2.2 Thermischer Prozess	29
5.2.3 Hydraulischer Prozess	31
5.2.3.1 Bilanzgleichungen, Transportgleichungen und Nebenbedingungen	31
5.2.3.2 Relativpermeabilitäten und Kapillardrücke	37
5.3 Zusammenführung der einzelnen Modelle / THM-Kopplungsbeziehungen	48
5.4 Analytische Lösungen zu einfachen Aufgabenstellungen	53
6 SCHWERPUNKT „THM-SIMULATOR“: Entwicklung und Verifizierung des FLAC^{3D}-TOUGH2-Simulators für THM-gekoppelte Prozesse	65
6.1 Überblick über die Programmpakete FLAC ^{3D} und TOUGH2 mit ihren jeweiligen Qualitäten und Anwendungsbereichen.....	65
6.1.1 Software FLAC ^{3D} für geomechanische Aufgabenstellungen	65
6.1.2 Software TOUGH2 für geothermohydraulische Aufgabenstellungen.....	67
6.2 Entwicklung einer Schnittstelle zwischen den Simulatoren FLAC ^{3D} und TOUGH2.....	70
6.2.1 Herangehensweise und Grundstrukturen	70
6.2.2 Modellkonversion	75
6.2.3 Implementierung der THM-Kopplungsbeziehungen	86
6.2.4 Zeitschrittsteuerung.....	90
6.2.5 Ablauf einer THM-gekoppelten Simulation mit dem FTK-Simulator	96
6.2.6 FLAC ^{3D} als Prä- und Postprozessor für TOUGH2 („TOUGH2 aus FLAC ^{3D} “)	101



6.3	Grundlegende hydraulische Berechnungen mit dem Programmpaket TOUGH2 zum Prozessverständnis	104
6.3.1	Einführung	104
6.3.2	Einphasenfluss und Teilsättigung mit passiver Gasphase – EOS-Modul 9	106
6.3.3	Zweiphasenfluss Wasser/Luft – EOS-Modul 3	108
6.3.4	Zweiphasenfluss Wasser/Wasserstoff – EOS-Modul 5	133
6.3.5	Vergleichsberechnungen mit MUFTE-Thermo (Ergebnisse aus <i>Kühle et al., 1999</i>) und FLAC	136
6.3.5.1	Vorbemerkungen.....	136
6.3.5.2	Modellbeschreibung.....	138
6.3.5.3	Berechnung mit dem FTK-Simulator	141
6.3.5.4	Berechnung mit FLAC und Vergleich der Ergebnisse der Simulatoren FTK und FLAC	148
6.3.5.5	Vergleich der Ergebnisse der Simulatoren FTK und MUFTE-Thermo.....	154
6.4	Erste Verifizierung des über die neu entwickelte Schnittstelle gekoppelten FTK-Simulators	160
6.4.1	Methodische Ansätze zur Verifizierung	160
6.4.2	Verifizierung anhand von analytisch lösbaren Beispielmodellen.....	161
6.4.2.1	Übersicht über die Beispielmodelle	161
6.4.2.2	Mechanische Entlastung einer wasserundurchlässigen Tragstruktur.....	163
6.4.2.3	Stark idealisiertes Gebirgsmodell mit Hohlraumausbruch (HM-Entlastung).....	167
6.4.2.4	Konsolidation einer Bodenschicht unter gleichförmiger Belastung	177
6.4.3	Verifizierung anhand von Vergleichsberechnungen mit FLAC ^{3D} – HM-gekoppelte Simulationen des Tragverhaltens eines Bohrlochs im hydraulisch-mechanischen Nahfeld einer Strecke.....	184
6.4.3.1	Systematik der Vorgehensweise	184
6.4.3.2	Einige Anmerkungen zu den Berechnungsgrundlagen.....	196
6.4.3.3	Berechnungsgrundlagen.....	197
6.4.3.4	Grundlegende Anmerkungen zum Vergleich der Berechnungsergebnisse des FTK-Simulators mit den Berechnungsergebnissen des Simulators FLAC ^{3D}	204
6.4.3.5	Numerische Simulationen mit dem quasi-zweidimensionalen scheibenartigen Berechnungsmodell eines Bohrlochs	218
6.4.3.6	Dreidimensionale Simulation zum Abteufen eines Bohrlochs	263



6.4.3.7	Quasi-zweidimensionale Simulation des Ausbruchs eines Streckenabschnittes	280
6.4.3.8	Dreidimensionale Simulation zum Abteufen eines Bohrlochs im Nahfeld einer Strecke.....	309
6.4.3.9	Fazit zum Vergleich der Simulatoren FLAC ^{3D} und FTK	365
6.4.3.10	Fazit zur numerischen Analysierbarkeit des Tragverhaltens der Observations- bohrlöcher	372
6.4.3.11	Weiteres Vorgehen.....	375
7	SCHWERPUNKT „BENCHMARKING“: Rechnerische Simulationen zum DMB- Experiment (Mine-by-Test) im URL Mont Terri mit den Simulatoren FTK und CODE_BRIGHT	379
7.1	Vorbemerkungen.....	379
7.2	Aufbau und Ablauf des in situ-Experimentes	379
7.3	Berechnungsgrundlagen und Modellierung	382
7.3.1	Modellierung.....	382
7.3.2	Berechnungsgrundlagen.....	384
7.4	Gegenüberstellung der mit dem FTK-Simulator berechneten Porenwasser- drücke mit den in situ gemessenen Porenwasserdrücken	387
7.5	Weitere ausgewählte Berechnungsergebnisse im Hinblick auf den Vergleich der Simulatoren	397
7.6	Gegenüberstellung von ausgewählten, mit den beiden Simulatoren FTK und CODE_BRIGHT generierten Berechnungsergebnissen	407
7.7	Fazit zur Gegenüberstellung der mit den beiden Simulatoren FTK und CODE_ BRIGHT generierten Berechnungsergebnisse	420
8	Vorbereitungen für einen organisationsübergreifenden Simulatorenver- gleich zur Qualitätssicherung	425
8.1	Motivation und Überblick	425
8.2	Potenzielle Kooperationspartner und ihre Erfahrungen im Bereich der (T)H ² M- Simulation von Endlagerteilsystemen.....	427
8.3	Für den Simulatorenvergleich vorgesehene Beispielm Modelle	430
8.3.1	Zur Auswahl der Modelle	430
8.3.2	Eindimensionale Modelle	431
8.3.3	Zweidimensionale Modelle.....	434



8.3.4	Dreidimensionales Modell	436
8.3.5	Feldexperimente	437
9	Zusammenfassung der Ergebnisse des Projekts mit einigen Anmerkungen für weiterführende Arbeiten	445
9.1	Überblick	445
9.2	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu den Bohrlochobservations- arbeiten im URL Mont Terri	448
9.3	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu den Bohrlochobservations- arbeiten im URL Tournemire	454
9.4	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse zu den laborativen Unter- suchungen an Opalinustonprüfkörpern aus dem URL Mont Terri	459
9.5	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse aus der Entwicklung des FTK- Simulators und den numerischen Untersuchungen zur Verifizierung und Vali- dierung des FTK-Simulators	462
10	Danksagung	473
11	Literaturverzeichnis	475



Teil I: Untersuchungen in Feld und Labor

Abschnitte 1 – 4





1 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

1.1 Zielsetzungen und Rahmenbedingungen

Im Rahmen des BMWi-Forschungsvorhabens 02E9632 ist die Übertragbarkeit des Stoffmodells *Hou/Lux* von Salzgesteinen auf Tongesteine labortechnisch und numerisch untersucht worden. Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass das mechanische Verhalten von Tongestein mit einem anisotropen Korngefüge (Schichtung, Schieferung) und einem grundsätzlich nicht auszuschließenden mechanisch relevanten Großgefüge mit dem entsprechend modifizierten/weiterentwickelten Stoffmodell *Hou/Lux-T* noch ohne Berücksichtigung von hydraulischen Eigenschaften relativ gut beschrieben werden kann. Im Gegensatz zum Salzgebirge liegt im Tonsteingebirge allerdings bereits im unverritzten Zustand ein vernetzter Porenraum vor, der primär auch noch als gesättigt anzusehen ist. Durch die Auffahrung von Hohlräumen wird in der Auflockerungszone zunächst ein Entsättigungsprozess induziert, danach folgen dann aufgrund der Bewetterung (natürlich, künstlich) Auf- und Entsättigungsprozesse im Wechsel. Nach Anordnung eines Verschlusssystems folgt ein finaler Aufsättigungsprozess und eventuell auch Erwärmungs-/Abkühlungsprozess.

Derartige gleichzeitig auftretende mechanische, hydraulische und thermische Prozesse können sowohl das mechanische Verhalten (Festigkeit, Verformbarkeit, Volumen der Festphase, Schädigung/Entfestigung und Self-Sealing, Saugspannung und Quelldruck, Quellung und Schrumpfung...) wie auch die hydraulischen Eigenschaften (relative Permeabilität, Saugspannung, *Biot*-Koeffizient, Porosität, Dichte der Fluide, Wassergehalt und Sättigungsgrad, Porenwasserdruck und Strömungskraft...) sowie die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Wärmeausdehnungskoeffizient...) des Tonsteingebirges sehr stark verändern. Die Intensität der Eigenschaftsänderungen ist abhängig von der jeweilig betrachteten Komponente des Endlagersystems, z.B. Engineered Barrier System im Einlagerungsbereich sowie Excavation Damaged Zone im Umgebungsbereich von Einlagerungskammern, Strecken- und Verschlussbauwerken. Daher muss im Hinblick auf eine das Langzeitverhalten eines Endlagers im Tongestein behandelnde Sicherheitsanalyse das gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische Verhalten des Tongesteins mit seinen Wechselwirkungen, die durch Bild 1.1 veranschaulicht werden, beobachtet sowie physikalisch modelliert werden. Prozessverständnis und physikalische Modellierung sowie numerische Simulation des Endlagersystemverhaltens bzw. seiner wesentlichen Teilkomponenten sind dann zentraler Bestandteil der Langzeitsicherheitsanalyse.

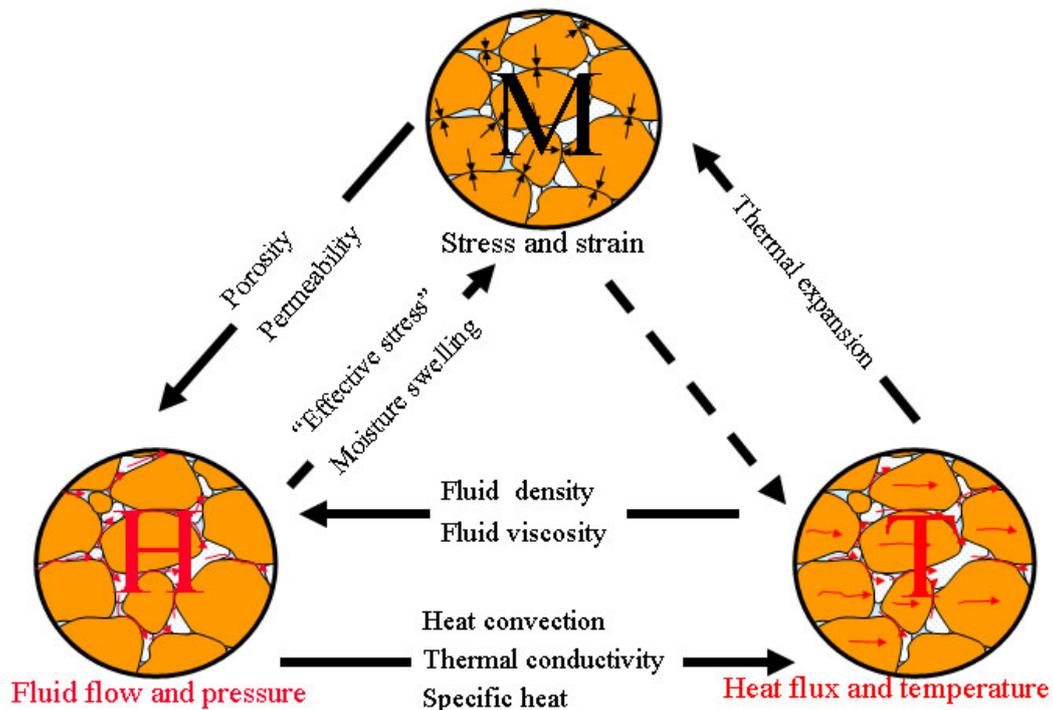


Bild 1.1: Schematische Darstellung der gekoppelten THM-Prozesse (ohne C), in Anlehnung an Cosenza & Ghoreychi (1994)

Das eine Hauptziel dieses vom Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik (LfD&G) der Technischen Universität Clausthal durchgeführten Forschungsvorhabens besteht darin, die Simulatoren $FLAC^{3D}$ und TOUGH2 im Hinblick auf die Modellierung/Simulation von mechanisch-hydraulischen Prozessen im Tonsteingebirge unter Endlagereinwirkungen zu koppeln. Ausgangspunkt ist dabei im Gegensatz zu einem bereits bestehenden und in *Rutqvist et al. (2002)* publizierten Ansatz das Programm $FLAC^{3D}$, da die geomechanische Simulation in ihrer Beeinflussung durch die geohydraulischen Prozesse im Vordergrund stehen soll und dazu die beim LfD&G vorliegenden tonsteinspezifischen Erweiterungen für $FLAC^{3D}$ zur Verfügung stehen. Anhand entsprechender experimenteller Untersuchungen sind dabei noch fehlende physikalische Grundlagendaten zu ermitteln. Darüber hinaus ist anhand geeigneter Fallbeispiele (generisch, URL-Feldversuche) die Aussagequalität des neuen Prognoseinstrumentariums zu belegen ((T)HM-Modellierung und -Simulation).

Das zweite Hauptziel besteht in der Fortführung der im Rahmen der vorangehenden beiden Forschungsvorhaben begonnenen Kalibermessungen und Kameraobservationen in Bohrlöchern der Lokationen Mont Terri (Schweiz, Opalinuston) und Tournemire (Frankreich, Toarcium-Tonstein) zum hydraulisch beeinflussten Trag- und Deformationsverhalten der beiden



Tongesteinsfazies. Neben der Erarbeitung von detaillierteren Informationen zu den eher kurzfristigen Gebirgsreaktionen auf die Auffahrung von Bohrlöchern im Tonsteingebirge liegt hierbei vorrangig die Erforschung derjenigen mechanischen und hydraulischen Effekte im Blickfeld, die mit einer langzeitigen Offenhaltung von Bohrlöchern im Tonsteingebirge verbunden sind. Damit werden im Rahmen des Vorhabens sowohl neu abgeteufte Bohrlöcher wie auch bereits bestehende Bohrlöcher im Hinblick auf ihr Tragverhalten untersucht. Dabei besteht auch eine weitere Möglichkeit darin, die auf diese Weise erhaltene Datensammlung zum Bohrlochtragverhalten zur Validierung des im Rahmen dieses Vorhabens entwickelten gekoppelten Simulators heranzuziehen. Wissenschaftlich-technische Grundlage für diese Untersuchungen ist die These, dass das Tragverhalten von Bohrlöchern in einem wenig durch ein Trennflächengefüge vorgeschädigten Gebirge Rückschlüsse auch auf das Tragverhalten von Hohlräumen ohne tragenden Ausbau mit größeren Abmessungen ermöglicht, z.B. Großbohrlöcher, Mikrotunnel, Strecken und Kammern, Infrastrukturgrubenbaue, *Lux & Seeska (2010)*.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sind daher vor diesem Hintergrund die folgenden Schwerpunkte zur Entwicklung eines *FLAC^{3D}-TOUGH2-Kopplungs-Simulators* („FTK-Simulator“) und zur Vertiefung der in situ-Erkenntnisse zum Hohlraumtragverhalten im Tonsteingebirge bearbeitet worden:

- Kopplung des geomechanischen Programms *FLAC^{3D}* mit den Komponenten zur Behandlung von Multiphasenfluss/Wärmetransport des Programms *TOUGH2* und Entwicklung eines numerisch gekoppelten THM-Simulators für ungesättigte/gesättigte Tongesteine,
- Verifizierung und Validierung des neuen (T)HM-Simulators, Erstellen einer Benchmark-Auswahl,
- experimentelle Untersuchungen zum HM-Verhalten von Tongesteinen bei der Auf- und Entsättigung zur Erweiterung des Prozessverständnisses,
- Berücksichtigung der Befunde aus den laborativen Untersuchungen in der physikalischen Modellierung,
- Fortführung und Vertiefung von Bohrlochgeometriemessungen und Bohrlochvideoobservationen zur Erweiterung des bestehenden Datenfundus von auch längere Beobachtungszeiten erfassenden in situ-Deformationsmessdaten und -Beobachtungen hinsichtlich der Wirkungsweise hydraulisch-mechanischer Prozesse (Konturbrüche, Gebirgs-



wasseransammlungen, Aufweichungs- und Austrocknungseffekte im Gestein der Bohrlochwand) als Anwendungsszenario für den neuen (T)HM-Simulator,

- Durchführung eines ersten Benchmarkings mit dem Programmsystem CODE_
BRIGHT der GRS Braunschweig in Verbindung mit einem Feldtest.

Eine wesentliche Bedeutung in den THM-Prozessen hat die Änderung des Sättigungsgrades im Tongestein (gesättigt ↔ teilgesättigt). Die damit verbundenen Prozesse und Eigenschaftsänderungen sollen daher im Mittelpunkt der Projektbearbeitung stehen, während die Untersuchungen bezüglich Temperaturänderungen erst für eine spätere Phase vorgesehen sind.

In den fachlichen Ausführungen des vorliegenden Berichts treten an vielen Stellen einige zentrale Begriffe für (multi)physikalische Prozesse und Sachverhalte auf. Häufig wird dabei der Übersichtlichkeit halber auf die folgenden abkürzenden Bezeichnungen für diese Prozesse und Sachverhalte zurückgegriffen:

- Prozesse (generell):
M – mechanisch, H – hydraulisch, T – thermisch, C – chemisch (→ HM – hydraulisch und mechanisch etc.),
- hydraulische Strömungsprozesse:
 H^1 – Einphasenströmung, H^2 – Zweiphasenströmung (→ TH^2M – thermisch-hydraulisch-mechanische Prozesse mit Zweiphasenfluss etc.),
- Prozessinteraktionen / betrachtete Teilaspekte aller möglichen Wechselwirkungen:
→ – einseitige Beeinflussung, ↔ – wechselseitige Beeinflussung (→ $H \rightarrow M$ – Einfluss der hydraulischen Strömungsprozesse auf das geomechanische Gebirgsverhalten, z.B. über das Effektivspannungskonzept).

Ein gelegentlich in runde Klammern gesetztes T oder C in „(T)HM“ bzw. „THM(C)“ weist darauf hin, dass die thermischen bzw. chemischen Prozesse im beschriebenen Kontext weniger im Fokus stehen als die hydraulischen und mechanischen Prozesse. Das mit dem vorliegenden Bericht dokumentierte Forschungsvorhaben ist ursprünglich zur Untersuchung und numerischen Beherrschung von lediglich HM-Prozessen initiiert worden.



1.2 Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen des BMWi-Förderprogramms

Das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie bzw. zu Vorhabensbeginn für Wirtschaft und Technologie) fördert Untersuchungen aus dem Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung, die zur generellen Thematik der Vorsorge für den Schutz von Mensch und Umwelt einen Beitrag leisten können. Dieser Thematik ist auch die Bearbeitung grundlegender Sicherheitsfragen zur Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen und hier speziell der Endlagerung radioaktiver Abfälle zuzurechnen. Auf dem Gebiet der Endlagerforschung werden u.a. Arbeiten gefördert, die der Vertiefung der Kenntnisse zu den sicherheitlich relevanten Prozessabläufen im Gebirge sowie der Fortentwicklung der Sicherheitstechnik und der Methoden zur Sicherheitsbewertung dienen. Dabei haben bis dato die Geosysteme Salzgebirge und Tonsteingebirge im Vordergrund gestanden.

Die im Vorhaben durchgeführten Arbeiten beziehen sich auf das Geosystem Tongestein und können Themen zugeordnet werden, deren Bearbeitung im BMWi-Förderkonzept „Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007-2010)“ gefördert worden ist und die sich insbesondere auf folgende Schwerpunkte beziehen:

A4 Wirtsgesteinseigenschaften

- Erhebung, Beschreibung und Beurteilung der endlagerrelevanten Eigenschaften von Steinsalz und Tonsteinen insbesondere hinsichtlich des Schädigungs- und Verheilungsverhaltens sowie im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit

B2 Geologische Barriere

- Untersuchung und Modellierung des geomechanischen, geochemischen und thermohydromechanischen Verhaltens von Steinsalz und Tonsteinen
- Untersuchungen zur Beeinträchtigung des Isolationspotenzials der geologischen Barriere durch geogene und technogene Einwirkungen, auch unter Berücksichtigung der Entstehung und Ausbreitung von Gasen

B5 Methoden und numerische Simulationen

- Verbesserung prozessbeschreibender Modelle, insbesondere durch Entwicklung gekoppelter Modelle



B6 Qualifizierung von Modellen und Reduzierung von Unsicherheiten

- Anwendung existierender oder Entwicklung neuer Methoden und Verfahren für die Qualifizierung von Modellen zur Beschreibung thermischer, geomechanischer, hydraulischer und geochemischer Prozesse (THMC-Kopplung)
- Überprüfung der Übertragbarkeit der Aussagen von Laboruntersuchungen auf Techniks- und reale Systeme

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Da es auf der hydraulischen Seite bereits etablierte Software mit Zweiphasenfluss insbesondere für Tonsteinformationen gibt wie z.B. das Programm TOUGH2, liegt es nahe, hier den Versuch einer Kopplung der vorhandenen und etablierten sowie inzwischen auch auf Tongesteine spezialisierten geomechanischen Software FLAC^{3D} mit der bestehenden und bewährten thermohydraulischen Software TOUGH2 zu unternehmen. Am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, Berkeley, USA) wird das Programmsystem TOUGH2 seit Jahren im Bereich der Geosystemmodellierung mit Schwerpunkt in der Simulation geohydraulischer und geothermischer Prozesse angewendet und auch weiterentwickelt. Der Quellcode dieses Programmsystems ist beim LfD&G bereits vorhanden gewesen, so dass hier auch anwendungsspezifische Modifikationen vorgenommen werden können. Zur Berücksichtigung von Einflüssen geomechanischer Vorgänge und Charakteristika auf die thermohydraulischen Eigenschaften und Prozesse wurde am LBNL bereits eine Einbindung der Software FLAC^{3D} in die Simulationen mit TOUGH2 realisiert („TOUGH-FLAC-Simulator“). Da die hier relevanten Aufgabenstellungen ihren Schwerpunkt in den mechanischen Prozessen haben und somit auch die Verwendung der diesbezüglich spezialisierten geomechanischen Software FLAC^{3D} für weiterführende Analysen von (thermo-)hydromechanisch gekoppelten Simulationen erforderlich ist, ist es aus Sicht des LfD&G vorgegeben gewesen, eine Kopplung der beiden Programmsysteme von der am Lehrstuhl weiterentwickelten und validierten Programmversion des Programms FLAC^{3D} ausgehend zu entwickeln („FLAC-TOUGH-Simulator“). Zudem hat das LBNL bereits zum Zeitpunkt der Antragstellung für dieses Forschungsvorhaben Interesse an einer Zusammenarbeit mit dem LfD&G im Hinblick auf hydromechanisch gekoppelte Simulationen mit den Codes FLAC^{3D} und TOUGH2 bekundet, bei der das am LfD&G entwickelte und dort bereits in FLAC^{3D} implementierte Stoffmodell *Lux/Wolters* für Salinargestein als eine Weiterentwicklung des Stoffmodells *Hou/Lux* verwendet werden soll.



Nach ersten Vorarbeiten sind die zur Kopplung notwendigen programmtechnischen Eingriffe für grundsätzlich möglich befunden worden, weil das Programmsystem FLAC^{3D} auf verschiedene Weise die Entwicklung einer eigenen Schnittstelle erlaubt sowie bezüglich TOUGH2 der Quellcode vorgelegen hat und insbesondere auch die Ein- und Ausgabedatei-strukturen bekannt gewesen sind.

Eine Validierung des neu entwickelten FLAC^{3D}-TOUGH2-Kopplungs-Simulators kann

- (1) mit Hilfe von einfachen, analytisch lösbaren Modellbeispielen sowie
- (2) durch retrospektive Simulation der messtechnischen und visuellen Befunde aus Laborversuchen und Felduntersuchungen, aber auch
- (3) über einen Vergleich der Berechnungsergebnisse mit denen eines weiteren bewährten numerischen Simulationsprogrammes für definierte Berechnungsbeispiele erfolgen (Benchmark).

Zu Punkt (2) haben aus vorangegangenen Forschungsvorhaben in einem erheblichen Umfang Untersuchungsbefunde zum Tragverhalten von Bohrlöchern vorgelegen, welche aufgrund der eher langzeitigen ablaufenden gesteinshydraulischen und geomechanischen Prozesse im Tonstein wie dem langsamen Abbau von Porenwasserdruckspitzen, der permeabilitätsbedingt verzögerten Wiederaufsättigung teilgesättigter/dilatanter Gebirgsbereiche und der kriechbedingten Spannungumlagerungen auch im Anschluss an diese Vorhaben kontinuierlich weiterzuerfassen und ggf. auf weitere Bohrlöcher auszuweiten gewesen sind. Auf diese Weise kann eine Validierung des neu entwickelten THM-gekoppelten Simulationsinstrumentariums anhand einer umfassenden Datenbank über mechanische und hydraulische in situ-Entwicklungen im Laufe eines mehrjährigen Zeitraumes erfolgen. Ergänzend ist beabsichtigt gewesen, Prüfkörperuntersuchungen zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Tonstein durchzuführen, welche idealerweise zur Validierung von Stoffmodellen herangezogen werden können.

Zu Punkt (3) ist im Rahmen des durchgeführten Vorhabens beabsichtigt gewesen, Simulationsergebnisse für komplexere (in situ-)Beispiele aus dem FTK-Simulator den Berechnungsergebnissen aus dem an der Polytechnischen Universität Kataloniens (UPC, Barcelona, Spanien) entwickelten Programm CODE_BRIGTH gegenüberzustellen. CODE_BRIGTH ist eine Software zur Durchführung von THM-gekoppelten Simulationen. Für die Durchführung von Benchmark-Berechnungen mit CODE_BRIGTH ist im Vorfeld eine Zusammenarbeit mit der



Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS Braunschweig) vereinbart worden. Hier liegen bereits langjährige Erfahrungen im Umgang mit dieser Software vor.

Grundsätzlich bieten derartige Simulatoren mit einer Kopplung mechanischer und hydraulischer sowie auch thermischer Prozesse die Möglichkeit, unter Einbeziehungen von Temperaturänderungen auf der mechanischen Seite den Gefügeentfestigungs-/Auflockerungsprozess mit der Entwicklung einer Sekundärporosität/Sekundärpermeabilität zu modellieren und auf der anderen Seite die hydraulisch nichtlinearen Prozesse des Zweiphasenflusses mit Ent-/Wiederaufsättigung und Porenwasserdruckänderung (Saugspannung) sowie zugehörige Festigkeitsänderungen quantitativ ermitteln zu können. Auf die Notwendigkeit derartiger Simulationswerkzeuge ist bereits in *Rejeb et al. (2008)* hingewiesen worden.

1.4 Arbeitsprogramm

Das mechanische Verhalten von Tongesteinen und die Beschreibung der geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen im Tongestein ohne Berücksichtigung des Multiphasenflusses sind im Rahmen der BMWi-Forschungsprojekte 02E9632 und 02E10427 in orientierenden Ansätzen untersucht worden. Dabei hat sich gezeigt, dass das durch entsprechende Zwischenlagerung in seinem ursprünglichen mechanisch-hydraulischen Zustand weitgehend erhaltene wassergesättigte Tongestein erwartungsgemäß ein anderes mechanisches Verhalten aufweist als das durch eigentlich ungewollte, aber mangels geeigneter Zwischenlagerungstechnik zunehmende Austrocknung desaturierte und damit teilgesättigte Tongestein. Auf diesen im Grundsatz wenig realitätsnahen laborativen Befunden aufbauende Modellierungen und Simulationen lassen damit auch eher nur wenig realitätsnahe Ergebnisse erwarten. Neben einer Fortsetzung der Verbesserung der laborativen Grundlagen zur Charakterisierung der HM-Prozesse ist für gesättigte und ungesättigte Tongesteine auch eine Weiterentwicklung von physikalischer Modellierung und numerischer Simulation erforderlich mit dem Ziel, die eng gekoppelten mechanisch-hydraulischen Prozesse besser beschreiben zu können.

Um den hydraulischen Simulator TOUGH2 (Zustandsgrößen/Kennwerte: Permeabilität, Fluiddrücke, Kapillardruck, Porosität, Dichte der Fluide, Wassergehalt und Sättigungsgrad...) zeitinkrementell und in zweiseitiger Wechselwirkung mit dem bereits auf Tongesteine spezialisierten geomechanischen Simulator FLAC^{3D} (Zustandsgrößen/Kennwerte: Spannungen, Verformungen und Verzerrungen, Schädigung und Verheilung, Quelldruck, Quellung und Schrumpfung, *Biot*'scher Koeffizient...) hinsichtlich der Prozesssimulation zu koppeln, müs-



sen zuerst geeignete Schnittstellen in beiden Programmen zum Austausch von Daten geschaffen werden. Die Daten zur Beschreibung der Modelldiskretisierung differieren bei beiden Programmen, da zur inkrementellen Lösung der jeweiligen Differentialgleichungen mit der FDM (Finite-Differenzen-Methode) und der IFDM (Integrale Finite-Differenzen-Methode) zwei unterschiedliche numerische Methoden angewandt werden, so dass auch hier eine Anpassung vorzunehmen ist (Konversion der relevanten Diskretisierungscharakteristika inklusive Randbedingungen und Quellen/Senken).

Im Rahmen dieses Vorhabens liegt der erste Schwerpunkt daher in der Entwicklung des FTK-Simulators und in seiner Verifizierung, während im zweiten Schwerpunkt dann die numerischen Simulationen zum (T)HM-Verhalten von Tongesteinen im Mittelpunkt stehen mit der Validierung des neu entwickelten Simulators anhand eines Benchmarkings und des Vergleichs der Resultate mit den in situ-Messungen sowie mit den Simulationsergebnissen der GRS Braunschweig (CODE_BRIGTH) mit dem Ziel der Qualitätssicherung.

Im Rahmen von laborativen Untersuchungen sind dann in einem dritten Schwerpunkt begleitende und eher grundsätzlich orientierende Arbeiten zum Materialverhalten von Tongestein durchgeführt worden. Neben weiterführenden Untersuchungen an vollgesättigten Prüfkörpern ist dabei beabsichtigt gewesen, den Fokus auf Einflüsse einer in situ vorherrschenden Streckenbewitterung auszudehnen, indem bei einaxialen Versuchen die relative Luftfeuchtigkeit in der Untersuchungsanlage variiert wird (→ Saugspannung/Verdampfung von Porenwasser, Teilentsättigung des Tonsteinmaterials).

Entsprechend dem zweiten Hauptziel dieses Forschungsvorhabens liegt schließlich der vierte Schwerpunkt in der Fortführung von Feldmessungen und Kamerabefahrungen von Bohrlöchern zum Ausbau der vorhandenen Datenbank mit Blick auf die Erfassung des Deformationsverhaltens der Bohrlochkonturen und die Entstehung und Aufweitung von Bruchstrukturen innerhalb der Bohrlöcher in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Bohrlöcher gegenüber dem Schichtungsgefüge und dem primären und sekundären Spannungsfeld sowie mit Blick auf zeitabhängige hydromechanisch-gekoppelte Phänomene innerhalb der Bohrlöcher (z.B. Wasserzutritte, Aufweichungseffekte, Austrocknungseffekte) in den betreffenden Lokationen Mont Terri und Tournemire. Ziel der Observationsarbeiten ist eine Erweiterung der vorhandenen Datenbank zur Validierung des neu entwickelten Simulationsinstrumentariums. Darüber hinaus soll durch die Erweiterung der Basis an eigenen Feldmessdaten eine weitere Verbesserung des Verständnisses für im Tongestein ablaufende endlagerrelevante Prozesse er-



reicht werden. Zur Durchführung der Feldarbeiten ist im Vorfeld des Projektes eine Zusammenarbeit mit der GRS Braunschweig vereinbart worden. Darüber hinaus bestehen seitens des LfD&G aus vorhergehenden Forschungsprojekten resultierende sehr gute Kontakte zu den Betreiberorganisationen der beiden Untertagelabore Mont Terri und Tournemire sowie zu weiteren Mitgliedsorganisationen des Mont-Terri-Konsortiums.

Aus der Zielsetzung des Forschungsprojektes und dem interdisziplinären Projektaufbau sind zunächst die folgenden 19 Arbeitspakete für das Forschungsvorhaben abgeleitet worden:

- (1) Aufarbeitung der bereits durchgeführten Arbeiten und der bestehenden Unterlagen zu FLAC^{3D} und TOUGH2 zur rechnerischen Simulation eines geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Materialverhaltens / Datenaufarbeitung und Dokumentation.
- (2) Aufarbeitung der vorhandenen laborativen Kenntnisse zu geomechanischen und insbesondere geohydraulischen Eigenschaften des Tongesteins (gesättigt, teilgesättigt).
- (3) Recherche, Beschaffung und Dokumentation international verfügbarer Literatur zum (T)HM-gekoppelten Materialverhalten zur Identifizierung tongesteinsbezogener Prozesse (NF-Pro, DECOVALEX-THMC, GENESIS, TEE, TemTon etc.) und Identifizierung offener Fragestellungen in diesem Kontext.
- (4) Erarbeitung einer Schnittstelle von FLAC^{3D} und TOUGH2 zur beiderseitigen Verwendung von diskretisierten Modellen und Randbedingungen (→ grundsätzliche vergleichende Prüfung der Leistungsfähigkeit der beiden Simulatoren).
- (5) Erarbeitung einer „M→H“-Kopplungsroutine zur Übertragung von Stoffmodellparametern und Umrechnung von berechneten mechanischen Zustandsgrößen von FLAC^{3D} auf bzw. für TOUGH2 und Erarbeitung einer „H→M“-Kopplungsroutine zur Rückübertragung und Umrechnung der berechneten hydraulischen Zustandsgrößen von TOUGH2 auf bzw. für FLAC^{3D}.
- (6) Erarbeitung von Referenzbeispielen (stark abstrahiert und analytisch handhabbar sowie realitätsnah und komplexer entsprechend der Fachliteratur).
- (7) Durchführung von ersten Testsimulationen.
- (8) Identifizierung und Charakterisierung implementierter Stoffmodelle (mechanisch, hydraulisch) – Benchmark.



- (9) Organisation des in situ-Untersuchungsprogramms. Dazu ist das entwickelte und zur Verfügung stehende Bohrlochobservationsinstrumentarium (Dreiarmskalibersonde/Axial-Bohrlochkamera/Temperatur- und Feuchtesensoren) in einer im Rahmen des UFO-PLAN-Vorhabens 3607R02596 bereits intensiv erkundeten Lokation innerhalb des URL Mont Terri zum Einsatz zu bringen, um so bestehendes Wissen um die geologischen Gegebenheiten (z.B. Faziesübergänge, Störungszonen, zu erwartende Wasserzutritte) nutzen zu können. Von besonderem wissenschaftlichen Interesse ist es, die neu herzustellen Observationsbohrlöcher in Gebirgsbereiche hinein abzuteufen, in denen bis zum Zeitpunkt des Abteufens der Bohrlöcher möglichst ungestörte Bedingungen vorliegen. Hierzu sind je nach Bohrlochausrichtung Bohrlochlängen von $l = 20\text{ m}$ bis $l = 30\text{ m}$ erforderlich. Eine Anzahl von $n = 4$ neuen Observationsbohrlöchern, jeweils in unterschiedlichen Orientierungen abgeteuft, wird angestrebt. Je nach Zustand der bereits bestehenden Bohrlöcher ist zusätzlich eine weitere Observation bereits bestehender Bohrlöcher möglich.
- (10) Ergänzung des in situ-Equipments um die zur Durchführung des in situ-Untersuchungsprogramms notwendigen Apparaturen (beispielsweise weiteres Vortriebsgestänge).
- (11) Abstimmung und Durchführung einer Bohrkernbeschaffungskampagne mit Zwischenlagerung des Bohrkernmaterials in speziell für Tongestein entwickelten Druckzellen → Kooperation mit der GRS Braunschweig.
- (12) Durchführung der in situ-Untersuchungen.
- (13) Erstellung eines Laborprogramms und Anpassung bestehender laborativer Ausrüstung zur Untersuchung von identifizierten offenen Fragestellungen in Abhängigkeit von Art, Anzahl und Qualität der gewonnenen Bohrkern (Orientierung zum Schichtungsgefüge). Es ist geplant, sowohl schichtungsparallele wie auch schichtungorthogonale Bohrkern in ausreichender Anzahl ($n_{\parallel} \approx 10$ und $n_{\perp} \approx 10$) zu entnehmen und zu konservieren, um insbesondere Unterschiede zwischen diesen beiden Prüfkörperarten in Bezug auf die Sensitivität gegenüber den hydraulischen Rahmenbedingungen laborativ herausarbeiten zu können. Hierzu ist eine bereits in einen Prüfstand integrierte und erprobte Befeuchtungsanlage weiter zu optimieren. Um die Umsetzung des Laborprogramms im geplanten zeitlichen Rahmen des Projektes gewährleisten zu können, soll ein weiterer Prüf-



stand mit Befeuchtungstechnologie ausgestattet werden. Ein Prüfstand zur Durchführung eines Langzeitkriechversuchs ($t > 6\text{mon}$) steht zur Verfügung.

- (14) Durchführung eigener laborativer Untersuchungen zur geomechanisch/geohydraulischen Charakterisierung des anstehenden Tongesteins (Einfluss hydraulischer Rahmenbedingungen wie z.B. relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft).
- (15) Ableitung von standortbezogenen repräsentativen Materialdaten für das der numerischen Simulation zugrunde gelegte physikalische Modell mit Berücksichtigung geomechanisch/geohydraulischer Eigenschaften und Einflussgrößen.
- (16) Durchführung von numerischen Simulationen für ausgewählte repräsentative Beispiele und Verifizierung der Berechnungsdaten sowie Überprüfung von Qualität und Effizienz (Rechenzeit) der HM-gekoppelten Berechnungen – Benchmark.
- (17) Validierung von physikalischer Modellierung/numerischer Simulation durch
 - Simulation von laborativen Untersuchungen und
 - Gegenüberstellung von Berechnungs- und in situ-Mess-/Beobachtungsdaten (komplexere Referenzbeispiele aus AP 6 und Befunde eigener in situ-Untersuchungen).Auswahl, Simulation und Dokumentation grundlegender, problemorientierter Benchmarks aus dem H²M-Bereich (Kopplung von Zweiphasenströmung in porösen Medien mit Matrixdeformation).
- (18) Vorstellung und Diskussion der Arbeiten im nationalen und internationalen Rahmen.
- (19) Dokumentationen der Forschungsarbeiten, Generalisierung der Befunde und Erarbeitung eines Abschlussberichtes.

Im ursprünglich angesetzt Bearbeitungszeitraum dieses Forschungsvorhabens 02E11041 ist der FTK-Simulator anhand erster Modellbeispiele verifiziert und getestet worden (numerische Korrektheit). Mit der Simulation von Zweiphasenflussprozessen liegen aber bereits ohne und dann insbesondere auch mit einer sequenziellen mechanischen Kopplung extrem komplexe und numerisch sensitive Prozesse vor, so dass im Rahmen des Arbeitspaketes 17 (Validierung/Benchmarking) daher nur erste grundlegende Rechenerfahrungen von eher qualitativem Charakter mit dem FTK-Simulator gewonnen werden konnten. Im Hinblick auf den zukünftigen Einsatz des Simulators bei der Bearbeitung von wissenschaftlich-technischen Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle ist jedoch vorab eine umfassende Validierung zur Demonstration der Funktionstüchtigkeit des Simulators erforderlich



(geotechnische Korrektheit). Vom LfD&G wird zu diesem Zweck in naher Zukunft beabsichtigt, den FTK-Simulator durch umfassendere Benchmark-Vergleiche mit den Simulatoren anderer Organisationen im Rahmen eines Folgevorhabens zu validieren. Nebenbei würde damit gleichzeitig auch eine Validierung der weiteren in den Benchmark einbezogenen Simulatoren erfolgen, so dass im langfristigen Ergebnis zukünftig in Deutschland mehrere voneinander unabhängige, in ihrer grundsätzlichen Funktionalität validierte Simulatoren für die Analyse der langfristig in Endlagern sowohl im Tonstein- wie auch im Salinargebirge ablaufenden, ein- bzw. zweiseitig gekoppelten thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozesse verfügbar sein würden.

Vor Ablauf des ursprünglich angesetzten Bearbeitungszeitraumes ist daher mit Blick auf die beabsichtigte Validierung des FTK-Simulators eine Laufzeitverlängerung und Aufstockung des Forschungsvorhabens in die Wege geleitet worden, um Planungen sowohl zur Gewinnung von Organisationen zur Beteiligung an dem geplanten Benchmark wie auch zur Erarbeitung der zu vergleichenden Berechnungsmodelle auf Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens bereits gewonnenen Erfahrungen vorzunehmen. Im Verlauf der bis dato erfolgten Bearbeitung des Vorhabens sind bereits erste Kontakte zu Organisationen, welche ebenfalls THM-gekoppelte Simulationen durchführen, im Hinblick auf eine gegenseitige fachliche Unterstützung im Bereich der Simulation von THM-Prozessen im Tonstein- und Salinargebirge aufgebaut bzw. im Hinblick auf einen derartigen Forschungsschwerpunkt erweitert worden. Diese Organisationen sind aus Sicht des LfD&G als primäre potenzielle Partner zur Teilnahme an dem geplanten Benchmark-Vergleich angesprochen worden. THM-Simulatoren, die über diese potenziellen Benchmarking-Teilnehmer im Optimalfall für den Vergleich zur Verfügung stünden, wären hierbei FTK, TOUGH-FLAC (*Rutqvist et al., 2002*), CODE_BRIGHT (*UPC, 1994/2014*), OpenGeoSys (*Kolditz et al., 2012*), COMSOL Multiphysics (*COMSOL, 2011*) und JIFE (*Faust et al., 2011*).

Für den geplanten Benchmark-Vergleich sind im Rahmen der Laufzeitverlängerung dieses Vorhabens ebenfalls Vorschläge für Modellbeispiele auszuarbeiten gewesen, die in dem anvisierten zukünftigen Folgevorhaben dann von allen Partnern gemäß dem Stand ihrer jeweiligen Simulationssoftware rechnerisch simuliert werden könnten. Insgesamt haben sich aus den ergänzenden Zielsetzungen zusätzlich zu den bereits bestehenden Arbeitspaketen (1)-(19) des Forschungsvorhabens 02E11041 damit die vier folgenden weiteren Arbeitspakete ergeben:



- (20) Gewinnung von teilnehmenden Organisationen für den geplanten Benchmark-Vergleich im Ton- und/oder Salinargestein (Vorstellung des bestehenden FTK-Simulators, Gespräche, erste Ideen für Benchmark-Beispielmodelle, ggf. Formalitäten).
- (21) Literaturrecherche in Vorbereitung auf den Benchmark-Vergleich (Recherche von Beispielmodellen, Überblick über Fähigkeiten und Berechnungsbeispiele der am Vergleich beteiligten Simulatoren, Erfahrungen mit anderen Benchmark-Aktivitäten).
- (22) Entwicklung und Konkretisierung von Benchmark-Beispielmodellen mit Blick auf die Modellierungsmöglichkeiten der am Vergleich beteiligten Organisationen/Simulatoren.
- (23) Dokumentation der für geeignet befundenen Benchmark-Beispiele, Vorstellung/Abriss der am Benchmark beteiligten Simulatoren, Integration dieser Dokumentationen in den Abschlussbericht aus Arbeitspaket (19).

Die innerhalb der folgenden Abschnitte erfolgte Dokumentation der im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten ist hier nicht anhand der aufgelisteten Arbeitspakete, sondern im Wesentlichen anhand der vorgenannten vier Schwerpunkte des Vorhabens strukturiert. Zur besseren Orientierung zeigt die Tabelle 1.1 auf, in welchen Abschnitten des vorliegenden Berichts die 23 aufgeführten Arbeitspakete behandelt werden, wobei in den angegebenen Abschnitten aufgrund der Berichtsstruktur nicht zwingend Überschriften oder Unterpunkte mit den den Arbeitspaketbezeichnungen entsprechenden Namen existieren.

Es folgen einige Anmerkungen zu den Tabelleneinträgen:

- (7): Die während der Codeimplementierung erfolgten Testsimulationen mit dem FTK-Simulator dienten lediglich zur Verifizierung eingebauter Codepassagen und werden aus diesem Grund nicht ausführlich dokumentiert. In Abschnitt 6.2 werden nennenswerte Aspekte der Entwicklung des gekoppelten Simulators erläutert, und in diesem Kontext wird auch Bezug auf Resultate von derartigen Testsimulationen genommen. Testsimulationen, die später zur hydraulisch-mechanischen oder hydraulischen Verifizierung des FTK-Simulators bzw. von „TOUGH2 aus FLAC^{3D}“ (TOUGH2 mit FLAC^{3D} als Prä- und Postprozessor, siehe dazu Abschnitt 6.2.6) herangezogen worden sind, sind dem Arbeitspaket (16) zugeordnet und werden demzufolge in Abschnitt 6.4.2 dokumentiert.



Arbeitspaket	Abschnitte	Bemerkungen
(1) Datenaufarbeitung F/T	6.1 / 2.2 / 8.2	
(2) Datenaufarbeitung Labor	2.1	
(3) Recherche THM/Tonstein	2 / 11	
(4) F-T-Schnittstelle	6.2	
(5) F-T-Kopplungsroutinen	6.2.3 / 5.3	
(6) Referenzbeispiele	5.4 / 6.4.3.1 - 6.4.3.3 6.3 / 7.3.1 / 7.3.2	← Einphasenfluss ← Zweiphasenfluss
(7) erste Testsimulationen	6.3.2 - 6.3.4 6.2	← TOUGH2 ← FTK-Simulator
(8) enthaltene Stoffmodelle	5.2 / 5.3	
(9) Organisation in situ-Programm	3.1.1 / 3.1.2 / Bild 7.1	
(10) Ergänzung in situ-Ausrüstung	–	unerlässlich für AP (12)
(11) Bohrkernbeschaffung	4.1 / 4.2	
(12) Durchf. in situ-Untersuchgn.	3	
(13) Erstellung Laborprogramm	4.1 / 4.6.1	
(14) Durchf. Laboruntersuchungen	4.3 - 4.7	
(15) Ableitung von Materialdaten	4.5 4.6.3 / 4.7.3	UC/TC: Bestätigung bestehender Parameter; UCc/TCc: keine Verzerrgs.-raten ableitbar
(16) verifizierende Simulationen	6.4 / 6.3.5	
(17) validierende Simulationen	7 / 6.4.3.10	
(18) Vorstellung und Diskussion	–	im Rahmen der Benchmarking-Partnergewinnung & v. vorber. Veröffentlichungen
(19) Dokumentation (1)-(18)	1 - 7 / 9 - 11	
(20) Partnergewinnung	8.1 / 8.2	
(21) Recherche Benchmarkmodelle	8.3 / 11	
(22) Entwicklg. Benchmarkmodelle	8.3	
(23) Dokumentation (20)-(22)	8 / 11	

Tabelle 1.1: Zuordnung der Arbeitspakete des hier bearbeiteten Forschungsvorhabens zu Abschnitten dieses Abschlussberichts (F: FLAC^{3D}, T: TOUGH2)



- (8): Es werden lediglich die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verwendeten THM-Stoffmodelle und -Gleichungen zusammengestellt und beschrieben. Tiefergehende mechanische Stoffmodelle sind im Rahmen von Verifizierungen und Validierungen bis dato noch nicht zum Einsatz gekommen und sind Teil zukünftiger Weiterentwicklungsarbeiten am FTK-Simulator (siehe dazu auch Abschnitt 6.2.2, „Anisotrope Strömungsprozesse“). Der THM-gekoppelte Simulator CODE_BRIGHT unterstützt sowohl die hydraulische (und auch die mechanische) Transversal-Isotropie wie auch bei Zweiphasenflussprozessen die Berücksichtigung „phasenfremder“ Komponenten in den beiden fluiden Phasen, d.h. Wasserdampf in der Gasphase und gelöste Luft in der Flüssigphase. Die wichtigsten zugrunde liegenden physikalischen Gleichungen in CODE_BRIGHT sind dieselben wie in FLAC^{3D} (Mechanik) bzw. TOUGH2 (Thermohydraulik, d.h. insbesondere mit Fluidbilanzen in Termen von Massen anstelle von Volumina).
- (9)-(11): Es erfolgen keine separaten Beschreibungen von organisatorischen und technischen Arbeitsschritten hinsichtlich der Vorbereitung und Durchführung der in situ-Arbeiten (Bohrkernentnahmen, Kameraobservationen, Kalibermessungen), die über ihre wissenschaftlich relevanten Aspekte hinausgehen. Die Vorbereitung und Durchführung der in situ-Arbeiten sind für den Erhalt von Mess- und Observationsresultaten unerlässlich gewesen, und wissenschaftlich relevante Aspekte finden dann bei der Diskussion der Resultate Eingang.
- (17): Aufgrund der im Rahmen dieses Vorhabens noch nicht erfolgten Implementierung von anisotropen Strömungsprozessen in den FTK-Simulator (siehe Abschnitt 6.2.2) sowie der erhaltenen Resultate der laborativen Untersuchungen (keine für die Simulationen sinnvolle Kriech-/Konsolidationsrate ableitbar) ist die Validierung des Simulators nur ansatzweise gelungen.
- (18): Eine Vorstellung und Diskussion des FTK-Simulators zusammen mit ersten Simulationsergebnissen ist im Rahmen von Fachgesprächen mit externen Organisationen bereits während des ursprünglich angesetztten Bearbeitungszeitraumes des Vorhabens mit Blick auf potenzielle zukünftige Kooperationen erfolgt. Resultate aus dem Benchmarking mit der GRS Braunschweig (AP 17) sind auf der 6. internationalen Tonsteinkonferenz in Brüssel im März 2015 in Form einer Posterpräsentation vorgestellt worden, *Czaikowski et al. (2015)*, und basierend auf eine während des Bearbeitungszeitraumes begonnene bestehende Kooperation mit dem LBNL ist der vom LfD&G entwickelte



FTK-Simulator auch bereits für Simulationen für ein generisches Endlager im Salinargestein zum Einsatz gekommen, *Blanco Martín et al. (2014)*. Des Weiteren sind Veröffentlichungen zu den Ergebnissen der im Rahmen dieses und der vorangehenden Forschungsvorhaben durchgeführten in situ-Untersuchungen in Vorbereitung bzw. geplant, die allerdings nicht mehr im Zeitraum dieses Vorhabens fertiggestellt werden konnten.

Nachfolgend werden im Anschluss an den in Abschnitt 2 vorgestellten Stand von Wissenschaft und Technik die vorstehend aufgeführten vier Bearbeitungsschwerpunkte dieses Forschungsvorhabens in der folgenden Reihenfolge ausführlich mit den erzielten Ergebnissen vorgestellt. Die Reihenfolge in der Untergliederung richtet sich dabei nach dem gedanklich logischen Weg zur Konzipierung eines Endlagers, d.h. von anschaulichen in situ-Untersuchungen über laborative Untersuchungen hin zur digitalen und somit etwas abstrakteren Welt der rechnerischen Simulationen und schließlich ankommend bei der Simulation von in realen untertägigen Hohlräumen ablaufenden Prozessen:

- (1) In situ-Untersuchungen (URL Mont Terri, URL Tournemire),
- (2) Erweiterte orientierende laborative Untersuchungen an Tongestein der Lokation Mont Terri,
- (3) Entwicklung des FTK-Simulators zur Simulation THM-gekoppelter Prozesse,
- (4) Erstes orientierendes Benchmarking (in situ-Experiment im URL Mont Terri in Zusammenarbeit mit der GRS Braunschweig).





2 Zum Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 In situ- und laborative Untersuchungen

2.1.1 Überblick über den internationalen Wissensstand

Die Einbeziehung von zu Salzgestein alternativen Wirts- und Barrierengesteinen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle setzt voraus, dass ein hinreichender Kenntnisstand zu den relevanten alternativen Geosystemen und zu ihrem Verhalten unter den endlagerbedingten technologischen Einwirkungen vorhanden ist. In Deutschland hat sich die endlagerbezogene Forschung in den letzten zwei bis drei Jahrzehnten auf das Salinargebirge als Wirts- und Barrierengestein konzentriert, sodass hier ein umfangreicher Kenntnisstand vorliegt, der zuverlässige Aussagen im Rahmen von Standortbewertungen und standortbezogenen Sicherheitsanalysen erwarten lässt, z.B. die Projekte „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (Kock et al., 2012; Müller-Hoeppe et al., 2012; u.a.), „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ (Hampel et al., 2010) und ISIBEL (Bollingerfehr et al., 2013) oder auch Rübel & Mönig (2010), Lux et al. (2009), Krone (2005), Schulze & Hunsche (2005), Tsang et al. (2005), Düsterloh & Lux (2003), Wallner (2003), Lux et al. (2002a,b), Zhang et al. (2002), Hunsche & Cristescu (1997). Dieser vertiefte Kenntnisstand liegt für alternative Geosysteme wie Ton- und Kristallingesteine in Deutschland nicht vor. Die vor diesem Hintergrund bearbeiteten Forschungsvorhaben 02E9632 und 02E10427 haben mit einer Konzentration auf Tongesteine einerseits bestehende Defizite identifiziert und andererseits den bestehenden Kenntnisstand sowohl im Bereich der physikalischen Modellierung wie auch der numerischen Simulation weiter entwickelt.

Die moderne Endlagerforschung stellt die im jeweiligen Geosystem im Nah- und Fernfeld des Endlagers ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse (mechanisch, hydraulisch, thermisch, chemisch) und ihre Wechselwirkungen in den Vordergrund. Dabei stehen im Zentrum der Bearbeitung mit Blick auf Tragverhalten (bautechnische Machbarkeit, Standsicherheit) und Erhalt der primären Barrierenintegrität (Schadstoffisolation) unter der generellen Zielsetzung des vollständigen Einschlusses der Abfälle in einem Teilbereich der Geosphäre, dem so genannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich,

- (1) die durch die Auffahrung von Hohlräumen im Gebirge induzierten geomechanischen Prozesse mehr oder weniger je nach Geosystemtyp und Endlagerkonzept beeinflusst durch, aber auch einwirkend auf thermische, hydraulische und chemische Prozesse und



(2) die durch die Ablagerung von wärmeentwickelnden Abfällen im Gebirge induzierten thermischen Prozesse mit Einwirkung auf mechanische und hydraulische Prozesse.

Von der DBE ist im Rahmen von generischen Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines Endlagers im Tonstein (Forschungsvorhaben *GENESIS*) untersucht worden, unter welchen Bedingungen und Voraussetzungen die Endlagerung von stark wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in einer Tonformation in Deutschland möglich und sinnvoll ist. Die Auswahl von vier repräsentativen und grundsätzlich aus geotektonischer Sicht für die Endlagerung geeignet erscheinenden Modellregionen (Geosysteme) innerhalb Deutschlands erfolgte in Zusammenarbeit mit der BGR, die in ihrer „Regionalen Tonstudie“ die für den Zweck der Endlagerung aussichtsreich erscheinenden Tonformationen in ihrer regionalen Verbreitung identifiziert hat.

Eines der gestellten Ziele im Vorhaben der DBE war die Analyse der Standsicherheit von Einlagerungsstrecken im Tonsteingebirge insbesondere unter Berücksichtigung des starken Wärmeeintrags anhand von rechnerischen Abschätzungen zum thermo-mechanischen Verhalten des Gebirges. Als Ergebnis ist aus Sicht der Endlagerauslegung bzw. -planung der untersuchten Modellregionen in Deutschland ein Ranking mit den Bewertungsmaßstäben „eher günstig“ oder „eher ungünstig“ als Basis für weitere Arbeiten erstellt worden. In der Zusammenfassung der hier durchgeführten Untersuchungen werden die weniger tief gelegenen Modellgebiete hinsichtlich der thermischen und geomechanischen Randbedingungen als eher günstig eingeschätzt, wobei insgesamt das Modellgebiet Nord 1 in einer Referenzteufe von 300-400m im mergeligen Tonstein favorisiert wird. Die durchgeführten numerischen Simulationen zeigen, dass sowohl zur Bewertung und Prognose der operativen Sicherheit wie auch für die Gewährleistung des Einschlusses der radioaktiven Abfälle in Tongesteinen das rheologische Materialverhalten, nicht zuletzt unter thermischen Einflüssen, von entscheidender Bedeutung ist. Daher wird darauf hingewiesen, dass die Datengrundlage zur Beschreibung des Materialverhaltens und hier insbesondere des rheologischen Verhaltens von den Tongesteinen, die als potenzielle Wirtsgesteinsformationen herangezogen werden könnten, in Deutschland bislang noch unzureichend erforscht ist, *Jobmann et al. (2007)*.

Grundsätzlich ist zunächst festzustellen, dass sowohl Salzgesteine wie auch Tongesteine ein ausgesprochen komplexes, hochgradig nichtlineares und sensitiv auf Veränderungen der Beanspruchungs- und Milieubedingungen reagierendes Materialverhalten aufweisen, insbesondere unter den für die Endlagerung relevanten Beanspruchungsbedingungen und Progno-

sezeiträumen. Bild 2.1 gibt eine Zusammenstellung der wesentlichen Materialeigenschaften. Dieser direkte Vergleich zeigt, dass Tongesteine aufgrund des Porenwassers und seines Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften des Mineralkorngefüges eher ein noch komplexeres Materialverhalten als Salinargesteine aufweisen und daher eher noch größere Anforderungen an eine zuverlässige physikalische Modellierung stellen als Salinargesteine.

Merkmal		Salinargesteine (Steinsalz)	Tongesteine	
▪ Deformationen	elastisch	+	+	Eigenschaft + = vorhanden (+)= bedingt vorhanden - = nicht vorhanden
	plastisch	+	+	
	viskos	+	+	
▪ Festigkeit	klastisch	+	+	zusätzliche Eigenschaften von Tongesteinen
	Bruch-	+	+	
	Nachbruch-	+	+	
	Dilatanz-	+	+	
▪ Gefüge-		+	+	} → Sättigungsgrad → Kapillarkohäsion (Saugspannung) → Quellen/Schrumpfen → Konsolidation
▪ fluiddruckinduzierte Infiltration		+	+	
▪ Anisotropie		-	+	
▪ Trennflächengefüge		-	+	
▪ Wassergehalt	ungeschädigt	-	+	} → Sättigungsgrad → Kapillarkohäsion (Saugspannung) → Quellen/Schrumpfen → Konsolidation
	geschädigt	(+)	+	
▪ Porenwasserdruck	ungeschädigt	-	+	} → Sättigungsgrad → Kapillarkohäsion (Saugspannung) → Quellen/Schrumpfen → Konsolidation
	geschädigt	(+)	+	

Bild 2.1: Grundlegende Materialeigenschaften der Salinar- und Tongesteine

Die beobachtete Ausbildung der *Excavation Damaged Zone* (EDZ) sowie die als zu dieser Zone zugehörig identifizierten mechanischen und hydraulischen Prozesse lassen am Beispiel des Opalinustons aus Mont Terri in Anlehnung an *Blümling et al. (2007)* erkennen, dass die für Steinsalz entwickelten physikalischen Modelle bei Verzicht auf einen mikromechanisch basierten Stoffmodellansatz und der im Rahmen einer phänomenologischen Betrachtung üblichen Beschränkung auf ein bezüglich des Korngefüges strukturloses Ersatzmaterial im Grundsatz auch für die Anwendung auf Tongesteine geeignet sind. Wesentlicher gemeinsamer Aspekt ist dabei die physikalische Modellierung des Materialverhaltens im Rahmen der Elastoplasto-Viskositätstheorie in Verbindung mit der Continuum-Damage-Mechanics-Theorie. Aus diesem erweiterten Ansatz folgt eine Quantifizierung der mit der Ausbildung der EDZ (= pseudo-plastische Zonen) verbundenen Dilatanz des Gebirges, aus der dann mit Hilfe eines geeigneten PoroPerm-Modells die induzierte Sekundärpermeabilität berechnet werden kann.



Gravierende Unterschiede bestehen allerdings aufgrund des bei Tongesteinen vorhandenen Porenwassers und aufgrund der schichtungsbedingten mechanischen Anisotropie. Somit ist bei der Übertragung zu berücksichtigen, dass aufgrund phänomenologisch ähnlicher mechanischer Eigenschaften von Ton- und Salzgesteinen zwar die grundsätzliche Anwendbarkeit des einen oder anderen bereits entwickelten physikalischen Modells gegeben ist, jedoch durch entsprechende Labor- und in situ-Untersuchungen sorgfältig zu identifizieren ist, welche Modifikationen bzw. Ergänzungen in den vorhandenen Modellen noch erforderlich sind und welche quantitativen Größen für die verschiedenen Kennwerte/Parameter bei einer Anwendung auf Tongestein(e) einzuführen sind.

Darüber hinaus ist nicht grundsätzlich auszuschließen, dass im Tonsteingebirge aufgrund tektonischer Vorbeanspruchung ein latentes Trennflächengefüge vorhanden ist, das bei entsprechenden Einwirkungen aktiviert wird und sich dann nachteilig auf die mechanischen und hydraulischen Gebirgseigenschaften auswirkt (z.B. Verminderung der Festigkeit, Vergrößerung der Deformationsfähigkeit, Vergrößerung der Durchlässigkeit).

Aufgrund der vorangehend beschriebenen großen Komplexität der in Tongesteinsformationen ablaufenden gekoppelten Prozesse ist es zur Erlangung einer umfangreichen Kenntnis der unterschiedlichen Prozesse und vor allen Dingen auch für die Erarbeitung eines umfassenden Prozessverständnisses neben laborativen Untersuchungen an Tongesteinsprüfkörpern unbedingt erforderlich, das hydraulisch-mechanisch gekoppelte zeitabhängige Trag- und Deformationsverhalten von Hohlräumen in Tongesteinsformationen auch in situ zu observieren.

Forschungsergebnisse zum in situ-Verhalten von Tragsystemen im Opalinuston sind beispielsweise in *Martin et al. (2004)* und *Inderbitzin et al. (2004)* dokumentiert worden. Die dort beschriebenen Forschungsarbeiten befassen sich schwerpunktmäßig mit der Erkundung der den innerhalb von Bohrlöchern im URL Mont Terri zu observierenden Versagensstrukturen zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen sowie mit dem Aufbau der Excavation Damaged Zone (EDZ) von Strecken und Bohrlöchern und weniger mit der präzisen Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung des Trag- und Deformationsverhaltens der Bohrlöcher und auch nicht mit der Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung des hydraulischen Verhaltens. Gerade die präzise Kenntnis und das darauf aufbauende Verständnis der zeitabhängig innerhalb von Hohlräumen in Tongesteinsformationen ablaufenden hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse stellen jedoch wesentliche Bausteine für die Schaffung



eines zuverlässigen Prognoseinstrumentariums für Tongesteinsformationen als potenzielle Wirtsgesteinsformationen dar.

Untersuchungen zum zeitabhängigen Tragverhalten von offen stehenden Bohrlöchern, die nicht fluidgefüllt oder fest mit Packersystemen oder ähnlichen Messinstrumentarien versehen worden sind, beschränkten sich für das URL Mont Terri lange Zeit auf die in *Corkum (2006)* dokumentierten Arbeiten. Die Beschreibungen zum Bohrlochtragverhalten in *Corkum (2006)* beschränken sich allerdings auf qualitative Beschreibungen der tragverhaltensbezogenen Entwicklungen innerhalb der observierten Bohrlöcher, die auf einer rein visuellen Begutachtung der Bohrlöcher von außerhalb des Bohrlochmundes beruhen. Eine Bohrlochobservationskamera oder eine optische Bohrlochsonde ist im Rahmen der in *Corkum (2006)* beschriebenen Arbeiten offensichtlich nicht zum Einsatz gekommen, da eine Visualisierung der Observationsergebnisse ausschließlich anhand von händischen Skizzen erfolgt und da auch keine Angaben zum Zustand der begutachteten Bohrlöcher in größeren Teufenbereichen ($t_{BL} \gg 1m$) getätigt werden. Insgesamt lässt sich also festhalten, dass die zeitabhängige Entwicklung des in situ Trag- und Deformationsverhaltens von offenen Observationsbohrlöchern innerhalb des URL Mont Terri bisher eher wenig dokumentiert worden ist. Untersuchungen zum zeitabhängigen Deformationsverhalten eines mit einer Dilatometersonde versehenen Bohrlochabschnitts sind von der GRS Braunschweig im Rahmen des DM-A-Experimentes im URL Mont Terri vorgenommen worden, *Zhang et al. (2014)*.

Im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* sowie im Rahmen von *Lux et al. (2012)* sind erstmals über mehrere Jahre hinweg zu unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgezeichnete Messdaten und Videoobservationsergebnisse aus im URL Mont Terri gelegenen Observationsbohrlöchern vorgestellt und diskutiert worden, wodurch die Datenbasis zum Bohrlochtrag- und Bohrlochdeformationsverhalten signifikant erweitert werden konnte.

Aus dem URL Tournemire haben vor Beginn der Arbeiten des LfD&G keine dokumentierten Observationsergebnisse zum zeitabhängigen Bohrlochtrag- und Bohrlochdeformationsverhalten vorgelegen, sodass die in *Lux et al. (2012)* dokumentierten Ergebnisse bisher die alleinige Datenbasis zum zeitabhängigen Bohrlochtrag- und Bohrlochdeformationsverhalten für das URL Tournemire darstellen.



2.1.2 Bisherige Arbeiten und Erfahrungen des Vorhabensbearbeiters

Bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens 02E9632 war es naheliegend, von dem vorhandenen Kenntnisstand zu Salinargesteinen auszugehen und in einem ersten Bearbeitungsschwerpunkt zunächst im Vergleich der Wirts- und Barrierengesteine Steinsalz und Tongestein Ähnlichkeiten und vor allem Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften und im mechanischen Verhalten zu identifizieren. Auf dieser Analyse aufbauend erfolgten dann in einem zweiten Bearbeitungsschwerpunkt laborative Untersuchungen zum Materialverhalten von Tongesteinen, um einerseits die Versuchstechnik an diese Gesteine anzupassen und andererseits ihr mechanisches Verhalten im Vergleich zu Literaturdaten zu analysieren (Eigenschaften, Kennwerte).

Der dritte Bearbeitungsschwerpunkt befasste sich dann mit der physikalischen Modellierung. Ausgehend von für Salinargesteine entwickelten Stoffmodellen ist untersucht worden, inwieweit diese Modelle im Rahmen einer phänomenologischen Betrachtungsweise auf Tongesteine übertragen werden können und welche Änderungen bzw. Erweiterungen noch vorzunehmen sind. Aus mechanischer Sicht haben sich dabei im Vergleich zu Salinargesteinen bei Tongesteinen insbesondere zwei zusätzliche Aspekte als gravierend herausgestellt:

- reduzierte Festigkeiten auf Schichtflächen → anisotropes Gesteins- bzw. Gebirgsverhalten und
- mechanische Wirkungen aus dem Porenwasser → mechanisch-hydraulische Kopplung a priori und grundsätzlich und nicht nur wie bei der Endlagerung im Salinargebirge im Fall der Szenarienanalyse (Endlagersystementwicklungen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, z.B. Absaufen).

In einem vierten Bearbeitungsschwerpunkt ist schließlich versucht worden, die übertragenen und in einem ersten Schritt modifizierten physikalischen Modelle in die numerische Simulation einzubeziehen und Fallbeispiele retrospektiv zu bearbeiten.

Im Rahmen der Bearbeitung eines Folgevorhabens 02E10427 wurden die Schritte laborative Untersuchungen, physikalische Modellierung und numerische Simulation auf verfestigtes Tongestein der Lokation Tournemire angewandt. Hierbei ergaben sich zum einen ein möglicher alternativer Ansatz zur Erklärung von beobachteten Versagensformen, basierend auf der Überschreitung einer Bruchverzerrungsgrenze, sowie zum anderen ein deutlicher Einfluss der



hydraulischen Prozesse auf das Bruchverhalten von Tonstein über die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft und die daraus resultierende Wiederaufsättigung des Gesteins.

Bei der Bearbeitung der Forschungsvorhaben 02E9632 und 02E10427 wurden im Rahmen der Durchführung laborativer Untersuchungen zum Verformungs- und Festigkeitsverhalten von Tongestein der Lokationen Mont Terri und Tournemire im Hinblick auf die Ermittlung des Einflusses der in situ anstehenden Porenwasserdrücke sowie der damit verbundenen geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen auf das Tragverhalten ein neu entwickeltes Druckbehältersystem zur Zwischenlagerung von Bohrkernmaterial unter einem isotropen Spannungszustand nahe dem in situ-Spannungszustand eingesetzt. Diese Druckbehälter wirken der bei der Bohrkernentnahme und nachfolgenden Zwischenlagerung im Lauf der Zeit entstehenden Reduktion des Porenwasserdruckes und der Austrocknung (Entsättigung) entgegen. Durchgeführte laborative Untersuchungen haben gezeigt, dass zur Ermittlung der in situ anstehenden Materialeigenschaften der Tongesteine der Erhalt des Porenwasserdrucks von grundsätzlicher Bedeutung ist. Es scheint daher auf der Grundlage dieser Ergebnisse angebracht zu sein, bei Tongesteinen über eine grundlegende Überarbeitung der international üblichen Bohrkernmaterialzwischenlagerung (Bohrkerne eingeschweißt in Aluminiumfolie zur Verhinderung von Wasserverlusten) nachzudenken.

Die bislang durchgeführten und größtenteils in der internationalen Literatur beschriebenen Versuche haben den grundsätzlichen Nachteil, dass ein gegebenenfalls natürlich im Gestein vorhandener und durch das Fehlen von geeigneten Konservierungsmethoden bereits vor Versuchsbeginn abgebauter Porenwasserdruck in seiner ursprünglichen Wirkung bei der Durchführung der Versuche und entsprechend bei der Auswertung/Interpretation der Untersuchungsergebnisse nicht berücksichtigt wird. Darüber hinaus besteht ein weiterer Nachteil in der bisherigen Versuchsdurchführung darin, dass nicht bekannt ist, inwiefern die untersuchten Gesteinsprüfkörper vor Versuchsbeginn in der Zwischenlagerzeit schon einem Austrocknungsprozess unterlegen gewesen sind, so dass eine Teilsättigung vorliegt. Möglicherweise ist in dieser Zeit neben einer teilsättigungsbedingten Verfestigung (Porenwasserunterdruck, Kapillarspannung, Saugspannung) auch bereits eine teilsättigungsbedingte Entfestigung eingetreten. Unbekannt ist damit, wie sich das Gestein in seinen Eigenschaften und in seinem Gefügestand nach der Entnahme aus dem Gesteinsverband und der dadurch bedingten äußeren mechanischen und hydraulischen Entlastung in der Zeit der Zwischenlagerung verändert hat. Möglicherweise wird der Wasserdruck auch bereits durch die elastische Rückverformung des



Bohrkernmaterials nach der Entnahme aus dem Gebirgsverband und die dadurch bedingte Entlastung abgebaut.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass bei Teilsättigung ein während der Versuchsdurchführung durch Kompaktion der Gesteinsmatrix entstehender zusätzlicher Porenwasserdruck ohne eine wie bei einer Permeabilitätsmessung vor Versuchsbeginn durchgeführte künstliche Resättigung des Prüfkörpers nicht gemessen werden kann (nachträglich kein hydraulischer Anschluss zwischen stirnseitigem Druckmesser und Porenraum im Prüfkörper möglich). Eine künstliche Resättigung von Prüfkörpern konnte jedoch in der verfügbaren Zeit zumindest an Tongestein der Lokation Tournemire wohl aufgrund seiner geringen Permeabilität im Gegensatz zu Tongestein der Lokation Mont Terri nicht erfolgen.

Um daher zu gewährleisten, dass das in Laborversuchen ermittelte Materialverhalten das in situ anstehende Gestein in seinen jeweilig untersuchten Eigenschaften hinreichend repräsentativ charakterisiert, müssen die Bohrkernmaterialien nach Entnahme aus dem Gebirgsverband und vor Durchführung der Versuche zum Schutz gegen (nachhaltige) Porenwasserdruckänderung/Entfestigung/Austrocknung entsprechend gelagert werden. Üblicherweise wird das in dieser Hinsicht sensitive Bohrkernmaterial (vornehmlich Tone, Tongesteine) zum Schutz gegen Austrocknung oder die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft jedoch lediglich in Plastik- oder besser Aluminiumfolie verschweißt und unter klimatisch geeigneten Umgebungsbedingungen zwischengelagert.

Eine weitere Ursache neben der teilsättigungsbedingten Schrumpfrissbildung könnte unter diesen Bedingungen darin bestehen, dass nach Entnahme des Bohrkernmaterials aus dem Gebirgsverband der Porenwasserdruck im Porenraum des Gesteins weiterhin aufgrund der geringen hydraulischen Leitfähigkeit wirksam ist, während die der Entnahmelokation entsprechenden und von außen auf das Bohrkerngestein eingewirkt habenden mechanischen Gebirgsspannungen und hydraulischen Drücke auf das Niveau des atmosphärischen Luftdruckes abgesenkt sind.

In der Folge entstehen innerhalb der Gesteinsstruktur des Prüfkörpers in Richtung Prüfkörperoberfläche zunehmende, tangential orientierte Zugspannungen, die je nach Gesteinsgefüge mit zunehmender Zwischenlagerungsdauer zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Veränderung der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Gesteinsmatrix führen können (Mikrorissbildung, Entfestigung).



Allerdings könnte der Porenwasserdruck durch die elastische Volumenvergrößerung der Gesteinsmatrix infolge Entspannung nach der Entnahme aus dem Gebirgsverband auch weitgehend reduziert sein, so dass nur die Schrumpfrissbildung als Mechanismus verbleibt.

Aus diesen Prozessen insgesamt können phänomenologisch abhängig von der Zwischenlagerungsdauer folgende Eigenschaftsänderungen auftreten:

- eine Zunahme der Scherfestigkeit des Gesteins (Erhöhung der Effektivspannung durch Reduktion des Porenwasserdruckes bzw. Entsättigung (Aufbau einer Saugspannung)),
- eine zunehmende Schädigung bzw. Zerstörung des Gesteinsgefüges durch die in der Matrix wirkende Differenz zwischen Porenwasserdruck und dem auf Atmosphärenniveau abgesenkten Umgebungsdruck, welche sich in der Ausbildung von Mikrofissuren und Rissen im Gestein zeigt, sowie
- eine zunehmende Zerstörung des Gesteinsgefüges durch weitere Entsättigung mit der Folge von Schrumpfrissbildung (austrocknungsbedingt zunehmende Saugspannung in Teilbereichen mit gleichzeitiger fortschreitender Schrumpfrissbildung).

Eine nachweislich erfolgreiche Methode zur Vermeidung der vorstehend skizzierten Alterungseffekte ist die Zwischenlagerung der Bohrkernkerne unmittelbar nach ihrer Entnahme aus dem Gebirgsverband in speziellen Probenlagerungsbehältern (Druckzellen).

Die vom LfD&G entwickelte und zwischenzeitlich mehrfach eingesetzte Probenlagerungstechnik mit Druckbehältern gewährleistet einerseits den Schutz der Prüfkörper gegen Austrocknung bzw. Wasser-/Feuchtigkeitszutritt und ermöglicht andererseits die Vorgabe und Konstanthaltung eines dem Gebirgsspannungszustand bzw. mindestens dem Porenwasserdruck der Entnahmelokation entsprechenden isostatischen Spannungszustandes.

Auf der Grundlage bisher durchgeführter Untersuchungen an Tongesteinen der Lokation Mont Terri kann bzgl. der Auswirkungen der Druckbehälterzwischenlagerung gegenüber einer konventionellen Zwischenlagerung in Form folienverschweißter Bohrkernkerne in Holzkisten unter atmosphärischem Druckbedingungen folgender Sachverhalt festgehalten werden:

- Bei konventioneller Zwischenlagerung wird mit zunehmender Zwischenlagerungsdauer entweder ein so genanntes Disking beobachtet, d.h. die zunächst bei der Einlagerung kompakten Bohrkernstücke zerfallen mit zunehmender Lagerungszeit entlang des genetisch angelegten Schichtungsgefüges in einzelne Gesteinsscheiben von wenigen Zentimetern Länge (*bedding* senkrecht zur Bohrkernachse), oder es zeigt sich eine makrosko-

pisch sichtbare Gefügeschädigung des Bohrkernmaterials durch die Ausbildung achspareller Risse (*bedding* parallel zur Bohrkernachse). Analoge Zerfallsprozesse konnten bei den in Druckbehältern zwischengelagerten Bohrkernen/Bohrkernstücken bisher nicht beobachtet werden. → Die Druckbehälter bewirken zumindest visuell den Erhalt der Gesteinsqualität.

Um zusätzlich zu den bislang vorgestellten Beobachtungen zum visuellen Erhalt der Gesteinsqualität bei den in Druckbehältern zwischengelagerten Prüfkörpern auch Aussagen zum mechanischen Erhalt der Gesteinsqualität zu erhalten, sind in Bild 2.2 die im Rahmen dieser Untersuchungsreihe im Bruchzustand erhaltenen Deviatorspannungen in Abhängigkeit von der Zwischenlagerungsdauer der einzelnen Prüfkörper dargestellt. Es ergeben sich hier für Prüfkörper, die erst 25 Wochen nach der Bohrkernentnahme aus dem Gebirgsverband untersucht worden sind, die gleichen Zahlenwerte für die deviatorischen Bruchspannungen und die gleichen geringen Streubreiten wie für die Prüfkörper mit einer deutlich geringeren Zwischenlagerungsdauer von etwa 6-7 Wochen. Dieser Befund steht in deutlichem Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungsergebnissen aus der internationalen Literatur. Hier zeigt sich eindrucksvoll die eigenschaftskonservierende Wirkung der konstruierten Druckbehälter, Bild 2.3.

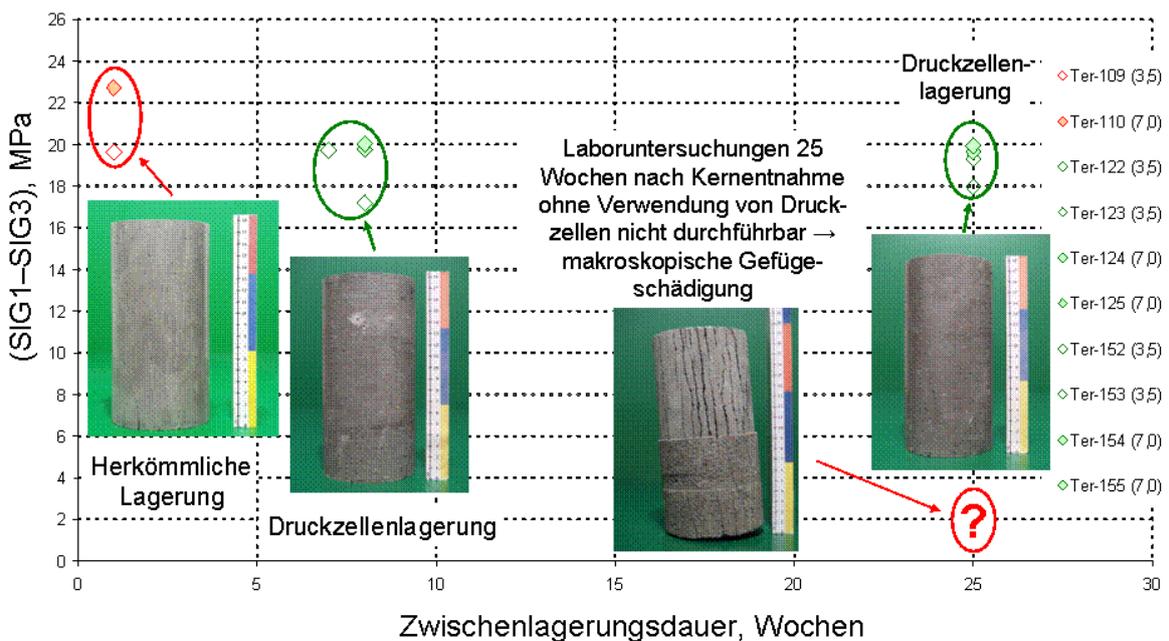


Bild 2.2: Deviatorspannungen im Bruchzustand in Abhängigkeit von der Zwischenlagerungsdauer der einzelnen Prüfkörper



Bild 2.3: Fotografische Ansicht des Zwischenlagerungsbehälters und seiner Wirkungsweise (Tongesteinsbohrkern mit/ohne Zwischenlagerung im Druckbehälter)

Abschließend zeigt Bild 2.4 eine Gegenüberstellung der im Rahmen der laborativen Untersuchungen an schichtungparallel erbohrtem Bohrkernmaterial der Lokation Mont Terri erhaltenen Versuchsdaten zur Bruchfestigkeit in einem $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} / \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ -Diagramm (entsprechend p-q-Diagramm nach Schmidt, 2001).

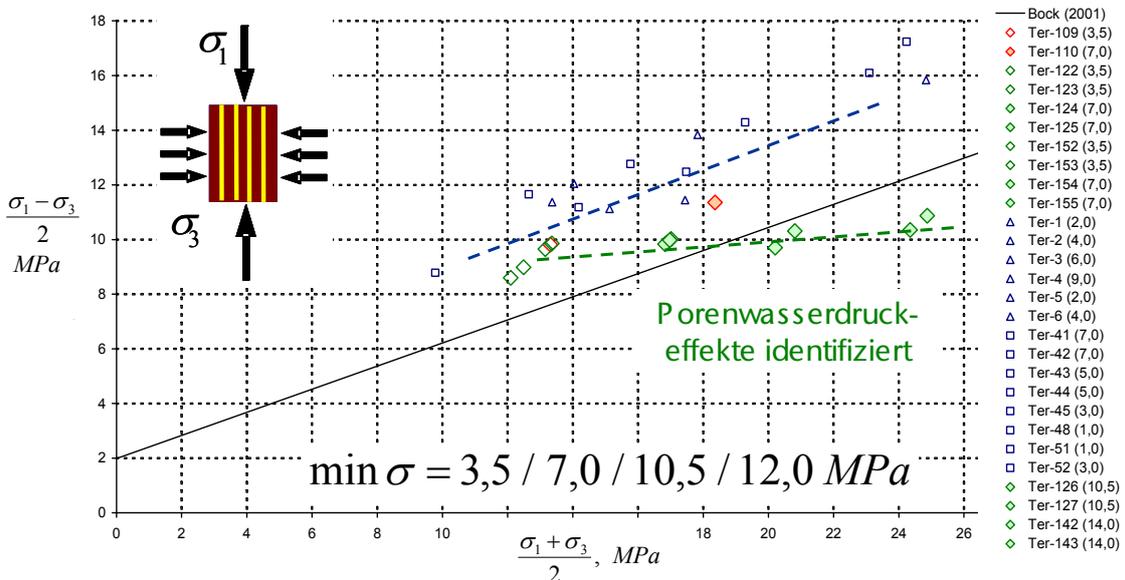


Bild 2.4: Gegenüberstellung der im Rahmen von laborativen Untersuchungen an schichtungparallel erbohrtem Bohrkernmaterial der Lokation Mont Terri erhaltenen Befunde zur Bruchfestigkeit bei triaxialer Beanspruchung



Grundsätzlich und wohl erstmalig wird das Vorhandensein eines mit der Minimalspannung zunehmenden Porenwasserdruckes detektiert. Die Detektion dieses Mechanismus ist offensichtlich auf den über die Zeit der Zwischenlagerung erfolgten weitgehenden Erhalt der in situ vorhandenen hydraulischen Eigenschaften der Gesteinsformation (Porenwasser(über)druck, Wassergehalt) im Bohrkernmaterial bedingt durch die Druckbehälterzwischenlagerung zurückzuführen. Im Rahmen des Vorhabens 02E10427 wurde eine Prüfanlage um eine Vorrichtung zur Online-Messung des Porenwasserdruckes erweitert, wobei eine Erprobung an Tonsteinmaterial der Lokation Tournemire aufgrund der – wie sich im weiteren Verlauf des Vorhabens herausstellte – sehr langen erforderlichen Zeiträume für die Prüfkörperaufsättigung (relativ geringe Porosität, Permeabilität und Porenwasserdrücke des Materials) nicht erfolgen konnte.

Weiterhin wird deutlich, dass aufgrund der vorstehend vorgestellten laborativen Untersuchungsbefunde eine Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei Verwendung der Druckbehälterzwischenlagerung zu beobachten ist und eine Konservierung der Materialeigenschaften erfolgt.

Zusammenfassend ist somit aus geomechanischer Sicht festzustellen:

- Das für Salinargestein vorhandene Modellierungs-/Simulationsinstrumentarium ist als Grundausrüstung auf Tongestein übertragbar. → Bei phänomenologischer Betrachtung sind grundsätzliche Ähnlichkeiten vorhanden, wenngleich die mikromechanischen Mechanismen ausgesprochen verschiedenartig (und in ihren Wirkungen auch zu berücksichtigen) sind.
- Salzgesteine weisen im Vergleich zu anderen Materialien des Ingenieurbaus geomechanisch bereits ein komplexes Materialverhalten auf, Tongesteine erscheinen durch den Einfluss der Schichtung auf das Tragverhalten und die zusätzlichen Wechselwirkungen zwischen Gesteinsmatrix und Porenwasser signifikant komplexer.
- Bei Tongesteinen sind Gefügeeigenschaften in der physikalischen Modellierung explizit zu berücksichtigen (Schichtungsgefüge, Schieferungsgefüge, Trennflächengefüge).
- Porenwasser/Porenwasserdruck sind explizit in Raum und Zeit zu berücksichtigen (Veränderung von Materialeigenschaften, mechanische Wirkung → *Biot*-, *Skempton*-, *Bishop*-Koeffizient).



- Während bei einem Endlager im Salinargebirge eine THM-C-Kopplung eher nur für die nicht grundsätzlich ausschließbaren Entwicklungen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit im Rahmen von Szenarienanalysen erforderlich wird, erfordert bei einem Endlager im Tongestein bereits die Analyse/Prognose der Normalentwicklung eine THM(C)-Kopplung.
- Während für das Salinargebirge im Grundsatz von einem isotropen Primärspannungszustand ausgegangen werden kann, ist im Tonsteingebirge grundsätzlich ein anisotroper Primärspannungszustand anzunehmen und entsprechend messtechnisch mit der erforderlichen Zuverlässigkeit zu quantifizieren (Richtung, zahlenmäßige Größe der Primärspannungskomponenten).
- Die Standortcharakterisierung, die Identifizierung von Standortunterschieden und die Prognose der Standortentwicklung erscheinen bei dem Geosystem Tonsteingebirge komplexer als bei dem Geosystem Salinargebirge. Damit nehmen auch die Prognoseunsicherheiten tendenziell zu.
- Die durchgeführte Stoffmodellvalidierung zeigt, dass für eine hinreichend zuverlässige Validierung von physikalischen Modellen die Gegenüberstellung von Messbefunden und Ergebnissen aus numerischen Simulationen unerlässlich ist und im Rahmen einer *on site confirmation* die Verwendung von dreidimensionalen Berechnungsmodellen grundsätzlich erforderlich ist (Berücksichtigung von nicht messbaren ortsbrustvorlaufenden Gebirgsdeformationen, Berücksichtigung eines anisotropen Primärspannungszustandes).
- Aus dreidimensionalen Simulationen ist zu ersehen, dass die explizite Berücksichtigung von Schichtflächen mit reduzierter Festigkeit einen nicht unerheblichen Einfluss auf das räumliche (!) Gebirgstragverhalten hat und somit nicht im Rahmen einer nur zweidimensionalen Simulation repräsentativ erfasst werden kann (Schichtflächenorientierung im Raum, ortsbrustvorlaufende Spannungsumlagerungen).
- Im Gegensatz zu salinaren Geosystemen kann bei Tonsteinformationen nicht von vornherein ein mechanisch wirksames Trennflächengefüge ausgeschlossen werden. Anzeichen deuten darauf hin, dass latente Trennflächensysteme a priori vorhanden sein können, die dann durch den technischen Eingriff in das Gebirge mechanisch und hydraulisch aktiviert werden.



- Tongesteine werden in ihrem Materialverhalten nachhaltig durch ausgeprägte hydromechanisch gekoppelte Prozesse beeinflusst. Neben den bereits beschriebenen Entsättigungs- bzw. Austrocknungseffekten mit einer zunächst eintretenden Verfestigung (Ausbildung von Saugspannungen / Zunahme der Scherfestigkeit durch Porenwasserdruckabbau) und einer daran anschließenden Entfestigung bei weiter fortschreitender Austrocknung (Schrumpfrissbildung, vorzugsweise entlang des Schichtungsgefüges) sind darüber hinaus auch Aufsättigungseffekte wie Gesteinsaufweichungen bis hin zum vollständigen Festigkeitsverlust („*softening*“) und der Aufbau von Quelldrücken („*swelling pressure*“) zu beachten. Zur Entfestigung von Tongestein führende Aufsättigungseffekte sind in ihren bisweilen dramatischen Auswirkungen im Rahmen von vom LfD&G durchgeführten in situ-Arbeiten sowohl in Observationsbohrlöchern am Forschungsstandort URL Tournemire wie auch in Observationsbohrlöchern am Forschungsstandort URL Mont Terri identifiziert worden (BMW-Projekt 02E10427, UFOPLAN-Vorhaben 3607R02596). Erste orientierende laborative Untersuchungen zu den Themenbereichen *softening* und *swelling pressure* sind am LfD&G im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens 3607R02596 durchgeführt worden. Die durchgeführten laborativen Arbeiten haben zu dem Ergebnis geführt, dass eine vertiefende Auseinandersetzung mit den Themen *softening* und *swelling pressure* zur Erlangung eines umfassenden und hinreichend realitätsnahen Verständnisses des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens von Tongesteinen unbedingt erforderlich ist.

Schließlich ist festzustellen, dass neben den laborativen Arbeiten mit einer dem sensitiven Material Tongestein angepassten Zwischenlagerung des für gesteinsmechanische Untersuchungen vorgesehenen Bohrkernmaterials sowie der physikalischen Modellierung und der numerischen Simulation (3D, Kopplung THM) die Validation des eingesetzten Prognoseinstrumentariums von zentraler Bedeutung ist. Dabei sind insbesondere mechanisch-hydraulisch gekoppelte Prozesse zu analysieren. Für diese Analysen sind unter dem Blickwinkel der bautechnischen Machbarkeit eher die nachteiligen Wirkungen der hydraulischen Prozesse auf die mechanischen Prozesse relevant, während unter dem Blickwinkel der Langzeitsicherheit eher die hydraulischen Prozesse im Vordergrund stehen und damit die Wirkungen der mechanischen Prozesse auf die hydraulischen Prozesse von Bedeutung sind.

Zur Validierung stehen international z.B. aus der Schweiz (Mont Terri) oder aus Frankreich (Tournemire) Feldmessdaten und damit an verschiedenen Standorten in unterschiedlichen

Tongesteinen aus diversen Messprogrammen und Feldexperimenten erhaltene in situ-Befunde zur Verfügung, die in weiterführenden Arbeiten entsprechend genutzt werden sollten.

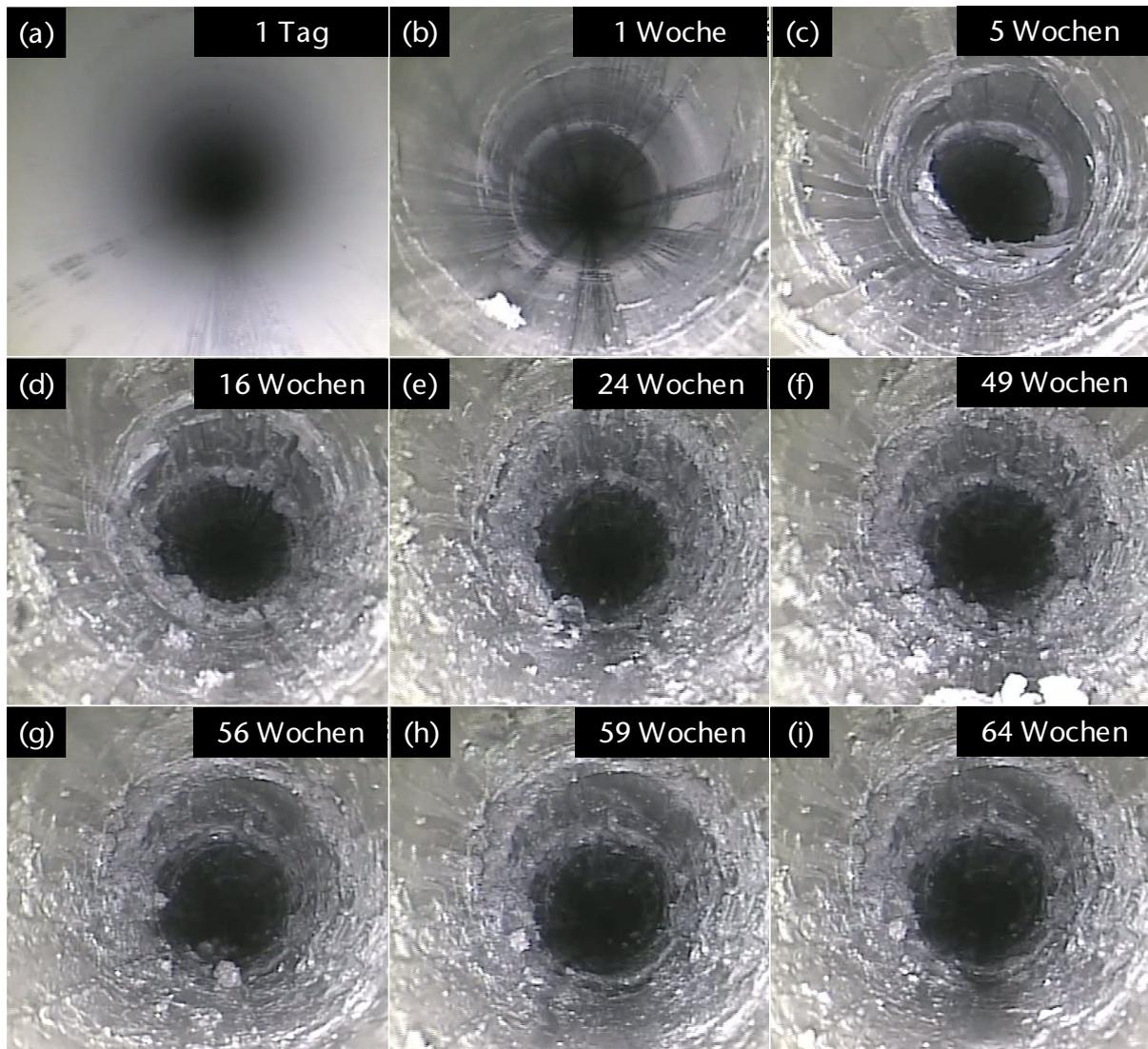


Bild 2.5: Zeitliche Entwicklung der Festigkeit der Bohrlochwand eines nahezu orthogonal zur Schichtung abgeteufte Bohrlochs der Lokation Mont Terri, Lux et al. (2012)

Abschließend ist hier auf die in *Lux et al. (2012)* und *Lux & Seeska (2010)* dokumentierten durchgeführten umfangreichen in situ-Arbeiten des LfD&G hinzuweisen. Im Rahmen dieser Arbeiten sind in insgesamt 41 Bohrlöchern an den Forschungsstandorten URL Tournemire und URL Mont Terri wiederholt Videobefahrungen durchgeführt worden. Beispielsweise dokumentiert die Serie von Aufnahmen der Axialbohrlochkamera in Bild 2.5 die zeitabhängige Entfestigung der Bohrlochwand infolge von Aufweichungen durch Wiederaufsättigungseffekte und vermittelt damit sowohl einen Eindruck von der Wichtigkeit der Berücksichtigung geohydraulischer Prozesse für die Bewertung der Hohlraumtragfähigkeit wie auch einen Ein-



druck von der Aussagekraft der mit dem vorliegenden in situ-Observationsinstrumentarium generierten Ergebnisse.

Neben der Videoobservation sind in 13 Bohrlöchern diskontinuierlich über Zeiträume von bis zu drei Jahren Kalibermessungen vorgenommen worden. Abgerundet wurde das in situ-Observationsprogramm durch Luftfeuchtmessungen in einigen ausgewählten Bohrlöchern. Die im Rahmen der vorangegangenen in situ-Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sind in die Planung und Durchführung der im Rahmen dieses Vorhabens vorgenommenen in situ-Untersuchungen mit eingeflossen. Die in Abschnitt 3.1 und Abschnitt 3.2 des vorliegenden Berichts dokumentierten aktuellen Observationsergebnisse aus den Untertagelaboren Mont Terri und Tournemire ergänzen die im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* und *Lux et al. (2012)* beschriebenen Observationsergebnisse. Sie haben im Rahmen der Ergebnisanalyse die Identifizierung von zum Teil systematischen Befunden zum Bohrlochtragverhalten auf Basis der Observation von nun insgesamt 45 Bohrlöchern über einen Zeitraum von bis zu sechseinhalb Jahren in zwei internationalen Untertagelaboren ermöglicht. Wesentlich beigetragen zu diesem Erkenntniszuwachs hat auch die Abteufung und Untersuchung von neuen Bohrlöchern neben bereits vorhandenen älteren Bohrlöchern.

2.2 Physikalische Modellierung und numerische Simulation

2.2.1 Überblick über den internationalen Wissensstand

In den vergangenen Jahrzehnten wurde auf internationaler Ebene von verschiedenen Arbeitsgruppen ein breites experimentelles und theoretisches Know-how zum geomechanischen und geohydraulischen Verhalten von Tongesteinen erarbeitet und auf Endlagerkomponenten, z.B. bei ingenieurtechnischen Studien oder bei der *back-analysis* von Feldversuchen angewendet. In diesem Rahmen sind im Lauf der Zeit auch Stoffmodelle zur physikalischen Modellierung des Verhaltens von Tongesteinen entwickelt worden, die auf unterschiedlichen physikalischen und mathematischen Ansätzen und unterschiedlichen experimentellen Daten beruhen. Dabei wird in den gängigen Stoffmodellen für Tongesteine kaum das Schädigungs-/Dilatanzverhalten modelliert. Allerdings sind die Stoffmodelle erst mit Ansätzen zur Modellierung dieser Prozesse in der Lage, die Auflockerungszone direkt (ohne zusätzliche Kriterien) zu ermitteln und in ihrer Intensität hinsichtlich Gesteinsentfestigung und sekundärem Porenraum zu qualifizieren sowie ihre zeitliche Ausdehnung (Vergrößerung und Verkleinerung je nach Spannungszustand) zu beschreiben. Das Stoffmodell *Hou/Lux-T* gehört zu diesem Typ von Stoff-

modellen, *Hou (2002)* und *Hou & Lux (2004)*. Dieses Stoffmodell ist in das FEM-Programm MISES3 und in das FDM-Programm FLAC^{3D} implementiert worden, *Hou (2002)* und *Lux et al. (2006)*.

Nach Recherchen in der internationalen Literatur und auf der Grundlage eigener Arbeiten im Rahmen des BMWi-Vorhabens 02E9632 kann der Stand von Wissenschaft und Technik auf dem oben genannten Gebiet wie folgt charakterisiert werden:

- Es gibt kaum Untersuchungen zum hydraulisch-mechanischen Verhalten von Auflockerungszonen in Tongesteinsformationen mit Berücksichtigung des teilgesättigten Zustandes. Bei Tonen (Lockergesteinen) wird die Auflockerungszone meistens mit den plastischen Modellen *Mohr* oder *Cam-Clay* ermittelt.
- Die bisherigen THM(C)-Untersuchungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf das Einlagerungsnahfeld mit Bentonit oder Bentonit-Mischungen als Abdichtung (H-Prozesse) und Puffer (C-Prozesse), weniger auf das umgebende Tonsteingebirge. Die Unterschiede im mechanisch/hydraulischen Verhalten zwischen Tongestein und Bentonit werden nicht betont bzw. vernachlässigt.
- Die in diesem Fachgebiet aktiv beteiligten Forscher kommen hauptsächlich aus vier unterschiedlichen Fachdisziplinen: Bodenmechanik, Lagerstättentechnik, Hydrogeologie, Felsmechanik. Daher sind entsprechend unterschiedliche Akzente bei der theoretischen Entwicklung zu beobachten.
- Zur Beschreibung der Spannungszustände im ungesättigten Tongestein gibt es bislang zwei voneinander getrennte Konzepte, und zwar das Konzept der effektiven Spannung nach *Bishop* mit der Einführung effektiver Spannungen und das Konzept der zwei unabhängigen Spannungsvariablen (z.B. Nettospannung bezogen auf Porengasdruck und Saugspannung):

(a) Konzept der effektiven Spannung σ' nach *Bishop*:

$$\sigma' = \sigma - I(\chi(S_l)p_l + (1 - \chi(S_l))p_g)$$

mit S_l = Wassersättigungsgrad, p_l = Porenwasserdruck, p_g = Porengasdruck;

Bishop'scher Koeffizient χ : $\chi = 0$ (trocken) und $\chi = 1$ (gesättigt)

(b) Konzept der zwei unabhängigen Spannungsvariablen wie z.B. Saugspannung s mit

$$s = p_g - p_l \text{ und Nettospannung bezogen auf den Porengasdruck mit } \sigma - p_g$$



- Theoretisch gesehen ist das Konzept mit zwei unabhängigen Spannungsvariablen als etwas besser zu bewerten als das Effektivspannungskonzept; es setzt jedoch voraus, dass der *Biot*'sche Koeffizient den Wert $\alpha \equiv 1$ annimmt. Ursprünglich ist das Konzept mit zwei unabhängigen Spannungsvariablen von Bodenmechanikern für Lockergesteine entwickelt worden. Ob es ohne weiteres auf Festgesteine wie Tongesteine übertragen werden kann, ist noch durch entsprechende Laboruntersuchungen zu prüfen.
- Versuchs- und Messtechnik für ungesättigtes Tongestein müssen noch weiterentwickelt werden, insbesondere zur Messung von Relativpermeabilitäten, Saugspannung, *Biot*'schen Koeffizienten usw.
- Es gibt keine kommerziellen EDV-Programme zur vollständigen numerischen Simulation des THM-Verhaltens von ungesättigtem Tongestein, weil grundlegende Fragen noch nicht beantwortet sind (Defizite im Prozessverständnis). Die bislang entwickelten bzw. eingesetzten EDV-Programme erreichen noch nicht den Status der Anwendungsreife, insbesondere aus hydraulischer Sicht nicht für ungesättigte Tongesteine. Die schwächste Stelle der physikalischen Modelle dieser und ähnlicher Programme liegt meistens aber im mechanischen Teil, weniger im hydraulischen Teil (Zweiphasenfluss, instationäre Sickerströmung) und im thermischen Teil (Wärmetransport, temperaturinduzierte Spannungen und Verformungen).

2.2.2 Bisherige Arbeiten und Erfahrungen des Vorhabensbearbeiters

Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens bestehen am LfD&G langjährige und spezielle Erfahrungen auf dem Gebiet der geomechanischen Forschung zur Endlagerung radioaktiver und zur untertägigen Deponierung chemisch-toxischer Abfälle, die in den Abschlussberichten zu diversen BMBF/BMWi/BMU-Forschungsvorhaben, mehreren Forschungsvorhaben der EU und des BfS und in mehreren Veröffentlichungen dokumentiert sind, *Lux et al. (2012)*, *Lux & Seeska (2010)*, *Lux et al. (2009)*, *Eberth (2008)*, *Lux et al. (2006)*, *Lux et al. (2005a)*, *Hou & Lux (2004)*, *Düsterloh & Lux (2003)*, *Lux et al. (2002a/b)* u.a.. In Bild 2.6 sind dabei diejenigen Forschungsvorhaben des LfD&G chronologisch aufgelistet, die sich konkret auf Tongestein als Wirtsgestein konzentrieren.

Das Stoffmodell *Hou/Lux-T* für Tongestein, basierend auf dem Stoffmodell *Lubby2* und auf den Grundlagen der Continuum-Damage-Mechanik, wurde Ende der neunziger Jahre als

Stoffmodell *Hou/Lux* zunächst für Salzgesteine entwickelt, dann um einen Verheilungsansatz erweitert und auf Tongesteine übertragen, *Hou (2002)*, sowie im Rahmen von zwei BMWi-/BMBF-Forschungsvorhaben (02E9632 für Tongesteine und 02C0720 für Salzgesteine) weiterentwickelt. Aufgrund mehrerer grundlegender Erweiterungen im Bereich der Salzgesteine ist das Stoffmodell *Hou/Lux* in das Stoffmodell *Lux/Wolters* übergegangen.

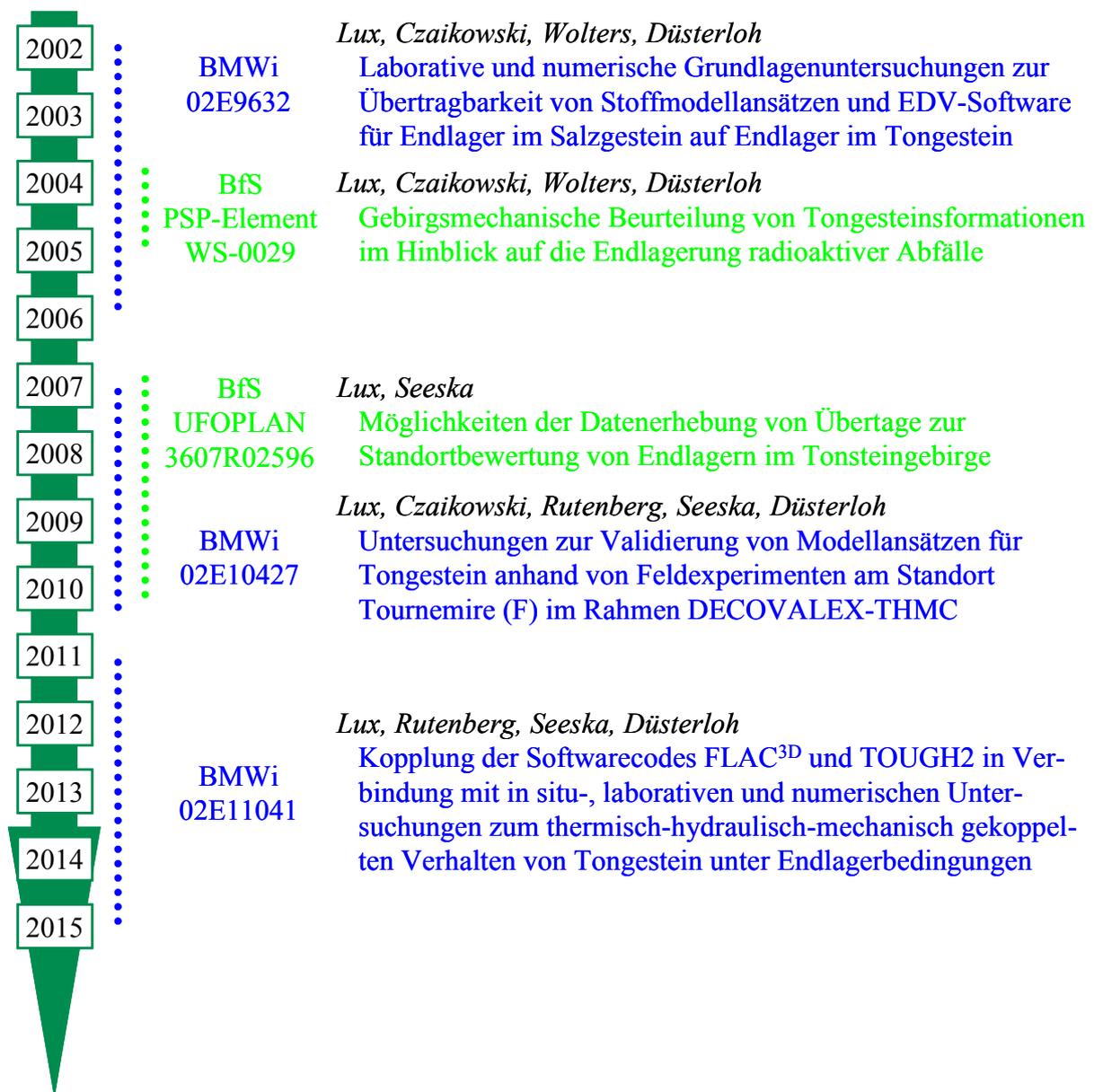


Bild 2.6: Bisherige Forschungsvorhaben des LfD&G im Bereich der Endlagerung im Tongestein



Dieses Stoffmodell ist im Grundsatz phänomenologisch-makroskopisch orientiert und erfasst die Wirkungen der verschiedenen Deformationsmechanismen vornehmlich integral. Die verschiedenen Deformationsmechanismen tragen unmittelbar zur Ausbildung der inelastischen Verzerrungsraten und damit zum jeweils aktuellen Deformationszustand und indirekt über die Tragelementsteifigkeit auch zum Beanspruchungszustand bei. Die totale Verzerrungsrate ergibt sich daher aus additiver Überlagerung elastischer, viskoplastisch-volumentreuer, schädigungsinduziert-dilatanter sowie verheilungsinduziert-kontraktanter Deformationsanteile.

Im Rahmen des BMWi-Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen 02E9632 ist der Übertragbarkeit von etablierten Stoffmodellen aus dem Salinarbereich auf Tongestein nachgegangen worden. Grundlage für den Forschungsansatz waren eine phänomenologisch ausgerichtete physikalische Modellierung relevant erscheinender Materialeigenschaften und die Einschätzung einer in beiden Fällen vom Handstück-Größenbereich ausgehenden Beschreibbarkeit der geomechanisch-geohydraulischen Eigenschaften. Unter Einbeziehung von eigenen laborativen Untersuchungen und Feldmessdaten aus untertägigen Grubenbauen (Deformationsmessungen) ist es gelungen, die für Tongesteine signifikanten Eigenschaften zu identifizieren, die Stoffparameter des Stoffmodells *Hou/Lux-T* durch Versuche für Opalinuston aus Mont Terri zu ermitteln und zumindest teilweise auch angemessen zu modellieren, *Lux et al. (2006)*.

Inzwischen sind mit diesem Stoffmodell umfangreiche numerische Berechnungen durchgeführt worden, *Lux et al. (2005b)*, *Lux & Czaikowski (2005)*, *Czaikowski & Lux (2006)*.

Begleitend konnten im Rahmen des in den Jahren 2004 bis 2005 im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz vom LfD&G durchgeführten Projektes *Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle* durch Aufarbeitung von vorhandenen Konvergenzmessdaten und eine *back analysis* für ausgewählte Messquerschnitte grundlegende Einblicke in das Tragverhalten von Grubenbauen (Einzelstrecken) im Tonsteingebirge erarbeitet werden. Im Vordergrund stand dabei ausdrücklich nicht die ingenieurtechnische Planung von Grubenbauen mit der Ermittlung der erforderlichen Ausbaumittel zur Gewährleistung der Standsicherheit. Ziel war es vielmehr, anhand verfügbarer Messdaten für ausgewählte Messquerschnitte die Prognosezuverlässigkeit von auf die geotektonischen Verhältnisse im Messortbereich spezialisierten geomechanischen Modellierungen/Simulationen zu prüfen, und zwar zunächst in deduktiver Vorgehensweise. Dabei haben



sich weitere grundlegende Erkenntnisse zur Prognosezuverlässigkeit herausgestellt, *Lux et al. (2005a)*.

Die Teilnahme des LfD&G an dem im Rahmen des 6. Rahmenprogramms der Europäischen Union von 2004–2007 durchgeführten internationalen Forschungsvorhabens „*Understanding and physical modelling of the key processes in the near-field and their coupling and repository strategies (NF-Pro)*“ hat maßgeblich zur internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen und hier speziell im Tonsteingebirge geführt. Das Forschungsprojekt ermöglichte u.a. den Austausch von Erkenntnissen zum langzeitigen Festigkeits- und Deformationsverhalten von Tongesteinsprüfkörpern aus Mont Terri.

Diese internationale Zusammenarbeit hat bereits in der Vergangenheit dazu geführt, dass Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen des LfD&G auf EU-Ebene zur Kenntnis gegeben worden sind, z.B. TOURS 2005 / *Lux et al. (2005b)*, *Lux & Czaikowski (2005)*, EUROCK06 / *Czaikowski & Lux (2006)*, LILLE 2007 / *Czaikowski & Lux (2008)*, LUXEMBURG 2009 / *Rutenberg et al. (2012)* und NANTES 2010 / *Rutenberg & Lux (2011)*.

In den Jahren 2012 und 2010 sind zwei weitere Forschungsvorhaben mit Schwerpunkt Tongestein abgeschlossen worden. Dabei handelt es sich einerseits um das Projekt 02E10427 zur Validierung des vorliegenden Simulationsinstrumentariums für Tongestein anhand von in situ-Messdaten der Lokation Tournemire (phänomenologische Beschreibung des zeitabhängigen Gesteins- und Gebirgsdeformationsverhaltens mit dem elastisch-plastisch/viskosen Stoffmodell *Hou/Lux-T*), welches sowohl numerische Simulationen wie auch laborative Untersuchungen umfasste, und andererseits um das UFOPLAN-Vorhaben 3607R02596 mit dem Schwerpunkt der Analyse der *Möglichkeiten zur Datenerhebung von Übertage zur Standortbewertung von Endlagern im Tonsteingebirge*. Im Rahmen des an zweiter Stelle genannten Projektes sind anhand einer umfangreichen Literaturrecherche, anhand von numerischen Variationsberechnungen mit einem elastischen und einem elastisch-plastischen Stoffmodell (Orientierung von Hohlräumen gegenüber dem Schichtungsgefüge und gegenüber dem Primärspannungszustand / Berücksichtigung eines Trennflächengefüges) sowie anhand der Auswertung von durch den LfD&G im URL Mont Terri generierten Bohrlochobservationsdaten aus geomechanischer Sicht (bautechnische Machbarkeit) endlagerrelevante Aspekte (Gesteinseigenschaften/Gebirgseigenschaften/hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse) im Tongestein identifiziert worden. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten zur Erkundung der identifi-



zierten relevanten Aspekte anhand der bei Verzicht auf ein Erkundungsbergwerk von Übertage aus durchzuführenden Untersuchungen analysiert worden. Resultat des Forschungsprojektes sind eine sehr gute Übersicht zu sowie ein sehr gutes grundsätzliches Verständnis von im Tongestein relevanten Prozessen. Das bestehende Verständnis der im Tongestein ablaufenden Prozesse dient in diesem Projekt einerseits als Grundlage und soll andererseits mittels der oben in diesem Abschnitt beschriebenen Systematik erweitert und vertieft werden.



3 SCHWERPUNKT „IN SITU“: Feldmessungen und Kamerabefahrungen in den Untertagelaboren Mont Terri und Tournemire

3.1 Beobachtung des Langzeittrag- und -deformationsverhaltens von Bohrlöchern im URL Mont Terri im Rahmen des DMB-Experimentes

3.1.1 Ziel des Experimentes

Im Januar 2013 sind im Untertagelabor Mont Terri (URL Mt. Terri) im Rahmen des von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) und des LfD&G unter der Leitung der GRS gemeinsam durchgeführten Experimentes *long-term deformation measurements - part B* (DMB-Experiment) vier unterschiedlich orientierte Bohrlöcher mit der Bezeichnung DMB-B1 bis DMB-B4 mit Endteufen von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis hin zu $t_{BL} \approx 30,5$ m abgeteuft worden. In diesen Bohrlöchern sind in den folgenden acht Monaten vom LfD&G Videobefahrungen, Bohrlochkalibermessungen und Luftfeuchtheitsmessungen durchgeführt worden. Des Weiteren sind im Gebirge in der Umgebung eines der Bohrlöcher von der GRS kontinuierliche Langzeitporenwasserdruckmessungen vor, während und nach dem Abteufen des Bohrlochs vorgenommen worden.

Ziel des DMB-Experimentes ist es gewesen, detaillierte Informationen über das zeitabhängige Bohrlochtrag- und Deformationsverhalten von unterschiedlich gegenüber dem Primärspannungsfeld und gegenüber dem Schichtungsgefüge orientierten Bohrlöchern im Opalinuston des URL Mt. Terri zu gewinnen und so die im Rahmen der vorangegangenen Forschungsvorhaben mit den Titeln *Möglichkeiten der Datenerhebung von Übertage zur Standortbewertung von Endlagern im Tonsteingebirge* (BfS – Lux & Seeska, 2010) und *Untersuchungen zur Validierung von Modellansätzen für Tongestein anhand von Feldexperimenten am Standort Tournemire (F) im Rahmen von DECOVALEX-THMC* (BMW i – Lux et al., 2012) erarbeitete Datenbasis zu erweitern. Darüber hinaus sollten Observations- und Messdaten zum hydraulischen Verhalten der Bohrlöcher und des Gebirges in ihrer Umgebung generiert werden.

Die im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb der Niche MI des URL Mont Terri durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten sind nicht darauf ausgerichtet gewesen, aus den Observationsergebnissen grundsätzlich gültige oder generalisierbare Erkenntnisse zum geohydraulischen oder hydraulisch-mechanischen Verhalten von Bohrlöchern innerhalb des URL Mont Terri oder gar zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Bohrlöchern im Opalinuston ableiten zu können.



Vielmehr ist im Rahmen dieses Vorhabens der Versuch unternommen worden, die in *Lux & Seeska (2010)* sowie in *Lux et al. (2012)* dokumentierten Erkenntnisse aus Bohrlochobservationsarbeiten, in deren Rahmen das Langzeittrag- und Deformationsverhalten von insgesamt sieben innerhalb des URL Mont Terri abgeteufte Bohrlöchern untersucht worden ist, von denen drei innerhalb der nachfolgend im Rahmen der Vorstellung der Observationsergebnisse aus dem DMB-Experiment näher betrachteten Niche MI liegen, durch die Observation von vier weiteren Bohrlöchern zu erweitern und abzusichern. Da drei der innerhalb der vorangegangenen Vorhaben untersuchten Observationsbohrlöcher sich innerhalb der Niche MI des URL Mont Terri befinden, ist es im Rahmen des aktuellen Vorhabens als aus wissenschaftlicher Sicht besonders sinnvoll erachtet worden, als nächsten Schritt zunächst weitere Observationsbohrlöcher in einem Gebirgsbereich, in dem bereits erste Erkenntnisse zum Bohrlochtrag- und Deformationsverhalten vorliegen, abzuteufen. Durch die Untersuchungen von nun insgesamt sieben Observationsbohrlöchern innerhalb der Niche MI in den vergangenen fünf Jahren ist es zum jetzigen Zeitpunkt erstmals möglich, reproduzierbare Muster bezüglich des Langzeittragverhaltens innerhalb von identisch orientierten Observationsbohrlöchern zu identifizieren. Die Identifizierung dieser wiederkehrenden Tragverhaltensmuster erfolgt in Abschnitt 3.1.8.

Selbstverständlich beziehen sich die im Rahmen des aktuellen Vorhabens auf der Grundlage einer phänomenologisch-makroskopischen Betrachtungsweise hinzugewonnenen Erkenntnisse zur Charakterisierung des Langzeit(trag)verhaltens der Bohrlöcher dementsprechend ausschließlich auf die Niche MI des URL Mont Terri mit der dort vorherrschenden speziellen geomechanischen Situation, die aus der unmittelbaren Nähe zu zwei Faziesübergängen einerseits und der Nähe zur *main fault* des URL Mont Terri andererseits resultiert. Die spezielle geomechanische Situation der Niche MI erschwert zwar einerseits die Generalisierung von Befunden zum Bohrlochtrag- und Deformationsverhalten, aber sie bietet andererseits die Möglichkeit, das geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte Langzeitverhalten von Observationsbohrlöchern in drei unterschiedlichen Faziestypen sowie darüber hinaus in den zwei Faziesübergängen zu untersuchen.

In den Jahren 2008 bis 2014 sind insgesamt 37 Observationsbohrlöcher vom LfD&G innerhalb des URL Mont Terri untersucht worden. Ein Vergleich der Observationsergebnisse aus den sieben innerhalb der Niche MI gelegenen Observationsbohrlöchern mit den Ergebnissen der in den 30 weiteren, an anderen Lokationen innerhalb des URL Mont Terri positionierten



Observationsbohrlöchern verdeutlicht, dass das innerhalb der Niche MI observierte zeitabhängige geomechanische und geohydraulische Bohrlochverhalten nicht als repräsentativ für das gesamte URL Mont Terri zu betrachten ist. Die Synthese der Observationsergebnisse aus allen insgesamt 37 zwischen 2008 und 2014 innerhalb des URL Mont Terri untersuchten Observationsbohrlöchern in englischer Sprache enthält *Seeska & Lux (in Vorbereitung)*. Darüber hinaus wird die Synthese der Observationsergebnisse in deutscher Sprache in näherer Zukunft in *Seeska (in Vorbereitung)* nachzulesen sein.

Des Weiteren ist bezüglich der nachfolgend vorgestellten Observationsergebnisse hervorzuheben, dass die dargestellten Aufnahmeserien der Axial-Bohrlochkamera zur Dokumentation des zeitabhängigen geomechanischen und geohydraulischen Verhaltens der Observationsbohrlöcher primär darauf ausgerichtet sind, dem Betrachter aus geomechanisch-geohydraulischer Sicht besonders interessante Bohrlochteufenbereiche aufzuzeigen, während auf die explizite Darstellung von Bohrlochteufenbereichen mit nur geringer innerhalb des Observationszeitraums observierbarer hydraulischer und/oder mechanischer Aktivität mit Rücksicht auf den Berichtsumfang verzichtet worden ist, sodass die alleinige Betrachtung der Aufnahmeserien der Axial-Bohrlochkamera einen Eindruck von größerer geomechanischer und geohydraulischer Aktivität innerhalb der Observationsbohrlöcher erwecken kann als sie tatsächlich innerhalb der Observationsbohrlöcher über ihren gesamten Bohrlochteufenbereich hinweg zu beobachten gewesen ist. Der Versuch einer möglichst objektiven Bewertung des geomechanischen sowie des geohydraulischen Verhaltens aller vom LfD&G innerhalb des URL Mont Terri untersuchten Observationsbohrlöcher ist außerhalb dieses Vorhabens im Rahmen der Erstellung der Synthese der Observationsergebnisse unternommen worden. Die Bewertung des zeitabhängigen geomechanischen und des zeitabhängigen geohydraulischen Verhaltens der Observationsbohrlöcher ist somit ebenfalls *Seeska & Lux (in Vorbereitung)* sowie in näherer Zukunft *Seeska (in Vorbereitung)* zu entnehmen.

In den nachfolgenden Ausführungen werden die betrachteten Bohrlochteufenbereiche teilweise vereinfachend als Teufenbereiche bezeichnet. Die angegebenen Teufenabschnittskordinaten beziehen sich stets auf die Position des vorgestellten Teufenbereichs innerhalb des jeweils betrachteten Observationsbohrlochs.

3.1.2 Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher

Die vier im Rahmen des DMB-Experimentes abgeteufte und untersuchten Bohrlöcher befinden sich in der Nische MI des URL Mt. Terri. Die Positionierung der Nische MI im URL Mt. Terri sowie die Positionierung der untersuchten Bohrlöcher innerhalb der Nische MI können Bild 3.1 entnommen werden.

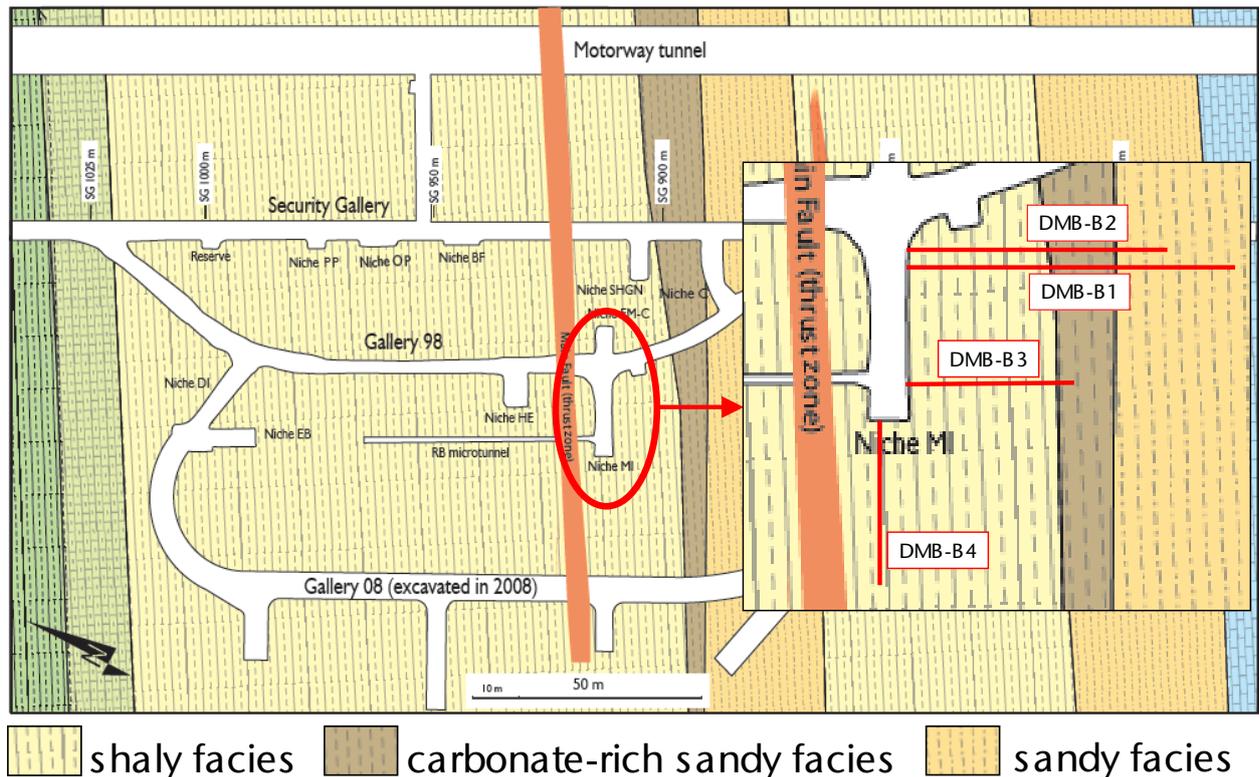


Bild 3.1: Übersichtsplan des URL Mt. Terri und der Nische MI mit der Positionierung der Bohrlöcher DMB 1, DMB 2, DMB 3 und DMB 4 innerhalb der Nische MI, modifiziert nach Bossart & Thury (2008)

Die vier nachfolgend beschriebenen Bohrlöcher sind über ihre gesamte Länge mit einem dünnwandigen Einfachkernrohr mit einem Außendurchmesser der Bohrkronen von $d_{BK} = 101$ mm hergestellt worden. Als Bohrspülung ist in allen vier Bohrlöchern ausschließlich Luft zum Einsatz gekommen.

Das vom 17.01.2013 bis zum 21.01.2013 abgeteufte Bohrloch DMB-B1 (Deformation Measurement B – Borehole 1) ist mit einer näherungsweise horizontalen Neigung seiner Längsachse in den südlichen Stoß der Nische MI abgeteufte worden. Der Azimut des Bohrlochs beträgt $\beta \approx 150^\circ$. Die Längsachse des Bohrlochs DMB-B1 verläuft somit annähernd orthogonal zum Streichen der im Bereich der Nische MI unter $\alpha \approx 45^\circ$ aus Richtung Norden einfallenden



Schichtflächen. Das insgesamt 30,5 m lange Bohrloch DMB-B1 durchteuft in den ersten 12,8 m die als „shaly facies“ bezeichnete Schiefertonzfazies mit dem höchsten Anteil an Tonmineralen im URL Mt. Terri, die nachfolgend in diesem Bericht vereinfachend als *tonige Fazies* bezeichnet wird. Bei einer Teufe von $t_{BL} \approx 12,8$ m erreicht das Bohrloch eine als „carbonate-rich sandy facies“ bezeichnete Opalinustonfazies, welche im Vergleich zur „shaly facies“ einen höheren Anteil an Karbonaten und Quarzen besitzt. Die „carbonate-rich sandy facies“ wird nachfolgend in diesem Bericht vereinfachend als *karbonatreiche Fazies* bezeichnet. Ab einer Teufe von $t_{BL} \approx 17,2$ m verläuft das Bohrloch DMB-B1 innerhalb der im vorliegenden Bericht als *sandige Fazies* bezeichneten „sandy facies“ des URL Mont Terri. Die anstehenden faziellen Ausbildungen des Opalinustons können ebenfalls Bild 3.1 entnommen werden.

Das vom 28.01 bis zum 30.01.2013 abgeteufte zweite Bohrloch DMB-B2 verläuft mit einer Neigung seiner Längsachse von $\delta \approx 40^\circ$ nach oben in den südlichen Stoß der Niche MI. Der Azimut des Bohrlochs beträgt $\beta \approx 150^\circ$. Die Längsachse des 27,5 m langen Bohrlochs DMB-B2 verläuft somit annähernd orthogonal zu den im Bereich der Niche MI unter $\alpha \approx 45^\circ$ aus Richtung Norden einfallenden Schichtflächen. Das Bohrloch DMB-B2 durchteuft zunächst die tonige Fazies und erreicht bei einer Teufe von $t_{BL} \approx 7,5$ m die karbonatreiche Fazies des Opalinustons, bevor es schließlich ab einer Teufe von $t_{BL} \approx 12,0$ m bis hin zu seiner Endteufe von $t_{BL} \approx 27,5$ m innerhalb der sandigen Fazies verläuft.

Die Längsachse des am 14. und 15.01.2013 abgeteuften dritten Bohrlochs DMB-B3 verläuft parallel zur Längsachse des Bohrlochs DMB-B2 und somit ebenfalls annähernd orthogonal zum Einfallen der Schichtflächen. Der Bohrlochmund des Bohrlochs DMB-B3 befindet sich um etwa 15 m in westlicher Richtung versetzt gegenüber dem Bohrlochmund des Bohrlochs DMB-B2 im südlichen Stoß der Niche MI. Das insgesamt ca. 12,5 m lange Bohrloch DMB-B3 verläuft bis zu einer Teufe von $t_{BL} \approx 8,3$ m innerhalb der tonigen Fazies. Die nachfolgenden gut 4 m des Bohrlochs DMB-B2 durchteufen bis zum Erreichen des Bohrlochtieftens die karbonatreiche Fazies.

Der Mund des Bohrlochs DMB-B4 befindet sich in der Ortsbrust der Niche MI. Die Längsachse des am 22. und 23.01.2013 abgeteuften Bohrlochs DMB-B4 verläuft annähernd horizontal mit einem Azimut von $\beta \approx 240^\circ$. Die Längsachse des $t_{BL} \approx 15,2$ m langen Bohrlochs liegt somit annähernd parallel zum Streichen der Schichtflächen. Das Bohrloch DMB-B4 verläuft über seine gesamte Länge innerhalb der tonigen Fazies.

3.1.3 Videoobservationen, Kalibermessungen und Luftfeuchtigkeitsmessungen im Rahmen des DMB-Experimentes in den Bohrlöchern DMB-B1 bis DMB-B4

Im Rahmen des vorliegenden Abschnitts 3.1 soll ausschließlich auf die in den Bohrlöchern DMB-B1, DMB-B2, DMB-B3 und DMB-B4 durchgeführten Videoobservationen sowie auf die in den Bohrlöchern DMB-B1, DMB-B2 und DMB-B3 vorgenommenen Kalibermessungen und auf die in dem Bohrloch DMB-B3 erfolgten Luftfeuchtigkeitsmessungen eingegangen werden. Bei den vorangehend aufgelisteten in situ-Arbeiten handelt es sich um die Tätigkeiten, die im Rahmen des DMB-Experimentes vom LfD&G erbracht worden sind. Die von der GRS durchgeführten Porenwasserdruckmessungen in der Umgebung des Bohrlochs DMB-B1 sind nicht Gegenstand dieses Abschnitts 3.1.

In den acht Monaten nach dem Abteufen der vier DMB-Bohrlöcher sind in den Bohrlöchern bis zu zehn Videobefahrungen und bis zu zehn Kalibermessungen durchgeführt worden. Zur Videoobservation der Bohrlöcher ist die in Bild 3.2(a) dargestellte Axial-Bohrlochkamera des LfD&G verwendet worden. Die im Rahmen der Kalibermessungen zum Einsatz gekommene Dreiarmkalibersonde ist in Bild 3.2(b) zu betrachten.

Eine Übersicht über das innerhalb der vier DMB-Bohrlöcher durchgeführte Observationsprogramm kann Tabelle 3.1 entnommen werden.

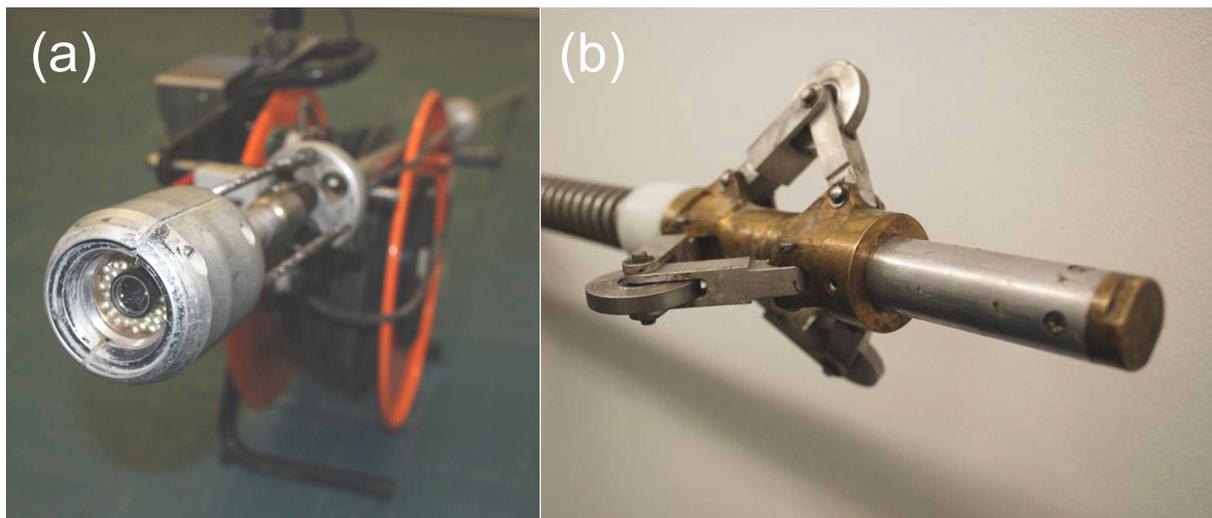


Bild 3.2: (a) Axial-Bohrlochkamera des LfD&G und (b) Dreiarmkalibersonde des LfD&G



Observationstermin	DMB-B1	DMB-B2	DMB-B3	DMB-B4
16.01.2013	-/-	-/-	V/K/(L)	-/-
22.01.2013	V/K	-/-	V/K/(L)	-/-
24.01.2013	V/K	-/-	V/K/(L)	V/X
29.01.2013	V/K	-/-	V/K/(L)	V/X
31.01.2013	V/K	V/K	V/K/(L)	V/X
12.02.2013	V/K	V/K	V/K/(L)	V/X
26&27.02.2013	V/K	V/X	V/K/(L)	V/X
12.03.2013	V/K	V/X	V/K	V/X
16.05.2013	V/K	V/X	V/K	V/X
26.08.2013	V/X	V/X	V/K	V/X

Tabelle 3.1: Überblick über die Observationstermine und das zu den einzelnen Terminen durchgeführte Observationsprogramm (-/- = Bohrloch noch nicht abgeteuft; V = Videoobservation; K = Kalibermessung; (L) = Luftfeuchtheitsmessung (Die Luftfeuchtheitsmessung wurde kontinuierlich auch zwischen den angegebenen Observationsterminen mit einer fest im Bohrloch installierten Apparatur durchgeführt); X = Kalibermessung aufgrund des Bohrlochzustands nicht möglich)

Die Differenz zwischen der Anzahl von Befahrungen der Bohrlöcher DMB-B1 und DMB-B2 mit der Dreiarmkalibersonde und der Anzahl von Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera resultiert daraus, dass die Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde in den beiden Observationsbohrlöchern nur so lange durchgeführt werden konnten, bis die Abnahme der Standfestigkeit des Gebirges an der Bohrlochwand durch Entfestigungsprozesse sowie eine starke Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts des Gesteins in einigen Teufenbereichen und die in diesen Teufenbereichen damit einhergehende starke Plastifizierung des Tongesteins weitere Befahrungen mit sensibler und / oder feuchtigkeitsanfälliger Messapparatur unmöglich gemacht haben, während eine Befahrung mit der robusten und wasserdichten Axial-Bohrlochkamera weiterhin möglich gewesen ist.

Aufgrund einer sehr starken und nahezu instantan auftretenden Abnahme der Standfestigkeit der Bohrlochwand konnte in dem Bohrloch DMB-B4 bereits am Tag nach seinem Abteufen keine Befahrung mit der Dreiarmkalibersonde mehr durchgeführt werden. Mit der gegenüber

der Dreiarmkalibersonde weitaus robusteren Axial-Bohrlochkamera sind dagegen über den gesamten Observationszeitraum hinweg Befahrungen des noch standfesten vorderen Bohrlochteufenbereiches durchgeführt worden, so dass die zeitabhängige Ausbreitung des Verbruchs der Bohrlochwand vom Bohrlochtiefsten ausgehend in Richtung des Bohrlochmundes anhand einer Serie von insgesamt acht Videobefahrungen dokumentiert werden konnte.

Einzig das Bohrloch DMB-B3 hat sich vom Zeitpunkt seines Abteufens an bis hin zum Ende des achtmonatigen Observationszeitraums als hinreichend trocken und hinreichend standfest erwiesen, so dass an insgesamt zehn Observationsterminen sowohl Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera wie auch mit der Dreiarmkalibersonde vorgenommen werden konnten.

Die Befahrungen in den vier Bohrlöchern sind mit der Zielsetzung erfolgt, die in den vorangegangenen Vorhaben mit den Titeln *Möglichkeiten der Datenerhebung von Übertage zur Standortbewertung von Endlagern im Tonsteingebirge* (BfS – Lux & Seeska, 2010) sowie *Untersuchungen zur Validierung von Modellansätzen für Tongestein anhand von Feldexperimenten am Standort Tournemire (F) im Rahmen von DECOVALEX-THMC* (BMW i – Lux et al., 2012) erstellte Datenbasis zum mittel- und langfristigen Deformations- und Tragverhalten von Bohrlöchern in unterschiedlichen Orientierungen gegenüber dem Schichtungsgefüge sowie gegenüber dem Primärspannungszustand weiter auszubauen und um systematische Befunde zum Gebirgstragverhalten in den verschiedenen Tongesteinsfaziestypen zu erarbeiten.



Bild 3.3: Ingenieur und zwei Techniker des LfD&G beim Einbringen der Axial-Bohrlochkamera in das Observationsbohrloch DMB-B3

In den nachstehenden vier Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Kalibermessungen und Videobefahrungen für die Bohrlöcher DMB-B1 bis DMB-B3 sowie die Ergebnisse der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B4 und die Ergebnisse der Luftfeuchtigkeitsmessung für das Bohrloch DMB-B3 vorgestellt.

Bild 3.3 zeigt das Team des LfD&G beim Einbringen der Axial-Bohrlochkamera in das Observationsbohrloch DMB-B3 im Vorfeld der Erstbefahrung am 16.01.2013.

3.1.4 Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen und der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B1

(a) Ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B1

(a 1) Übersicht

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen des horizontal in den Stoß der Niche MI abgeteufte und näherungsweise senkrecht zum Streichen der unter $\alpha \approx 45^\circ$ einfallenden Schichtung verlaufenden Bohrlochs DMB-B1 vorgestellt und erläutert. In Bild 3.4, Bild 3.10, Bild 3.13 und Bild 3.15 ist jeweils die zeitliche Entwicklung von einem von insgesamt vier unterschiedlichen und hier näher betrachteten Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B1 anhand einer aus jeweils neun zu unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgenommenen Bildern bestehenden Bildfolge dokumentiert.

Dabei handelt es sich um vier im Lauf der Zeit in sehr unterschiedlich starkem Maß von Bohrlochkonturveränderungen betroffene Teufenbereiche. Der erste der nachfolgend diskutierten Teufenbereiche befindet sich innerhalb der tonigen Fazies, der zweite Teufenbereich liegt im Übergangsbereich von der tonigen in die karbonatreiche Fazies, während der dritte Teufenbereich im Übergangsbereich von der karbonatreichen in die sandige Fazies lokalisiert ist und der vierte der diskutierten Teufenbereiche sich innerhalb der sandigen Fazies befindet.

(a 2) Bohrlochbereich 1 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m / tonige Fazies

Bild 3.4 zeigt zunächst die zeitabhängige Entwicklung des Bohrlochs DMB-B1 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m.

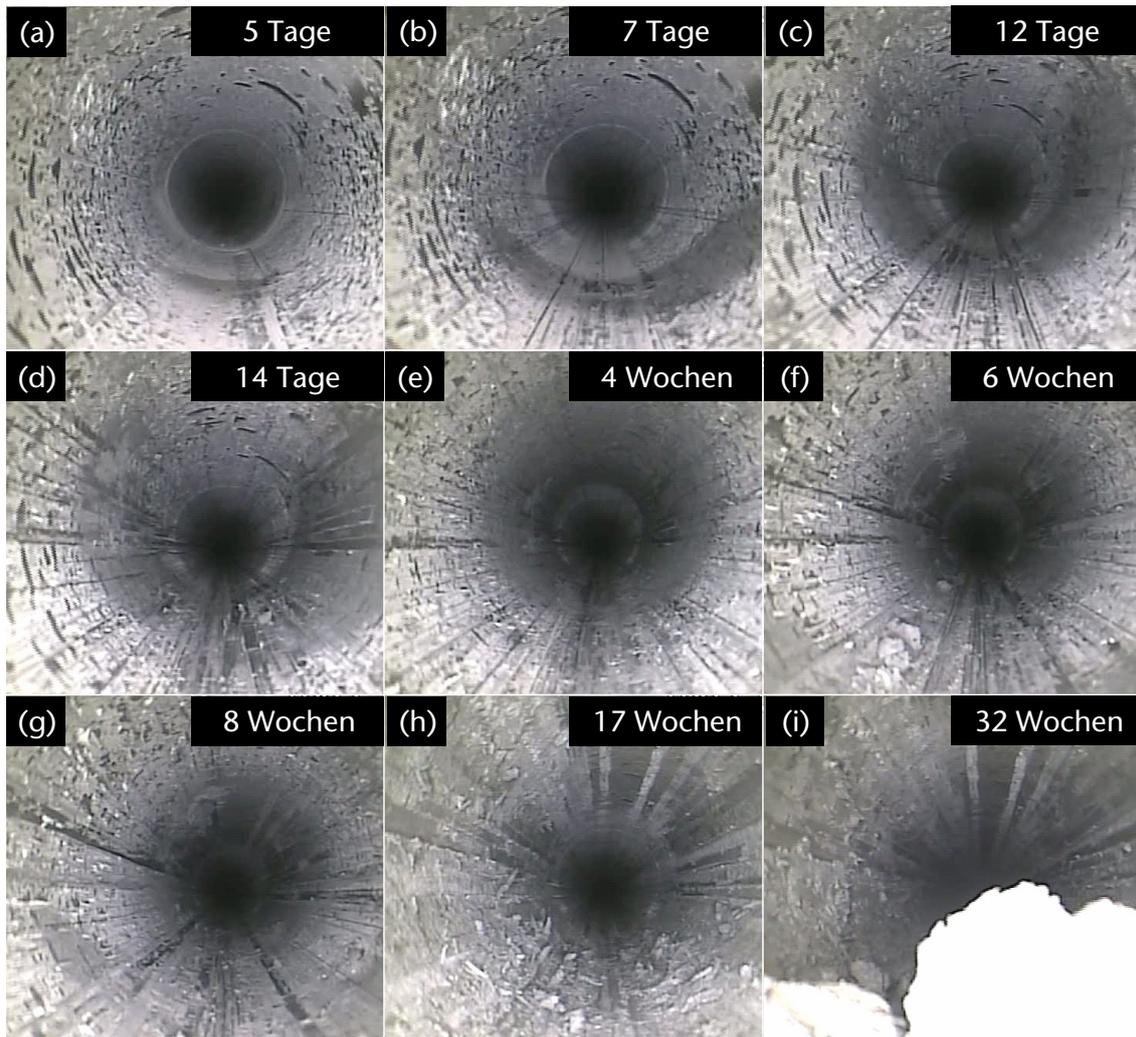


Bild 3.4: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand über einen Zeitraum von 32 Wochen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m des Bohrlochs DMB-B1; dauerhaft standfeste Bohrlochkontur mit zunächst moderater Feuchtigkeitzunahme. Wasserzutritt über einen innerhalb der ersten 14 Tage in (a) bis (d) im Bereich der Bohrlochsohle lokalisierbaren „Wet-Spot“; ab der vierten Woche (e) Feuchtigkeit im Bereich der gesamten Bohrlochkontur einhergehend mit leichten Entfestigungserscheinungen ab der 17. Woche (h)

Da das Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 sich insgesamt über einen Zeitraum von fünf Kalendertagen erstreckt hat, konnte die Erstbefahrung erst zu einem Zeitpunkt durchgeführt werden, als der hier betrachtete Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m bereits fünf Tage alt gewesen ist. Innerhalb dieses fünf Tage alten Teufenbereichs hat sich, wie Bild 3.4(a) entnommen werden kann, bereits ein Feuchtigkeitzutritt in das Bohrloch DMB-B1 ereignet. Zu erkennen ist das feuchte Gestein in diesem Bohrlochabschnitt im Bereich der Bohrlochsohle anhand der gegenüber dem weiteren Gestein in der unmittelbaren Umgebung dunkleren Färbung. Bei den zahlreichen weiteren dunkelgrauen und schwarzen Flecken im Bereich der

gesamten Bohrlochkontur handelt es sich hingegen um durch den Bohrvorgang hervorgerufene Artefakte, die nicht durch Feuchtigkeitzutritte hervorgerufen werden und die demnach auch nicht zeitabhängig ihr Erscheinungsbild oder ihre flächenmäßige Ausdehnung ändern.

Bild 3.5 zeigt eine Vergrößerung von Bild 3.4(a) mit einer grafischen Hervorhebung des sich innerhalb der Sohle des Bohrlochs DMB-B1 ausbildenden, in Anlehnung an den innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft des Mont Terri Konsortiums üblichen Sprachgebrauch im Rahmen des vorliegenden Berichts als „Wet-Spot“ bezeichneten diskreten Feuchtigkeitzutritts.

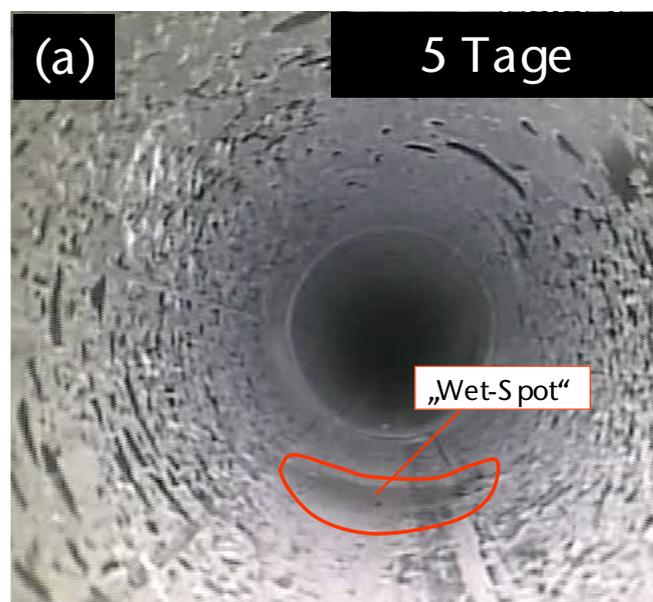


Bild 3.5: Grafische Hervorhebung (rote Linie) des sich innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 7,3 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 7,5 \text{ m}$ in der Bohrlochsohle ausbildenden „Wet-Spots“ zum Observationszeitpunkt 5 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

In der Aufnahmenserie von Bild 3.4(a) bis Bild 3.4(d) kann betrachtet werden, wie der anfänglich in Bild 3.4(a) in seiner flächenhaften Ausdehnung auf den Bereich der Bohrlochsohle beschränkte „Wet-Spot“ sich innerhalb von neun Tagen erheblich vergrößert. Zur Verdeutlichung der zeitabhängig von der Bohrlochsohle ausgehenden voranschreitenden Ausbreitung des „Wet-Spots“ zeigt Bild 3.6 eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.4(d) mit einer farblichen Hervorhebung des „Wet-Spots“ zum Observationszeitpunkt 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs.

Der vergleichenden Betrachtung von Bild 3.5 und Bild 3.6 kann eine Vervielfachung der flächenhaften Ausdehnung des von einem Feuchtigkeitzutritt betroffenen Bereichs der Bohr-

lochkontur innerhalb der ersten neun Tage des Observationszeitraums entnommen werden. Im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten nicht zu klären gewesen ist allerdings, ob die Durchfeuchtung der Bohrlochwand einzig von dem in Bild 3.4(a) zu betrachtenden initialen „Wet-Spot“ aus stattgefunden hat oder ob zu den späteren Observationszeitpunkten ein Zutritt von Feuchtigkeit in das Gestein entlang der Bohrlochkontur auch aus anderen Gebirgsbereichen stattgefunden hat. Zum Observationszeitpunkt vier Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 ist in der zugehörigen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.4(e) kein begrenzter Konturbereich mit einem erhöhten Feuchtigkeitsgrad des Gesteins mehr zu erkennen. Vielmehr ist nun das Gestein entlang der gesamten Bohrlochkontur durchfeuchtet.

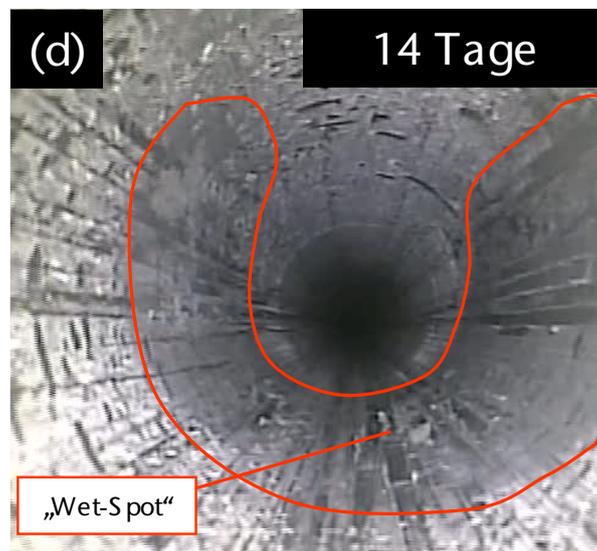


Bild 3.6: Grafische Hervorhebung (rote Linie) des sich innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 7,3 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 7,5 \text{ m}$ in der Bohrlochsohle ausbildenden „Wet-Spots“ zum Observationszeitpunkt 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

Der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.4(e) bis Bild 3.4(i) kann entnommen werden, dass in den folgenden 28 Wochen des Observationszeitraums eine leichte Entfestigung des Gesteins entlang der Bohrlochkontur erfolgt, aus der gegen Ende des Observationszeitraums erste Abplatzungen von kleineren Gesteinsstücken aus der Bohrlochwand heraus resultieren. Verantwortlich für die leichte Entfestigung des Gesteins entlang der Bohrlochkontur ist wahrscheinlich zumindest zu einem gewissen Grad der in der Bilderserie in Bild 3.4 dokumentierte Zutritt von Feuchtigkeit in das Bohrloch DMB-B1 hinein.

Die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 in Bild 3.4(i) zeigt im unteren Bildbereich lockeres Ge-

steinsmaterial, das von der Axial-Bohrlochkamera beim Vorschub mitgeführt wird und den Blick auf einen Teil des observierten Teufenbereichs verdeckt. Zu dem lockeren Gesteinsmaterial ist anzumerken, dass sein Vorhandensein kein Indiz für einen Verbruch oder eine größere Bohrlochwandinstabilität im betrachteten Teufenbereich ist, sondern, dass dieses Gesteinsmaterial im Rahmen vorangegangener Befahrungen aus tiefer innerhalb des Bohrlochs gelegenen Teufenbereichen von der Axial-Bohrlochkamera in die näher am Bohrlochmund gelegenen Teufenbereiche transportiert worden ist. Eine Verbesserung der Qualität der Aufnahme durch eine Wiederholung der Befahrung des Bohrlochs DMB-B1 ist zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen nicht möglich gewesen, da, wie nachfolgend bei der detaillierten Betrachtung der weiteren ausgesuchten und im Rahmen dieses Abschnitts diskutierten Teufenbereiche noch verdeutlicht werden wird, sich zum betrachteten Observationszeitpunkt eine größere Menge Sickerwasser in den tiefer innerhalb des Bohrlochs gelegenen Teufenbereichen angesammelt hatte, die im Anschluss an die Befahrung des Bohrlochs DMB-B1 von der Axial-Bohrlochkamera gemeinsam mit größeren Mengen von feuchtem, plastifiziertem Gesteinsmaterial in die vorderen Teufenbereiche mitgeführt worden ist.

Bei den in Bild 3.4(b) bis Bild 3.4(i) erkennbaren und in Bohrlochlängsrichtung verlaufenden Streifen an der Bohrlochwand handelt es sich um Spuren der Messarme der für die Kalibermessungen verwendeten Dreiarmkalibersonde. Einige der Spuren der Dreiarmkalibersonde sind zur Veranschaulichung in Bild 3.7, das eine Vergrößerung von Bild 3.4(d) darstellt, mit roten Pfeilen gekennzeichnet worden.

Auffällig bei der Betrachtung von Bild 3.7 ist, dass die Spuren der Kalibersonde im Bereich des „Wet-Spots“ deutlicher zu erkennen sind und dass sich die Messarme der Kalibersonde scheinbar in den feuchteren Bohrlochkonturbereichen tiefer in das Gestein hineindrücken konnten als in den vergleichsweise trockeneren Bohrlochkonturbereichen. Passend zu der geschilderten Beobachtung vermittelt auch die Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.4(a) bis Bild 3.4(i) insgesamt den Eindruck, als seien die Spuren der Kalibersonde mit voranschreitender Dauer des Observationszeitraums deutlicher auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu erkennen, was als Indikator für eine zunehmende Aufweichung (*softening*) des Gesteins in der Bohrlochwand innerhalb des betrachteten Teufenbereichs gewertet werden kann.

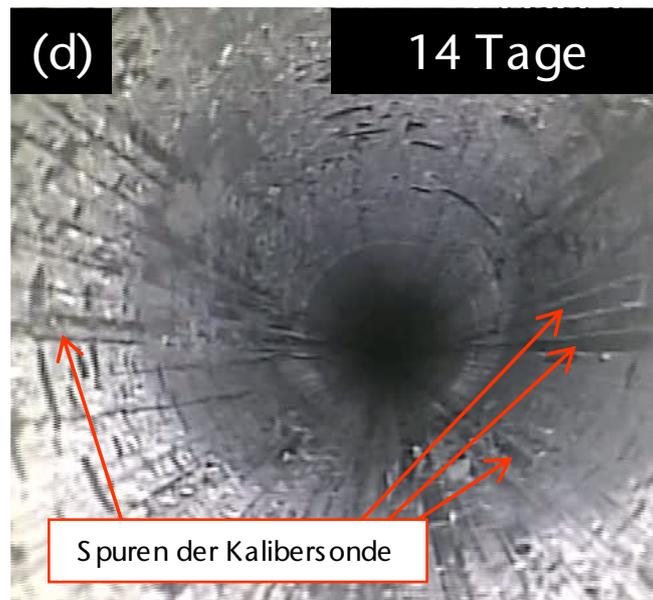


Bild 3.7: Spuren der Dreiarmkalibersonde im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m in der Bohrlochwand zum Observationszeitpunkt 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

Bild 3.8 zeigt schließlich eine Vergrößerung von Bild 3.4(e), auf der der zum Observationszeitpunkt 4 Wochen nach dem Abteufen des Observationsbohrlochs DMB-B1 komplett um die Bohrlochkontur herumreichende, stark durchfeuchtete Bohrlochwandbereich grafisch hervorgehoben wird.

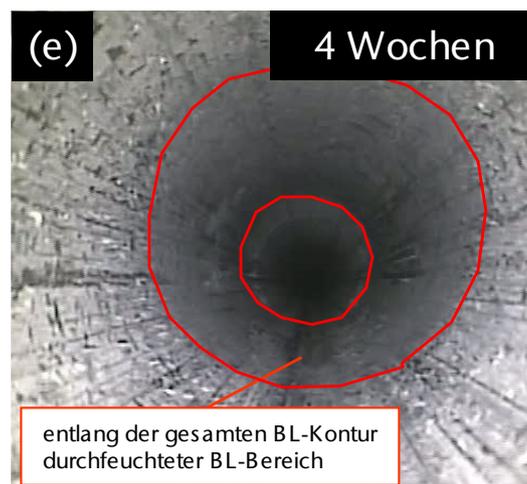


Bild 3.8: Grafische Hervorhebung (rote Linien) des innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m aus dem ehemaligen „Wet-Spot“ hervorgegangenen, stark durchfeuchteten Bohrlochwandbereichs zum Observationszeitpunkt 4 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

Zum Vergleich mit den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem von der Ausbildung eines „Wet-Spots“ und dem damit einhergehenden Feuchtigkeitsanstieg im Gestein der Bohrlochwand betroffenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 7,5$ m ist auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.9 abschließend der zum Observationszeitpunkt vier Wochen nach dem Abteufen vergleichsweise trockene, weniger als einen Meter von dem von der Ausbildung eines „Wet-Spots“ betroffenen Teufenbereich entfernt liegende Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,5$ m bis $t_{BL} \approx 6,7$ m zu betrachten.

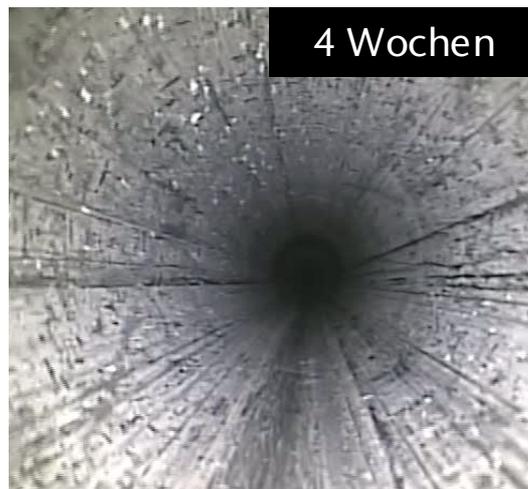


Bild 3.9: Nicht von der Ausbildung eines „Wet-Spots“ betroffener Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,5$ m bis $t_{BL} \approx 6,7$ mit weitestgehend trockener Bohrlochwand 4 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

(a 3) Bohrlochbereich 2 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m / Übergangsbereich von der tonigen Fazies in die karbonatreiche Fazies

Die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand in einem weiteren Bohrlochabschnitt im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m des Bohrlochs DMB-B1 ist in Bild 3.10 dargestellt.

Es ist aus der hellgrauen Färbung des Gesteins entlang der Bohrlochkontur in der Serie von Aufnahmen in Bild 3.10(a) bis Bild 3.10(i) zu schlussfolgern, dass im betrachteten Teufenbereich über den gesamten 32 Wochen lang andauernden Observationszeitraum hinweg eher trockene Verhältnisse vorgeherrscht haben.

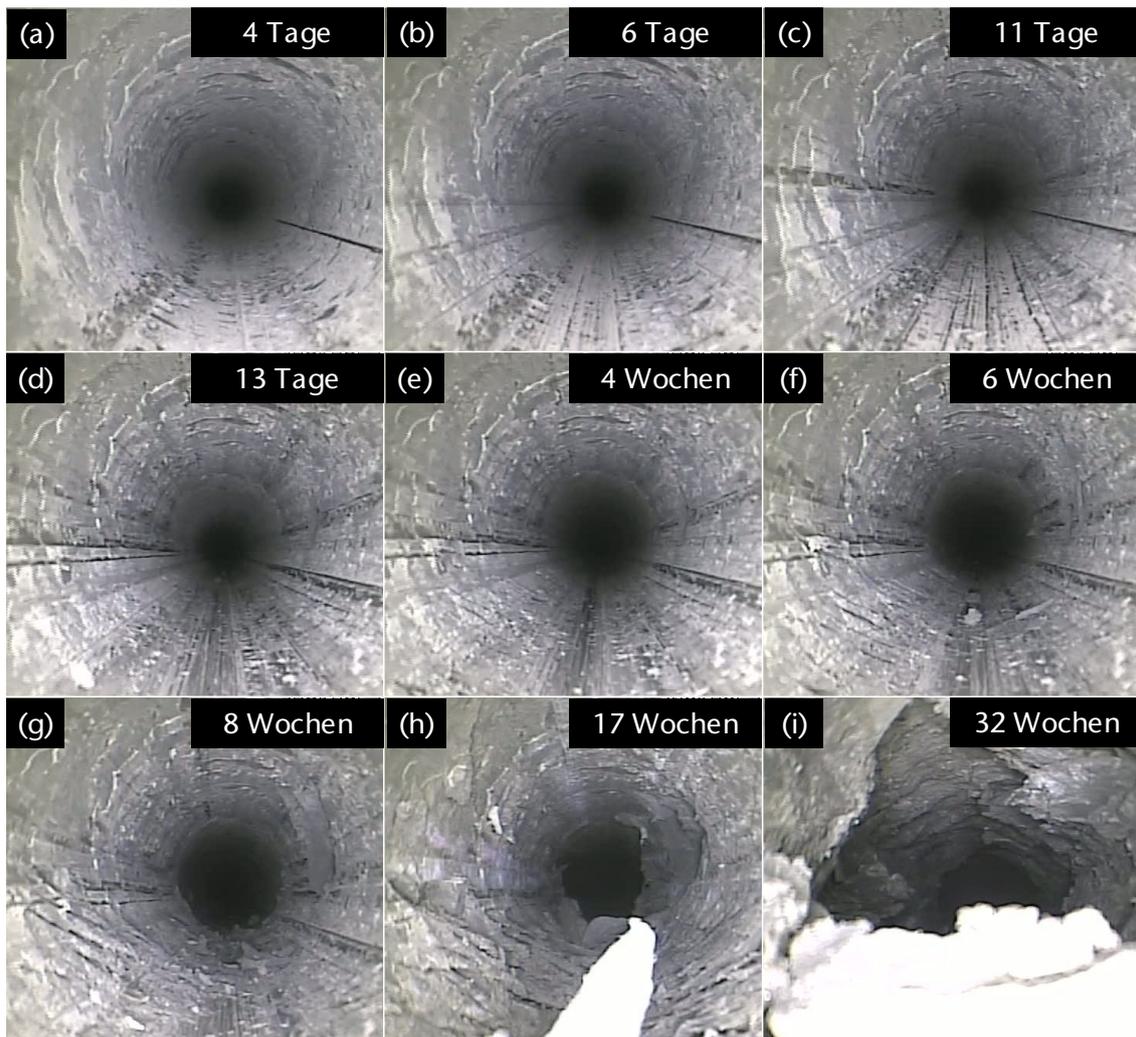


Bild 3.10: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand über einen Zeitraum von 32 Wochen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m des Bohrlochs DMB-B1; dauerhaft eher trockene Bohrlochkontur mit zunächst moderater Gesteinsabplatzung im Bohrlochstoß und anschließender Ausbildung eines beinahe vollständigen Bohrlochwandverbruchs

Wie der Betrachtung von Bild 3.10(a) bis Bild 3.10(c) entnommen werden kann, ergeben sich innerhalb der ersten 11 Tage des Observationszeitraums auf Basis einer optischen Begutachtung kaum registrierbare Veränderungen im Gestein entlang der Bohrlochkontur. Erst zum Zeitpunkt 13 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs bildet sich im rechten Stoßbereich des Bohrlochs eine Gesteinsabplatzung als erstes Anzeichen des später erfolgenden Bohrlochkonturverbruchs aus. Eine Vergrößerung von Bild 3.10(d) einschließlich einer Kennzeichnung der beginnenden Konturentfestigung mit der Ausbildung einer Gesteinsabplatzung im Bohrlochstoß durch einen Pfeil zeigt Bild 3.11.

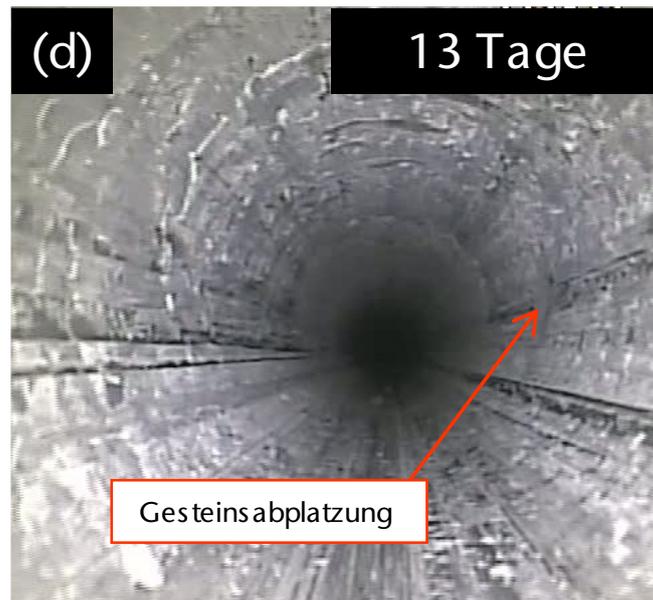


Bild 3.11: Gesteinsabplatzung im rechten Stoßbereich als erstes Anzeichen der nachfolgenden Konturentfestigung im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m zum Observationszeitpunkt 13 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

Die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.10(e) bis Bild 3.10(g) dokumentieren das Fortschreiten der Bohrlochkonturentfestigung in den folgenden sechs Wochen des Observationszeitraums im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m. Bild 3.12 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.10(g) mit einer grafischen Kennzeichnung der gegenüber der Darstellung in Bild 3.10(d) angewachsenen Gesteinsabplatzung im rechten Stoßbereich des Bohrlochs sowie mit einer grafischen Kennzeichnung von sich im Übergangsbereich zwischen linkem Bohrlochstoß und Bohrlochsohle ausbildenden Gesteinsabschalungen.

In Bild 3.10(h) und Bild 3.10(i) sind abschließend die signifikanten Bohrlochkonturveränderungen, die sich zu den Observationszeitpunkten 17 Wochen und 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 im betrachteten Teufenbereich ergeben haben, zu betrachten.

Da im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten keine Wasserzutritte festgestellt werden konnten, scheint eine feuchtezutrittsbedingte Festigkeitsabnahme im Gestein als Erklärung für das innerhalb des 32-wöchigen Observationszeitraums zu beobachtende Bohrlochwandversagen entlang der gesamten Kontur des Bohrlochs eher unwahrscheinlich. Eine mögliche Erklärung für das lokal auf den betrachteten Teufenbereich begrenzte Bohrlochwandversagen scheint eher eine mit einem Kohäsionsverlust einhergehende Austrocknung des Gesteins (Teilsättigung, Schrumpfrissbildung) entlang der Bohrlochkontur in Verbindung mit einer gegebenen-

falls im Bereich des Faziesübergangs zwischen toniger und karbonatreicher Fazies anstehenden Schwächezone im Gebirge zu sein.

Ergänzend ist zur Ergebnisdarstellung für den Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m hinzuzufügen, dass trotz eines vollständigen Versagens des Gesteins entlang der Bohrlochkontur kein Komplettverbruch des Bohrlochs einhergehend mit einem Nachbruch von weiterem Gesteinsmaterial aus weiter entfernten Gebirgsbereichen erfolgt ist. Vielmehr hat sich die durch das Bohrlochwandversagen entstandene neue Hohlraumkontur zumindest temporär so weit stabilisiert, dass auch zum letzten Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 der betrachtete Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m mit der Axial-Bohrlochkamera befahren werden konnte.

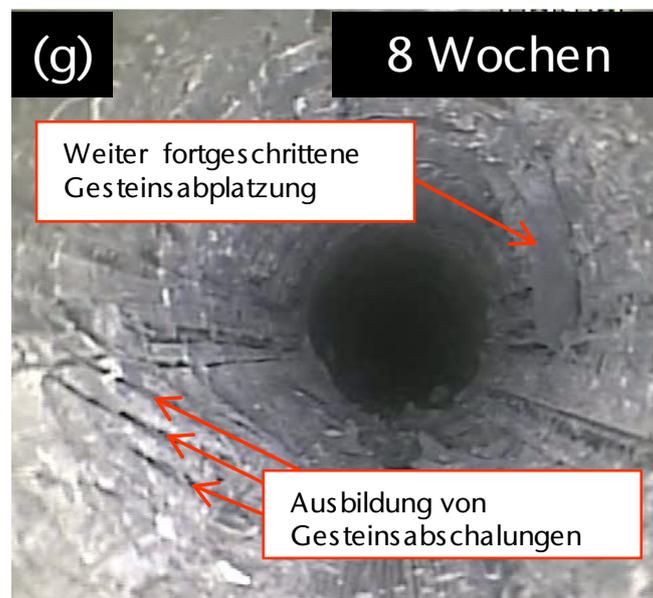


Bild 3.12: Deutlich vorangeschrittene Gesteinsabplatzung im rechten Stoßbereich und der Beginn der Ausbildung von Gesteinsabschalungen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m zum Observationszeitpunkt 8 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

(a 4) Bohrlochbereich 3 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m / Übergangsbereich von der karbonatreichen Fazies in die sandige Fazies

Ähnlich wie im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,5$ m bis $t_{BL} \approx 12,7$ m ist es auch im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m insbesondere ab der achten Woche des Observationszeitraums zu signifikanten Bohrlochkonturveränderungen gekommen. Anhand der in Bild 3.13

dargestellten Bildfolge kann die zeitabhängige Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit in dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m nachvollzogen werden.

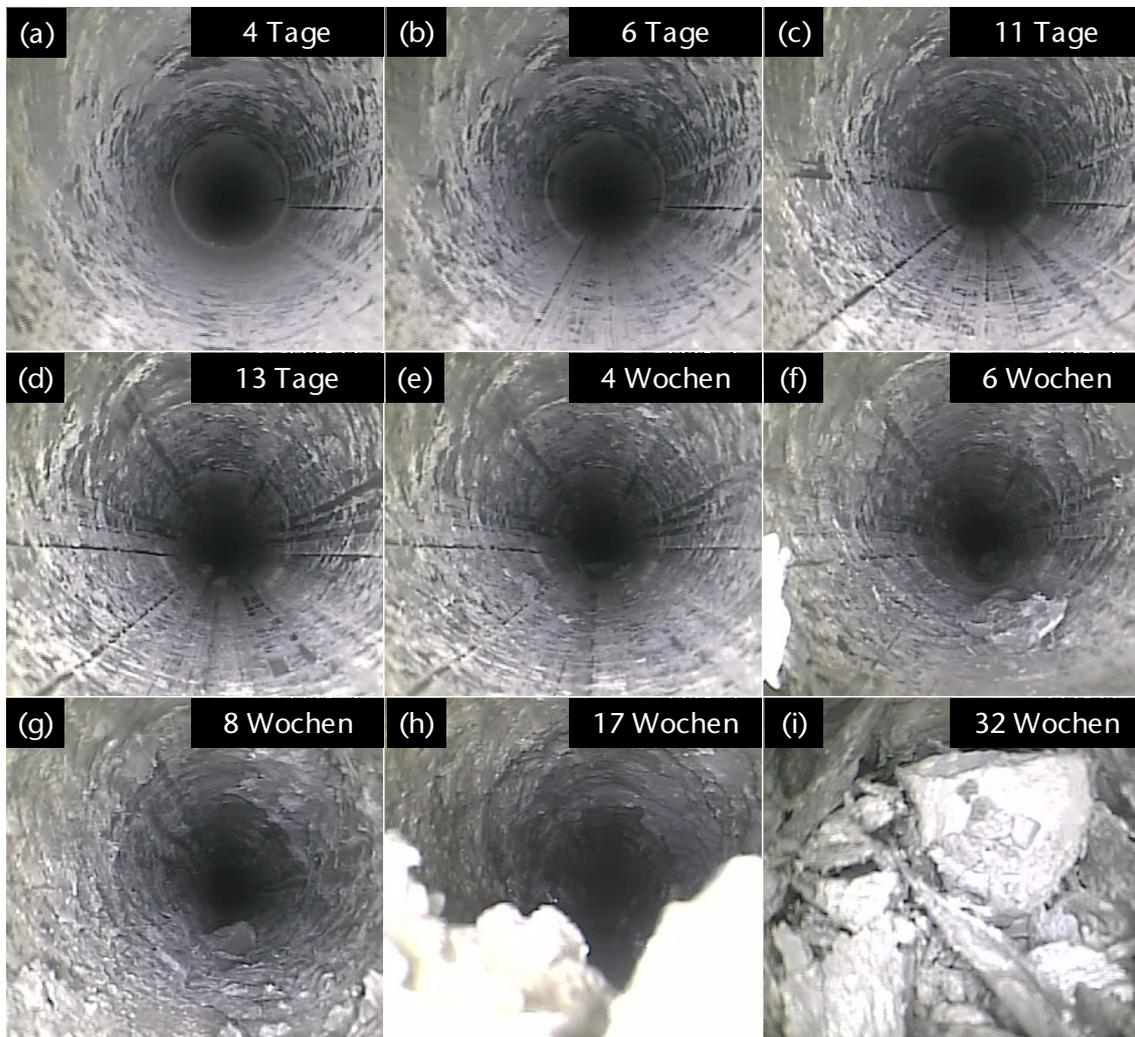


Bild 3.13: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand über einen Zeitraum von 32 Wochen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m des Bohrlochs DMB-B1; Bohrlochkontur mit zunächst moderater Gesteinsabplatzung im Bohrlochstoß und anschließender Ausbildung starker Bohrlochkonturveränderungen

Bei der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.13(a) bis Bild 3.13(d) ist zu erkennen, wie die Bohrlochwand im gesamten betrachteten Teufenbereich sich innerhalb der ersten vier Wochen des Observationszeitraums als vollständig standfest und frei von optisch erkennbaren Schädigungen erweist. Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Bohrlochwand auf den im Rahmen der ersten vier Observationstermine gewonnenen Aufnahmen sehr trocken erscheint. Eine deutlich auf Basis der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizierbare Veränderung der innerhalb des betrachteten Teufenbereichs

vorherrschenden Bedingungen ereignet sich zwischen der vierten und der sechsten Observationswoche, wie der vergleichenden Betrachtung von Bild 3.13(e) und Bild 3.13(f) entnommen werden kann. Auf der sechs Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera sind zum einen sowohl linksseitig wie auch rechtsseitig in den Übergangsbereichen zwischen Bohrlochstoß und Bohrlochfirse Bohrlochkonturveränderungen zu erkennen und zum anderen scheinen sich auch die hydraulischen Verhältnisse innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m signifikant verändert zu haben. Bild 3.14 zeigt die Vergrößerung von Bild 3.13(f) mit einer grafischen Hervorhebung der wichtigsten Veränderungen innerhalb des betrachteten Teufenbereichs gegenüber der in Bild 3.13(e) dargestellten, zum Observationszeitpunkt vier Wochen nach dem Abteufen entstandenen Aufnahme.

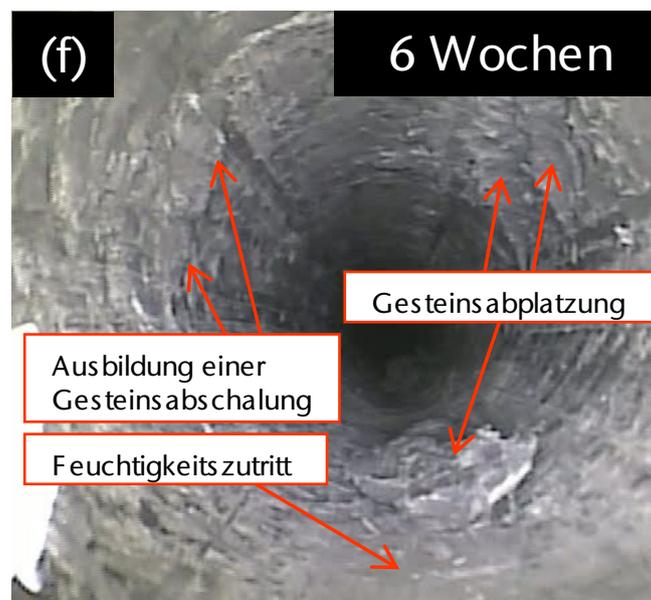


Bild 3.14: Ausbildung einer Bohrlochwandabschalung und einer Gesteinsabplatzung aus der Bohrlochwand heraus sowie eine Feuchtigkeitsansammlung im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m zum Observationszeitpunkt 6 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1

Die dunkelgraue Färbung des Gesteins in der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(e) gegenüber der hellgrauen Färbung des Gesteins, die in der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(f) zu erkennen ist, kann als Anzeichen für einen Feuchtigkeitszutritt in den betrachteten Teufenbereich einhergehend mit einem Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes im Gestein entlang der Bohrlochkontur gewertet werden. Auch Strukturen in der Bohrlochwand, die auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(e) noch deut-

lich erkennbar sind, erscheinen auf der zwei Wochen später entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(f) weniger klar definiert. Insbesondere gilt die beschriebene Abnahme der Definiertheit von Strukturen für den Bereich der Bohrlochsohle. Während auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(e) im Bereich der Bohrlochsohle gut beleuchtete, helle Bereiche und im Schatten liegende, dunkle Bereiche in kurzen Abständen aufeinander folgen, wirkt auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(f) die gesamte Bohrlochsohle in ihrer Beschaffenheit eher homogen und eben – möglicherweise ein Indiz für eine mit dem Feuchtigkeitsanstieg einhergehende Aufweichung des Tongesteins insbesondere im Bereich der Bohrlochsohle.

Neben dem Anstieg der Feuchtigkeit im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m zeigt Bild 3.13(f) die Ausbildung einer Gesteinsabschalung aus der Bohrlochwand heraus im linken Stoßbereich sowie im Übergangsbereich zwischen Bohrlochstoß und Bohrlochfirse. Darüber hinaus ist im rechten Übergangsbereich zwischen Bohrlochstoß und Bohrlochfirse eine größere Gesteinsabplatzung zu erkennen, die sich zwischen der vierten und der sechsten Observationswoche ereignet hat. Das aus der Bohrlochwand herausgebrochene Gesteinsmaterial ist auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(f) im Bereich der Bohrlochsohle zu erkennen.

Die erstmals zum Observationszeitpunkt 6 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 identifizierten Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit nehmen in den nachfolgenden Wochen zeitabhängig in ihrer Ausprägung zu, wie in der Aufnahmenserie in Bild 3.13(f) bis Bild 3.13(h) betrachtet werden kann. Der Betrachtung von Bild 3.13(h) ist zu entnehmen, dass sich die Gesteinsabplatzung im rechten Bohrlochkonturbereich zum Observationszeitpunkt 17 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 seit ihrer erstmaligen Detektierung 6 Wochen nach dem Abteufen entschieden vergrößert hat. Das Gestein, das 6 Wochen nach dem Abteufen begonnen hat, sich im linken Bereich der Bohrlochkontur aus der Bohrlochwand herauszulösen, ist zum Observationszeitpunkt 17 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 vollständig aus der Bohrlochwand herausgebrochen, wie ebenfalls der Betrachtung von Bild 3.13(h) zu entnehmen ist. Zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 ist es nicht möglich gewesen, mittels der Axial-Bohrlochkamera eine wissenschaftlich verwertbare Aufnahme aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m oder aus einem anderen jenseits von $t_{BL} \approx 15,0$ m gelegenen Teufenbereich zu generieren, da sich zu diesem Zeitpunkt bereits eine große Menge

verbrochenen Gesteinsmaterials sowie darüber hinaus auch eine größere Menge Sickerwasser im Bohrloch DMB-B1 befunden haben. Die in einer Tiefe von $t_{BL} \approx 13,0$ m entstandene Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.13(i) repräsentiert die widrigen Bedingungen in den tiefer im Gebirge gelegenen Teufenbereichen innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen.

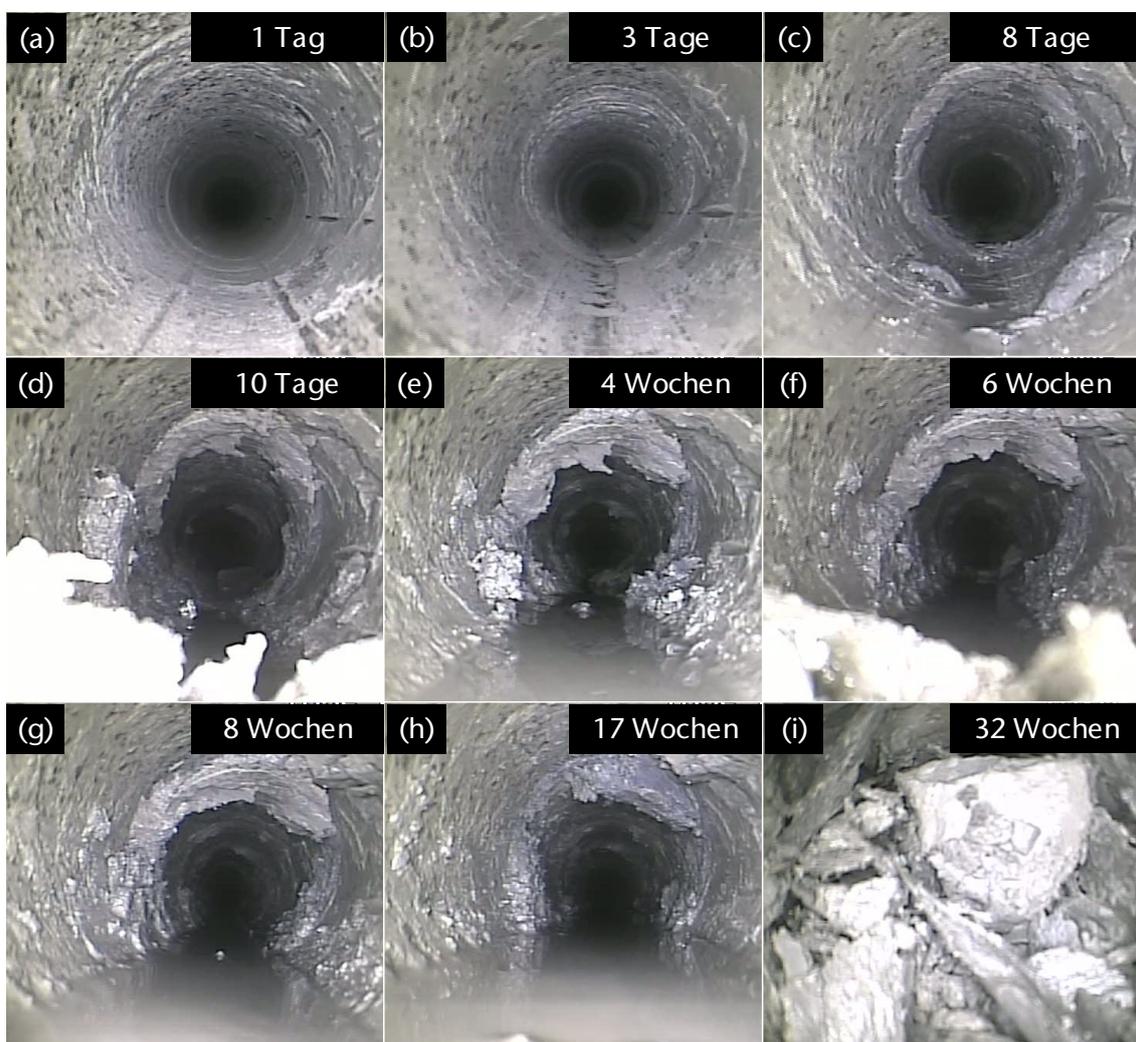


Bild 3.15: Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m des Bohrlochs DMB-B1; zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand über einen Zeitraum von 32 Wochen mit der Ausbildung einer signifikanten Gesteinsabschalung und der Ansammlung von Sickerwasser

(a 5) *Bohrlochbereich 4 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m / sandige Fazies*

Weiterführend wird nachfolgend stellvertretend für das Tragverhalten des Bohrlochs DMB-B1 im Bereich der sandigen Fazies das observierte zeitabhängige Tragverhalten in dem in der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B1 von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m diskutiert. In Bild 3.15 ist die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m anhand einer Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt.

Während die Bohrlochwand auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.15(a) und Bild 3.15(b), die zu den Observationszeitpunkten 1 Tag und 3 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 entstanden sind, noch einen überwiegend trockenen Eindruck erweckt, hat sich zum Observationszeitpunkt 8 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 mit der zugehörigen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.15(c) ein Feuchtigkeitszutritt in den observierten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m ereignet. Deutlich ist auf der Aufnahme in Bild 3.15(c) anhand der Lichtreflexionen und der Spiegelungen im Bereich der Bohrlochsohle zu erkennen, dass zum Observationszeitpunkt 8 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 nicht nur ein Anstieg des Feuchtigkeitsgehalts im Gestein an der Bohrlochkontur stattgefunden hat, sondern, dass sich darüber hinaus bereits freies Sickerwasser im Bereich der Bohrlochsohle im betrachteten Teufenbereich angesammelt hat. Die Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.15(c) bis Bild 3.15(h) veranschaulicht, wie die im Inneren des Bohrlochs DMB-B1 befindliche Menge freien Wassers innerhalb der nächsten 9 Wochen des Observationszeitraums weiter anwächst.

Aus den gleichen Gründen, die auch für den zuvor betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 17,1$ m bis $t_{BL} \approx 17,3$ m angeführt worden sind, ist es nicht möglich gewesen, auch zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 ein aussagekräftiges Bild vom Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m mittels der Axial-Bohrlochkamera aufzunehmen. Festzuhalten ist allerdings, dass insbesondere auch zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 große Mengen von freiem Sickerwasser in den tiefergelegenen Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B1 festzustellen gewesen sind. Insgesamt ist zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen dreimal der Versuch unternommen worden, das Bohrloch DMB-B1 bis zur Endteufe mit der Axial-Bohrlochkamera zu befahren, wobei bei allen drei Versuchen größere Men-



gen von plastifiziertem Tongestein sowie größere Mengen von Sickerwasser durch die Axial-Bohrlochkamera aus dem Bohrloch heraus transportiert worden sind. Eine Befahrung des Bohrlochs DMB-B1 ist somit auch am letzten Observationstermin noch bis zur Endteufe von $t_{BL} \approx 30,5$ m möglich gewesen. Lediglich das Anfertigen von wissenschaftlich aussagekräftigen Aufnahmen ist aufgrund der innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 vorherrschenden Bedingungen mit dem Vorhandensein von größeren Mengen plastifizierten Tongesteins sowie von größeren Mengen aufgestauten Sickerwassers in den tiefergelegenen Teufenbereichen nicht mehr möglich gewesen.

Wie anhand der Betrachtung der Aufnahmen in Bild 3.15(e) bis Bild 3.15(h) bereits zu erahnen ist, hat sich der Zutritt von Sickerwasser nicht auf den Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m beschränkt, sondern es hat sich im Teufenbereich vor dem Bohrlochtiefsten durchgängig Sickerwasser innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 aufgestaut. Zum Verständnis der Tatsache, dass sich in einem horizontal abgeteuften Bohrloch Sickerwasser aufstauen kann, ist es entscheidend, zu wissen, dass die Längsachse des Bohrlochs DMB-B1 nicht voll-

Observationstermin	Zeit seit dem Abteufen [Wochen]	freies Wasser ab Teufe [m]
22.01.2013	< 1	-
24.01.2013	< 1	-
29.01.2013	< 2	24
31.01.2013	< 2	23
12.02.2013	4	22
26&27.02.2013	6	21
12.03.2013	8	20
16.05.2013	17	>17*
26.08.2013	32	14

Tabelle 3.2: Teufenbereiche, ab denen zu den jeweiligen Observationszeitpunkten freies Wasser innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 identifiziert werden konnte. *Für die Befahrung am 16.05.2013 konnte bis in eine Teufe von $t_{BL} \approx 17,0$ m kein Wasser observiert werden. Ab der entsprechenden Teufe verdeckt verbrochenes Gesteinsmaterial die Sicht auf den Sohlbereich des Bohrlochs.

ständig horizontal verläuft, wie die Einmessung des Bohrlochs DMB-B1 ergeben hat. Stattdessen steigt die Längsachse des Bohrlochs auf den ersten 15 Teufenmetern minimal an, bevor sie im Anschluss daran auf den zweiten gut 15 Teufenmetern minimal abfällt, weshalb die Bohrlochsohle im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 15,0$ m ungefähr $\Delta h \approx 3$ cm oberhalb der Bohrlochsohle im Bereich des Bohrlochtiefsten liegt. Dadurch wird das Aufstauen des Sickerwassers überhaupt erst ermöglicht. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick darüber, ab welcher Teufe freies Sickerwasser zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten im Bohrloch detektiert worden ist.

Anmerkung: Die Darstellung der Teufen, ab denen innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 freies Wasser detektiert worden ist, dient lediglich dazu, dem Betrachter einen qualitativen Eindruck von dem geohydraulischen Verhalten des Bohrlochs DMB-B1 zu verschaffen. Die angegebenen Daten sind nicht auf der Basis von zuvor festgelegten Kriterien einschließlich einer Definition des Begriffs „freies Sickerwasser“ generiert worden. So handelt es sich bei den angegebenen Teufenbereichen bis zum Observationszeitpunkt am 12.03.2013 eher um freies Wasser, das von der Axial-Bohrlochkamera während des Vorschubs in das Bohrloch hinein gemeinsam mit plastifiziertem Tongesteinsmaterial in Richtung des Bohrlochtiefsten transportiert und letztendlich dort aufgestaut wird, während ab der Befahrung am 16.05.2013 tatsächlich von einer weitestgehend durch die Axial-Bohrlochkamera unbeeinflussten Aufstauung größerer Mengen freien Wassers vor dem Bohrlochtiefsten ausgegangen werden kann.

Darüber hinaus sind die angegebenen Teufendaten nicht zur Ableitung von quantitativen Informationen bezüglich der Menge an dem Bohrloch zugesickertem Wasser geeignet, da keinerlei Informationen bezüglich der Verdunstungsraten vorliegen und darüber hinaus auch im Rahmen der Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera größere Mengen des zugesickerten Wassers aus dem Bohrloch heraus transportiert worden sind.

Die Betrachtung von Tabelle 3.2 verdeutlicht, wie sich zeitabhängig über den gesamten Observationszeitraum hinweg immer größere Mengen von Sickerwasser innerhalb des Bohrlochs ansammeln und bestätigt somit den bei der Betrachtung der Aufnahmenserie in Bild 3.15 erhaltenen Eindruck bezüglich des geohydraulischen Verhaltens des Bohrlochs DMB-B1.

Nachdem vorangehend zunächst das geohydraulische Verhalten innerhalb der tiefer im Gebirge liegenden Teufenbereiche des Bohrlochs DMB-B1 diskutiert worden ist, soll anhand der Darstellung in Bild 3.16 nachfolgend auch kurz auf das zeitabhängige geomechanische Ver-

halten im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m eingegangen werden. Bild 3.16 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.15(b) mit einer Kennzeichnung von präexisten-ten, ringförmig angeordneten Strukturen, entlang derer sich im weiteren Verlauf des Observa-tionszeitraums eine massive Gesteinsabschalung entwickelt hat.

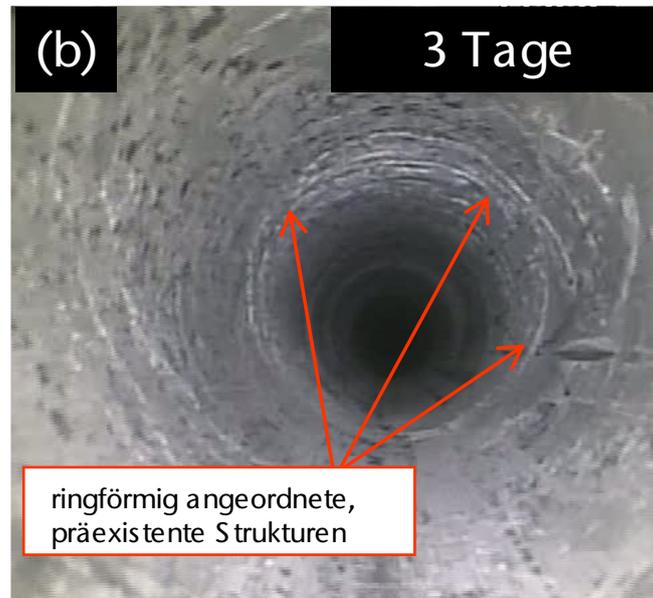


Bild 3.16: Ringförmig angeordnete, präexistente Strukturen in der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m des Bohrlochs DMB-B1

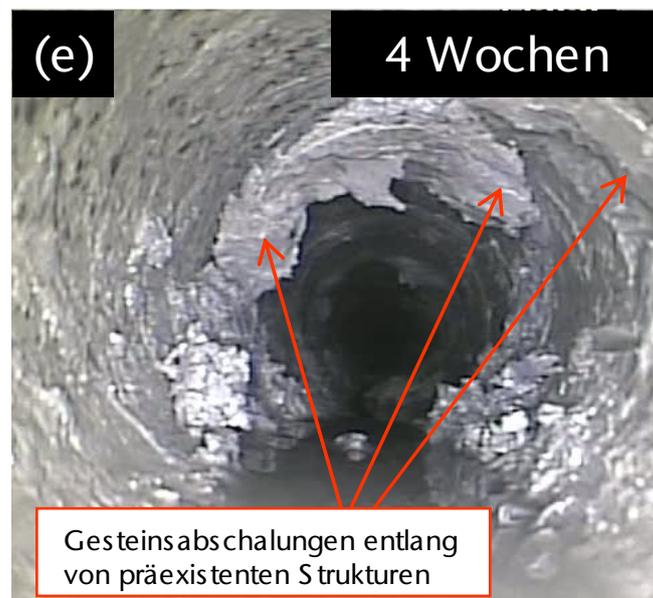


Bild 3.17: Gesteinsabschalung aus der Bohrlochwand heraus entlang von präexisten-ten Strukturen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m des Bohrlochs DMB-B1

Die in Bild 3.15(b) zu erkennenden Strukturen in der Bohrlochwand könnten einen Hinweis auf eine Schwächezone wie beispielsweise eine mit einem weicheren, weniger belastbaren Gestein gefüllte Kluft innerhalb der sandigen Fazies des Opalinustons darstellen. Der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.15(b) bis Bild 3.15(h) ist zu entnehmen, wie sich zeitabhängig im Bereich der ringförmig angeordneten, präexistenter Strukturen eine signifikante Abschalung von Gestein aus der Bohrlochwand heraus ausbildet. Wie der Betrachtung der vergrößerten Darstellung von Bild 3.15(e) in Bild 3.17 entnommen werden kann, bildet sich im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m darüber hinaus auch in dem der ringförmigen Struktur vorgelagerten Bohrlochwandbereich zeitabhängig eine weitere Gesteinsabschalung aus.

Im Rahmen der vom Schweizer Bundesamt für Landestopografie (Swisstopo) vorgenommenen Bohrkernaufnahme konnten für den betrachteten Teufenbereich anhand einer optischen Begutachtung des Bohrkernmaterials durch einen Geologen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Beschaffenheit des Gesteins im betrachteten Teufenbereich gegenüber der Gesteinsbeschaffenheit in den unmittelbar umgebenden Teufenbereichen festgestellt werden. Anhand der Tatsache, dass sich innerhalb eines Gebirgsbereiches, der keine auf Basis der Bohrkernaufnahme identifizierbaren signifikanten Unterschiede bezüglich der Gesteinsbeschaffenheit zu den umgebenden Gebirgsbereichen aufweist, eine massive Gesteinsabschalung aus der Bohrlochwand heraus ausbildet, verdeutlicht sich einmal mehr die große Bedeutung, die der wiederholten Bohrlochobservation mittels optischer Verfahren bei der geomechanischen Charakterisierung von Tongesteinsformationen im Rahmen der Standortuntersuchung zukommt.

Eine einmalige Bohrlochsondierung zeitnah nach dem Abteufen sowie eine Bohrkernentnahme einschließlich der im Rahmen der Bohrkernaufnahme üblichen Untersuchungen sowie einschließlich der üblichen laborativen Untersuchungen scheinen aufgrund der Komplexität der in situ observierten zeitabhängigen geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Prozesse nicht hinreichend zu sein, um einen Gebirgsbereich bezüglich seines geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Verhaltens im Sinne einer Standortcharakterisierung hinreichend genau zu charakterisieren. Insbesondere die Identifizierung von bezüglich ihres zeitabhängigen geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Verhaltens besonders relevanten Gebirgsbereichen scheint aufgrund der bei der Observation des Bohrlochs DMB-B1 gemachten Erfahrungen erst im Rahmen von Wiederholungssondierungen möglich zu sein.



Eine im Kontext der Endlagerung radioaktiver Abfälle aus wissenschaftlicher Sicht hochinteressante Fragestellung bezüglich des geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Verhaltens des Gebirges in der Umgebung der Bohrlochkontur im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,5$ m bis $t_{BL} \approx 25,7$ m, die im Rahmen der durchgeführten Observationsarbeiten nicht zu beantworten gewesen ist, bezieht sich darauf, in wie weit im Rahmen geomechanisch-geohydraulischer Wechselwirkungen die zu betrachtende Gesteinsabschalung aus der Bohrlochwand heraus die Entwicklung des Sickerwasserzutritts in das Bohrloch DMB-B1 hinein beeinflusst hat und in wie weit andererseits der zu beobachtende Sickerwasserzutritt für die Ausbildung der Gesteinsabschalung mitverantwortlich ist. Hier besteht nach wie vor weiterer Forschungsbedarf.

Unabhängig davon, ob in dem zu betrachtenden geohydraulisch-geomechanisch geprägten Gebirgsversagensszenario in Bild 3.17 ein primär mechanisches Versagen des Gebirges zur Öffnung hydraulischer Wegsamkeiten geführt hat, entlang derer dann ein verstärkter Zustrom von Gebirgswasser in den betrachteten Bohrlochteufenbereich erfolgen konnte, oder ob zunächst ein verstärkter Zustrom von Wasser in das Gebirge in der Umgebung der Bohrlochkontur erfolgt ist, der dann zu einer Abminderung der Gesteinsfestigkeit durch Aufweichungseffekte geführt hat, die dann die in Bild 3.17 zu betrachtenden Gesteinsherauslösungen aus der Bohrlochwand hervorgerufen haben, lässt sich feststellen, dass hier mit dem partiellen Versagen der Hohlraumkontur und dem Zutritt größerer Mengen von Gebirgswasser in den Hohlraum hinein zwei übertragen auf einen Grubenbau zur Endlagerung radioaktiver Abfälle als durchaus dramatisch zu bezeichnende Ereignisse dokumentiert worden sind. Aufgrund der gebirgsmechanischen Komplexität der sich gegenseitig beeinflussenden und im Gebirge lokal auf einen relativ kurzen Gebirgsbereich beschränkt ablaufenden hydraulischen und mechanischen Prozesse ist anzuzweifeln, dass das Gebirgsversagen und der zu betrachtende Gebirgswasserzutritt in ihrer in situ zu observierenden Ausprägung auch anhand von laborativen Untersuchungen von Gesteinsproben aus dem Observationsbohrloch DMB-B1 präzise prognostizierbar gewesen wären. Auch eine geophysikalische Erkundung des Gebirges von der Kontur der Niche MI aus sowie ein einmalig im Anschluss an das Abteufen durchgeführtes geophysikalisches und optisches Logging der Bohrlochwand hätten ggf. nicht genügend Informationen geliefert, um die sich erst zum Observationszeitpunkt $t = 8$ Tage nach dem Abteufen erstmals andeutende Entwicklung innerhalb des Observationsbohrlochs DMB-B1 vorhersehen zu können.



Die zeitabhängige in situ-Beobachtung und Dokumentation von gebirgsmechanischen Prozessen mittels optischer Verfahren stellt daher bei gegebenem Stand von Wissenschaft und Technik die vermutlich verlässlichste Methode zur Erkundung von bezüglich ihrer Wirtsgesteinseigenschaften für radioaktive Abfälle zu bewertenden Gebirgsformationen dar. Aufgrund ihrer Robustheit und aufgrund der überwiegend einfach zu interpretierenden Aufnahmen bietet sich eine Axial-Bohrlochkamera zumindest als eine zentrale Komponente eines zur Erkundung potenzieller Endlagerformationen einzusetzenden Observationsinstrumentariums an (siehe hierzu auch *Lux & Seeska, 2010*, und *Lux et al., 2012*).

(b) Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen für das Bohrloch DMB-B1

An acht Befahrungsterminen sind in dem Bohrloch DMB-B1 insgesamt jeweils vier Kalibermessungen durchgeführt worden. Die vier Messungen ergeben sich aus zwei Befahrungen des Bohrlochs, bei denen jeweils bei der Einfahrt und bei der Ausfahrt eine Messung stattgefunden hat. Die zwei Befahrungen je Befahrungstermin sind durchgeführt worden, um durch eine Variation des Ausgangswinkels φ der Kalibersonde anhand der Messwerte möglichst viele Informationen über die Form der Bohrlochkontur und die Beschaffenheit der Bohrlochwand zu erhalten. Nach der ersten Befahrung unter einem Ausgangswinkel von $\varphi = 0^\circ$, bei der die Sonde in ihrer Ausgangsposition so orientiert gewesen ist, dass einer ihrer drei Messarme direkt zum obersten Punkt der Bohrlochkontur orientiert war, ist die Sonde anschließend für die zweite Befahrung im Uhrzeigersinn um jeweils $\Delta\varphi = 60^\circ$ gegenüber der vorangegangenen Befahrung weitergedreht worden. Somit sind Befahrungen mit einer Ausgangsposition der Sonde von $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 60^\circ$ vorgenommen worden. Die Auswertung erfolgt vornehmlich aus qualitativer Sicht, um die messtechnisch erfassten Veränderungen hervorzuheben. Wertende Einschätzungen und Interpretationen beruhen dabei auf den Erfahrungen, die mit dieser Bohrlochmesstechnik und ihrer Aussagekraft zwischenzeitlich vorliegen. Hervorzuheben ist, dass umfangsbezogen lageabhängige Mittelwerte erhalten werden.

Anmerkung: Eine Verdrehung der Sonde aus der vorgegebenen Ausgangsposition heraus kann während des Vorschubs bei der eingesetzten Messtechnologie insbesondere in stark deformierten Observationsbohrlöchern nicht ausgeschlossen werden, sodass nicht sichergestellt werden kann, dass die Messarme der Dreiarmkalibersonde bei identischen Ausgangspositionierungen während der Befahrungen auch jedes Mal den gleichen Pfad entlang der Bohrlochwand innerhalb eines Observationsbohrlochs zurücklegen. Ausführliche Informationen

zur Funktionsweise des Messmechanismus der Dreiarmkalibersonde und zu Faktoren, die die Ausrichtung der Dreiarmkalibersonde innerhalb der Observationsbohrlöcher beeinflussen können, enthält Lux et al. (2012).

Die einzelnen Ein- und Ausfahrten unterscheiden sich quantitativ zwar leicht voneinander, insgesamt stimmen die Messergebnisse aber so gut überein, dass hier im Rahmen der Vorstellung der Messergebnisse auf eine Diskussion der Unterschiede zwischen den einzelnen Befahrungen mit variiertem Ausgangswinkel φ der Kalibersonde verzichtet werden kann. In Bild 3.18 sind exemplarisch die von der Kalibersonde bei der Ausfahrt unter $\varphi = 60^\circ$ gemessenen Zahlenwerte für jeden der acht Befahrungstermine dargestellt.

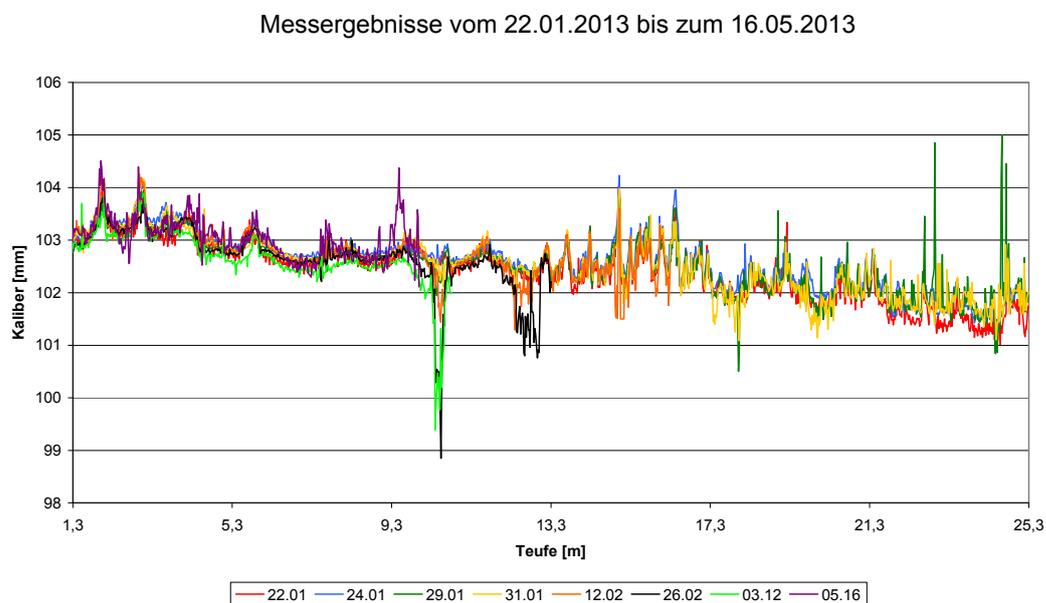


Bild 3.18: Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde: Zusammenstellung der Ausfahrten unter $\varphi = 60^\circ$ für alle acht Befahrungstermine im Observationszeitraum vom 22.01.2013 bis zum 16.05.2013 für das Bohrloch DMB-B1

Die bei der Ausfahrt unter $\varphi = 60^\circ$ aufgenommenen Messwerte werden im Folgenden stellvertretend für alle bei den Befahrungen des Bohrlochs DMB-B1 ermittelten Messwerte vorgestellt.

Die Befahrungen zur Ermittlung der in Bild 3.18 dargestellten Messergebnisse sind zu den Observationszeitpunkten 1 Tag (roter Graph), 3 Tage (dunkelblauer Graph), 8 Tage (dunkelgrüner Graph), 10 Tage (gelber Graph), 4 Wochen (orangefarbener Graph), 6 Wochen

(schwarzer Graph), 8 Wochen (hellgrüner Graph) und 17 Wochen (violetter Graph) nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 durchgeführt worden.

Zur Diskussion der mittels der Dreiarmkalibersonde generierten Messergebnisse werden die in Bild 3.18 zu betrachtenden Messwertgraphen nachfolgend erneut auf zwei Diagramme dargestellt. Die Darstellung in zwei getrennten Diagrammen erfolgt, um eine bessere Übersichtlichkeit bezüglich der zu den acht unterschiedlichen Observationsterminen von der Kalibersonde aufgezeichneten Messergebnisse herzustellen und somit die Ergebnisdiskussion zu erleichtern. Die Zuteilung der Messwertgraphen zu den zwei Diagrammen erfolgt dabei anhand des Datums des Observationstermins, zu dem die Messergebnisse generiert worden sind. In Bild 3.19 sind die Messwertgraphen der an den ersten vier Observationsterminen innerhalb der ersten 10 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 generierten Messergebnisse dargestellt. Im Diagramm in Bild 3.19 ist dementsprechend die kurzfristig nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 eintretende zeitabhängige Entwicklung bezüglich der gemessenen Kaliberwerte zu betrachten.

Messergebnisse vom 22.01.2013 bis zum 31.01.2013

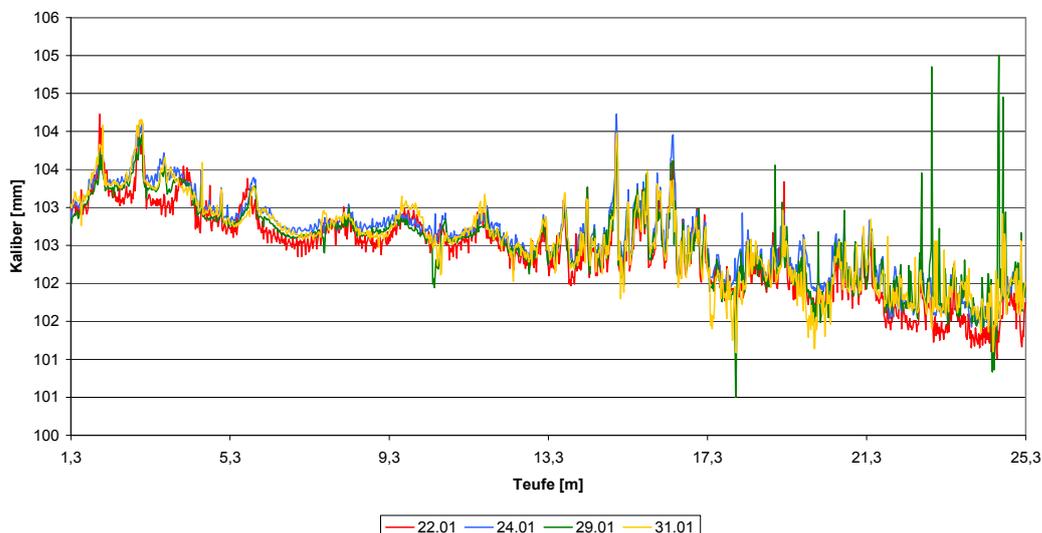


Bild 3.19: Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde: Zusammenstellung der Ausfahrten unter $\varphi = 60^\circ$ für die vier Befahrungstermine im Observationszeitraum vom 22.01.2013 bis zum 31.01.2013 für das Bohrloch DMB-B1

Das Diagramm in Bild 3.20 zeigt dagegen die längerfristige Entwicklung bezüglich der gemessenen Kaliberwerte über einen Observationszeitraum von 17 Wochen anhand der Darstellung der Messwertgraphen, die an fünf ausgewählten Observationsterminen 1 Tag (roter

Graph), 4 Wochen (hellblauer Graph), 6 Wochen (schwarzer Graph), 8 Wochen (hellgrüner Graph) und 17 Wochen (violetter Graph) nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 von der Kalibersonde aufgezeichnet worden sind. Der zum Observationstermin 1 Tag nach dem Abteufen gehörige Messwertgraph ist somit sowohl im Diagramm in Bild 3.19 wie auch im Diagramm in Bild 3.20 zu betrachten. Die einen Tag nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 von der Kalibersonde aufgezeichneten Messwerte dienen somit als Bezugsgrößen, um die weiteren in Bild 3.19 und Bild 3.20 dargestellten Messwertgraphen zueinander in Relation setzen zu können.

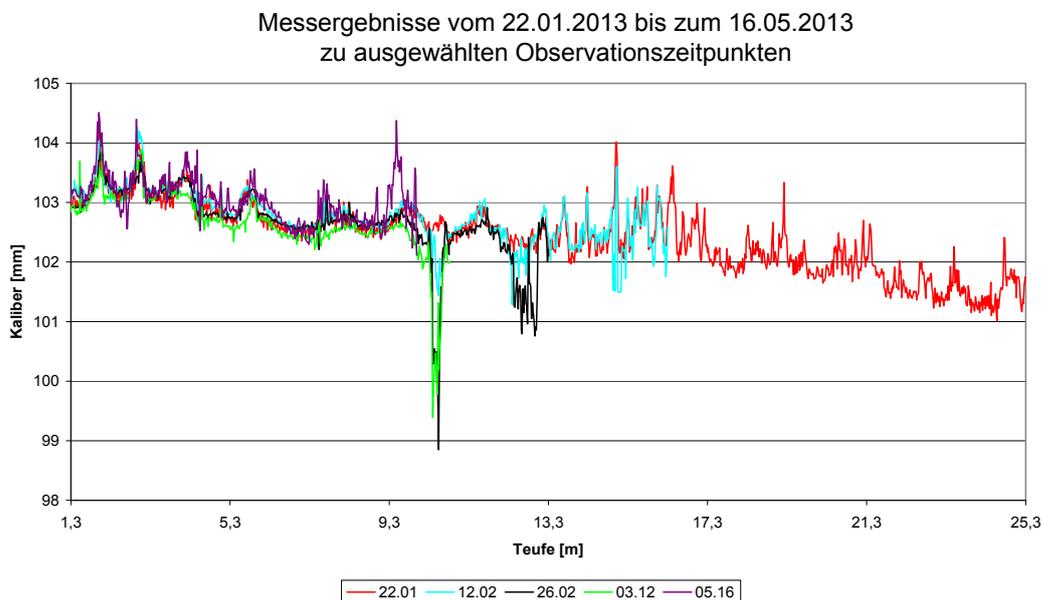


Bild 3.20: Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde: Zusammenstellung der Ausfahrten unter $\varphi = 60^\circ$ für fünf ausgewählte Befahrungstermine im Observationszeitraum vom 22.01.2013 bis zum 16.05.2013 für das Bohrloch DMB-B1

Anmerkung: Aus messtechnischen Gründen ist eine Befahrung des Bohrlochs DMB-B1 im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten mittels der Dreiarmkalibersonde vom ersten Observationstermin an maximal bis in eine Teufe von $t_{BL} \approx 25,3$ m durchgeführt worden. Während die Beschränkung der Kalibermessungen auf bestimmte Teufenbereiche zu den letzten vier Observationsterminen auf den zu den entsprechenden Zeitpunkten innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 vorherrschenden geomechanischen und geohydraulischen Gesamtzustand zurückgeführt werden kann, ist die von Anfang an vorgenommene Beschränkung der durchgeführten Kalibermessungen auf den Teufenbereich vom Bohrlochmund bis in eine Teufe von $t_{BL} \approx 25,3$ m nicht auf eine innerhalb des Bohrlochs eingetretene Verschlechte-



rung der geomechanischen oder geohydraulischen Bedingungen zurückzuführen, sondern lediglich auf eine messtechnische Beschränkung bezüglich der mit dem angewendeten Equipment zu erreichenden Endteufe.

Der Betrachtung aller Messwertgraphen in den Diagrammen in Bild 3.19 und in Bild 3.20 ist zunächst zu entnehmen, dass die von der Dreiarmlibersonde generierten Messergebnisse auf eine teufenabhängige Verjüngung des Bohrlochs vom Bohrlochmund in Richtung des Bohrlochtiefsten hinweisen. Während zu allen Observationszeitpunkten die Messung des Bohrlochkalibers im Bereich des Bohrlochmunds unmittelbar an der Streckenkantur Zahlenwerte von $d_{BL} \approx 103,5$ mm ergeben hat, werden ebenfalls unabhängig vom betrachteten Observationszeitpunkt im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 25,3$ m, bis zu dem die Messungen zu den ersten vier Observationsterminen durchgeführt worden sind, für das Kaliber des Bohrlochs Zahlenwerte im Bereich von $102,0 \text{ mm} < d_{BL} < 102,5$ mm gemessen. Abgesehen von den Messwerten der Dreiarmlibersonde, die zu einigen der Observationstermine im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 10,3$ m und im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,3$ m bis $t_{BL} \approx 13,3$ m aufgezeichnet worden sind, liegen alle innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 gemessenen Kaliberwerte oberhalb des nominellen Durchmessers der Bohrkronen von $d_{BK} = 101,0$ mm. Zurückzuführen ist die Diskrepanz zwischen dem nominellen Durchmesser der Bohrkronen und den von der Dreiarmlibersonde aufgezeichneten Kaliberwerten auf die Tatsache, dass Bohrkronen und Bohrgestänge während des Bohrlochabteufens einer gewissen Dynamik unterliegen, die mit lateralen Bewegungen der Bohrkronen während des Vortriebs in das Gestein hinein einhergeht. In Abhängigkeit von Faktoren wie beispielsweise der Härte und der Abrasivität des durchteuften Gesteins und der Bohrgeschwindigkeit können diese auch als das Schlagen der Bohrkronen bezeichneten lateralen Bewegungen entsprechend stärker oder weniger stark ausfallen.

Während des Abteufens des Bohrlochs unter Verwendung eines Einfachkernrohrs ist es erforderlich, den frisch erbohrten Kern nach dem Abteufen von maximal $\Delta t_{BL} = 2,0$ m aus dem Kernrohr zu entnehmen, weshalb es im Verlauf des Abteufens des $l \approx 30,5$ m langen Bohrlochs DMB-B1 16 mal notwendig gewesen ist, das Bohrgerät zur Entnahme des Bohrkerns aus dem Bohrloch zu entfernen und im Anschluss daran wieder einzubringen. Um ein Festsetzen des Bohrgeräts innerhalb des Bohrlochs zu vermeiden, befinden sich Bohrkronen und Bohrgestänge nicht nur während des Vortriebs tiefer in das Gebirge hinein, sondern auch während der Entnahme und des Wiedereinbringens stets in einer Rotationsbewegung. Daher wird während des gesamten Abteufens ein Teufenbereich umso häufiger von der rotierenden



Bohrkrone durchfahren, je näher er sich am Bohrlochmund befindet. Somit ist davon auszugehen, dass die in den beiden Diagrammen in Bild 3.19 und in Bild 3.20 dokumentierte Verjüngung des Bohrlochs DMB-B1 in Richtung des Bohrlochtieftsten durch den erhöhten Gesteinsabrieb, der bei häufigerem Durchfahren eines Teufenbereichs mit dem Bohrgerät entsteht, zu erklären ist.

Bei der Betrachtung des Diagramms in Bild 3.19 mit der Darstellung der vier Messwertgraphen, die innerhalb der ersten zehn Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 von der Kalibersonde aufgezeichnet worden sind, lässt sich erkennen, dass alle vier Messwertgraphen auf den ersten in etwa 12,3 m einen insgesamt ruhigeren Verlauf aufweisen als auf den darauf folgenden 13 m. Es entsteht beim Betrachten des Diagramms der Eindruck, dass die von der Kalibersonde aufgezeichneten Messwertgraphen innerhalb der im Bereich der tonigen Fazies gelegenen ersten ca. 12,3 m des Bohrlochs DMB-B1 weniger stark oszillieren und auch lokale Minima und Maxima der Messwertgraphen weniger schnell auf einander folgen als im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 12,3$ m und $t_{BL} \approx 17,3$ m sowie im innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich jenseits von $t_{BL} \approx 17,3$ m. So ist beispielsweise im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 15,0$ m in allen vier im Diagramm in Bild 3.19 zu betrachtenden Messwertgraphen innerhalb kürzester Distanz zunächst ein Anwachsen und unmittelbar darauf folgend eine Verkleinerung des gemessenen Bohrlochkalibers um $\Delta d \approx 2$ mm dokumentiert. Innerhalb des Bohrlochabschnitts in der tonigen Fazies lassen sich anhand der von der Kalibersonde innerhalb der ersten zehn Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 generierten Messwerte Veränderungen des gemessenen Bohrlochkalibers innerhalb von kurzen Distanzen von maximal nur $\Delta d \approx 1$ mm identifizieren.

Die größeren Amplituden der Messwertgraphen im Bereich der karbonatreichen und der sandigen Fazies im Vergleich zu den Amplituden der Messwertgraphen im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereich sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf die größere Härte und Abrasivität des Gesteins in den hinteren beiden Gesteinsfaziestypen zurückzuführen. Die größere Gesteinshärte sowie die größere Gesteinsabrasivität könnten demnach während des Abteufens ein stärkeres Schlagen des Bohrgestänges und der Bohrkrone innerhalb der karbonatreichen und der sandigen Fazies verursacht haben, woraus dann eine ungleichmäßigere Beschaffenheit der Bohrlochwand resultiert hat, die sich wiederum in den den Messwertgraphen im Diagramm in Bild 3.19 zu entnehmenden starken Schwankungen innerhalb der beiden tiefer im Gebirge gelegenen Faziesbereiche widerspiegelt.



Unterschiede zwischen den drei vom Bohrloch DMB-B1 durchteuften Faziesbereichen sind anhand der von der Dreiarmkalibersonde generierten Messdaten auch bezüglich der zeitabhängigen Entwicklung zu identifizieren.

Während sich die im inneren Bereich der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereiche von der Dreiarmkalibersonde an den vier unterschiedlichen Observationsterminen innerhalb der ersten zehn Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 aufgezeichneten Messwertgraphen optisch bezüglich ihrer Verläufe deutlich voneinander unterscheiden, weisen die Messwertgraphen im Bereich der karbonatreichen Fazies sehr ähnliche Verläufe auf, wie der Betrachtung von Bild 3.19 entnommen werden kann. Während aus der Betrachtung der zu den ersten vier Observationsterminen aufgezeichneten Messwertgraphen auf eine Aufweitung der Bohrlochkontur im Bereich der tonigen Fazies geschlossen werden kann, scheint die Bohrlochkontur trotz der insgesamt deutlich unruhigeren Verläufe der Messwertgraphen im Bereich der karbonatreichen Fazies innerhalb der ersten zehn Tage des Observationszeitraums nahezu unverändert zu bleiben. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen zeitabhängigen Entwicklungen bezüglich der gemessenen Bohrlochkaliberwerte innerhalb der beiden unterschiedlichen Gesteinsfaziestypen könnte darin liegen, dass das Gestein innerhalb der tonigen Fazies sensibler auf den nach dem Abteufen zeitabhängig einsetzenden Feuchtigkeitsanstieg innerhalb des durch den Bohrvorgang zunächst ausgetrockneten Gesteins in der Umgebung der Kontur des Bohrlochs DMB-B1 reagiert als das Gestein innerhalb der karbonatreichen Fazies. Im Zuge des Feuchtigkeitsanstiegs im Gestein in der Umgebung der Bohrlochkontur kann es zu Aufweichungseffekten (*softening*) an der Bohrlochwand kommen, die es den Messarmen der Kalibersonde erlauben, sich etwas tiefer in das Gestein der Bohrlochwand hinein zu drücken, woraus dann wiederum die Messung von größeren Kaliberwerten resultiert.

Sehr ungleichmäßige und zum Teil sehr stark voneinander differierende Verläufe mit unsystematischen Messwertabweichungen gegenüber der Nullmessung weisen die Messwertgraphen innerhalb der ersten zehn Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 im Bereich der sandigen Fazies auf. Aus den Verläufen der Messwertgraphen lässt sich ersehen, dass es im Bereich der sandigen Fazies zeitabhängig bereits innerhalb der ersten zehn Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 zu Bohrlochkonturaufweitungen und damit einhergehend auch zu zeitabhängig eintretenden Veränderungen des gemessenen Bohrlochkalibers kommt. In den unruhigen Verläufen der Messwertgraphen der ersten vier Observationstermine im Bereich der sandigen Fazies spiegelt sich die innerhalb der sandigen Fazies früh einsetzende



und als stark zu bezeichnende geohydraulische Aktivität wieder, die auch im Rahmen der Videoobservation des Bohrlochs DMB-B1 festgestellt werden konnte und die beispielsweise in der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.15 dokumentiert wird.

Konsequenterweise hat sich die bereits Bild 3.19 zu entnehmende Tendenz bezüglich der zeitabhängigen hydraulischen Entwicklung innerhalb des in der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereichs des Bohrlochs DMB-B1 mit der Ansammlung von freiem Sickerwasser im hinteren Teufenbereich (siehe Tabelle 3.2) derart fortgesetzt, dass zu den späteren vier Observationsterminen, deren zugehörige Messwertgraphen im Diagramm in Bild 3.20 dargestellt sind, keine Befahrung des innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereichs mit der Dreiarmkalibersonde mehr möglich gewesen ist. Insgesamt hat der Zutritt von Sickerwasser in das Bohrloch DMB-B1 in Verbindung mit den einhergehenden geomechanisch-geohydraulisch gekoppelt bedingten Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit und der Bohrlochkontur dazu geführt, dass zum Observationszeitpunkt vier Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 eine Befahrung mit der Dreiarmkalibersonde nur noch bis in den innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich hinein möglich gewesen ist und dass ab dem Observationszeitpunkt sechs Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 nur noch der innerhalb der tonigen Fazies gelegene Teufenbereich mit der Dreiarmkalibersonde befahren werden konnte.

Insgesamt betrachtet lässt sich festhalten, dass für den 17-wöchigen Zeitraum, in dem die acht Befahrungen des innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereichs des Bohrlochs DMB-B1 stattgefunden haben, kein eindeutig identifizierbares systematisches zeitabhängiges Deformationsverhalten der Bohrlochkontur im Sinne von beispielsweise einer Bohrlochkonvergenz festzustellen gewesen ist. Die zu den sieben Wiederholungsmessungsterminen von der Dreiarmkalibersonde gemessenen Kaliberwerte liegen größtenteils oberhalb der im Rahmen der Nullmessung am 22.01.2013 gemessenen Kaliberwerte. Eine Ausnahme stellen die am 12.03.2013 aufgezeichneten Kaliberwerte dar. Der zugehörige grüne Messwertgraph verläuft im Diagramm in Bild 3.20 nahezu durchgängig unterhalb des roten Messwertgraphen der Nullmessung. Da der acht Wochen nach dem Abteufen aufgezeichnete grüne Messwertgraph sich – wenn auch bezüglich der gemessenen Kaliberwerte betragsmäßig nur gering – in seinem Verlauf dennoch deutlich von den weiteren Messwertgraphen unterscheidet, ist nicht auszuschließen, dass die am 12.03.2013 aufgezeichneten Messwerte einem messtechnischen Fehler unterliegen. Messtechnischen Fehler können unter anderem beispielsweise dann zu



Stände kommen, wenn sich plastifiziertes Tongesteinsmaterial an den Messarmen der Kalibersonde festsetzt oder wenn die Messelektronik der Kalibersonde durch am Rumpf der Sonde auskondensierendes Wasser gestört wird. Letzten Endes ist nicht eindeutig aufklärbar, ob die Kalibermessungen vom 12.03.2013 den bezüglich des Deformationsverhaltens der Bohrlochkontur zum entsprechenden Observationszeitpunkt vorherrschenden Zustand repräsentativ widerspiegeln oder ob der bei der Betrachtung des zugehörigen Messwertgraphen in Bild 3.20 entstehende Eindruck einer zwischenzeitlich einsetzenden Bohrlochkonvergenz durch ein messtechnisches Artefakt hervorgerufen worden ist. Mit Sicherheit festzustellen ist, dass die nachfolgend zum Observationstermin am 16.05.2013 durchgeführten Kalibermessungen den Eindruck von einer innerhalb des Bohrlochs ablaufenden Konvergenz nicht bestätigen.

Bezüglich des Tragverhaltens der Bohrlochwand ist festzustellen, dass sich zu den letzten vier Observationsterminen, an denen Messungen mit der Kalibersonde im Bohrloch DMB-B1 durchgeführt worden sind, im Zeitraum zwischen dem 12.02.2013 und dem 16.05.2013 die Entwicklung einer großen Bohrlochkonturaufweitung im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 9,3$ m abzeichnet, sowie, dass darüber hinaus im selben Zeitraum zum einen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,3$ m sowie zum anderen im Übergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Fazies im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 12,3$ m bis $t_{BL} \approx 13,3$ m die Entwicklung zweier Bohrlochquerschnittsverringierungen zu beobachten ist. Die zeitabhängige Entwicklung des Übergangsbereichs zwischen toniger und karbonatreicher Fazies ist im Rahmen der Vorstellung der Ergebnisse der Videoobservation des Bohrlochs DMB-B1 bereits ausführlich anhand der Diskussion der zeitabhängigen Entwicklung innerhalb des Teufenbereichs zwischen $t_{BL} \approx 12,5$ m und $t_{BL} \approx 12,7$ m erfolgt. Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt eine weitere Befassung mit dem Bohrlochtragverhalten in Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B1, für die anhand der Analyse der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde besondere Entwicklungen bezüglich des Bohrlochtragverhaltens anzunehmen sind, mit der Gegenüberstellung von Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde mit ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera.

(c) *Gegenüberstellung von ausgewählten Ergebnissen der Videobefahrungen mit ausgewählten Ergebnissen der Kalibermessungen für das Bohrloch DMB-B1*

Grundsätzlich führen die Befunde aus der Befahrung mit Bohrlochkamera und Kalibersonde für sich allein zwar zu sehr guten ersten Eindrücken von dem Verhalten der Bohrlochkontur,

ergeben aber jeweils gegebenenfalls noch kein eindeutiges bzw. umfassendes Bild von den Vorgängen innerhalb des observierten Bohrlochs. Daher soll im vorliegenden Abschnitt versucht werden, eine Korrelation zwischen den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera und den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde herzustellen, um so zu überprüfen, ob die mehr als qualitativ anzusehenden Befunde aus der Kamerabefahrung durch die quantitativen Befunde aus der Kalibermessung gestützt werden bzw. welche Ursachen die Befunde aus den Kalibermessungen mit Blick auf die Beschaffenheit der Bohrlochwand haben könnten.

Zur Verdeutlichung der Ursachen für die starken Ausschläge der zu den späteren Observationsterminen aufgezeichneten Messwertgraphen werden in Bild 3.21 ausgewählte Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera, die im Rahmen der Befahrung am 16.05.2013 generiert worden sind, den bereits in Bild 3.20 dargestellten Messwertgraphen gegenübergestellt. Insgesamt werden in Bild 3.21 sechs Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom 16.05.2013 vorgestellt. Drei der dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera stammen aus Teufenbereichen, die vorangehend bereits im Rahmen der Vorstellung der Ergebnisse der Bohrlochvideoobservation detailliert betrachtet worden sind. Die drei zuvor bereits in Bild 3.10(h), Bild 3.13(h) und Bild 3.15(h) zu betrachtenden Aufnahmen stammen aus den Teufenbereichen zwischen $t_{BL} \approx 12,5$ m und $t_{BL} \approx 12,7$ m, zwischen $t_{BL} \approx 17,1$ m und $t_{BL} \approx 17,3$ m sowie zwischen $t_{BL} \approx 25,5$ m und $t_{BL} \approx 25,7$ m. Sie sind zur Korrelation der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde um drei weitere Aufnahmen aus den Teufenbereichen zwischen $t_{BL} \approx 9,2$ m und $t_{BL} \approx 9,4$ m, zwischen $t_{BL} \approx 10,2$ m und $t_{BL} \approx 10,4$ m sowie zwischen $t_{BL} \approx 15,2$ m und $t_{BL} \approx 15,4$ m ergänzt worden. Neben der Korrelation der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde ist in Bild 3.21 eine Zuordnung der gemessenen Kaliberwerte zu den drei unterschiedlichen vom Bohrloch DMB-B1 durchteuften Opalinustonfaziestypen zu erkennen. Der innerhalb der tonigen Fazies gelegene Teufenbereich ist orangefarben unterlegt, der innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegene Teufenbereich ist durch eine Hinterlegung mit einem grauen Farbton gekennzeichnet und der Teufenbereich, der innerhalb der sandigen Fazies gelegen ist, wird grafisch durch eine gelbe Kennzeichnung hervorgehoben. Die angenommenen Faziesübergänge sind in Bild 3.21 nicht gesondert farblich hinterlegt worden und sind dementsprechend anhand der weißen Hintergrundfarbe zu identifizieren.

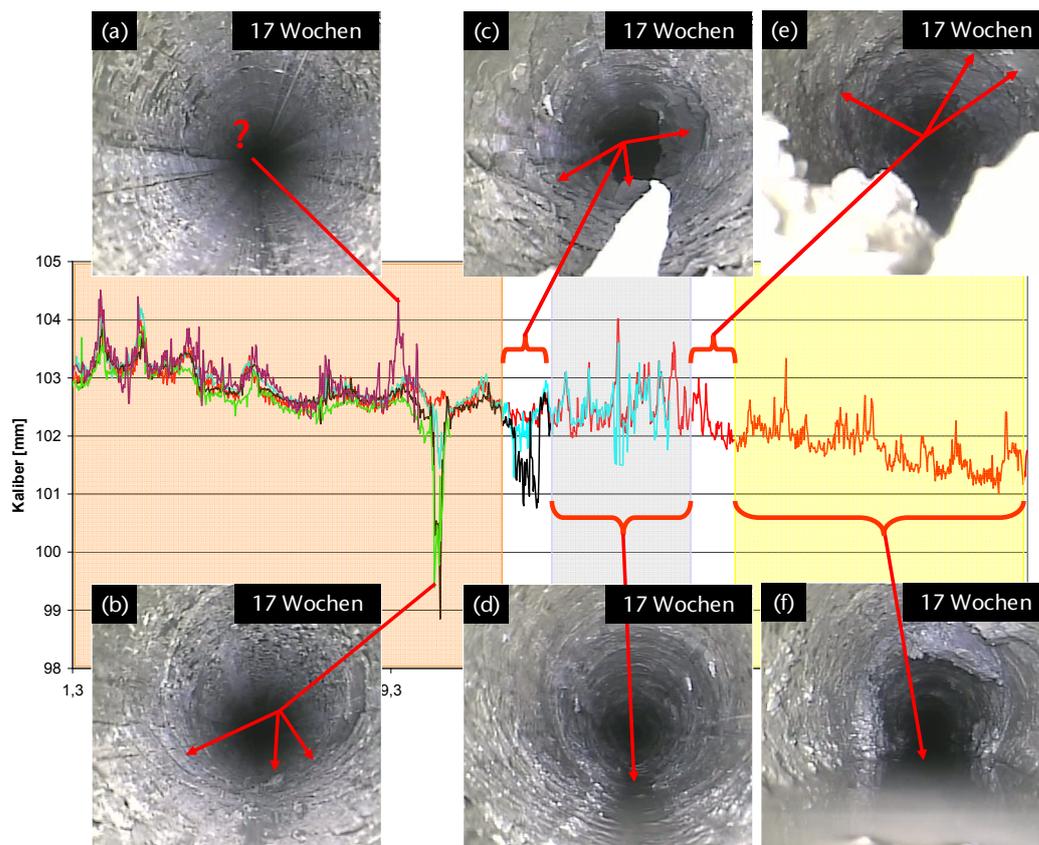


Bild 3.21: Gegenüberstellung von Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde mit ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom Observationszeitpunkt 17 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 (orangefarbenen unterlegter Bereich = tonige Fazies, grau = karbonatreiche Fazies, gelb = sandige Fazies, weiß = Faziesübergangsbereiche)

Anmerkung: Die Zuordnung der Teufenbereiche des Bohrlochs DMB-B1 zu den drei durchteuften Gesteinsfaziestypen erfolgt vereinfachend auf Basis einer Einschätzung, die aus einer Kombination der Ergebnisse der Bohrlochvideoobservation und der Ergebnisse der geologischen Kernaufnahme beruht. Es ist wichtig hervorzuheben, dass es sich bei der Zuordnung der Teufenbereiche des Bohrlochs DMB-B1 zu den drei unterschiedlichen Gesteinsfaziestypen um vorläufige Einschätzungen handelt. Eine präzise Identifikation der Positionen der Gesteinsfaziesgrenzen und der Gesteinsfaziesübergänge ist im Rahmen der in dem vorliegenden Bericht beschriebenen wissenschaftlichen Untersuchungen nicht möglich gewesen.

Anhand der grafischen Gegenüberstellung von ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit den von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichneten Messwerten in Bild 3.21 zeigt sich, dass sich die Ergebnisse der Kalibersondenbefahrungen aus dem Observationszeitraum vom 22.01.2013 bis zum 16.05.2013 für den mehrfach mit der Dreiarmkalibersonde befahrenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B1 zwischen dem Bohrlochmund und



der angenommenen Grenze zur karbonatreichen Gesteinsfazies mit den Ergebnissen der Axial-Bohrlochkamerabefahrung vom 16.05.2013 grundsätzlich gut korrelieren lassen.

Die in Bild 3.21(a) zu betrachtende Aufnahme aus dem Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 9,2$ m und $t_{BL} \approx 9,4$ m visualisiert die vergleichsweise trockenen Bedingungen und die größtenteils standfeste Bohrlochwand im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B1. Die Aufnahme ist zur Darstellung ausgewählt worden, da der Messwertgraph der von der Dreiarmkalibersonde am 16.05.2013 aufgezeichneten Kaliberwerte in einer Teufe von $t_{BL} \approx 9,3$ m einen lokalen Maximalwert von $d_{BL} \approx 104,4$ mm annimmt und der gemessene Kaliberwert in diesem Teufenbereich damit deutlich oberhalb der bei den vorangehenden Befahrungen gemessenen Kaliberwerte liegt. Anhand des in der Darstellung in Bild 3.21(a) zu erkennenden Fragezeichens wird jedoch angedeutet, dass auf Basis der optischen Begutachtung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera kein Hinweis auf die Ursache für die Vergrößerung des am 16.05.2013 in einer Teufe von $t_{BL} \approx 9,3$ m gemessenen Kaliberwertes um $\Delta d_{BL} \approx 1,5$ mm gegenüber den zuvor im selben Teufenbereich gemessenen Kaliberwerten zu identifizieren ist. Es scheint eine Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit für die Vergrößerung des gemessenen Kaliberwerts verantwortlich zu sein, die derart geringfügig ist, dass sie durch den sensiblen Messmechanismus der Dreiarmkalibersonde zwar erfasst wird, jedoch auf Basis der Betrachtung der Aufnahme in Bild 3.21(a) nicht erkennbar ist.

Deutlich auf Basis einer optischen Begutachtung erkennbare Bohrlochkonturveränderungen einschließlich einer Gesteinsabplatzung im Bohrlochstoß sowie Gesteinsabschalungen im Bereich der Bohrlochsohle zeigt die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 10,2$ m und $t_{BL} \approx 10,4$ m in Bild 3.21(b). In den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde deutet sich bereits ab der Befahrung vom 12.02.2013 eine Veränderung der Bohrlochkontur im betreffenden Teufenbereich an. Interessanterweise ergibt die Betrachtung der Messwertgraphen in Bild 3.21, dass die gemessenen Kaliberwerte für den Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 10,3$ m zeitabhängig von Observationstermin zu Observationstermin kleiner werden. Den Haupteinfluss auf die gemessenen Kaliberwerte übt somit nicht die in Bild 3.21(b) zu betrachtende Gesteinsabplatzung aus der Bohrlochwand heraus im Stoß des Bohrlochs DMB-B1 aus, sondern der Messmechanismus der Dreiarmkalibersonde wird primär durch das im Bereich der Bohrlochsohle in den ursprünglichen Bohrlochquerschnitt hineinragende, abschalende Gestein dahingehend beeinflusst, dass im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,3$ m von Observationstermin zu Observationstermin kleinere Kaliberwerte aufge-

zeichnet werden. Aufgrund des in Bild 3.21(b) zu betrachtenden geomechanischen Gesamtzustands der Bohrlochwand ist zum Observationstermin am 16.05.2013 auf eine Befahrung des Bohrlochs DMB-B1 bis in den Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 10,3$ m hinein verzichtet worden.

Bild 3.21(c) entspricht Bild 3.13(h) und zeigt den Zustand der Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B1 im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 17,1$ m und $t_{BL} \approx 17,3$ m am 16.05.2013. Die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.21(c) ist zur Darstellung ausgewählt worden, da sie den stark veränderten Zustand der Bohrlochwand innerhalb des Übergangsbereichs zwischen der tonigen und der karbonatreichen Gesteinsfazies repräsentativ widerspiegelt. Im betrachteten Teufenbereich haben sich 17 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 signifikante Bohrlochkonturveränderungen ergeben. Im gesamten Stoß- und Firstbereich ist es zu Gesteinsabplatzungen gekommen, die zu einer Erweiterung der Bohrlochkontur geführt haben, während innerhalb des Bereichs der Bohrlochsohle aus der Bohrlochwand heraus abgeschaltes Gestein in den ursprünglichen Bohrlochquerschnitt hineinragt. In den Verläufen der Messwertgraphen vom 12.02.2013 und vom 26.02.2013 deuten sich die Bohrlochkonturveränderungen im Übergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Gesteinsfazies deutlich an. Interessanterweise dominieren auch im in Bild 3.21(c) zu betrachtenden Teufenbereich die Gesteinsabschalungen mit dem in den ursprünglichen Bohrlochquerschnitt hineinragenden Gestein sowie gegebenenfalls im Bereich der Bohrlochsohle aufgehäuftes loses Gesteinshaufwerk wie schon im zuvor diskutierten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,3$ m die Messungen mit der Dreiarmkalibersonde, so dass aus den zeitabhängig eintretenden Bohrlochkonturveränderungen kleinere von der Dreiarmkalibersonde gemessene Kaliberwerte resultieren.

Nach dem 12.02.2013 ist keine weitere Befahrung des innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereichs des Bohrlochs DMB-B1 mehr möglich gewesen. Wie die Aufnahme in Bild 3.21(d) veranschaulicht, ist dafür jedoch nicht der Zustand der Bohrlochwand innerhalb des Teufenbereichs in der karbonatreichen Fazies verantwortlich, sondern die Verschlechterung des Zustands der Bohrlochwand in den zuvor diskutierten und in Bild 3.21(b) und Bild 3.21(c) dargestellten, der karbonatreichen Fazies vorgelagerten Teufenbereichen. Bild 3.21(d), das die Aufnahme mit der Abbildung des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 15,2$ m bis $t_{BL} \approx 15,4$ m zeigt, steht stellvertretend für den bis zum Ende des Observationszeitraums relativ guten Zustand der Bohrlochwand innerhalb des in der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitts mit nur sehr wenigen kleineren Bohrlochwandabschalungen und einer leichten Feuchtigkeitsansammlung im Bereich der Bohrlochsohle.



Ein komplett anderes Bild bezüglich des Zustands der Bohrlochwand zeichnet die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.21(e). Die Aufnahme ist bereits in Bild 3.13(h) dargestellt worden und zeigt den Zustand der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 17,1$ m und $t_{BL} \approx 17,3$ m zum Observationszeitpunkt 17 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1. Wie Bild 3.21 zu entnehmen ist, befindet sich der Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 17,1$ m und $t_{BL} \approx 17,3$ m im Übergangsbereich zwischen der karbonatreichen und der sandigen Gesteinsfazies. Aufgrund der zeitnah nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B1 einsetzenden, vorangehend bereits ausführlich im Rahmen der Beschreibung der Ergebnisse der Videoobservationsarbeiten beschriebenen zeitabhängigen Verschlechterung des Zustands der Bohrlochwand ist eine Befahrung des Bohrlochs DMB-B1 bis in den Übergangsbereich zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies hinein bereits zum Observationszeitpunkt am 12.02.2013 nicht mehr möglich gewesen.

Zum Abschluss der Gegenüberstellung von Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde mit Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera wird in Bild 3.21(f) die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera, die bereits in Bild 3.15(h) zu betrachten ist, erneut dargestellt. Die Aufnahme zeigt eindrucksvoll die großen Mengen von Sickerwasser, die sich zum Observationszeitpunkt am 16.05.2013 im Bereich der Bohrlochsohle in den tiefer gelegenen Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B1 aufgestaut haben. In Bild 3.21 ist die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera mit der großen Menge von aufgestautem Sickerwasser als repräsentativ für den gesamten innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich mit der dort zu beobachtenden großen Menge von dem Bohrloch DMB-B1 zeitabhängig zugetretenem Sickerwasser zu betrachten. Die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.21(f) liefert somit zusätzlich zu den zuvor diskutierten Gesteinsabplatzungen und Bohrlochwandabschalungen in den vorgelagerten Teufenbereichen eine weitere Begründung dafür, weshalb bereits zum Observationstermin am 12.02.2013 keine Befahrung des innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereiches mit der Dreiarmkalibersonde mehr möglich gewesen ist.

3.1.5 Ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B2

(a) Übersicht

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen des schräg nach oben, etwa senkrecht zur einfallenden Schichtung verlaufenden Bohrlochs DMB-B2 vorgestellt und erläutert. In Bild 3.22, Bild 3.25, Bild 3.28 und Bild 3.30 ist jeweils die zeitliche Entwicklung

von einem von insgesamt vier unterschiedlichen und hier näher betrachteten Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B2 anhand einer aus jeweils sechs zu unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgenommenen Bildern bestehenden Bildfolge dokumentiert. Dabei sind wie zuvor auch schon für das Bohrloch DMB-B1 vier im Lauf der Zeit in sehr unterschiedlich starkem Maß von Bohrlochkonturveränderungen betroffene Teufenbereiche zur näheren Betrachtung im Rahmen der Ergebnisdiskussion ausgewählt worden. Der erste der nachfolgend diskutierten Teufenbereiche befindet sich innerhalb der tonigen Fazies, der zweite Teufenbereich liegt im Übergangsbereich von der tonigen in die karbonatreiche Fazies, während sich der dritte Teufenbereich im Übergangsbereich zwischen der karbonatreichen und der sandigen Fazies befindet und der vierte nachfolgend dargestellte Teufenbereich innerhalb der karbonatreichen Fazies positioniert ist.

(b) Bohrlochbereich 1 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m / tonige Fazies

Bild 3.22 zeigt zunächst die zeitabhängige Entwicklung des Bohrlochs DMB-B2 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m.

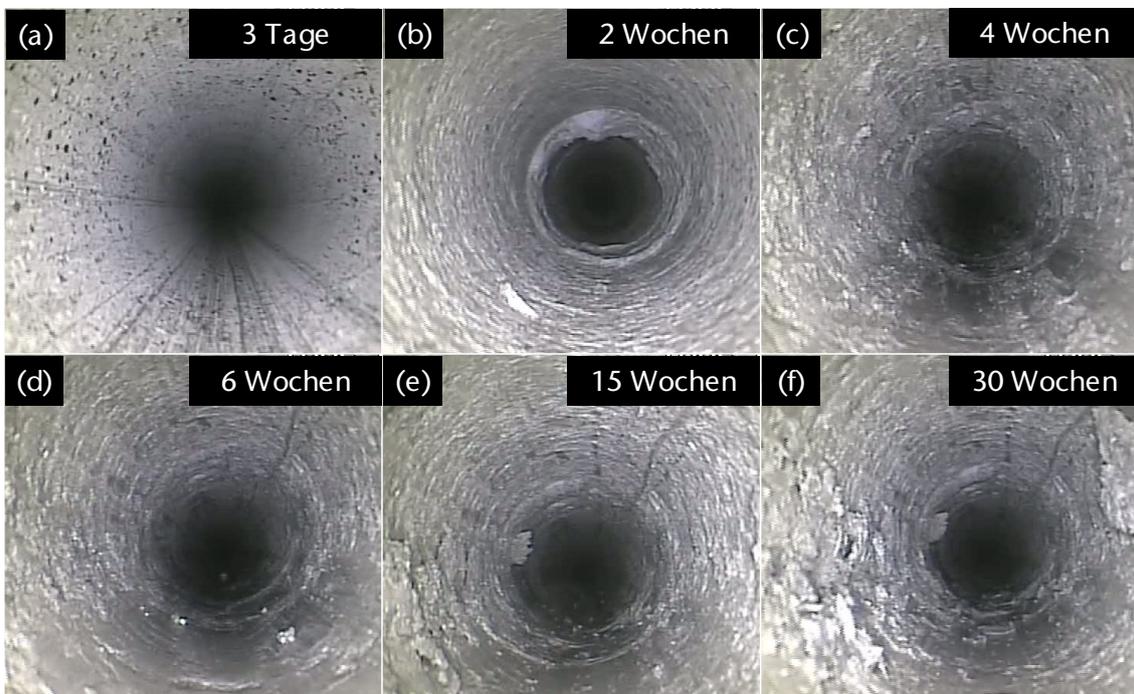


Bild 3.22: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m des Bohrlochs DMB-B2; Ausbildung einer ringförmig um die Bohrlochkontur herumreichenden Gesteinsabschalung und Ausbildung von zusätzlichen Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen

Die Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B2 erweist sich im dargestellten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m ausschließlich zum ersten Observationstermin drei Tage nach dem Beginn des Abteufens als trocken und vollständig standfest. Wie der Betrachtung von Bild 3.22(b) entnommen werden kann, haben sich bereits zwei Wochen nach dem Abteufen signifikante Veränderungen innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m ergeben. Insgesamt wirkt die Bohrlochwand feucht und es deuten sich innerhalb des gesamten auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zu erkennenden Teufenbereiches Bohrlochwandauflockerungen an. Im zentralen Bildbereich ist eine ringförmig um die gesamte Bohrlochkontur herumreichende Gesteinsabschalung aus der Bohrlochwand heraus zu erkennen. Bild 3.23 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.22(b) mit einer grafischen Hervorhebung der kreisförmigen Gesteinsabschalung und der sich andeutenden Gesteinsauflockerungen.

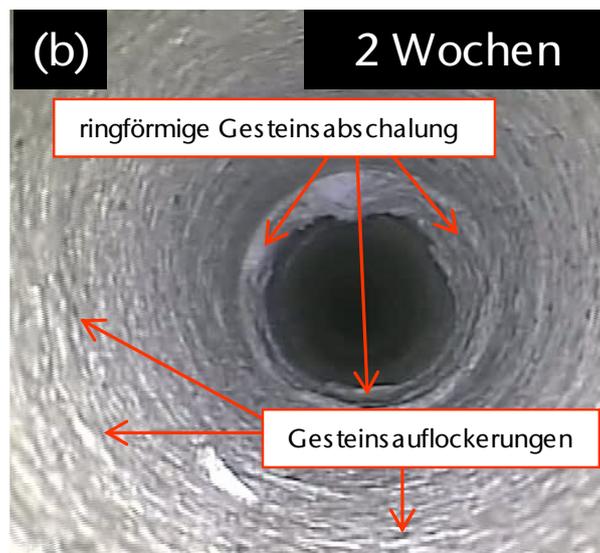


Bild 3.23: Grafische Kennzeichnung der ringförmigen Gesteinsabschalung sowie der sich andeutenden Gesteinsauflockerungen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m des Bohrlochs DMB-B2

Wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.22(b) bis Bild 3.22(f) entnommen werden kann, bleibt der hohe Feuchtigkeitsgehalt innerhalb des Gesteins der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m über den gesamten 30 Wochen lang andauernden Observationszeitraum bestehen. Zwar erweist sich die Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m über den 30-wöchigen Observationszeitraum hinweg als insgesamt standfest, allerdings kommt es neben der bereits in Bild 3.22(b) zu betrachtenden ringförmigen Gesteinsabschalung zu weiteren signifikanten Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen des Bohrlochs DMB-B2. Während die bereits zwei Wochen nach

dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 zu betrachtende, ringförmig um die Bohrlochkontur herum angeordnete Gesteinsabschalung sich nicht weiter zu vergrößern scheint, kann der Betrachtung von Bild 3.22(b) bis Bild 3.22(f) entnommen werden, wie die Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen sich zeitabhängig von Observationstermin zu Observationstermin stärker ausbilden, bis aus den geringfügigen Gesteinsauflockerungen, die auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.22(b) zu betrachten sind, schließlich 28 Wochen später die Bild 3.22(f) zu entnehmenden Gesteinsabschalungen geworden sind. Eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.22(f) mit einer grafischen Kennzeichnung der ringförmigen Gesteinsabschalung und der weiteren Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen des Bohrlochs DMB-B2 kann Bild 3.24 entnommen werden.



Bild 3.24: Grafische Kennzeichnung der ringförmigen Gesteinsabschalung sowie der sich andeutenden weiteren Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m des Bohrlochs DMB-B2 zum Ende des 30-wöchigen Observationszeitraums

Deutlich ist der Betrachtung von Bild 3.22(f) zu entnehmen, wie sich die Gesteinsabschalungen in den Stößen des Bohrlochs DMB-B2 kontinuierlich erweitert haben, während die ringförmige Gesteinsabschalung in ihrer Entwicklung stagniert hat und bedingt durch die Tatsache, dass das im Bereich der ringförmigen Gesteinsabschalung in den ursprünglichen Bohrlochquerschnitt hineinragende, lose und aufgeweichte Gesteinsmaterial im Rahmen der Videoobservationsarbeiten von der Axial-Bohrlochkamera erfasst und in tiefer im Gebirge gelegene Teufenbereiche mitgeschleppt worden ist, optisch eher weniger stark ausgeprägt wirkt.

- (c) Bohrlochbereich 2 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m / Übergangsbereich von der tonigen zur karbonatreichen Fazies

Die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand in einem weiteren Bohrlochabschnitt im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m des Bohrlochs DMB-B2 ist in Bild 3.25 dargestellt.

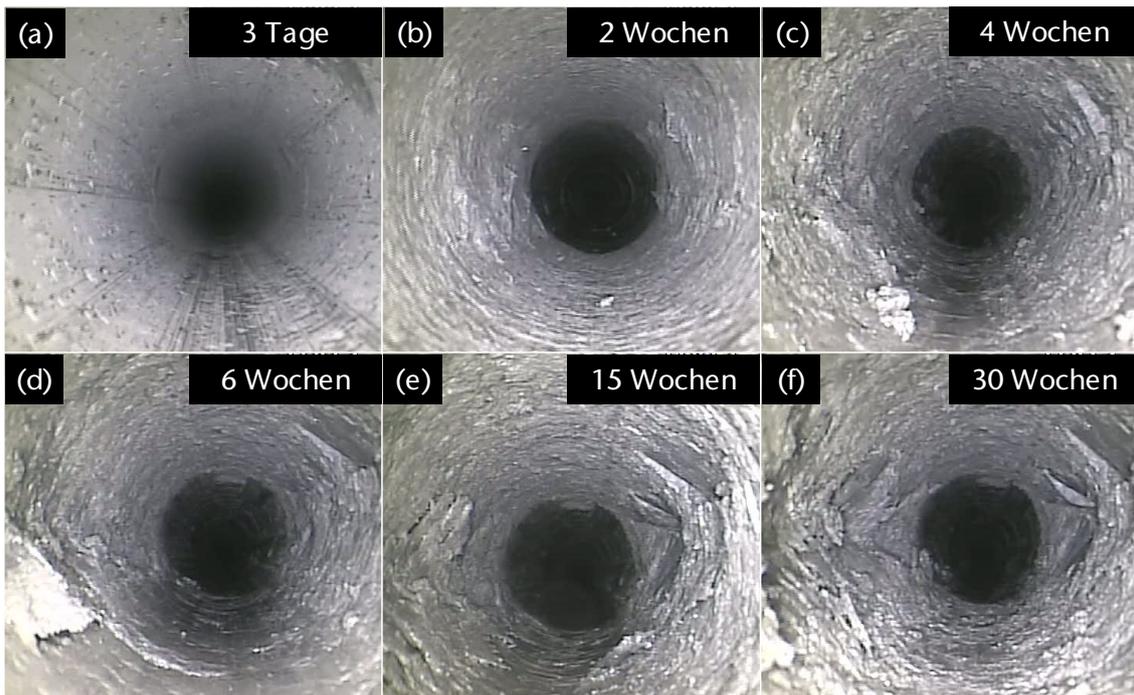


Bild 3.25: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m des Bohrlochs DMB-B2; Ausbildung von signifikanten Gesteinsabschalungen in den Bohrlochstoßbereichen im Bereich des Faziesübergangs zwischen toniger und karbonatreicher Fazies

Wie auch in dem zuvor beschriebenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m ist es zum Observationszeitpunkt zwei Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 zu einer optisch feststellbaren Erhöhung der Feuchtigkeit im Gestein der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m gekommen. Die Erhöhung des Feuchtegehaltes im Gestein der Bohrlochwand wirkt sich im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m allerdings schneller und stärker aus als im zuvor betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m. Während im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,2$ m 14 Tage nach dem Abteufen in den Bohrlochstößen nur minimale Gesteinsauflockerungen sichtbar sind, wie der Betrachtung von Bild 3.23 zu entnehmen ist, zeigt die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.25(b) zum selben Observationszeitpunkt bereits deutlich erkennbare Abschalungen

von Gestein aus der Bohrlochwand heraus. Die stärkeren anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera feststellbaren Gesteinsabschalungen zum identischen Observationszeitpunkt lassen darauf schließen, dass im Übergangsbereich zwischen der tonigen und der karbonatreichen Opalinustonfazies möglicherweise der Feuchtigkeitsanstieg im Gestein entlang der Bohrlochwand schneller erfolgt und / oder dass das Gestein im Bereich des Faziesübergangs gegebenenfalls eine geringere Festigkeit oder eine höhere hydraulische Sensitivität besitzt. Bild 3.25(b) wird in Bild 3.26 einschließlich einer grafischen Kennzeichnung der bereits 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 eingetretenen Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit vergrößert dargestellt.

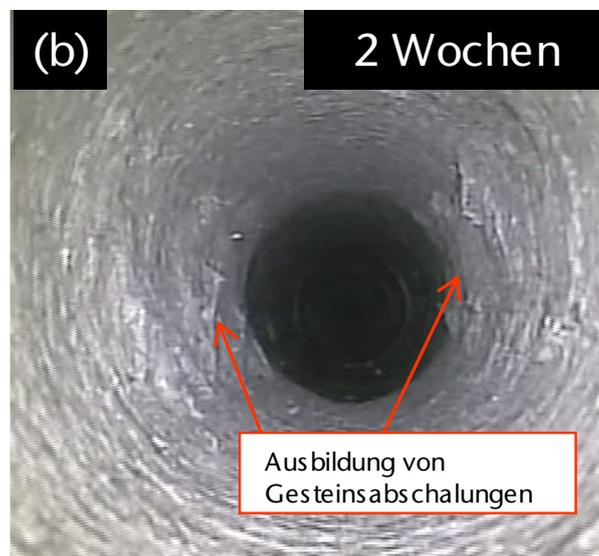


Bild 3.26: Beginn der Ausbildung von signifikanten Gesteinsabschalungen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m des Bohrlochs DMB-B2 in den Bohrlochstoßbereichen in unmittelbarer Nähe zum Faziesübergang zwischen toniger und karbonatreicher Fazies 14 Tage nach dem Abteufen

Die weitere Entwicklung der Auswirkungen der starken Zunahme des Wassergehalts des Gesteins im Bereich der Bohrlochwand wird bei der Betrachtung von Bild 3.25(c) deutlich. In den zwei Wochen zwischen dem Observationszeitpunkt zwei Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 mit der dazugehörigen in Bild 3.25(b) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera und dem Observationszeitpunkt vier Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 mit der in Bild 3.25(c) dargestellten dazugehörigen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera ist es im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m zu weiteren Veränderungen der Gesteinsbeschaffenheit und damit auch der Bohrlochkontur gekommen. Sehr wahrscheinlich bedingt durch den Anstieg des Wassergehaltes im bereits mechanisch entfes-

tigten Gestein im Bereich der Bohrlochwand haben sich im Gestein zusätzlich Aufweicheffekte (*softening*) ergeben, die zu einer verstärkten Verminderung der Festigkeit des Opalinustons geführt haben. Infolge der Abminderung des Tragvermögens ist es dem Gestein nicht mehr möglich, insbesondere in den Stoßbereichen des Bohrlochs DMB-B2 die Beanspruchung aus dem induzierten Sekundärspannungszustand zu ertragen und es ergeben sich die in Bild 3.25(c) zu erkennenden, stark ausgeprägten Abschalungen in den Stoßbereichen des Bohrlochs.

In Bild 3.25(c) bis Bild 3.25(f) zeigt sich, wie die Abschalungen von Gestein aus der Bohrlochwand heraus sich im Observationszeitraum zwischen der vierten Woche und der 30. Woche nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 weiter fortsetzen, wodurch im Lauf der Zeit die Kontur des Bohrlochs DMB-B2 im betrachteten Bereich stetig aufgeweitet wird.

Bei der Betrachtung der in Bild 3.25 dargestellten Bildfolge ist zu berücksichtigen, dass der hier gezeigte Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B2 sich, wie bereits erwähnt, genau am Übergang zwischen der tonigen Fazies und der karbonatreichen Fazies des Opalinustons befindet. Wie Bild 3.27 zu entnehmen ist, sind die beiden Tongesteinsfaziestypen sehr wahrscheinlich durch eine signifikant unterschiedliche Sensitivität gegenüber Feuchtigkeitsanstiegen und Wasserzutritten gekennzeichnet, woraus wiederum ein grundsätzlich unterschiedliches zeitabhängiges hydraulisch-mechanisch gekoppeltes Verhalten des Gesteins in den beiden unterschiedlichen Faziesbereichen resultiert.

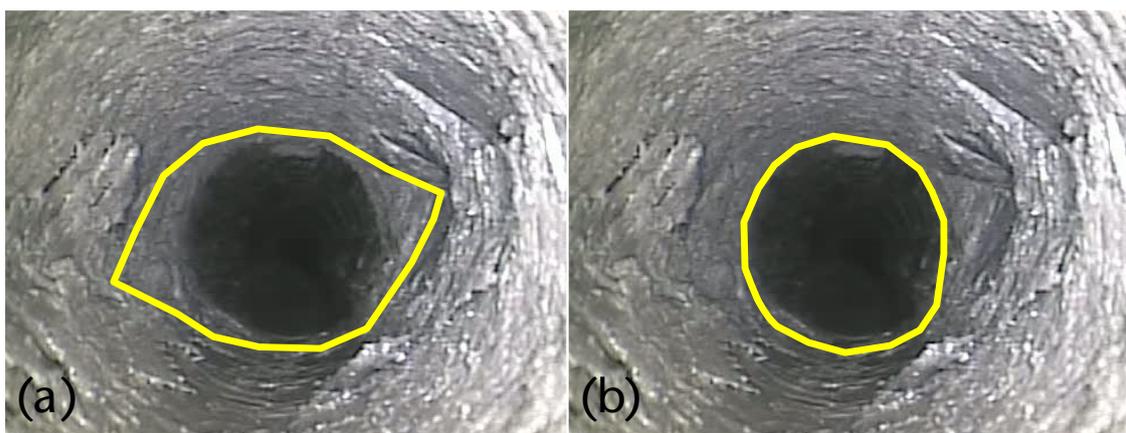


Bild 3.27: Detaildarstellung des Übergangs von der tonigen Opalinustonfazies in die karbonatreiche Opalinustonfazies im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m des Bohrlochs DMB-B2 zum Observationszeitpunkt 15 Wochen nach dem Abteufen mit (a) einer kirsch kernartigen Aufweitung der Bohrlochkontur in der tonigen Fazies und (b) einer standfesten und somit auch nach 15 Wochen noch annähernd kreisförmigen Kontur in der karbonatreichen Fazies

In Bild 3.27 ist genau der Bohrlochabschnitt dargestellt, in dem es in den ersten zwei Wochen des Observationszeitraums zunächst zu kleineren Abschaltungen von Gestein aus der Bohrlochwand heraus gekommen ist, bevor anschließend ab der vierten Woche des Observationszeitraums signifikante, die Bohrlochkontur nachhaltig verändernde Gesteinsabschaltungen aus den Stoßbereichen des Bohrlochs DMB-B2 heraus zu beobachten gewesen sind. In Bild 3.27(a) ist die bruchhafte, kirsch kernförmige Aufweitung der Bohrlochkontur des Bohrlochs DMB-B2 im Bereich der tonigen Fazies durch die gelbe Linie nachgezeichnet, während in Bild 3.27(b) die nach 15 Wochen und darüber hinaus auch bis zum Ende des 30-wöchigen Observationszeitraums standfeste und immer noch annähernd kreisrunde Kontur des Bohrlochs DMB-B2 im Bereich der karbonatreichen Fazies ebenfalls durch eine gelbe Linie hervorgehoben wird. Anhand der vergleichenden Betrachtung von Bild 3.27(a) und Bild 3.27(b) verdeutlicht sich, dass die signifikanten Veränderungen der Bohrlochkontur und der Bohrlochwandbeschaffenheit sich allerdings auf den innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereich beschränken, während das Gestein innerhalb der karbonatreichen Fazies eine deutlich höhere Standfestigkeit aufweist. Zwar sind auch in der karbonatreichen Fazies Aufweichungen des Opalinustons einhergehend mit Abschaltungen von Gestein aus der Bohrlochwand zu erkennen, jedoch erscheinen diese Konturentfestigungen wesentlich schwächer ausgeprägt zu sein als die Abschaltungen von Gestein aus der Bohrlochwand im Bereich der tonigen Fazies. Diese Beobachtung führt zu der Schlussfolgerung, dass die Festigkeit des Opalinustons und somit auch die Standfestigkeit der Bohrlochwand in der karbonatreichen Fazies deutlich weniger durch den Feuchtigkeitszutritt beeinträchtigt worden ist als in der tonigen Fazies. Von einer nahezu identischen mechanischen Beanspruchung des Gesteins im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,1$ m bis $t_{BL} \approx 7,3$ m in der Umgebung des Bohrlochs DMB-B2 innerhalb der tonigen sowie innerhalb der karbonatreichen Fazies darf aufgrund der unmittelbaren räumlichen Nachbarschaft wohl ausgegangen werden.

Eine weitere wertvolle geomechanische Information, die Bild 3.27(a) entnommen werden kann, ist die nicht horizontal verlaufende Ausrichtung der Verbindungslinie zwischen den beidseitig voranschreitenden Bruchfronten der Bohrlochrandausbrüche. Bei dem nicht horizontalen Verlauf der Verbindungslinie zwischen den Bruchfronten in den Stoßbereichen innerhalb der tonigen Fazies handelt es sich um ein Phänomen, das bereits im Rahmen von vorangehenden Felduntersuchungen observiert worden ist und das im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* bereits detailliert beschrieben worden ist. Des Weiteren sei vorausgenommen, dass sich ein ähnliches Bruchbild der Bohrlochwand auch innerhalb der in der Umgebung der



Faziesübergangsbereiche zwischen toniger und karbonatreicher Fazies gelegenen Teufenbereiche des nachfolgend vorgestellten Bohrlochs DMB-B3 ergeben hat. Auf die Parallelitäten bezüglich der Ausbildung des Bohrlochwandversagens im Faziesübergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Fazies in den insgesamt vier im Rahmen dieses Berichtes und im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* vorgestellten Bohrlöchern, die schräg nach oben in den südlichen Stoß der Niche MI geteuft worden sind und die somit den Faziesübergang zwischen toniger und karbonatreicher Fazies näherungsweise orthogonal durchteufen, wird im Anschluss an die Vorstellung der innerhalb des aktuellen Vorhabens generierten Observationsergebnisse noch gesondert eingegangen.

Die vorstehend vorgestellten, aus den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera ausgewählten Beispiele zeigen eindrucksvoll, wie stark das beobachtete zeitabhängige Trag- und Deformationsverhalten des Tongesteins im Bohrloch DMB-B2 zunächst faziesbezogen (tonige Fazies und karbonatreiche Fazies) und dann auch innerhalb derselben Opalinustonfazies (tonige Fazies) variiert und wie stark das mechanische Verhalten durch hydraulische Prozesse beeinflusst wird. Die Gründe für das unterschiedliche fazielle Verhalten können vielfältig sein. Neben einer möglicherweise inhomogenen Beschaffenheit des Opalinustons auch innerhalb der tonigen Fazies bezüglich seiner geomechanischen Eigenschaften und daraus resultierender unterschiedlich intensiver Konturentfestigungen können unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeiten insbesondere in den Schichtflächen und vielleicht auch unterschiedliche hydraulische Gradienten je nach Position des betrachtenden Bohrlochabschnitts in Bezug auf die aufgefahrene Niche MI sowie gegebenenfalls auch unterschiedliches Quellverhalten (*swelling*) und Aufweichungsverhalten (*softening*) in den einzelnen Abschnitten des Bohrlochs DMB-B2 für das von Bohrlochabschnitt zu Bohrlochabschnitt und durchweg auch zeitabhängig variierende Tragverhalten verantwortlich sein. Allerdings sollten und konnten die Ursachen der teufenabhängigen Variationen des Tragverhaltens im Bohrloch DMB-B2 im Rahmen dieses Vorhabens nicht identifiziert werden. Hierzu besteht bereits aufgrund der hier bislang vorgestellten Beobachtungen grundsätzlich noch erheblicher weiterer Forschungsbedarf außerhalb des Rahmens dieses Vorhabens.

- (d) Bohrlochbereich 3 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m / Faziesübergang von der karbonatreichen zur sandigen Fazies

Anhand der in Bild 3.28 dargestellten Bildfolge kann die zeitabhängige Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit in dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m nachvollzogen werden.

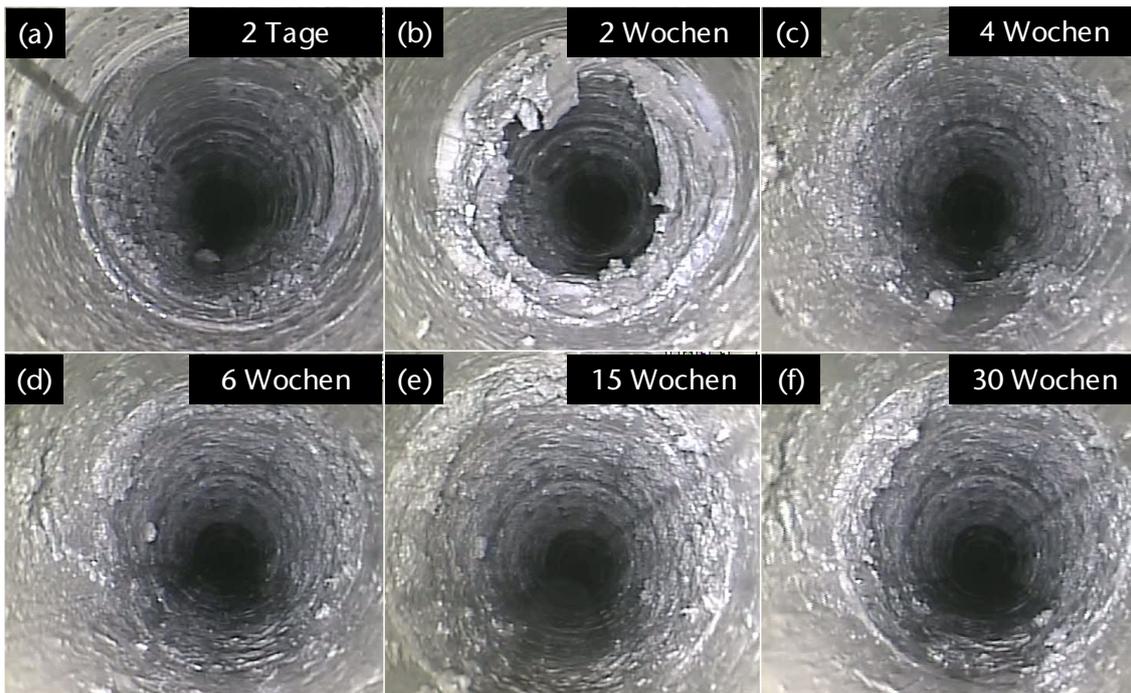


Bild 3.28: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m des Bohrlochs DMB-B2; Ausbildung einer signifikanten, ringförmig entlang der Bohrlochkontur verlaufenden Gesteinsabschälung und zeitnah nach dem Abteufen einsetzender Feuchtigkeitszutritt im Bereich des Faziesübergangs zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies

Anmerkung: Die hier getroffene Aussage, es handele sich bei dem in Bild 3.28 zu betrachtenden Teufenbereich um den Faziesübergangsbereich zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies, beruht auf einer Einschätzung, die auf Basis der in den Bohrlochern DMB-B1 und DMB-B2 durchgeführten Videoobservationsarbeiten getroffen worden ist. Auf Basis der durch einen Geologen durchgeführten Bohrkernaufnahme ist keine Lokalisierung des Faziesübergangs zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies möglich gewesen, da es im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 9,0$ m bis $t_{BL} \approx 14,0$ m beim Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 zu größeren Kernverlusten im Größenordnungsbereich von mehreren Metern gekommen ist und somit kein durchgängiges Kernmaterial zur Begutachtung zur Verfügung gestanden hat. Insgesamt stellen die großen Kernverluste während des Bohrprozesses ein Indiz für das Vorhan-

densein einer oder mehrerer Schwächezonen innerhalb des Gebirges in der Umgebung des Faziesübergangs zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies dar.

Ersichtlich bei der Betrachtung von Bild 3.28(a) ist die Tatsache, dass sich die Beschaffenheit des Gestein der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m teufenabhängig verändert. Bild 3.29 zeigt eine Vergrößerung von Bild 3.28(a) mit einer grafischen Hervorhebung der sich bereits zwei Tage nach dem Abteufen des betrachteten Teufenbereichs ausbildenden ringförmigen Gesteinsabschalung, des dem betrachteten Teufenbereich zuzickernden Wassers und der unterschiedlichen Beschaffenheit des Gesteins vor und hinter der ringförmigen Gesteinsabschalung.

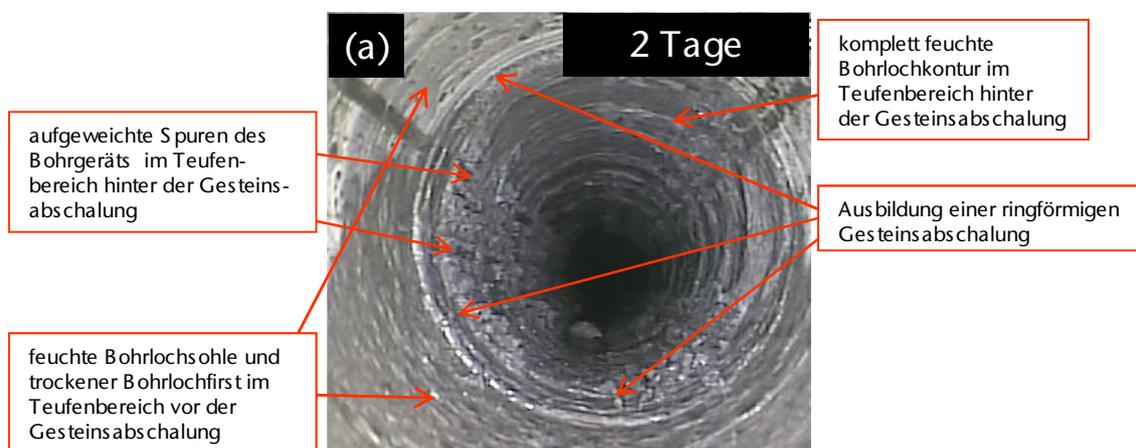


Bild 3.29: Beginn der Ausbildung einer signifikanten, ringförmig entlang der Bohrlochkontur verlaufenden Gesteinsabschalung und zeitnah nach dem Abteufen einsetzender Feuchtigkeitszutritt im Bereich des Faziesübergangs zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m des Bohrlochs DMB-B2

Nicht im Rahmen des durchgeführten Vorhabens zu klären gewesen ist die Frage, ob die Beschaffenheitsänderung des Gesteins in der Bohrlochwand, die bei der Betrachtung von Bild 3.28(a) zu erkennen ist, auf einen Fazieswechsel, auf eine Schwächezone im Gebirge oder auf unterschiedlich starke hydraulische Aktivitäten in den unterschiedlichen Teufenbereichen zurückzuführen ist. Tatsächlich anhand der Betrachtung von Bild 3.28(a) feststellbar ist ausschließlich der Sachverhalt, dass das Gestein im Teufenbereich hinter der sich ausbildenden ringförmigen Gesteinsabschalung zum ersten Observationszeitpunkt zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 bereits deutlich stärker aufgeweicht ist als das in Bild 3.28(a) im Teufenbereich vor der sich ausbildenden ringförmigen Gesteinsabschalung zu betrachtende Gestein. In der vergrößerten Darstellung von Bild 3.28(a) in Bild 3.29 sind entlang

der Bohrlochwand in Richtung der Bohrlochlängsachse verlaufende Spuren grafisch hervorgehoben. Bei den grafisch hervorgehobenen Spuren handelt es sich nicht um Spuren der Dreiarmkalibersonde, da zum Zeitpunkt der Entstehung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 noch keine Befahrung mit der Dreiarmkalibersonde stattgefunden hat. Vielmehr handelt es sich um Spuren, die im Rahmen des Bohrlochabteufens beim Herausziehen des Bohrgeräts zur Kernentnahme sowie beim anschließenden Wiedereinbringen des Bohrgeräts entstanden sind. Wie der Betrachtung von Bild 3.28(a) bzw. Bild 3.29 entnommen werden kann, sind die Spuren des Bohrgeräts im hinteren Bohrlochbereich deutlich stärker aufgeweicht als im vorderen Bereich des auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera erkennbaren Bohrlochabschnitts. Des Weiteren scheint zum Observationszeitpunkt zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 der hintere Bereich des erkennbaren Bohrlochabschnitts auch ansonsten deutlich stärker von einer feuchtebedingten Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit betroffen zu sein. So sind beispielsweise bereits kleinere Mengen plastifizierten Tongesteins, die sich lose im Bereich der Bohrlochsohle angesammelt haben, im hinteren Bohrlochbereich in Bild 3.29 zu erkennen.

Weiter ist der Betrachtung von Bild 3.29 zu entnehmen, dass das Gestein im Bohrlochbereich hinter der sich ausbildenden ringförmigen Gesteinsabschalung zwei Tage nach dem Abteufen bereits entlang der gesamten Bohrlochkontur einschließlich des Bohrlochfirstes durchfeuchtet ist, während im Bohrlochbereich vor der sich ausbildenden ringförmigen Gesteinsabschalung der Bohrlochfirst bei der Betrachtung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.29 noch trocken erscheint.

Anmerkung: Auf Basis der bis zu diesem Zeitpunkt zur Auswertung der mittels der verwendeten Videoobservationstechnologie generierten Aufnahmen vorliegenden Erfahrungen wird hier davon ausgegangen, dass es sich bei den auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera hellgrau und matt erscheinenden Bohrlochkonturbereichen um trockene Bohrlochkonturbereiche handelt, während es sich bei den auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera dunkler wirkenden und teilweise reflektierenden Bohrlochkonturbereichen um bereits von zusickerndem Wasser durchfeuchtete Bohrlochkonturbereiche handelt.

Die Tatsache, dass im vorderen in Bild 3.29 zu betrachtenden Bereich das Gestein im Bereich der Bohrlochsohle durchfeuchtet ist, während das Gestein im Bereich des Bohrlochfirstes noch trocken erscheint, legt in Kombination mit der Tatsache, dass im Bohrlochbereich hinter

der sich ausbildenden ringförmigen Gesteinsabschalung das Gestein entlang der kompletten Bohrlochkontur durchfeuchtet ist, die Vermutung nahe, dass Gebirgswasser im hinteren Bohrlochbereich dem an der Bohrlochkontur gelegenen Gestein Zutritt und anschließend dem Einfluss der Schwerkraft folgend in den vorderen zu betrachtenden Bohrlochbereich heruntersickert. Das auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom Observationstermin zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 zu betrachtende hydraulische Szenario stellt somit ein Indiz für das Vorhandensein von höheren hydraulischen Leitfähigkeiten in den tiefer im Gebirge liegenden Gebirgsbereichen dar. Nicht abschließend zu klären gewesen ist im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten, ob die stärkeren Feuchtigkeitszutritte in den tiefer im Gebirge gelegenen Bohrlochbereichen auf grundsätzlich höhere hydraulische Leitfähigkeiten im Bereich der sandigen Fazies oder auf das Vorhandensein von diskreten hydraulischen Wegsamkeiten wie beispielsweise im Gebirge eingeschlossenen Sandlagen (*sandy layers*) zurückzuführen ist. Diesbezüglich werden derzeit von der Nagra im Rahmen des *Wet-Spot-Experimentes* Untersuchungen unter anderem in zwei im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* vorgestellten und vorangehend vom LfD&G observierten Bohrlöchern durchgeführt.

Verglichen mit den bereits zwei Tage nach dem Abteufen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m observierbaren hydraulischen Aktivitäten und Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit verläuft die weitere Entwicklung innerhalb des betrachteten Bohrlochbereichs eher unspektakulär. Der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.28(b) ist zu entnehmen, dass zum Observationszeitpunkt zwei Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 das Gestein entlang der gesamten Bohrlochkontur im kompletten auf der Aufnahme zu betrachtenden Bohrlochbereich durchfeuchtet ist und dass sich darüber hinaus die sich in Bild 3.28(a) andeutende ringförmige Gesteinsabschalung deutlich stärker ausgebildet hat. Aus der Bohrlochwand herausgelöstes Gestein ragt weit in den ursprünglichen Bohrlochquerschnitt hinein. Wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.28(c) bis Bild 3.28(f) entnommen werden kann, führt die zu beobachtende zunächst recht spektakulär anmutende Gesteinsabschalung in den folgenden 30 Wochen jedoch nicht zu weiteren größeren Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit oder gar zu einem Bohrlochverbruch. Stattdessen wird das lose in den Bohrlochquerschnitt hineinragende Gestein im Rahmen der weiteren Befahrungen des Bohrlochs DMB-B2 mit der Axial-Bohrlochkamera zum Teil durch die Axial-Bohrlochkamera aus dem betrachteten Bohrlochbereich heraus transportiert, so dass gegen Ende des 30-wöchigen Observationszeitraums die

gebirgsmechanische Situation innerhalb des Bohrlochbereichs von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m eher unspektakulär wirkt und insgesamt als standfest zu bezeichnen ist.

(e) Bohrlochbereich 4 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m / sandige Fazies

Weiterführend wird nachfolgend stellvertretend für das Tragverhalten des Bohrlochs DMB-B2 im Bereich der sandigen Fazies das observierte zeitabhängige Tragverhalten in dem in der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B2 von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m diskutiert. Bild 3.30 zeigt die zeitabhängige Entwicklung im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m anhand einer aus sechs Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera bestehenden Bilderserie.

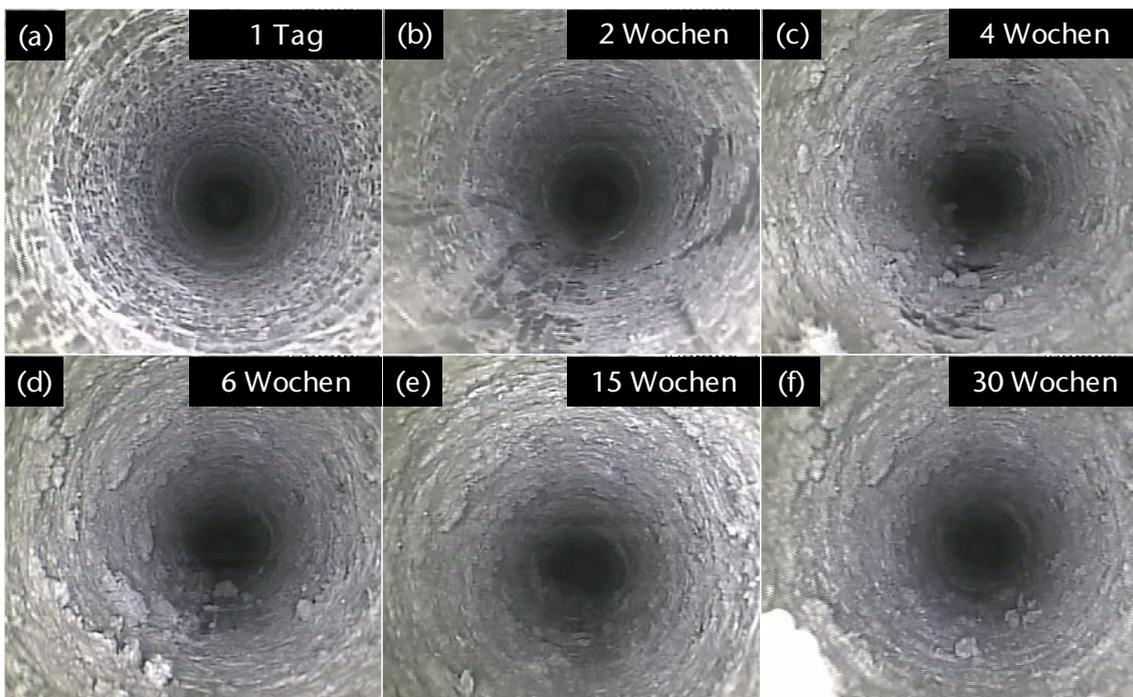


Bild 3.30: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B2 im innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m über einen Observationszeitraum von 30 Wochen

Während die vorangehend vorgestellten zeitabhängigen Entwicklungen der Bohrlochwandbeschaffenheit in innerhalb der Observationsbohrlöcher DMB-B1 und DMB-B2 gelegenen Bohrlochbereichen überwiegend von der zeitabhängigen Ausbildung einer oder mehrerer diskreter Versagensstrukturen der Bohrlochwand geprägt sind, ist im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m trotz einer signifikanten Veränderung der Bohrlochwandbe-

schaffenheit die zeitabhängige Ausbildung von diskreten Bruchstrukturen wie Bohrlochwandabschalungen oder Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus innerhalb des 30-wöchigen Observationszeitraums nicht feststellen gewesen. Stattdessen ist, wie der Darstellung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.30(a) bis Bild 3.30(f) zu entnehmen ist, innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m eine nahezu bruchlos voranschreitende Aufweichung der Bohrlochwand bedingt durch einen augenscheinlich homogen erfolgenden Feuchtigkeitsanstieg innerhalb des gesamten betrachteten Bohrlochbereichs einhergehend mit einer strukturellen Veränderung der Beschaffenheit der Bohrlochwand erfolgt. Innerhalb der Serie von Aufnahmen in Bild 3.30(a) bis Bild 3.30(c) kann betrachtet werden, wie die Feuchtigkeit des Gesteins in der Bohrlochwand innerhalb der ersten vier Wochen des Observationszeitraums ansteigt und sich einhergehend mit dem Feuchtigkeitsanstieg nach vier Wochen erste Entfestigungserscheinungen des Gesteins, die sich überwiegend durch kleinere Gesteinsabschalungen aus der Bohrlochwand heraus charakterisieren lassen, zeigen. So können in Bild 3.30(c) einige kleinere, plastifizierte und lose im Bereich der Bohrlochsohle liegende Gesteinsstücke identifiziert werden. Nicht feststellbar ist jedoch, ob und wenn ja aus welchem Bereich der Bohrlochkontur die Gesteinsstücke sich aus der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m herausgelöst haben, ob sie aus weiter oberhalb gelegenen Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B2 unter dem Einfluss der Schwerkraft heruntergerutscht sind oder ob sie gegebenenfalls von der Axial-Bohrlochkamera im Rahmen vorangehender Befahrungen in den betrachteten Bohrlochbereich transportiert worden sind. Größere Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus sind im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m jedenfalls nicht zu erkennen. In Bild 3.31, das eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.30(c) zeigt, sind einige Gesteinsstücke, die sich offensichtlich unter dem Einfluss des Feuchtigkeitsanstiegs im betrachteten Bohrlochbereich langsam aus der Bohrlochwand herauslösen, grafisch gekennzeichnet worden.

Die Betrachtung von Bild 3.31 verdeutlicht nochmals die bereits vorangehend getroffene Aussage, dass die Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m deutlichen feuchtigkeitsbedingten Beschaffenheitsänderungen mit im Bereich der gesamten Bohrlochkontur auftretenden kleineren Herauslösungen von Gesteinsstücken aus der aufgeweichten Bohrlochwand unterliegt, ohne dass es jedoch zu größeren Gesteinsabplatzungen oder Gesteinsabschalungen im betrachteten Bohrlochbereich kommt.

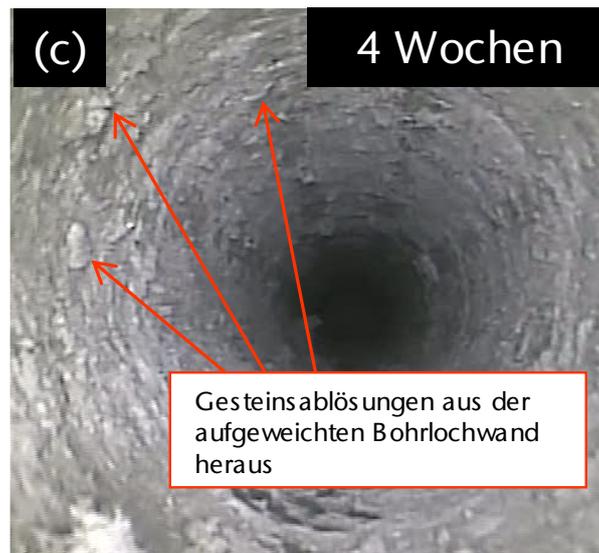


Bild 3.31: Aufweichungserscheinungen der Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B2 im inneren Bereich der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m nach einem Observationszeitraum von 4 Wochen; grafische Kennzeichnung von kleineren Gesteinsablösungen aus der Bohrlochwand heraus

Wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.30(d) bis Bild 3.30(f) zu entnehmen ist, schreiten die Veränderungen der Bohrlochwand im betrachteten Bohrlochbereich bis zum Ende des 30-wöchigen Observationszeitraums nur sehr langsam voran, so dass im Rahmen der letzten drei Observationstermine keine signifikanten Veränderungen der geomechanischen oder geohydraulischen Bedingungen innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m des Bohrlochs DMB-B2 mehr observiert werden können und die Bedingungen innerhalb des in der sandigen Fazies des Opalinustons gelegenen Bohrlochbereichs somit als insgesamt standfest bezeichnet werden können.

Hervorzuheben ist abschließend, dass im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten innerhalb der ersten zwei Wochen des Observationszeitraums für den innerhalb der sandigen Fazies des Opalinustons gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m trockene Bedingungen festgestellt werden konnten und erst zum Observationstermin vier Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 ein Anstieg der Feuchtigkeit im Gestein in der Bohrlochwand zu verzeichnen gewesen ist, während für den zuvor diskutierten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m im Übergangsbereich zwischen karbonatreicher und sandiger Fazies bereits zwei Tage nach dem Abteufen ein signifikanter Zutritt von Sickerwasser festgestellt werden konnte. Aus der Tatsache, dass im Faziesübergangsbereich der Wasserzutritt / Feuchtigkeitsanstieg deutlich schneller erfolgt als im innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Bohrlochbereich, lässt sich schlussfolgern, dass nicht allein die im Vergleich zur



tonigen Fazies relativ hohe hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins in der sandigen Fazies für den schon kurz nach dem Abteufen erfolgenden Wasserzutritt im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,9$ m bis $t_{BL} \approx 12,1$ m verantwortlich sein kann, sondern dass darüber hinaus in diesem Bohrlochbereich oder in der Nähe dieses Bohrlochbereichs noch zusätzlich Gebirgsschichten mit gegenüber dem Gestein in der sandigen Fazies deutlich erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit vorhanden sein müssen (*sandy layers?*).

3.1.6 Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen, Videobefahrungen und Luftfeuchtigkeitsmessungen für das Bohrloch DMB-B3

(a) *Ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B3*

(a 1) *Übersicht*

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen des ebenfalls schräg nach oben in den südlichen Stoß der Niche MI abgeteufen, etwa senkrecht zur einfallenden Schichtung verlaufenden Bohrlochs DMB-B3 vorgestellt und erläutert. In Bild 3.32, Bild 3.35, und Bild 3.39 ist jeweils die zeitliche Entwicklung von einem von insgesamt drei unterschiedlichen und hier näher betrachteten Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B3 anhand einer aus jeweils zehn zu unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgenommenen Bildern bestehenden Bildfolge dokumentiert. Auch innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 ereignen sich in allen drei vorgestellten Teufenbereichen im Lauf der Zeit sehr unterschiedlich stark ausgeprägte Bohrlochkonturveränderungen. Der erste der nachfolgend diskutierten Teufenbereiche befindet sich innerhalb der tonigen Fazies, der zweite Teufenbereich liegt im Übergangsbereich von der tonigen in die karbonatreiche Fazies und der dritte nachfolgend diskutierte Teufenbereich befindet sich innerhalb der karbonatreichen Fazies.

(a 2) *Bohrlochbereich 1 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m / tonige Fazies*

Die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m des Bohrlochs DMB-B3 ist in Bild 3.32 dargestellt.

In Bild 3.32(a) bis Bild 3.32(e) ist anhand der dunkler werdenden Färbung der Bohrlochwand zu erkennen, dass der hier betrachtete Gebirgsbereich des Bohrlochs DMB-B3 durch in das

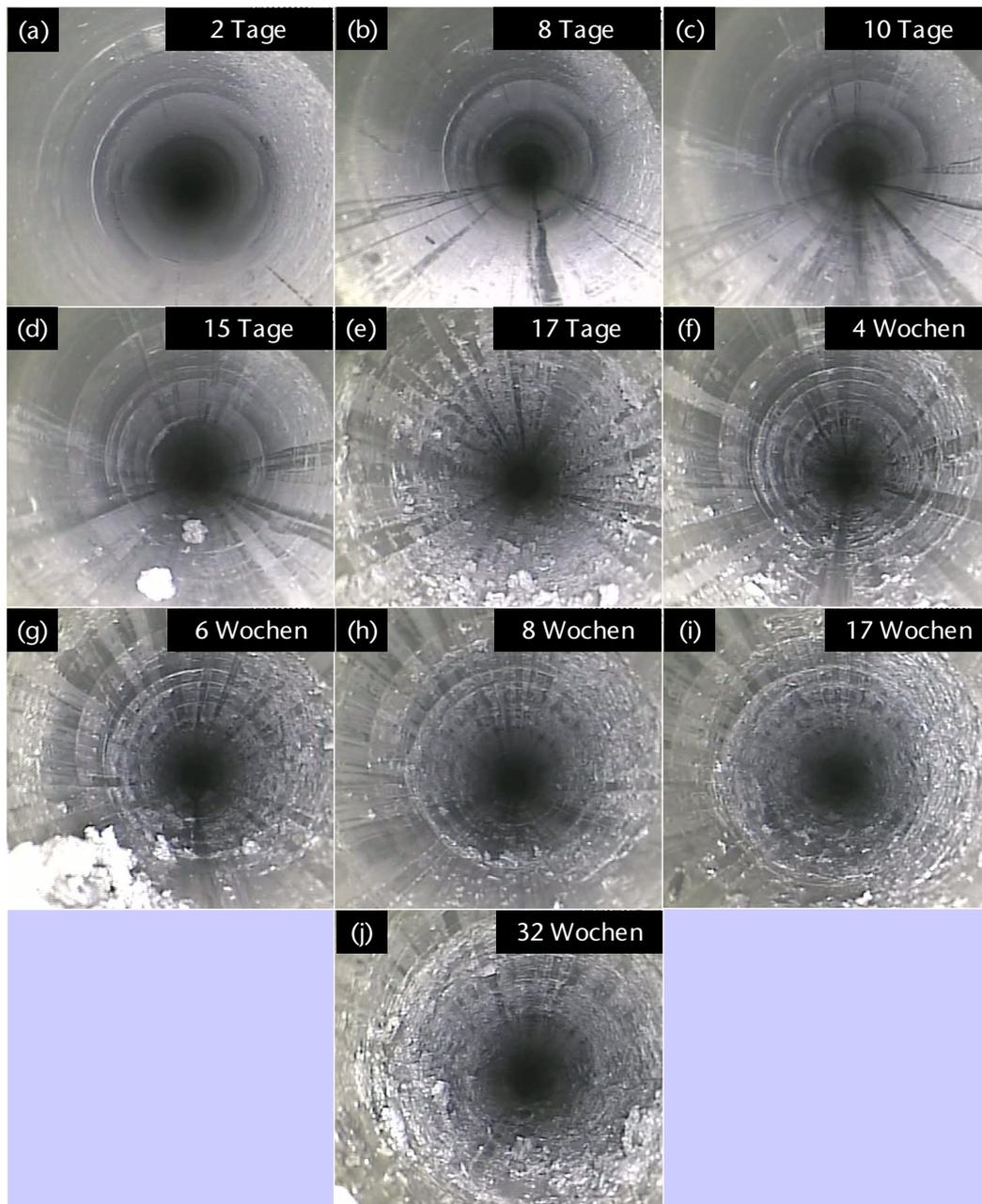


Bild 3.32: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m über einen Observationszeitraum von 32 Wochen mit der Ausbildung einer ringförmig um die Bohrlochkontur herumreichenden Gesteinsentfestigung und der Ausbildung von Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen unter dem Einfluss einer Zunahme des Wassergehaltes im konturnahen Gestein

Bohrloch zutretendes Wasser beeinflusst worden ist. Insbesondere der Vergleich zwischen Bild 3.32(d) und Bild 3.32(e) zeigt eine signifikante Veränderung der hydraulischen Bedingungen innerhalb des Bohrlochs DMB-B3. Einhergehend mit der in den nur zwei Tagen zwischen dem Observationszeitpunkt 15 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 und dem Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 eintretenden

signifikanten Veränderung der hydraulischen Bedingungen mit einem deutlich erkennbaren Anstieg des Feuchtegehaltes des Gesteins in der Bohrlochwand erfolgt auch eine signifikante Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m. Während die Bohrlochwand zu den ersten vier Observationsterminen bei der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.32(a) bis Bild 3.32(d) einen ausgesprochen standfesten Eindruck hinterlässt und das Gestein entlang der Bohrlochkontur derart fest zu sein scheint, dass sich die Messarme der Dreiarmkalibersonde nur minimal in die Bohrlochwand hineindrücken können, ist auf der in Bild 3.32(e) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zu erkennen, wie sich die Messarme der Dreiarmkalibersonde deutlich tiefer in das nun leicht aufgeweichte Gestein im Bereich der Bohrlochwand hineindrücken können. Darüber hinaus wirkt die Bohrlochwand zum Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 insgesamt unebener als auf den vier zu den früheren Observationszeitpunkten generierten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera. Die zu betrachtende Unebenheit der Bohrlochwand ist auf aufweichungsbedingte kleinere Gesteinsabschalungen und kleinere Herauslösungen von Gestein aus der Bohrlochwand heraus zurückzuführen. Bild 3.33 zeigt eine vergrößerte Darstellung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus Bild 3.32(e) mit einer grafischen Hervorhebung der dem aufgeweichten Gestein der Bohrlochwand aufgeprägten Spuren der Dreiarmkalibersonde sowie von einigen Gesteinsablösungen aus der Bohrlochwand heraus und von lose im Bereich der Bohrlochsohle liegenden, plastifizierten Gesteinsstücken.

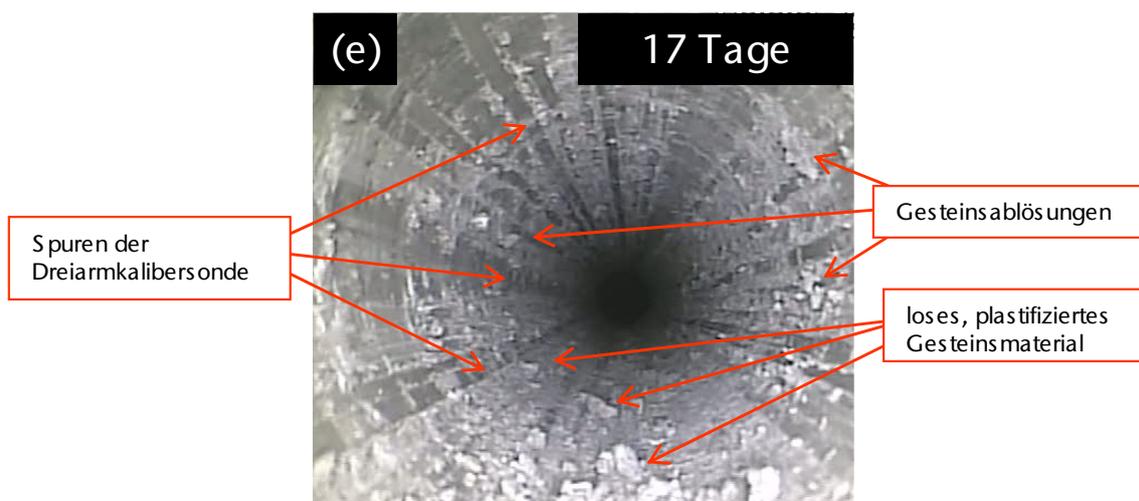


Bild 3.33: Spuren der Dreiarmkalibersonde, Gesteinsablösungen aus der aufgeweichten Bohrlochwand heraus und loses, im Bereich der Bohrlochsohle liegendes Gesteinsmaterial im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m zum Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3

Innerhalb der nächsten vier Wochen des Observationszeitraums sind im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera keine größeren zu identifizierenden Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit eingetreten, wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.32(e) bis Bild 3.32(g) entnommen werden kann.

Erst auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera, die zum Observationszeitpunkt acht Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 entstanden ist, deutet sich eine weitere Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit und somit auch eine Veränderung der Form der Bohrlochkontur an. In beiden Stoßbereichen des Bohrlochs DMB-B3 kommt es innerhalb des betrachteten Teufenbereichs zur Ausbildung von Gesteinsabschalungen. Der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.32(h) bis Bild 3.32(j) kann entnommen werden, wie sich die zum Observationszeitpunkt acht Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 andeutungsweise vorhandenen Gesteinsabschalungen in den Bohrlochstoßbereichen in den restlichen 24 Wochen des insgesamt 32-wöchigen Observationszeitraums zeitabhängig zu deutlich anhand der Betrachtung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera identifizierbaren Gesteinsabschalungen entwickeln. Es sei an dieser Stelle bereits voraus genommen, dass es sich bei dem betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m um den Anfangsbereich eines in etwa $l \approx 1,5$ m langen Bohrlochabschnitts handelt, der bis zum Faziesüber-

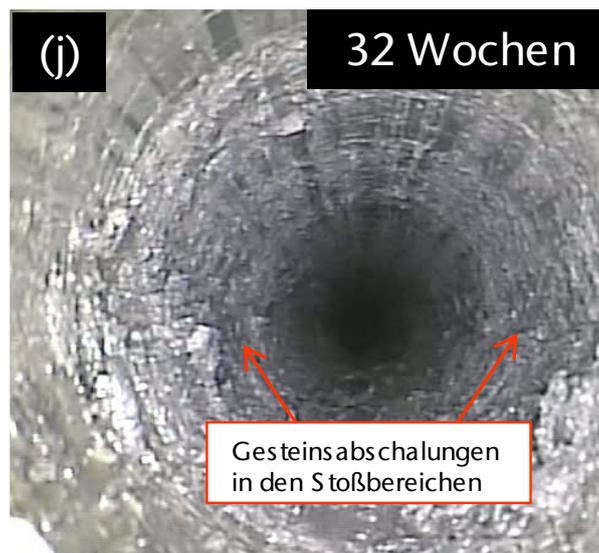


Bild 3.34: Gesteinsabschalungen im Bereich der Bohrlochstöße im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m zum letzten Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3



gang zwischen der tonigen und der karbonatreichen Opalinustonfazies in einer Teufe von $t_{BL} \approx 8,4$ m reicht und in dem das unterhalb des Faziesübergangs in der tonigen Fazies gelegene Tongestein zum Ende des 32-wöchigen Observationszeitraums durchgängig von einem sich zeitabhängig aus Richtung des Fazieswechsels in Richtung des Bohrlochmunds ausbreitenden Versagen des Gesteins in den Bohrlochstößen betroffen gewesen ist. Bevor im nachfolgenden Abschnitt der Teufenbereich des Faziesübergangs, von dem aus sich das Versagen des Gesteins in den Bohrlochstößen in die in der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereiche hinein ausgebreitet hat, detailliert vorgestellt wird, wird zunächst zum Abschluss der Vorstellung der Ergebnisse aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m Bild 3.32(j) inklusive einer grafischen Hervorhebung der Gesteinsabschalungen, die sich im Bereich der Bohrlochstöße innerhalb der letzten 24 Wochen des Observationszeitraums ausgebildet haben, in Bild 3.34 vergrößert dargestellt.

(a 3) *Bohrlochbereich 2 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m / Faziesübergang zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies*

Deutlich stärker als im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m hat sich der Einfluss des dem Bohrloch DMB-B3 zutretenden Gebirgswassers im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m bemerkbar gemacht. Anhand der in Bild 3.35 dargestellten Bildfolge kann die zeitabhängige Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit in dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m nachvollzogen werden.

Zu der in Bild 3.35 dargestellten Bildfolge ist zunächst anzumerken, dass der hier gezeigte Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B3 sich genau am Übergang zwischen der tonigen Fazies und der karbonatreichen Fazies des Opalinustons befindet. Wie der Entwicklung des Tragverhaltens der Bohrlochwand in Bild 3.35(a) bis Bild 3.35(j) zu entnehmen ist, sind die beiden Tongesteinsfaziestypen sehr wahrscheinlich durch ein signifikant unterschiedliches hydraulisches Verhalten gekennzeichnet. Ähnliche Differenzen bezüglich des Tragverhaltens der unterschiedlichen Opalinustonfaziestypen sind bereits im Rahmen des vorliegenden Berichts bei der Beschreibung der Observationsergebnisse für das Bohrloch DMB-B2 geschildert worden und werden darüber hinaus auch im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* für zwei weitere innerhalb des URL Mont Terri untersuchte Observationsbohrlöcher beschrieben. Wie bereits im Rahmen der Beschreibung der Observationsergebnisse für das Bohrloch DMB-B2 erwähnt

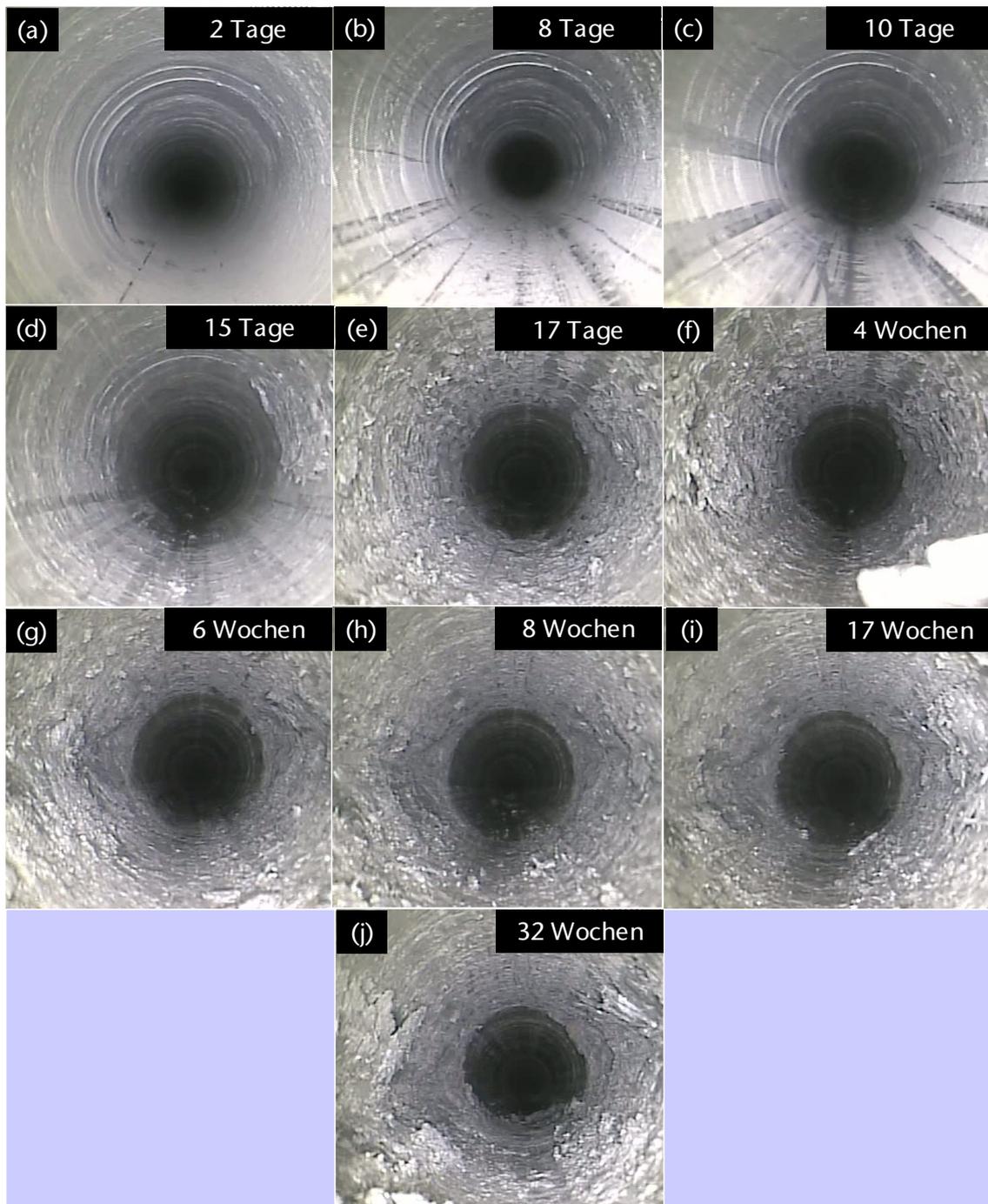


Bild 3.35: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m über einen Observationszeitraum von 32 Wochen mit der Ausbildung von massiven Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen unter dem Einfluss einer Zunahme des Wassergehaltes im konturnahen Gestein

worden ist, erfolgt im Anschluss an die Diskussion der Observationsergebnisse für die innerhalb des aktuellen Vorhabens untersuchten DMB-Bohrlöcher eine systematische Gegenüberstellung der Videoobservationsergebnisse aus allen vier in den vergangenen Jahren vom LfD&G innerhalb der Niche MI des URL Mont Terri observierten Bohrlöcher, die den Fa-

zieswechsel zwischen toniger und karbonatreicher Fazies näherungsweise orthogonal durchteufen.

Bei der Betrachtung von Bild 3.35(a) bis Bild 3.35(d) ist zu erkennen, wie die zunächst zu den ersten drei Observationsterminen von ihrer Beschaffenheit her gleichmäßig und standfest erscheinende Bohrlochwand zu dem Observationszeitpunkt 15 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 mit der in Bild 3.35(d) dargestellten dazugehörigen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera von Gebirgswasser infiltriert worden ist. Einhergehend mit dem anhand der dunkleren Färbung des Gesteins in der Bohrlochwand in Bild 3.35(d) zu detektierenden Feuchtigkeitsanstieg im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m ist es im Bereich des rechten Bohrlochstoßes zur Ausbildung einer Gesteinsabschalung aus der Bohrlochwand heraus gekommen. Während sich das aus der Bohrlochwand herausschalende Gestein zum Observationszeitpunkt 15 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 noch in einem losen Verbund zur Bohrlochwand befindet, hat es sich bereits zwei Tage später vollständig aus der Bohrlochwand heraus gelöst, wie der in Bild 3.35(e) zu betrachtenden, 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera entnommen werden kann. Der Vergleich der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.35(c), Bild 3.35(d) und Bild 3.35(e) verdeutlicht, welchen signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten der Bohrlochwand offensichtlich das dem Bohrloch DMB-B3 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m zusickernde Gebirgswasser ausübt.

Während die eher trocken anmutende Bohrlochwand auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.35(c) sich noch als vollständig standfest erweist, tritt nur fünf Tage später ein erstes Versagen der zu diesem Zeitpunkt durchfeuchteten Bohrlochwand in Form der Gesteinsabschalungen im rechten Stoßbereich auf, wie der Betrachtung von Bild 3.35(d) entnommen werden kann. Nur zwei Tage später, zum Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3, haben sich sowohl die Beschaffenheit der Bohrlochwand wie auch die Form der Bohrlochkontur signifikant verändert. Bild 3.36 zeigt die Vergrößerung von Bild 3.35(e) mit einer deutlich erkennbaren, durch Bohrlochwandabschalungen in den Stoßbereichen bedingten Veränderung der Form der Bohrlochkontur sowie mit einer gegenüber dem Zustand zum vorherigen Observationszeitpunkt deutlich veränderten Beschaffenheit des Gesteins in der Bohrlochwand.



Bild 3.36: Zustand der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m zum Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 mit der grafischen Hervorhebung von Gesteinsabschalungen in den Bohrlochstoßbereichen im Bereich der tonigen Fazies

Die Auswirkungen der starken Zunahme des Wassergehalts des Gesteins im Bereich der Bohrlochwand innerhalb des im Bereich der tonigen Fazies gelegenen Teils des hier betrachteten Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m, die bereits auf der in Bild 3.35(e) zu betrachtenden, zum Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zu erkennen sind, nehmen innerhalb der nächsten Wochen des Observationszeitraums noch dramatisch zu, wie der Betrachtung der Bilderserie von Bild 3.35(f) bis Bild 3.35(j) mit den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu den Observationszeitpunkten vier Wochen bis 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 entnommen werden kann. In den knapp 30 Wochen zwischen dem Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 mit der dazugehörigen, in Bild 3.35(e) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera und dem Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 mit der in Bild 3.35(j) dargestellten dazugehörigen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera ist es im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m zu signifikanten Veränderungen der Bohrlochkontur entsprechend des sich bereits zum Observationszeitpunkt 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 andeutenden Bruchmusters im Gestein entlang der Bohrlochwand gekommen. Sehr wahrscheinlich bedingt durch den Anstieg des Wassergehaltes im bereits mechanisch entfestigten Gestein im Bereich der Bohrlochwand haben sich im Gestein zusätzlich Aufweichungseffekte (*softening*) ergeben, die zu einer verstärkten Verminderung der Festigkeit des Opalinustons

geführt haben. Infolge der aufweichungsbedingten Abminderung des Tragvermögens ist es dem Gestein nicht mehr möglich, insbesondere in den Stoßbereichen des Bohrlochs DMB-B3 die Beanspruchung aus dem induzierten Sekundärspannungszustand zu ertragen und es bilden sich zeitabhängig, wie es anhand der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.35(f) bis Bild 3.35(j) nachvollzogen werden kann, die in Bild 3.35(j) zu erkennenden stark ausgeprägten Abschaltungen in den Stoßbereichen des Bohrlochs aus. Die starken Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen des innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Abschnitts des betrachteten Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m zum Ende des Observationszeitraums 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3, die bereits in Bild 3.35(j) zu betrachten sind, werden in Bild 3.37 vergrößert inklusive einer grafischen Hervorhebung dargestellt.



Bild 3.37: Stark ausgeprägte Gesteinsabschalungen in den Stoßbereichen zum Ende des Observationszeitraums im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m

In Bild 3.35(f) bis Bild 3.35(j) zeigt sich, wie die Abschaltungen von Gestein aus der Bohrwand heraus sich im Observationszeitraum zwischen der zweiten Woche und der 32. Woche nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 zeitabhängig weiter fortgesetzt haben, wodurch im Lauf der Zeit die Kontur des Bohrlochs DMB-B3 im betrachteten Teufenbereich stetig aufgeweitet worden ist, bis sie 32 Wochen nach dem Abteufen schließlich die in Bild 3.35(j) bzw. in Bild 3.37 zu betrachtende kirsch kernartige Form mit einer leichten Neigung einer gedachten Verbindungsgeraden zwischen den in den beiden Stoßbereichen befindlichen Bruchfronten angenommen hat.

Wie eingangs bereits erwähnt worden ist, befindet sich der hier detailliert betrachtete Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B3 genau am Übergang zwischen der tonigen Fazies und der karbonatreichen Fazies des Opalinustons. Wie zuvor bereits im Rahmen der Auswertung der Videoobservationsarbeiten zum Tragverhalten des Observationsbohrlochs DMB-B2 festgestellt und in Bild 3.27 dargestellt worden ist, sind die beiden Tongesteinsfaziestypen durch ein signifikant unterschiedliches hydraulisches und hydraulisch-mechanisch gekoppeltes Verhalten gekennzeichnet. Analog zur Gegenüberstellung der Differenzen zwischen den beiden Opalinustonfaziestypen in Bezug auf das hydraulisch beeinflusste Langzeittragverhalten in Bild 3.27 wird zur Verdeutlichung der Reproduzierbarkeit der Systematik des auftretenden Bruchbildes der Bohrlochwand in Bild 3.38 auch für den innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 gelegenen Faziesübergangsbereich eine Gegenüberstellung des Tragverhaltens der Bohrlochwand in den beiden zwar in unmittelbarer Nachbarschaft, aber dennoch in unterschiedlichen Gesteinsfaziestypen gelegenen Bohrlochabschnitten vorgenommen.

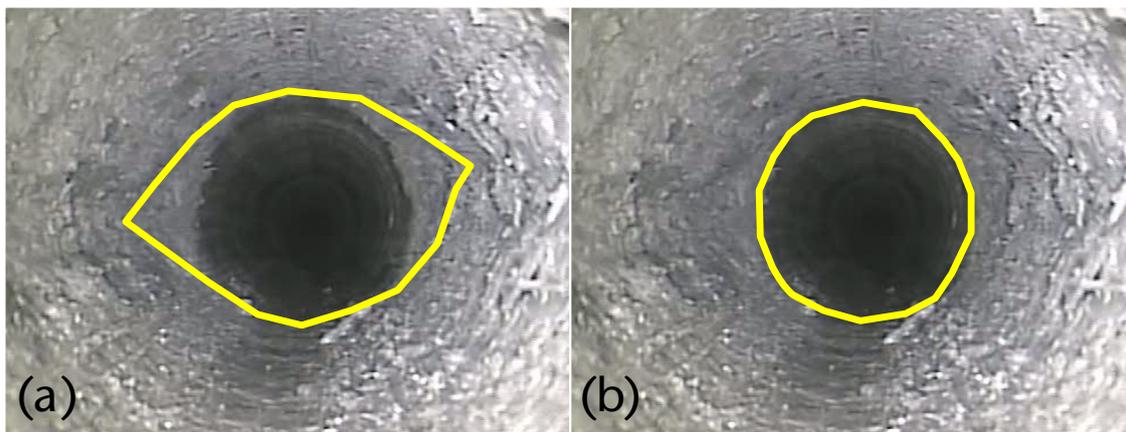


Bild 3.38: Detaildarstellung des Übergangs von der tonigen Opalinustonfazies in die karbonatreiche Opalinustonfazies im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m des Bohrlochs DMB-B3 zum Observationszeitpunkt 17 Wochen nach dem Abteufen mit (a) einer kirsch kernartigen Aufweitung der Bohrlochkontur in der tonigen Fazies und (b) einer standfesten und somit auch nach 17 Wochen noch annähernd kreisrunden Kontur in der karbonatreichen Fazies

In Bild 3.38 ist Bild 3.35(i) zweimal dargestellt. In Bild 3.38(a) ist die bruchhafte, kirsch kernförmige Aufweitung der Bohrlochkontur des Bohrlochs DMB-B3 im Bereich der tonigen Fazies durch die gelbe Linie nachgezeichnet, während in Bild 3.38(b) die nach 17 Wochen nach wie vor standfeste und immer noch annähernd kreisrunde Kontur des Bohrlochs DMB-B3 im Bereich der karbonatreichen Fazies ebenfalls durch eine gelbe Linie hervorgehoben wird.

Die offensichtlichen Parallelitäten bezüglich des Tragverhaltens der Bohrlochwand in den Übergangsbereichen zwischen der tonigen und der karbonatreichen Opalinustonfazies in den Observationsbohrlöchern DMB-B2 und DMB-B3 werden nachfolgend in Abschnitt 3.1.8 noch detailliert analysiert und daher hier zunächst nicht weiter diskutiert.

(a 4) Bohrlochbereich 3 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m / karbonatreiche Fazies

Weiterführend wird nachfolgend stellvertretend für das Tragverhalten des Bohrlochs DMB-B3 im Bereich der karbonatreichen Fazies das observierte zeitabhängige Tragverhalten in dem in der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m diskutiert. Als Diskussionsgrundlage ist in Bild 3.39 die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m dargestellt.

Die in Bild 3.39 dargestellte Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera repräsentiert das hohe Maß an Standfestigkeit der Bohrlochwand, das zu den zehn Befahrungsterminen innerhalb des 32-wöchigen Observationszeitraums im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B3 observiert worden ist. Wie der Betrachtung von Bild 3.39(a) bis Bild 3.39(c) zu entnehmen ist, kommt es im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m bereits innerhalb der ersten neun Tage des Observationszeitraums zu einem anhand der dunkleren Färbung der Bohrlochwand in Bild 3.39(c) gegenüber der Färbung der Bohrlochwand auf den zu den vorangehenden Observationsterminen entstandenen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizierbaren Feuchtigkeitsanstieg im Gestein in der Bohrlochwand. Einhergehend mit dem detektierbaren Feuchtigkeitsanstieg kommt es auch im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen und hier genauer betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m zu Aufweichungen im Gestein in der Bohrlochwand. Die feuchtebedingte Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit äußert sich beispielsweise in den in Bild 3.39(c) zu betrachtenden aufgeweichten Spuren der Kalibersonde. Eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.39(c) mit einer grafischen Hervorhebung der auf eine leichte Bohrlochwandaufweicheung hinweisenden Spuren der Kalibersonde zeigt Bild 3.40.

Die in Bild 3.39 dargestellte Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera repräsentiert das hohe Maß an Standfestigkeit der Bohrlochwand, das zu den zehn Befahrungsterminen innerhalb des 32-wöchigen Observationszeitraums im innerhalb der karbonatreichen Fazies

gelegenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B3 observiert worden ist. Wie der Betrachtung von Bild 3.39(a) bis Bild 3.39(c) zu entnehmen ist, kommt es im betrachteten Teufenbereich

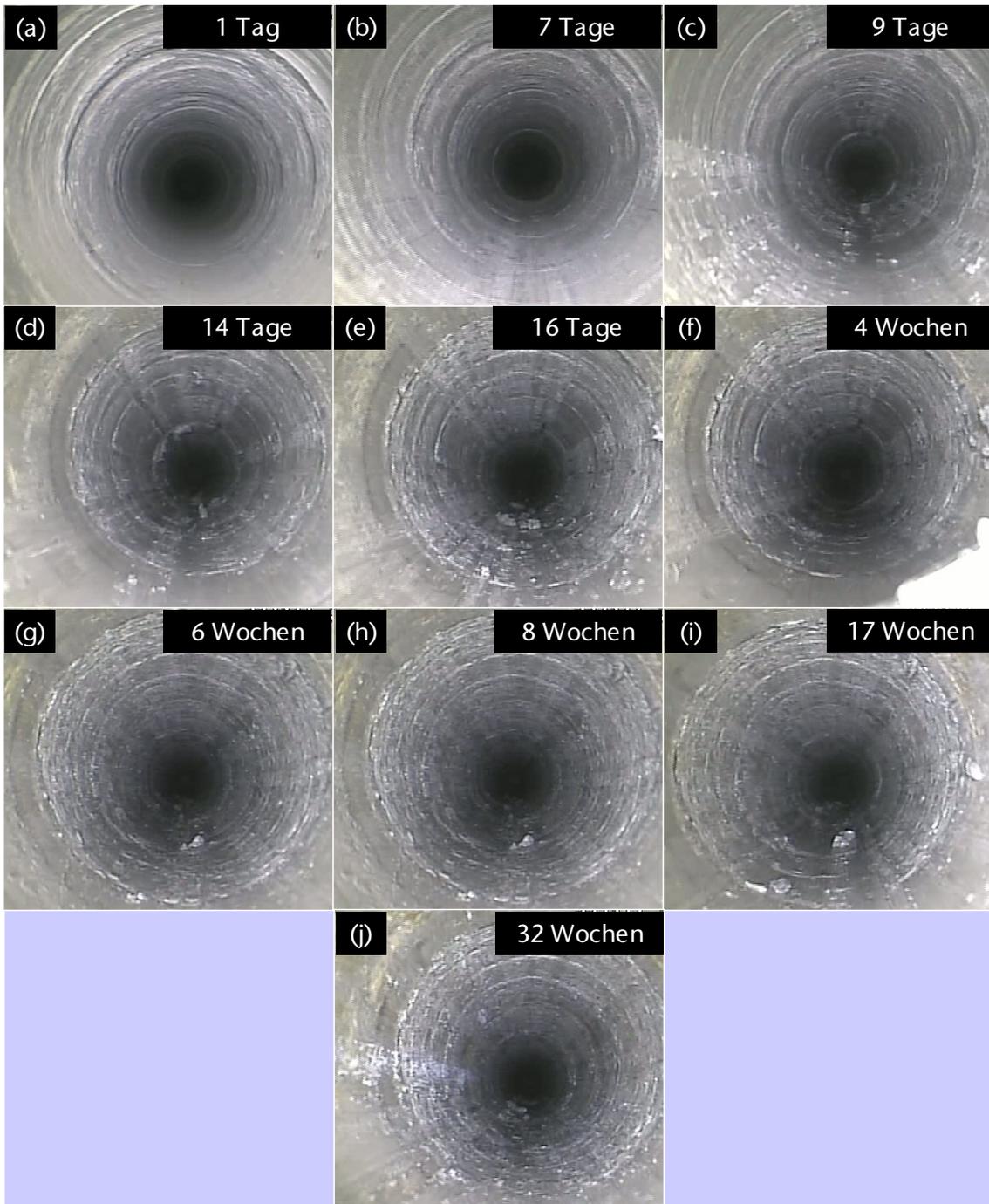


Bild 3.39: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m über einen Observationszeitraum von 32 Wochen mit starker Zunahme des Wassergehaltes im Gestein und einer moderaten zeitabhängigen Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit in der karbonatreichen Fazies

von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m bereits innerhalb der ersten neun Tage des Observationszeitraums zu einem anhand der dunkleren Färbung der Bohrlochwand in Bild 3.39(c) gegenüber der Färbung der Bohrlochwand auf den zu den vorangehenden Observationsterminen entstandenen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizierbaren Feuchtigkeitsanstieg im Gestein in der Bohrlochwand. Einhergehend mit dem detektierbaren Feuchtigkeitsanstieg kommt es auch im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen und hier genauer betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m zu Aufweichungen im Gestein in der Bohrlochwand. Die feuchtebedingte Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit äußert sich beispielsweise in den in Bild 3.39(c) zu betrachtenden aufgeweichten Spuren der Kalibersonde. Eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.39(c) mit einer grafischen Hervorhebung der auf eine leichte Bohrlochwandaufweichung hinweisenden Spuren der Kalibersonde zeigt Bild 3.40.

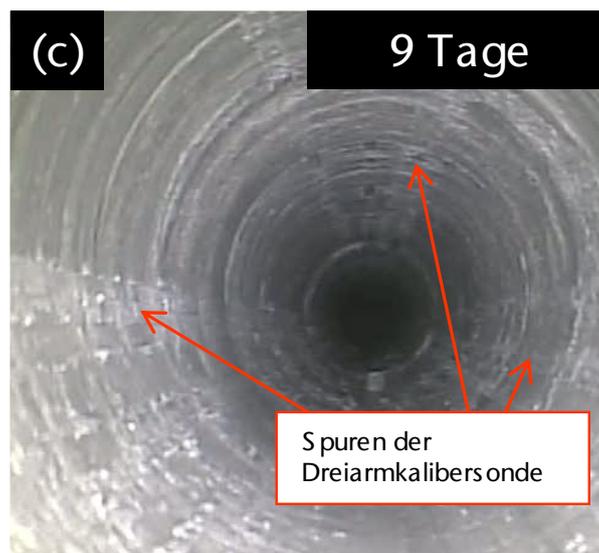


Bild 3.40: Spuren der Dreiarmskalibersonde entlang der feuchtigkeitsbedingt leicht angeweichten Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m zum Observationszeitpunkt 9 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3

Die Durchfeuchtung der Bohrlochwand tritt im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m zwischen den Observationsterminen sieben Tage und neun Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 ein und erfolgt somit deutlich schneller als in den zuvor vorgestellten innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 gelegenen Teufenbereichen. So erfolgt im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m eine deutlich anhand der Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera feststellbare Durchfeuchtung der Bohrlochwand im Zeitraum zehn Tage bis 15 Tage nach dem Abteufen. Im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis



$t_{BL} \approx 7,1$ m ereignet sich der signifikante Anstieg des Feuchtegehaltes des Gesteins in der Bohrlochwand im Zeitraum 15 Tage bis 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3. Aus der schnelleren Durchfeuchtung der Bohrlochwand im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m lässt sich schlussfolgern, dass das Gestein innerhalb der karbonatreichen Fazies des Opalinustons höchstwahrscheinlich über eine höhere hydraulische Leitfähigkeit verfügt als das Gestein innerhalb der tonigen Fazies. Somit erscheint es wahrscheinlich, dass Gebirgswasser im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt des Bohrlochs DMB-B3 dem zunächst durch die Hitzeentwicklung und die Luftspülung beim Abteufen entsättigten Gestein in der Bohrlochwand zugetreten ist und ausgehend von der karbonatreichen Fazies im Anschluss daran dem Einfallen des Bohrlochs folgend in die darunter in der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereiche in Richtung Bohrlochmund gesickert ist, wo es zunächst nach 10-15 Tagen die Bohrlochwand im Bereich des Faziesübergangs aufgesättigt hat und im Anschluss daran im Zeitraum zwischen 15 und 17 Tagen auch die Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m erreicht hat.

Das von einer im Bereich der stärker hydraulisch leitfähigen karbonatreichen Fazies beginnenden Aufsättigung der Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B3 ausgehende gedankliche Modell ist nicht erst im Rahmen der Analyse der im Zuge des DMB-Experimentes gewonnenen Observationsergebnisse entworfen worden, sondern diente darüber hinaus bereits im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* zur Erklärung des innerhalb von zwei weiteren innerhalb der Niche MI gelegenen Observationsbohrlöchern mit identischen Orientierungen der Bohrlochlängsachse zu beobachtenden zeitabhängigen Tragverhaltens. Des Weiteren scheint, wie vorangehend bereits beschrieben worden ist, auch das zeitabhängige Tragverhalten des Bohrlochs DMB-B2 im Übergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Fazies von vergleichbaren hydraulisch-mechanisch gekoppelt wirkenden Effekten maßgeblich beeinflusst worden zu sein. Das anhand der Analyse der mittels der Axial-Bohrlochkamera generierten Aufnahmen ermittelte hydraulische Verhalten innerhalb des Observationsbohrlochs DMB-B3 liefert somit einen weiteren wertvollen Hinweis auf die Plausibilität der zuvor in *Lux & Seeska (2010)* zur Erklärung des Tragverhaltens der Observationsbohrlöcher im Übergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Fazies formulierten Thesen.

Des Weiteren werden im nachfolgenden Abschnitt Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus dem Observationsbohrloch DMB-B3 vorgestellt, die eine zeitabhängige Entwicklung des



Tragverhaltens der Bohrlochwand im Faziesübergangsbereich abbilden, die sich ebenfalls sehr gut mittels der Annahme von aus der karbonatreichen Fazies in die tonige Fazies heruntersickerndem Gebirgswasser erklären lässt.

Bevor jedoch im nachfolgenden Abschnitt 3.1.6(b) die anhand der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde herleitbaren Rückschlüsse bezüglich des Tragverhaltens des Bohrlochs DMB-B3 diskutiert werden und bevor in Abschnitt 3.1.8 nochmals vertiefend auf das Tragverhalten der bis zu diesem Zeitpunkt insgesamt vier vom LfD&G observierten Bohrlöcher mit einer zum Bohrloch DMB-B3 vergleichbaren Positionierung und Längsachsenorientierung innerhalb des Übergangsbereichs zwischen toniger und karbonatreicher Fazies eingegangen wird, soll im vorliegenden Abschnitt zunächst noch die mit der Darstellung von Bild 3.39 begonnene Diskussion des zeitabhängigen Tragverhaltens der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m des Bohrlochs DMB-B3 abgeschlossen werden.

Trotz der Tatsache, dass im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m bereits neun Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 eine Durchfeuchtung der Bohrlochwand erfolgt ist und dass die Durchfeuchtung der Bohrlochwand auch mit einer zeitnah einsetzenden leichten Aufweichung der Bohrlochwand einhergegangen ist, erweist sich die Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m über den gesamten 32-wöchigen Observationszeitraum hinweg als vollständig standfest, wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.39(d) bis Bild 3.39(j) entnommen werden kann. Zunächst ist zu erkennen, dass die Bohrlochwand beim Betrachten auch auf allen nach dem dritten Observationstermin entstandenen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera einen durchfeuchteten Eindruck erweckt. Die Feuchtigkeit in der Bohrlochwand scheint jedoch auch über den 32 Wochen lang andauernden Observationszeitraum hinweg keine signifikanten weiteren Aufweichungseffekte zu bewirken. Lediglich einige bereits zum ersten Observationszeitpunkt wahrnehmbare und somit höchstwahrscheinlich im Gestein präexistente Strukturen entlang der Bohrlochwand erfahren eine geringfügige Aufweichung und es kommt an einigen Stellen zu minimalen Herauslösungen von Gestein aus der Bohrlochwand. Stellvertretend für die lang anhaltende Standfestigkeit der Bohrlochwand und für die nur sehr geringen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m zu observierenden Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit wird abschließend für die Vorstellung der Observationsergebnisse aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus Bild 3.39(j) in Bild 3.41 inklusive einer grafischen Hervorhebung der leichten aufweichungs-

bedingten Gesteinsherauslösungen aus der Bohrlochwand im Bereich der präexistenter Strukturen vergrößert dargestellt.



Bild 3.41: Minimale aufweichungsbedingte Gesteinsablösungen aus der Bohrlochwand heraus im Bereich von präexistenter Strukturen im Tiefenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3

(b) Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen für das Bohrloch DMB-B3

An zehn Befahrungsterminen sind in dem Bohrloch DMB-B3 insgesamt jeweils vier Kalibermessungen durchgeführt worden. Wie im Rahmen der Vorstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde für das Bohrloch DMB-B1 bereits erläutert worden ist, ergeben sich die vier Messungen pro Observationstermin aus zwei pro Observationstermin durchgeführten Befahrungen des Bohrlochs, bei denen jeweils bei der Einfahrt und bei der Ausfahrt eine Messung stattgefunden hat. Auch für das Bohrloch DMB-B3 ist die erste Befahrung unter einem Ausgangswinkel von $\varphi = 0^\circ$ durchgeführt worden, was bedeutet, dass die Sonde in ihrer Ausgangsposition so orientiert gewesen ist, dass einer ihrer drei Messarme allerdings nur im Bereich des Bohrlochmundes direkt zum obersten Punkt der Bohrlochkontur orientiert war. Anschließend ist die Sonde für die zweite Befahrung im Uhrzeigersinn um $\Delta\varphi = 60^\circ$ gegenüber der vorangegangenen Befahrung weitergedreht worden. Somit sind Befahrungen mit einer Ausgangsposition der Sonde von $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 60^\circ$ vorgenommen worden. Die einzelnen Ein- und Ausfahrten unterscheiden sich quantitativ zwar leicht voneinander, insge-

samt stimmen die Messergebnisse aber so gut überein, dass hier im Rahmen der Vorstellung der Messergebnisse auf eine Diskussion der Unterschiede zwischen den einzelnen Befahrungen mit variiertem Ausgangswinkel φ der Kalibersonde verzichtet werden kann. In Bild 3.42 sind exemplarisch die von der Kalibersonde bei der Ausfahrt unter $\varphi = 0^\circ$ gemessenen Zahlenwerte für jeden der zehn Befahrungstermine vom 16.01.2013 bis zum 26.08.2013 dargestellt.

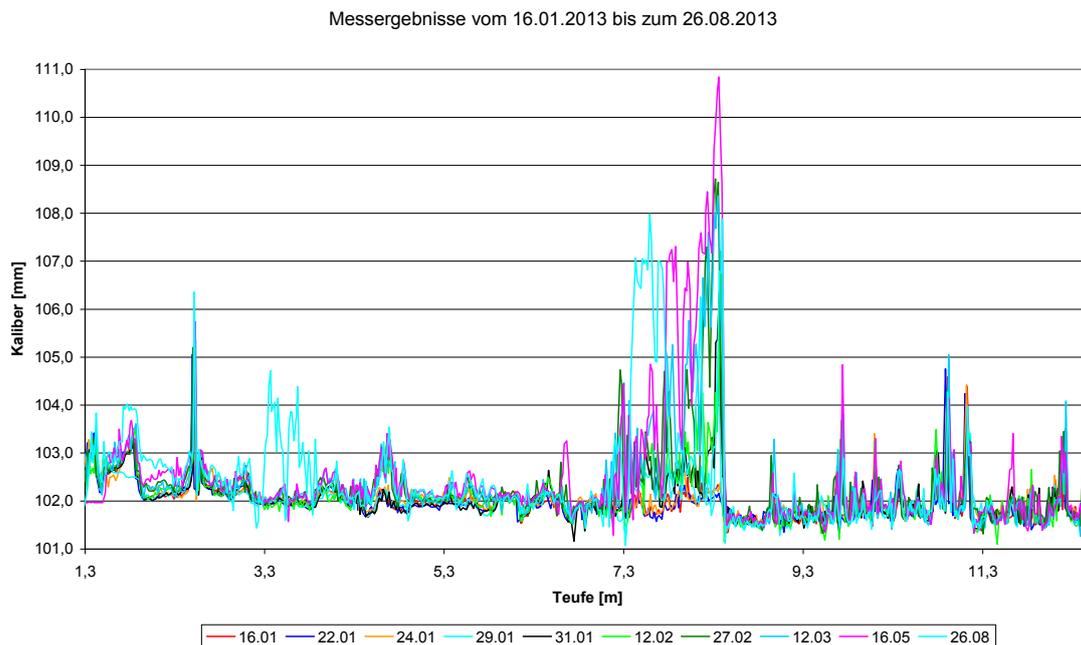


Bild 3.42: Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde: Zusammenstellung der Ausfahrten unter $\varphi = 0^\circ$ für alle zehn Befahrungstermine im Observationszeitraum vom 16.01.2013 bis zum 26.08.2013 für das Bohrloch DMB-B3

Aus der Betrachtung der im Diagramm in Bild 3.42 dargestellten Messwertgraphen geht zunächst hervor, dass zu allen Observationsterminen im Observationszeitraum vom 16.01.2013 bis zum 26.08.2013 eine Befahrung des Bohrlochs DMB-B3 mit der Dreiarmkalibersonde bis zum Bohrlochtiefsten möglich gewesen ist. Das Bohrloch DMB-B3 ist somit das einzige der vier im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb des URL Mont Terri untersuchten Observationsbohrlöcher, in dem über den gesamten 32 Wochen lang andauernden Observationszeitraum hinweg eine Befahrung über die gesamte Teufe vom Bohrlochmund bis hin zum Bohrlochtiefsten sowohl mit der Dreiarmkalibersonde wie auch mit der Axial-Bohrlochkamera durchgeführt werden konnte. Die Tatsache, dass bis einschließlich des letzten Observationstermins einer Befahrbarkeit des Bohrlochs DMB-B3 mit der Dreiarmkalibersonde gegeben gewesen

ist, dürfte zum einen der günstigen Orientierung der Bohrlochlängsachse gegenüber dem einfallenden Schichtflächengefüge geschuldet sein, aber darüber hinaus auch der Tatsache, dass das Bohrloch DMB-B3 mit einer Endteufe von $t_{BL} \approx 12,5$ m insgesamt deutlich kürzer ist als die Bohrlöcher DMB-B2 und DMB-B1. Bedingt durch die geringe Endteufe durchteuft das Observationsbohrloch DMB-B3 die karbonatreiche Opalinustonfazies nicht vollständig und erreicht dementsprechend die sandige Fazies des Opalinustons nicht. Daher konnten innerhalb des Observationsbohrlochs DMB-B3 die Videoobservations- und Kalibermessarbeiten auch nicht durch innerhalb der sandigen Fazies erfolgende Wasserzutritte oder durch Bohrlochwandverbrüche im Bereich des Faziesübergangs von der karbonatreichen in die sandige Fazies gestört oder verhindert werden.

Die Betrachtung der Messwertgraphen in Bild 3.42 zeigt, dass sich die Bohrlochkontur vom Bohrlochmund in Richtung des Bohrlochtiefsten unabhängig von der zeitabhängigen Entwicklung verjüngt. Diese Verjüngung dürfte höchstwahrscheinlich bohrtechnisch bedingt sein. Im Rahmen der Beschreibung der für das Observationsbohrloch DMB-B1 generierten Messwerte der Dreiarmkalibersonde ist bereits detailliert darauf eingegangen worden, wie durch die mehrfache Entnahme und das anschließende Wiedereinbringen des Bohrgeräts bei der Herstellung einer Kernbohrung ein Bohrlochquerschnitt im näher zum Bohrlochmund hin gelegenen Bohrlochbereich im Vergleich zu einem Bohrlochquerschnitt im näher zum Bohrlochtiefsten hin gelegenen Bohrlochbereich stärker von der Bohrkronen aufgeweitet wird.

Die Tatsache, dass die Messwertgraphen der zehn unterschiedlichen durchgeführten Befahrungen des Bohrlochs DMB-B3 mit der Dreiarmkalibersonde sich im bis zu einer Teufe von $t_{BL} \approx 8,4$ m reichenden, innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt partiell deutlich voneinander unterscheiden, während im jenseits von $t_{BL} \approx 8,4$ m innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich die Messwertgraphen der zehn unterschiedlichen Befahrungen eher sehr ähnliche Verläufe aufweisen, lässt darauf schließen, dass innerhalb des in der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitts in dem 32 Wochen lang andauernden Observationszeitraum eher als standfest zu bezeichnende geomechanische Verhältnisse mit nur geringfügigen zeitabhängig eintretenden Veränderungen der Bohrlochkontur oder der Bohrlochwandbeschaffenheit vorgelegen haben, während es im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt augenscheinlich zu größeren zeitabhängigen Veränderungen der Bohrlochkontur gekommen ist. Insbesondere in dem dem Faziesübergang vorgelagerten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 6,9$ m und $t_{BL} \approx 8,4$ m können signifikante zeitabhängig

eutretende Veränderungen bezüglich der von der Dreiarmkalibersonde gemessenen Bohrlochkaliberwerte aus der Betrachtung der Messwertgraphen im Diagramm in Bild 3.42 geschlossen werden – ein Befund, der sich hervorragend mit den vorangehend vorgestellten Ergebnissen der Bohrlochvideoobservation mittels der Axial-Bohrlochkamera korrelieren lässt.

Zur weiteren Diskussion der mittels der Dreiarmkalibersonde generierten Messergebnisse werden zwecks einer besseren Übersichtlichkeit neun der zehn im Diagramm in Bild 3.42 dargestellten Messwertgraphen nachfolgend aufgeteilt auf zwei Diagramme dargestellt. Das Diagramm in Bild 3.43 stellt die Messergebnisse der innerhalb der ersten zwei Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 durchgeführten fünf Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde dar. Im Diagramm in Bild 3.44 ist dagegen die langfristig innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 erfolgende Entwicklung der Bohrlochkontur anhand der Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde von fünf weiteren ausgesuchten Observationszeitpunkten dokumentiert.

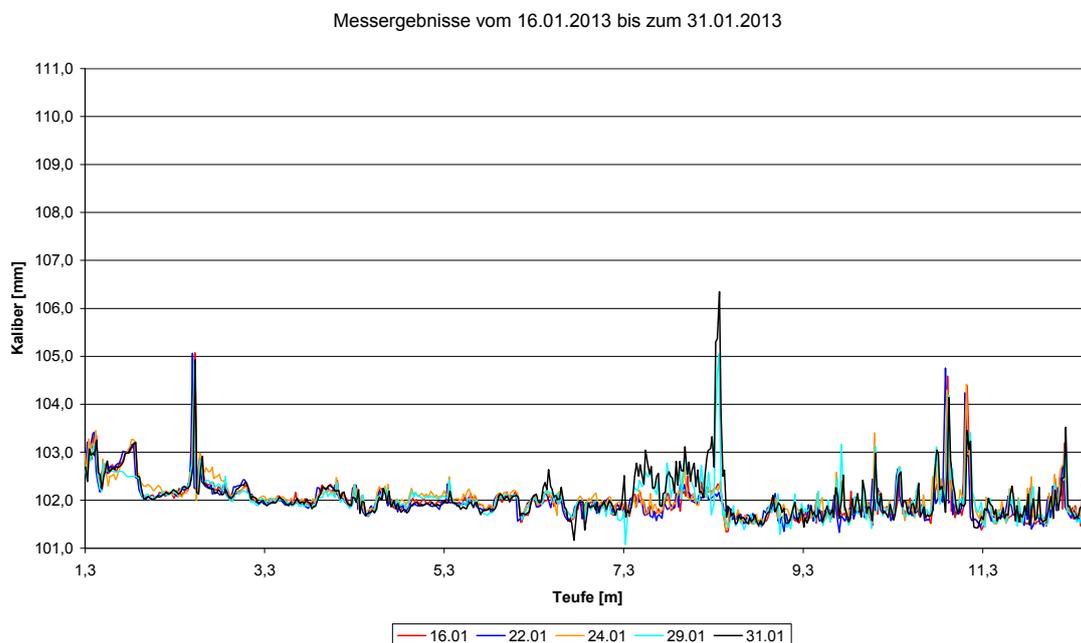


Bild 3.43: Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde: Zusammenstellung der Ausfahrten unter $\varphi = 0^\circ$ für die fünf Befahrungstermine im Observationszeitraum vom 16.01.2013 bis zum 31.01.2013 für das Bohrloch DMB-B3

Die Befahrungen zur Ermittlung der in Bild 3.43 dargestellten Messergebnisse sind zu den Observationszeitpunkten zwei Tage (roter Graph), acht Tage (dunkelblauer Graph), zehn Ta-



ge (orangefarbener Graph), 15 Tage (türkisfarbener Graph) und 17 Tage (schwarzer Graph) nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 durchgeführt worden.

An den in Bild 3.43 dargestellten Messwertgraphen der Befahrungen vom 16.01.2013 bis zum 31.01.2013 zeigt sich insgesamt, dass die Schwankungen zwischen den gemessenen Kaliberwerten im Bereich der karbonatreichen Fazies deutlich stärker sind – erkennbar an dem dort insgesamt unruhiger wirkenden Verlauf des Messwertgraphen. Der unruhigere Verlauf des Messwertgraphen im in der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich des Bohrlochs DMB-B3 könnte in der größeren Festigkeit und Abrasivität des Gesteins in der karbonatreichen Fazies und den damit einhergehenden stärkeren Lateralbewegungen der Bohrkronen beim Abteufen begründet liegen.

Bei der Betrachtung der Messwertgraphen im Diagramm in Bild 3.43 fällt auf, dass bereits innerhalb der ersten 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 in einigen Teufenbereichen innerhalb des in der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitts deutliche Differenzen zwischen den zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichneten Kaliberwerten auftreten. Insbesondere für den dem Faziesübergang vorgelagerten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,4$ m unterscheiden sich die gemessenen Kaliberwerte zum Teil stark voneinander. Während die Messwertgraphen der Dreiarmkalibersonde, die zu den Observationszeitpunkten zwei Tage, acht Tage und zehn Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 aufgezeichnet worden sind, im betreffenden Teufenbereich nahezu parallel verlaufen und keine Aufweitung der Bohrlochkontur anzeigen, liegen die zu den Observationszeitpunkten 15 Tage und 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 gemessenen Kaliberwerte im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,4$ m größtenteils deutlich oberhalb der zu den vorangehenden Observationszeitpunkten generierten Kalibermesswerte. Die am 29.01.2013 und am 31.01.2013 aufgezeichneten Messwertgraphen oszillieren stark und zeigen insbesondere unmittelbar vor dem Übergang in die karbonatreiche Fazies eine signifikante Konturaufweitung mit einem maximalen gemessenen Kaliberwert von $d_{BL} > 106$ mm an, bevor unmittelbar nach dem Faziesübergang alle Messwertgraphen wieder deutlich kleinere Kaliberwerte von $d_{BL} < 102$ mm anzeigen und einen nahezu parallelen Verlauf annehmen.

In guter Übereinstimmung mit den Resultaten der Bohrlochvideoobservation steigen die von der Dreiarmkalibersonde gemessenen Kaliberwerte in dem dem Faziesübergang unmittelbar vorgelagerten Teufenbereich zu den späteren Observationszeitpunkten nochmals stark an und

der zum Observationszeitpunkt am 31.01.2013 vom Faziesübergang bis in eine Teufe von $t_{BL} \approx 7,3$ m in die tonige Fazies hineinreichende, von den primär durch massive Gesteinsabschalungen in den Bohrlochstoßbereichen verursachten signifikanten Konturaufweitungen betroffene Bohrlochabschnitt weitet sich bis zum Ende des Observationszeitraums am 26.08.2013 noch bis in eine Teufe von $t_{BL} \approx 6,9$ m hinein aus. Die zeitabhängig zwischen den unterschiedlichen Messwertgraphen in Bild 3.43 auftretenden Differenzen bezüglich der gemessenen Kaliberwerte bilden somit den Beginn der sich bis zum Ende des 32-wöchigen Observationszeitraums fortsetzenden – feuchtigkeitszutrittsbedingten – signifikanten Bohrlochwandbeschaffenheitsveränderungen und den Beginn der damit einhergehenden signifikanten Bohrlochkonturveränderungen ab. Die innerhalb des Diagramms in Bild 3.43 dargestellten Messwertgraphen sind bezüglich der zeitabhängigen Entwicklung der Bohrlochkonturveränderungen hervorragend mit den in Bild 3.35(a) bis Bild 3.35(e) dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera korrelierbar und zeichnen somit in Kombination mit den von der Axial-Bohrlochkamera generierten Observationsergebnissen ein präzises Bild von den innerhalb der ersten 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 insbesondere im Bereich des Faziesübergangs vorherrschenden geomechanischen Bedingungen.

Die Verläufe der Messwertgraphen im Diagramm in Bild 3.44 dokumentieren das weitere Voranschreiten der sich innerhalb der ersten 17 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 andeutenden Entwicklungen.

Der rote Messwertgraph der ersten innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 durchgeführten Messung vom 16.01.2013 zum Observationszeitpunkt zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 wird zur besseren Korrelierbarkeit der in den beiden Diagrammen in Bild 3.43 und Bild 3.44 dargestellten Messwertgraphen im Diagramm in Bild 3.44 erneut dargestellt. Darüber hinaus sind im Diagramm in Bild 3.44 die Messwertgraphen der Messergebnisse dargestellt, die zu den Observationszeitpunkten vier Wochen (grüner Graph), acht Wochen (schwarzer Graph), 17 Wochen (violetter Graph) und 32 Wochen (türkisfarbener Graph) nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 mittels der Dreiarmkalibersonde generiert worden sind.

Deutlicher als in den zuvor erfolgten Darstellungen in Bild 3.42 und Bild 3.43 kann dem Diagramm in Bild 3.44 entnommen werden, wie der rote Messwertgraph der Befahrung vom 16.01.2013 den dem Faziesübergang vorgelagerten Teufenbereich ohne größere Ausschläge

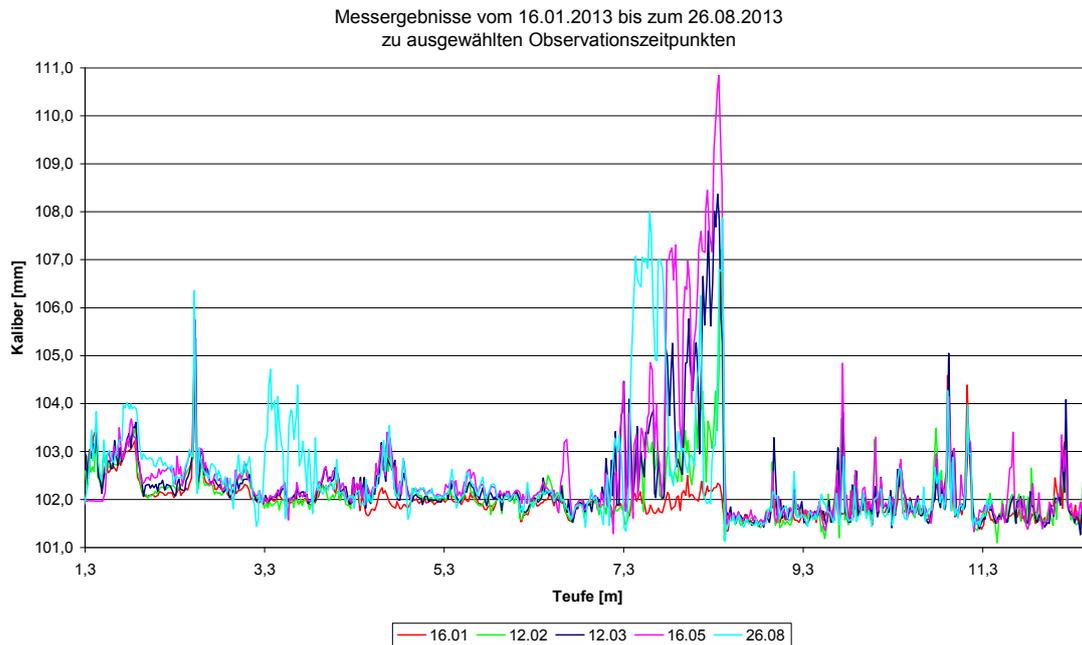


Bild 3.44: Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde: Zusammenstellung der Ausfahrten unter $\varphi = 0^\circ$ für fünf ausgewählte Befahrungstermine im Observationszeitraum vom 16.01.2013 bis zum 26.08.2013 für das Bohrloch DMB-B3

durchläuft, was die Unversehrtheit der Bohrlochwand zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 verdeutlicht. Die zum ersten Observationszeitpunkt im später von starken Konturaufweitungen betroffenen Bohrlochabschnitt unmittelbar vor dem Faziesübergang gemessenen Kaliberwerte liegen durchschnittlich nicht oberhalb der weiteren innerhalb des in der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitts gemessenen Kaliberwerte. Einzig ein kleiner annähernd vertikaler Versatz im Messwertgraphen vom 16.01.2013 weist zum Observationszeitpunkt zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 auf den Faziesübergang von der tonigen in die karbonatreiche Fazies in der Teufe von $t_{BL} \approx 8,4$ m hin.

Zu den nachfolgenden drei in der Darstellung in Bild 3.44 berücksichtigten Befahrungsterminen wachsen die im unmittelbar dem Faziesübergang vorgelagerten Bohrlochabschnitt in der tonigen Fazies gemessenen Kaliberwerte von Befahrungstermin zu Befahrungstermin signifikant an, bis zum Observationstermin 17 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 am 16.05.2013 ein maximaler Kaliberwert von $d_{BL_max} \approx 110,8$ mm gemessen wird. Zum letzten Observationszeitpunkt am 26.08.2013 ist überraschenderweise ein deutlich kleinerer Messwert in einer Teufe von $t_{BL} \approx 8,4$ m ermittelt worden. Der gegenüber dem zum vorangegangenen Observationszeitpunkt ermittelten Messwert kleinere Messwert muss jedoch als auf



einem messtechnischen Fehler beruhend betrachtet werden, da, wie die Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.35 zeigt, über den gesamten 32-wöchigen Observationszeitraum hinweg eine durch die Ausbildung von Bohrlochwandabschalungen in den Stoßbereichen bedingte Aufweitung der Bohrlochkontur in der Teufe von $t_{BL} \approx 8,4$ m erfolgt ist. Eine mögliche Begründung für einen messtechnischen Fehler könnte darin zu suchen sein, dass die Gelenke des Messmechanismus der Dreiarmkalibersonde in dem zum betrachteten Observationszeitpunkt bereits stark von Bohrlochwandaufweichungen und Bohrlochwandverbrüchen betroffenen Bohrloch durch bei der Befahrung erfasstes und an der Sonde anhaftendes plastifiziertes Gesteinsmaterial in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt worden sind. Ein Sachverhalt, der dann eine zur messtechnischen Erfassung der kompletten Bohrlochkonturaufweitung erforderliche Ausdehnung des Messmechanismus unmöglich gemacht haben könnte.

Sehr gut anhand der Betrachtung der Messwertgraphen in Bild 3.44 nachvollziehbar ist, wie sich der dem Faziesübergang vorgelagerte und von Bohrlochkonturaufweitungen betroffene Bohrlochabschnitt zeitabhängig in Richtung des Bohrlochmunds erweitert hat, bis der Teufenbereich, der von starken Gesteinsabschalungen in den Bohrlochstoßbereichen betroffen ist, sich zum Ende des Observationszeitraums über einen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 8,4$ m erstreckt und somit insgesamt in etwa $l \approx 1,5$ m umfasst. Die anhand der Betrachtung der in Bild 3.44 dargestellten Messwertgraphen zu erkennende zeitabhängige Ausweitung des von starken Gesteinsabschalungen in den Bohrlochstoßbereichen betroffenen Bohrlochabschnitts stellt ein weiteres Argument für die bereits im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse der Bohrlochvideobestimmung geäußerte Vermutung dar, dass die starken Bohrlochwandbeschaffenheitsveränderungen in dem dem Faziesübergang vorgelagerten Bohrlochabschnitt durch im Bereich der karbonatreichen Fazies der Bohrlochwand zusickerndes und anschließend in den innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bereich auf der Bohrlochsohle herunter laufendes Gebirgswasser verursacht werden.

Abgesehen von den faziell bedingten Unterschieden bezüglich des zeitabhängigen Tragverhaltens im Übergangsbereich zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies kann der Betrachtung von Bild 3.44 ein weiterer, sich in den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde manifestierender Unterschied bezüglich des zeitabhängigen Verhaltens der Bohrlochwand zwischen den zwei in den unterschiedlichen Gesteinsfaziestypen abgeteufte Bohrlochabschnitten entnommen werden.

Im Bereich der karbonatreichen Fazies weisen die Messwertgraphen vom Beginn des Observationszeitraums an unruhigere, stärker oszillierende Verläufe auf. Wie vorangehend bereits erwähnt worden ist, sind die unruhigeren Verläufe der Messwertgraphen mit der schnelleren Abfolge von lokalen Messwertminima und lokalen Messwertmaxima wahrscheinlich der größeren Härte und Abrasivität des Gesteins im Bereich der karbonatreichen Opalinustonfazies im Vergleich zum Gestein im Bereich der tonigen Opalinustonfazies geschuldet. Allerdings unterscheiden sich die Verläufe der in Bild 3.44 dargestellten Messwertgraphen im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich unabhängig vom Zeitpunkt ihrer Aufzeichnung wenn überhaupt dann nur geringfügig voneinander. Anders verhält es sich im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Abschnitt des Bohrlochs DMB-B3. Hier unterscheiden sich die von der Dreiarmkalibersonde generierten, in Bild 3.44 dargestellten Messwertgraphen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt ihrer Aufzeichnung deutlich voneinander. Nicht nur in dem dem Faziesübergang unmittelbar vorgelagerten Teufenbereich liegen die zu den späteren Zeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen deutlich oberhalb des Messwertgraphens der Messung vom 16.01.2013, sondern auch in weiteren Teufenbereichen indiziert der Vergleich der Verläufe der zu den fünf ausgewählten unterschiedlichen Observationsterminen innerhalb des 32-wöchigen Beobachtungszeitraums aufgezeichneten Messwertgraphen zeitabhängig voranschreitende Aufweitungen der Bohrlochkontur. In solchen Teufenbereichen, in denen die Messwertgraphen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt ihrer Aufzeichnung stark unterschiedlich anmutende Verläufe aufweisen und in denen die Messwerte sich gegenüber den Messwerten der Nullmessung vom 16.01.2013 um $\Delta d_{BL} > 1,0$ mm unterscheiden, ist wohl von bruchhaften Veränderungen der Bohrlochwand auszugehen. Besonders auffällig bei der Betrachtung des Diagramms in Bild 3.44 ist in diesem Zusammenhang der Verlauf des türkisfarbenen Messwertgraphen der Messung vom 26.08.2013 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,2$ m bis $t_{BL} \approx 4,0$ m. Im nachfolgenden Abschnitt 3.1.6(c) werden im Rahmen der Gegenüberstellung von ausgewählten Ergebnissen der Videobefahrungen mit ausgewählten Ergebnissen der Kalibermessungen für das Bohrloch DMB-B3 einige Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom 26.08.2013 aus Teufenbereichen, in denen bruchhafte Veränderungen der Bohrlochwand zu detektieren gewesen sind, mit den in Bild 3.44 dargestellten Messwertgraphen korreliert.

Es zeigen sich allerdings auch in solchen Teufenbereichen innerhalb des in der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitts des Bohrlochs DMB-B3, in denen weder anhand der Auswertung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera noch anhand der Betrachtung der von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichneten Messwertgraphen ein bruchhaftes Versagen der Bohr-



lochwand detektiert werden konnte, zeitabhängige Unterschiede zwischen den zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen. Besonders gut erkennen lassen sich die Unterschiede zwischen den Messwertgraphen im von bruchhaften Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit nicht betroffenen Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,0$ m und $t_{BL} \approx 6,4$ m. Bei genauer Betrachtung der Messwertgraphen im benannten Teufenbereich lässt sich erkennen, dass die zu den fünf unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen nahezu parallele Verläufe aufweisen und dass die zu den späteren Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen jeweils gemessene Kaliberwerte anzeigen, die durchschnittlich um wenige Zehntelmillimeter oberhalb von den bei der vorangegangenen Messung mittels der Dreiarmkalibersonde generierten Messwerten liegen.

Innerhalb der karbonatreichen Fazies sind derartige zeitabhängig auftretende Differenzen zwischen den gemessenen Kaliberwerten anhand der Betrachtung der Verläufe der Messwertgraphen nicht festzustellen. Einen naheliegenden Erklärungsansatz für die bei der Betrachtung von Bild 3.44 festzustellenden Differenzen bezüglich der Verläufe der zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten innerhalb des in der tonigen Fazies gelegenen und innerhalb des in der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitts aufgezeichneten Messwertgraphen stellt die höhere hydraulische Sensitivität des Gesteins innerhalb der tonigen Fazies im Vergleich zur hydraulischen Sensitivität des Gesteins innerhalb der karbonatreichen Fazies dar. Während das Gestein innerhalb der karbonatreichen Fazies sich über den gesamten 32-wöchigen Observationszeitraum hinweg als weitestgehend vom stattfindenden Sickerwasserzutritt unbeeinflusst erweist, verursacht das wahrscheinlich aus der karbonatreichen Fazies in die tonige Fazies heruntersickernde Gebirgswasser im Bereich der tonigen Fazies zeitabhängig eintretende Gesteinsaufweichungen, die sich in einer gemessenen minimalen Aufweitung der Bohrlochkontur manifestieren, da die Messarme der Dreiarmkalibersonde sich umso tiefer in das Gestein in der Bohrlochwand hineindrücken, umso mehr die Bohrlochwand durch einen Anstieg des Wassergehaltes im Gestein aufgeweicht wird.

(c) *Gegenüberstellung von ausgewählten Ergebnissen der Videobefahrungen mit ausgewählten Ergebnissen der Kalibermessungen für das Bohrloch DMB-B3*

Wie zuvor schon für das Observationsbohrloch DMB-B1 soll auch für das Observationsbohrloch DMB-B3 der Versuch einer Korrelation der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit

den von der Dreiarmkalibersonde generierten Kalibermesswerten unternommen werden. Für das Bohrloch DMB-B2 liegen keine Kalibermessdaten vor, sodass eine entsprechende Gegenüberstellung nicht möglich gewesen ist.

Zwar vermitteln die Befunde aus der Befahrung mit Bohrlochkamera und Kalibersonde für sich allein schon sehr gute Einblicke in das innerhalb des Observationsbohrlochs DMB-B3 ablaufende zeitabhängige Trag- und Deformationsverhalten der Bohrlochwand, jedoch haben die Erfahrungen aus den vorangegangenen Vorhaben *Lux & Seeska (2010)* und *Lux et al. (2012)* sowie die Ergebnisauswertungen für das Observationsbohrloch DMB-B1 aufgezeigt, dass durch die Gegenüberstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde mit ausgewählten Ergebnissen der Bohrlochvideoobservation mittels der Axial-Bohrlochkamera ein umfassenderes Bild von den Vorgängen innerhalb des observierten Bohrlochs erstellt werden kann. Daher soll im vorliegenden Abschnitt auch für das Bohrloch DMB-B3 versucht werden, eine Korrelation zwischen den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera und den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde herzustellen.

Vor diesem Hintergrund ist festzustellen, dass sich zwischen den von der Axial-Bohrlochkamera aufgenommenen Bildern und den mit der Dreiarmkalibersonde aufgezeichneten Messwerten für das Bohrloch DMB-B3 insgesamt sehr schlüssige Zusammenhänge herstellen lassen. Exemplarisch hierfür sind in Bild 3.45 ausgewählte Aufnahmen der Videobefahrung des Bohrlochs DMB-B3 vom 26.08.2013 den Ergebnissen der fünf ausgewählten Kalibersondenbefahrungen des Bohrlochs DMB-B3 aus Bild 3.44 gegenübergestellt.

Anhand der grafischen Gegenüberstellung von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit den von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichneten Messwerten in Bild 3.45 zeigt sich, dass sich die Ergebnisse der Kalibersondenbefahrung vom 26.08.2013 (türkisfarbener Graph) mit den Ergebnissen der Axial-Bohrlochkamerabefahrung vom 26.08.2013 hervorragend korrelieren lassen.

In Bild 3.45(a) zeigt sich im Bohrlochbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m eine ringförmige Struktur in der Bohrlochwand. Bild 3.45 zeigt den durch die ringförmige Struktur hervorgerufenen, sehr starken, aber nur punktuell auf einen sehr kurzen Bohrlochbereich begrenzten Ausschlag des Messwertgraphen. Der Zusammenhang zwischen der in Bild 3.45(a) dargestellten Aufnahme und dem dazugehörigen, von der Dreiarmkalibersonde in einer Teufe von $t_{BL} \approx 2,5$ m aufgezeichneten Messwert wird in Bild 3.45 durch einen roten Pfeil verdeutlicht. Bei der ringförmigen Struktur handelt es sich um eine in etwa schichtungsparell und somit

orthogonal zur Bohrlochlängsachse gelagerte, einige Zentimeter starke, sehr harte Pyritschicht, die vom Bohrloch DMB-B3 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m durchteuft wird.

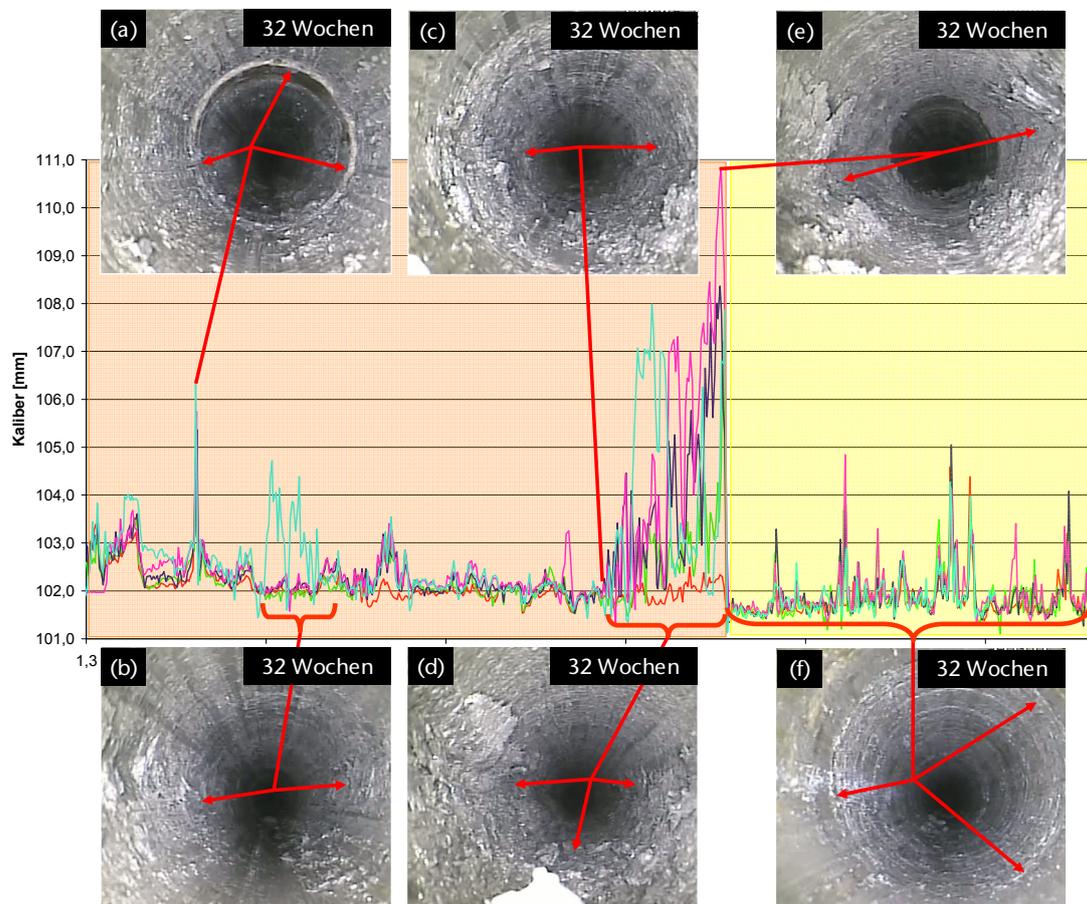


Bild 3.45: Gegenüberstellung von Messergebnissen der Dreiarmlkalibersonde mit ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera des Observationszeitpunktes 32 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3

Bild 3.45(b) zeigt den zunächst innerhalb der ersten 17 Wochen des Observationszeitraums standfesten, dann aber doch infolge des Feuchtigkeitsanstiegs innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 aufgeweichten und infolge von Konturbrüchen im Bohrlochstoßbereich, die sich zwischen der 17. Woche und der 32. Woche des Observationszeitraums ereignet haben, aufgeweiteten Bohrlochbereich von $t_{BL} \approx 3,5$ m bis $t_{BL} \approx 3,7$ m. Bild 3.45(b) ist hier als repräsentativ für den gesamten Bohrlochbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,2$ m und $t_{BL} \approx 4,0$ m zu betrachten und zeigt damit die Ursache dafür, dass die Dreiarmlkalibersonde bei der Befahrung am 26.08.2013 in diesem Teufenbereich deutlich oberhalb der bei den vorherigen Befahrungen gemessenen Kaliberwerte liegende Messergebnisse im Zahlenwertebereich von bis zu $d_{BL} \approx 104,8$ mm aufgezeichnet hat.

Die Aufnahme in Bild 3.45(c) zeigt den Beginn des innerhalb des 32-wöchigen Observationszeitraums durch den Feuchtigkeitszutritt aus der oberhalb gelegenen karbonatreichen Fazies in die tonige Fazies hinein aufgeweichten und infolge der Aufweichungen von Konturbrüchen im Stoßbereich betroffenen, dem Faziesübergang unmittelbar vorgelagerten Bohrlochabschnitts. Der auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.45(c) zu betrachtende Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m ist vorangehend bereits ausführlich bezüglich seiner zeitabhängigen Entwicklung diskutiert und in Bild 3.32 dargestellt worden. Ab dem Observationstermin am 12.03.2013 beginnen die Messwertgraphen bereits ab einer Teufe von $t_{BL} \approx 6,9$ m deutlich stärker nach oben auszuschlagen als in den näher zum Bohrlochmund hin gelegenen Teufenbereichen und indizieren somit, dass der von aufweichungsbedingtem Versagen der Bohrlochwand betroffene Teufenbereich sich acht Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 bereits $l \approx 1,5$ m tief in die tonige Fazies hinein erstreckt. Wie Bild 3.32(h) entnommen werden kann, deutet sich das beschriebene Bohrlochwandversagen zu diesem Observationszeitpunkt allerdings erst leicht an und ist im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m erst zum letzten Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen deutlich anhand der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu erkennen. Mit der Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 7,1$ m liegt somit ein Beispiel für eine gebirgsmechanischen Situation vor, deren zeitabhängige Entwicklung deutlich besser durch den zusätzlichen Einsatz der sensiblen Messtechnik der Dreiarmlibersonde als durch den alleinigen Einsatz der Axial-Bohrlochkamera erfasst werden kann.

Die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.45(d) repräsentiert den Zustand der Bohrlochwand in dem von einem aufweichungsbedingten Bohrlochwandversagen in den Stoßbereichen betroffenen Bohrlochabschnitt zwischen $t_{BL} \approx 6,9$ m bis $t_{BL} \approx 8,4$ m und liefert somit die Begründung für die unruhigen Verläufe der Messwertgraphen und die deutlich oberhalb des ursprünglichen Bohrlochdurchmessers von $d_{BL} \approx 102,0$ mm gelegenen gemessenen Kaliberwerte. Die in Bild 3.45(d) dargestellte Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera ist bei einer Position der Kamera in einer Teufe von $t_{BL} \approx 7,3$ m entstanden.

Bild 3.45(e) zeigt schließlich auf eindrucksvolle Art und Weise den unmittelbaren Faziesübergang zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies im vorangehend im Rahmen der Vorstellung der Ergebnisse der Bohrlochvideobehobung schon ausführlich diskutierten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 8,3$ m bis $t_{BL} \approx 8,5$ m. Der Faziesübergang stellt das abrupte Ende des von starken Aufweichungen und Bohrlochwandversagen betroffenen Bohrlochabschnitts dar.

Unmittelbar vor dem Faziesübergang innerhalb der tonigen Fazies ist das Bohrloch DMB-B3 am stärksten von den beschriebenen Bohrlochwandbeschaffenheits- und den damit einhergehenden Bohrlochkonturveränderungen betroffen, so dass in diesem Teufenbereich auch die größten Kaliberwerte von $d_{BL-MAX} \approx 110,8$ mm innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 gemessen werden.

Abschließend für die Gegenüberstellung von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit Messwerten der Dreiarmkalibersonde ist in Bild 3.45(f) die von der Axial-Bohrlochkamera im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 10,2$ m bis $t_{BL} \approx 10,4$ m bei der Befahrung des Bohrlochs DMB-B3 am 26.08.2013 aufgezeichnete Aufnahme dargestellt. Auf der Aufnahme sind einige kleinere ringförmig um die Bohrlochkontur herum verlaufende Abschalung zu erkennen, die allerdings so geringfügig sind, dass sie keine deutlich identifizierbaren Differenzen zwischen den zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen hervorrufen. Daher ist die in Bild 3.45(f) dargestellte Aufnahme auch als repräsentativ für die große Standfestigkeit der Bohrlochwand und die minimalen zeitabhängigen Veränderungen der Bohrlochkontur, die im Rahmen der durchgeführten Observationsarbeiten innerhalb des 32-wöchigen Beobachtungszeitraums im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt festgestellt werden konnten, anzusehen.

Zusammenfassend ist zu den im Rahmen der Auswertung der durchgeführten in situ-Arbeiten sowohl für das Bohrloch DMB-B1 wie auch für das Bohrloch DMB-B3 vorgenommenen Ergebnisgegenüberstellungen von ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit von der Dreiarmkalibersonde gemessenen Kaliberwerten festzustellen:

Die erfolgte Gegenüberstellung der mit den beiden Bohrlochobservationsinstrumenten generierten Befunde zeigt eindrucksvoll, wie sich beide Verfahren gegenseitig bei der Interpretation der jeweiligen Mess- bzw. Beobachtungsbefunde ergänzen. Die Kombination von Dreiarmkalibersonde und Axial-Bohrlochkamera stellt insbesondere auch für die innerhalb der observierten Bohrlöcher vorliegenden, dem eingesetzten Beobachtungsinstrumentarium ein großes Maß an Robustheit abverlangenden Einsatzbedingungen (Feuchtigkeit / stark bruchhaftes, plastifiziertes Gesteinsmaterial / starke Konturveränderungen) eine gut praktikable und ergebnisbezogen effektive Methode zur Beobachtung des zeitabhängigen Bohrlochtrag- und Deformationsverhaltens dar.



(d) *Ausgewählte Ergebnisse der Luftfeuchtigkeitsmessungen für das Bohrloch DMB-B3*

Zur Abrundung des innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 durchgeführten Observationsprogramms sind vom 17.01.2013 bis zum 26.02.2013 in drei unterschiedlichen Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B3 Feuchtigkeitssensoren zur kontinuierlichen Aufzeichnung der innerhalb des Bohrlochs vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeit installiert worden. Die drei Sensoren sind zur Aufzeichnung der relativen Luftfeuchtigkeit in Teufen von $t_{BL} \approx 1,0$ m, $t_{BL} \approx 5,0$ m und $t_{BL} \approx 9,0$ m im Bohrloch DMB-B3 installiert worden. Durchgeführt worden sind die Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit, um den im Rahmen der vorangegangenen Bohrlochvideobervationsarbeiten gewonnenen Eindruck, dass innerhalb der in der Nische MI des URL Mont Terri observierten und in *Lux & Seeska (2010)* reportierten Bohrlöcher eher feuchte Bedingungen vorherrschen, auch in Bezug auf den relativen Feuchtegehalt der Luft im Inneren der Bohrlöcher quantitativ mit Messergebnissen unterlegen zu können. Des Weiteren können die gemessenen Luftfeuchtigkeiten in Zukunft als Rahmenbedingungen für laborative und numerische Untersuchungen genutzt werden.

Die Messungen mittels der drei Feuchtigkeitssensoren sind innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 im Zeitraum zwischen dem 17.01.2013 und dem 26.02.2013 nahezu kontinuierlich durchgeführt worden. Die einzigen Unterbrechungen der Messungen haben zu den Zeitpunkten stattgefunden, an denen das Bohrloch mit der Dreiarmlibersonde und mit der Axial-Bohrlochkamera befahren worden ist. Da die Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit zu den Observationszeitpunkten unterbrochen werden mussten, liegen die von den drei Luftfeuchtigkeitssensoren aufgezeichneten Messwerte auch nicht durchgehend aneinandergereiht in einem Diagramm vor, sondern die Messwerte sind als im Rahmen von mehreren hintereinander durchgeführten Messungen generierte Ergebnisse in getrennten Diagrammen dargestellt worden. Da sich bezüglich der vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeiten innerhalb der drei unterschiedlichen Teufenbereiche bereits kurze Zeit nach dem Beginn der Messungen am 17.01.2013 ein klar zu identifizierender Trend abgezeichnet hat und es im Rahmen der weiteren Messungen zu keinen überraschenden Abweichungen in Bezug auf die gemessenen relativen Luftfeuchtigkeiten gekommen ist, ist es zur Ergebnispräsentation im Rahmen des vorliegenden Berichts als hinreichend erachtet worden, für jeden der betrachteten Teufenbereiche jeweils das Ergebnis des ersten Messintervalls vom 17.01.2013 bis zum 22.01.2013 sowie das Ergebnis des letzten Messintervalls von 12.02.2013 bis zum 26.02.2013 darzustellen. Bild

3.46 zeigt die innerhalb der beiden Messintervalle in den drei unterschiedlichen Teufenbereichen aufgezeichneten relativen Luftfeuchtigkeiten.

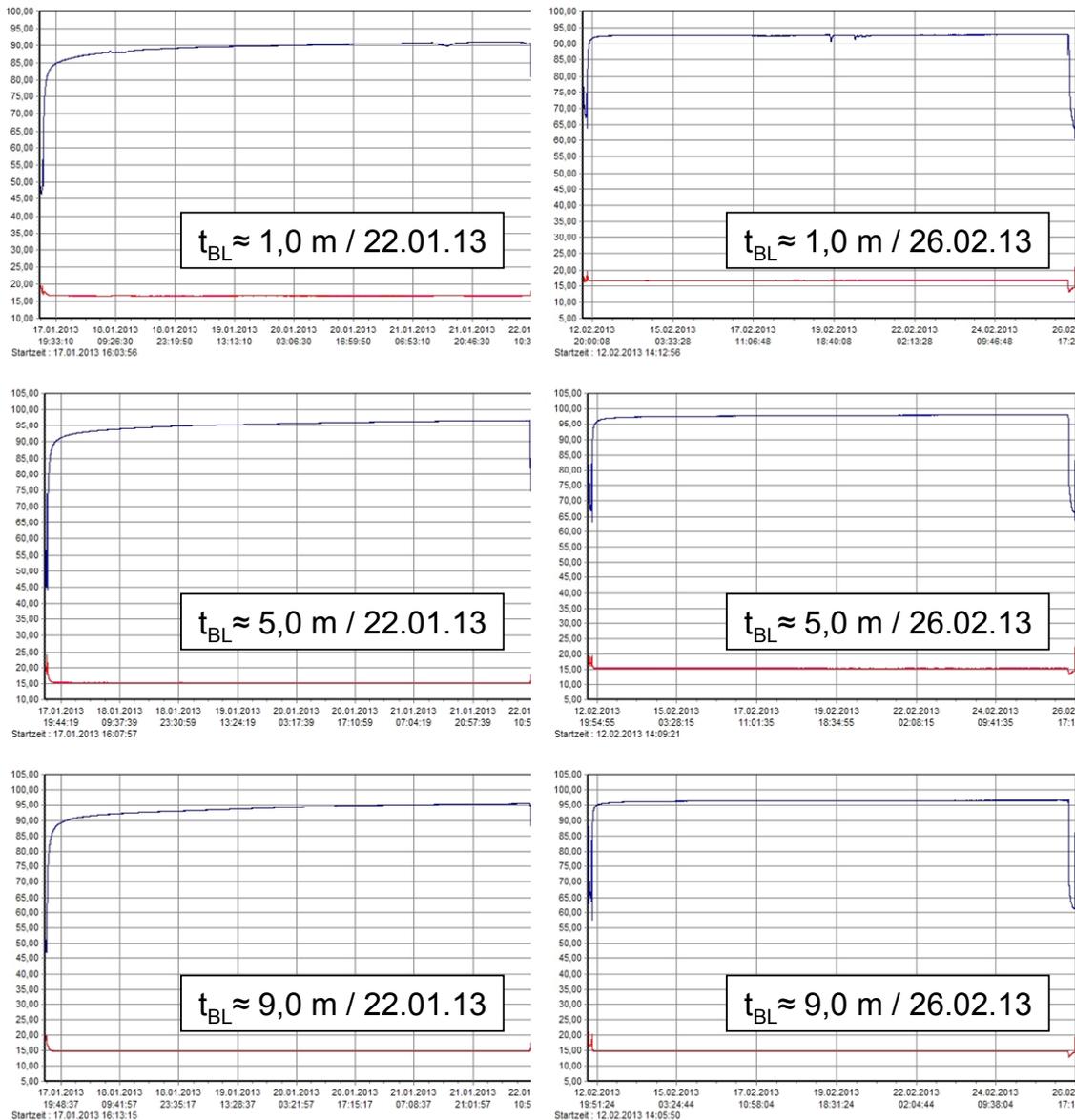


Bild 3.46: Gemessene relative Luftfeuchtigkeiten (blaue Graphen) und Temperaturen (rote Graphen) in drei unterschiedlichen Teufenbereichen des Bohrlochs DMB-B3 bei $t_{BL} \approx 1,0\text{ m}$, $t_{BL} \approx 5,0\text{ m}$ und $t_{BL} \approx 9,0\text{ m}$ in den Zeiträumen vom 17.01.2013 bis zum 22.01.2013 und vom 12.02.2013 bis zum 26.02.2013

In der linken Spalte in Bild 3.46 sind die in den drei unterschiedlichen Teufenbereichen innerhalb des ersten Messintervalls vom 17.01.2013 bis zum 22.01.2013 generierten Messwerte dargestellt. Die zweite Spalte enthält die im letzten Messintervall vom 12.02.2013 bis zum 26.02.2013 aufgezeichneten Messwerte. Die erste Zeile enthält die innerhalb der beiden hier näher betrachteten Messintervalle in einer Teufe von $t_{BL} \approx 1,0\text{ m}$ generierten Messergebnisse.

Die Messergebnisse aus einer Teufe von $t_{BL} \approx 5,0$ m sind in der zweiten Zeile dargestellt und die von dem Sensor, der in einer Teufe von $t_{BL} \approx 9,0$ m innerhalb des Bohrlochs installiert gewesen ist, aufgezeichneten Messwerte können in der dritten Zeile in Bild 3.46 betrachtet werden. Neben den relativen Luftfeuchten, auf denen das Hauptaugenmerk bei der Durchführung der Messungen gelegen hat, sind zusätzlich auch noch die innerhalb der drei Teufenbereiche des Bohrlochs DMB-B3 vorherrschenden Temperaturen durch die im Bohrloch installierten Messapparaturen erfasst worden. Die sechs in Bild 3.46 zu betrachtenden Diagramme enthalten daher neben der Darstellung der kontinuierlich aufgezeichneten relativen Luftfeuchtigkeiten mittels der blauen Messwertgraphen zusätzlich auch noch die Darstellung der kontinuierlich gemessenen Temperaturen anhand der roten Messwertgraphen.

Innerhalb des Teufenbereichs in der Umgebung der Teufe von $t_{BL} \approx 1,0$ m steigen die gemessenen Feuchtwerte innerhalb einiger weniger Stunden nach dem erstmaligen Einbringen des Sensors in das Bohrloch auf $R_H \approx 85$ %. Parallel dazu fällt innerhalb des gleichen Zeitraums die gemessene Temperatur von den innerhalb der Nische MI vorherrschenden $T \approx 20^\circ\text{C}$ auf in etwa $T \approx 17^\circ\text{C}$ ab. Der erste steile Anstieg des Messwertgraphen der relativen Luftfeuchtigkeit ist somit nicht auf eine tatsächlich innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 ablaufende Entwicklung bezüglich der vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeit zurückzuführen, sondern auf die Akklimatisierung des zuvor innerhalb eines wärmeren Regimes aufgewärmten Messsensors. Gleiches gilt auch für die Messergebnisse der beiden innerhalb der zwei tiefer im Bohrloch gelegenen Teufenbereiche installierten Feuchtigkeitssensoren. Erst nachdem die roten Messwertgraphen der Temperaturen näherungsweise horizontale Verläufe annehmen, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Messsensoren auf die innerhalb der drei Teufenbereiche vorherrschenden Umgebungstemperaturen abgekühlt haben und dass somit bezüglich der relativen Luftfeuchten realistische Messergebnisse generiert werden. Für die beiden tiefer innerhalb des Bohrlochs gelegenen Teufenbereiche werden konstant vorherrschenden Temperaturen von $T \approx 15^\circ\text{C}$ gemessen und für den näher an der durch zahlreiche elektronische Gerätschaften und die Beleuchtungsanlage aufgeheizten Nische MI gelegenen Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 1,0$ m wird nahezu konstant eine Temperatur von $T \approx 17^\circ\text{C}$ ermittelt.

Während die gemessenen Temperaturen in den zwei tiefer gelegenen Teufenbereichen innerhalb der beiden betrachteten Messintervalle überhaupt keine Schwankungen aufweisen, sind im Verlauf des Messwertgraphen der Temperatur für den Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 1,0$ m bei einer sehr genauen Betrachtung einige minimale Temperaturschwankungen zu erkennen. Hier



zeigt sich der Einfluss der Nähe zur Niche MI, in der es betriebsbedingt zu klimatischen Schwankungen kommen kann, die dann entsprechend in stark abgeschwächter Form eine Teufe von $t_{BL} \approx 1,0$ m innerhalb des Bohrlochs erreichen können, aber keinen Einfluss auf den Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 5,0$ m oder die tiefer innerhalb des Bohrlochs gelegenen Teufenbereiche ausüben.

Nach dem Abschluss der Akklimatisierungsphase werden einige Stunden nach dem Einbringen der Messsensoren in das Bohrloch innerhalb des Teufenbereichs bei $t_{BL} \approx 1,0$ m wie vorangehend bereits erwähnt Zahlenwerte von $R_H \approx 85$ % gemessen, im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 5,0$ m werden gemessene Zahlenwerte der relativen Luftfeuchtigkeit von $R_H \approx 92$ % erreicht und im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 9,0$ m betragen die gemessenen Zahlenwerte der relativen Luftfeuchtigkeit $R_H \approx 90$ %. Innerhalb der nachfolgenden fünf Tage steigt die gemessene relative Luftfeuchtigkeit bis zum 22.01.2013 im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 1,0$ m auf einen Wert von $R_H \approx 91$ % an, erreicht im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 5,0$ m einen gemessenen Zahlenwert von $R_H \approx 96$ % und nimmt im Teufenbereich bei $t_{BL} \approx 9,0$ m einen Zahlenwert von $R_H \approx 95$ % an.

Innerhalb der nächsten hier nicht explizit dargestellten Messintervalle bleiben die innerhalb der drei Teufenbereiche gemessenen Temperaturen konstant, während die gemessenen relativen Luftfeuchten in allen drei betrachteten Teufenbereichen noch geringfügig um $\Delta R_H \approx 2$ % anwachsen. So erreicht gegen Ende des letzten Messeintervalls die gemessene Luftfeuchtigkeit im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,0$ m einen Wert von $R_H \approx 93$ % während die gemessene Luftfeuchtigkeit im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m einen Wert von $R_H \approx 98$ % annimmt und im Teufenbereich um $t_{BL} \approx 9,0$ m bezüglich der Luftfeuchtigkeit ein Wert von $R_H \approx 97$ % gemessen wird. Wie den Verläufen der drei Messwertgraphen in den zu dem letzten Messeintervall gehörigen Diagrammen in Bild 3.46 entnommen werden kann, liegen in der zweiten Hälfte des letzten Messeintervalls in allen drei Teufenbereichen sehr konstante Bedingungen bezüglich der vorherrschenden Luftfeuchten vor. Die konstanten Luftfeuchtigkeitsbedingungen manifestieren sich in den nahezu horizontalen Verläufen der Messwertgraphen in der zweiten Hälfte des Messeintervalls, nachdem zu Beginn des Messeintervalls bedingt durch den Aus- und Wiedereinbau der Messsensoren eine Störung der Messung erfolgt ist, die ein künstliches Absinken der gemessenen relativen Luftfeuchten in allen drei Teufenbereichen mit sich gebracht hat und zunächst eine erneute Akklimatisierungsphase erforderlich gemacht hat.



Insgesamt betrachtet untermauern die innerhalb des Messzeitraums vom 17.01.2013 bis zum 26.02.2013 gemessenen relativen Luftfeuchtigkeiten mit Messwerten von bis zu $R_H \approx 93\%$ in einer Entfernung von $\Delta l = 1\text{ m}$ zum Bohrlochmund und gemessenen Luftfeuchtigkeiten von bis zu $R_H \approx 98\%$ in den tiefer gelegenen Teufenbereichen eindrucksvoll den im Rahmen der Bohrlochvideobobservation entstandenen Eindruck von insgesamt eher als feucht und insbesondere im Bereich der karbonatreichen Fazies und im unmittelbar der karbonatreichen Fazies vorgelagerten Teufenbereich als sehr feucht zu bezeichnenden Bedingungen.

Eine Differenzierung zwischen dem als insgesamt sehr feucht zu bezeichnenden, innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich (Messsensor bei $t_{BL} \approx 9,0\text{ m}$) und dem auf Basis der Ergebnisse der Bohrlochvideobobservation als etwas weniger feucht eingestuften Teufenbereich in der Umgebung der Teufe von $t_{BL} \approx 5,0\text{ m}$ bezüglich der vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeiten ist allerdings mittels der eingesetzten Messtechnik nicht möglich gewesen. Während hier bezüglich der Feuchtegehalte des Gesteins der Bohrlochwand augenscheinlich anhand der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zumindest zu Beginn des Observationszeitraums Unterschiede feststellbar sind, kann eine derartige Differenzierung bezüglich der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeiten nicht vorgenommen werden.

3.1.7 Ausgewählte Ergebnisse der Videobefahrungen für das Bohrloch DMB-B4

(a) Übersicht

Insgesamt sind in den 31 Wochen nach dem Abteufen des horizontal im Streichen der Schichtflächen verlaufenden und $l_{BL} \approx 15,2\text{ m}$ langen Bohrlochs DMB-B4 acht Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera durchgeführt worden. Die acht Befahrungen haben einen Tag, sechs Tage, neun Tage, drei Wochen, fünf Wochen, sieben Wochen, 16 Wochen und 31 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 stattgefunden. Die acht Befahrungen mit der robusten Axial-Bohrlochkamera sind möglich gewesen, obwohl nur kurze Zeit nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 ein Verbruch des Bohrlochs im hinteren Bohrlochbereich festgestellt worden ist. Nur zum ersten Observationszeitpunkt einen Tag nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 ist eine Befahrung bis in die Endteufe von $t_{BL} \approx 15,2\text{ m}$ möglich gewesen. Zu den nachfolgenden Observationsterminen hat sich die Observation des im Streichen der Schichtflächen gelegenen Bohrlochs aufgrund von zunehmendem Bohrlochwandversagen und dementsprechend damit einhergehend auch einer Zunahme von lose im Bohrloch



liegendem, aus der Bohrlochwand herausgelöstem Gesteinsmaterial immer schwieriger gestaltet, so dass die Axial-Bohrlochkamera von Observationstermin zu Observationstermin weniger tief in das Bohrloch DMB-B4 vordringen konnte. Im nachfolgenden Abschnitt 3.1.7(b) wird zunächst der zeitabhängig voranschreitende Verbruch des Bohrlochs DMB-B4 anhand von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dokumentiert und diskutiert, bevor in den darauf folgenden beiden Abschnitten die zeitabhängigen Entwicklungen der Bohrlochwand in zwei Teufenbereichen, die sehr nah am Bohrlochmund gelegen sind und daher über den gesamten 31-wöchigen Observationszeitraum mittels der Axial-Bohrlochkamera erreichbar gewesen sind, vorgestellt und diskutiert werden.

(b) Bohrlochverbruch

Zur Dokumentation der zeitlichen Entwicklung des Verbruchs des Bohrlochs DMB-B4 ist eine aus acht Bildern bestehende Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.47 dargestellt.

Zu der in Bild 3.47 dargestellten Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera ist anzumerken, dass anhand der dargestellten Aufnahmen keine Aussage darüber getroffen werden kann, in welcher Teufe genau sich das erste Versagen der Bohrlochwand ereignet hat. Wahrscheinlich ist ein systematisches Versagen im Bereich der tangential zur Bohrlochkontur verlaufenden Schichtflächen. Die Tatsache, dass das Bohrloch DMB-B4 zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten nach dem ersten Befahrungstermin nur noch bis in eine Teufe befahren werden konnte, die kleiner als die ursprüngliche Endteufe und jeweils kleiner als die zum vorangegangenen Observationstermin noch zu erreichende Teufe gewesen ist, ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass im Rahmen der Befahrungen in Teufenbereichen, in denen ein Versagen der Bohrlochwand aufgetreten ist, loses Gesteinsmaterial von der Axial-Bohrlochkamera erfasst und solange mitgeführt worden ist, bis sich das vor der Axial-Bohrlochkamera aufgetürmte lose Gesteinshaufwerk derart in der geschädigten Bohrlochwand verkeilt hat, dass ein weiterer Vorschub der Axial-Bohrlochkamera nicht mehr möglich gewesen ist. Es ist somit nicht auszuschließen, dass sich hinter den in den Aufnahmen in Bild 3.47 dargestellten Teufenbereichen mit nicht mehr von der Kamera zu überwindendem oder fortzuschiebendem Gesteinshaufwerk noch standfeste Bohrlochabschnitte befinden bzw. zu irgendeinem Observationszeitpunkt befunden haben. In einem nur in etwa $\Delta l \approx 1,5$ m von dem

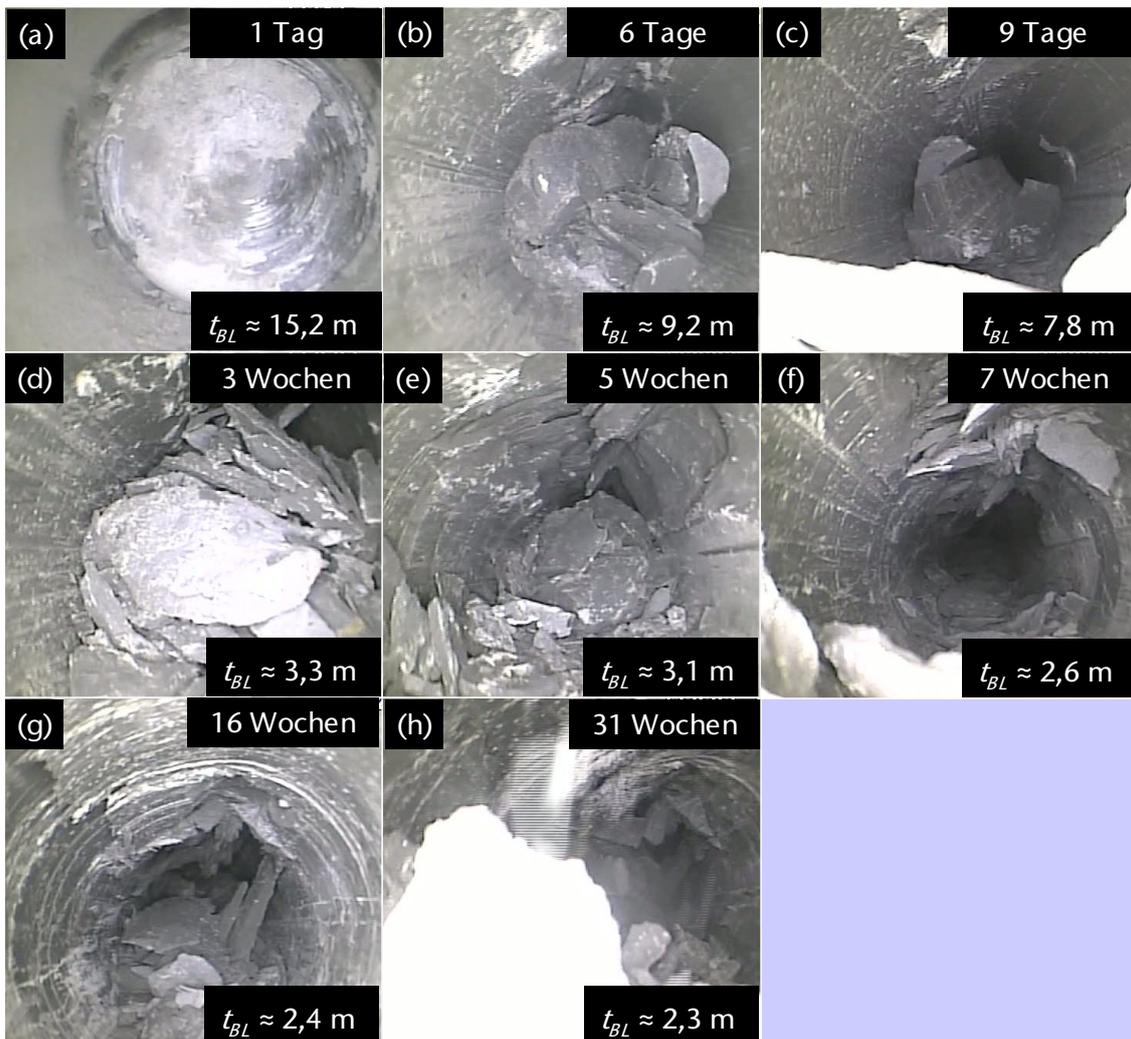


Bild 3.47: Dokumentation der zu den einzelnen Observationszeitpunkten innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 erreichbaren Endteufen anhand der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera

hier beschriebenen Bohrloch DMB-B4 entfernt liegenden, parallel verlaufenden und bereits in den Jahren 2008 bis 2010 untersuchten Bohrloch ist ein zeitabhängig aus größeren Teufenbereichen in Richtung des Bohrlochmundes fortschreitendes Schichtflächenversagen im Rahmen der Bohrlochvideobeobachtung festzustellen gewesen, Lux & Seeska (2010).

Anmerkung: Im vorliegenden Bericht wird das Versagen des Gesteins in den Schichtflächen vereinfachend als Schichtflächenversagen bezeichnet, während das Versagen des Gesteins außerhalb der Schichtflächen vereinfachend als Matrixversagen benannt wird.

Ein derartig systematisch auftretendes, sich zeitabhängig vom Bohrlochtieftsten in Richtung des Bohrlochmundes ausbreitendes Schichtflächenversagen oder wie auch immer geartetes Bohrlochwandversagen ist im Rahmen der Videobeobachtung des Bohrlochs DMB-B4 nicht

festzustellen gewesen. Dennoch ist die in Bild 3.47 zu betrachtende Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera als Indikator für eine, wenn auch nicht nach einem klar identifizierbaren System mit einer eindeutig identifizierbaren Bruchfront ablaufende, zeitabhängig eintretende Destabilisierung der Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B4 anzusehen.

Der Hauptversagensmechanismus, der für das Vorhandensein von großen Mengen von losem Gesteinshaufwerk im Inneren des Bohrlochs DMB-B4, die ab dem zweiten Observationstermin sechs Tage nach dem Abteufen ein Erreichen des ursprünglichen Bohrlochtieftes unmöglich gemacht haben, verantwortlich ist, ist das Schichtflächenversagen. So hat in dem im Streichen der unter $\alpha \approx 45^\circ$ einfallenden Schichtflächen gelegenen Bohrloch das Versagen der Bohrlochwand vorwiegend in den Bereichen der Bohrlochkontur begonnen, in denen die einfallenden Schichtflächen die Bohrlochkontur tangential berühren bzw. in tangentialer Richtung zur Bohrlochkontur verlaufen. Sehr gut erkennen lässt sich die Ausbildung eines Schichtflächenversagens beispielsweise in dem in Bild 3.47(g) zu betrachtenden vorderen Teufenbereich. Das Erscheinungsbild des gerade noch standfesten Bohrlochabschnitts unmittelbar im Vorfeld des vollständig mit Gesteinshaufwerk aufgefüllten Teufenbereichs in Bild 3.47(g) mit dem im oberen linken Konturbereich zu erkennenden Bohrlochwandversagen erweckt den Eindruck, dass sich ein mehr oder weniger schalenartig zusammenhängender Gesteinsbereich aus der Bohrlochwand herauslöst. Die Herauslösung des Gesteins aus der Bohrlochwand scheint genau in dem Bereich der Bohrlochkontur begonnen zu haben, in dem die unter $\alpha \approx 45^\circ$ einfallenden Schichtflächen die Bohrlochkontur tangential berühren. Bild 3.48 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.47(g) mit einer grafischen Kennzeichnung des schalenartig zusammenhängenden Gesteinsbereichs, der sich im Prozess des Herauslösens aus der Bohrlochwand befindet.

Der Prozess der zeitabhängig voranschreitenden Herauslösung von Gestein aus der Bohrlochwand wird nachfolgend im Rahmen der Vorstellung und Diskussion von Ergebnissen der Bohrlochvideobehauptung für zwei Teufenbereiche, die innerhalb des über den gesamten 31-wöchigen Observationszeitraum hinweg mittels der Axial-Bohrlochkamera befahrbaren Bohrlochabschnitts liegen, noch ausführlich beschrieben. Wie der Darstellung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.47(b) bis Bild 3.47(g) entnommen werden kann, hat das Auftreten von Schichtflächenversagen in mehreren Teufenbereichen innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 in Verbindung mit der Herauslösung von größeren Gesteinsmengen aus



Bild 3.48: Herauslösung von schalenartig zusammenhängendem Gestein aus der Bohrlochwand mit einer Bruchkante in dem Bereich der Bohrlochkontur, in dem die Schichtflächen die Bohrlochkontur tangential berühren

der Bohrlochwand dazu geführt, dass die Kamerabefahrungen zu den sieben auf die Ursprungsbefahrung vom 24.01.2013 folgenden Observationsterminen nur bis in Endteufen von $t_{BL} \approx 9,2$ m (29.01.2013), $t_{BL} \approx 7,8$ m (31.01.2013), $t_{BL} \approx 3,3$ m (12.02.2013), $t_{BL} \approx 3,1$ m (26.02.2013), $t_{BL} \approx 2,6$ m (12.03.2013), $t_{BL} \approx 2,4$ m (16.05.2013) und $t_{BL} \approx 2,3$ m (26.08.2013) durchgeführt werden konnten.

(c) Bohrlochbereich 1 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 0,2$ m bis $t_{BL} \approx 0,4$ m / tonige Fazies

Im vorangehenden Abschnitt wird geschildert, wie durch das Auftreten von Schichtflächenversagen aus der Bohrlochwand herausgelöstes Gestein die Befahrung des Bohrlochs DMB-B4 mittels der Axial-Bohrlochkamera erschwert und in den tiefer gelegenen Teufenbereichen sogar unmöglich macht. Bei dem innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 im Verlauf des 31-wöchigen Observationszeitraums zu beobachtenden Schichtflächenversagen handelt es sich nicht um von einem Ausgangspunkt kontinuierlich und durchgängig in Richtung des Bohrlochmunds propagierendes Bohrlochwandversagen, sondern es konnte im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten innerhalb mehrerer Teufenbereiche mehr oder weniger unabhängig voneinander auftretendes Schichtflächenversagen beobachtet werden. Einer der Teufenbereiche, in denen bereits kurze Zeit nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 ein Schichtflächenversagen zu beobachten gewesen ist und der darüber hinaus auch noch über

den gesamten 31-wöchigen Observationszeitraum hinweg mit der Axial-Bohrlochkamera befahrbar gewesen ist, ist der sehr nah am Bohrlöchlumnd gelegene Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2$ m bis $t_{BL} \approx 0,4$ m. Bild 3.49 zeigt die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlöchlumndwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2$ m bis $t_{BL} \approx 0,4$ m anhand einer aus acht Bildern bestehenden Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera.

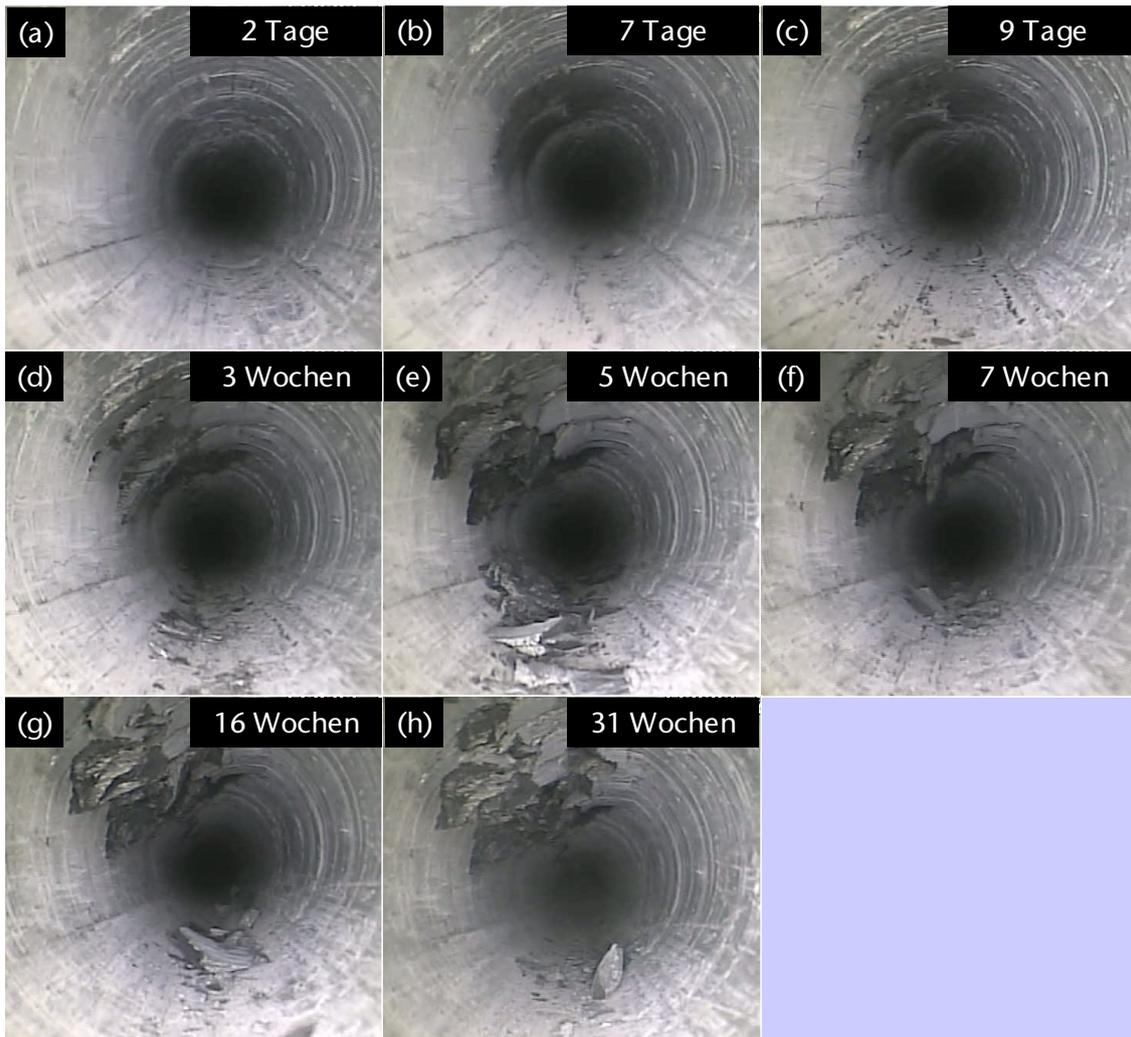


Bild 3.49: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlöchlumndwand im nahe des Bohrlöchlumnds gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2$ m bis $t_{BL} \approx 0,4$ m über einen Observationszeitraum von 31 Wochen mit der Ausbildung von Schichtflächenversagen im linken oberen Bereich der Bohrlöchlumndkontur

In Bild 3.49(a) kann zunächst zwei Tage nach dem Abteufen des Bohrlöchlumnds noch eine ungeschädigte Bohrlöchlumndwand des Bohrlöchlumnds DMB-B4 betrachtet werden. Bereits sieben Tage nach dem Abteufen sind im linken oberen Konturbereich deutliche strukturelle Veränderungen der Bohrlöchlumndbeschaffenheit zu erkennen, wie Bild 3.49(b) entnommen werden kann.

Zwar sind auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera noch keine eindeutig bruchhaften Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit zu identifizieren, aber ein Bereich der Bohrlochwand grenzt sich durch die dunklere Färbung des Gesteins deutlich vom restlichen auf der Aufnahme zu betrachtenden Gestein in der Bohrlochwand ab. Bild 3.50 zeigt die vergrößerte Darstellung von Bild 3.49(b) mit einer grafischen Kennzeichnung des dunkel verfärbten Bereichs der Bohrlochwand, in dem sich zu den nachfolgenden Observationsterminen ein schichtflächenbedingtes Bohrlochwandversagen ausbildet.

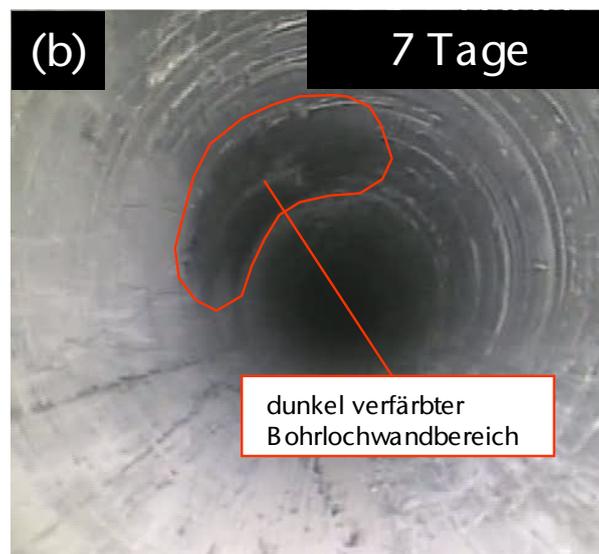


Bild 3.50: Dunkle Verfärbung der Bohrlochwand im linken oberen Konturbereich im sieben Tage alten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 0,4 \text{ m}$

Es ist im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten nicht abschließend aufzuklären gewesen, ob die in Bild 3.49(b) zu betrachtende dunkle Verfärbung der Bohrlochwand durch einen Feuchtigkeitzutritt in das Gestein der Bohrlochwand hinein hervorgerufen worden ist oder ob eine strukturelle Veränderung der Beschaffenheit des Gesteins in der Bohrlochwand für das dunklere Erscheinungsbild des Gesteins im später von einem Bohrlochwandversagen betroffenen Konturbereich verantwortlich ist. Denkbar wäre, dass hier ein aufgrund der Nähe zur Niche MI gestörter und daher aufgelockerter Gebirgsbereich vorliegt, der eine Wegsamkeit für Gebirgswasser darstellt und über den daher Feuchtigkeit in das Gestein im Bereich der Bohrlochwand des Bohrlochs DMB-B4 in den in Bild 3.49 dargestellten Teufenbereich eindringen konnte.

Mit Sicherheit festzustellen ist, dass es im Bereich der dunklen Verfärbung der Bohrlochwand bereits zwei Tage später zum Observationszeitpunkt neun Tage nach dem Abteufen zum Auf-

treten von Schichtflächenversagen gekommen ist, wie Bild 3.49(c) entnommen werden kann. Im dunkel verfärbten Bohrlochwandbereich ist es zu diesem Zeitpunkt bereits zur Ausbildung mehrerer Risse in der Bohrlochwand gekommen und das Herauslösen eines schalenartig verbundenen Gesteinsbereichs aus der Bohrlochwand heraus, wie es für das innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 zu beobachtende Schichtflächenversagen typisch ist und vorangehend bereits beschrieben wurde, hat ebenfalls bereits begonnen. Zur besseren Verdeutlichung der sich bereits neun Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 andeutenden Bruchstrukturen in der Bohrlochwand erfolgt in Bild 3.51 eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.49(c), in der einige Risse in der Bohrlochwand und die schalenartige Gesteinsablösung grafisch gekennzeichnet werden.

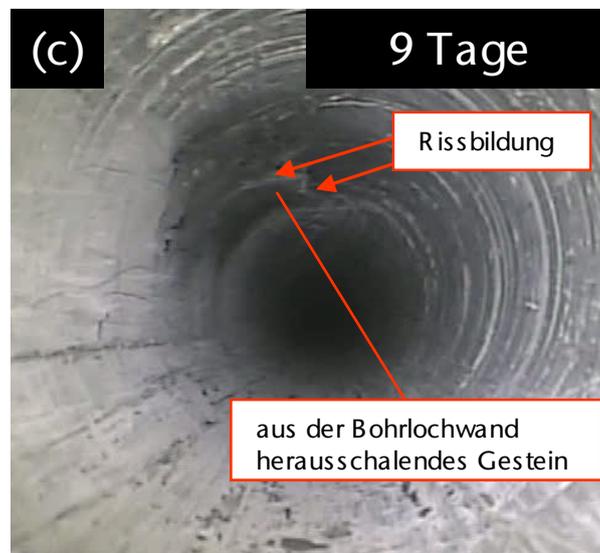


Bild 3.51: Erste Risse in der Bohrlochwand und der Beginn eines schalenartigen Herauslösens von Gestein aus der Bohrlochwand im linken oberen Konturbereich im neun Tage alten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2$ m bis $t_{BL} \approx 0,4$ m des Bohrlochs DMB-B4

In Bild 3.49(d) kann betrachtet werden, wie die sich zum Zeitpunkt neun Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 andeutenden Gesteinsabschalungen zu großflächigen Herauslösungen von Gestein aus der Bohrlochwand im linken oberen Bohrlochkonturbereich geführt haben. Der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.49(d) bis Bild 3.49(h) ist zu entnehmen, wie die bruchhaften Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit sich innerhalb der verbleibenden 28 Wochen des Observationszeitraums weiter ausbreiten. Allerdings schreitet die zeitabhängige Entwicklung des Bohrlochwandversagens zwischen der dritten und der 31. Woche des Observationszeitraums deutlich langsamer voran als es in den ersten drei Wochen des Observationszeitraums der Fall ist.

Auffällig bei der Betrachtung der Aufnahmen in Bild 3.49 ist, dass sich im gesamten 31-wöchigen Observationszeitraum ausschließlich im linken oberen Bohrlochkonturbereich ein Schichtflächenversagen ereignet und die Bohrlochwand im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur keine Beschaffenheitsveränderungen aufweist. Diese Beobachtung ist insofern bemerkenswert, da grundsätzlich in beiden Konturbereichen eine vergleichbare gebirgsmechanische Belastung zu erwarten ist und auch die Orientierung der Schichtflächen gegenüber der Bohrlochkontur und somit auch gegenüber den in der Umgebung der Bohrlochkontur wirkenden Hauptspannungen identisch ist. Das innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 beobachtete Schichtflächenversagen scheint somit in Bezug auf die Lokationen seines Auftretens maßgeblich durch Variationen der mechanischen Eigenschaften des anstehenden Gesteins in der Bohrlochwand und in der Umgebung des Bohrlochs DMB-B4 beeinflusst zu werden. Ortsabhängige Variationen der Gesteinsfestigkeit scheinen dabei zum einen in Bohrlochlängsrichtung vorzuliegen, was dazu geführt hat, dass sich innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 Teufenbereiche mit standfester Bohrlochwand mit Teufenbereichen, in denen die Bohrlochwand bruchhafte Veränderungen ihrer Beschaffenheit aufweist, abwechseln. Zum anderen ist im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten zusätzlich der Eindruck entstanden, dass auch innerhalb eines Teufenbereiches positionsabhängig entlang der Bohrlochkontur stärkere und schwächere Gesteinsbereiche miteinander abwechseln können – ein Sachverhalt, wie er beispielsweise in der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.49 betrachtet werden kann und der dazu geführt hat, dass zwei aus gebirgsmechanischer Sicht vermeintlich gleichermaßen stark belastete Konturbereiche innerhalb desselben Teufenbereichs ein unterschiedliches zeitabhängiges Tragverhalten aufweisen.

(d) *Bohrlochbereich 2 – Bohrlochteufe $t_{BL} \approx 1,6 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 1,8 \text{ m}$ / tonige Fazies*

Der Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 1,8 \text{ m}$ erweist sich als zunächst deutlich standfester als der im vorangehenden Abschnitt betrachtete Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 0,4 \text{ m}$. Das maßgeblich von einer entweder präexistenten oder eventuell durch die Schädigung einer Schichtfläche beim Abteufen des Bohrlochs entstandenen Struktur geprägte zeitabhängige Tragverhalten der Bohrlochwand innerhalb des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 1,6 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 1,8 \text{ m}$ kann in Bild 3.52 betrachtet werden.

Bereits zum Observationszeitpunkt zwei Tage nach dem Abteufen ist in der standfesten und ansonsten vollkommen ungeschädigt wirkenden Bohrlochwand eine deutliche Schädigung des

Gesteins im Firstbereich der Bohrlochkontur zu erkennen. Da die zu erkennende Gesteinschädigungen im Firstbereich einen signifikanten Einfluss auf das innerhalb des 31-wöchigen Observationszeitraums beobachtete zeitabhängige Tragverhalten innerhalb des betrachteten Bohrlochabschnitts ausübt, wird Bild 3.52(a) inklusive einer grafischen Kennzeichnung der möglicherweise präexistenten Struktur im Firstbereich in Bild 3.53 vergrößert dargestellt.

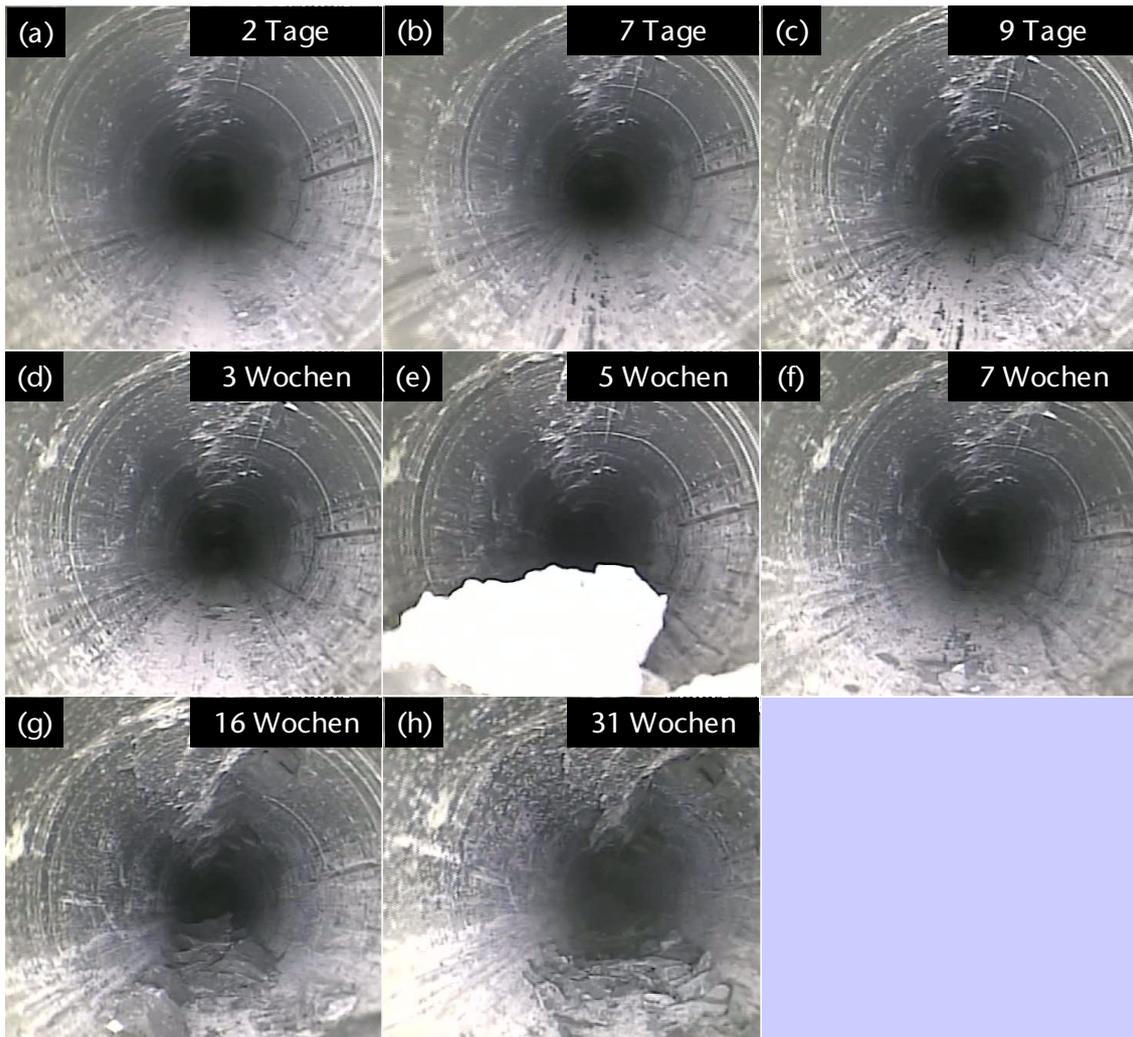


Bild 3.52: Zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m über einen Observationszeitraum von 31 Wochen mit der Ausbildung von Schichtflächenversagen entlang von bereits zum ersten Observationszeitpunkt detektierbaren Schädigungsstrukturen im oberen Bereich der Bohrlochkontur

Wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.52(a) bis Bild 3.52(d) entnommen werden kann, verhält sich die Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m innerhalb der ersten drei Wochen des Observationszeitraums standfest, bevor es zu einer im Bereich der Schädigungsstruktur im Firstbereich beginnenden Herauslösung

von Gestein aus der Bohrlochwand kommt. Die Herauslösung von erneut schalenartig zusammenhängendem Gestein aus der Bohrlochwand ist im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten ab der fünften Woche nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 zu beobachten gewesen und wird dementsprechend in Bild 3.52(e) bis Bild 3.52(h) dokumentiert. Während die Bohrlochwand auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.52(e) und Bild 3.52(f), die zu den Observationszeitpunkten fünf und sieben Wochen nach dem Abteufen entstanden sind, trotz der beginnenden Herauslösung von Gestein aus der Bohrlochwand beim Betrachten noch einen insgesamt als standfest zu bezeichnenden Eindruck hinterlässt, hat sich 16 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 ein komplettes Herausbrechen des zuvor zunächst im schalenartigen Verbund abgelösten Gesteins ereignet. Die zum Observationszeitpunkt 16 Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B4 gehörige Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera ist in Bild 3.52(g) zu betrachten. Wie der vergleichenden Betrachtung von Bild 3.52(g) und Bild 3.52(h) zu entnehmen ist, ereignen sich innerhalb der letzten 15 Wochen des insgesamt 31-wöchigen Observationszeitraums keine weiteren signifikanten Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit innerhalb des betrachteten Teufenbereichs.

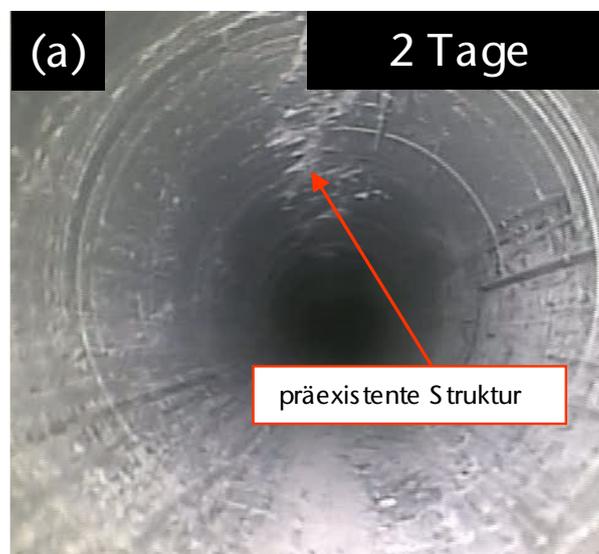


Bild 3.53: Möglicherweise präexistente Struktur in der Bohrlochwand im linken oberen Kurvenbereich im zwei Tage alten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 1,8 \text{ m}$

Während bezüglich des im vorangehend betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,2 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 0,4 \text{ m}$ beobachteten Schichtflächenversagens der Verdacht besteht, dass gegebenenfalls ein Feuchtigkeitsanstieg innerhalb des Gesteins in der Bohrlochwand einen Einfluss auf das Tragvermögen und damit auch die Standfestigkeit der Bohrlochwand gehabt haben könnte, ist

anhand der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m kein Hinweis auf einen möglichen Einfluss von Gebirgswasser auf das zu beobachtende Bohrlochtragverhalten festzustellen. Vielmehr hinterlässt das Gestein an der Bohrlochkontur beim Betrachten der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu allen Observationszeitpunkten einen sehr trockenen Eindruck. Auch das schließlich gegen Ende des Observationszeitraums auf den Aufnahmen in Bild 3.52(g) und Bild 3.52(h) zu betrachtende Bruchbild im Gestein scheint keineswegs feuchtigkeits- oder aufweichungsgeprägt zu sein. Eher vermittelt die geringfügig rechts vom Bohrlochfirst positionierte Abbruchkante den Eindruck, dass das zuvor langsam partiell aus der Bohrlochwand herausgelöste Gestein sich im Zuge eines tendenziell schlagartig erfolgenden Sprödbruchs endgültig aus der Bohrlochwand gelöst hat. Bild 3.54 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.52(g) mit einer grafischen Kennzeichnung der Abbruchkante sowie der Kennzeichnung von aus der Bohrlochwand herausgebrochenem Gesteinsmaterial.

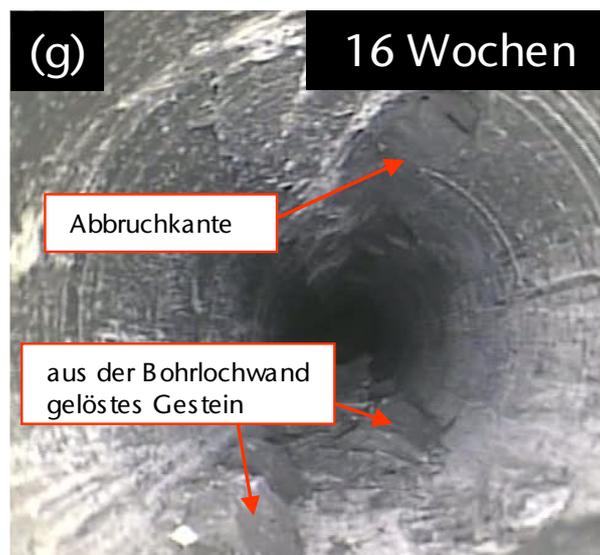


Bild 3.54: Herauslösung von Gestein aus der Bohrlochwand entlang der Struktur im linken oberen Konturbereich sowie Herausbrechen des Gesteins aus der Bohrlochwand im rechten oberen Konturbereich mit einer grafischen Kennzeichnung der Abbruchkante und des lose im Bereich der Bohrlochsohle liegenden, herausgebrochenen Gesteinsmaterials im 16 Tage alten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m

Auffällig bei der Betrachtung von Bild 3.52(g) und Bild 3.52(h) ist die Tatsache, dass nicht das komplette zuvor in einem schalenartigen Verbund aus der Bohrlochwand herausgelöste Gestein aus der Bohrlochwand herausgebrochen ist, sondern, dass ein Teil des herausgelösten Gesteins noch bis zum Ende des Observationszeitraums partiell mit der Bohrlochwand ver-



bunden bleibt – auch nachdem im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur ein keilförmiger Gesteinskörper aus der Bohrlochwand herausgebrochen ist.

3.1.8 Fazit zu den im Rahmen dieses Vorhabens im URL Mont Terri mit der Dreiarmkalibersonde und der Axial-Bohrlochkamera durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten

Zunächst ist hervorzuheben, dass die im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb der Niche MI des URL Mont Terri durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten mit der Observation von vier Bohrlöchern nicht darauf ausgerichtet gewesen sind, aus den Observationsergebnissen grundsätzlich gültige oder generalisierbare Erkenntnisse zum geohydraulischen oder hydraulisch-mechanischen Verhalten von Bohrlöchern innerhalb des URL Mont Terri oder gar zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten von Bohrlöchern im Opalinuston ableiten zu können.

Vielmehr ist im Rahmen dieses Vorhabens der Versuch unternommen worden, die in *Lux & Seeska (2010)* sowie in *Lux et al. (2012)* dokumentierten Erkenntnisse aus Bohrlochobservationsarbeiten, in deren Rahmen das Langzeittrag- und Deformationsverhalten von insgesamt sieben innerhalb des URL Mont Terri abgeteufte Bohrlöchern untersucht worden ist, durch die Observation von vier weiteren Bohrlöchern zu erweitern und abzusichern. Da drei der innerhalb der vorangegangenen Vorhaben untersuchten Observationsbohrlöcher sich innerhalb der Niche MI des URL Mont Terri befinden, ist es im Rahmen des aktuellen Vorhabens als aus wissenschaftlicher Sicht besonders sinnvoll erachtet worden, als nächsten Schritt zunächst weitere Observationsbohrlöcher in einem Gebirgsbereich, in dem bereits erste Erkenntnisse zum Bohrlochtrag- und Deformationsverhalten vorliegen, abzuteufen. Durch die Untersuchungen von nun insgesamt sieben Observationsbohrlöchern innerhalb der Niche MI in den vergangenen fünf Jahren ist es zum jetzigen Zeitpunkt erstmals möglich, reproduzierbare Muster bezüglich des Langzeittragverhaltens innerhalb von identisch orientierten Observationsbohrlöchern zu identifizieren. Selbstverständlich beziehen sich die im Rahmen des aktuellen Vorhabens auf der Grundlage einer phänomenologisch-makroskopischen Betrachtungsweise hinzugewonnenen Erkenntnisse zur Charakterisierung des Langzeit(trag)verhaltens der Bohrlöcher dementsprechend ausschließlich auf die Niche MI des URL Mont Terri mit der dort vorherrschenden speziellen geomechanischen Situation, die aus der unmittelbaren Nähe zu zwei Faziesübergängen einerseits und der Nähe zur *main fault* des URL Mont Terri



andererseits resultiert. Die spezielle geomechanische Situation der Niche MI erschwert zwar einerseits die Generalisierung von Befunden zum Bohrlochtrag- und Deformationsverhalten, aber sie bietet andererseits die Möglichkeit, das geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte Langzeitverhalten von Observationsbohrlöchern in drei unterschiedlichen Faziestypen sowie darüber hinaus in den zwei Faziesübergängen zu untersuchen.

Als wichtiges Observationsergebnis der durchgeführten in situ-Arbeiten ist der signifikante Feuchtigkeitszutritt in immerhin drei der vier im Rahmen dieses Vorhabens observierten Bohrlöchern zu nennen. Alle drei im Rahmen dieses Vorhabens observierten Bohrlöcher, in denen ein Feuchtigkeitszutritt festgestellt worden ist, sind in den südlichen Stoß der Niche MI abgeteuft worden. Zwei der drei Observationsbohrlöcher verlaufen mit einer Neigung ihrer Längsachse von $\delta \approx 40^\circ$ nach oben in den südlichen Stoß der Niche MI, während das dritte Bohrloch mit einer näherungsweise horizontalen Neigung seiner Längsachse abgeteuft worden ist. Zu horizontal in den südlichen Stoß der Niche MI und somit orthogonal zum Streichen der einfallenden Schichtflächen abgeteuften Bohrlöchern haben im Vorfeld dieses Vorhabens keine Erfahrungen vorgelegen, so dass keine Möglichkeit eines Vergleiches der Observationsergebnisse für das horizontal verlaufende Bohrloch DMB-B1 mit den Observationsergebnissen eines im Rahmen früherer in situ-Untersuchungen observierten Bohrlochs bestanden hat. Weiterhin ist auch bezüglich der Länge des untersuchten Bohrlochs mit den Observationsarbeiten innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 mit seiner Endteufe von $t_{BL} \approx 30,5$ m wissenschaftlich-technisches Neuland betreten worden. Die im Rahmen der vorangehenden Vorhaben vom LfD&G innerhalb der Niche MI bezüglich ihres Langzeittrag- und Deformationsverhaltens untersuchten drei Bohrlöcher sind zwischen $10,0 \text{ m} < l_{BL} < 14,0 \text{ m}$ lang gewesen. Somit ist das Bohrloch DMB-B1 nicht nur das erste orthogonal zum Streichen der Schichtflächen, horizontal in den südlichen Stoß abgeteuft Bohrloch, das vom LfD&G observiert worden ist, sondern es ist auch das erste der Observationsbohrlöcher, das große Teile der sandigen Fazies des Opalinustons durchteuft, wodurch innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 erstmals eine Observation des geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Trag- und Deformationsverhaltens der Bohrlochwand in einem längeren innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt möglich gewesen ist.

Als signifikantestes Observationsergebnis bezüglich des Bohrlochs DMB-B1 ist sicherlich die große Ansammlung von dem Bohrloch zugetretenem Sickerwasser im hinteren Bohrlochbereich zu nennen. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass auch im vorderen, innerhalb der tonigen



Fazies gelegenen Bohrlochbereich eine zeitabhängige Erhöhung des Feuchtegehaltes des Gesteins in der Bohrlochwand observiert werden konnte. In der frühen Phase des Observationszeitraums konnte darüber hinaus die Ausbildung eines *wet spots* im Bereich der Bohrlochsohle in einem innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochbereich dokumentiert werden. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die Bedingungen im vorderen, innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt sowie darüber hinaus zumindest über große Teile des Observationszeitraums hinweg auch im darauf folgenden innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt deutlich trockener gewesen sind als im innerhalb der sandigen Fazies verlaufenden Bohrlochabschnitt. So sind weder freies, im Bereich der Bohrlochsohle angesammeltes oder aufgestautes Sickerwasser in den vorderen Bohrlochbereichen noch der Austritt von freiem Gebirgswasser aus dem Bohrlochmund festzustellen gewesen. Auch unmittelbar im Bereich des sich zu Beginn des Observationszeitraums ausbildenden *wet spots* konnte lediglich eine aufsättigungsbedingte Aufweichung des Gesteins in der Bohrlochwand festgestellt werden, nicht jedoch das Vorhandensein von freiem Sickerwasser.

Bezüglich des Tragverhaltens des Bohrlochs DMB-B1 ist festzustellen, dass trotz des signifikanten Wasserzutritts eine Standfestigkeit der Bohrlochwand im Sinne der Befahrbarkeit mit der Axial-Bohrlochkamera in allen Teufenbereichen über den gesamten Observationszeitraum hinweg gegeben gewesen ist. Abgesehen von partiellem Bohrlochwandversagen in einigen kleineren Teufenbereichen verhält sich die Bohrlochwand auch in einem von einem starken Sickerwasserzutritt betroffenen, innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt standfest. Lediglich in den Faziesübergangsbereichen zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies kommt es im Verlauf des Observationszeitraums zu stärkeren bruchhaften Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit und somit auch zu Veränderungen der Bohrlochkontur. Größere Mengen von aus der Bohrlochwand herausgelöstem Gesteinsmaterial aus den Faziesübergangsbereichen in Verbindung mit dem in den hinteren Bohrlochbereichen aufgestauten Sickerwasser sind letztendlich dafür verantwortlich, dass zum letzten Observationstermin innerhalb des Bohrlochs DMB-B1 eine Befahrung bis hin zum Bohrlochtiefsten zwar möglich ist, jedoch im Rahmen dieser Befahrung keine zur Dokumentation des zeitabhängigen Verhaltens der Bohrlochwand verwertbaren Aufnahmen mehr generiert werden können.

Anders als für den Fall des Observationsbohrlochs DMB-B1 hat für die Observationsbohrlöcher DMB-B2 und DMB-B3 die Möglichkeit eines Vergleichs der Observationsergebnisse

mit den Befunden zu im Rahmen vorangehender in situ-Arbeiten untersuchten Observationsbohrlöchern, die sich ebenfalls innerhalb der Niche MI befinden und die mit der gleichen Orientierung ihrer Längsachse in den südlichen Stoß abgeteuft worden sind, bestanden. Da zwischen den innerhalb des aktuellen Vorhabens untersuchten Bohrlöchern DMB-B2 und DMB-B3 und den beiden etwa drei Jahre zuvor im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* untersuchten Bohrlöchern große systematische Übereinstimmungen bezüglich des geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten zeitabhängigen Tragverhaltens festzustellen sind, soll im Rahmen eines kleinen Exkurses an dieser Stelle kurz eine Gegenüberstellung ausgewählter Observationsergebnisse für die vier innerhalb der zwei unterschiedlichen Vorhaben mittels der Axial-Bohrlochkamera und der Dreiarmkalibersonde untersuchten Bohrlöcher erfolgen. Zum besseren Verständnis zeigt Bild 3.55 zunächst eine Übersicht über die Niche MI in Form einer Draufsicht mit einer grafischen Darstellung der insgesamt sieben im Rahmen der beiden Vorhaben observierten Bohrlöcher.

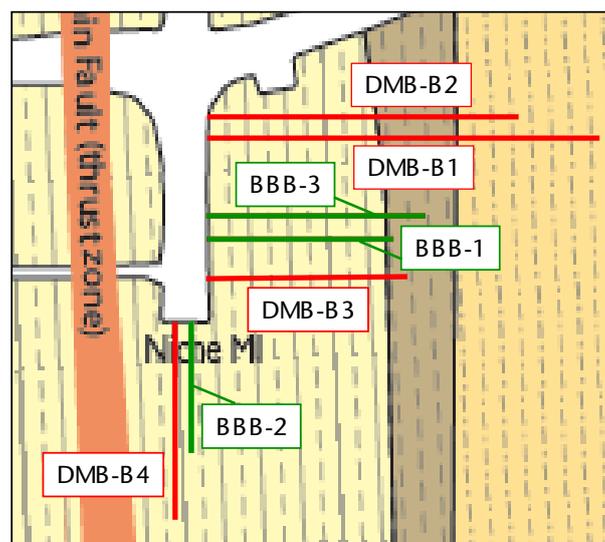


Bild 3.55: Übersichtsplan der Niche MI mit der Positionierung der innerhalb des aktuellen Vorhabens untersuchten Bohrlöcher DMB-B1, DMB-B2, DMB-B3 und DMB-B4 und der im Rahmen von Lux & Seeska (2010) untersuchten Bohrlöcher BBB-1, BBB-2 und BBB-3 innerhalb der Niche MI, modifiziert nach Bossart & Thury (2008)

Die drei in Bild 3.55 in Grün dargestellten Observationsbohrlöcher BBB-1, BBB-2 und BBB-3 sind im Rahmen des vom LfD&G und der BGR Hannover gemeinsam unter der Leitung der BGR Hannover durchgeführten Experimentes *long-term borehole behaviour* (BB-Experiment) abgeteuft und observiert worden. Detaillierte Ergebnisse der im Rahmen des BB-Experimentes durchgeführten Observationsarbeiten enthält *Lux & Seeska (2010)*.

Zum Verständnis der hier durchgeführten Gegenüberstellung ausgewählter Ergebnisse ist es vorab lediglich erforderlich zu wissen, dass die beiden Observationsbohrlöcher BBB-1 und BBB-3 parallel zu den Observationsbohrlöchern DMB-B2 und DMB-B3 verlaufen, während das Observationsbohrloch BBB-2 parallel zum Bohrloch DMB-B4 positioniert ist.

Bild 3.56 zeigt ausgewählte Aufnahmen aus den vier Observationsbohrlöchern BBB-1, BBB-3, DMB-B2 und DMB-B3.

Dargestellt ist in Bild 3.56 für jedes der vier betrachteten Observationsbohrlöcher jeweils der Faziesübergangsbereich von der tonigen in die karbonatreiche Fazies. Für die Observations-

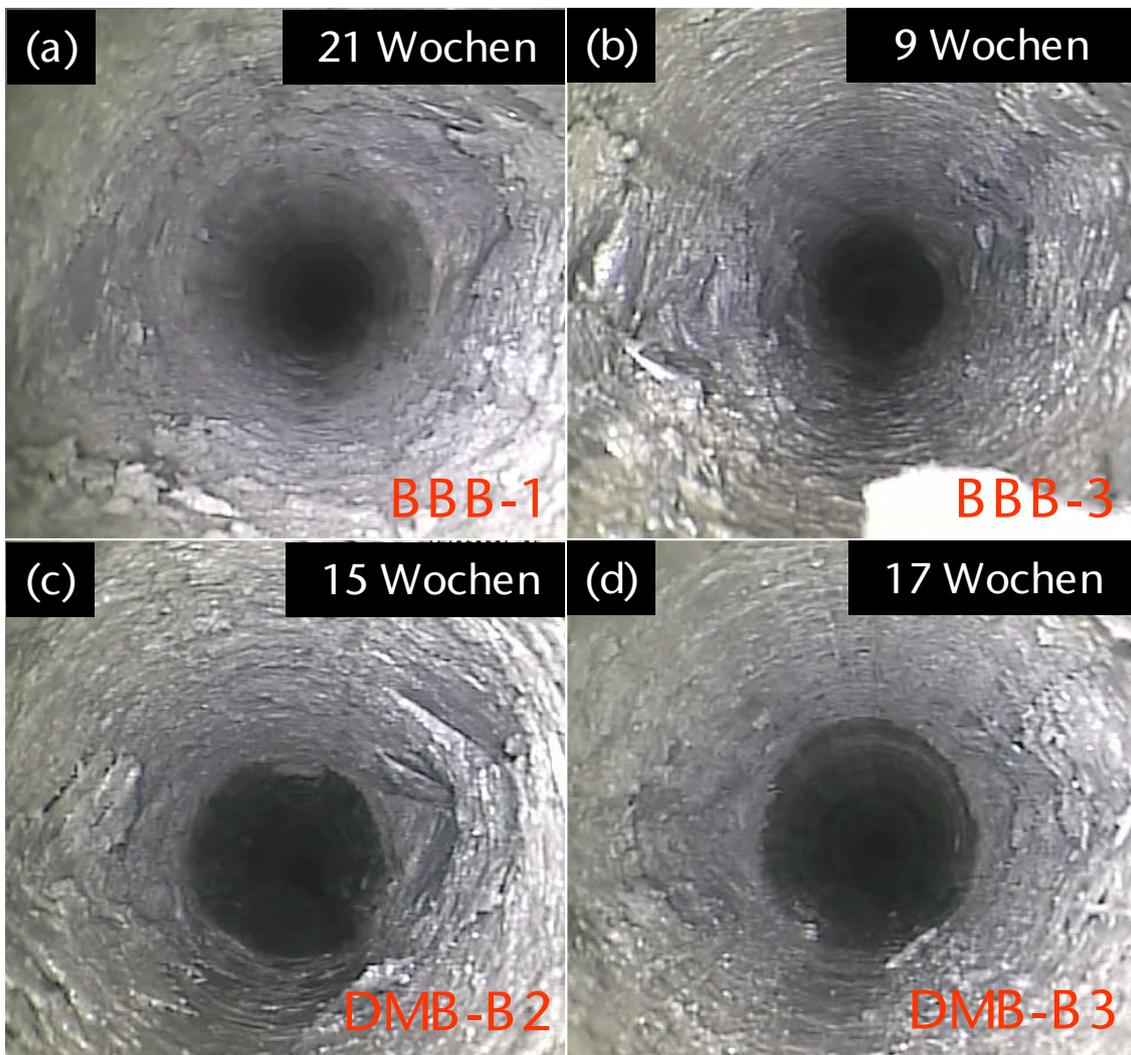


Bild 3.56: Faziesübergangsbereiche zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies in vier unterschiedlichen aus der Niche MI heraus abgeteufte Observationsbohrlöchern mit parallelem Verlauf der Bohrlochlängsachse; systematische Übereinstimmungen bezüglich des Auftretens von Bohrlochwandversagen



bohrlöcher BBB-1 (Bild 3.56(a)), DMB-B1 (Bild 3.56(c)) und DMB-B3 (Bild 3.56(d)) sind Aufnahmen aus dem Faziesübergangsbereich zu betrachten, die zu Observationszeitpunkten von 15 Wochen bis 21 Wochen nach dem Abteufen der Bohrlöcher entstanden sind. Die aus den Aufnahmen zu ersehenden Gesteinsabplatzungen in den Stoßbereichen weisen in etwa eine vergleichbare Intensität auf. Auf der Aufnahme aus dem Inneren des Bohrlochs BBB-3 ist ein im Erscheinungsbild zwar vergleichbares, aber zum Zeitpunkt der Entstehung der Aufnahme neun Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs BBB-3 in seiner Intensität noch nicht ganz so stark ausgeprägtes Bohrlochwandversagen zu beobachten. Die neun Wochen nach dem Abteufen entstandene Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera ist deshalb zur Gegenüberstellung mit den Aufnahmen aus den weiteren Observationsbohrlöchern ausgewählt worden, da aus organisatorischen Gründen im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* eine Observation des Bohrlochs BBB-3 nur über einen Zeitraum von neun Wochen hinweg durchgeführt werden konnte. In Bezug auf die weiteren drei untersuchten Bohrlöcher erschien es mit Blick auf eine besonders aussagekräftigen Darstellung der identifizierten systematischen Gemeinsamkeiten hinsichtlich des beobachteten Bohrlochtragverhaltens dennoch sinnvoll, die einige Wochen später nach dem Abteufen der jeweiligen Observationsbohrlöcher entstandenen Aufnahmen zur Gegenüberstellung auszuwählen.

Bei der Betrachtung der Gegenüberstellung von Aufnahmen aus den Faziesübergangsbereichen in Bild 3.56 ist zu erkennen, dass es, während sich die Bohrlochwand im innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Bohrlochbereich in allen vier Bohrlöchern als standfest erweist, im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochbereich ebenfalls in allen vier Bohrlöchern zu großen Bohrlochkonturaufweitungen kommt, die durch ein Versagen des Gesteins in den Bohrlochstößen hervorgerufen werden. Den vorangehend im vorliegenden Bericht erfolgten Diskussionen der Observationsergebnisse für die Bohrlöcher DMB-B2 und DMB-B3 sowie den im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* erfolgten Darstellungen der Observationsergebnisse für die Bohrlöcher BBB-1 und BBB-3 ist zu entnehmen, dass in allen vier Bohrlöchern primär jeweils Aufweichungserscheinungen der Bohrlochwand innerhalb des in der tonigen Fazies gelegenen, dem Faziesübergang unmittelbar vorgelagerten Bohrlochbereichs für das zu beobachtende Bohrlochwandversagen verantwortlich sind, die durch aus den tiefer im Bohrloch und somit oberhalb gelegenen Bohrlochbereichen heruntersickerndes Gebirgswasser verursacht worden sind. Dabei sind die Schädigungen der Bohrlochwand in allen vier observierten Bohrlöchern innerhalb des Gesteins der tonigen Fazies unmittelbar am Faziesübergang am stärksten ausgeprägt. Bezüglich der zeitabhängigen Entwicklung des Bohr-

lochwandversagens ist anzumerken, dass die Schädigungen der Bohrlochwand in den Stoßbereichen für alle vier Bohrlöcher auch zunächst direkt im Bereich des Faziesübergangs aufgetreten sind, bevor sie sich ausgehend vom Faziesübergang zeitabhängig tiefer in die tonige Fazies hinein fortgepflanzt haben. Der anhand der Analyse der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera gestellte Befund eines sich ausgehend vom Faziesübergang tiefer in die tonige Fazies hinein ausbreitenden Bohrlochwandversagens wird für die zwei Observationsbohrlöcher BBB-1 und DMB-B3 durch die von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichneten Kalibermesswerte gestützt. Ausgewählte Messergebnisse der Kalibersonde für die beiden Observationsbohrlöcher DMB-B3 und BBB-1 sind vorangehend bereits im vorliegenden Bericht und in *Lux & Seeska (2010)* sehr ausführlich diskutiert worden. Zur Darstellung der großen Parallelen bezüglich des Bohrlochtragverhaltens, die sich in den untersuchten Bohrlöchern nicht nur anhand der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizieren lassen, sondern die sich eben auch in den von der Dreiarmkalibersonde generierten Ergebnissen widerspiegeln, werden in Bild 3.57 ausgewählte Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus den beiden Bohrlöchern DMB-B3 und BBB-1 gegenübergestellt. In den in Bild 3.57 zu betrachtenden zwei Diagrammen sind jeweils die im Rahmen von fünf ausgewählten Befahrungen von der Dreiarmkalibersonde gemessenen Kaliberwerte über die Bohrlochteufe dargestellt. Der innerhalb der tonigen Fazies gelegene Teufenbereich der beiden Observationsbohrlöcher ist jeweils orangefarben unterlegt, während der innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegene Teufenbereich farblich durch eine gelbe Hinterlegung gekennzeichnet wird. Die im oberen in Bild 3.57 zu erkennenden Diagramm dargestellten Messwertgraphen sind innerhalb eines insgesamt 21 Wochen umfassenden Observationszeitraums aufgezeichnet worden. Die Befahrungen haben zu Observationsterminen einen Tag (roter Graph), eine Woche (grüner Graph), sieben Wochen (blauer Graph), zehn Wochen (violetter Graph) und 21 Wochen (türkisfarbener Graph) nach dem Abteufen des Bohrlochs BBB-1 stattgefunden. Darüber hinaus konnte in dem insgesamt 101 Wochen umfassenden Observationszeitraum innerhalb des Bohrlochs BBB-1 aufgrund des Zustands der Bohrlochwand keine weitere Befahrung mit der Dreiarmkalibersonde mehr durchgeführt werden. Aufgrund eines später vorgenommenen Umbaus der Dreiarmkalibersonde zur Anpassung an die ein hohes Maß an Robustheit voraussetzenden, im Opalinuston des URL Mont Terri vorherrschenden Bedingungen konnte die im Zuge des Umbaus mit größeren Rollen und verstärkten Messarmen ausgestattete Dreiarmkalibersonde im Bohrloch DMB-B3 trotz einer vergleichbaren zeitabhängigen Entwicklung der Bohrloch-

wand bis zum Observationszeitpunkt 32 Wochen nach dem Abteufen zum Einsatz gebracht werden.

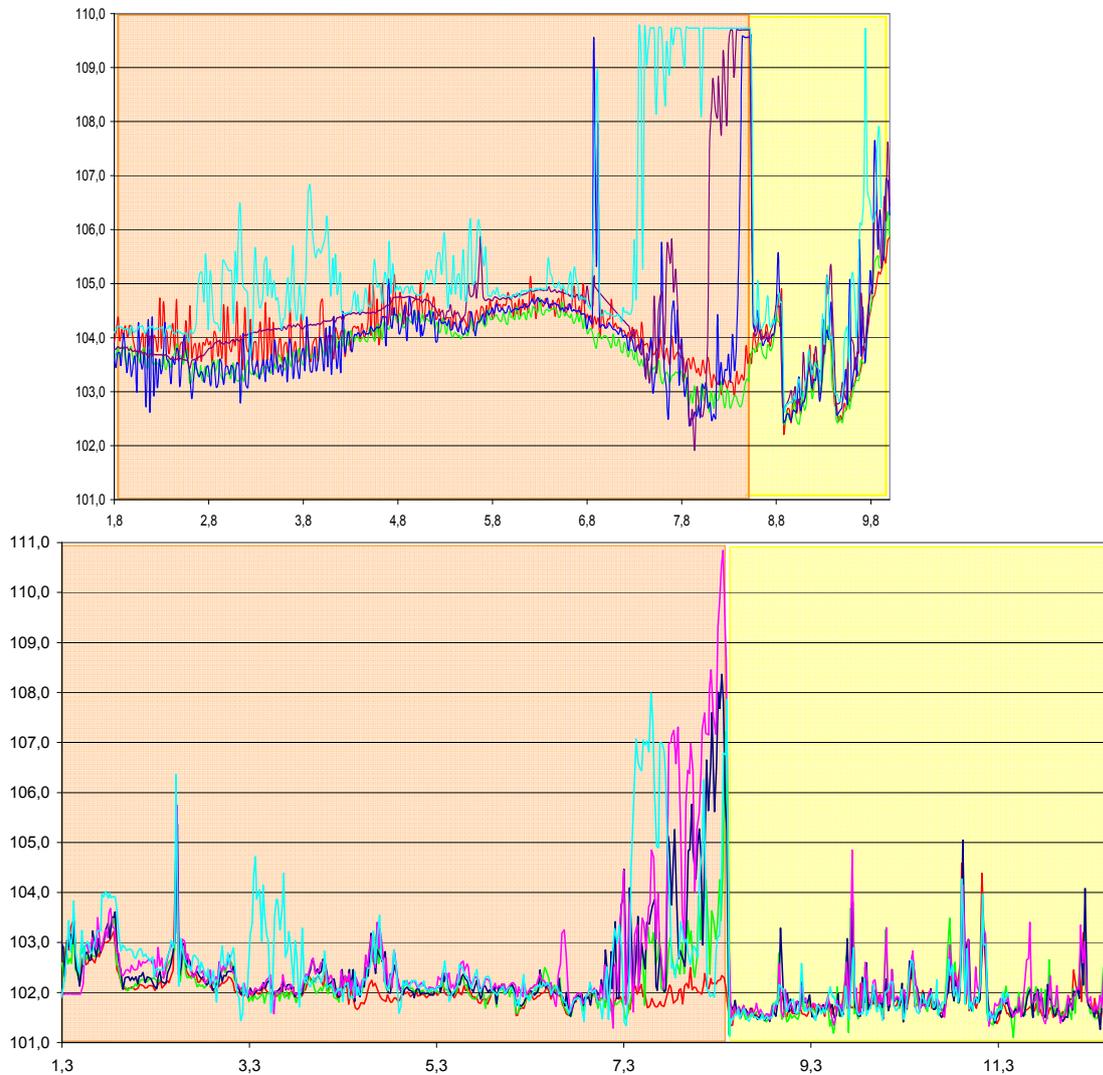


Bild 3.57: Gegenüberstellung von ausgewählten Messergebnissen aus dem Bohrloch BBB-1 (oberes Diagramm) und dem Bohrloch DMB-B3 (unteres Diagramm), Seeska (in Vorbereitung)

So zeigen die im unteren Diagramm in Bild 3.57 zu betrachtenden Messwertgraphen die Ergebnisse der Befahrungen zu den Observationsterminen zwei Tage (roter Graph), vier Wochen (grüner Graph), acht Wochen (blauer Graph), 17 Wochen (violetter Graph) und 32 Wochen (türkisfarbener Graph) nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3.

An den geringeren Streubreiten der Messwerte im unteren Diagramm in Bild 3.57 zeigt sich die Verbesserung der Qualität der Messergebnisse, die aufgrund des Umbaus der Messmechanik der Dreiarmkalibersonde und darüber hinaus durch eine zusätzlich in der Zwischenzeit

erfolgte Optimierung der Spannungsversorgung der Messapparatur erzielt werden konnte. Im Rahmen der hier vorgenommenen Gegenüberstellung der Messergebnisse aus den beiden Observationsbohrlöchern BBB-1 und DMB-B3 soll nicht erneut auf die Hintergründe und Details der vorgenommenen Arbeiten zur Optimierung der Dreiarmkalibersonde für Messeinsätze innerhalb des URL Mont Terri eingegangen werden, sondern es sei an dieser Stelle verwiesen auf die Beschreibungen der vorgenommenen Modifikationen in *Lux et al. (2012)*.

Details der anhand der Begutachtung und Analyse der Messergebnisse ableitbaren zeitabhängigen Entwicklungen der Bohrlochwand innerhalb der beiden Observationsbohrlöcher sollen im Rahmen der hier vorgenommenen Ergebnisgegenüberstellung ebenfalls nicht erneut diskutiert werden. Eine ausführliche Beschreibung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde für das Bohrloch BBB-1 kann *Lux & Seeska (2010)* entnommen werden und die detaillierte Diskussion der von der Dreiarmkalibersonde innerhalb des Bohrlochs DMB-B3 generierten Messwerte ist bereits vorangehend in diesem Bericht in Abschnitt 3.1.6(b) erfolgt.

Die hier vorgenommene Gegenüberstellung ausgewählter Messergebnisse aus den beiden unterschiedlichen Observationsbohrlöchern dient dazu, nochmals zu verdeutlichen, dass zu Beginn der Observationszeiträume auch in den innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitten der beiden Bohrlöcher BBB-1 und DMB-B3 als standfest anzusehende Bedingungen vorherrschen, bevor in den dem Faziesübergang vorgelagerten Bohrlochbereichen zeitabhängige Entfestigungsprozesse im Gestein in der Bohrlochwand einsetzen. Anhand der in den zwei Diagrammen in Bild 3.57 zu betrachtenden Ergebnisse der in den beiden unterschiedlichen Observationsbohrlöchern durchgeführten Messserien lässt sich deutlich erkennen, wie die entfestigten Bohrlochbereiche sich zeitabhängig innerhalb von beiden Bohrlöchern ausgehend vom Faziesübergang weiter in die tonige Fazies hinein ausbreiten. Deutlicher zu erkennen ist die zeitabhängig fortschreitende Aufweitung der Bohrlochkontur anhand der Betrachtung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus dem Bohrloch DMB-B3, was auf die vorangehend bereits erwähnte Optimierung der Dreiarmkalibersonde sowie darüber hinaus auch auf die größere Erfahrung bei der Durchführung von Kalibermessungen und insbesondere auch auf die auf Basis der gesammelten Vorerfahrungen vorgenommene, besser an die Erfordernisse angepasste Festlegung der Observationszeitpunkte zurückzuführen ist. Somit dient die in Bild 3.57 erfolgte Gegenüberstellung der Messergebnisse aus zwei unterschiedlichen Observationsbohrlöchern nicht nur der Verdeutlichung der Parallelitäten bezüglich der zeitabhängigen Entwicklungen des Tragverhaltens der Bohrlöcher, sondern darüber



hinaus auch der Verdeutlichung der Relevanz, die der optimalen Anpassung des verwendeten Messequipments an die vorherrschenden Bedingungen und dem stetigen Ausbau des gesteins- und formationsspezifischen Erfahrungsschatzes im Umgang mit dem Messequipment zukommt.

Neben der vom Faziesübergang ausgehenden zeitabhängigen Ausdehnung der Bruchfronten in die tonige Fazies hinein kann der Gegenüberstellung der Messergebnisse in den zwei Diagrammen in Bild 3.57 entnommen werden, dass jeweils zum letzten Messtermin 21 Wochen (BBB-1) bzw. 32 Wochen (DMB-B3) nach dem Abteufen auch in größeren, näher am Bohrlochmund gelegenen Bohrlochbereichen innerhalb der tonigen Fazies in beiden Observationsbohrlöchern Aufweitungen der Bohrlochkontur von der Dreiarmkalibersonde registriert werden. Ein weiterer Befund, der sich gut mit den innerhalb der beiden Observationsbohrlöcher generierten Ergebnissen der Bohrlochvideoobservation mittels der Axial-Bohrlochkamera korrelieren lässt.

Insgesamt führen die innerhalb der vier schräg nach oben in den südlichen Stoß der Niche MI generierten Ergebnisse der Bohrlochvideoobservation in Kombination mit den Ergebnissen der in den Bohrlöchern DMB-B3 und BBB-1 durchgeführten Messungen mittels der Dreiarmkalibersonde zu dem Eindruck, dass in allen vier Bohrlöchern zunächst Wasserzutritte in den tiefer innerhalb des Bohrlochs und somit oberhalb des in der tonigen Fazies verlaufenden Bohrlochabschnitts erfolgt sind und dass das den Bohrlöchern zugetretene Sickerwasser dem Einfluss der Schwerkraft folgend in den innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Teufenbereich der Bohrlöcher hinunter gesickert ist, wo es dann zuerst zu einer Erhöhung des Feuchtegehaltes des Gesteins in der Bohrlochwand und im Anschluss daran zu einer Aufweichung des Gesteins in der Bohrlochwand (*softening*) möglicherweise einhergehend mit weiteren hydraulisch-mechanisch gekoppelten Effekten (Quellen – *swelling*) geführt hat, was schlussendlich das Versagen der Bohrlochwände in den durch den abteufungsbedingt induzierten Sekundärspannungszustand am stärksten belasteten Bohrlochstößen herbeigeführt hat.

Bemerkenswert ist bezüglich des Auftretens des Bohrlochwandversagens in den Stoßbereichen, dass eine imaginäre Verbindungslinie zwischen den links- und rechtsseitig in den Bohrlochstößen auftretenden Bruchfronten für keines der Bohrlöcher im unmittelbaren Übergangsbereich zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies horizontal verläuft, sondern dass alle vier imaginären Verbindungslinien eine in etwa vergleichbare leichte Neigung aufweisen. Die leichten Neigungen der Verbindungslinien könnten einen Indikator für einen

nicht vertikalen, sondern geneigten Verlauf der größten primären Hauptspannungen im Bereich der Niche MI darstellen. Der Zusammenhang zwischen der Positionierung der Bruchfronten entlang der Kontur eines Bohrlochs und des möglichen Verlaufs der Hauptspannungskomponenten des vorherrschenden Primärspannungszustands ist in *Lux & Seeska (2010)* bereits ausführlich diskutiert worden und soll hier nicht erneut thematisiert werden.

Zur Verdeutlichung der identifizierten Ähnlichkeiten zwischen den in den vier unterschiedlichen Bohrlöchern zu observierenden Bruchbildern der Bohrlochwand wird Bild 3.56 inklusive einer grafischen Darstellung einer gedachten Verbindungslinie zwischen den Bruchfronten für jedes der vier Observationsbohrlöcher DMB-B2, DMB-B3, BBB-1 und BBB-3 in Bild 3.58 erneut dargestellt. Die erneute Darstellung der in den vier Observationsbohrlöchern in dem dem Faziesübergang vorgelagerten Bohrlochbereich observierten Bruchbilder verdeutlicht, dass den vier Bohrlöchern nicht nur der kirsch kernartige Charakter des durch das Versagen des Gesteins in den Bohrlochstößen geprägten Bruchbildes gemein ist, sondern dass in allen vier Bohrlöchern die Längsachse der kirsch kernartig anmutenden, durch die zeitabhängig ablaufenden Bruchprozesse geprägten Bohrlochkontur auch mehr oder weniger stark und gleichsinnig geneigt verläuft.

Anmerkung: Die Befunde zur Ausrichtung der Orientierungen der imaginären Verbindungslinien zwischen den stark geschädigten Bohrlochkonturbereichen besitzen ausschließlich qualitativen Charakter und sind keineswegs dazu geeignet, eine präzise Bestimmung der Orientierung des Primärspannungsfeldes im Bereich der Niche MI vorzunehmen. Zum einen besitzt die Axial-Bohrlochkamera ein Weitwinkelobjektiv, was dazu führt, dass das von der Kamera aufgenommene Abbild des Bohrlochinneren nicht hundertprozentig der Wahrnehmung durch das menschliche Auge entspricht, und zum anderen wird die Axial-Bohrlochkamera im Rahmen der Bohrlochbefahrungen händisch vorgeschoben, wobei der den Vorschub leistenden Person ein elektronischer Neigungsmesser zur Verfügung steht. Der zur Verfügung stehende Neigungsmesser signalisiert Rotationen des Kamerakopfes, sobald dieser um mehr als $\Delta\delta = 1^\circ$ aus der vorgesehenen Position heraus ausgelenkt wird. Dennoch ist es nicht auszuschließen, dass gegebenenfalls während einer Befahrung kurzfristig un bemerkt auch eine stärkere Auslenkung des Kamerakopfes aus der vorgegebenen Position heraus stattfinden kann, woraus dann Ungenauigkeiten in Bezug auf die präzise Abbildung des im Inneren des Bohrlochs vorherrschenden Bruchbildes resultieren können.

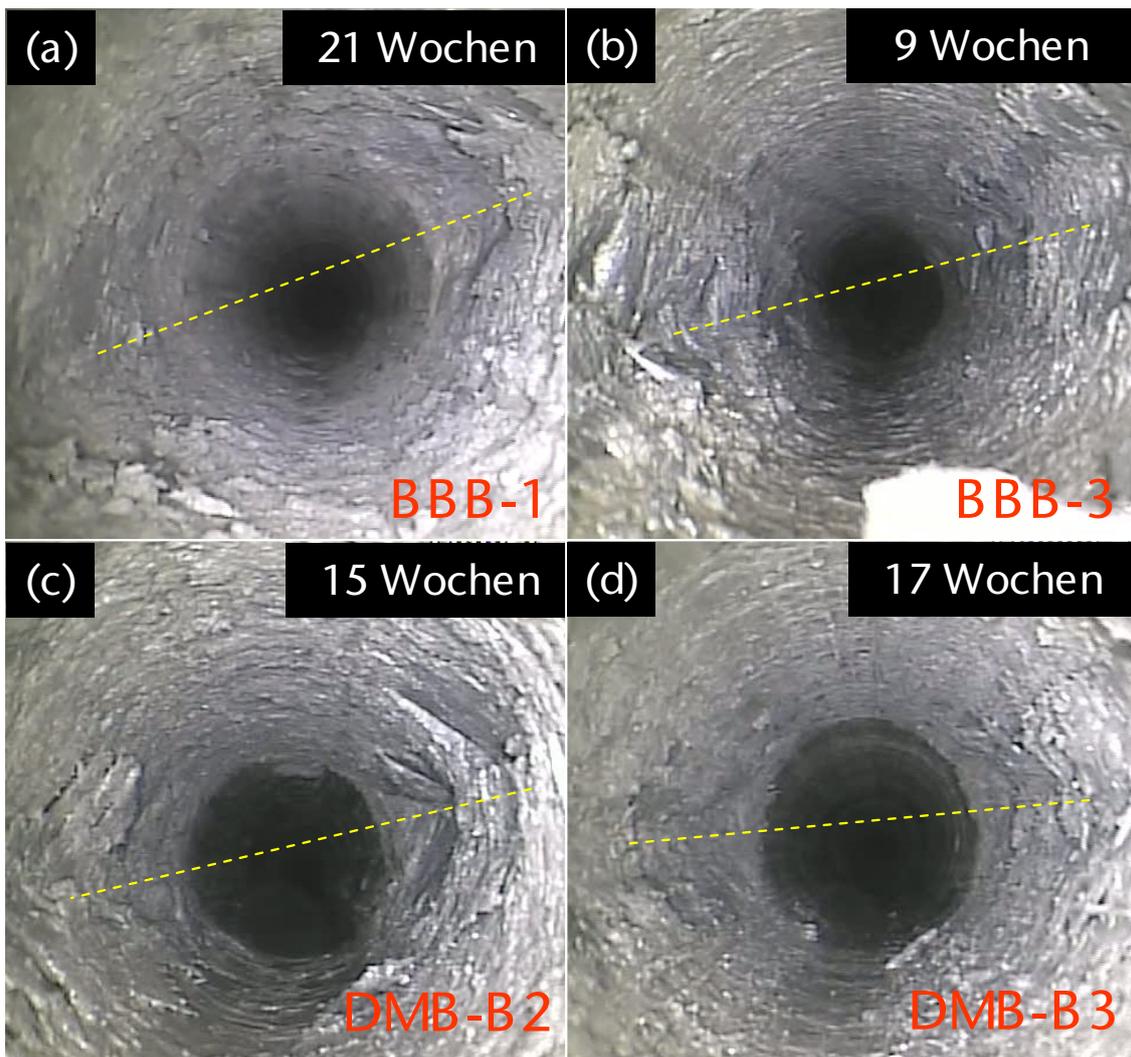


Bild 3.58: Faziesübergangsbereiche zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies in den vier unterschiedlichen aus der Niche MI heraus abgeteufte Observationsbohrlöchern mit parallelem Verlauf der Bohrlochlängsachse; Visualisierung von imaginären Verbindungslinien zwischen den stark geschädigten Bohrlochkonturbereichen

Möglicherweise zeigt sich in der geeigneten Anordnung der kirsch kernartig anmutenden Bruchstrukturen innerhalb der vier im südlichen Stoß der Niche MI befindlichen Observationsbohrlöcher der Einfluss der nahen Gallery 98 auf das im Bereich der Niche MI vorherrschende Hauptspannungsfeld. Ein Indiz für eine Beeinflussung des Hauptspannungsfeldes durch die Gallery 98 stellt die Tatsache dar, dass in dem am weitesten von der Gallery 98 entfernten Observationsbohrloch DMB-B3 die Längsachse der durch das Bohrlochwandversagen in den Stoßbereichen geprägten Bohrlochkontur deutlich weniger steil in Richtung der Gallery 98 geneigt ist als in den weiteren drei observierten Bohrlöchern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bezüglich der Form, der Orientierung und der Positionierung der innerhalb der tonigen Fazies auftretenden Bruchstrukturen sowohl anhand der durchgeführten Videoobservationsarbeiten sowie auch anhand der in zwei der vier hier diskutierten Bohrlöcher vorgenommenen Dreiarmkalibermessungen große Übereinstimmungen festgestellt werden konnten. Allen vier schräg nach oben in den südlichen Stoß der Niche MI abgeteufte Observationsbohrlöchern scheint unabhängig von der Position ihres Bohrlochmundes innerhalb des südlichen Stoßes der Niche MI sowie unabhängig von ihrer Endteufe, die zwischen $t_{BL} \approx 10,2$ m (BBB-1) und $t_{BL} \approx 27,5$ m (DMB-B2) variiert, gemein zu sein, dass innerhalb eines insgesamt als standfest zu bezeichnenden hinteren Bohrlochbereichs im Bereich der karbonatreichen Fazies oder im Falle der Bohrlöcher DMB-B2 und BBB-3 (Endteufe $t_{BL} \approx 14,0$ m) eventuell auch im Bereich der sandigen Fazies Wasser zutritt, das anschließend im innerhalb der tonigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt zu Aufweicheffekten und Bohrlochwandversagen führt.

Trotz der identifizierten Gemeinsamkeiten bezüglich des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens ergeben sich zwischen den vier Bohrlöchern auch Unterschiede bezüglich des hydraulischen Verhaltens und zwar insbesondere bezüglich der Intensitäten der Feuchtigkeitszutritte und bezüglich der zu Beginn der Observationszeiträume observierbaren Wasserzutrittsprozesse.

Eine Gegenüberstellung von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zur visuellen Verdeutlichung der Unterschiede bezüglich des hydraulischen Verhaltens zwischen den vier schräg nach oben in den südlichen Stoß geteufte Observationsbohrlöchern zeigt Bild 3.59.

Die in Bild 3.59(a) zu betrachtende Aufnahme ist im Rahmen des BB-Experimentes von der BGR mit der Axial-Bohrlochkamera der BGR aufgenommen worden. Die Aufnahme zeigt den Übergangsbereich von der tonigen in die karbonatreiche Fazies innerhalb des Bohrlochs BBB-1 zum Observationszeitpunkt eine Woche nach dem Abteufen. Deutlich ist beim Betrachten der Aufnahme ein dunkler, um die gesamte Bohrlochkontur herumreichender Ring zu identifizieren. Die dunkle Färbung des Gesteins im Bereich des um die Bohrlochkontur herumreichenden Rings resultiert aus einem gegenüber dem Gestein in der Umgebung erhöhten Feuchtegehalt, der auf einen Wasserzutritt in das Bohrloch BBB-1 entlang einer Gesteinschicht mit einer gegenüber dem restlichen Gebirge stark erhöhten hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich des Faziesübergangs zurückzuführen ist. Somit ist für das Bohrloch BBB-1 ein diskreter Teufenbereich abgrenzbar, in dem sehr wahrscheinlich große Mengen des für die

später in diesem Teufenbereich identifizierbaren Aufweichungseffekte verantwortlichen Gebirgswassers dem Bohrloch zugesickert sind. Ein vollkommen anderes Bild offenbart sich eine Woche nach dem Abteufen im Bereich des Faziesübergangs zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies innerhalb des Bohrlochs BBB-3.

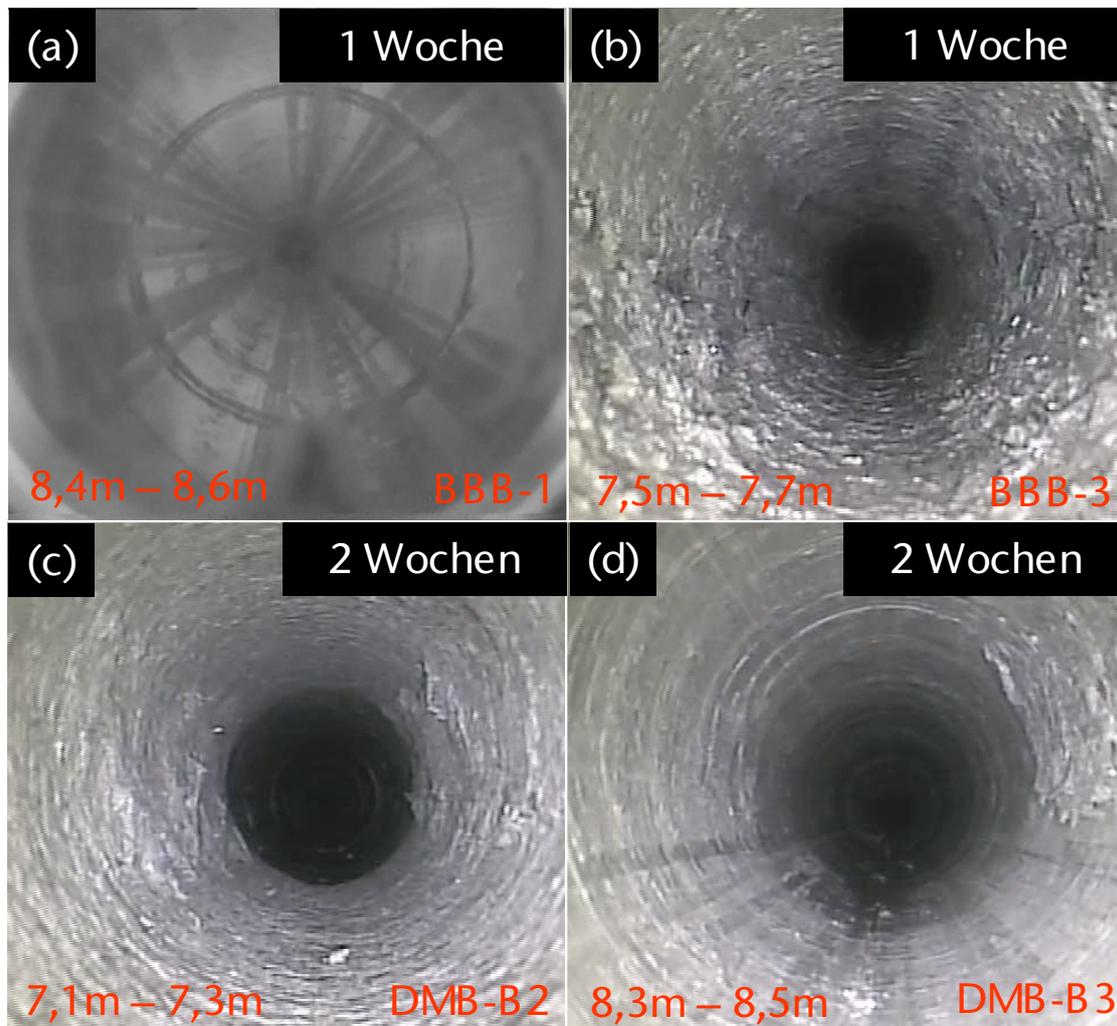


Bild 3.59: Unterschiedliches hydraulisches Verhalten im Bereich der Faziesübergänge von der tonigen in die karbonatreiche Fazies in den vier unterschiedlichen aus der Nische MI heraus abgeteufte Observationsbohrlöchern mit parallelem Verlauf der Bohrlochlängsachsen

Während innerhalb des Bohrlochs BBB-1 im Faziesübergangsbereich große Teile der Bohrlochwand noch einen trockenen Eindruck hinterlassen, ist das Gestein im Faziesübergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Fazies innerhalb des Bohrlochs BBB-3 eine Woche nach dem Abteufen bereits komplett durchfeuchtet und es haben sich darüber hinaus bereits Bohrlochwandabschalungen ereignet, wie der Betrachtung von Bild 3.59(b) zu entnehmen ist. Da aus organisatorischen Gründen eine frühere Befahrung des Bohrlochs BBB-3 mit



der Axial-Bohrlochkamera nicht möglich gewesen ist, konnte leider nicht festgestellt werden, ob der primäre Zutritt von Gebirgswasser in das Bohrloch BBB-3 gleichmäßig verteilt entlang der gesamten Bohrlochkontur oder eher innerhalb von deutlich einzugrenzen Bohrlochabschnitten erfolgt ist. Mit Sicherheit festzustellen ist jedoch, dass die Aufsättigung der Bohrlochwand innerhalb des Bohrlochs BBB-3 deutlich schneller abgelaufen ist als innerhalb des Bohrlochs BBB-1.

Eine Befahrung des Bohrlochs DMB-B2 eine Woche nach dem Abteufen hat nicht stattgefunden, so dass eine Darstellung der hydraulischen Bedingungen innerhalb des Bohrlochs DMB-B2 zwecks eines unmittelbaren Vergleichs mit den zuvor in Bild 3.59(a) und Bild 3.59(b) dargestellten hydraulischen Situationen innerhalb der Observationsbohrlöcher BBB-1 und BBB-3 eine Woche nach dem Abteufen nicht möglich ist. Anhand der innerhalb des Bohrlochs DMB-B2 durchgeführten Videoobservationsarbeiten kann jedoch festgestellt werden, dass zum Observationszeitpunkt drei Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2 innerhalb des Übergangsbereichs zwischen der tonigen und der karbonatreichen Fazies noch als trocken zu bezeichnende Bedingungen vorgeherrscht haben, während zum nächsten Observationszeitpunkt zwei Wochen nach dem Abteufen eine bereits mit deutlichen Aufweichungs- und Entfestigungserscheinungen einhergehende Aufsättigung der Bohrlochwand mit Gebirgswasser stattgefunden hat, wie Bild 3.59(c) zu entnehmen ist. Bild 3.59(d) zeigt, dass es 14 Tage nach dem Abteufen auch innerhalb des Observationsbohrlochs DMB-B3 im Übergangsbereich zwischen toniger und karbonatreicher Fazies zu einer Aufsättigung des Gesteins in der Bohrlochwand gekommen ist und dass sich darüber hinaus auch schon erste Schädigungen der Bohrlochwand andeuten. Die sich 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B3 andeutenden Schädigungen der Bohrlochwand im Faziesübergangsbereich sind allerdings weit weniger stark ausgeprägt als die 14 Tage nach dem Abteufen innerhalb des Faziesübergangs im Bohrloch DMB-B2 identifizierbaren Bohrlochwandabschalungen. Aus der Auswertung der weiteren Observationsergebnisse für das Bohrloch DMB-B3 geht hervor, dass eine Aufsättigung des Gesteins in der Bohrlochwand im Faziesübergangsbereich erst im Zeitraum 10-15 Tage nach dem Abteufen stattgefunden hat.

Zusammenfassend lässt sich zum hydraulischen Verhalten der vier in den südlichen Stoß der Niche MI geteufenen Observationsbohrlöcher festhalten, dass lediglich für das Bohrloch BBB-1 ein diskreter Sickerwasserzutrittsbereich identifiziert werden konnte, während für die weiteren drei Bohrlöcher anhand der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera keine

klar abgrenzbaren Teufen- oder Konturbereiche ausfindig gemacht werden konnten, in denen sich ein verstärkter Zutritt von Gebirgswasser in die Bohrlöcher hinein ereignet hat. Auffällig ist allerdings, dass sich in den beiden Observationsbohrlöchern, die aufgrund ihrer größeren Endteufen bis in die sandige Fazies hineinreichen (BBB-3 & DMB-B2), offensichtlich eine schnellere Aufsättigung des Gesteins in der Bohrlochwand – einhergehend mit dem schnelleren Eintreten von aufweichungsbedingten Bohrlochwandschädigungen – ergibt als in den beiden Observationsbohrlöchern, die aufgrund ihrer geringeren Endteufen die sandige Fazies nicht erreichen (BBB-1 & DMB-B3). Aufgrund der geringeren hydraulischen Aktivitäten waren die Observationsbohrlöcher DMB-B3 und BBB-1 auch die beiden Bohrlöcher, in denen über längere Zeiträume hinweg eine Befahrung mit der Dreiarmkalibersonde möglich gewesen ist, während innerhalb der Observationsbohrlöcher DMB-B2 und BBB-3 wegen des starken Feuchtigkeitszutritts von Anbeginn der Observationszeiträume an auf Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde verzichtet werden musste. Zur Differenzierung bezüglich des hydraulischen Verhaltens zwischen den Observationsbohrlöchern DMB-B2 und BBB-3 ist allerdings anzumerken, dass das Bohrloch DMB-B2 unmittelbar nach dem Abteufen noch eine trockene Bohrlochwand aufgewiesen hat, während für das Bohrloch BBB-3 bereits während des Bohrvorgangs das Vorhandensein von freiem Wasser festgestellt werden konnte.

Es liegt der Verdacht nahe, dass die deutlich größere hydraulische Aktivität der beiden bis in die sandige Fazies hineinreichenden Observationsbohrlöcher auf die größere hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins in der sandigen Fazies oder möglicherweise auf die große hydraulische Leitfähigkeit von im Gestein der sandigen Fazies eingeschlossenen sandigen Schichten (*sandy layers*) zurückzuführen ist. Der Verdacht, dass Gebirgswasser, das innerhalb der in der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereiche den Observationsbohrlöchern zusickert, für die größeren Mengen an Feuchtigkeit und die schnellere Aufsättigung des Gesteins in der Bohrlochwand in den beiden Observationsbohrlöchern mit den größeren Endteufen verantwortlich ist, wird gestützt durch die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.60. Die Aufnahme zeigt den Übergangsbereich zwischen der karbonatreichen und der sandigen Fazies innerhalb des Observationsbohrlochs DMB-B2 zwei Tage nach dem Abteufen. Deutlich ist zu erkennen, wie Feuchtigkeit aus dem innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Bohrlochabschnitt, in dem die Bohrlochwand zwei Tage nach dem Abteufen bereits komplett durchfeuchtet ist und bereits Aufweichungserscheinungen aufweist, in den innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich heruntersickert und dort zunächst das Gestein im Bereich der Bohr-

lochsohle aufsättigt, während im Bereich des Bohrlochfirstes noch trockenes Gestein zu erkennen ist.



Bild 3.60: Zutritt von Sickerwasser aus dem innerhalb der sandigen Fazies gelegenen Teufenbereich in den innerhalb der karbonatreichen Fazies gelegenen Teufenbereich 2 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2

Der Eindruck von einer bereits wenige Tage nach dem Abteufen eventuell komplett durchfeuchteten Bohrlochwand im Bereich der sandigen Fazies innerhalb des Bohrlochs DMB-B2 relativiert sich bei der Betrachtung von Bild 3.61.

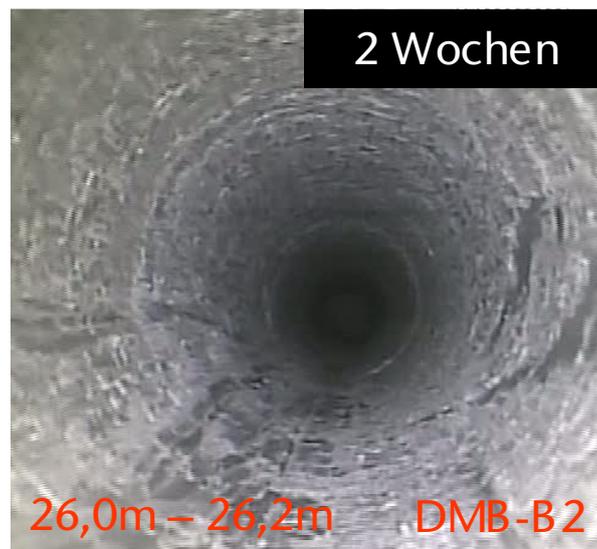


Bild 3.61: Trockene Bedingungen im hinteren Bereich der sandigen Fazies 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2

Bild 3.61 zeigt eine Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom Zustand der Bohrlochwand nahe des Bohrlochtieftsten weit innerhalb der sandigen Fazies zwei Wochen nach dem Abteufen des Bohrlochs DMB-B2. Deutlich ist zu erkennen, dass im zu betrachtenden Teufenbereich von $t_{BL} \approx 26,0$ m bis $t_{BL} \approx 26,2$ m auch 14 Tage nach dem Abteufen des Bohrlochs tiefer innerhalb der sandigen Fazies noch trockene Verhältnisse vorherrschen und die Bohrlochwand noch frei von Veränderungen ihres mechanischen Zustands und von Schädigungen ist. Die Abbildung der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.61 stützt somit die These, dass sich der in Bild 3.60 dokumentierte schnelle Wasserzutritt in das Bohrloch DMB-B2 hinein im Bereich der sandigen Fazies wohl eher entlang von hydraulisch stark leitfähigen Sandlagen ereignet hat als durch die Porenräume des Opalinustons hindurch. Eine Identifizierung von sandigen Lagen anhand der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten oder anhand der geologischen Kernaufnahme ist jedoch nicht möglich gewesen, so dass bezüglich der endgültigen Klärung der Ursachen für die starken Wasserzutritte insbesondere in die Observationsbohrlöcher DMB-B2 und BBB-3 hinein in Zukunft noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Wie den Ausführungen zu den systematischen Gemeinsamkeiten und Unterschieden bezüglich des geomechanisch-geohydraulischen Verhaltens der vier aufwärts gerichtet in den südlichen Stoß der Niche MI abgeteufte Observationsbohrlöcher sowie den Ausführungen zum observierten Verhalten des horizontal in den südlichen Stoß abgeteufte Bohrlochs DMB-B1 entnommen werden kann, ist es in allen fünf innerhalb der Niche MI im Rahmen dieses Vorhabens sowie im Rahmen des vorangehenden Vorhabens abgeteufte Observationsbohrlöchern, die zwei oder drei Faziestypen des Opalinustons durchteufen und die somit auch durch ein oder zwei Faziesübergänge hindurch abgeteufte worden sind, bereits wenige Tage oder Wochen nach dem Abteufen in großen Teufenbereichen zu deutlich identifizierbaren Feuchtigkeitsanstiegen im Gestein in der Bohrlochwand gekommen. In den beiden parallel zueinander in die Ortsbrust der Niche MI abgeteufte und im Streichen der Schichtung verlaufenden horizontalen Observationsbohrlöchern DMB-B4 und BBB-2, die beide über ihre gesamte Länge hinweg ausschließlich innerhalb der tonigen Fazies verlaufen, ist hingegen kein signifikanter Feuchtigkeitszutritt feststellbar gewesen.

Wie der vorangehenden Diskussion der Observationsergebnisse für das Bohrloch DMB-B4 in Abschnitt 3.1.7 und der Beschreibung der Observationsergebnisse für das Bohrloch BBB-2 in *Lux & Seeska (2010)* zu entnehmen ist, besteht eine systematische Übereinstimmung zwischen den beiden Observationsbohrlöchern in erster Linie darin, dass es in großen Teufenbe-

reichen beider Bohrlöcher zu einem Versagen des Gebirges in den Schichtflächen gekommen ist. Ausgewählte Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera mit zu betrachtendem Schichtflächenversagen innerhalb der beiden im Streichen der Schichtflächen verlaufenden Observationsbohrlöcher zeigt Bild 3.62.

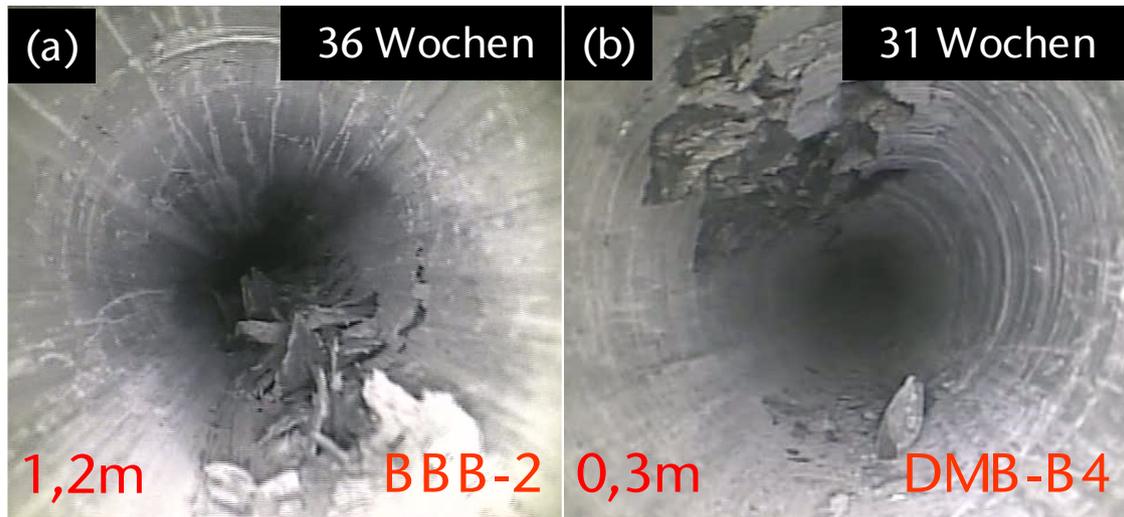


Bild 3.62: In gegenüberliegenden Konturbereichen auftretendes Schichtflächenversagen innerhalb der Observationsbohrlöcher BBB-2 und DMB-B4

Wie es für ein Versagen des Gebirges in den Schichtflächen typisch ist, ergibt sich das Bohrlochwandversagen in Konturbereichen, in denen die einfallenden Schichtflächen das Bohrloch tangieren oder in tangentialer Richtung an der Bohrlochkontur vorbei verlaufen. Trotz der systematischen Übereinstimmungen zwischen den beiden Observationsbohrlöchern BBB-2 und DMB-B4 bezüglich des Auftretens von schichtflächendominiertem Bohrlochwandversagen sind zwischen den beiden Bohrlöchern auch zwei signifikante Unterschiede bezüglich des observierten Bohrlochtragverhaltens zu identifizieren gewesen. Die beiden identifizierten Unterschiede lauten:

1. Während innerhalb des Bohrlochs BBB-2 ein Schichtflächenversagen innerhalb des Observationszeitraums überwiegend im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur festgestellt werden konnte, ist es innerhalb des Bohrlochs DMB-B4 überwiegend zu einem Schichtflächenversagen im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur gekommen.
2. Innerhalb des Bohrlochs BBB-2 breitet sich das Schichtflächenversagen im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur zeitabhängig aus tieferen Bohrlochbereichen kontinuierlich entlang einer Bruchfront in Richtung des Bohrlochmunds aus. Das inner-



halb des Bohrlochs DMB-B4 zu identifizierende Schichtflächenversagen tritt im Vergleich dazu eher etwas unsystematisch in mehreren Teufenbereichen nahezu gleichzeitig auf.

Eine Erklärung bezüglich der Unterschiede zwischen den in den beiden im Streichen der Schichtflächen verlaufenden Observationsbohrlöchern zu beobachtenden, schichtflächendominierten Bruchbildern sowie eine Erklärung für die Tatsache, dass das Schichtflächenversagen innerhalb der beiden Observationsbohrlöcher in vielen Teufenbereichen nur einseitig entlang der Bohrlochkontur auftritt und auch in solchen Teufenbereichen, in denen es beidseitig entlang der Bohrlochkontur zu beobachten ist, nicht zwangsläufig gleichzeitig auftritt, können auf Basis der bisher vorliegenden Datensätze nicht erarbeitet werden. Die Vermutung liegt nahe, dass Inhomogenitäten im Aufbau des Gebirges für die Unterschiede bezüglich des in den beiden parallel zueinander in die Ortsbrust der Niche MI hinein geteufte Observationsbohrlöchern zu beobachtenden Tragverhaltens der Bohrlochwand verantwortlich sind. Allerdings besteht zur wissenschaftlichen Absicherung des geäußerten Erklärungsansatzes noch erheblicher Forschungsbedarf.

Insgesamt verdeutlichen die im Rahmen des aktuellen Vorhabens generierten Observationsergebnisse aus den Bohrlöchern DMB-B1 bis DMB-B4 insbesondere in Kombination mit den im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* aus den Observationsbohrlöchern BBB-1 bis BBB-3 gewonnenen Observationsergebnissen, welche zentrale Bedeutung der Kenntnis und dem Verständnis des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens des Opalinustons bei der Vorhersage des Tragverhaltens und der Bewertung der Standfestigkeit von Hohlräumen sowohl in der tonigen Fazies wie auch in der karbonatreichen und der sandigen Fazies des Opalinustons des URL Mont Terri zukommen. Zu einer Vertiefung des Verständnisses für die im Opalinuston ablaufenden hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse ist es erforderlich, die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Observationsarbeiten in Zukunft durch vertiefende laborative Untersuchungen zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten des Opalinustons zu ergänzen und gegebenenfalls auch eine Observation weiterer Bohrlöcher innerhalb des URL Mont Terri vorzunehmen und so die insbesondere für den Bereich der Niche MI und für die tonige Fazies des Opalinustons recht umfangreiche Datenbasis zu ergänzen.

In Zukunft durchzuführende in situ-Untersuchungen sollten sich eher nicht auf den Bereich der Niche MI beziehen, sondern sich auf weitere, innerhalb des URL Mont Terri gelegene



Gebirgsbereiche konzentrieren, um so einen umfassenden Datensatz zu schaffen, der eine objektivere Einschätzung des Trag- und Deformationsverhaltens von Bohrlöchern in den unterschiedlichen Faziestypen des Opalinustons ermöglicht. Ergebnisse zum Langzeittrag- und Deformationsverhalten von vier weiteren innerhalb des URL Mont Terri, aber nicht innerhalb der Niche MI gelegenen Observationsbohrlöchern sind bereits im Rahmen von *Lux & Seeska (2010)* sowie *Lux et al. (2012)* erarbeitet und in den zugehörigen Abschlussberichten dokumentiert worden. Eine Synthese der Observationsergebnisse aus allen insgesamt 37 zwischen 2008 und 2014 innerhalb des URL Mont Terri untersuchten Observationsbohrlöchern in englischer Sprache enthält *Seeska & Lux (in Vorbereitung)*. Darüber hinaus wird die Synthese der Observationsergebnisse in deutscher Sprache in näherer Zukunft in *Seeska (in Vorbereitung)* veröffentlicht werden.



3.2 Beobachtung des Langzeittrag- und -deformationsverhaltens von Bohrlöchern im URL Tournemire

3.2.1 Ziel der Untersuchungen

Im September 2007 sind im Untertagelabor Tournemire (URL Tournemire) im Rahmen des vorangegangenen BMWi-Forschungsvorhabens mit dem Titel *Untersuchungen zur Validierung von Modellansätzen für Tongestein anhand von Feldexperimenten am Standort Tournemire (F) im Rahmen DECOVALEX-THMC / Lux et al. (2012)* erstmals drei unterschiedlich orientierte Bohrlöcher vom LfD&G mit der Dreiarmkalibersonde befahren worden. Die drei im September 2007 erstmals befahrenen Observationsbohrlöcher tragen die Bezeichnungen GEM 90, GEM 180 und GEM 270. Während das Observationsbohrloch GEM 270 im September 2007 abgeteuft worden ist, sind die Observationsbohrlöcher GEM 90 und GEM 180 bereits im Jahr 2004 geteuft und im September 2007 ca. 14 Tage vor der ersten Messung zur Bohrkerngewinnung verlängert worden. Im November 2009 sind erstmals Wiederholungsmessungen in den drei GEM-Bohrlöchern durchgeführt worden. Neben der Dreiarmkalibersonde ist von November 2009 an auch die Axial-Bohrlochkamera zur Observation des Bohrlochtragverhaltens innerhalb der im URL Tournemire gelegenen Observationsbohrlöcher zum Einsatz gekommen. Zusätzlich zu den drei GEM-Bohrlöchern sind von November 2009 an fünf weitere Observationsbohrlöcher vom LfD&G untersucht worden. Diese fünf weiteren und unterschiedlich orientierten Observationsbohrlöcher mit den Bezeichnungen GSM 45 bis GSM 315 sind unmittelbar vor der Erstbefahrung im November 2009 abgeteuft worden. In den nun insgesamt acht innerhalb des URL Tournemire vom LfD&G untersuchten Observationsbohrlöchern sind im Rahmen des BMWi-Forschungsvorhabens *Untersuchungen zur Validierung von Modellansätzen für Tongestein anhand von Feldexperimenten am Standort Tournemire (F) im Rahmen DECOVALEX-THMC / Lux et al. (2012)* zwei weitere Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde und mit der Axial-Bohrlochkamera im Mai 2010 und im Oktober 2010 vorgenommen worden.

Ziel der Untersuchungen ist es gewesen, detaillierte Informationen über das zeitabhängige Bohrlochtrag- und Bohrlochdeformationsverhalten von unterschiedlich gegenüber dem Primärspannungsfeld und gegenüber dem Schichtungsgefüge orientierten Bohrlöchern im Toarcium-Tongestein des URL Tournemire zu gewinnen. Im Rahmen dieses Vorhabens sind die im Rahmen von *Lux et al. (2012)* begonnenen Forschungsarbeiten in den Jahren 2011 bis 2014 fortgesetzt worden, sodass nun erstmalig Informationen zum Langzeittragverhalten von

zum Ende der Observationsarbeiten zwischen viereinhalb und ca. zehn Jahre alten Observationsbohrlöchern aus dem URL Tournemire vorliegen.

Informationen zur Beanspruchungssituation des Gebirges im Bereich des URL Tournemire sowie Informationen zu den Materialeigenschaften des anstehenden Toarcium-Tongesteins können *Lux et al. (2012)*, *Rejeb (2003)*, *Valès et al. (2002)* sowie *Niandou et al. (1997)* entnommen werden.

3.2.2 Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher

(a) Anmerkung zu den nachfolgenden Ausführungen

Die nachfolgenden Abschnitte 3.2.2(b-d) zur Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher ist vollständig aus *Lux et al. (2012)* übernommen. Er wird im Rahmen dieses Berichts wiederholt dargestellt, um dem Leser auch ohne die Kenntnis der Inhalte von *Lux et al. (2012)* einen Überblick über die Lage und Geometrie der acht unterschiedlichen Observationsbohrlöcher sowie über die innerhalb des URL Tournemire vorherrschende grundsätzliche geologische Situation zu verschaffen.

(b) Positionierung der observierten Bohrlöcher innerhalb des URL Tournemire

Im Rahmen dieses Vorhabens sind im URL Tournemire insgesamt acht Bohrlöcher mit der Axial-Bohrlochkamera und der Dreiarmlibersonde untersucht worden. Drei der observierten Bohrlöcher befinden sich in der Gallery 96 des URL Tournemire. Die fünf weiteren Bohrlöcher sind in der Gallery 08 abgeteuft worden. Bild 3.63 zeigt eine dreidimensionale Ansicht des URL Tournemire mit einer Unterteilung des Tunnel- und Streckensystems in die zu unterschiedlichen Zeitabschnitten hergestellten Bereiche des URL. Weiterhin werden in Bild 3.63 die Bereiche, in denen sich die im Rahmen dieses Vorhabens observierten Bohrlöcher befinden, jeweils durch eine rote Umrandung hervorgehoben.

Aus der Betrachtung von Bild 3.63 geht hervor, dass sich die eine Gruppe der observierten Bohrlöcher im östlich vom Haupttunnel (Tunnel 1881) gelegenen Streckenabschnitt der Gallery 96 befindet und die andere Gruppe von observierten Bohrlöchern relativ nahe der südlichen Ortsbrust des parallel zum Haupttunnel aufgefahrenen Teils der Gallery 08 abgeteuft

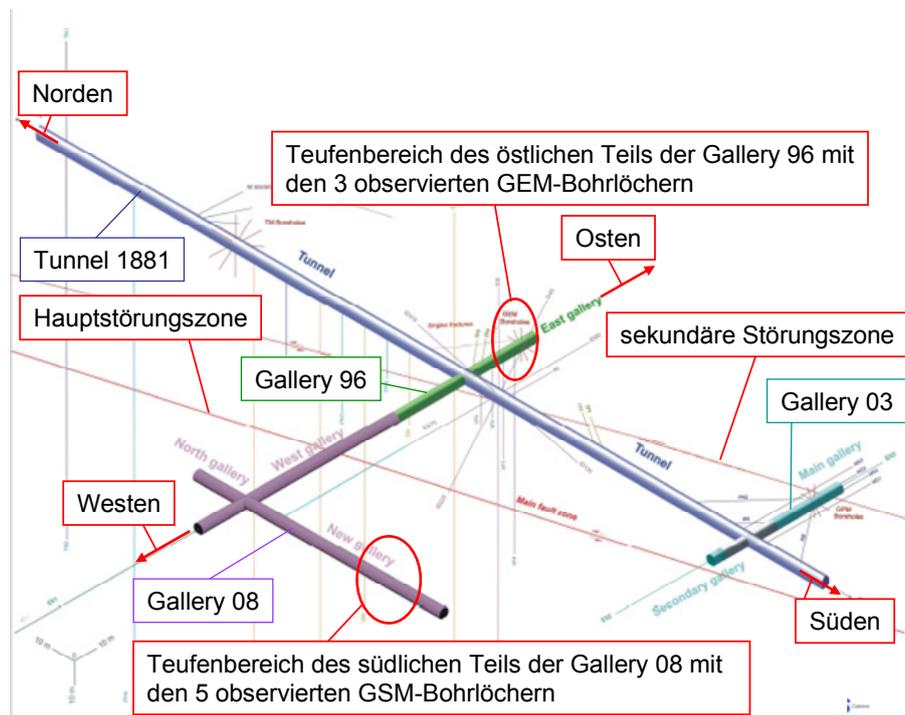


Bild 3.63: Aufbau und geografische Ausrichtung des URL Tournemire in der 3D-Ansicht mit der Kennzeichnung der einzelnen URL-Bereiche entsprechend des Auffahrungszeitraums sowie der Kennzeichnung von zwei Störungszone (Hauptstörungszone und sekundäre Störungszone) und der grafischen Hervorhebung der Bereiche, in denen sich die observierten Bohrlöcher befinden, modifiziert nach Cabrera (2009)

worden ist. Die geografische Ausrichtung des URL Tournemire kann ebenfalls Bild 3.63 entnommen werden. Des Weiteren ist Bild 3.63 die Lage von zwei großen tektonischen Störungszone, der im gesamten Abschnitt 3.2 als Hauptstörungszone bezeichneten *main fault* und der in diesem Abschnitt als sekundäre Störungszone bezeichneten *secondary fault* zu entnehmen. Entgegen des bei der Betrachtung von Bild 3.63 aufgrund der Darstellung in Form zweier Linien entstehenden Eindrucks handelt es sich bei den beiden Störungszone tatsächlich nicht um schmale, linienartig und gerade durch die Gebirgsformation hindurch verlaufende Trennflächen, sondern um aus zahlreichen gefüllten Klüften und Trennflächen bestehende Kluftsysteme mit einer räumlichen Ausdehnung von mehreren Metern. In der Umgebung der beiden Störungszone weisen zahlreiche weitere im Gestein detektierbare Klüfte auf Beeinflussungen des die Störungszone umgebenden Gebirges in einem Bereich von mehreren Dekametern hin. Da sich im Rahmen der im URL Tournemire durchgeführten Bohrlochobservationen herausgestellt hat, dass die räumliche Positionierung der einzelnen observierten Bohrlöcher gegenüber den Störungszone einen signifikanten Einfluss auf das Langzeittragverhal-



Bild 3.64: Gesteinsabplatzungen und gesicherter Bereich mit Gesteinsauflockerung im Bereich der sekundären Störungszone im Stoßbereich des westlichen Teils der Gallery 96

ten der observierten Bohrlöcher hat, soll nachfolgend zunächst kurz auf die Ausprägung der sekundären Störungszone und der Hauptstörungszone eingegangen werden.

Bild 3.64 zeigt in einem Foto einen Teil der sekundären Störungszone. Das Foto ist im westlichen Teil der orthogonal zum Haupttunnel verlaufenden Gallery 96 aufgenommen worden.

In Bild 3.64 als dunkle Stellen entlang der Gallerywand erkennbare Gesteinsabplatzungen sowie ein durch verstärkten Maschendraht (Verzugsmatten) gesicherter Konturbereich mit starken Gesteinsauflockerungen im rechten Teil des Bildes vermitteln einen Eindruck von der Mächtigkeit der sekundären Störungszone und von der Inhomogenität des Gebirgstragverhaltens im Bereich der sekundären Störungszone. Noch deutlicher erkennbar sind die Auswirkungen der sekundären Störungszone mit ihrem inhomogenen Gebirgsaufbau auf das Gebirgstragverhalten in der in Bild 3.65 dargestellten Detailaufnahme des bereits in Bild 3.64 zu betrachtenden aufgelockerten und gesicherten Bereiches.

Es zeigt sich, dass das Gestein im Bereich der sekundären Störungszone in der zum Zeitpunkt der Aufnahme von Bild 3.64 und Bild 3.65 in etwa 14 Jahre alten Gallery 96 derart starke



Bild 3.65: Detailaufnahme des gesicherten Konturbereiches mit Gesteinsauflockerung im Bereich der sekundären Störungszone im Stoß des westlichen Teils der Gallery 96

Auflockerungserscheinungen zeigt, dass sich ohne die angebrachten Sicherungsmittel ein partieller Verbruch der Kontur ereignen würde. Die Bereiche der Gallerywand außerhalb des Einflusses der sekundären Störungszone erweisen sich dagegen auch über diesen langen Zeitraum als sehr standfest.

Zur Verdeutlichung der Mächtigkeit der sekundären Störungszone zeigt Bild 3.66 einen Grundriss der Gallery 96 einschließlich des die Gallery 96 umgebenden Gebirges, der vor der Auffahrung der Gallery 08 erstellt worden ist.

In Rot sind in Bild 3.66 Trennflächen kartiert, die im Bereich der Sohle der Gallery 96 sowie anhand der Untersuchung einer Sondierbohrung detektiert worden sind. Die Kartierung der Trennflächen im Bereich der Sohle der Gallery 96 ist möglich gewesen, da die Gallery 96 ausschließlich mit Stahlbögen und im Firstbereich mit maschendrahtartigen Verzugsmatten gesichert ist. Deutlich zeigt sich der Einfluss der in Bild 3.66 irreführenderweise als *major*

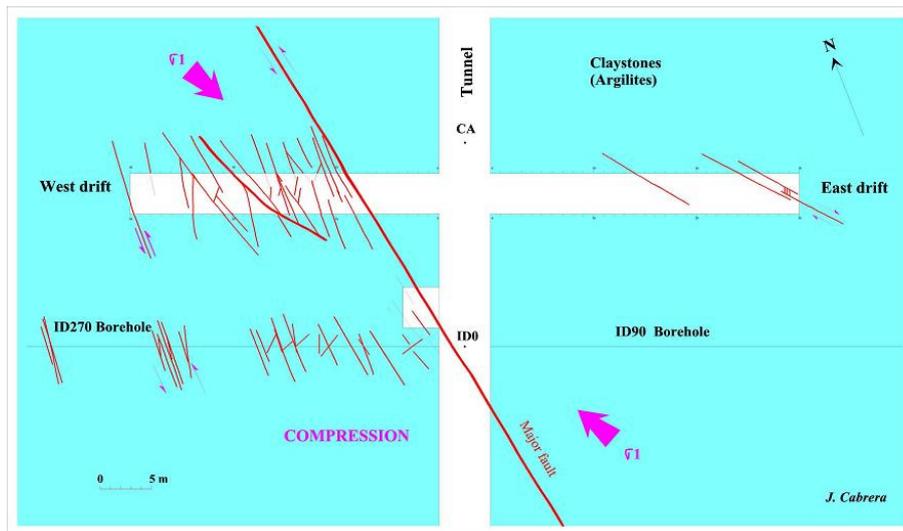


Bild 3.66: Grundriss der Gallery 96 des URL Tournemire und des Tunnels 1881 im Bereich der Gallery 96 mit einer Darstellung der sekundären Störungszone (hier noch bezeichnet als major fault) und der Darstellung detektierte Trennflächen im Gebirge und in der Sohle der Gallery 96, Cabrera et al. (1999)

fault bezeichneten sekundären Störungszone. Während im östlichen Teil der Gallery 96 eher wenige Trennflächen in der Gallerysohle detektiert worden sind, ist die Anzahl der in der Sohle des westlichen Teils der Gallery 96 detektierten Trennflächen deutlich höher. Besonders auffällig ist dabei, dass alle in Bild 3.66 dargestellten Trennflächen sich westlich von der sekundären Störungszone befinden. Wird vorausgesetzt, dass die sekundäre Störungszone den Grund darstellt für die Existenz aller in Bild 3.66 dargestellten Trennflächen, so ist der Betrachtung von Bild 3.66 zu entnehmen, dass die sekundäre Störungszone einschließlich des zugehörigen Trennflächensystems orthogonal zu der dem Bild 3.63 zu entnehmenden Verlaufsrichtung der sekundären Störungszone im Bereich der Gallery 96 eine Mächtigkeit von mindestens $d > 16$ m besitzt. Es ist hier zunächst zu erwähnen, dass die drei im Rahmen der durchgeführten in situ-Arbeiten observierten GEM-Bohrlöcher in dem im Vergleich zum westlichen Teil der Gallery 96 tektonisch eher schwach vorbeanspruchten östlichen Teil der Gallery 96 liegen.

Bild 3.67 zeigt eine Aufnahme der Kontur der Gallery 08 im Bereich der Hauptstörungszone. Ein Vergleich von Bild 3.67 und Bild 3.64 zeigt, dass die Schädigungen der Gallerykontur durch Gesteinsabplatzungen und Gesteinsauflockerungen im Bereich der sekundären Störungszone etwas stärker ausgeprägt sind als im Bereich der Hauptstörungszone. Der Grund für die stärkeren Schädigungen der Gallerykontur im Bereich der sekundären Störungszone ist



Bild 3.67: Gesteinsabplatzungen und Trennflächen im Bereich der Hauptstörungszone im Stoß der Gallery 08 (Verlängerung des westlichen Teils der Gallery 96)

jedoch nicht in einer stärkeren Beeinflussung des Gebirgstragverhaltens durch die sekundäre Störungszone als durch die Hauptstörungszone zu sehen, sondern wohl eher darin, dass die Gallerykontur im Bereich der Hauptstörungszone zum Zeitpunkt der Aufnahme von Bild 3.67 erst zwei Jahre alt gewesen ist (Gallery 08), während die Gallerykontur im Bereich der sekundären Störungszone zum Zeitpunkt der Aufnahme von Bild 3.64 bereits 14 Jahre alt gewesen ist (Gallery 96) und somit in diesem Gallerybereich bereits eine stärkere Austrocknung des Gesteins und eine höhere Anzahl saisonal bedingter Ent- und Aufsättigungszyklen stattgefunden haben. Neben den Gesteinsabplatzungen aus der Gallerykontur können in Bild 3.67 zwei zum Kluft- und Trennflächensystem der Hauptstörungszone gehörende Trennflächen betrachtet werden. Darüber hinaus kann Bild 3.67 entnommen werden, dass im Bereich der beiden Trennflächen ein zusätzlicher Stahlbogen zur Sicherung in die Gallery 08 eingebracht worden ist. Während der Abstand zwischen den Stahlbögen in den übrigen Teufenbereichen der Gallery 08 sowie in der gesamten Gallery 96 $a = 2$ m beträgt, beträgt er für die drei in Bild 3.67 in der Bildmitte dargestellten Stahlbögen, die sich im Bereich der Hauptstörungszone befinden, nur $a = 1$ m.



Es entsteht zwar bei der Betrachtung von Bild 3.63 der Eindruck, dass die in der Nähe der südlichen Ortsbrust der Gallery 08 gelegenen GSM-Bohrlöcher einen Abstand zur Hauptstörungszone von $a > 50$ m haben und damit außerhalb des Einflussbereiches der Hauptstörungszone liegen, jedoch sei an dieser Stelle bereits vorweggenommen, dass die durchgeführten Bohrlochobservationen im Bereich der Gallery 08 zu Ergebnissen geführt haben, die einen Einfluss der Hauptstörungszone auf das zeitabhängige Bohrlochtragverhalten der fünf GSM-Observationsbohrlöcher als wahrscheinlich erscheinen lassen. Ein Einfluss der Hauptstörungszone auf das Bohrlochtragverhalten der Observationsbohrlöcher in der Gallery 08 ist gleichbedeutend damit, dass die räumliche Ausdehnung des Kluft-/ Trennflächensystems der Hauptstörungszone mit ihren Nebenkluften und Trennflächen weitaus größer ist als die Aufnahme in Bild 3.67 es vermuten lässt.

(c) Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher in der Gallery 96 (GEM-Bohrlöcher)

Im östlichen Teil der Gallery 96 sind im Rahmen der im URL Tournemire durchgeführten in situ-Arbeiten insgesamt drei Bohrlöcher mit den Namen GEM 90, GEM 180 und GEM 270 observiert worden. Bei den observierten Bohrlöchern handelt es sich

- (1) um ein horizontales Bohrloch, das im Jahr 2004 in den südlichen Stoß der Gallery 96 abgeteuft worden ist und das 14 Tage vor der ersten Messung um eine Länge von $\Delta l \approx 4$ m auf eine Gesamtlänge von $l \approx 10$ m verlängert worden ist sowie
- (2) um ein vertikal in die Sohle der Gallery 96 abgeteuftes Bohrloch aus dem Jahr 2004 mit einer Länge von $l \approx 7$ m, in dem 14 Tage vor der ersten Messung mit der Dreiarmskalibersonde der Versuch einer Verlängerung des Bohrlochs zur Bohrkerngewinnung unternommen worden ist (GEM 180), der jedoch aufgrund von Problemen mit dem Bohrgerät nach wenigen Zentimetern abgebrochen worden ist und
- (3) um ein im September 2007 neu in die Gallerysohle abgeteuftes vertikales Bohrloch, das zum Zeitpunkt der ersten Messung mit der Dreiarmskalibersonde 14 Tage alt gewesen ist (GEM 270) und dessen Länge ebenfalls $l \approx 7$ m beträgt.

Das Bohrloch GEM 270 verläuft parallel zum Bohrloch GEM 180 in einem Abstand von $a \approx 1$ m. Alle drei in diesem Abschnitt 3.2.2(c) betrachteten Bohrlöcher sind mit einem Einfachkernrohr mit einem Außendurchmesser der Bohrkronen von $d_{BK} = 101$ mm im Trocken-

bohrverfahren mit Luftspülung abgeteuft worden. Die genaue Position des Teufenbereichs der östlichen Gallery 96 mit den drei observierten GEM-Bohrlöchern ist in Bild 3.68 durch die rote Ellipse gekennzeichnet.

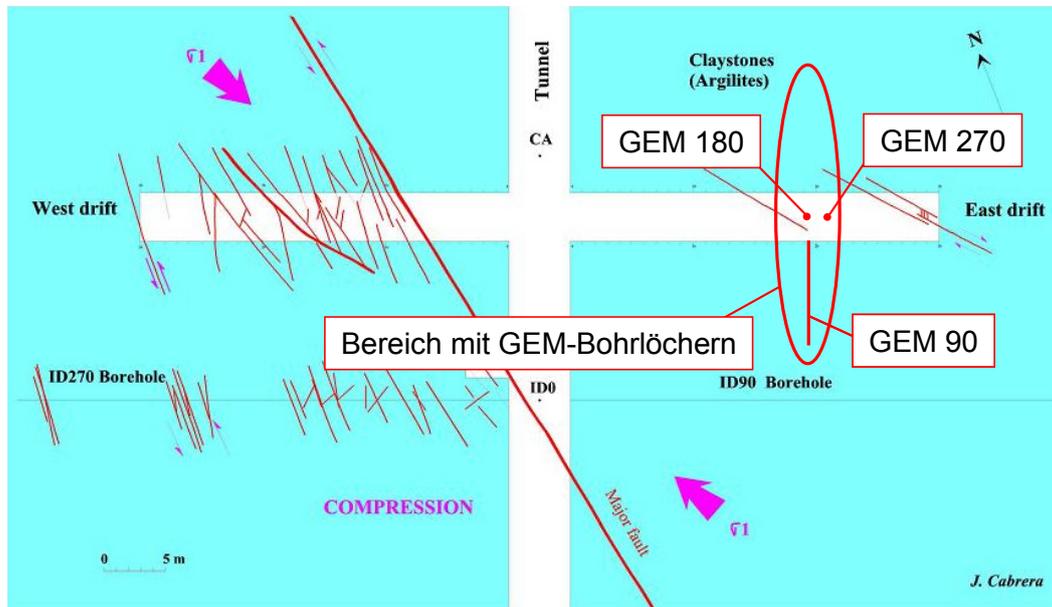


Bild 3.68: Positionierung der observierten GEM-Bohrlöcher im östlichen Teil der Gallery 96, modifiziert nach Cabrera et al. (1999); Anmerkung: Die sekundäre Störungszone wird hier noch als major fault bezeichnet

Aus Bild 3.68, das eine Draufsicht auf die Gallery 96 mit den dort vorgefundenen geotektonischen Elementen *sekundäre Störungszone* und *east drift* zeigt sowie im westlichen Abschnitt der Gallery 96 einen Hinweis gibt auf das Anstehen zahlreicher Trennflächen und im östlichen Abschnitt auf die Existenz von nur wenigen Trennflächen hindeutet, ist ebenfalls zu erkennen, dass die drei Bohrlöcher in einem durch Störungszone, Klüfte und Trennflächen nur relativ schwach gestörten Gebiet liegen. Die Bohrlochmünder der Bohrlöcher GEM 90 und GEM 180 befinden sich in einem Abstand von $a \approx 10$ m zur östlichen Ortsbrust der Gallery 96. Der Abstand des Bohrlochmundes des Bohrlochs GEM 270 beträgt dementsprechend $a \approx 9$ m zur östlichen Ortsbrust der Gallery 96. Bild 3.69 zeigt einen Querschnitt durch die Gallery 96, aus dem die Lage des horizontalen Bohrlochs GEM 90 und die Lage des vertikalen Bohrlochs GEM 180 und darüber hinaus auch die Orientierung der beiden Observationsbohrlöcher gegenüber der aus der Süd-Richtung mit einem Fallwinkel von $\alpha \approx 5^\circ$ einfallenden Schichtflächen zu ersehen sind. Der Verlauf der Schichtflächen wird in Bild 3.69 durch die rot gestrichelte Linie symbolisiert. Bei der in Bild 3.69 angegebenen und für beide dargestellten Bohrlöcher einheitlichen Bohrlochlänge von $l \approx 9$ m handelt es sich um ursprünglich ge-

plante Längen, die nicht den tatsächlichen Längen der dargestellten Bohrlöcher entsprechen. Wie voranstehend bereits erwähnt worden ist, beträgt die tatsächliche Länge des horizontalen Bohrlochs GEM 90 $l \approx 10$ m und die tatsächliche Länge der beiden vertikalen Bohrlöcher GEM 180 und GEM 270 beträgt jeweils $l \approx 7$ m.

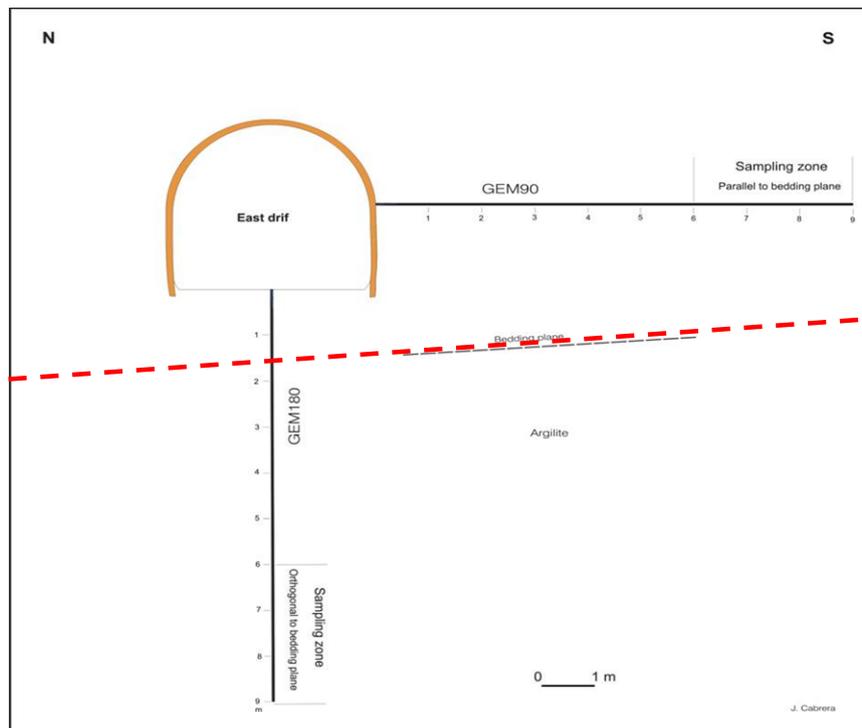


Bild 3.69: Querschnitt durch den östlichen Abschnitt der Gallery 96 mit einer Darstellung der Bohrlöcher GEM 90 und GEM 180, modifiziert nach Cabrera et al. (1999)

Der Querschnitt in Bild 3.69 zeigt den Blick aus dem Haupttunnel in Richtung der Ortsbrust des östlichen Abschnitts der Gallery 96. Es ist Bild 3.69 zu entnehmen, dass das horizontale Bohrloch GEM 90 einen nahezu schichtungsparallelen Verlauf hat, während die Längsachse des vertikalen Bohrlochs GEM 180 annähernd schichtungsorthogonal zu dem nahezu sählig anstehenden Schichtungsgefüge verläuft. Daraus lässt sich schließen, dass auch das in Bild 3.69 nicht dargestellte und parallel zum Bohrloch GEM 180 verlaufende Bohrloch GEM 270 einen nahezu schichtungsorthogonalen Verlauf aufweist.

(d) Lage und Geometrie der untersuchten Bohrlöcher in der Gallery 08 (GSM-Bohrlöcher)

Die fünf im südlichen Abschnitt der Gallery 08 gelegenen GSM-Bohrlöcher sind, wie auch die GEM-Bohrlöcher in der Gallery 96, mit einem Einfachkernrohr mit einem Außendurch-

messer der Bohrkronen von $d_{BK} = 101 \text{ mm}$ im Trockenbohrverfahren mit Luftspülung hergestellt worden. Alle fünf Observationsbohrlöcher befinden sich im selben Galleryquerschnitt mit einem Abstand von $a \approx 15 \text{ m}$ zur südlichen Ortsbrust der Gallery 08. Die Bohrlöcher haben alle eine Länge von $l \approx 6 \text{ m}$. Die Bezeichnung der Bohrlöcher lautet im einzelnen: GSM 45, GSM 90, GSM 135, GSM 225 und GSM 315. Die Zahl in der Bezeichnung eines Bohrlochs charakterisiert dabei die Lage und Richtung des Bohrlochs innerhalb des Stollenquerschnitts. Aus Norden in Richtung der südlich gelegenen Ortsbrust blickend bezeichnet die angegebene Gradzahl, beginnend in der Firste bei $\phi = 0^\circ$ und im Gegenuhrzeigersinn entlang der Gallerykontur verlaufend, den zugehörigen Umfangswinkel zu der Position entlang der Gallerykontur, an der das Bohrloch in das Gebirge abgeteuft worden ist. Darüber hinaus bezeichnet die im Namen eines Bohrlochs enthaltene Gradzahl die Neigung der Längsachse des Bohrlochs gegenüber der Vertikalen. Bild 3.70 zeigt schematisch die Anordnung der fünf observierten GSM-Bohrlöcher innerhalb der Gallery 08.

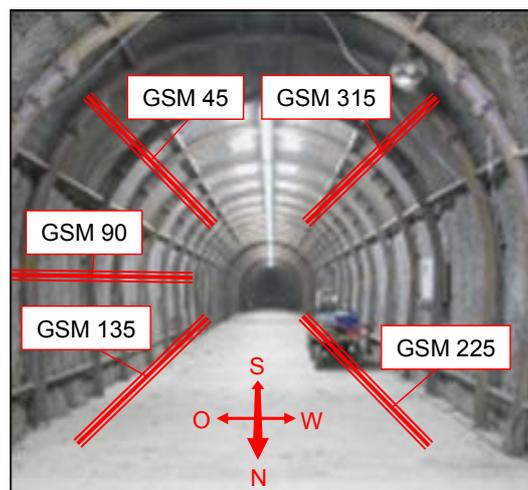


Bild 3.70: Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit schematisch dargestellter Anordnung der fünf observierten GSM-Bohrlöcher

Die Blickrichtung in Bild 3.70 entspricht der Südrichtung. Im betrachteten Galleryquerschnitt existieren auch noch die Bohrlöcher GSM 0 (vertikal in die Firste geteuft), GSM 180 (vertikal in die Sohle geteuft) und GSM 270 (horizontal in den westlichen Stoß geteuft). Allerdings sind diese drei GSM-Bohrlöcher unmittelbar nach ihrem Abteufen vom IRSN instrumentiert worden, so dass sie nicht als Observationsbohrlöcher im Rahmen der vom LfD&G durchgeführten in situ-Arbeiten zur Verfügung gestanden haben.

Bild 3.63 kann entnommen werden, dass die Gallery 08 westlich von der Hauptstörungszone liegt. Daraus folgt, dass das im östlichen Stoß der Gallery 08 gelegene Bohrloch GSM 90 sowie die beiden ebenfalls auf der östlichen Seite der Gallery 08 gelegenen Bohrlöcher GSM 45 und GSM 135 in Richtung der Hauptstörungszone abgeteuft worden sind, während die Bohrlöcher GSM 225 und 315 auf der westlichen und somit von der Hauptstörungszone abgewandten Seite der Gallery 08 liegen. Wie die Vorstellung und Diskussion der Observationsergebnisse für die GSM-Bohrlöcher aufzeigen wird, hat die Ausrichtung, in der die Bohrlöcher abgeteuft worden sind, einen großen Einfluss auf das zeitabhängige hydraulisch-mechanisch gekoppelte Bohrlochtragverhalten und insbesondere auf das zeitabhängige hydraulische Verhalten der Bohrlöcher (Intensität von Wasserzutritten).

3.2.3 GEM-Bohrlöcher in der Gallery 96

(a) *Untersuchungsprogramm und Umfang der in den GEM-Bohrlöchern durchgeführten Observationsarbeiten*

In den drei GEM-Bohrlöchern sind im Zuge der im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens durchgeführten in situ-Arbeiten insgesamt je vier Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde und je drei Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera durchgeführt worden (*Lux et al., 2012*). Im Rahmen dieses Vorhabens sind an insgesamt vier weiteren Observationsterminen Befahrungen der drei GEM-Bohrlöcher durchgeführt worden. Eine Übersicht über das im Rahmen der zwei Forschungsvorhaben insgesamt innerhalb der drei GEM-Bohrlöcher mit der Dreiarmkalibersonde und der Axial-Bohrlochkamera durchgeführte Observationsprogramm kann Tabelle 3.3 entnommen werden.

Die Differenz zwischen der Anzahl von Befahrungen der Bohrlöcher GEM 90, GEM 180 und GEM 270 mit der Dreiarmkalibersonde und der Anzahl von Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera resultiert daraus, dass zum ersten Befahrungstermin im Jahr 2007 noch keine Axial-Bohrlochkamera am LfD&G zur Verfügung gestanden hat. Anstelle der Axial-Bohrlochkamera ist am ersten Observationstermin am 26.09.2007 zusätzlich zu der Dreiarmkalibersonde ein optischer Bohrlochscanner zum Einsatz gekommen. Ausgewählte Ergebnisse der Bohrlochscans können *Lux et al. (2012)* entnommen werden.

Observationstermin	GEM 90	GEM 180	GEM 270
26.09.2007	-/K	-/K	-/K
03.11.2009	V/K	V/K	V/K
10.05.2010	V/K	V/K	V/K
08.10.2010	V/K	V/K	V/K
23.11.2011	V/X	V/K	V/K
23.05.2012	V/X	V/K	V/K
28.08.2013	V/X	V/K	V/K
14.05.2014	V/X	V/K	V/K

Tabelle 3.3: Überblick über die Observationstermine und das zu den einzelnen Terminen durchgeführte Observationsprogramm (-/K = Kalibermessung, aber keine Videoobservation, da die Axial-Bohrlochkamera noch nicht zur Verfügung stand; V = Videoobservation; K = Kalibermessung; X = Kalibermessung aufgrund des Bohrlochzustands nicht möglich)



Bild 3.71: Techniker und Ingenieur des LfD&G bei Videoobservationsarbeiten am Bohrloch GEM 90



Des Weiteren ist Tabelle 3.3 zu entnehmen, dass in den Jahren 2011 bis 2014, also zu den letzten vier Observationsterminen und somit innerhalb dieses Vorhabens, keine Befahrung mit der Dreiarmkalibersonde im Observationsbohrloch GEM 90 mehr durchgeführt worden ist. Der Grund dafür, dass innerhalb des Observationsbohrlochs GEM 90 nach dem 08.10.2010 keine Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde mehr stattgefunden haben, ist, dass eine sich bereits zu den vorangehenden Observationszeitpunkten andeutende Abnahme der Standfestigkeit des Gebirges an der Bohrlochwand durch Entfestigungsprozesse schließlich soweit vorangeschritten war, dass weitere Befahrungen mit der sensiblen Messapparatur zur Kalibermessung unmöglich geworden sind, während eine Befahrung des Bohrlochs GEM 90 mit der robusten Axial-Bohrlochkamera weiterhin möglich gewesen ist. Bild 3.71 vermittelt einen Eindruck von den Videoobservationsarbeiten am Observationsbohrloch GEM 90 innerhalb der Gallery 96.

(b) Zur Darstellung der innerhalb der GEM-Bohrlöcher generierten Observationsergebnisse

(b 1) GEM 90

Nachfolgend werden zunächst für das Bohrloch GEM 90 ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation mit der Axial-Bohrlochkamera vorgestellt und diskutiert. Zur Diskussion der Ergebnisse der Videoobservation werden neben den an den letzten vier Observationsterminen von 2011 bis 2014 innerhalb des Rahmens dieses Vorhabens generierten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zusätzlich auch die in den Jahren 2009 bis 2010 im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens entstandenen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt, sodass für jeden der betrachteten Bohrlochbereiche eine Serie von sieben Aufnahmen aus dem Inneren des Bohrlochs zu betrachten ist.

Da, wie Tabelle 3.3 zu entnehmen ist, innerhalb dieses Vorhabens keine weiteren Messungen mit der Dreiarmkalibersonde im Observationsbohrloch GEM 90 durchgeführt werden konnten, wird auf eine erneute Diskussion der Ergebnisse der Kalibermessungen im Rahmen des vorliegenden Berichts verzichtet. Die vollständige Ergebnisdarstellung zu den Kalibermessungen innerhalb des Observationsbohrlochs GEM 90 kann aus *Lux et al. (2012)* entnommen werden.



(b 2) GEM 180 und GEM 270

Für die zwei Observationsbohrlöcher GEM 180 und GEM 270 wird aufgrund der bei der insgesamt mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observation der beiden Bohrlöcher auf Basis der Videoobservation und der Vermessung mit der Dreiarmkalibersonde festzustellen, tendenziell als ereignisarm einzustufenden zeitlichen Entwicklung auf eine gesonderte Darstellung von ausgewählten Ergebnissen der Videoobservation mit der Axial-Bohrlochkamera verzichtet. Stattdessen findet für die beiden Observationsbohrlöcher GEM 180 und GEM 270 im Rahmen der Ergebnisdiskussion eine Fokussierung auf die Ergebnisse der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde statt. Um dem Betrachter das Erlangen eines vollständigen Überblicks über die anhand der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde dokumentierte zeitabhängige Entwicklung innerhalb des insgesamt mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums zu ermöglichen, werden im Rahmen der Diskussion der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde die an allen Observationsterminen in den Jahren von 2007 bis 2014 generierten Resultate dargestellt. Die nachfolgend zu betrachtenden exemplarisch ausgewählten Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde setzen sich somit aus Messwerten zusammen, die an den vier Observationsterminen in den Jahren 2011 bis 2014 im Rahmen dieses Vorhabens generiert worden sind, sowie darüber hinaus aus Messwerten, die in den Jahren 2007 bis 2010 an den vier Observationsterminen im Rahmen von *Lux et al. (2012)* entstanden sind.

Am ersten Befahrungstermin sind in den GEM-Bohrlöchern insgesamt sechs Kalibermessungen je Bohrloch durchgeführt worden. Die sechs Messungen ergeben sich aus drei aufeinander folgenden Befahrungen des Bohrlochs, bei denen jeweils bei der Einfahrt und bei der Ausfahrt eine Messung stattgefunden hat. Die drei Befahrungen je Befahrungstermin sind durchgeführt worden, um durch Variationen des Ausgangswinkels ϕ der Kalibersonde anhand der Messwerte möglichst viele Informationen über die Form der Bohrlochkontur und die Beschaffenheit der Bohrlochwand zu erhalten. Nach der ersten Befahrung unter einem Ausgangswinkel von $\phi = 0^\circ$, bei der die Sonde in ihrer Ausgangsposition so orientiert gewesen ist, dass einer ihrer drei Messarme direkt zum obersten Punkt der Bohrlochkontur orientiert war (horizontales Bohrloch GEM 90) beziehungsweise in die Nord-Richtung orientiert war (vertikale Bohrlöcher GEM 180 und GEM 270), ist die Sonde anschließend für die nächsten zwei Befahrungen im Uhrzeigersinn um jeweils $\Delta\phi = 40^\circ$ gegenüber der vorangegangenen Befahrung weitergedreht worden. Somit sind zum ersten Befahrungstermin am 26.09.2007 Befah-

rungen der GEM-Bohrlöcher mit einer Ausgangsposition der Sonde von $\phi = 0^\circ$, $\phi = 40^\circ$ und $\phi = 80^\circ$ vorgenommen worden. Um die Wahrscheinlichkeit zu verringern, dass bei einem Befahrungstermin eine Veränderung der Bohrlochwandbeschaffenheit oder der Bohrlochkontur nicht von einem der Messarme der Dreiarmkalibersonde erfasst wird und um somit die Aussagekraft der bei einem Befahrungstermin gewonnenen Bohrlochmessdaten zu erhöhen, ist ab dem zweiten Befahrungstermin die Anzahl der pro Befahrungstermin durchgeführten Messungen auf acht pro Bohrloch erhöht worden. Ab dem zweiten Befahrungstermin sind somit Befahrungen mit einem Ausgangswinkel der Dreiarmkalibersonde von $\phi = 0^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$ und $\phi = 90^\circ$ durchgeführt worden. Eine detaillierte Beschreibung der Dreiarmkalibersonde kann Abschnitt 4 in *Lux et al. (2012)* entnommen werden. Hingewiesen werden soll an dieser Stelle darauf, dass die nachfolgend vorgestellte Auswertung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde vornehmlich aus qualitativer Sicht erfolgt, um die messtechnisch erfassten Veränderungen hervorzuheben. Wertende Einschätzungen und Interpretationen beruhen dabei auf den Erfahrungen, die mit dieser Bohrlochmesstechnik und ihrer Aussagekraft zwischenzeitlich vorliegen. Hervorzuheben ist, dass mit der verwendeten Dreiarmkalibersonde umfangsbezogen von der Lage der Sonde im Bohrlochquerschnitt abhängige Deformationsmittelwerte erhalten werden.

(c) Ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation im Bohrloch GEM 90

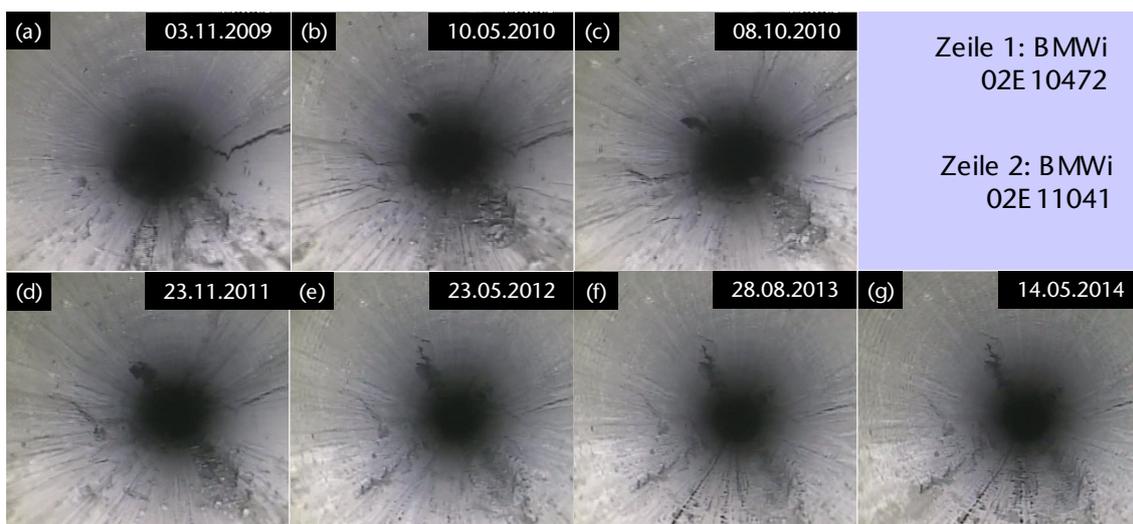
(c 1) Zur Darstellung der Ergebnisse

Im Rahmen dieses und des vorangegangenen Forschungsprojektes haben, wie Tabelle 3.3 zu entnehmen ist, zu insgesamt sieben Observationszeitpunkten Befahrungen des Bohrlochs GEM 90 mit der Axial-Bohrlochkamera stattgefunden. Nachfolgend wird die zeitliche Entwicklung von vier exemplarisch ausgewählten unterschiedlichen Teufenabschnitten innerhalb des Bohrlochs GEM 90 anhand der Gegenüberstellung von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus den ausgewählten Teufenbereichen dokumentiert. Je betrachtetem Teufenbereich werden entsprechend der sieben Observationstermine, an denen innerhalb des Bohrlochs GEM 90 Videoobservationen stattgefunden haben, sieben Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt. Die Darstellung der aus je sieben Aufnahmen bestehenden Aufnahmeserien erfolgt im vorliegenden Abschnitt stets in zwei Zeilen, wobei in der oberen Zeile drei Aufnahmen und in der unteren Zeile vier Aufnahmen zu betrachten sind. Die drei Aufnahmen (a) bis (c) in Zeile 1 sind im Rahmen des Forschungsvorhabens mit dem Förder-

kennzeichen 02E10472 in den Jahren 2009 bis 2010 entstanden und bereits in *Lux et al. (2012)* ausführlich diskutiert worden. Um dem Betrachter einen Überblick über die zeitabhängige Entwicklung innerhalb des gesamten Zeitraums vom Jahr 2009 bis zum Jahr 2014, in dem vom LfD&G Videoobservationsarbeiten mit der Axial-Bohrlochkamera durchgeführt worden sind, zu verschaffen, werden die Aufnahmen im Rahmen des vorliegenden Berichts erneut präsentiert. In der zweiten Zeile werden die vier Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt, die in den Jahren 2011 bis 2014 und somit im Rahmen dieses Vorhabens generiert worden sind.

(c 2) *Teufenbereich 1: $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m*

Der erste der hier vorgestellten ausgewählten Teufenbereiche ist der Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 1,8$ m. Die vergleichende Betrachtung der sieben Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.72 zeigt, dass sich in den ca. viereinhalb Jahren zwischen dem 03.11.2009 und dem 14.05.2014 nur geringfügige, auf Basis der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizierbare Veränderungen der Beschaffenheit der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 1,8$ m ergeben haben.



*Bild 3.72: Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m. Die Aufnahmen (a) bis (c) in Zeile 1 sind im Rahmen des Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen 02E10472 entstanden und bereits in *Lux et al. (2012)* ausführlich diskutiert worden, während die Aufnahmen (d) bis (g) in der zweiten Zeile im Rahmen dieses Vorhabens generiert worden sind.*

Der überwiegende Teil der auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.72 zu betrachtenden Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 1,8$ m erweist sich als bis zum Ende des beinahe siebenjährigen Observationszeitraums, zu dem der betrachtete Bohrlochbereich eine Standzeit von $t_s \approx 10$ a erreicht hat, als standfest. Lediglich in drei Bereichen der Bohrlochkontur entwickeln sich im Verlauf des Observationszeitraums unterschiedlich stark ausgeprägte Schädigungen im Gestein entlang der Bohrlochwand. Die stärkste Veränderung der Beschaffenheit des Gesteins entlang der Bohrlochwand innerhalb des betrachteten Bohrlochbereichs ist in allen sieben in Bild 3.72 zu betrachtenden Aufnahmen im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur identifizierbar. Weitere, weit weniger stark ausgeprägte Schädigungen der Bohrlochwand sind in einigen der Aufnahmen in Bild 3.72 im linken oberen sowie im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur zu erkennen. Während die Schädigung der Bohrlochwand im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur bereits auf der zu Beginn der Observationsarbeiten mit der Axial-Bohrlochkamera am 03.11.2009 entstandenen Aufnahme in Bild 3.72(a) zu observieren ist, entwickeln sich die Bohrlochwandschädigungen in den zwei weiteren Bohrlochkonturbereichen im betrachteten Teufenbereich erst zu späteren Zeitpunkten.

Bevor nachfolgend auf die zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 1,8$ m eingegangen wird, werden die drei Bohrlochkonturbereiche, in denen im Rahmen der durchgeführten Observationsarbeiten nachhaltige Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit identifiziert werden konnten, in Bild 3.73, das eine Vergrößerung von Bild 3.72(g) zeigt, grafisch hervorgehoben.

Bei allen drei in Bild 3.73 zu betrachtenden Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit handelt es sich um der Richtung der Bohrlochlängsachse folgende Gesteinsabplatzungen an der Bohrlochwand. Neben der vom Anfang des Observationszeitraums an identifizierbaren Gesteinsabplatzung im rechten unteren Konturbereich sind darüber hinaus auch Gesteinsabplatzungen im linken oberen sowie im linken unteren Konturbereich zu betrachten. Anders als die vergleichsweise große Gesteinsabplatzung im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur sind die zwei weiteren Konturbruchstrukturen auf der am 03.11.2009 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.72(a) noch nicht zu erkennen.

Während die tiefer im Bohrloch gelegene Bruchstruktur im linken oberen Konturbereich erstmals auf der am 08.10.2010 entstandenen und in Bild 3.72(c) dargestellten Aufnahme der



Bild 3.73: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.72(g) mit grafischer Kennzeichnung von Schichtflächenversagen im rechten unteren Konturbereich (Vordergrund) und im linken oberen sowie im linken unteren Konturbereich (Hintergrund)

Axial-Bohrlochkamera deutlich zu erkennen ist, kann die Bruchstruktur im linken unteren Bohrlochkonturbereich erstmals auf der am 23.05.2012 generierten und in Bild 3.72(e) dargestellten Aufnahme erkannt werden. Daraus wird deutlich, dass der Nachbruch im linken oberen Bohrlochkonturbereich sich im Zeitraum zwischen der Kamerabefahrung am 03.11.2009 und der Kamerabefahrung am 10.05.2010 aus einem tiefer im Bohrloch GEM 90 gelegenen Teufenbereich bis in den betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m hinein ausbreitet.

Darüber hinaus ist der Aufnahmenserie in Bild 3.72 zu entnehmen, dass die Konturbruchstruktur im linken unteren Bohrlochkonturbereich sich offensichtlich innerhalb der 7 Monate zwischen den Observationsterminen am 23.11.2011 und am 23.05.2012 in den betrachteten Teufenbereich hinein fortpflanzt.

Weiter ist aus der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.72(d) bis Bild 3.72(g) zu schlussfolgern, dass die größte der drei zu betrachtenden Gesteinsabplatzungen sich zwar bezüglich ihrer Ausdehnung entlang der Bohrlochkontur in den Jahren 2011 bis 2014 etwas vergrößert, aber eine nennenswerte Ausdehnung entlang der Bohrlochlängsachse in Richtung des Bohrlochmunds nicht stattfindet. Der rechte obere Bereich der Bohrlochkontur bleibt im betrachteten Teufenbereich bemerkenswerterweise über den gesamten mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum hinweg von Bohrlochwandbeschaffenheitsveränderungen unbeeinflusst.

Wie den Ausführungen zum Tragverhalten des Bohrlochs GEM 90 in *Lux et al. (2012)* entnommen werden kann, stellt der hier betrachtete Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m den Anfang eines $l \approx 4$ m langen Abschnitts des Bohrlochs GEM 90 dar, in dem es bereits im Zeitraum zwischen dem Abteufen im Jahr 2004 und der Erstbefahrung mittels des optischen Bohrlochscanners im September 2007 nahezu durchgängig zu einem Versagen des Gebirges in den Schichtflächen gekommen ist. Da die Schichtflächen des Toarcium-Tongesteins im hier betrachteten Bereich des URL Tournemire näherungsweise horizontal unter einem Fallwinkel von $\alpha \approx 5^\circ$ aus der Süd-Richtung einfallen, verläuft das horizontal in den südlichen Stoß der Gallery 96 hinein abgeteufte Observationsbohrloch GEM 90 annähernd schichtungsparallel, Bild 3.69 in Abschnitt 3.2.2.

Versagen des Gebirges in den Schichtflächen ereignet sich in den Bereichen entlang der Bohrlochkontur, in denen die im Gebirge tangential zur Bohrlochkontur verlaufenden Sekundärspannungen in besonders ungünstiger Weise zu einer Scherbeanspruchung in den Schichtflächen des Gesteins mit der dort gegenüber der Gesteinsmatrix reduzierten Scherfestigkeit führen. Detaillierte Ausführungen zu Mechanismen des Schichtflächenversagens und zu den das Auftreten von Schichtflächenversagen begünstigenden Orientierungen von untertägigen Hohlräumen gegenüber dem Schichtungsgefüge und dem innerhalb einer Gebirgsformation vorherrschenden Primärspannungszustand können *Lux & Seeska (2010)* entnommen werden. Im Fall des nahezu schichtungsparallel verlaufenden Observationsbohrlochs GEM 90 tritt das Versagen des Gebirges in den Schichtflächen erwartungsgemäß näherungsweise axialsymmetrisch sowohl bezogen auf die Vertikalachse wie auch auf die Horizontalachse im linken oberen, im linken unteren, im rechten oberen und auch im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur auf. Zur Visualisierung des beschriebenen, in weiten Teilen des Observationsbohrlochs GEM 90 observierten Konturbruchmusters zeigt Bild 3.74 eine am 10.05.2010 entstandene Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus dem im nachfolgenden Abschnitt 3.2.3(c3) noch detailliert anhand der Diskussion einer Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m. Bei der in Bild 3.74 zu betrachtenden Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera handelt es sich um eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.72(b), die bereits in *Lux et al. (2012)* zur Verdeutlichung der Systematik des innerhalb des Observationsbohrlochs GEM 90 identifizierten Konturbruchmusters herangezogen worden ist. Die systematisch um die Bohrlochkontur herum angeordneten, höchstwahrscheinlich durch ein Versagen des Gebirges in den Schichtflächen hervorgerufenen Schädigungen des Gesteins entlang der Bohrlochwand werden in Bild 3.74 grafisch durch rote Pfeile

hervorgehoben. Der Verlauf der Schichtflächen in der Bildebene wird durch die gelb strichpunktierten Linien visualisiert.

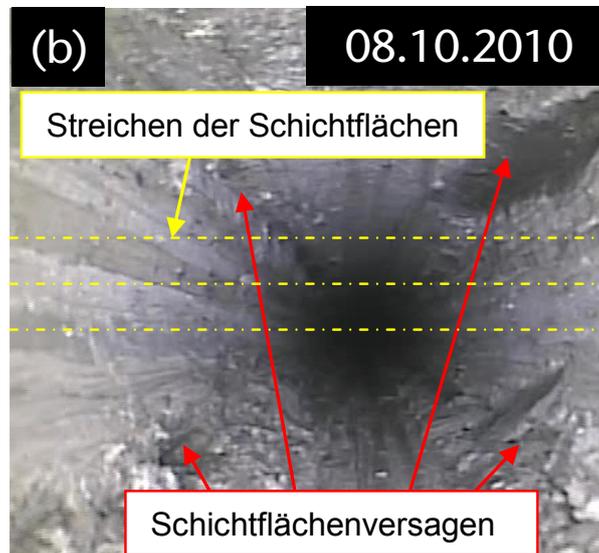


Bild 3.74: Darstellung des lokal in vier begrenzten Bohrlochkonturbereichen auftretenden Schichtflächenversagens (rote Pfeile) sowie Visualisierung des Streichens der Schichtflächen (gelb strichpunktierte Linien), Lux et al. (2012)

Neben der systematischen Anordnung der Bruchstrukturen entlang der Bohrlochkontur scheint besonders die Beschaffenheit der Bruchstruktur im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur mit einem nahezu horizontalen Verlauf der Bruchfläche die Annahme zu bestätigen, dass es sich bei den zu beobachtenden Bruchstrukturen um durch ein Versagen des Gesteins in den Schichtflächen hervorgerufene Schädigungen der Bohrlochwand handelt.

Die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m zeigt, wie sich der Zustand der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m vom Zustand der Bohrlochwand in den tiefer im Observationsbohrloch GEM 90 gelegenen Teufenbereichen unterscheidet. Die Aufnahme aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m kann auf Basis der Begutachtung der von der Axial-Bohrlochkamera im Inneren des Bohrlochs GEM 90 aufgezeichneten Bohrlochvideos als repräsentativ für das Bohrlochtragverhalten im Bohrlochabschnitt zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m angesehen werden. Lediglich in den Übergangsbereichen zwischen den entweder ungeschädigten oder allenfalls leicht geschädigten Bohrlochbereichen zwischen dem Bohrlochmund und einer Teufe von $t_{BL} \approx 1,6$ m sowie ab einer Teufe von $t_{BL} \approx 5,7$ m bis zum Bohrlochtiefsten unterscheiden sich die zu betrachtenden Bruchmuster im Gestein entlang der



Bohrlochkontur etwas von dem in Bild 3.74 zu betrachtenden Bruchmuster mit den vier systematisch entlang der Bohrlochkontur angeordneten Versagensbereichen.

In Bezug auf die zeitabhängige Entwicklung des innerhalb des Bohrlochs GEM 90 detektierten Schichtflächenversagens lässt sich feststellen, dass es innerhalb der ersten drei Jahre nach dem Abteufen, also in der Zeit vor dem ersten Observationstermin offensichtlich vergleichsweise schnell zur Ausbildung des zu beobachtenden Versagens des Gebirges in den Schichtflächen in den tieferen Bohrlochbereichen gekommen ist. Wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m in Bild 3.72 zu entnehmen ist, findet bis zum heutigen Zeitpunkt eine Ausbreitung der Bruchstrukturen in Richtung des Bohrlochmundes statt. Allerdings ist der Betrachtung der Aufnahmenserie in Bild 3.72 auch eindeutig zu entnehmen, dass die Ausbreitung der durch ein Versagen des Gebirges in den Schichtflächen hervorgerufenen Konturbruchstrukturen im durch die Observationsarbeiten mit der Axial-Bohrlochkamera erfassten Zeitraum offensichtlich deutlich langsamer voranschreiten, als in den fünf vorangehenden Jahren, in denen sich die Versagensstrukturen über einen Bohrlochbereich mit einer Länge von $l \approx 4$ m innerhalb des Observationsbohrlochs GEM 90 ausgebreitet haben.

Neben der Tatsache, dass die Ausbreitung der Bruchstrukturen an der Bohrlochkontur in Richtung des Bohrlochmunds vom in Bild 3.72(a) dokumentierten Observationszeitpunkt am 03.11.2009 an nur noch sehr langsam voranschreitet, lässt sich der Betrachtung der Aufnahmenserie von Bild 3.72(a) bis Bild 3.72(g) darüber hinaus entnehmen, dass die Ausbreitung der linienartig entlang der Bohrlochwand in Richtung der Bohrlochlängsachse verlaufenden Bruchstrukturen nicht kontinuierlich und auch nicht in allen vier potenziell von einem Versagen des Gebirges in den Schichtflächen betroffenen Bohrlochkonturbereichen mit vergleichbarer Propagationsgeschwindigkeit erfolgt. Während, wie Bild 3.72(a) entnommen werden kann, am 03.11.2009 lediglich im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur eine deutliche Schädigung der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m observiert werden konnte, ist auf der knapp ein Jahr später entstandenen und in Bild 3.72(c) zu betrachtenden Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 08.10.2010 auch im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur eine Schädigung der Bohrlochwand erkennbar. Eine Schädigung der Bohrlochwand im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur ist zum Observationszeitpunkt am 08.10.2010 noch nicht identifizierbar gewesen. Während sich ein gutes Jahr später zum 23.11.2011 erste Veränderungen der Beschaffenheit der Bohrlochwand im linken

unteren Bereich der Bohrlochkontur andeuten, ist weitere sieben Monate später dann zum Observationstermin am 23.05.2012 eine deutliche Schädigung der Bohrlochwand im linken unteren Bohrlochkonturbereich feststellbar. Im selben Zeitraum, in dem sich die Schädigungen der Bohrlochwand im linken unteren Bohrlochkonturbereich ausbilden, treten kaum weitere anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizierbare Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit in den beiden zuvor bereits geschädigten Bohrlochkonturbereichen auf. In den darauf folgenden zwei Jahren zwischen dem 23.05.2012 und dem 14.05.2014 stagniert die Ausbreitung der Bruchstrukturen im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m nahezu, wie der Betrachtung von Bild 3.72(f) und Bild 3.72(g) entnommen werden kann, sodass für den rechten oberen Bohrlochkonturbereich im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m auch nach einer Standzeit von $t_s \approx 10$ a keine Schädigung der Bohrlochwand zu verzeichnen ist.

(c 3) *Teufenbereich 2: $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m*

In Bild 3.75 sind Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m des Bohrlochs GEM 90 dargestellt. Die obere Zeile von Bild 3.75 zeigt die bereits in *Lux et al. (2012)* dargestellten und ausführlich diskutierten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus den Jahren 2009 und 2010, Bild 3.75(a) bis Bild 3.75(c). In der

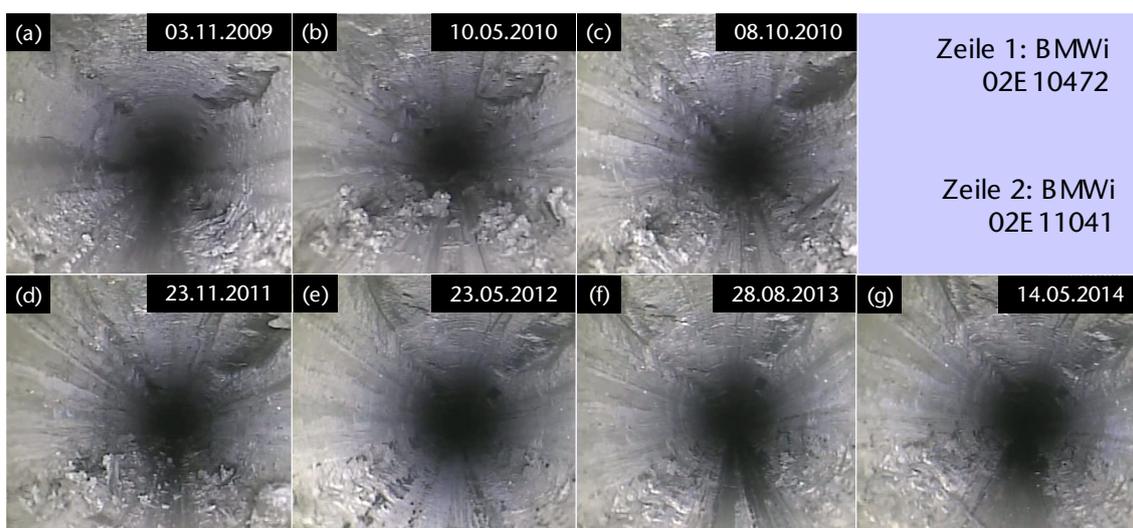


Bild 3.75: *Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m*

zweiten Zeile sind in Bild 3.75(d) bis Bild 3.75(g) die Aufnahmen zu betrachten, die zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 und somit im Rahmen dieses Vorhabens generiert worden sind.

Der in Bild 3.75 dargestellte Bohrlochbereich befindet sich in einer Teufe von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m und damit vom Bohrlochmund aus betrachtet in etwa $\Delta l \approx 0,8$ m weiter innerhalb des Gebirges als der bei $t_{BL} \approx 1,6$ m beginnende Bohrlochbereich, in dem entsprechend der vorangehenden Ausführungen stärkere Schädigungen der Bohrlochwand vorliegen, die ihrer Lokalisation entlang des Bohrlochumfangs nach durch ein Versagen des Gebirges in den Schichtflächen hervorgerufen werden. Die in Bild 3.75 dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m sind deshalb stellvertretend für die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Bohrlochbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 5,7$ m mit den stärker ausgeprägten Schädigungen der Bohrlochwand ausgewählt worden, weil sie die im vorangehenden Abschnitt 3.2.3(c2) bereits ausführlich beschriebene, systematische Anordnung der schichtflächenbedingten Bruchstrukturen entlang der Bohrlochkontur sehr gut widerspiegeln. Während in der in Bild 3.72 dargestellten Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,6$ m bis $t_{BL} \approx 1,8$ m zunächst nur im linken oberen und im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur und ab dem 23.05.2012 und somit zu den letzten drei Observationsterminen schließlich auch im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus erkennbar sind, sind in Bild 3.75 deutlich stärkere Schädigungen der Bohrlochwand bis hin zu flächenhaften Gesteinsabplatzungen im linken oberen, linken unteren, rechten oberen und rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur zu ersehen. Besonders die Beschaffenheit der Konturbruchstruktur im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur mit einem nahezu horizontalen Verlauf der Bruchfläche scheint die Annahme zu bestätigen, dass es sich bei der zu beobachtenden Bruchstruktur um eine durch Versagen des Gesteins in den Schichtflächen hervorgerufene Schädigung der Bohrlochwand handelt. Bild 3.76, das bereits in *Lux et al. (2012)* dargestellt worden ist, zeigt wie zuvor auch schon Bild 3.74 eine Vergrößerung der am 10.05.2010 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.75(b).

Die auf ein Versagen des Gesteins in den Schichtflächen hinweisende horizontal verlaufende Bruchfläche wird in Bild 3.76 grafisch durch rote Pfeile hervorgehoben. Des Weiteren wird in Bild 3.76 mittels mehrerer gelber Pfeile ein Riss im Gestein der Bohrlochwand im linken oberen Bereich der Bohrlochwand markiert.

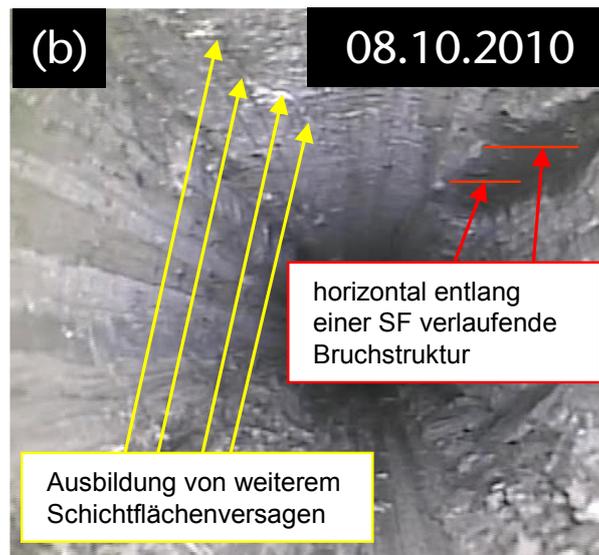


Bild 3.76: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.75(b) mit einer Kennzeichnung der nahezu horizontal entlang einer Schichtfläche verlaufenden Bruchstruktur im rechten oberen Bohrlochkonturbereich (rote Pfeile) und der Kennzeichnung eines Risses, der die Ausbildung von weiterem Schichtflächenversagen ankündigt (gelbe Pfeile), Lux et al. (2012)

Entlang des in Bild 3.76 zu beobachtenden Risses im Gestein der Bohrlochwand löst sich innerhalb des Observationszeitraums zwischen dem 10.05.2010 und dem 14.05.2014 nach und nach etwas Gestein aus der Bohrlochwand heraus, wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen in Bild 3.75(b) bis Bild 3.75(g) entnommen werden kann. Allerdings verdeutlicht die der Betrachtung der Aufnahme in Bild 3.75(g) zu entnehmende Tatsache, dass sich auch zum Observationstermin am 14.05.2014 große Teile des bereits am 10.05.2010 durch die Ausbildung des in Bild 3.76 grafisch hervorgehobenen Risses partiell aus der Bohrlochwand heraus gelösten Gesteins noch nicht vollständig aus der Bohrlochwand herausgetrennt haben, wie sehr sich die Schädigungsprozesse auch innerhalb des hier betrachteten, deutlich von einem Versagen des Gebirges in den Schichtflächen betroffenen Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m des Observationsbohrlochs GEM 90 offensichtlich seit dem Abteufen im Jahr 2004 verlangsamt haben. Bild 3.77 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.75(g) mit einer grafischen Kennzeichnung des in etwa vier Jahre nach der Entstehung der in Bild 3.75(b) zu betrachtenden Aufnahme nach wie vor entlang der Bohrlochkontur zu identifizierenden Risses im Gestein und einer grafischen Kennzeichnung eines Bereiches, in dem es entlang des Risses zu einer Gesteinsabplatzung aus der Bohrlochwand heraus gekommen ist.

Auch in den weiteren Konturbereichen innerhalb des betrachteten Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m erweisen sich die zeitabhängigen Entfestigungsprozesse des Ge-

steins entlang der Bohrlochwand in ihrer Entwicklung als langsamer als es der Zustand der Bohrlochwand zum ersten Observationstermin, an dem die Axial-Bohrlochkamera zum Einsatz gekommen ist (03.11.2009), vermuten ließ. Der im Rahmen von *Lux et al. (2012)* bereits nach den ersten drei Observationsterminen mit den dazugehörigen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.75(a) bis Bild 3.75(c) formulierte Eindruck einer starken Verlangsamung der zeitabhängig ablaufenden Schädigungsprozesse wird durch die im Rahmen dieses Vorhabens generierten und in Bild 3.75(d) bis Bild 3.75(g) dargestellten Aufnahmen aus dem Tiefenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m bis $t_{BL} \approx 2,6$ m somit vollständig bestätigt.



Bild 3.77: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.75(g) mit einer Kennzeichnung der nahezu horizontal entlang einer Schichtfläche verlaufenden Bruchstruktur im linken oberen Bohrlochkonturbereich (rote Pfeile) und der Kennzeichnung des bereits in Bild 3.76 grafisch hervorgehobenen Risses, entlang dessen die Ausbildung von weiterem Schichtflächenversagen zeitabhängig in tiefere Bohrlochbereiche voranschreitet (gelbe Pfeile)

Neben der bereits beschriebenen, sehr langsam voranschreitenden Entfestigung des Gesteins im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur lassen sich bezüglich der zeitabhängigen Entwicklung des Tragverhaltens der Bohrlochwand im Bohrloch GEM 90 aus der Betrachtung der Aufnahmenserie in Bild 3.75 drei weitere optisch detektierbare Bereiche der Bohrlochkontur mit einer Zunahme der Schädigung des Gesteins entlang der Bohrlochwand entnehmen. Entsprechend der vorangehenden Ausführungen handelt es sich bei den weiteren geschädigten Bereichen um den linken unteren, den rechten unteren und den rechten oberen Bohrlochkonturbereich. Wie der Betrachtung von Bild 3.75 jedoch ebenfalls zu entnehmen ist, finden anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu



identifizierende, zeitabhängig ablaufende Bohrlochwandveränderungen in erster Linie im Zeitraum vom zweiten Observationszeitpunkt am 03.11.2009 bis zum vierten Observationszeitpunkt am 08.10.2010 mit den zugehörigen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.75(a) bis Bild 3.75(c) statt. Im Rahmen der vier innerhalb des aktuellen Vorhabens gelegenen Videobefahrungen mit den Observationszeitpunkten zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 und den zugehörigen Aufnahmen in Bild 3.75(d) bis Bild 3.75(g) lassen sich dagegen in den weiteren drei geschädigten Bohrlochkonturbereichen kaum weitere zeitabhängig eintretende Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera im betrachteten Teufenbereich identifizieren.

Die innerhalb des Bohrlochs GEM 90 durchgeführten Videoobservationsarbeiten verdeutlichen somit, wie die zeitabhängigen Schädigungsprozesse im Gestein der Bohrlochwand sich trotz des Vorhandenseins von schichtflächenbedingten Bohrlochwandschädigungen in vier Bereichen entlang der Bohrlochkontur mit zunehmender Standzeit des gegen Ende des Observationszeitraums ca. zehn Jahre alten Bohrlochs im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4$ m und $t_{BL} \approx 2,6$ m verlangsamen. Trotz des Auftretens von Versagen des Gebirges in den Schichtflächen in allen vier durch die Orientierung der Schichtflächen gegenüber der Bohrlochkontur und gegenüber den um die Bohrlochkontur herum herrschenden Sekundärspannungen dafür prädestinierten Konturbereichen lässt sich auf Basis der durchgeführten Videoobservationsarbeiten ca. zehn Jahre nach dem Abteufen daher auch immer noch eine insgesamt als relativ hoch zu bezeichnende Standfestigkeit des Bohrlochs GEM 90 im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 2,4$ m und $t_{BL} \approx 2,6$ m feststellen.

Insgesamt führen die im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 2,4$ m und $t_{BL} \approx 2,6$ m mit der Axial-Bohrlochkamera in dem je nach betrachtetem Observationszeitpunkt ca. fünf bis ca. zehn Jahre alten Bohrlochabschnitt erhaltenen Observationsergebnisse zu der Schlussfolgerung, dass die zeitabhängigen Entwicklungen der einzelnen Bruchbereiche in den unterschiedlichen Konturbereichen des Bohrlochs diskontinuierlich und zeitlich unabhängig voneinander ablaufen, wobei die zeitabhängig voranschreitenden Bruchprozesse sich mit zunehmender Standzeit des Bohrlochs stark zu verlangsamen scheinen. Während in den unteren Konturbereichen des Bohrloches im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 2,4$ m und $t_{BL} \approx 2,6$ m eine erkennbare Zunahme der Schädigung der Bohrlochwand insbesondere zwischen dem 03.11.2009 und dem 10.05.2010 erfolgt, wächst die erkennbare bruchhafte Schädigung der Bohrlochwand im rechten oberen Konturbereich des Bohrlochs GEM 90 ausschließlich zwi-



schen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 an. Im linken oberen Konturbereich deutet sich dagegen ein Fortschreiten eines Verbruchs der Bohrlochwand im gesamten Zeitraum zwischen dem 03.11.2009 und dem 08.10.2010 zwar an, jedoch tritt der eigentliche Verbruch der Bohrlochwand trotz deutlich sichtbarer Risse im Gestein der Bohrlochwand erst zwischen den Videobefahrungen am 23.11.2011 und am 23.05.2012 ein. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die Ausbildung und das Fortschreiten der einzelnen bruchhaft beanspruchten Bohrlochwandbereiche

- (1) diskontinuierlich verlaufen,
- (2) scheinbar unabhängig von den Ereignissen in den jeweils anderen im selben Teufenbereich bruchhaft beanspruchten Bohrlochwandbereichen ablaufen und
- (3) in dem je nach betrachtetem Observationszeitpunkt ca. fünf bis ca. zehn Jahre alten Bohrlochteufenbereich sehr langsam ablaufen, wobei die Geschwindigkeit der observierten Bruchprozesse mit zunehmender Standzeit des Bohrlochs abzunehmen scheint.

(c 4) *Teufenbereich 3: $t_{BL} \approx 5,5 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 5,7 \text{ m}$*

Für den im vorliegenden Abschnitt betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5 \text{ m}$ und $t_{BL} \approx 5,7 \text{ m}$ ist im Rahmen von *Lux et al. (2012)* für den Zeitraum vom 03.11.2009 bis zum 08.10.2010 eine noch langsamere Entwicklung bezüglich des bruchhaften Tragverhaltens der Bohrlochwand als im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 2,4 \text{ m}$ und $t_{BL} \approx 2,6 \text{ m}$ identifiziert worden. Bei der Betrachtung der in Bild 3.78(a) bis Bild 3.78(c) dargestellten Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera wird deutlich, dass im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5 \text{ m}$ und $t_{BL} \approx 5,7 \text{ m}$ der linke Bereich der Bohrlochkontur deutlich stärker geschädigt ist als der rechte Bereich der Bohrlochkontur. Wie schon im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,4 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 2,6 \text{ m}$ befinden sich alle erkennbaren Schädigungsstrukturen systematisch gegenüber dem in Richtung der Bohrlochlängsachse unter $\alpha \approx 5^\circ$ einfallenden Schichtungsgefüge angeordnet im linken oberen, linken unteren, rechten oberen und rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur.

Eine ähnliche systematische Anordnung der Schädigungsstrukturen gegenüber dem Schichtungsgefüge wie in den Teufenbereichen von $t_{BL} \approx 2,4 \text{ m}$ bis $t_{BL} \approx 2,6 \text{ m}$ und dem Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5 \text{ m}$ und $t_{BL} \approx 5,7 \text{ m}$ lässt sich im übrigen auch auf allen weiteren und

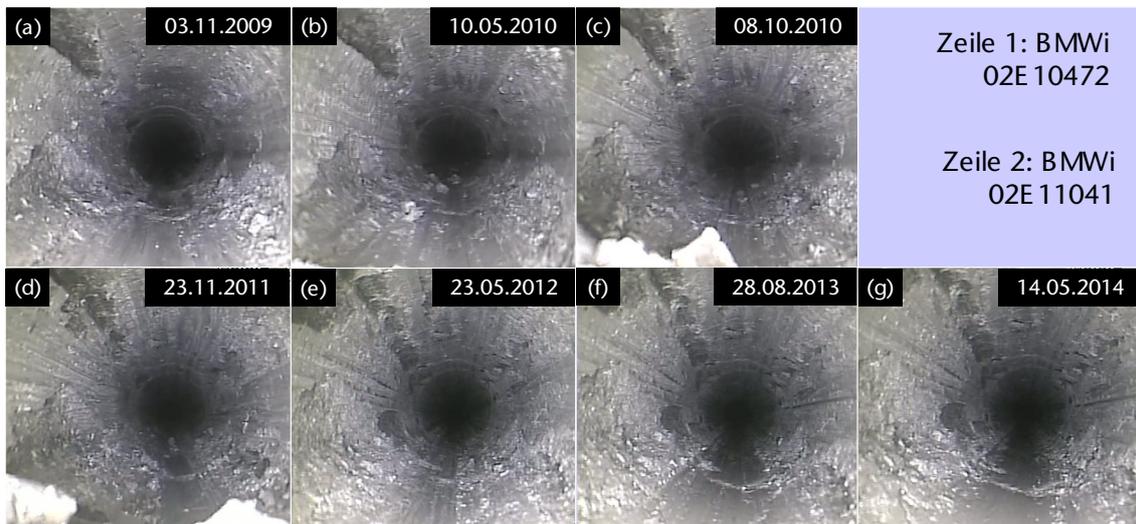


Bild 3.78: Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,5$ m bis $t_{BL} \approx 5,7$ m

hier nicht dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 6,0$ m beobachten. In dem in Bild 3.78 dargestellten Teufenbereich ist, wie die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zeigen, zu den sieben Observationszeitpunkten jeweils der linke Bohrlochkonturbereich der deutlich am stärksten geschädigte. Während den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera im rechten unteren Bereich der Bohrlochkontur und im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur nur vergleichsweise leichte Schädigungen der Bohrlochwand zu entnehmen sind, zeigen die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur und im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur eine deutlich stärker geschädigte Bohrlochwand mit großen Abplatzungen von Gestein aus der Bohrlochwand heraus. Dabei erscheint es zumindest bei der optischen Begutachtung der Aufnahmen in Bild 3.78 so, als sei die Gesteinsabplatzung im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur eher weniger tief und dafür in tangentialer Richtung weiter entlang der Bohrlochkontur ausgedehnt als die Gesteinsabplatzung im linken oberen Teil der Bohrlochkontur, die ihrerseits in ihrer tangentialen Ausdehnung eher schmal erscheint, dafür aber den Eindruck erweckt, als würde sie in radialer Richtung tiefer in das Gebirge hinein reichen. Eine zeitabhängige Entwicklung des Tragverhaltens der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m mit Blick auf eine Intensivierung der Bruchvorgänge ist, wie eingangs bereits erwähnt worden ist, im Observationszeitraum zwischen dem 03.11.2009 und dem 08.10.2010 mit den zugehörigen Aufnahmen in Bild 3.78(a) bis Bild 3.78(c) kaum zu verzeichnen. Während auf Basis des Vergleichs der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.78(a) und Bild 3.78(b) optisch keinerlei signifikante Verän-

derung der Beschaffenheit der Bohrlochwand festgestellt werden kann, zeigt ein Vergleich von Bild 3.78(b) mit Bild 3.78(c), dass es im Zeitraum zwischen den Observationszeitpunkten 10.05.2010 und 08.10.2010

- (1) zu einer weiteren Gesteinsabplatzung im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur kommt und
- (2) sich einige Risse im linksseitigen Bereich der Bohrlochkontur bilden, die wahrscheinlich den Beginn einer neuen Gesteinsablösung aus der Bohrlochwand heraus darstellen.

Diese weitere Gesteinsabplatzung mit Kennzeichnung durch einen roten Pfeil sowie die sich ausbildenden Risse in der Bohrlochwand mit Kennzeichnung durch gelbe Pfeile werden in Bild 3.79 grafisch hervorgehoben. Bild 3.79 stellt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.78(c) dar.



Bild 3.79: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.78(c) mit einer Kennzeichnung des voranschreitenden Schichtflächenversagens im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur (roter Pfeil) sowie mit der Kennzeichnung von sich im linken Bereich der Bohrlochkontur ausbildenden Rissstrukturen, die den Beginn der Entwicklung eines weiteren Bohrlochkonturversagens darstellen (gelbe Pfeile), Lux et al. (2012)

Innerhalb des Observationszeitraums zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 kommt es zu weiteren bruchhaften Veränderungen der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m, wie der Betrachtung der zugehörigen Aufnahmenserie in Bild 3.78(d) bis Bild 3.78(g) entnommen werden kann. Zur Veranschaulichung der wichtigsten Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit innerhalb des betrachteten Teufenbe-

reichs in den letzten drei Jahren des Observationszeitraums zeigt Bild 3.80 eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.78(g) inklusive einer grafischen Hervorhebung der drei signifikantesten, nach dem 08.10.2010 aufgetretenen Bohrlochwandbeschaffenheitsveränderungen.

Wie die Betrachtung von Bild 3.78(g) zeigt, ist es im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m anders als im vorangehend betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 2,4$ m und $t_{BL} \approx 2,6$ m nach dem 08.10.2010 nicht zu einer Verlangsamung, sondern offensichtlich eher zu einer Beschleunigung der Bruchprozesse im Gestein der Bohrlochwand gekommen. Im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur setzt sich das schichtungsbedingte Bohrlochwandversagen weiter in die tiefer im Bohrloch gelegenen Bereiche hinein fort.



Bild 3.80: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.78(g) mit einer Kennzeichnung von weiter in Richtung des Bohrlochtiefsten voranschreitendem Schichtflächenversagen im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur sowie von sich in die entgegengesetzte Richtung ausbreitendem Schichtflächenversagen im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur und der Kennzeichnung einer größeren Gesteinsherauslösung im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur

Das Versagen des Gebirges in den Schichtflächen im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur ist im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m über den gesamten in Bild 3.78 dokumentierten Observationszeitraum hinweg wesentlich schwächer ausgeprägt als im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur.

Jedoch ist bei der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.78(d) bis Bild 3.78(g) zu erkennen, wie insbesondere ab dem 23.11.2011 auch die schichtflächenbedingte Schädigung der Bohrlochwand im rechten oberen Bereich der Bohrlochkon-

tur im betrachteten Teufenbereich deutlich zunimmt. Neben den beiden schichtflächenbedingten Schädigungen der Bohrlochwand im oberen Bereich der Bohrlochkontur ist als dritte signifikante bruchhafte Veränderung der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m die Herauslösung von Gesteinsmaterial aus der Bohrlochwand im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur zu benennen. Der von der Gesteinsherauslösung betroffene Bohrlochkonturbereich wird in Bild 3.80 neben den beiden Konturbereichen mit Versagen des Gebirges in den Schichtflächen ebenfalls grafisch hervorgehoben. Wie der vergleichenden Betrachtung von Bild 3.78(d) und Bild 3.78(e) zu entnehmen ist, ereignet sich die bruchhafte Herauslösung von Gestein aus der Bohrlochwand offensichtlich zwischen dem 23.11.2011 und dem 23.05.2012. Bemerkenswerterweise kommt es neben den beschriebenen Bruchvorgängen im hier betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,5$ m und $t_{BL} \approx 5,7$ m innerhalb des Observationszeitraums nicht zu der in *Lux et al. (2012)* auf Basis der Analyse der Observationsergebnisse bis zum 08.10.2010 angenommenen Herauslösung von Gestein aus der Bohrlochwand entlang des in Bild 3.79 grafisch gekennzeichneten Risses.

Auf Basis der innerhalb des in etwa sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums abgelaufenen zeitabhängigen Entwicklung des Tragverhaltens des Gesteins in der Bohrlochwand des Bohrlochs GEM 90 kann jedoch trotz eines insbesondere im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 6,0$ m langsam weiter voranschreitenden Verbrauchs der Bohrlochwand davon ausgegangen werden, dass das Bohrloch GEM 90 sich noch über mehrere Jahre bis Jahrzehnte hinweg als insgesamt standfest erweisen wird, wenn nicht ein unerwartetes Ereignis wie z.B. die rissbedingte Verbindung des Bohrlochkonturbereiches mit stark wasserführenden Gesteinsbereichen und ein daraus resultierender stärkerer Wasserzutritt und dadurch bedingte Gesteinsentfestigungen zu einer Beschleunigung der ablaufenden Verbrauchsprozesse führt.

(c 5) *Teufenbereich 4: $t_{BL} \approx 7,0$ m bis $t_{BL} \approx 7,2$ m*

Die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.81 stehen stellvertretend für die mit der Axial-Bohrlochkamera im hinteren und jüngeren Teil des Bohrlochs GEM 90 generierten Observationsergebnisse und schließen die Vorstellung und Diskussion der mit der Axial-Bohrlochkamera im Bohrloch GEM 90 generierten Observationsergebnisse ab. Die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera sind im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 7,0$ m und $t_{BL} \approx 7,2$ m entstanden. Der Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 7,0$ m und $t_{BL} \approx 7,2$ m liegt in dem am

12.09.2007 abgeteuften Abschnitt des Bohrlochs GEM 90, der sich insgesamt von einer Teufe von $t_{BL} \approx 6,0$ m bis zum Bohrlochtieftsten in einer Teufe von $t_{BL} \approx 10,0$ m erstreckt.

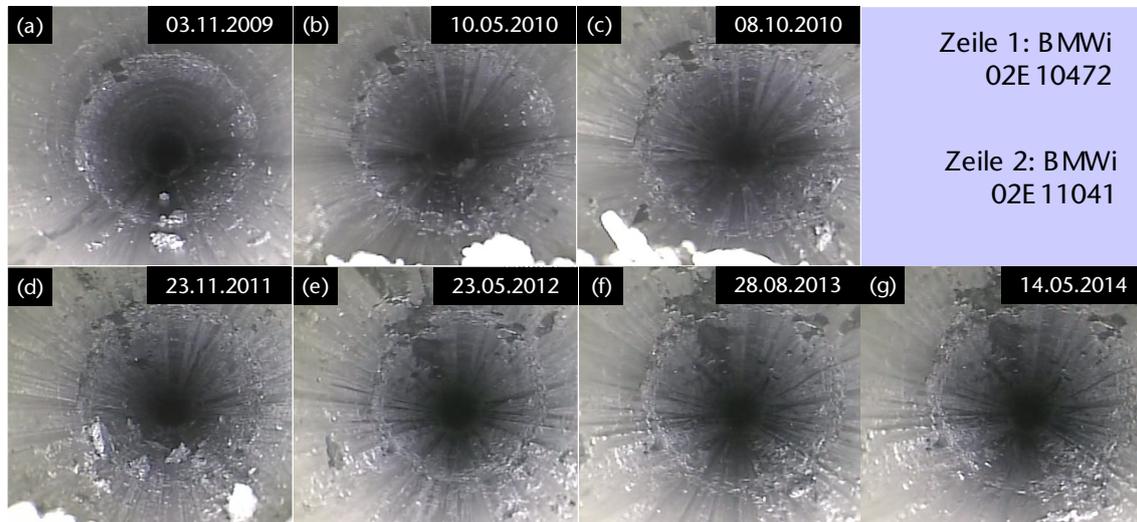


Bild 3.81: Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,0$ m bis $t_{BL} \approx 7,2$ m

Zu den Observationszeitpunkten zwischen dem 03.11.2009 und dem 14.05.2014, an denen die in Bild 3.81 dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera entstanden sind, ist der betrachtete Teufenbereich somit zwischen etwas mehr als zwei Jahren und in etwa sechseinhalb Jahren alt. Auf allen sieben Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera, die in Bild 3.81 abgebildet sind, ist eine ringförmige Struktur mit einer aufgeraut erscheinenden Beschaffenheit des Gesteins der Bohrlochwand zu erkennen. Ob die bei der optischen Begutachtung der Aufnahmen in Bild 3.81 feststellbare Veränderung der Beschaffenheit des Gesteins der Bohrlochwand eher auf Aufweichungseffekte oder auf ringförmig erfolgte kleine Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus oder auf eine Kombination aus beiden in Erwägung gezogenen Möglichkeiten zurückzuführen ist, ist im Rahmen der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten nicht aufzuklären gewesen. Bild 3.82 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.81(c), also von der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera von der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 7,0$ m und $t_{BL} \approx 7,2$ m, die am 08.10.2010 entstanden ist.

Neben der bereits beschriebenen ringförmig ausgebildeten Bruchstruktur, die in Bild 3.82 durch gelbe Pfeile grafisch hervorgehoben wird, werden vier weitere strukturelle Auffälligkeiten in Bild 3.82 gekennzeichnet. Zunächst werden drei in ihren räumlichen Ausmaßen recht kleine Gesteinsabplatzungen, von denen zwei nah beieinander im linken oberen Bereich der

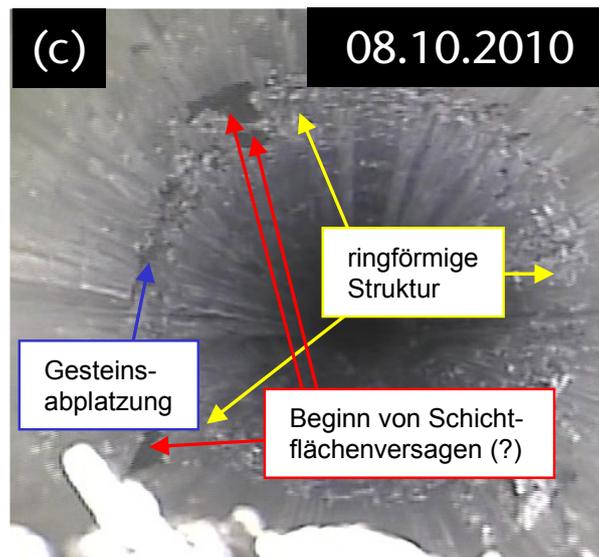


Bild 3.82: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.81(c) mit einer Kennzeichnung von Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus im linken oberen und im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur (rote Pfeile) sowie mit der Kennzeichnung einer ringförmig um die Bohrlochkontur herumreichenden Struktur (gelbe Pfeile) und einer Gesteinsabplatzung aus der Bohrlochwand heraus im linken Stoßbereich, Lux et al. (2012)

Bohrlochkontur liegen und von denen sich eine im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur befindet, durch rote Pfeile grafisch hervorgehoben.

Im Rahmen von Lux et al. (2012) ist aufgrund der Anordnung der drei Bruchstrukturen entlang der Bohrlochkontur die Vermutung geäußert worden, es handele sich bei dem zu beobachtenden lokal stark begrenzten Versagen des Gesteins entlang der Bohrlochwand um den Beginn von schichtflächenbedingtem Bohrlochwandversagen. Die Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.81(d) bis Bild 3.81(g) zeigt die weitere zeitabhängige Entwicklung im betrachteten Teufenbereich in den Jahren 2011 bis 2014. Die signifikantesten Veränderungen bezüglich der Bohrlochwandbeschaffenheit, die zwischen dem 08.10.2010 und dem 14.05.2014 eingetreten sind, werden in Bild 3.83, das eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.81(g) beinhaltet, grafisch hervorgehoben.

Ein Vergleich der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.81(a), Bild 3.81(b) und Bild 3.81(c) zeigt, dass sich die beiden bruchhaften Strukturen im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur im Observationszeitraum zwischen dem 03.11.2009 und dem 08.10.2010 nur minimal vergrößern und dass die bruchhafte Struktur im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur sich zwischen dem zweiten und dem dritten Observationstermin ausbildet. Es ist



Bild 3.83: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.81(g) mit einer Kennzeichnung von stark ausgeprägtem schichtflächenbedingtem Bohrlochwandversagen im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur sowie mit der Kennzeichnung von zwischen dem 08.10.2010 und dem 14.05.2014 nur geringfügig angewachsenem schichtflächenbedingtem Bohrlochwandversagen im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur und erst zum 23.05.2012 observierbarem Versagen des Gesteins in den Schichtflächen im rechten oberen Konturbereich

aufgrund der Orientierung der auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.82 und Bild 3.83 zu betrachtenden Gesteinsabplatzungen anzunehmen, dass es sich bei den zu betrachtenden Gesteinsabplatzungen um die Ausbildung eines weiteren, in Richtung der Bohrlochlängsachse verlaufenden Versagens des Gesteins in den Schichtflächen handelt – wie es in weiten Teilen des Teufenbereiches zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 6,0$ m detektiert worden ist.

Die vergleichende Betrachtung von Bild 3.81(c) und Bild 3.81(g) verdeutlicht, dass die zeitabhängige Entwicklung des Tragverhaltens der Bohrlochwand in den unterschiedlichen Konturbereichen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 7,0$ m bis $t_{BL} \approx 7,2$ m innerhalb des Zeitraums zwischen dem 08.10.2010 und dem 14.05.2014 sehr unterschiedlich verläuft. Während sich im linken unteren Bohrlochkonturbereich nur sehr geringfügige, anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu identifizierende bruchhafte Veränderungen der Bohrlochwand ergeben, schreitet das schichtflächenbedingte Bohrlochwandversagen im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur stark voran. Wie der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.81(c) bis Bild 3.81(g) entnommen werden kann, breiten sich die Bruchstrukturen zwischen den einzelnen Observationsterminen sowohl

in tangentialer Richtung entlang der Bohrlochkontur sowie auch in Richtung der Bohrlochlängsachse weiter in Richtung des Bohrlochtiefsten aus. Zusätzlich zu den bereits in *Lux et al. (2012)* beschriebenen Schädigungsstrukturen im linken Bereich der Bohrlochkontur entstehen zwischen den Observationszeitpunkten am 23.11.2011 und am 23.05.2012 auch im rechten oberen Bereich der Bohrlochkontur deutlich erkennbare Schädigungen der Bohrlochwand, wie der vergleichenden Betrachtung von Bild 3.81(d) und Bild 3.81(e) zu entnehmen ist.

Im Rahmen von *Lux et al. (2012)* ist die Frage formuliert worden, ob die bruchbehafteten Strukturen sich auch im jüngeren Bereich des Bohrlochs GEM 90 so ausbreiten, wie es im vorderen und in etwa drei Jahre älteren Teufenbereich des Bohrlochs GEM 90 observiert worden ist. Aufgrund der sehr geringen Geschwindigkeit, mit der die Bruchprozesse innerhalb des Bohrlochs GEM 90 ablaufen, ist die in *Lux et al. (2012)* formulierte Frage für den betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 7,0$ m und $t_{BL} \approx 7,2$ m auch nach der Verlängerung des Observationszeitraums um weitere dreieinhalb Jahre bis in das Jahr 2014 hinein noch nicht abschließend zu klären. Es scheint jedoch aufgrund der auf den Aufnahmen in Bild 3.81 zu betrachtenden zeitabhängigen Entwicklung des Tragverhaltens mit der zu erkennenden starken Schädigungszunahme im linken oberen Bereich der Bohrlochkontur, der leichten Zunahme von Bohrlochwandschädigungen im linken unteren Bereich der Bohrlochkontur und darüber hinaus dem erstmaligen Auftreten von allem Anschein nach schichtflächenbedingtem Bohrlochwandversagen im rechten oberen Bohrlochkonturbereich zumindest sehr wahrscheinlich zu sein, dass sich im hinteren und jüngeren Abschnitt des Bohrlochs GEM 90 im Laufe der nächsten Jahre oder gegebenenfalls auch Jahrzehnte ebenfalls ein Bruchstrukturenmuster im Gestein der Bohrlochwand mit in tangentialer Richtung lokal begrenzten, in Richtung der Bohrlochlängsachse propagierend verlaufenden und systematisch gegenüber dem Schichtungsgefüge ausgerichteten Bruchstrukturen einstellen wird, wie es im vorderen und älteren Abschnitt des Bohrlochs GEM 90 im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,6$ m und $t_{BL} \approx 6,0$ m vorliegt.

Die ebenfalls im Rahmen von *Lux et al. (2012)* geäußerte Vermutung, dass sowohl der ältere Abschnitt des Bohrlochs GEM 90 zwischen Bohrlochmund und $t_{BL} \approx 6,0$ m wie insbesondere auch der jüngere Abschnitt des Bohrlochs GEM 90 von $t_{BL} \approx 6,0$ m bis zum Bohrlochtiefsten sehr wahrscheinlich noch für viele Jahre standfest sein wird, scheint durch die Resultate der fortgesetzten Videoobservationsarbeiten in den Jahren 2011 bis 2014 bestätigt zu werden.

(d) *Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen im Bohrloch GEM 180*

Bild 3.84 enthält eine Zusammenstellung aller im Bohrloch GEM 180 aufgezeichneten Messwertgraphen.

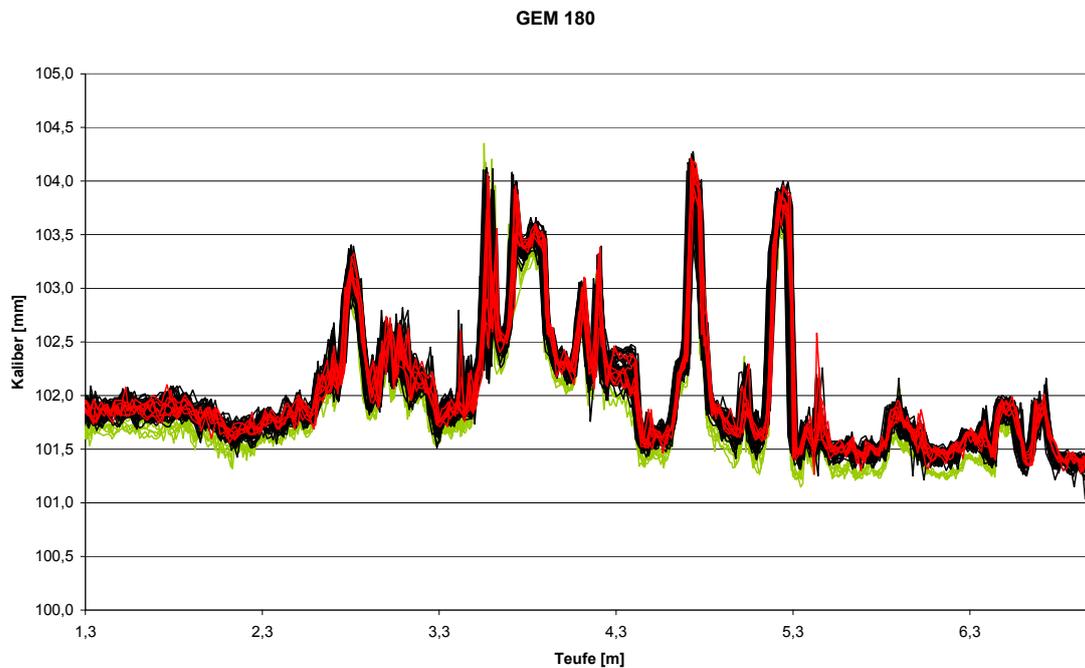


Bild 3.84: Zusammenstellung der Messergebnisse aller im Bohrloch GEM 180 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 26.09.2007 und dem 14.05.2014 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der ersten Befahrung vom 26.09.2007 sind in Grün dargestellt, während die Messergebnisse der letzten Befahrung vom 14.05.2014 rot dargestellt werden.

Insgesamt sind innerhalb des Bohrlochs GEM 180 an acht Observationsterminen Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführt worden. Die Ergebnisse der vier ersten Befahrungstermine vom 26.09.2007, vom 03.11.2009, vom 10.05.2010 und vom 08.10.2010 sind bereits in *Lux et al. (2012)* vorgestellt und ausführlich diskutiert worden. Im Rahmen dieses Vorhabens sind am 23.11.2011, am 23.05.2012, am 28.08.2013 und am 14.05.2014 weitere Kalibermessungen mit der Dreiarmkalibersonde innerhalb des Bohrlochs GEM 180 vorgenommen worden. Das am 21.09.2004 abgeteufte Bohrloch GEM 180 ist somit zum Zeitpunkt des ersten Befahrungstermins am 26.09.2007 beinahe exakt drei Jahre alt gewesen und ist zum Zeitpunkt der letzten im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen am 14.05.2014 in etwa neuneinhalb Jahre alt gewesen.

Bild 3.84 ist zu entnehmen, dass alle von der Dreiarmkalibersonde im Bohrloch GEM 180 aufgezeichneten Kaliberwerte im Bereich zwischen $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 105 \text{ mm}$ liegen. Die Skalierung der y-Achse, über die die gemessenen Kaliberwerte aufgetragen werden, mit einem darstellbaren Messwertebereich zwischen $100 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 105 \text{ mm}$ ist für alle in Abschnitt 3.2 vorgestellten Observationsbohrlöcher der Lokation Tournemire unabhängig von der tatsächlichen Bandbreite der gemessenen Kaliberwerte gewählt worden, um so dem Betrachter einen besseren Eindruck von den Unterschieden zwischen den Verläufen der in den unterschiedlichen Observationsbohrlöchern generierten Messwertgraphen zu verschaffen.

Die Messwerte weisen im Teufenbereich vom Bohrlochmund bis in eine Teufe von $t_{\text{BL}} \approx 2,6 \text{ m}$ einheitlich einen sehr ruhigen Verlauf auf. Es kommt im vorderen Teufenbereich des Bohrloch GEM 180 zu keinen signifikanten Ausschlägen der Messwertgraphen und auch nicht zu größeren Abweichungen der Messwertgraphen untereinander. Vielmehr befinden sich alle im Teufenbereich zwischen dem Bohrlochmund und der Teufe von $t_{\text{BL}} \approx 2,6 \text{ m}$ im Bohrloch GEM 180 gemessenen Kaliberwerte in einem Zahlenwertebereich zwischen $101,4 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 102,1 \text{ mm}$. Auf den vorderen Teufenbereich des Bohrlochs GEM 180 folgt zwischen $t_{\text{BL}} \approx 2,6$ und $t_{\text{BL}} \approx 5,3$ ein Teufenbereich, in dem die mittels der Dreiarmkalibersonde gemessenen Kaliberwerte eine deutlich größere Bandbreite aufweisen als auf den ersten Teufenmetern zwischen dem Bohrlochmund und $t_{\text{BL}} \approx 2,6 \text{ m}$. Im Teufenbereich zwischen $t_{\text{BL}} \approx 2,6 \text{ m}$ und $t_{\text{BL}} \approx 5,3 \text{ m}$ weisen die ermittelten Messwertgraphen, wie der Betrachtung von Bild 3.84 entnommen werden kann, lokal recht große Schwankungen auf, so dass an mehreren Stellen des Teufenbereichs lokale Maxima mit gemessenen Kaliberwerten von $d_{\text{BL}} \approx 104 \text{ mm}$ erreicht werden.

Insgesamt ergeben sich für den 2,7 m langen Teufenbereich zwischen $t_{\text{BL}} \approx 2,6 \text{ m}$ und $t_{\text{BL}} \approx 5,3 \text{ m}$ Kaliberwerte im Zahlenwertebereich von $101,2 < d_{\text{BL}} < 104,3$. Unterhalb des Teufenbereiches zwischen $t_{\text{BL}} \approx 2,6 \text{ m}$ und $t_{\text{BL}} \approx 5,3 \text{ m}$ folgt ein Teufenbereich zwischen $t_{\text{BL}} \approx 5,3$ und dem Bohrlochtiefsten mit einem wiederum deutlich ruhigeren Verlauf der Messwertgraphen.

Die innerhalb des Bohrlochs GEM 180 aufgezeichneten Messwertgraphen zeigen unabhängig von dem betrachteten Befahrungstermin und von der bei den einzelnen Befahrungen gewählten Ausgangsorientierungen der Dreiarmkalibersonde beinahe identische Verläufe. Die großen Übereinstimmungen zwischen den Messwertgraphen der zu unterschiedlichen Zeitpunk-

ten und unter unterschiedlichen Ausgangsorientierungen der Dreiarmkalibersonde ermittelten Messwertgraphen lassen zwei Schlussfolgerungen zu:

- (1) Die im Bohrloch GEM 180 gemessenen Kaliberwerte sind unabhängig von der Positionierung / Ausrichtung der Messarme der Dreiarmkalibersonde innerhalb des Bohrlochs während der Messung, was auf eher ringförmig um die gesamte Bohrlochkontur herumreichende Bohrlochkonturaufweitungen im Bereich ermittelter lokaler Messwertgraph-maxima schließen lässt.
- (2) Eine mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde detektierbare zeitabhängige Entwicklung des Trag- und Deformationsverhaltens der Bohrlochwand hat in dem mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum innerhalb des Bohrlochs GEM 180 nicht stattgefunden.

Zur Überprüfung der zweiten Schlussfolgerung ist die Bild 3.84 zu entnehmende farbliche Zuordnung der Messwertgraphen der Dreiarmkalibersonde aus dem Bohrloch GEM 180 zu den unterschiedlichen Observationsterminen gewählt worden. Grün dargestellt sind in Bild 3.84 alle Messergebnisse, die während der ersten Befahrungen am 26.09.2007 aufgezeichnet worden sind. Rot und im Vordergrund dargestellt sind die Messergebnisse, die bei den Befahrungen zum letzten Observationstermin am 14.05.2014 generiert worden sind. Die in Schwarz dargestellten Messwertgraphen repräsentieren die Ergebnisse aller zu den sechs weiteren Observationsterminen durchgeführten Befahrungen des Bohrlochs GEM 180 mit der Dreiarmkalibersonde.

Der Vergleich der in Grün dargestellten Messergebnisse vom 26.09.2007 mit den weiteren Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde zeigt, dass die Messergebnisse vom 26.09.2007 leicht unterhalb der Ergebnisse aller weiteren Messungen liegen. Wie im Rahmen von *Lux et al. (2012)* ausführlich erläutert wird, ist die Dreiarmkalibersonde zwischen den Observationsterminen am 26.09.2007 und am 03.11.2009 umgebaut worden. Dieser Umbau resultiert in einer minimalen Veränderung der Messpräzision (im Sinne einer Optimierung, *Lux et al., 2012*), woraus sich eine Bild 3.84 entnehmbare scheinbare Divergenz innerhalb des Bohrlochs GEM 180 zwischen dem 26.09.2007 und dem 03.11.2009 ergeben hat. Eine derartige Divergenz ist geomechanisch nicht zu erklären. Die jeweiligen Divergenzen zwischen den Messwerten vom 26.09.2007 und den weiteren innerhalb des Bohrlochs GEM 180 aufgezeichneten Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde sind somit ausschließlich auf die Umrüstung der Dreiarmkalibersonde zurückzuführen. Ohne die durch die Umrüstung der Drei-



armkalibersonde herbeigeführten Differenzen zwischen den Ergebnissen der Messungen vom 26.09.2007 und den Ergebnissen der weiteren im Bohrloch GEM 180 mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführten Messungen würde die Bandbreite der Messergebnisse für alle Teufenbereiche des Bohrloch GEM 180 noch deutlich geringer ausfallen. Eine anhand der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde detektierbare zeitabhängige Entwicklung des Trag- und Deformationsverhaltens der Bohrlochwand hat somit innerhalb des Bohrlochs GEM 180 in den gut sechseinhalb Jahren, in denen Messungen mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführt worden sind, nicht stattgefunden. Durch dieses Messergebnis wird auch die Zuverlässigkeit des Messequipments und damit der Messwerte über einen Zeitraum von mehreren Jahren bestätigt. Diese Bestätigung ist von zentraler Bedeutung für die Qualität der geomechanischen Schlussfolgerungen, die aus den Messwerten abgeleitet werden.

(e) *Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen im Bohrloch GEM 270*

In Bild 3.85 sind sämtliche Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde, die im Rahmen dieses Vorhabens im ebenfalls nahezu schichtungsorthogonal ausgerichteten Bohrloch GEM 270 generiert worden sind, in dem gleichen Maßstab dargestellt, der auch für die Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus dem Bohrloch GEM 180 gewählt worden ist. Neben der Verwendung desselben Maßstabs ist auch die gleiche farbliche Zuordnung der aufgezeichneten Messwertgraphen zu den Observationsterminen gewählt worden, wie sie zur Darstellung der Messergebnisse aus dem Bohrloch GEM 180 verwendet worden ist. So sind in Bild 3.85 alle Messergebnisse, die während der ersten Befahrungen am 26.09.2007 generiert worden sind, in Grün dargestellt. In Rot dargestellt sind die Messergebnisse, die bei den Befahrungen zum letzten Observationstermin am 14.05.2014 aufgezeichnet worden sind und allen weiteren Messwertgraphen ist die Farbe Schwarz zugewiesen worden.

Die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus dem Bohrloch GEM 270 spiegeln die Ereignislosigkeit in der Entwicklung des zum Zeitpunkt der Erstbefahrung am 26.09.2007 15 Tage alten Bohrlochs GEM 270 innerhalb des mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraumes wider. Wie auch in dem Bohrloch GEM 180 sind die Befahrungen des Bohrlochs GEM 270 am 26.09.2007, am 03.11.2009, am 10.05.2010, 08.10.2010, 23.11.2011, 23.05.2012, 28.08.2013 und am 14.05.2014 durchgeführt worden.

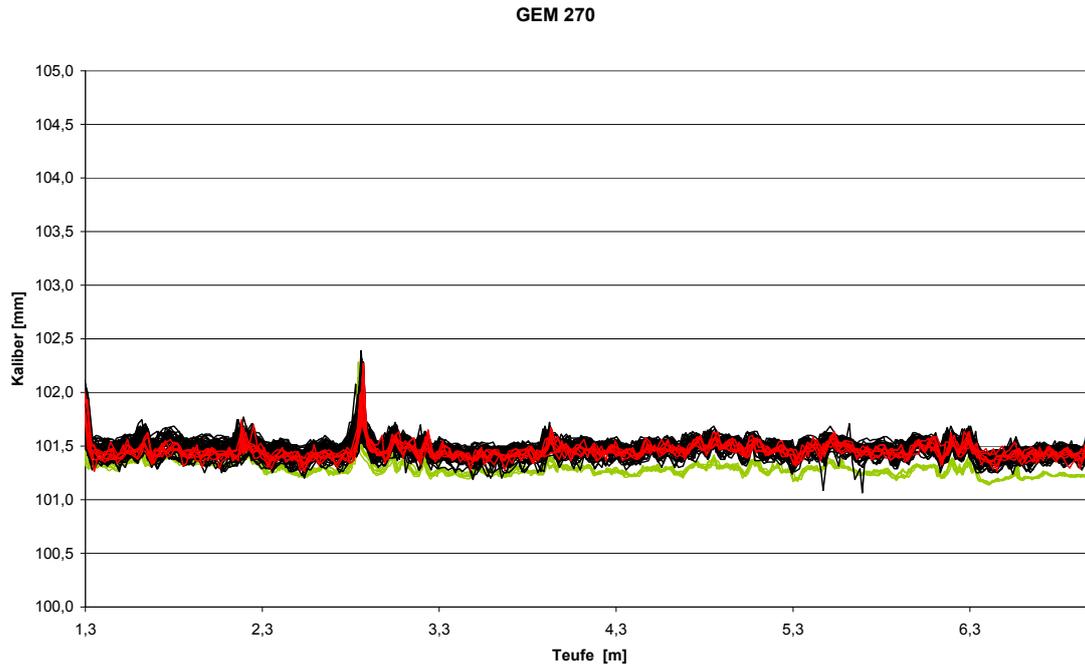


Bild 3.85: Zusammenstellung der Messergebnisse aller im Bohrloch GEM 270 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 26.09.2007 und dem 14.05.2014 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der ersten Befahrung vom 26.09.2007 sind in Grün dargestellt, während die Messergebnisse der letzten Befahrung vom 14.05.2014 rot dargestellt werden.

Alle an den acht genannten Befahrungsterminen ermittelten Messwertgraphen verlaufen innerhalb eines zwischen $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 102 \text{ mm}$ gelegenen schmalen Messwertbandes. Lediglich im Teufenbereich zwischen $t_{\text{BL}} \approx 2,8 \text{ m}$ und $t_{\text{BL}} \approx 3,0 \text{ m}$ weisen die Messwertgraphen einheitlich einen mit einem Maximalwert von $d_{\text{BL}} \approx 102,4 \text{ mm}$ nur sehr gering von den in den weiteren Bereichen des Bohrlochs GEM 270 gemessenen Kaliberwerten abweichenden Peak auf.

Die in Bild 3.85 gewählte Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde mit der farblichen Hervorhebung der Messwertgraphen vom 26.09.2007 (grün) und vom 14.05.2014 (rot) zeigt, dass die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde vom 26.09.2007 geschlossen minimal um ca. $\Delta d_{\text{BL}} \approx 0,3 \text{ mm}$ unterhalb der Messergebnisse der weiteren im Bohrloch GEM 270 durchgeführten Messungen liegen.

Die festzustellende Differenz zwischen den Messergebnissen vom 26.09.2007 und den weiteren im Bohrloch GEM 270 durchgeführten Messungen ist auf die bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* ausführlich beschriebene sowie im Rahmen der Vorstellung der Messergebnisse aus dem Bohrloch GEM 180 vorstehend bereits zitierte Umrüstung der Dreiarmkalibersonde



zwischen dem ersten und dem zweiten Observationstermin zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass ohne die Umrüstung der Dreiarmkalibersonde und die dadurch bedingten messtechnischen Effekte die Bandbreite der in den einzelnen Teufenbereichen des Bohrlochs GEM 270 gemessenen Kaliberwerte noch geringer wäre als sie es ohnehin schon ist. Bezüglich des Deformationsverhaltens der Bohrlochkontur innerhalb des annähernd schichtungsorthogonal verlaufenden Bohrlochs GEM 270 kann somit auf Basis der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde von einer bemerkenswerten, nahezu vollständigen Ereignislosigkeit innerhalb des insgesamt immerhin mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums ausgegangen werden (Konturstabilität).

3.2.4 GSM-Bohrlöcher in der Gallery 08

(a) *Untersuchungsprogramm und Umfang der in den GSM-Bohrlöchern durchgeführten Observationsarbeiten*

In den fünf im Rahmen dieses und des vorherigen Vorhabens innerhalb der Gallery 08 des URL Tournemire in den Jahren 2009 bis 2014 observierten Bohrlöchern GSM 45, GSM 90, GSM 135, GSM 225 und GSM 315 sind je nach Bohrloch an bis zu sieben Observationsterminen Befahrungen mit der Axial-Bohrlochkamera und der Dreiarmkalibersonde durchgeführt worden. Wie Tabelle 3.4, die einen Überblick über das in den GSM-Observationsbohrlöchern vom LfD&G durchgeführte Observationsprogramm in kompakter Form enthält, entnommen werden kann, konnten in den drei Observationsbohrlöchern GSM 45, GSM 225 und GSM 315 an allen sieben Observationsterminen innerhalb des beinahe genau viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums Befahrungen sowohl mit der Axial-Bohrlochkamera wie auch mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführt werden. Die Observationsarbeiten innerhalb des Bohrlochs GSM 135 mussten bereits nach dem fünften Observationstermin am 23.05.2012 eingestellt werden, da das im Verlauf des Observationszeitraums von einem Wasserzutritt betroffene Observationsbohrloch vom IRSN, der Betreiberorganisation des URL Tournemire, zwecks der Untersuchung des zugesickerten Gebirgswassers mit einem fest installierten Packersystem versehen wurde.

Bereits zum dritten Observationszeitpunkt am 08.10.2010 machte eine bereits in *Lux et al. (2012)* beschriebene starke Verschlechterung des Zustands der Bohrlochwand mit zum Teil signifikanten Gesteinsherauslösungen aus der Bohrlochwand eine weitere Befahrung mit der



Observationstermin	GSM 45	GSM 90	GSM 135	GSM 225	GSM 315
06.11.2009	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K
10.05.2010	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K
08.10.2010	V/K	V/X	V/K	V/K	V/K
23.11.2011	V/K	V/X	V/K	V/K	V/K
23.05.2012	V/K	V/X	V/K	V/K	V/K
28.08.2013	V/K	V/X	-/-	V/K	V/K
14.05.2014	V/K	V/X	-/-	V/K	V/K

Tabelle 3.4: Überblick über die Observationstermine und das zu den einzelnen Terminen durchgeführte Observationsprogramm (-/- = keine Observation, da das Bohrloch aufgrund anderer wissenschaftlicher Untersuchungen nicht mehr zur Verfügung stand; V = Videoobservation; K = Kalibermessung; X = Kalibermessung aufgrund des Bohrlochzustands nicht mehr möglich)

im Vergleich zur robusten Axial-Bohrlochkamera sehr sensiblen Dreiarmkalibersonde unmöglich.

Stattgefunden haben die Befahrungen in den zwischen dem 03.11.2009 und dem 05.11.2009 abgeteuften GSM-Bohrlöchern zu den Observationszeitpunkten am 06.11.2009, am 10.05.2010 und am 08.10.2010 entsprechend *Lux et al. (2012)* sowie im Rahmen dieses Vorhabens am 23.11.2011, am 23.05.2012, am 28.08.2013 sowie abschließend am 14.05.2014.

Bei der Auswertung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde sowie bei der Betrachtung der zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgenommenen Videos der Axial-Bohrlochkamera hat sich bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* herausgestellt, dass Unterschiede zwischen den fünf observierten GSM-Bohrlöchern insbesondere im Hinblick auf das zeitabhängige hydraulische Verhalten und das hydraulisch-mechanisch gekoppelte Verhalten existieren und dass die Unterschiede bezüglich des hydraulischen und mechanisch-hydraulisch gekoppelten Verhaltens zwischen den Bohrlöchern in einem systematischen Zusammenhang stehen mit der Orientierung der Bohrlöcher entlang der Kontur der Gallery 08. Die Diskussion der nachfolgend vorgestellten Observationsergebnisse erfolgt daher auch schwerpunktmäßig mit Blick auf das hydraulische und das hydraulisch-mechanisch gekoppelte Verhalten der untersuchten Bohrlöcher. Im Vorfeld der Vorstellung und Diskussion der im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb der GSM-Bohrlöcher generierten Observationsergebnisse

werden im nachfolgenden Abschnitt die im Rahmen von *Lux et al. (2012)* identifizierten systematischen Zusammenhänge zwischen der Anordnung der Bohrlöcher entlang der Kontur der Gallery 08 und ihrem hydraulischen und mechanisch-hydraulisch gekoppelten Verhalten nochmals in kompakter Form dargestellt.

(b) *Bisherige Befunde zum hydraulischen und zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten der GSM-Bohrlöcher auf Basis der Observationsergebnisse bis zum 08.10.2010*

Im vorliegenden Abschnitt werden die wichtigsten Erkenntnisse zum hydraulischen und zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten der GSM-Bohrlöcher in der Gallery 08 aus *Lux et al. (2012)* nochmals stichpunktartig zusammengefasst. Die zentralen Erkenntnisse aus den Observationsarbeiten bis zum 08.10.2010 lauten wie folgt:

- (1) Die hydraulische Situation in den westlich der Hauptstörungszone des URL Tournemire in der Gallery 08 gelegenen GSM-Bohrlöchern gestaltet sich mit observierbaren Wasserzutritten in allen fünf Bohrlöchern grundlegend anders als in den östlich der Hauptstörungszone gelegenen, überwiegend trockenen GEM-Bohrlöchern.
- (2) Die stärksten Wasserzutritte sind in den Bohrlöchern GSM 90 und GSM 135 observiert worden. Aber auch in den drei weiteren GSM-Bohrlöchern sind Feuchtigkeitszunahmen im Gestein der Bohrlochwand mittels der Axial-Bohrlochkamera detektiert worden, die deutlich stärker sind als die Feuchtigkeitszunahme im Bohrloch GEM 90, dem einzigen Observationsbohrloch mit einem anhand der Videoobservationsarbeiten identifizierbaren Feuchtigkeitsanstieg im Gestein der Bohrlochwand in der Gallery 96.
- (3) Neben dem starken Anstieg der Feuchtigkeit im Gestein der Bohrlochwand ist in allen fünf GSM-Bohrlöchern darüber hinaus ein Zutritt von Sickerwasser festzustellen gewesen. Während das den Bohrlöchern zutretende Wasser sich im horizontalen Bohrloch GSM 90 zwischen dem plastifizierten Gesteinshaufwerk im Bereich eines Bohrlochwandverbruchs und dem Bohrlochtiefsten aufstaut, sammelt sich das Sickerwasser in den abwärts orientierten Bohrlöchern GSM 135 und GSM 225 im Bereich des Bohrlochtiefsten. Die Tatsache, dass auch den zwei schräg nach oben orientierten Bohrlöchern GSM 45 und GSM 315 Grundwasser zutritt, lässt sich anhand von sich in den Bohrlochsohlen ausbildenden kleinen Rinnsalen feststellen.



- (4) Aus den ungünstigeren geohydraulischen Rahmenbedingungen (höherer Feuchtgehalt im Gestein der Bohrlochwand, Zutritt von Sickerwasser) scheint die Tatsache zu resultieren, dass in den GSM-Bohrlöchern bereits nach einem Observationszeitraum von $t < 1$ a Bohrlochkonvergenzen mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde eindeutig nachgewiesen werden konnten, während in den GEM-Bohrlöchern in einem Observationszeitraum von $t \approx 3$ a keinerlei zeitabhängige Deformationen mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde nachgewiesen werden konnten.
- (5) Aus rein geomechanischer Sicht müssten sich stärkere Bohrlochwandkonvergenzen direkt nach dem Abteufen der Bohrlöcher ergeben, die sich dann nach und nach mit dem Voranschreiten der Spannungsumlagerungen im mechanischen Bohrlochnahfeld verlangsamten. Die Tatsache, dass in den GSM-Bohrlöchern deutlich identifizierbare Bohrlochkonvergenzen erst im zweiten Observationshalbjahr auftreten, liefert einen wichtigen Hinweis darauf, dass die in den GSM-Bohrlöchern gemessenen Konvergenzen durch hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse hervorgerufen werden.
- (6) Vermutet werden könnte als Ursache ein Porenwasserdruckabbau in der Bohrlochumgebung (Anstieg der effektiven Belastung in der Gesteinsmatrix) oder aber auch eine Zunahme des Wassergehaltes im Gestein in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs mit der Folge einer Zunahme der Deformationsfähigkeit des Gesteins (softening → Abnahme der Gesteinssteifigkeit).
- (7) Ein als realistisch anzusehender Erklärungsansatz für das in den GSM-Bohrlöchern zu beobachtende zeitabhängige Deformationsverhalten besteht jedoch auch darin, dass bohrtechnisch bedingte Austrocknungseffekte (Entsättigung durch Luftspülung) zunächst zu einer Verfestigung des Gesteins in der unmittelbaren Umgebung der Bohrlöcher geführt haben, woraus wiederum die Ausbildung eines verfestigten und versteiften Gebirgstragringes resultiert hat, weshalb sich im ersten halben Jahr des Observationszeitraumes keine Konvergenz der Bohrlochwände in den GSM-Bohrlöchern ereignet hat.
- (8) Anschließend können Wiederaufsättigungseffekte zur Festigkeits- und Steifigkeitsabnahme im Bereich des konturnahen Gebirgstragringes geführt haben, wodurch im zweiten Observationshalbjahr schließlich Bohrlochwandkonvergenzen innerhalb der GSM-Bohrlöcher stattfinden konnten.

Des Weiteren sind in *Lux et al. (2012)* zwei Erklärungsansätze dafür formuliert worden, weshalb eine Bohrlochkonvergenz zwar in allen GSM-Bohrlöchern, aber in keinem der GEM-Bohrlöcher beobachtet worden ist, wobei eine Kombination aus beiden nachfolgend aufgelisteten Erklärungsansätzen als durchaus wahrscheinlich eingestuft worden ist:

- (1) Das Gebirge in der Umgebung der GSM-Bohrlöcher ist aufgrund seiner Lage westlich der Hauptstörungszone tektonisch deutlich stärker vorbelastet als das Gebirge in der Umgebung der GEM-Bohrlöcher und hat somit auch aufgrund einer höheren Anzahl von Klüften und Trennflächen eine höhere hydraulische Leitfähigkeit, wodurch wiederum Wasserzutritte und Aufsättigungseffekte begünstigt werden. Auch ein Wasserzutritt entlang einzelner diskreter Pfade mit stark erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit in das Gestein in der Umgebung der GSM-Bohrlöcher hinein ist nicht auszuschließen.
- (2) Das Gebirge in der Umgebung der Gallery 08, aus der heraus die GSM-Bohrlöcher abgeteuft worden sind, ist bis zur Auffahrung der Gallery 08 durch technologene Eingriffe unbeeinflusst gewesen. Daher hat hier ein Entsättigungsprozess mit einem Abbau des Porenwasserdrucks auch erst mit der Auffahrung der Gallery 08 begonnen, während eine Entsättigung des Gebirges einschließlich des Abbaus des Porenwasserdrucks in der Umgebung der Gallery 96 bereits seit 1996 und im eingeschränkten Maße vielleicht aufgrund der Nähe der GEM-Bohrlöcher zum Haupttunnel schon seit 1881 stattfindet. Aus den unterschiedlichen Entsättigungsgraden des Gesteins könnten unterschiedliche Potentialdifferenzen zwischen den Bohrlochkonturen als Vorflut und den hydraulischen Fernfeldern der GSM-Bohrlöcher und der GEM-Bohrlöcher resultieren, woraus stark unterschiedliche Wiederaufsättigungsgeschwindigkeiten resultieren würden und sich auch Auswirkungen auf die Intensität der ablaufenden hydraulisch-mechanisch gekoppelten Effekte ergeben könnten.

Die These, dass das Vorhandensein von Trennflächen und Klüften in der Umgebung der Gallery 08 einen starken Einfluss auf das Deformationsverhalten der GSM-Bohrlöcher ausübt, wird gestützt durch die Tatsache, dass auch innerhalb der Gruppe der fünf GSM-Bohrlöcher innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 08.10.2010 deutliche Unterschiede in Bezug auf das Deformationsverhalten zwischen den einzelnen Bohrlöchern identifiziert worden sind.

Zur Betrachtung der identifizierten Unterschiede bezüglich des Deformationsverhaltens sind in Bild 3.86 die Ergebnisse der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde für die GSM-

Bohrlöcher mit Ausnahme des Bohrlochs GSM 90 dargestellt. Eine Darstellung der Ergebnisse der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde für das Bohrloch GSM 90 erfolgt nicht, da ein Verbruch der Bohrlochkontur sowie ein starker Wasserzutritt in das Bohrloch GSM 90 dazu geführt haben, dass bereits zum dritten Observationszeitpunkt am 08.10.2010 keine Befahrung des Bohrlochs GSM 90 mit der Dreiarmkalibersonde mehr erfolgen konnte. Neben den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde sind in Bild 3.86 nochmals die Anordnung und die Ausrichtung der GSM-Bohrlöcher innerhalb der Gallery 08 dargestellt.

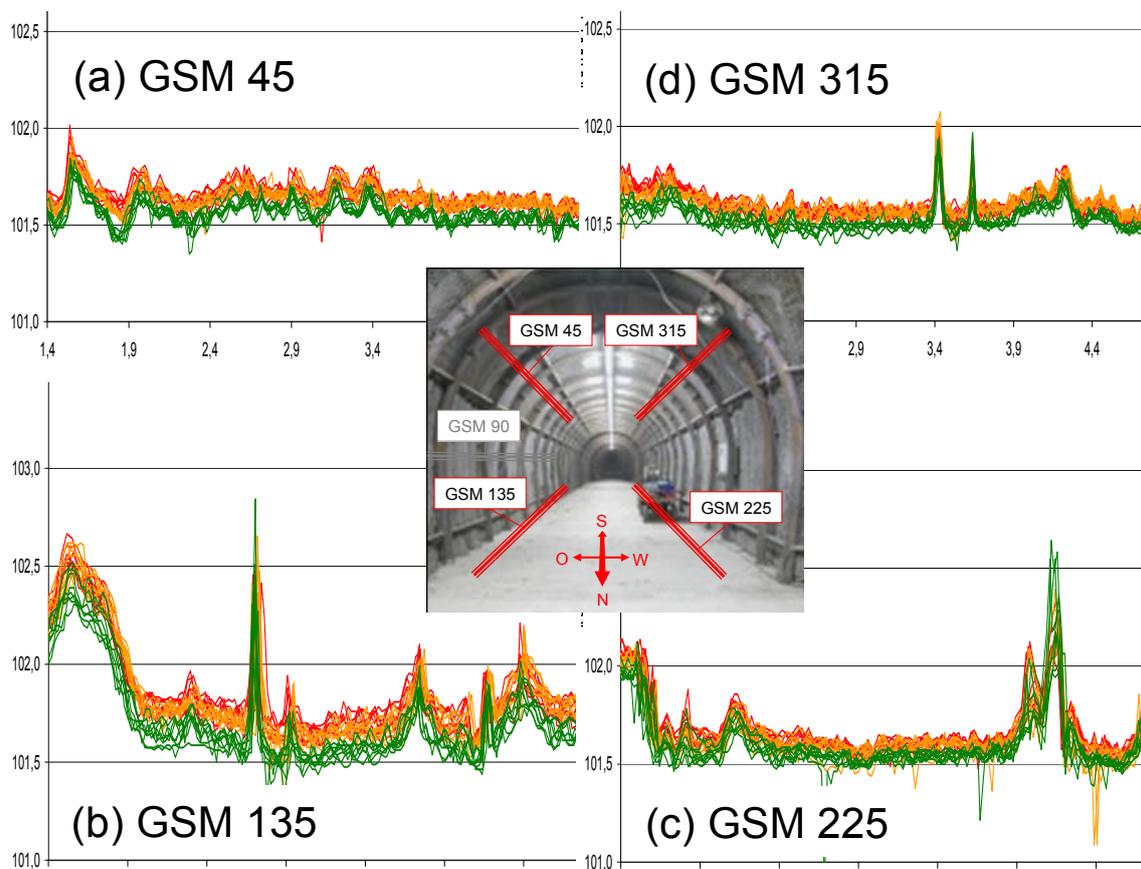


Bild 3.86: Gegenüberstellung aller Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus den Bohrlochern GSM 45, GSM 135, GSM 225 und GSM 315 bis zum 08.10.2010, Lux et al. (2012)

Aus den zusammengestellten Befunden sind folgende deutliche Zusammenhänge zwischen der Anordnung und Orientierung der Bohrlöcher und dem observierten Deformations- bzw. Tragverhalten identifiziert worden:

- (1) Das im östlichen Bereich der Gallerysohle schräg nach unten abgeteufte Bohrloch GSM 135 ist das Bohrloch mit der größten Bandbreite von ermittelten Messwerten und darüber hinaus auch das Bohrloch, in dem die größten Konvergenzen zwischen den Ob-



servationszeitpunkten am 10.05.2010 und am 08.10.2010 ermittelt werden konnten. *Anmerkung: In den tiefer gelegenen Teufenbereichen ist im Rahmen von Lux et al. (2012) ein deutlich ausgeprägtes Trennflächengefüge sowie eine signifikante Ansammlung von Sickerwasser (ca. zwei Liter im Observationszeitraum vom 06.11.2009 bis zum 08.10.2010) anhand der Auswertung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera detektiert worden.*

- (2) Das Bohrloch GSM 225 zeigt ein sich deutlich vom Deformationsverhalten des Bohrlochs GSM 135 unterscheidendes zeitabhängiges Deformationsverhalten, wie die vergleichende Betrachtung von Bild 3.86(b) und Bild 3.86(c) vor Augen führt.
- (3) Die im auf der westlichen Seite der Gallerysohle der Gallery 08 schräg nach unten in Richtung Westen abgeteuften Bohrloch GSM 225 ermittelten Bohrlochkonvergenzen fallen deutlich geringer aus als im Bohrloch GSM 135.
- (4) Für die beiden schräg nach oben abgeteuften Bohrlöcher GSM 45 (östlicher Firstbereich / in Richtung der Hauptstörungszone abgeteuft) und GSM 315 (westlicher Firstbereich / auf der von der Hauptstörungszone abgewandten Galleryseite abgeteuft) sind ebenfalls deutlich erkennbare Bohrlochkonvergenzen ermittelt worden.
- (5) Für das Bohrloch GSM 315 liegen die anhand der Betrachtung der Messwertgraphen der Dreiarmkalibersonde erkennbaren Bohrlochkonvergenzen mit den für das Bohrloch GSM 225 ermittelten Konvergenzen in der selben Größenordnung.
- (6) Auf der östlichen Seite der Gallery 08 weist das im Firstbereich abgeteuft Bohrloch GSM 45 deutlich geringere Bohrlochkonvergenzen auf als das in die Sohle abgeteuft Bohrloch GSM 135.
- (7) Die innerhalb des Bohrlochs GSM 45 gemessenen Konvergenzen sind etwas größer als die im Bohrloch GSM 315 detektierten Konvergenzen.

Zusammenfassend lässt sich somit für den Observationszeitraum vom 06.11.2009 bis zum 08.10.2010 feststellen, dass in den der Hauptstörungszone zugewandten Observationsbohrlöchern auf der östlichen Seite der Gallery 08 die stärkeren Bohrlochkonvergenzen stattfinden im Vergleich zu den Bohrlochkonvergenzen in den Bohrlöchern auf der westlichen und somit von der Hauptstörungszone abgewandten Seite. Wird das partiell verbrochene Bohrloch GSM 90 mit in die Betrachtung einbezogen, so wird deutlich, dass die Observationsbohrlöcher umso mehr in ihrem Trag- und Deformationsverhalten negativ beeinflusst werden, je



mehr ihre Bohrlochwände von Trennflächen durchzogen werden und je stärker der Wasserzutritt in das Gestein der Bohrlochwand hinein sowie der Zutritt von Sickerwasser in das Bohrloch hinein sind.

(c) Zur Darstellung der innerhalb der GSM-Bohrlöcher generierten Observationsergebnisse

Vor dem Hintergrund der bisherigen Erkenntnisse aus den Observationsarbeiten bis zum 08.10.2010 soll nun nachfolgend die Entwicklung der GSM-Bohrlöcher im gesamten in etwa viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 betrachtet werden. Daher werden im Rahmen der Präsentation der Ergebnisse der Kalibermessungen und der Videoobservationsarbeiten neben den Observationsergebnissen, die im Rahmen dieses Vorhabens an den vier Befahrungsterminen zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 generiert worden sind, auch die bereits in *Lux et al. (2012)* diskutierten Observationsergebnisse dargestellt, die zu den ersten drei Observationsterminen zwischen dem 06.11.2009 und dem 08.10.2010 aufgezeichnet worden sind, sodass für jeden der betrachteten Bohrlochbereiche eine Serie von sieben Aufnahmen aus dem Inneren des jeweiligen Observationsbohrlochs zu betrachten ist. Der wissenschaftliche Schwerpunkt bei der Analyse der nachfolgend vorgestellten Observationsergebnisse hat auf der Beantwortung der Frage gelegen, inwieweit sich die im Rahmen von *Lux et al. (2012)* identifizierten zeitabhängigen hydraulischen und hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse innerhalb der GSM-Observationsbohrlöcher nach dem 08.10.2010 weiter fortgesetzt haben.

Nachfolgend werden für die Observationsbohrlöcher GSM 45, GSM 135, GSM 225 und GSM 315 ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation mit der Axial-Bohrlochkamera und der Kalibermessungen mit der Dreiarmkalibersonde vorgestellt und diskutiert. Da im Rahmen dieses Vorhabens im Observationsbohrloch GSM 90 keine weiteren Messungen mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführt werden konnten und die verfügbaren Ergebnisse der Kalibermessungen im Observationsbohrloch GSM 90 somit bereits in *Lux et al. (2012)* vollständig dokumentiert worden sind, werden für das Bohrloch GSM 90 lediglich die Ergebnisse der Videoobservation dargestellt und diskutiert.

Zu jedem Befahrungstermin sind in den GSM-Bohrlöchern insgesamt acht Kalibermessungen je Bohrloch durchgeführt worden. Die acht Messungen ergeben sich aus vier Befahrungen des Bohrlochs, bei denen jeweils bei der Einfahrt und bei der Ausfahrt eine Messung stattgefunden



den hat. Die vier Befahrungen je Befahrungstermin sind durchgeführt worden, um durch Variationen des Ausgangswinkels ϕ der Kalibersonde anhand der Messwerte möglichst viele Informationen über die Form der Bohrlochkontur und die Beschaffenheit der Bohrlochwand zu erhalten. Nach der ersten Befahrung unter einem Ausgangswinkel von $\phi = 0^\circ$, bei der die Sonde in ihrer Ausgangsposition so orientiert gewesen ist, dass einer ihrer drei Messarme direkt zum obersten Punkt der Bohrlochkontur orientiert war, ist die Sonde anschließend für die nächsten drei Befahrungen im Uhrzeigersinn um jeweils $\Delta\phi = 30^\circ$ gegenüber der vorangegangenen Befahrung weitergedreht worden. Hingewiesen werden soll an dieser Stelle nochmals darauf, dass die nachfolgend vorgestellte Auswertung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde vornehmlich aus qualitativer Sicht erfolgt, um die messtechnisch erfassten Veränderungen hervorzuheben. Wertende Einschätzungen und Interpretationen beruhen dabei auf den Erfahrungen, die mit dieser Bohrlochmesstechnik und ihrer Aussagekraft zwischenzeitlich vorliegen. Hervorzuheben ist, dass mit der verwendeten Dreiarmkalibersonde umfangsbezogen von der Lage der Sonde im Bohrlochquerschnitt abhängige Mittelwerte zur Bohrlochwanddeformation erhalten werden.

Wie auch schon zur Darstellung der Messergebnisse der Kalibersonde aus den GEM-Observationsbohrlöchern in Abschnitt 3.2.3 ist die Skalierung der y-Achse, über die die gemessenen Kaliberwerte aufgetragen werden, mit einem darstellbaren Messwertebereich zwischen $100 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 105 \text{ mm}$ für alle GSM-Observationsbohrlöcher unabhängig von der tatsächlichen Bandbreite der gemessenen Kaliberwerte gewählt worden, um so dem Betrachter einen besseren Eindruck von den Unterschieden zwischen den Verläufen der in den unterschiedlichen Observationsbohrlöchern generierten Messwertgraphen zu verschaffen.

In den Messwertdiagrammen mit der Skalierung der y-Achse im Messwertebereich von $100 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 105 \text{ mm}$ werden für jedes der observierten Bohrlöcher jeweils alle innerhalb des Bohrlochs mittels der Dreiarmkalibersonde generierten Messwerte dargestellt. Dabei wird die aus acht Messwertgraphen bestehende Messwertschar des ersten Observationstermins vom 06.11.2009 in Grün dargestellt, während die zum letzten Observationstermin am 14.05.2014 gemessenen Zahlenwerte jeweils in Rot dargestellt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird für die Darstellung aller in einem Observationsbohrloch generierten Messwertgraphen innerhalb eines Diagramms auf eine weitere farbliche Differenzierung zwischen den zu den einzelnen Observationsterminen generierten Messdaten verzichtet, sodass alle weiteren, nicht am ersten oder letzten Observationstermin aufgezeichneten Messwertgra-

phen schwarz dargestellt werden. Zur genaueren Betrachtung der zeitabhängigen Entwicklung des Bohrlochkalibers wird für jedes der Bohrlöcher im Rahmen der Ergebnisdiskussion ein weiteres Messwertdiagramm dargestellt. In dem zweiten pro Bohrloch dargestellten Messwertdiagramm werden für jedes der Observationsbohrlöcher die zu jedem Befahrungstermin bei der Einfahrt der Dreiarmkalibersonde in das Bohrloch mit einem Ausgangswinkel von $\phi = 0^\circ$ aufgezeichneten Messwerte farblich voneinander differenziert abgebildet.

Im Rahmen der Analyse der in den vier mit der Dreiarmkalibersonde im Rahmen dieses Vorhabens befahrenen GSM-Observationsbohrlöchern generierten Messergebnisse ist eine grundsätzlich gute qualitative und quantitative Übereinstimmung zwischen den bei den Befahrungen unter unterschiedlichen Ausgangswinkeln aufgezeichneten Kalibermesswerten in Bezug auf das zeitabhängige Deformationsverhalten festgestellt worden, sodass die Ergebnisse der Messung bei der Einfahrt unter $\phi = 0^\circ$ als repräsentativ für die weiteren Messergebnisse betrachtet werden können, weshalb auf die gesonderte Darstellung der bei den Messungen unter anderen Ausgangswinkeln generierten Messergebnisse verzichtet werden kann. Um gegebenenfalls auftretende zeitabhängige Unterschiede bezüglich der zu den sieben unterschiedlichen Observationszeitpunkten innerhalb der GSM-Bohrlöcher gemessenen Kaliberwerte auch für den Fall identifizieren zu können, dass sich zwischen den einzelnen Observationszeitpunkten nur sehr geringe Deformationen der Bohrlochwand ereignet haben, ist für die Darstellung der bei der Einfahrt unter $\phi = 0^\circ$ generierten Messwertgraphen eine nochmals verfeinerte Auflösung mit einer Skalierung der y-Achse von $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 103 \text{ mm}$ gewählt worden.

(d) Observationsbohrloch GSM 45

(d 1) Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen im Bohrloch GSM 45

Die Ausrichtung des Bohrlochs GSM 45 entlang der Kontur der Gallery 08 sowie die Orientierung gegenüber den weiteren observierten GSM-Bohrlöchern kann Bild 3.87 entnommen werden. Bild 3.88 zeigt die Messwertgraphen aller im Bohrloch GSM 45 durchgeführten Messungen.

Wie den vorangehenden Ausführungen in Abschnitt 3.2.4(b) und insbesondere der Darstellung in Bild 3.86(a) zu entnehmen ist, ist im Rahmen von *Lux et al. (2012)* aus den im Bohrloch GSM 45 generierten Messergebnissen eine zwar nur geringfügige, aber dennoch deutlich

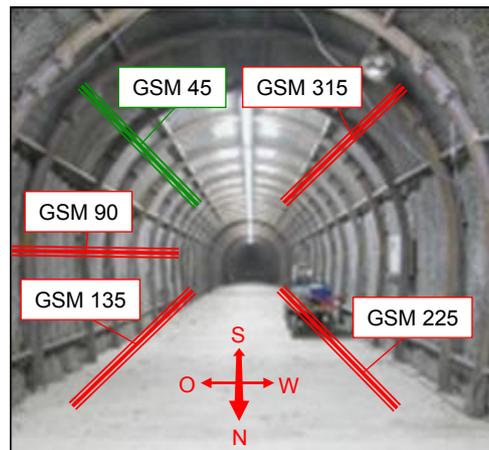


Bild 3.87: Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit schematisch dargestellter Anordnung des Bohrlochs GSM 45 (Bohrlochverlauf in östlicher Richtung schräg nach oben) und der vier weiteren observierten GSM-Bohrlöcher

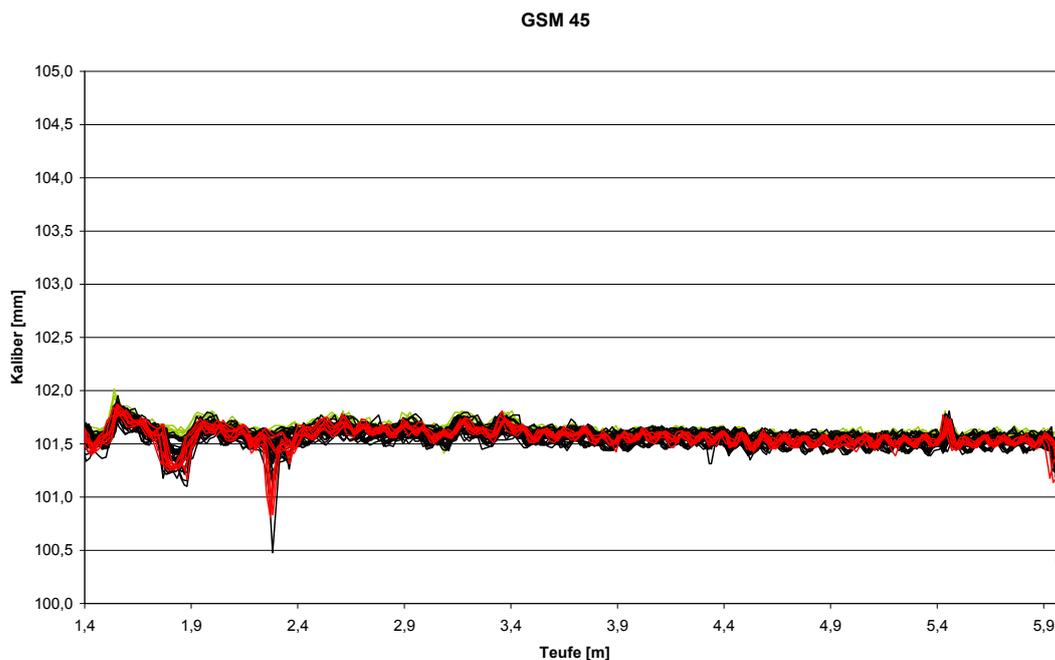


Bild 3.88: Zusammenstellung der Messergebnisse aller im Bohrloch GSM 45 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der ersten Befahrung vom 06.11.2009 sind in Grün dargestellt, während die Messergebnisse der letzten Befahrung vom 14.05.2014 rot dargestellt werden.

identifizierbare zeitabhängige Entwicklung bezüglich des Deformationsverhaltens des Bohrlochs GSM 45 identifiziert worden. Der Betrachtung von Bild 3.88 kann keine eindeutig identifizierbare Fortsetzung des Konvergenzprozesses innerhalb des Bohrlochs GSM 45 im Observationszeitraum vom 08.10.2010 bis zum 14.05.2014 entnommen werden. Die in Bild 3.88

in Grün dargestellten Messwertgraphen des ersten Befahrungstermins vom 06.11.2009 liegen zum Teil zwar minimal oberhalb der weiteren Messwertgraphen, werden aber zu großen Teilen auch von der weiteren Messwertgraphenschar überdeckt.

Die im Vordergrund in Rot dargestellte Messwertgraphenschar des letzten Befahrungstermins vom 14.05.2014 liegt zwar leicht unterhalb der Messwertgraphen, die am 06.11.2009 aufgezeichnet worden sind, hebt sich jedoch nicht klar erkennbar von den zu den weiteren Observationszeitpunkten generierten Messergebnissen ab. Während einige der in Bild 3.88 in Schwarz dargestellten Messwertgraphen, die zu den weiteren Observationszeitpunkten aufgezeichnet worden sind, oberhalb der Messwertgraphen vom 14.05.2014 verlaufen, verlaufen andere der zu den weiteren Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen auch unterhalb der roten Messwertgraphenschar vom 14.05.2014. Aus der in Bild 3.88 gewählten Darstellung der Messergebnisse kann somit keine eindeutige Fortsetzung der im Rahmen von *Lux et al. (2012)* identifizierten Bohrlochkonvergenz geschlussfolgert werden. Die der Betrachtung von Bild 3.88 zu entnehmende relativ gute Übereinstimmung zwischen den Messwertgraphen der unterschiedlichen Befahrungen und insbesondere die Tatsache, dass die Messwertgraphen des letzten Befahrungstermins vom 14.05.2014 nicht eindeutig unterhalb der weiteren Messwertgraphen angeordnet sind, legen eher den Verdacht nahe, dass die insbesondere für den Observationszeitraum zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 identifizierten Bohrlochkonvergenzprozesse nach dem 08.10.2010 zum Erliegen gekommen sein könnten.

Zur detaillierten Analyse der Entwicklung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 45 sind in Bild 3.89 die Ergebnisse der zu jedem Observationszeitpunkt bei der Einfahrt unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 45 mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführten Messungen erneut in einem vergrößerten Maßstab dargestellt.

Für die Darstellung der gemessenen Kaliberwerte ist in Bild 3.89 daher eine sehr detaillierte Auflösung mit einer Skalierung der y-Achse zwischen $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 103 \text{ mm}$ gewählt worden. Darüber hinaus sind den Messwertgraphen Farben entsprechend ihres jeweiligen Aufzeichnungsdatums zugeordnet worden. Dem Messwertgraphen des Observationstermins vom 06.11.2009 ist die Farbe Grün zugewiesen worden und der Messwertgraph des darauf folgenden Observationstermins vom 10.05.2010 ist türkisfarben dargestellt. Die Graphen der Messergebnisse der nachfolgenden Observationstermine sind in zeitlich aufsteigender Reihenfolge in den Farben Blau (08.10.2010), Violet (23.11.2011), Rot (23.05.2012) und Orange (28.08.2013) dargestellt, während der am letzten Observationstermin am 14.05.2014 generier-

te Messwertgraph an seiner gelben Farbe zu erkennen ist. Somit enthält das Messwertdiagramm in Bild 3.89 insgesamt sieben Messwertgraphen.

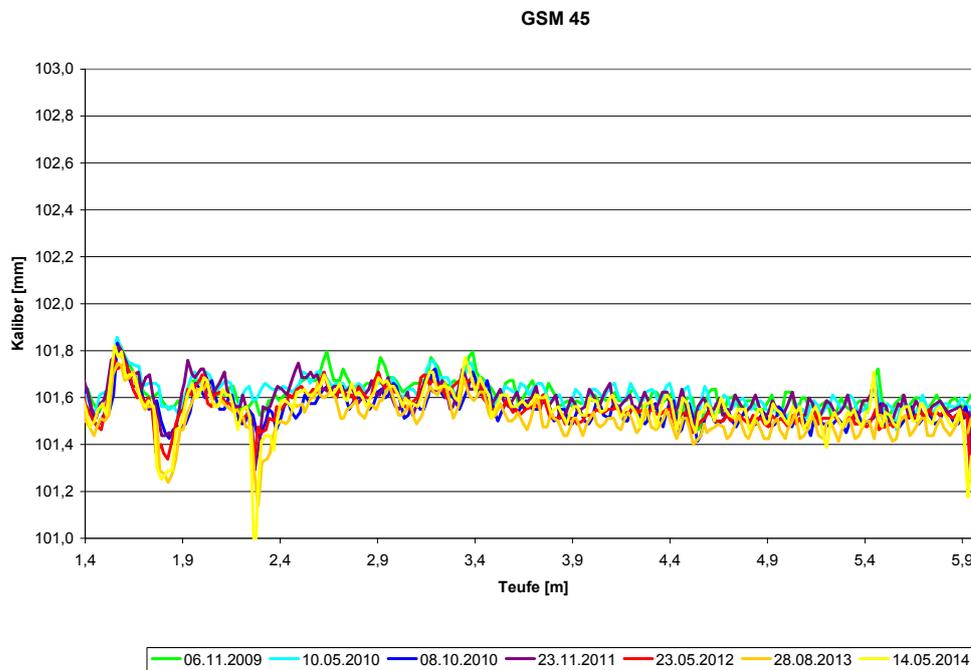


Bild 3.89: Zusammenstellung der Messergebnisse der Einfahrten unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 45 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014

Auch bei der Betrachtung der Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde in Bild 3.89 mit der gegenüber der Darstellung in Bild 3.88 nochmals deutlich erhöhten Auflösung bezüglich der gemessenen Kaliberwerte lässt sich für den größten Teil des Bohrlochs GSM 45 nach dem 08.10.2010 keine weitere eindeutige zeitabhängig voranschreitende Bohrlochkonvergenz erkennen, wie sie zunächst für den Zeitraum zwischen den Observationszeitpunkten am 10.05.2010 und am 08.10.2010 festgestellt werden konnte.

Lediglich in den zwei Teufenbereichen zwischen $t_{BL} \approx 1,7$ m und $t_{BL} \approx 1,9$ m und zwischen $t_{BL} \approx 2,2$ m und $t_{BL} \approx 2,4$ m, in denen alle ab dem 08.10.2010 aufgezeichneten Messwertgraphen lokale Minima aufweisen, ist eindeutig eine zeitabhängige Verringerung des Bohrllochdurchmessers anhand der Betrachtung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde identifizierbar. Mit einer messbaren Verringerung des Bohrllochdurchmessers um maximal $\Delta d \approx 0,6$ mm gegenüber dem ursprünglich bei der Erstbefahrung am 06.11.2009 gemessenen Bohrllochdurchmesser sind die zeitabhängig ablaufenden Veränderungen in den beiden Teufenbereichen allerdings zu gering, um Hinweise auf die Ursachen, weshalb gerade innerhalb



dieser zwei Teufenbereiche eine konvergente zeitabhängige Entwicklung der Bohrlochkontur eingetreten ist, anhand der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera identifizieren zu können. Allerdings liefern die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus den zwei Teufenbereichen zwischen $t_{BL} \approx 1,7$ m und $t_{BL} \approx 1,9$ m und zwischen $t_{BL} \approx 2,2$ m und $t_{BL} \approx 2,4$ m wertvolle Hinweise darauf, dass zum einen zeitabhängige Deformationsprozesse innerhalb des Bohrlochs GSM 45 auch nach dem 08.10.2010 ablaufen und dass zum anderen die eingesetzte Kalibersondenmesstechnik auch dazu geeignet ist, diese zeitabhängigen Deformationsprozesse zu erfassen.

Die im Diagramm in Bild 3.89 zu identifizierenden Messwertdifferenzen in den zwei Teufenbereichen zwischen $t_{BL} \approx 1,7$ m und $t_{BL} \approx 1,9$ m und zwischen $t_{BL} \approx 2,2$ m und $t_{BL} \approx 2,4$ m verdeutlichen umso mehr die anhand des Vergleichs der zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten entstandenen Messwertgraphen feststellbare relative Ereignislosigkeit im tiefer gelegenen Bohrlochabschnitt zwischen $t_{BL} \approx 2,4$ m und dem Bohrlochtieftsten in $t_{BL} \approx 6,0$ m. Während für diesen Bohrlochabschnitt zum Ende des vorangegangenen Forschungsvorhabens noch eine Bohrlochkonvergenz aus dem Vergleich der Messwertgraphen vom 10.05.2010 und dem 08.10.2010 heraus interpretiert worden ist, lässt sich hingegen bei der Betrachtung von Bild 3.89 eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen den fünf Messwertgraphen feststellen, die zwischen dem 08.10.2010 und dem 14.05.2014 aufgezeichnet worden sind. Geringfügige Unterschiede bezüglich des Verlaufs der fünf ab dem 08.10.2010 aufgezeichneten Messwertgraphen dürften bei Inbetrachtung der Feinheit der Auflösung der Ergebnisdarstellung in Bild 3.89 auf Unregelmäßigkeiten im Gestein entlang der Bohrlochwand sowie gegebenenfalls auf messtechnische Effekte zurückzuführen sein.

Zusammenfassend kann bezüglich des mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde dokumentierten zeitabhängigen Deformationsverhaltens des Observationsbohrlochs GSM 45 geschlussfolgert werden, dass eine geringfügige konvergente Veränderung der zwischen dem Abteufen am 06.11.2009 und der ersten Wiederholungsmessungen am 10.05.2010 zunächst weitestgehend unveränderten Bohrlochkontur, die zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 eingetreten ist, sich nach dem 08.10.2010 nicht klar erkennbar weiter fortgesetzt hat.

Insgesamt scheinen die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde damit die bereits in *Lux et al. (2012)* formulierte These zu stützen, dass die zwischen dem zweiten und dem dritten Observationszeitpunkt am 10.05.2010 und am 08.10.2010 identifizierte Bohrlochkonvergenz auf



Aufweichungsprozesse (*softening*) im Zuge der Wiederaufsättigung des Gesteins in der Umgebung des Bohrlochs GSM 45 zurückzuführen ist, das zunächst durch den Bohrvorgang austrocknet und dadurch in einen teilgesättigten Zustand überführt worden ist, was möglicherweise auch mit einer Gesteinsverfestigung verbunden war. Die Wiederaufsättigung könnte somit zu einer erneuten Abnahme der zunächst erhöhten Steifigkeit des Gesteins in dem durch den die Bohrlochkontur umgebenden Sekundärspannungszustand belasteten Gebirgsbereich geführt haben, woraus wiederum die mittels der Dreiarmkalibersonde gemessene Verringerung des Bohrlochdurchmessers zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 resultiert haben könnte. Des Weiteren ist nicht auszuschließen, dass die durch das Bohrlochabteufen hervorgerufene Teilsättigung des Gesteins in der Umgebung des Bohrlochs zu einer kapillarspannungsbedingten Schrumpfrissbildung und damit Entfestigung des Gesteins in der Umgebung des Bohrlochs geführt hat. Eine derartige Schrumpfrissbildung könnte neben einer Entfestigung des Gesteins auch eine die Wiederaufsättigung begünstigende Permeabilitätserhöhung des Gesteins in der näheren Umgebung des Bohrlochs hervorrufen. Nach dem Abschluss des Wiederaufsättigungsprozesses sind dann den Messbefunden folgend keine weiteren zeitabhängigen Aufweichungsprozesse im Gestein in der Umgebung der Bohrlochkontur mehr abgelaufen, sodass keine weiteren signifikanten, mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde feststellbaren Bohrlochkonturveränderungen mehr eingetreten sind.

Insgesamt entsteht somit bei der Analyse der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde, die innerhalb des insgesamt ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums im Bohrloch GSM 45 aufgezeichnet worden sind, der Eindruck, dass das zeitabhängige Deformationsverhalten des Bohrlochs GSM 45 überwiegend durch geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte Prozesse (*Re-Sättigung* → *softening*) dominiert wird und ein viskoses mechanisches Materialverhalten ("*Kriechen*") oder ein sonstiges, ggf. kontinuierlich ablaufendes zeitabhängiges Materialverhalten keinen oder einen wenn überhaupt dann nur untergeordneten Einfluss auf das zeitabhängige Deformationsverhalten des Bohrlochs GSM 45 ausgeübt hat. Somit verdeutlichen die innerhalb des Bohrlochs GSM 45 mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführten Messungen einmal mehr, was für einen wichtigen Faktor das Verständnis geomechanisch-geohydraulisch gekoppelter Prozesse für die Interpretation von beobachtetem Trag- und Deformationsverhalten sowie darüber hinaus auch für die Prognose des Trag- und Deformationsverhaltens von Hohlräumen in Tongesteinsformationen darstellt. Es sei an dieser Stelle bereits vorweggenommen, dass die nachfolgend noch vorgestellten und diskutierten Observationsergebnisse aus den weiteren GSM-Observationsbohrlöchern die Signifikanz des

Verständnisses geomechanisch-geohydraulisch gekoppelter Prozesse im Tongestein weiter untermauern werden.

(d 2) Ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation des Bohrlochs GSM 45

Bevor in den nachfolgenden Abschnitten die Messergebnisse aus den weiteren GSM-Bohrlöchern vorgestellt und diskutiert werden, soll zunächst mittels der Gegenüberstellung von ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera die zeitabhängige hydraulische Entwicklung innerhalb des Bohrlochs GSM 45 diskutiert werden. Zur Diskussion der zeitabhängigen hydraulischen Entwicklung werden dieselben Teufenbereiche des Bohrlochs GSM 45 herangezogen, die bereits in *Lux et al. (2012)* vorgestellt und diskutiert worden sind.

In Bild 3.90 ist zunächst die zeitabhängige Entwicklung des sehr nah am Bohrlochmund gelegenen Teufenbereichs zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m innerhalb des ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 anhand von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt. Wie vorangehend auch schon im Rahmen der Diskussion der Observationsergebnisse aus den GEM-Bohrlöchern werden somit auch für die GSM-Observationsbohrlöcher alle innerhalb des vorangegangenen Forschungsvorhabens und alle innerhalb des aktuellen Forschungsvorhabens generierten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus den betrachteten Teufenbereichen vorgestellt und diskutiert. Die erste

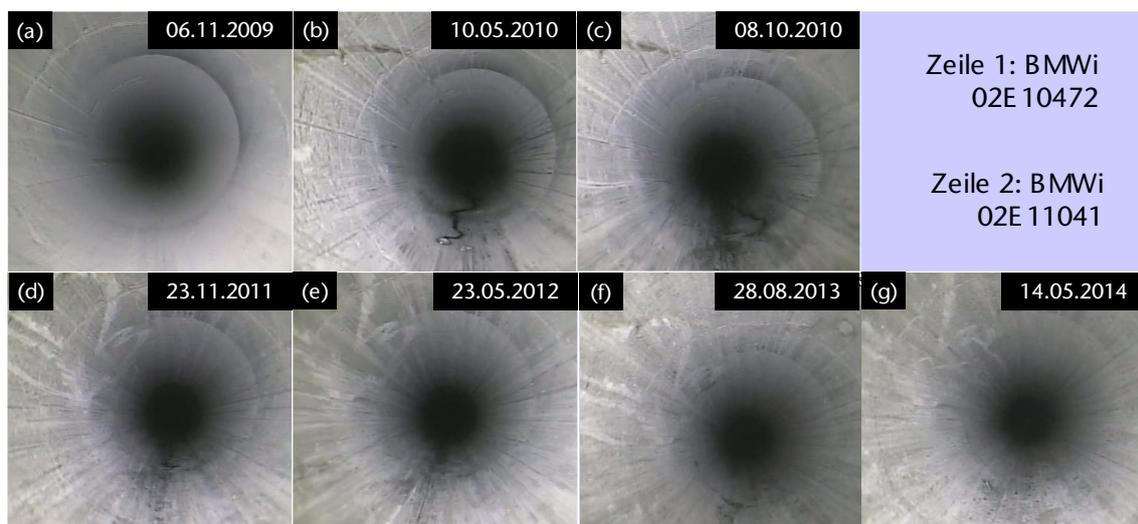


Bild 3.90: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,4$ m bis $t_{BL} \approx 0,6$ m innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014

Zeile von Bild 3.90 enthält die zwischen dem 06.11.2009 und dem 08.10.2010 entstandenen und bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* vorgestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera, während die im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 generierten Aufnahmen in der zweiten Zeile von Bild 3.90 dargestellt werden.

Die in Bild 3.90 dargestellte Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zeigt eine über den gesamten Observationszeitraum vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 auffallend nicht durch Entfestigungserscheinungen geprägte und damit sehr standfeste Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,4$ m bis $t_{BL} \approx 0,6$ m.

Auf der in Bild 3.90(a) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 06.11.2009 wirkt das Gestein der Bohrlochwand vollkommen trocken. Auch auf der am 10.05.2010 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.90(b) scheint die Bohrlochwand überwiegend trocken zu sein. Allerdings deutet ein in der Bohrlochsohle des um $\delta = 45^\circ$ geneigt nach oben in das Gebirge hinein geteuften Bohrlochs GSM 45 herunter laufender Wassertropfen darauf hin, dass in den tiefer im Gebirge gelegenen Teufenbereichen des Bohrlochs GSM 45 feuchtere Bedingungen vorliegen müssen.

Auf der in Bild 3.90(c) vorgestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 08.10.2010 ist zu erkennen, dass sich im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,4$ m bis $t_{BL} \approx 0,6$ m in der Bohrlochsohle ein dunkler feuchter Streifen gebildet hat, der darauf hindeutet, dass auch in den Monaten zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 Wasser aus den tiefer im Gebirge gelegenen Teufenbereichen des Bohrlochs GSM 45 in den Teufenbereich $t_{BL} \approx 0,4$ m bis $t_{BL} \approx 0,6$ m und auch noch weiter in Richtung des Bohrlochmundes herunter gelaufen ist. Abgesehen von der Bohrlochsohle hinterlässt die Bohrlochwand in den übrigen Konturbereichen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,4$ m bis $t_{BL} \approx 0,6$ m beim Betrachten der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 08.10.2010 einen trockenen Eindruck. Es hat sich für den betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m somit im Rahmen von *Lux et al. (2012)* zusammenfassend festhalten lassen, dass dieser Teufenbereich zu Beginn des Observationszeitraums am 06.11.2009 durchgehend trocken ist, bevor im Zeitraum um den zweiten Observationszeitpunkt am 10.05.2010 herum Wasser aus tiefer gelegenen Teufenbereichen beginnt, innerhalb des Bohrlochs in den Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m vorzudringen und dass sich das Herunterrinnen von Wasser aus tiefer gelegenen Teufenbereichen auch bis zum 08.10.2010 fortsetzt.

Auf den zu den weiteren vier Observationszeitpunkten zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 entstandenen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera ist kein weiterer im Bereich der Bohrlochsohle herunter laufender Wassertropfen wie in Bild 3.90(b) zu erkennen und auch sonst wirkt das Gestein im Bereich der Bohrlochsohle auf den Aufnahmen eher trockener als auf der am 08.10.2010 entstandenen und in Bild 3.90(c) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera. Insbesondere die Aufnahme vom 14.05.2014 in Bild 3.90(g) vermittelt aufgrund der hellen Färbung des Gesteins im Bereich der Bohrlochsohle den Eindruck von einer beinahe vollkommenen Trockenheit des Gesteins entlang der gesamten Bohrlochkontur. Es scheint somit innerhalb der ca. dreieinhalb Jahre des Observationszeitraums nach dem 08.10.2010 ein Austrocknungsprozess im Bereich der Bohrlochsohle im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m stattzufinden.

Allerdings ist es auch möglich, dass zwischen den Messzeitpunkten einzelne aperiodisch auftretende Wasserzutritte in tieferen Bohrlochbereichen bis in den Observationsbereich vordringen, dort das Wasser bis zur nächsten Observation aber schon wieder verdunstet ist.

Um festzustellen, ob sich die für den sehr nahe am Bohrlochmund gelegenen Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m observierte Abnahme der Feuchtigkeit im Gestein entlang der Bohrlochkontur im Zeitraum nach dem 08.10.2010 auch innerhalb der etwas tiefer im Bohrloch GSM 45 gelegenen Teufenbereiche zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m und zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m hat beobachten lassen, werden nachfolgend die Serien von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus diesen zwei Teufenbereichen dargestellt.

Das nachfolgende Bild 3.91 zeigt zunächst den nur ein wenig tiefer im Bohrloch GSM 45 gelegenen Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m.

Der in Bild 3.91 vorgestellte Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m unterscheidet sich von dem in Bild 3.90 dargestellten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m unter anderem dadurch, dass das Gestein der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m bereits beim Betrachten der am zweiten Observationstermin am 10.05.2010 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.91(b) entlang der gesamten Bohrlochkontur einen eher feuchten Eindruck hinterlässt. Das Rinnsal, das sich entlang der Bohrlochsohle gebildet hat, hebt sich auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.91(b) farblich von den übrigen Bohrlochwandbereichen ab – ein Indikator dafür, dass im Bereich des Rinnsals entlang der Bohrlochsohle der Feuchtegehalt des Gesteins noch höher ist als in den übrigen Bereichen der Bohrlochkontur. Dennoch aber

wirkt auch das Gestein der Bohrlochwand in den weiteren Konturbereichen auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.91(b) feucht.

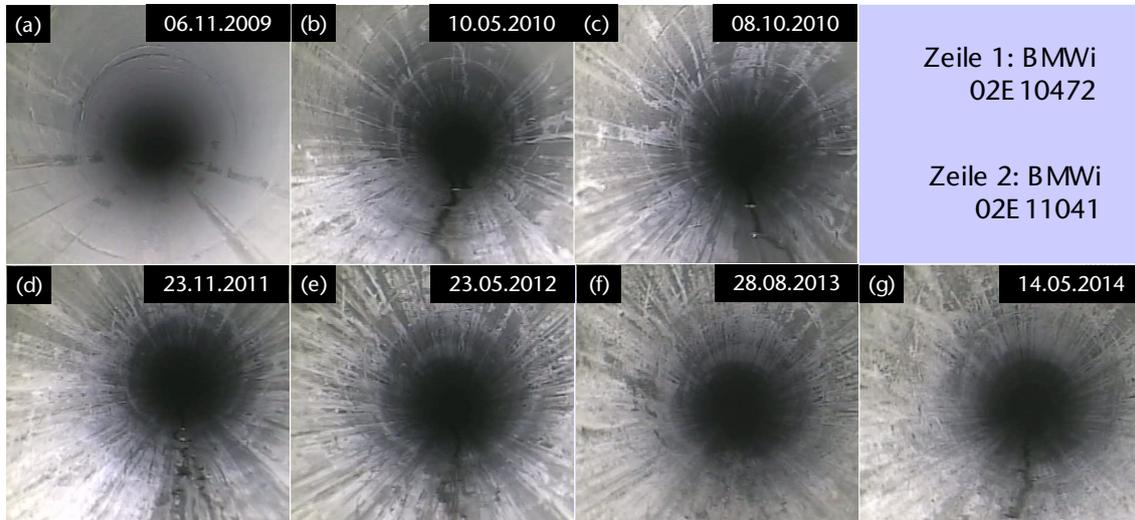


Bild 3.91: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 0,7$ m bis $t_{BL} \approx 0,9$ m innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014

Das Gestein in Bild 3.91(b) unterscheidet sich in seinem Erscheinungsbild somit deutlich von dem Erscheinungsbild des Gesteins des Teufenbereiches zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m zum Observationszeitpunkt am 10.05.2010. Zum dritten Observationszeitpunkt am 08.10.2010 kann der in Bild 3.91(c) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera entnommen werden, dass sich der Bereich der Bohrlochsohle, der besonders dunkel gefärbt ist, gegenüber dem 10.05.2010 noch deutlich verbreitert hat und die übrigen Bereiche der Bohrlochkontur nach wie vor ebenfalls feucht wirken.

Im darauf folgenden Zeitraum scheint sich wie auch schon im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m ein Austrocknungsprozess innerhalb des betrachteten Teufenbereichs zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m zu vollziehen. Das Rinnsal im Bereich der Bohrlochsohle wird zwischen den Observationszeitpunkten vom 08.10.2010 und dem 28.08.2013 mit den dazugehörigen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.91(c) bis Bild 3.91(f) von Observationszeitpunkt zu Observationszeitpunkt schmaler, bis es schließlich auf der am 28.08.2013 entstandenen Aufnahme vollständig verschwunden ist. Auch das Gestein entlang der weiteren Bereiche der Bohrlochkontur erweckt beim Betrachten von Bild 3.91(f) aufgrund seiner helleren Färbung einen trockeneren Eindruck als zu den vorangegangenen Observationszeitpunkten. Auf der zum letzten Observationszeitpunkt am 14.05.2014 aufgezeichneten

Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.91(g) wirkt das Gestein entlang der Bohrlochkontur insgesamt sehr trocken. Allerdings deutet ein schmaler dunkler Streifen im Bereich der Bohrlochsohle darauf hin, dass sich zum Ende des Observationszeitraums eventuell ein weiteres Mal ein kleines Rinnsal im Bereich der Bohrlochsohle ausbildet.

Wie schon im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,4$ m und $t_{BL} \approx 0,6$ m haben das von weiter oberhalb entlang eines Rinnsals in der Bohrlochsohle zutretende Wasser sowie der im Bereich der gesamten Bohrlochkontur zu verzeichnende Anstieg des Feuchtegehaltes des Gesteins in der Bohrlochwand zwischen dem 06.11.2009 und dem 08.10.2010 sowie der im Anschluss an den Observationstermin am 08.10.2010 eintretende und bis zum Ende des Observationszeitraums am 14.05.2014 anhaltende Austrocknungsprozess auch im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m keinen mittels der Axial-Bohrlochkamera observierbaren Einfluss auf die Stabilität der Bohrlochwand gehabt.

Zur weiteren Interpretation der Vorgänge im Bohrloch GSM45 ist in Bild 3.92 die zeitliche Entwicklung im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m anhand von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt.

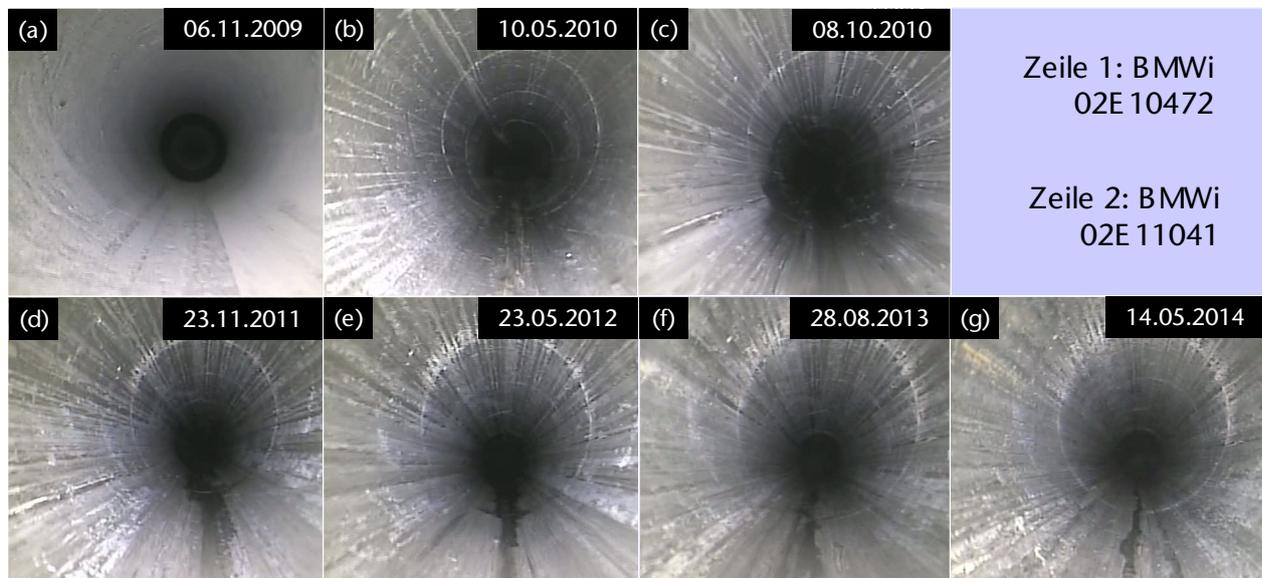


Bild 3.92: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,3$ m bis $t_{BL} \approx 1,5$ m innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014

Wie in den anderen beiden zuvor vorgestellten Teufenbereichen ist am ersten Observationstermin am 06.11.2009 die Bohrlochwand entlang der gesamten Bohrlochkontur trocken, deutlich zu ersehen aus der Betrachtung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.92(a).



Wie die Auswertung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom 06.11.2009 ergeben hat, ist die Bohrlochwand darüber hinaus zum Zeitpunkt der Erstbefahrung auch in allen weiteren Teufenbereichen des Bohrlochs GSM 45 trocken gewesen. Der zentrale Unterschied zwischen dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,3$ m bis $t_{BL} \approx 1,5$ m zu dem zuvor in Bild 3.91 dargestellten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m besteht darin, dass zu den Observationszeitpunkten am 10.05.2010 und am 08.10.2010 die Bohrlochwand im Bereich der gesamten Bohrlochkontur so feucht ist, dass das in der Bohrlochsohle herunter rinnende Wasser und die daraus resultierenden feuchten Bereiche der Bohrlochsohle sich farblich nicht mehr deutlich von den übrigen Bereichen der Bohrlochwand abheben. Die Auswertung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom 10.05.2010 und vom 08.10.2010 hat ergeben, dass das Gestein der Bohrlochwand zu diesen beiden Observationszeitpunkten auch in allen tiefer im Bohrloch GSM 45 gelegenen Teufenbereichen bei der optischen Begutachtung einen feuchten Eindruck hinterlassen hat.

Auch zu den späteren vier Observationszeitpunkten zwischen dem 23.11.2011 und dem 14.05.2014 erweckt das Gestein auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera im gesamten betrachteten Teufenbereich einen feuchten Eindruck. Jedoch ändert sich das Erscheinungsbild des Teufenbereichs zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m ab dem 23.11.2011 dahingehend, dass von diesem Observationszeitpunkt an bis hin zum Ende des Observationszeitraums am 14.05.2014 wieder ein dunklerer Streifen im Bereich der Bohrlochsohle zu erkennen ist. Der dunkle Streifen im Bereich der Bohrlochsohle resultiert höchstwahrscheinlich wie in den beiden zuvor vorgestellten Teufenbereichen aus dem höheren Feuchtegehalt des Gesteins im Bereich der Bohrlochsohle im Vergleich zum Feuchtegehalt des Gesteins in den weiteren Bereichen der Bohrlochkontur. Auch im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m scheint sich somit zwischen dem 08.10.2010 und dem 23.11.2011 ein Rinnsal im Bereich der Bohrlochsohle auszubilden. Da eine Austrocknung des Gesteins in den weiteren Bohrlochkonturbereichen, wie sie in dem Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m und $t_{BL} \approx 0,9$ m observiert worden ist, für den Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m nicht aus der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera geschlussfolgert werden kann, da auf den Aufnahmen in Bild 3.92(d) bis Bild 3.92(g) das Gestein im Bereich der gesamten Bohrlochkontur einen eher feucht glänzenden Eindruck erweckt, kann nicht abschließend geklärt werden, ob die Ausbildung des sich optisch abhebenden Rinnsals im Bereich der Bohrlochsohle darauf beruht, dass der Feuchtegehalt in den weiteren Bohrlochkonturbereichen abnimmt, oder darauf, dass der Feuchtegehalt / die Sickerwassermenge im Bereich der Bohr-



lochsohle ansteigt. Zieht man jedoch das hydraulische Verhalten des Gebirges in den beiden zuvor betrachteten, näher in Richtung des Bohrlochmunds gelegenen Teufenbereichen mit in Betracht, so erscheint es wahrscheinlicher, dass zu den vier späteren Observationsterminen in den Jahren 2011 bis 2014 auch im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m eine Verringerung des Feuchtegehalts im Gestein der Bohrlochwand entlang weiter Teile der Bohrlochkontur stattgefunden hat.

Weiteren Aufschluss gibt die Betrachtung der tiefer innerhalb des Bohrlochs GSM 45 gelegenen Teufenbereiche zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten. Während am 23.11.2011 und am 23.05.2012 noch ab einer Teufe von $t_{BL} \approx 1,7$ m eine vollständig um die Bohrlochkontur herumreichende und augenscheinlich gleichmäßige Durchfeuchtung der Bohrlochwand anhand der Analyse der Videos der Axial-Bohrlochkamera festgestellt werden kann, wird ein vergleichbarer hydraulischer Zustand des Gesteins entlang der Bohrlochwand am 28.08.2013 erst in einer Teufe von $t_{BL} \approx 2,1$ m und am 14.05.2014 erst in einer Teufe von $t_{BL} \approx 2,2$ m erreicht. Insgesamt entsteht somit bei der Auswertung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum der Eindruck, dass nach einer innerhalb des ersten Jahres zwischen dem 06.11.2009 und dem 08.10.2010 ablaufenden Wiederaufsättigungsphase, in der das zunächst im Zuge des Abteufens ausgetrocknete Gestein wieder durchfeuchtet wird, innerhalb der nächsten ca. dreieinhalb Jahre eine sehr langsam voranschreitende, vom Bohrlochmund ausgehende und sich tiefer in das Bohrloch GSM 45 hinein ausbreitende Austrocknung des Gesteins entlang der Bohrlochkontur erfolgt.

Trotz der Tatsache, dass sich im Teufenbereich nahe des Bohrlochmunds im Laufe der Zeit tendenziell eine Austrocknung des Gesteins zu ereignen scheint, bleibt festzuhalten, dass zu allen sieben Observationszeitpunkten und insbesondere auch noch zum letzten Observationszeitpunkt am 14.05.2014 im Bereich der Bohrlochsohle in Richtung des Bohrlochmundes heruntersickerndes Wasser innerhalb des Bohrlochs GSM 45 observiert werden konnte. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass sich innerhalb des Bohrlochs GSM 45 aus der Richtung des Bohrlochmunds ausgehende Entsättigungsprozesse (Abfuhr von Feuchtigkeit aus dem Gestein über die Wetter in der Strecke) mit auf Basis der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten nicht näher charakterisierbaren Feuchtigkeitzutrittsprozessen (ggf. diskret entlang von bevorzugten Wegsamkeiten oder ansonsten über Strömungsprozesse innerhalb des



Porenraumes des Tongesteins) überlagern und so zu dem observierten zeitabhängigen geohydraulischen Verhalten führen.

Zusammenfassend lässt sich bezüglich der Auswertung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera für das Bohrloch GSM 45 nochmals stichpunktartig festhalten:

- (1) Die Bohrlochwand des Bohrlochs GSM 45 ist am 06.11.2009 durchgehend innerhalb des gesamten, ca. 6 m langen Bohrlochs trocken gewesen.
- (2) Am 10.05.2010 ist die Bohrlochwand des Bohrlochs GSM 45 ab einer Teufe von $t_{BL} \approx 1,3$ m bis hin zum Bohrlochtiefsten durchgehend entlang der gesamten Bohrlochkontur feucht gewesen. Wasser aus den tiefer im Gebirge liegenden Teufenbereichen ist entlang der Bohrlochsohle bis in eine Teufe von $t_{BL} \approx 0,5$ m herunter gelaufen.
- (3) Zwar ist am 08.10.2010 kein Wasseraustritt aus dem Bohrlochmund des Bohrlochs GSM 45 erkennbar gewesen, es ist jedoch Wasser aus den tiefer im Gebirge gelegenen Teufenbereichen bis nah an den Bohrlochmund heran vorgedrungen. Zwischen dem Bohrlochmund und einer Teufe von etwa $t_{BL} \approx 1,3$ m hat sich ein Übergangsbereich gebildet, in dem zunächst nahe des Bohrlochmundes nur die Bohrlochsohle feucht ist und in dem die Feuchtigkeit in den übrigen Bereichen der Bohrlochwand umso mehr zunimmt, je tiefer der betrachtete Teufenbereich des Bohrlochs GSM 45 im Gebirge liegt.
- (4) Ab einer Teufe von etwa $t_{BL} \approx 1,3$ m bis hin zum Bohrlochtiefsten weist das Gestein der Bohrlochwand zum Observationstermin am 08.10.2010 durchgängig entlang der gesamten Bohrlochkontur deutlich erkennbar einen hohen Feuchtegehalt auf.
- (5) Zu den Observationsterminen am 23.11.2011 und am 23.05.2012 verlagert sich die Grenze, ab der das Gestein entlang der Bohrlochkontur durchgängig deutlich erkennbar durchfeuchtet ist, in eine Teufe von $t_{BL} \approx 1,7$ m.
- (6) Zu den Observationsterminen am 28.08.2013 und am 14.05.2014 verlagert sich die Durchfeuchtungsgrenze weiter in Richtung des Bohrlochtiefsten in eine Teufe von $t_{BL} \approx 2,1$ m beziehungsweise $t_{BL} \approx 2,2$ m.
- (7) Zu allen sieben Observationszeitpunkten konnten geringe Mengen von im Bereich der Bohrlochsohle in Richtung des Bohrlochmundes heruntersickerndem Wasser innerhalb des Bohrlochs GSM 45 observiert werden.

- (8) Eine diskrete Zuflussstelle von Wasser in das Bohrloch GSM 45 hinein ist bei der Analyse der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera nicht detektierbar gewesen

(e) Observationsbohrloch GSM 90

(e 1) Lage und Orientierung des Bohrlochs GSM 90

Eine sich deutlich von den zeitlichen Entwicklungen des Tragverhaltens in den übrigen vier GSM-Bohrlöchern abhebende Entwicklung des Tragverhaltens zeigt sich im Bohrloch GSM 90. Wie Bild 3.93 entnommen werden kann, verläuft das Bohrloch GSM 90 horizontal vom östlichen Stoß der Gallery 08 aus in Richtung Osten in das Gebirge hinein.

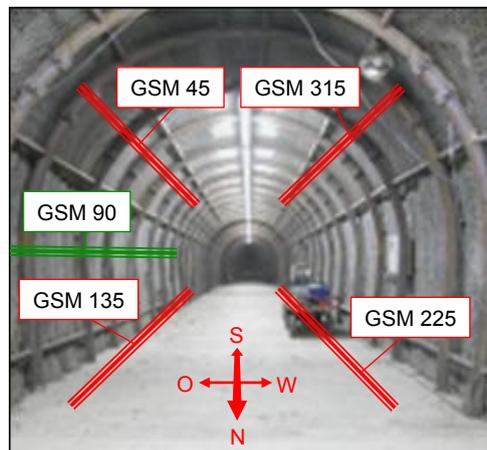


Bild 3.93: Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit schematisch dargestellter Anordnung des Bohrlochs GSM 90 (Bohrlochverlauf horizontal Richtung Osten) sowie der vier weiteren observierten GSM-Bohrlöcher

Das Bohrloch GSM 90 weist somit als einziges der GSM-Bohrlöcher einen schichtungsp parallelen Verlauf auf. Darüber hinaus ist es direkt in Richtung der in Abschnitt 3.2.2 ausführlich beschriebenen Hauptstörungszone des URL Tournemire orientiert. Das Bohrloch GSM 90 ist das einzige der fünf observierten GSM-Bohrlöcher, in dem es zu einem partiellen Verbruch der Bohrlochkontur mit der Ausbildung von größeren Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus gekommen ist. Der Verbruch der Bohrlochkontur hat sich innerhalb des ersten Jahres des Observationszeitraums ereignet und ist bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* ausführlich diskutiert worden. Nachfolgend soll die zeitabhängige Entwicklung des Tragverhaltens und aus gegebenem Anlass insbesondere die Entwicklung des geohydraulischen Verhaltens innerhalb des Bohrlochs GSM 90 über den insgesamt ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum hinweg betrachtet werden. Zur Diskussion der inner-

halb des Observationsbohrlochs GSM 90 ablaufenden zeitabhängigen Prozesse werden die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus den beiden Teufenbereichen herangezogen, die aufgrund der hohen Signifikanz der dort innerhalb des Observationszeitraum auftretenden Veränderungen der geomechanischen und geohydraulischen Bedingungen bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* detailliert betrachtet worden sind.

(e 2) *Ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation des Bohrlochs GSM 90*

Nachfolgend wird die Entwicklung der Bohrlochkontur in den Teufenbereichen des Bohrlochs GSM 90 von $t_{BL} \approx 3,1$ m bis $t_{BL} \approx 3,3$ m und von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m im Observationszeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014 anhand der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera dargestellt. Bild 3.94 zeigt zunächst die Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,1$ m und $t_{BL} \approx 3,3$ m.

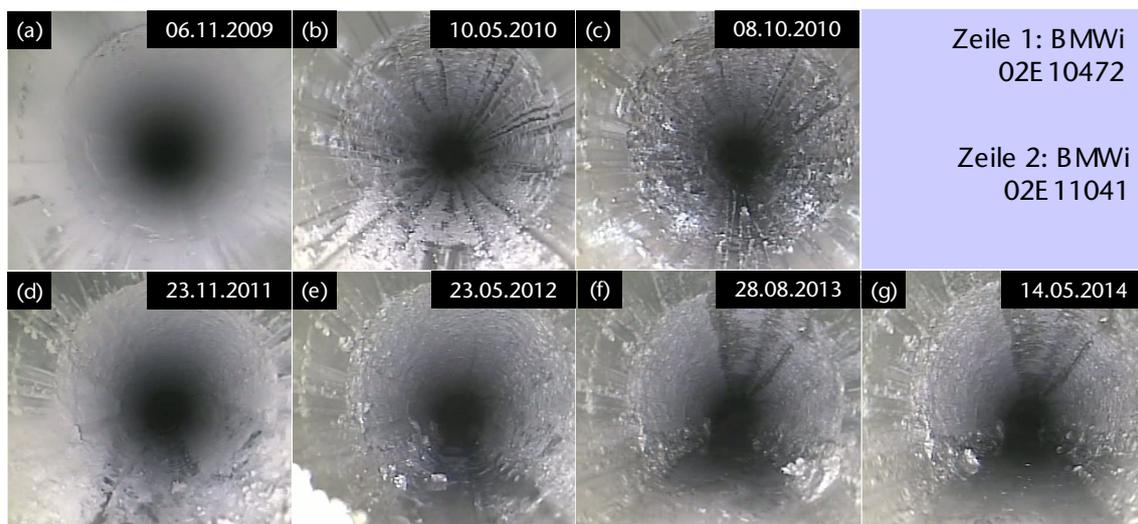


Bild 3.94: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung der Bohrlochkontur im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,1$ m bis $t_{BL} \approx 3,3$ m innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014

Die in Bild 3.94(a) dargestellte Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 06.11.2009 zeigt eine durchgängig trockene Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,1$ m und $t_{BL} \approx 3,3$ m. Obwohl die Bohrlochwand zum Zeitpunkt der Erstbefahrung noch zum Teil mit Bohrstaub bedeckt ist, ist bereits auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 06.11.2009 eine ringförmige Struktur im Gestein der Bohrlochwand identifizierbar. Bild 3.95 zeigt eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.94(a), auf der die zum

Zeitpunkt der Entstehung der Aufnahme relativ schwer zu erkennende ringförmige Struktur im Gestein der Bohrlochwand durch rote Pfeile grafisch hervorgehoben wird.

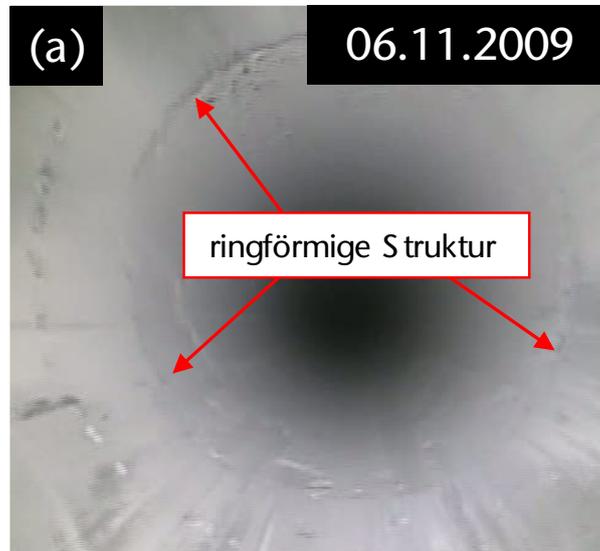


Bild 3.95: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.94(a) mit einer grafischen Kennzeichnung der ringförmigen Struktur im Gestein der Bohrlochwand, Lux et al. (2012)

Beim Betrachten von Bild 3.94(b) erweckt die Bohrlochwand des Bohrlochs GSM 90 auf der dort dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera keinen staubigen und trockenen Eindruck mehr, so wie es noch ca. 6 Monate vorher in Bild 3.94(a) der Fall ist. Vielmehr vermittelt die auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zu betrachtende Bohrlochwand im vorderen Abschnitt des betrachteten Teufenbereiches einen feucht glänzenden Eindruck. Ab der Teufe der in Bild 3.95 grafisch hervorgehobenen ringförmigen Struktur wechselt schlagartig die Beschaffenheit der Bohrlochwand. Die Bohrlochwand wirkt im Teufenbereich jenseits der ringförmigen Struktur unregelmäßig in ihrer Beschaffenheit und sie erweckt beim Betrachten von Bild 3.94(b) durchgängig einen aufgeweichten Eindruck.

Noch etwas deutlicher als in Bild 3.94(b) ist der Teufenbereich mit der aufgeweichten Bohrlochwand auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.94(c) zu erkennen. Die über einen Zeitraum von mindestens fünf Monaten hinweg andauernde starke Feuchtigkeit im Bereich der Bohrlochwand hat trotz der stark veränderte Beschaffenheit der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,1$ m und $t_{BL} \approx 3,3$ m innerhalb des ersten Jahres nicht zu Konturbrüchen mit Abschalungen geführt. Auch innerhalb der nächsten ca. dreieinhalb Jahre des Observationszeitraums ereignen sich keinerlei bruchhafte Veränderungen der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich, zu entnehmen aus der Betrachtung der Serie

von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.94(d) bis Bild 3.94(g). Trotz des Vorhandenseins der in Bild 3.95 grafisch hervorgehobenen präexistenten, ringförmigen Strukturen entlang der Bohrlochkontur und trotz der bereits ab dem zweiten Observationstermin am 10.05.2010 observierten, mit optisch detektierbaren Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit einhergehenden Durchfeuchtung des Gesteins entlang der Bohrlochwand erweist sich die Bohrlochkontur bis zum Ende des Observationszeitraums am 14.05.2014 als standfest.

Als deutlich spektakulärer als die geomechanischen Befunde erweisen sich die Befunde zum geohydraulischen Verhalten innerhalb des Teufenbereichs zwischen $t_{BL} \approx 3,1$ m und $t_{BL} \approx 3,3$ m. Während die Bohrlochwand beim Betrachten der in Bild 3.94(b) bis Bild 3.94(d) dargestellten Aufnahmen, die zwischen dem 10.05.2010 und dem 23.11.2011 entstanden sind, zwar einen durchfeuchteten Eindruck erweckt, ist zu diesen Zeitpunkten kein Sickerwasser im Bereich der Bohrlochsohle observierbar. Beim Betrachten der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 23.05.2012 ist erstmals das Vorhandensein von dem Bohrloch GSM 90 zugesickertem Wasser im Bereich der Bohrlochsohle aufgrund der glatten Beschaffenheit des Gesteins im Bereich der Bohrlochsohle sowie aufgrund der Tatsache, dass sich ein aus der Bohrlochwand herausgelöstes Gesteinsstück in der Bohrlochsohle spiegelt, zu erahnen. Deutlich größere Mengen von Wasser im Bereich der Bohrlochsohle, die während der Befahrung des Bohrlochs mit der Axial-Bohrlochkamera vor der Kamera hergetrieben werden, sind auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.94(f) und Bild 3.94(g) zu erkennen, die zu den letzten beiden Observationszeitpunkten am 28.08.2013 und am 14.05.2014 entstanden sind.

Die Aufnahmenserie in Bild 3.94 dokumentiert somit, wie innerhalb eines unmittelbar nach dem Abteufen zunächst trockenen Bohrlochs ca. ein halbes Jahr nach dem Abteufen eine Durchfeuchtung der Bohrlochwand auftritt, die zunächst ca. anderthalb Jahre lang anhält, ohne dass das Vorhandensein von freiem Sickerwasser innerhalb des Bohrlochs festgestellt werden kann, bevor zum Observationszeitpunkt am 23.05.2012 in etwa zweieinhalb Jahre nach dem Abteufen erstmals das Vorhandensein von zugesickertem Wasser im Bereich der Bohrlochsohle observiert werden kann. Des Weiteren ist der Aufnahmenserie in Bild 3.94 zu entnehmen, dass die Menge an zugesickertem Wasser im Bereich der Bohrlochsohle knapp vier Jahre nach dem Abteufen stark zugenommen hat und dass sich auch zum letzten Observati-



onstermin ca. viereinhalb Jahre nach dem Abteufen eine beträchtliche Menge an Sickerwasser im Observationsbohrloch GSM 90 befindet.

Eine quantitative Einschätzung der innerhalb des horizontal verlaufenden Observationsbohrlochs GSM 90 aufgestauten Wassermenge ist anhand der durchgeführten Observationsarbeiten mit der Axial-Bohrlochkamera nicht möglich. Auf Basis der Betrachtung von Bild 3.94(f) und Bild 3.94(g) kann jedoch von einer erheblichen Menge von dem Bohrloch GSM 90 zugetretenem Sickerwasser ausgegangen werden. Bei der Betrachtung von Bild 3.94(f) und Bild 3.94(g) ist zu berücksichtigen, dass lediglich der Anteil des zugesickerten Gebirgswassers auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu betrachten ist, der sich im Bereich der Bohrlochsohle des horizontal abgeteufte Observationsbohrlochs GSM 90 im Bereich von Unebenheiten oder hinter verbrochenem Gesteinsmaterial aufgestaut hat und der während der Befahrung des Bohrlochs mit der Axial-Bohrlochkamera gemeinsam mit plastifiziertem Gesteinsmaterial vor der Kamera her geschoben wird. Es ist anzunehmen, dass ein beträchtlicher Teil des dem Bohrloch GSM 90 zugesickerten Wassers aus dem Bohrlochmund heraus geflossen ist oder bereits innerhalb des Bohrlochs GSM 90 verdunstet ist. Des Weiteren ist anzumerken, dass größere Mengen von Wasser auch im Rahmen der Befahrungen des Bohrlochs von der Axial-Bohrlochkamera aus dem Bohrloch heraus transportiert worden sind. Die tatsächlich dem Observationsbohrloch GSM 90 zugetretene Wassermenge dürfte somit höchstwahrscheinlich deutlich größer sein als es die Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera erahnen lässt.

Einen sehr viel deutlicheren Eindruck von der Intensität der innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 90 insbesondere innerhalb der letzten zwei Jahre des Observationszeitraums ablaufenden hydraulischen Prozesse vermittelt die Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96. Deutlich anders als im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,1$ m und $t_{BL} \approx 3,3$ m gestaltet sich auch die Entwicklung des Tragverhaltens der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m, wie ebenfalls den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96 entnommen werden kann.

Entlang einer präexistente Struktur in der Bohrlochwand kommt es im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m in Verbindung mit dem Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes im Gestein der Bohrlochwand zur Ausbildung einer große Teile der Bohrlochkontur betreffenden Abplatzung von Gestein aus der Bohrlochwand heraus. Bereits in der auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96(a) zu betrachtenden staubigen und trocken wirkenden

Bohrlochwand ist ein Strukturelement im Gestein der Bohrlochwand zu erkennen, entlang dessen es später im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 10.05.2010 zur Ausbildung einer massiven Schädigung der Bohrlochwand gekommen ist. Bild 3.97 zeigt eine Vergrößerung von Bild 3.96(a), in der die präexistenten Strukturelemente in der Bohrlochwand durch Pfeile gekennzeichnet sind.

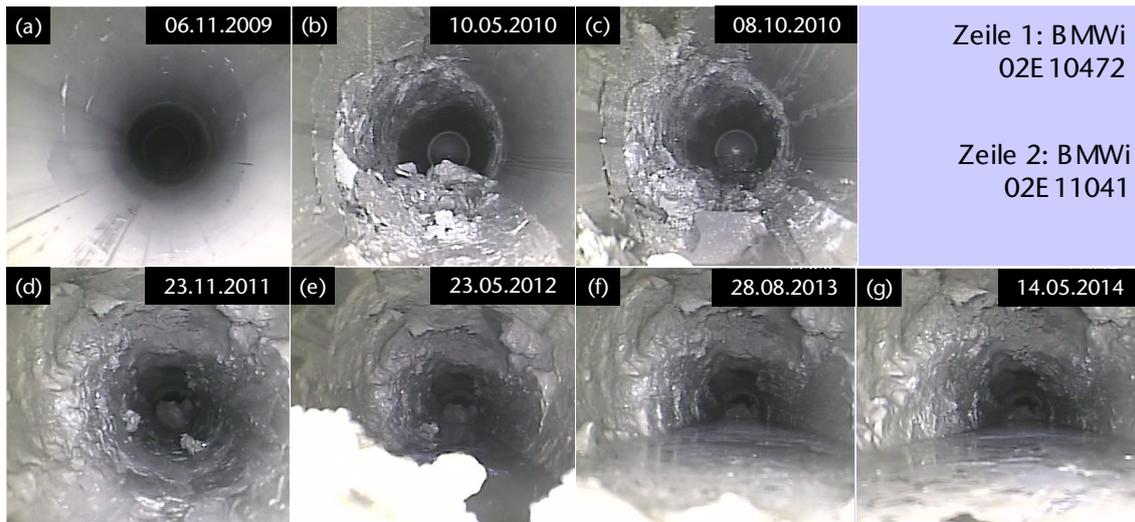


Bild 3.96: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung der Bohrlochwand im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014

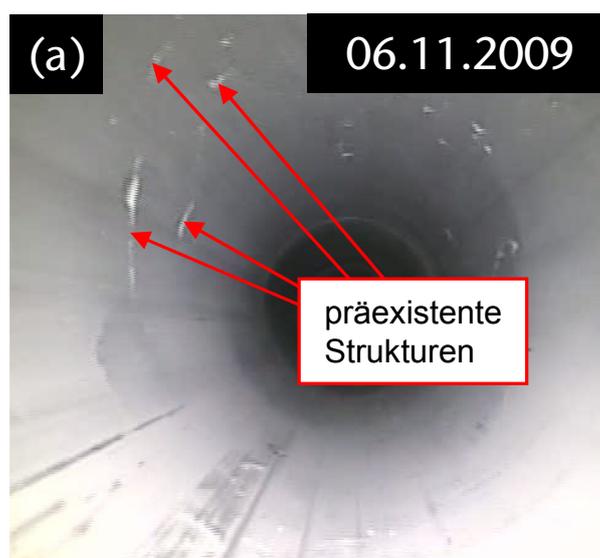


Bild 3.97: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.96(a) mit einer grafischen Kennzeichnung der präexistenten Strukturen im Gestein der Bohrlochwand, Lux et al. (2012)



In Bild 3.96(b) ist die stark geschädigte Bohrlochwand in einer am 10.05.2010 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera zu betrachten. Besonders entlang der linken Hälfte der Bohrlochkontur ist ein großer Bereich entstanden, in dem sich Gestein aus der Bohrlochwand heraus gelöst hat. Große Mengen losen Gesteins liegen aufgehäuft im Bereich der Bohrlochsohle. Darüber hinaus ist Bild 3.96(b) zu entnehmen, dass im Vorfeld des stark geschädigten Bohrlochwandbereiches weiteres Gestein beginnt, sich aus der Bohrlochwand heraus zu lösen. Die Betrachtung der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96(c) zeigt, dass die Gesteinsabschalungen im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 5,1$ m und $t_{BL} \approx 5,3$ m bis zum 08.10.2010 weiter vorangeschritten sind. Eine vergrößerte Darstellung von Bild 3.96(c) kann in Bild 3.98 betrachtet werden.

In Bild 3.98 sind drei signifikante Auswirkungen der zeitabhängigen Entwicklung innerhalb des Bohrlochs GSM 90 zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 grafisch hervorgehoben:

- (1) die Ausbildung einer großen Gesteinsabplatzung im Firstbereich des betrachteten Bohrloch-Teufenbereiches,
- (2) das weitere Voranschreiten der Ablösung von Gestein aus der Bohrlochwand heraus entlang der präexistenten Strukturen und
- (3) die Aufstauung von Wasser durch das in der Bohrlochsohle liegende Gesteinshaufwerk jenseits des Teufenbereiches mit der stark geschädigten Bohrlochwand.

Bezüglich der Entwicklung des beobachteten hydraulisch-mechanisch gekoppelten Tragverhaltens im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m des Bohrlochs GSM 90 ist die Frage zu formulieren, ob hier in erster Linie das hauptsächlich mechanisch bedingte Versagen der Bohrlochwand entlang von präexistenten Strukturen einen starken Wasserzutritt ermöglicht hat oder ob in dem schichtungsparell ausgerichteten Bohrloch GSM 90 in erster Linie ein lokaler starker Wasserzutritt das Versagen der Bohrlochwand entlang von präexistenten Strukturen beschleunigt hat. Auf Basis der im Rahmen dieses Vorhabens und im Rahmen des vorangegangenen Vorhabens im Bohrloch GSM 90 generierten Observationsdaten kann keine wissenschaftlich belegte Aussage darüber getroffen werden, ob im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m das Wasser primär entlang präexistenter Strukturen oder doch eher entlang hydraulisch leitfähiger Schichtflächen oder vielleicht sogar gleichmäßig entlang der Porenräume der Gesteinsmatrix dem Bohrloch GSM 90 zugetreten ist, um dort zu einer



Bild 3.98: Vergrößerte Darstellung von Bild 3.96(c) mit einer grafischen Kennzeichnung von einer Gesteinsabplatzung im Firstbereich, einer fortschreitenden Herauslösung von Gestein aus der Bohrlochwand heraus sowie von aufgestautem Sickerwasser im hinteren Teufenbereich des Bohrlochs GSM 90, Lux et al. (2012)

Schwächung der Bohrlochwand zu führen, aus der schließlich die in Bild 3.98 zu beobachtenden Schädigungen der Bohrlochwand resultiert haben. Ebenfalls nicht beantwortet werden kann die Frage, ob es auch bei einem weniger intensiven Wasserzutritt in das Bohrloch GSM 90 hinein und einem somit auch geringeren Feuchtegehalt des Gesteins der Bohrlochwand entlang der präexistente Strukturen im Gestein der Bohrlochwand zu ähnlich stark ausgeprägten Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus gekommen wäre, wie sie sich tatsächlich im Bohrloch GSM 90 ereignet haben und wie sie in Bild 3.96(b) und Bild 3.96(c) zu betrachten sind.

Definitiv feststellen lässt sich anhand der Betrachtung der Aufnahmenserie in Bild 3.96, dass es im Observationszeitraum nach dem 08.10.2010 zu einer Zunahme der hydraulischen Aktivität im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m gekommen ist. Auf der in Bild 3.96(d) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 23.11.2011 ist zwar kein im Bereich der Bohrlochsohle aufgestautem Sickerwasser zu erkennen, jedoch wirkt das Gestein entlang der gesamten Bohrlochkontur feuchter und aufgeweichter als auf der gut ein Jahr älteren Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96(c). Insbesondere im Bereich des Bohrlochfirstes ist es zu weiteren Ablösungen von Gestein aus der Bohrlochwand heraus und somit zu einer Aufweitung der Bohrlochkontur gekommen. Allerdings sind aufgrund der Aufweichung des Gesteins entlang der Bohrlochwand in Bild 3.96(d) keine eindeutigen Bruchstrukturen wie Abrisskanten oder sich eindeutig im Prozess der Herauslösung aus der



Bohrlochwand befindlichen Gesteinskörper entlang der Bohrlochkontur identifizierbar, wie es bei der Betrachtung von Bild 3.96(b) oder Bild 3.96(c) der Fall ist. Auch das lose im Bereich der Bohrlochsohle liegende, aus der Bohrlochwand herausgelöste Gestein wirkt auf der am 23.11.2011 entstandenen Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aufgeweichter und weit weniger spröde als auf den zu früheren Observationszeitpunkten entstandenen Aufnahmen. Große Teile des in Bild 3.96(b) und Bild 3.96(c) zu betrachtenden Gesteinshaufwerks sind offensichtlich vor der Befahrung des Bohrlochs GSM 90 am 23.11.2011 von der Axial-Bohrlochkamera aus dem hier betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m heraus transportiert worden. Bereits die in Bild 3.94(e) zu betrachtende Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,1$ m bis $t_{BL} \approx 3,3$ m vom 23.05.2012 lässt einen signifikanten Wasserzutritt zwischen dem 23.11.2011 und dem 23.05.2012 in das Bohrloch GSM 90 hinein erahnen. Weitaus deutlicher erkennbar ist der signifikante Wasserzutritt anhand der Betrachtung von Bild 3.96(e). Deutlich ist der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96(e) zu entnehmen, wie im Bohrloch befindliches Sickerwasser gemeinsam mit von der Kamera erfasstem, losem Gesteinsmaterial vor der Kamera hergeführt wird. Das verbrochene Gesteinsmaterial ist im unteren Bildbereich an seiner sehr hellen Färbung zu erkennen. Die sehr helle Färbung des eigentlich grau erscheinenden Toarcium-Tongesteins resultiert daraus, dass sich das Gestein im Moment der Aufnahme unmittelbar vor der Linse der Axial-Bohrlochkamera befindet und somit extrem stark von der die Linse der Kamera umgebenden LED-Beleuchtung aufgehellt wird.

Wie schon im Rahmen der Diskussion der Observationsergebnisse aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,1$ m bis $t_{BL} \approx 3,3$ m erläutert worden ist, ist es im Rahmen der Untersuchung des Bohrlochs GSM 90 nicht möglich gewesen zu ermitteln, in welchen Teufenbereichen das auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu betrachtende Sickerwasser dem Bohrloch GSM 90 zugetreten ist. Somit lässt sich auch für das auf der Aufnahme in Bild 3.96(e) zu betrachtende Wasser im Bereich der Bohrlochsohle keine belegbare Aussage darüber treffen, ob es sich überwiegend um im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m zugesickertes Wasser handelt oder um Wasser, das dem Bohrloch GSM 90 hauptsächlich in anderen Bohrlochteufenbereichen zugetreten ist und das im Rahmen der Befahrung des Bohrlochs GSM 90 zwischen der Axial-Bohrlochkamera und dem Bohrlochtiefsten in einer Teufe von $t_{BL} \approx 6,0$ m aufgestaut wird. Gegen Ende des Observationszeitraums zu den letzten beiden Observationszeitpunkten am 28.08.2013 und am 14.05.2014 nimmt die innerhalb des Bohrlochs GSM 90 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m zu observierende Menge an Sickerwasser

nochmals erheblich zu, wie den dazugehörigen Aufnahmen in Bild 3.96(f) und Bild 3.96(g) entnommen werden kann.

Während in der den Observationszeitraum vom 10.05.2010 bis zum 23.11.2011 repräsentierenden Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96(b) bis Bild 3.96(d) somit in erster Linie eine starke, zeitabhängig ablaufende mechanische Veränderung der Beschaffenheit der Bohrlochwand in Form von sich entlang von präexistente Strukturen ausbildenden Gesteinsherauslösungen bei einer nur moderaten Zunahme der zu beobachtenden hydraulischen Aktivität dokumentiert wird, lässt sich in der die letzten zwei Jahre des Observationszeitraums vom 23.05.2012 bis zum 14.05.2014 widerspiegelnden Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.96(e) bis Bild 3.96(g) eine starke zeitabhängige Zunahme der hydraulischen Aktivität innerhalb des Bohrlochs GSM 90 erkennen. Die mechanischen Prozesse verlangsamten sich dagegen innerhalb der letzten ca. zwei Jahre des Observationszeitraums zumindest in dem auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu erkennenden oberen Bereich der Bohrlochkontur deutlich und es kommt zu keinen weiteren signifikanten Herauslösungen von Gestein im Bohrlochfirstbereich.

Die Tatsache, dass es im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m des Bohrlochs GSM 90 zunächst innerhalb des ersten Jahres nach dem Abteufen zu einer starken Veränderung der mechanischen Beschaffenheit der Bohrlochwand kommt, bevor innerhalb des nächsten Jahres zunächst ein leichter Feuchtigkeitszutritt in das Bohrloch hinein zu beobachten ist und bevor schließlich innerhalb der letzten ca. zweieinhalb Jahre eine starke Zunahme der hydraulischen Aktivität observiert werden kann, legt die Schlussfolgerung nahe, dass sich im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,1$ m bis $t_{BL} \approx 5,3$ m und gegebenenfalls auch in weiteren Teufenbereichen des Bohrlochs GSM 90 zunächst entlang von präexistente Strukturen überwiegend mechanisch geprägte Veränderungen der Gebirgsbeschaffenheit ergeben haben, die dann später als bevorzugte hydraulische Wegsamkeiten gedient haben könnten, entlang derer sich größere Mengen von Gebirgswasser ihren Weg ins Innere des Observationsbohrlochs GSM 90 gebahnt haben.

Unabhängig davon, wie die mechanischen und die hydraulischen Prozesse in der Umgebung des Bohrlochs als Ursachen für den partiellen Verbruch des Bohrlochs GSM 90 sowie für den observierten starken Wasserzutritt zu gewichten sind, führt das Beispiel des Bohrlochs GSM 90 eindrucksvoll vor Augen, einen wie großen Einfluss auf das Tragverhalten eines Hohlraums lokale Inhomogenitäten mit einem verstärkten Zutritt von Porenwasser auch in-

nerhalb des URL Tournemire haben können. Dieses Observationsergebnis ist besonders interessant, da innerhalb des URL Tournemire ein eher als gering anzusehender Porenwasserdruck und im Grundsatz eine sehr geringe Gebirgspermeabilität vorliegen und darüber hinaus das dort anstehende Toarcium-Tongestein im Vergleich zu Tongesteinen anderer Standorte doch eher eine größere Festigkeit aufweist. Auch verdeutlicht dieses Observationsergebnis einmal mehr, welche signifikante Bedeutung dem vertieften Verständnis hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse in Tongesteinsformationen sowohl für die retrospektive Analyse des Tragverhaltens von Hohlräumen im Tongestein sowie insbesondere im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Tongesteinsformationen auch für die Prognose des Langzeit(trag)verhaltens von Betriebsstrecken und Einlagerungskammern zukommt.

(f) Observationsbohrloch GSM 135

(f 1) Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen im Bohrloch GSM 135

Einen Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit der schematischen Darstellung der Anordnung des Bohrlochs GSM 135 sowie der vier weiteren observierten GSM-Bohrlöcher zeigt Bild 3.99.

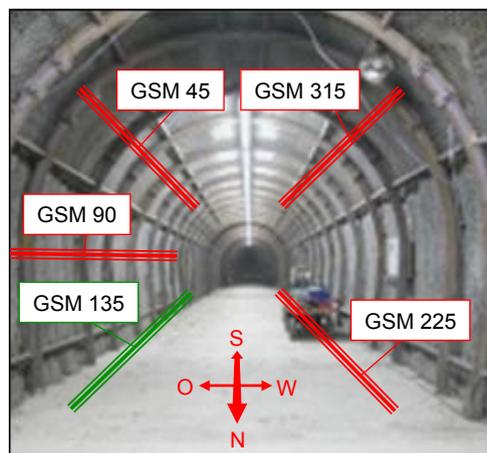


Bild 3.99: Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit schematisch dargestellter Anordnung des Bohrlochs GSM 135 (Bohrlochverlauf in östlicher Richtung schräg nach unten) und der vier weiteren observierten GSM-Bohrlöcher

In Bild 3.100 sind die Ergebnisse aller Messungen mit der Dreiarmkalibersonde aus dem Bohrloch GSM 135 dargestellt.

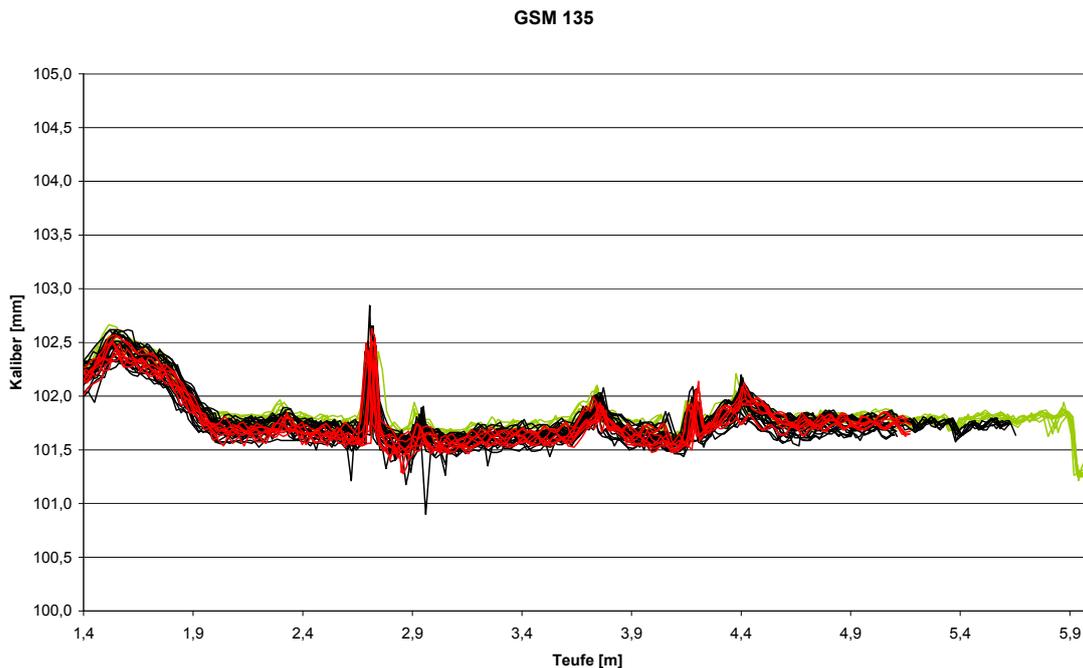


Bild 3.100: Zusammenstellung der Messergebnisse aller im Bohrloch GSM 135 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 23.05.2012 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der ersten Befahrung vom 06.11.2009 sind in Grün dargestellt, während die Messergebnisse der letzten Befahrung vom 23.05.2012 rot dargestellt werden.

Wie den vorangehenden Ausführungen in Abschnitt 3.2.4(b) und insbesondere der Darstellung in Bild 3.86(b) zu entnehmen ist, ist im Rahmen von *Lux et al. (2012)* auch aus den im Bohrloch GSM 135 generierten Messergebnissen eine deutlich erkennbare zeitabhängige Entwicklung bezüglich des Deformationsverhaltens des Bohrlochs GSM 135 identifiziert worden. Anhand der Betrachtung von Bild 3.86 kann festgestellt werden, dass die aus dem Vergleich der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde ableitbare Bohrlochkonvergenz zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 135 deutlich größer ist als innerhalb der drei weiteren mit der Dreiarmkalibersonde vermessenen GSM-Observationsbohrlöcher. Allerdings kann auch für das von der stärksten Bohrlochkonvergenz betroffene Observationsbohrloch GSM 135 aus der Betrachtung der weiteren Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde in Bild 3.100 keine eindeutig identifizierbare Fortsetzung des Konvergenzprozesses innerhalb des Bohrlochs GSM 135 im Observationszeitraum vom 08.10.2010 bis zum 23.05.2012 entnommen werden. Eine Observation des Bohrlochs an den letzten beiden Observationsterminen am 28.08.2013 und am 14.05.2014 ist, wie bereits in Abschnitt 3.2.4(a) erläutert worden ist, nicht möglich gewesen, da das Bohrloch GSM 135



nach dem 23.05.2012 vom IRSN mit einem fest installierten Packersystem versehen worden ist.

Trotz der stärker ausgeprägten Bohrlochkonvergenz zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 ähnelt das Deformationsverhalten des schräg nach unten in den östlichen Stoß abgeteufte Bohrlochs GSM 135 qualitativ stark dem Deformationsverhalten des schräg nach oben abgeteufte Bohrlochs GSM 45, wie einem Vergleich der Messergebnisse in Bild 3.88 und in Bild 3.100 entnommen werden kann. Die in Bild 3.100 in Grün dargestellten Messwertgraphen des ersten Befahrungstermins vom 06.11.2009 liegen zum Teil zwar minimal oberhalb der weiteren Messwertgraphen, werden aber zu großen Teilen auch von der weiteren Messwertgraphenschar überdeckt. Die im Vordergrund in Rot dargestellte Messwertgraphenschar des letzten Befahrungstermins vom 23.05.2012 liegt zwar leicht unterhalb der Messwertgraphen, die am 06.11.2009 aufgezeichnet worden sind, hebt sich jedoch nicht klar erkennbar von den an den weiteren Observationszeitpunkten generierten Messergebnissen ab. Während einige der in Bild 3.100 in Schwarz dargestellten Messwertgraphen, die zu den weiteren Observationszeitpunkten aufgezeichnet worden sind, oberhalb der Messwertgraphen vom 23.05.2012 verlaufen, verlaufen andere der zu den weiteren Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messwertgraphen auch unterhalb der roten Messwertgraphenschar vom 23.05.2012. Aus der in Bild 3.100 gewählten Darstellung der Messergebnisse ist somit keine eindeutige Fortsetzung der im Rahmen von *Lux et al. (2012)* identifizierten Bohrlochkonvergenz schlussfolgerbar. Die der Betrachtung von Bild 3.100 zu entnehmende relativ gute Übereinstimmung zwischen den Messwertgraphen der unterschiedlichen Befahrungen und insbesondere die Tatsache, dass die Messwertgraphen des letzten Befahrungstermins vom 23.05.2012 nicht eindeutig unterhalb der weiteren Messwertgraphen angeordnet sind, legen ebenfalls eher den bereits im Rahmen der Analyse der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde für das Observationsbohrloch GSM 45 formulierten Verdacht nahe, dass die insbesondere für den Observationszeitraum zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 identifizierten Bohrlochkonvergenzprozesse nach dem 08.10.2010 zum Erliegen gekommen sein könnten.

Zur detaillierten Analyse der Entwicklung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 135 sind in Bild 3.101 die Ergebnisse der zu jedem Observationszeitpunkt bei der Einfahrt unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 135 mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführten Messungen erneut dargestellt.

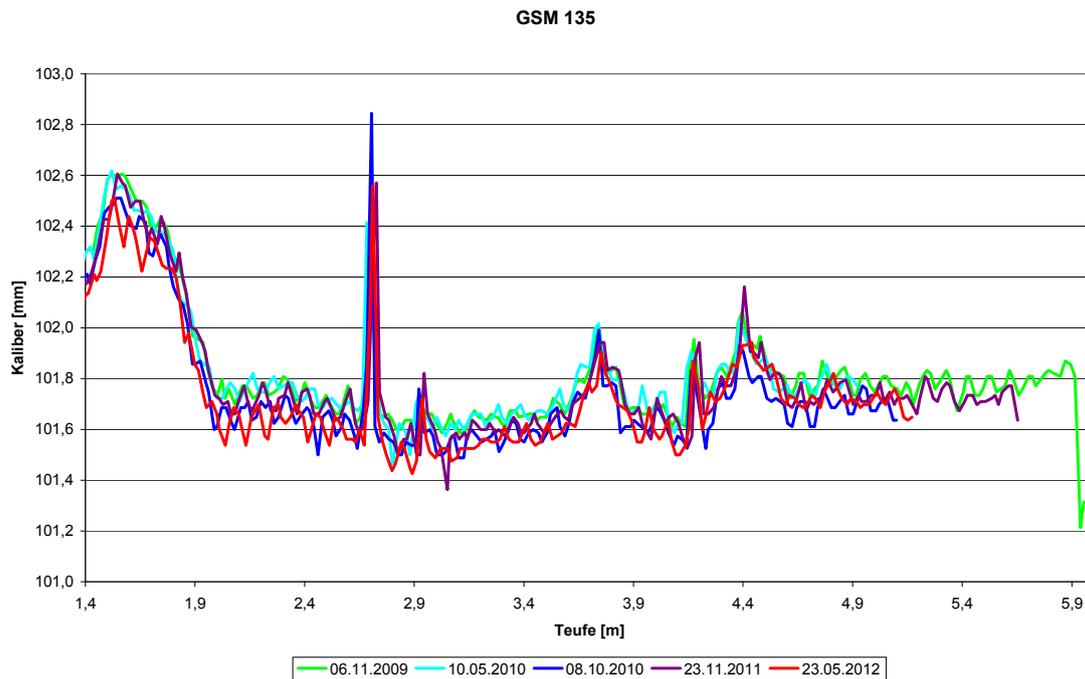


Bild 3.101: Zusammenstellung der Messergebnisse der Einfahrten unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 135 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 23.05.2012

Für die Darstellung der gemessenen Kaliberwerte ist in Bild 3.101 dieselbe sehr detaillierte Auflösung mit einer Skalierung der y-Achse zwischen $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 103 \text{ mm}$ gewählt worden, die auch für die Detaildarstellung der Messergebnisse aus dem Bohrloch GSM 45 angewendet worden ist. Auch die Zuordnung der Farben zu den Messwertgraphen entsprechend ihres jeweiligen Aufzeichnungsdatums erfolgt analog zur Farbzuordnung bei der Detaildarstellung der Messergebnisse aus dem Bohrloch GSM 45. Dem Messwertgraphen des Observationstermins vom 06.11.2009 ist dementsprechend die Farbe Grün zugewiesen worden und der Messwertgraph des darauf folgenden Observationstermins vom 10.05.2010 ist türkisfarben dargestellt. Die Graphen der Messergebnisse der nachfolgenden Observationstermine sind in zeitlich aufsteigender Reihenfolge in den Farben Blau (08.10.2010), Violett (23.11.2011) und Rot (23.05.2012) dargestellt. Somit enthält das Messwertdiagramm in Bild 3.101 insgesamt fünf Messwertgraphen.

Auch bei der Betrachtung der Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde in Bild 3.101 mit der gegenüber der Darstellung in Bild 3.100 nochmals deutlich erhöhten Auflösung bezüglich der gemessenen Kaliberwerte lässt sich für das gesamte Bohrloch GSM 135 nach dem 08.10.2010 keine weitere eindeutige zeitabhängig voranschreitende Bohrlochkon-



vergenz erkennen, wie sie zunächst für den Zeitraum zwischen den Observationszeitpunkten am 10.05.2010 und am 08.10.2010 festgestellt werden konnte.

Während für das Bohrloch GSM 135 zum Ende des vorangegangenen Forschungsvorhabens noch eine Bohrlochkonvergenz aus dem Vergleich der Messwertgraphen vom 10.05.2010 und dem 08.10.2010 heraus interpretiert worden ist, lässt sich hingegen bei der Betrachtung von Bild 3.101 eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen den drei Messwertgraphen feststellen, die zwischen dem 08.10.2010 und dem 23.05.2012 aufgezeichnet worden sind. Geringfügige Unterschiede bezüglich des Verlaufs der drei ab dem 08.10.2010 aufgezeichneten Messwertgraphen dürften bei der hier vorliegenden Feinheit der Auflösung der Ergebnisdarstellung in Bild 3.101 auf Unregelmäßigkeiten im Gestein entlang der Bohrlochwand sowie gegebenenfalls auf messtechnische Effekte zurückzuführen sein.

Die Tatsache, dass lediglich die erste Befahrung des Bohrlochs GSM 135 am 06.11.2009 bis zur Endteufe durchgeführt werden konnte, ist auf den bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* beschriebenen und im nachfolgenden Abschnitt im Rahmen der Vorstellung von ausgewählten Ergebnissen der Videoobservation nochmals thematisierten Wasserzutritt in das Bohrloch hinein zurückzuführen.

Die Ursache für den relativ starken Ausschlag aller in Bild 3.101 dargestellten Messwertgraphen im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m wird ebenfalls im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse der Bohrlochvideoobservation im nachfolgenden Abschnitt 3.2.4(f2) aufgezeigt.

Zusammenfassend kann bezüglich des mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde dokumentierten zeitabhängigen Deformationsverhaltens des Observationsbohrlochs GSM 135 geschlussfolgert werden, dass die Konvergenz der zwischen dem Abteufen am 06.11.2009 und der ersten Wiederholungsmessungen am 10.05.2010 zunächst weitestgehend unveränderten Bohrlochkontur, die zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 eingetreten ist, sich nach dem 08.10.2010 nicht klar erkennbar weiter fortgesetzt hat. Insgesamt scheinen die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus dem Observationsbohrloch GSM 135 wie zuvor auch schon die Messergebnisse aus dem Observationsbohrloch GSM 45 damit die bereits in *Lux et al. (2012)* formulierte These zu stützen, dass die zwischen dem zweiten und dem dritten Observationszeitpunkt am 10.05.2010 und am 08.10.2010 identifizierte Bohrlochkonvergenz auf Aufweichungsprozesse (*softening*) im Zuge der Wiederaufsättigung des zunächst durch den Bohrvorgang ausgetrockneten und somit entsättigten / teilgesättigten Gesteins in

der Umgebung der GSM-Bohrlöcher zurückzuführen ist. Nach dem Abschluss des Wiederaufsättigungsprozesses sind dann scheinbar keine weiteren zeitabhängigen Aufweichungsprozesse im Gestein in der Umgebung der Bohrlochkontur mehr abgelaufen, sodass keine weiteren signifikanten, mittels der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde feststellbaren Bohrlochkonturveränderungen nach dem 08.10.2010 mehr eingetreten sind.

(f 2) *Ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation des Bohrlochs GSM 135*

Bild 3.102 zeigt Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m. Auf allen fünf in Bild 3.102 dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera ist eine ringförmige Struktur zu erkennen, die sich optisch deutlich von den übrigen Bohrlochwandbereichen des Bohrlochs GSM 135 im hier betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m abhebt.

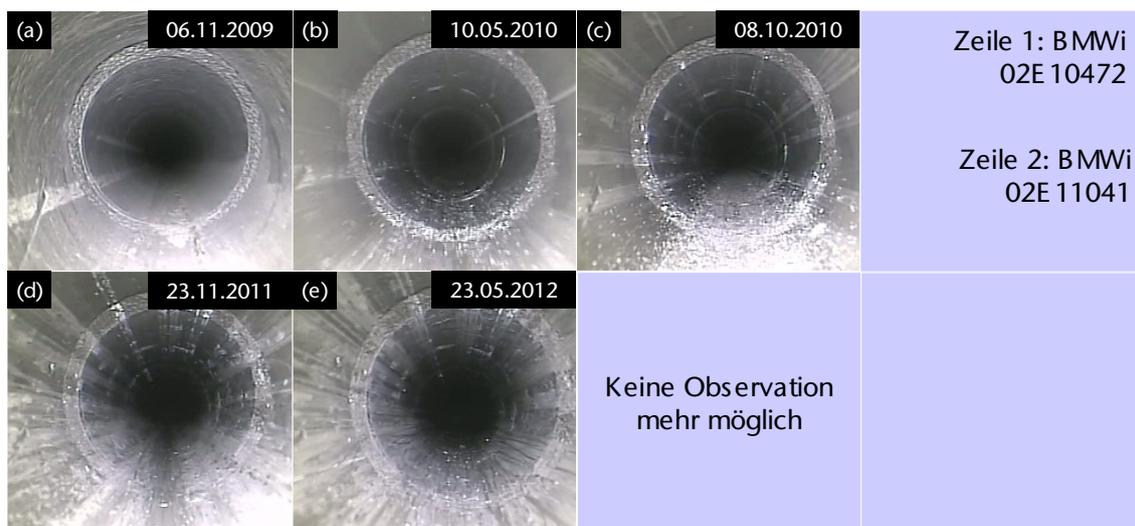


Bild 3.102: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung der Bohrlochkontur im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 23.05.2012

Die ringförmig um die gesamte Bohrlochkontur herum reichende Struktur stellt die Ursache für die den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde in Bild 3.101 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m zu entnehmende Aufweitung des Bohrlochquerschnitts dar. Passend zu der Tatsache, dass die zu den unterschiedlichen Observationszeitpunkten aufgezeichneten Messergebnisse aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m nur um wenige Zehntelmillimeter differieren und passend zu der Tatsache, dass sich aus den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde keine eindeutige zeitabhängige Entwicklung bezüglich des De-



formationsverhaltens für den Teufenbereich von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m herausinterpretieren lässt, zeigen auch die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.102 keine größeren, anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen identifizierbaren Veränderungen bezüglich des Trag- und Deformationsverhaltens oder bezüglich des geohydraulisch-geomechanisch gekoppelten Verhaltens im dargestellten Teufenbereich innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 23.05.2012.

So entsteht bei der optischen Begutachtung nicht der Eindruck, als würde das Gestein der Bohrlochwand im Bereich der ringförmigen Struktur aufweichen oder in irgendeiner anderen Form seine Beschaffenheit verändern. Darüber hinaus erweist sich die Bohrlochwand über den gesamten Observationszeitraum hinweg als standfest.

Aufgrund der Unveränderlichkeit der ringförmigen Struktur im gesamten Observationszeitraum liegt die Annahme nahe, dass im betrachteten Teufenbereich ein Festgesteinseinschluss beim Abteufen des Bohrlochs GSM 135 durchteuft worden ist. Bezüglich der zeitabhängigen Entwicklung des Teufenbereichs von $t_{BL} \approx 2,6$ m bis $t_{BL} \approx 2,8$ m lässt sich anhand der optischen Begutachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera lediglich feststellen, dass der Feuchtigkeitsgehalt des Gesteins der Bohrlochwand zwischen dem ersten Observationstermin am 06.11.2009 und dem zweiten Observationstermin am 10.05.2010 deutlich zugenommen hat. Während die Bohrlochwand auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 06.11.2009 in Bild 3.102(a) beim Betrachten einen matten und daher eher trockenen Eindruck hinterlässt, glänzt die Bohrlochwand auf den weiteren vier in Bild 3.102 zu betrachtenden Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera feucht.

Die Entwicklung des Bohrlochteufenbereichs zwischen $t_{BL} \approx 2,6$ m und $t_{BL} \approx 2,8$ m kann als repräsentativ für das sehr gute Tragverhalten der Bohrlochwand des gesamten Bohrlochs GSM 135 angesehen werden, da es, wie die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde es bereits haben vermuten lassen, an keiner Stelle des Bohrlochs GSM 135 zur Ausbildung einer Gesteinsabplatzung oder einer Gesteinsablösung aus der Bohrlochwand heraus gekommen ist.

Während die Bohrlochwand im Teufenbereich des Bohrlochs GSM 135 zwischen dem Bohrlochmund und einer Teufe von $t_{BL} \approx 5,0$ m am 06.11.2009 trocken erscheint, hat die Auswertung des am 06.11.2009 von der Axial-Bohrlochkamera aufgenommenen Videos aufgezeigt, dass die Bohrlochwand im Bereich des letzten Teufenmeters vor dem Bohrlochtiefsten bereits zum Zeitpunkt der Erstbefahrung einen optisch deutlich erkennbar erhöhten Feuchtegehalt hatte. Der Feuchtigkeitsgehalt im hinteren Abschnitt des Bohrloch GSM 135 ist bereits am

ersten Observationstermin derart hoch gewesen, dass sich etwas Wasser am Bohrlochtiefsten angesammelt hat. Dieser Sachverhalt kann Bild 3.103(a) entnommen werden.



Bild 3.103: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung der Bohrlochkontur im Teufenbereich unmittelbar am Bohrlochtiefsten innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 23.05.2012 mit einem vorübergehenden Anstieg des Sickerwasserspiegels

Die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.103(b) und Bild 3.103(c) zeigen, dass sich zwischen dem zweiten und dem dritten Observationszeitpunkt weiteres Wasser am Bohrlochtiefsten des unter $\delta = 45^\circ$ schräg nach unten orientierten Bohrlochs GSM 135 angesammelt hat. Bild 3.103(b) kann entnommen werden, dass bis zum 10.05.2010 der Wasserspiegel des am Bohrlochtiefsten aufgestauten Wassers gegenüber dem 06.11.2009 um etwa $\Delta h_w \approx 0,1$ m angestiegen ist. Bild 3.103(c) zeigt, dass der Wasserspiegel zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 um in etwa weitere $\Delta h_w \approx 0,1$ m angestiegen ist. Aus dem zu beobachteten Anstieg des Wasserspiegels am Bohrlochtiefsten des Bohrlochs GSM 135 lässt sich grob eine Zuflussrate von in etwa $Q \approx 2$ l/a für das Bohrloch GSM 135 herleiten. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der ermittelten Zuflussrate um eine grobe Näherung handelt, da die Teufenzählung der Axial-Bohrlochkamera nur den Dezimeterbereich auflösen kann und da Verdunstungseffekte und Versickerungseffekte nicht berücksichtigt werden können.

Im Rahmen dieses Vorhabens ist der Versuch unternommen worden, die in Lux et al. (2012) begonnene Dokumentation der Ansammlung von Sickerwasser im Teufenbereich unmittelbar vor dem Bohrlochtiefsten fortzuführen, um so Rückschlüsse auf die weitere zeitabhängige Entwicklung der geohydraulischen Aktivität innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 135

ziehen zu können und um gegebenenfalls weitere Wasserzuflussraten in das Bohrloch ermitteln zu können. Wie der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.103(d) und Bild 3.103(e) zu entnehmen ist, ist jedoch zwischen dem 08.10.2010 und dem 23.11.2011 ein starker Rückgang der im Bereich des Bohrlochtiefsten aufgestauten Sickerwassermenge zu verzeichnen, während im Anschluss daran zwischen dem 23.11.2011 und dem 23.05.2012 scheinbar eine Stagnation des Wasserzutritts in das Bohrloch GSM 135 erfolgt. Der scheinbare Rückgang bzw. die Stagnation der innerhalb des Bohrlochs befindlichen Wassermenge ist jedoch nicht auf eine Abnahme der geohydraulischen Aktivität oder auf eine wie auch immer geartete sonstige geomechanische oder geohydraulische Ursache zurückzuführen, sondern auf die Tatsache, dass aus dem Bohrloch GSM 135 in den Jahren 2011 und 2012 mehrfach durch das IRSN Gebirgswasser zur chemischen Analyse entnommen worden ist. Bezüglich der entnommenen Wassermengen liegen bedauerlicherweise keine verlässlichen Informationen vor.

Einen Hinweis auf die Ursache für den recht starken Wasserzutritt im Bohrloch GSM 135 gibt die in Bild 3.104 dargestellte Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera.

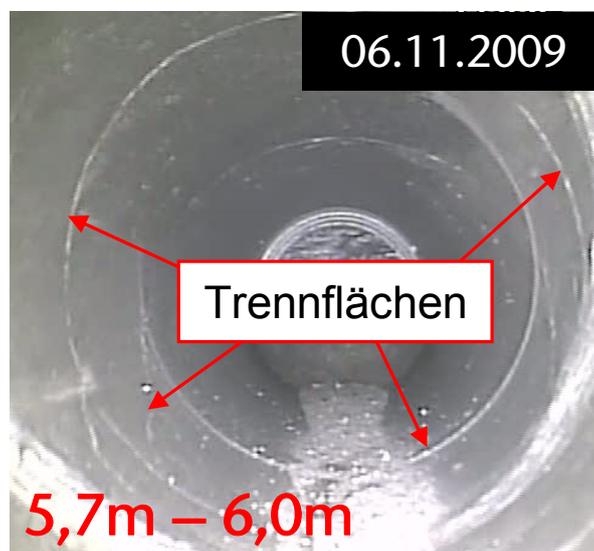


Bild 3.104: Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,7$ m bis zum Bohrlochtiefsten mit der grafischen Kennzeichnung von in der Bohrlochwand zu erkennenden Trennflächen, Lux et al. (2012)

Die Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.104 zeigt zahlreiche linienartige Strukturen in der Bohrlochwand, bei denen es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um Trennflächen handelt, die zu den Randbereichen der in Bild 3.63 dargestellten Hauptstörungszone gehören. Bedingt durch das Vorhandensein zahlreicher Trennflächen herrscht im hinteren Teufenbe-

reich des Bohrlochs GSM 135 offensichtlich eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit des Gebirges, die schließlich zu dem relativ gesehen starken observierten Wasserzutritt geführt hat.

(g) Observationsbohrloch GSM 225

(g 1) Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen im Bohrloch GSM 225

Wie beim Bohrloch GSM 135 handelt es sich auch beim Bohrloch GSM 225 um ein schräg nach unten in die Sohle der Gallery 08 abgeteuftes Bohrloch. Allerdings ist das Bohrloch GSM 225 entsprechend Bild 3.105 auf der westlichen Seite schräg nach unten in die Sohle der Gallery 08 abgeteuft worden.

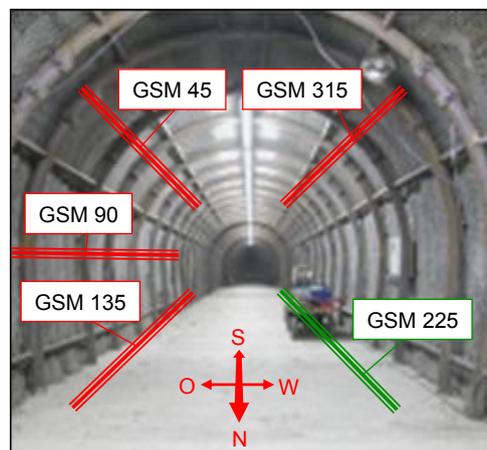


Bild 3.105: Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit schematisch dargestellter Anordnung des Bohrlochs GSM 225 (Bohrlochverlauf in westlicher Richtung schräg nach unten) sowie der vier weiteren observierten GSM-Bohrlöcher

Die Ergebnisse der mit der Dreiarmlkalibersonde durchgeführten Messungen im Bohrloch GSM 225 sind in Bild 3.106 dargestellt.

Wie den vorangehenden Ausführungen in Abschnitt 3.2.4(b) und insbesondere der Darstellung in Bild 3.86(c) zu entnehmen ist, ist im Rahmen von *Lux et al. (2012)* aus den im Bohrloch GSM 225 generierten Messergebnissen im Observationszeitraum vom 06.11.2009 bis zum 08.10.2010 eine zwar nicht so deutlich wie in den auf der östlichen Seite der Gallery 08 abgeteufte und vorangehend diskutierte Observationsbohrlöchern GSM 45 und GSM 135 ausgeprägte, aber dennoch deutlich erkennbare zeitabhängige Entwicklung bezüglich des Deformationsverhaltens des Bohrlochs GSM 225 identifiziert worden. Die weitere zeitabhängige

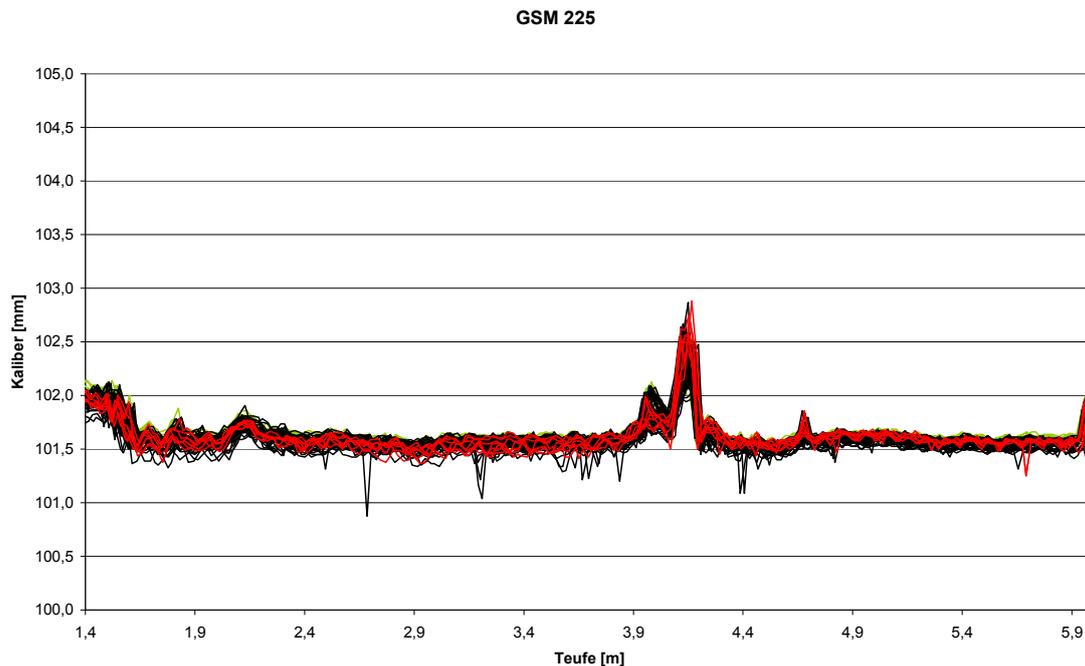


Bild 3.106: Zusammenstellung der Messergebnisse aller im Bohrloch GSM 225 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der ersten Befahrung vom 06.11.2009 sind in Grün dargestellt, während die Messergebnisse der letzten Befahrung vom 14.05.2014 rot dargestellt werden.

Entwicklung der Deformationsprozesse innerhalb des Bohrlochs GSM 225 nach dem 08.10.2010 ähnelt sehr stark der zeitabhängigen Entwicklung in den Observationsbohrlöchern GSM 45 und GSM 135. Daher ist auch der Betrachtung von Bild 3.106 keine eindeutig identifizierbare Fortsetzung des Konvergenzprozesses innerhalb des Bohrlochs GSM 225 im Observationszeitraum vom 08.10.2010 bis zum 14.05.2014 zu entnehmen. Die in Bild 3.106 in Grün dargestellten Messwertgraphen des ersten Befahrungstermins vom 06.11.2009 liegen zum Teil zwar minimal oberhalb der weiteren Messwertgraphen, werden aber zu sehr großen Teilen auch von der weiteren Messwertgraphenschar überdeckt.

Die im Vordergrund in Rot dargestellte Messwertgraphenschar des letzten Befahrungstermins vom 14.05.2014 liegt zwar leicht unterhalb der Messwertgraphen, die am 06.11.2009 aufgezeichnet worden sind, hebt sich jedoch nicht klar erkennbar von den an den weiteren Observationszeitpunkten generierten Messergebnissen ab, sodass sich auf Basis der Betrachtung der Messwertgraphen aller Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde auch für das Bohrloch GSM 225 keine Fortsetzung des in *Lux et al. (2012)* beschriebenen Konvergenzprozesses im Observationszeitraum zwischen dem 08.10.2010 und dem 14.05.2014 identifizieren lässt.

Zur detaillierten Analyse der Entwicklung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 225 sind in Bild 3.107 die Ergebnisse der zu jedem Observationszeitpunkt bei der Einfahrt unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 225 mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführten Messungen erneut dargestellt.

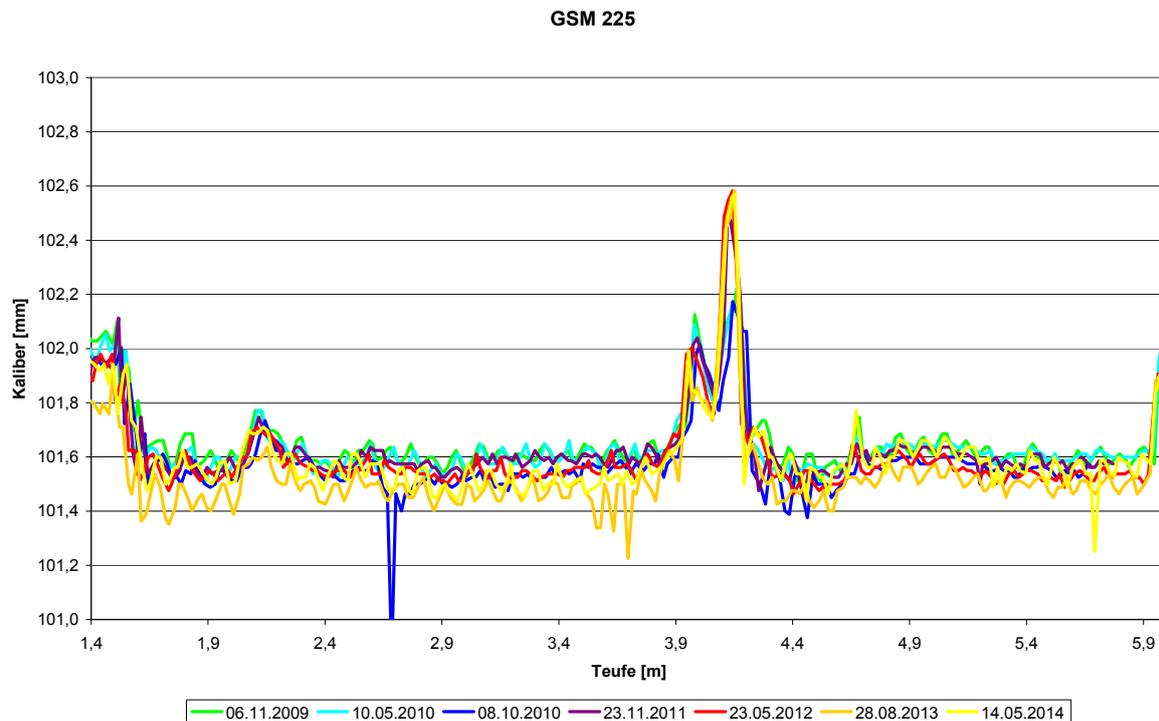


Bild 3.107: Zusammenstellung der Messergebnisse der Einfahrten unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 225 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014

Für die Darstellung der gemessenen Kaliberwerte ist in Bild 3.107 die bereits von der Diskussion der Messergebnisse aus den Observationsbohrlöchern GSM 45 und GSM 135 bekannte, sehr detaillierte Auflösung mit einer Skalierung der y-Achse zwischen $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 103 \text{ mm}$ gewählt worden. Darüber hinaus sind den Messwertgraphen Farben entsprechend ihres jeweiligen Aufzeichnungsdatums zugeordnet worden. Dem Messwertgraphen des Observationstermins vom 06.11.2009 ist die Farbe Grün zugewiesen worden und der Messwertgraph des darauf folgenden Observationstermins vom 10.05.2010 ist türkisfarben dargestellt. Die Graphen der Messergebnisse der nachfolgenden Observationstermine sind in zeitlich aufsteigender Reihenfolge in den Farben Blau (08.10.2010), Violet (23.11.2011), Rot (23.05.2012) und Orange (28.08.2013) dargestellt während der am letzten Observationstermin am 14.05.2014 generierte Messwertgraph an seiner gelben Farbe zu erkennen ist.



Auch bei der Betrachtung der Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde in Bild 3.107 mit der gegenüber der Darstellung in Bild 3.106 nochmals deutlich erhöhten Auflösung bezüglich der gemessenen Kaliberwerte lässt sich für den größten Teil des Bohrlochs GSM 225 nach dem 08.10.2010 keine weitere eindeutige zeitabhängig voranschreitende Bohrlochkonvergenz erkennen, wie sie zunächst für den Zeitraum zwischen den Observationszeitpunkten am 10.05.2010 und am 08.10.2010 festgestellt werden konnte. Die Ergebnisse der Messung vom vorletzten Observationstermin am 28.08.2013 liegen beinahe durchgängig leicht unterhalb der Messungen der vorangegangenen Observationstermine, was auf eine erneut einsetzende Bohrlochkonvergenz zwischen dem 23.05.2012 und dem 28.08.2013 hinweisen könnte. Allerdings wird der durch den Verlauf des am 28.08.2013 erweckte Eindruck, es wäre im Bohrloch GSM 225 eventuell zu weiteren konvergenten Prozessen gekommen, nicht durch die weiteren Messergebnisse vom 28.08.2013 gestützt. Des Weiteren widerlegen auch die am nachfolgenden Observationstermin aufgezeichneten Messergebnisse vom 14.05.2014 die Annahme von weiteren Konvergenzprozessen nach dem 08.10.2010 im Bohrloch GSM 225, da sie in großen Teufenbereichen oberhalb der Messwerte liegen, die am 28.08.2013 von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichnet worden sind. Lediglich im Teufenbereichen zwischen $t_{BL} \approx 2,9$ m und $t_{BL} \approx 3,9$ m verläuft der am letzten Observationstermin am 14.05.2014 aufgezeichnete Messwertgraph erkennbar unterhalb des Messwertgraphen vom 28.08.2013.

Insgesamt weisen die Messwertgraphen aller Messungen, die innerhalb des ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums aufgezeichnet worden sind, auch in der sehr feinen, zur Darstellung in Bild 3.107 gewählten Auflösung einen sehr ruhigen und gut übereinstimmenden Verlauf auf, was als Indikator für eine große Standfestigkeit der Bohrlochwand und für eine daraus resultierende geomechanische Ereignislosigkeit abgesehen von den konvergenten Prozessen, die bis zum 08.10.2010 festgestellt werden konnten, gewertet werden kann.

Die einzige Ausnahme bildet der Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,9$ m und $t_{BL} \approx 4,2$ m, in dem die Messwertgraphen aller Messungen Maximalwerte annehmen. Der Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,9$ m und $t_{BL} \approx 4,2$ m, in dem mit einem gemessenen Zahlenwert von $d_{BL} \approx 102,6$ mm das absolute Maximum der innerhalb des Bohrlochs GSM 225 gemessenen Kaliberwerte erreicht wird, wird nachfolgend im Rahmen der Vorstellung ausgesuchter Ergebnisse der Bohrlochvideoobservation detailliert betrachtet.

Der in Bild 3.108 dargestellte Teufenbereich stellt den Teufenbereich dar, in dem zu jedem Observationszeitpunkt die maximalen Kaliberwerte innerhalb des Bohrlochs GSM 225 gemessen worden sind. Die Bild 3.107 in Abschnitt 3.2.4(g1) zu entnehmende Tatsache, dass alle dargestellten Messwertgraphen auf den betrachteten Teufenbereich begrenzte, starke Ausschläge nach oben aufweisen, stellt einen Indikator für eine gegenüber dem umgebenden Gebirge vor und hinter dem betrachteten Teufenbereich veränderte Gesteinsbeschaffenheit dar. Möglicherweise ist im betrachteten Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,9$ m und $t_{BL} \approx 4,1$ m eine Gesteinsschicht mit einer höheren Gesteinsfestigkeit durchteuft worden, was während des Bohrprozesses zu stärkeren Lateralbewegungen der Bohrkronen (Schlagen der Bohrkronen) geführt haben könnte, woraus dann wiederum die im Vergleich zu den Kaliberwerten aus den weiteren Teufenbereichen größeren gemessenen Bohrlochkaliber resultiert haben könnten. Die Tatsache, dass zu den letzten vier Observationsterminen mit maximalen Kaliberwerten von $d_{BL_max} \approx 102,6$ mm etwas größere Bohrlochkaliber gemessen worden sind als zu den ersten drei Observationsterminen, bei denen Kaliberwerte im Bereich von $d_{BL_max} \approx 102,2$ mm ermittelt worden sind, könnte eventuell darauf hindeuten, dass die in Bild 3.108 zu betrachtende Feuchtigkeit des Gesteins im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,9$ m und $t_{BL} \approx 4,1$ m zu einer Aufweichung des Gesteins entlang der Bohrlochwand geführt hat. Allerdings ist die These von einer zeitabhängig voranschreitenden Aufweichung der Bohrlochwand vorsichtig zu betrachten, da die maximal gemessenen Kaliberwerte nicht sukzessive von Observationstermin zu Observationstermin ansteigen, sondern sich nach dem dritten Observationstermin sprunghaft von $d_{BL_max} \approx 102,2$ mm auf $d_{BL_max} \approx 102,6$ mm erhöhen.

Bild 3.109, in dem die Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera vom Bohrlöchtiefsten des Bohrlochs GSM 225 zu den sieben Observationszeitpunkten vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 zu betrachten sind, verdeutlicht, dass das Bohrloch GSM 225 bereits vom ersten Observationszeitpunkt an von einem Feuchtigkeitszutritt betroffen gewesen ist. Das zugetretene Grundwasser hat sich im Bohrlöchtiefsten angesammelt (zunächst feuchte Ortsbrust, später Wasseransammlung im Bohrlöchtiefsten).

In Bild 3.109(a) ist zu erkennen, wie das feuchte Gestein am Bohrlöchtiefsten das Licht der Axial-Bohrlochkamera reflektiert. Zum zweiten Observationszeitpunkt am 10.05.2010 hat sich eine kleinere Menge von dem Bohrloch zugesickertem Wasser am Bohrlöchtiefsten angesammelt. Allerdings handelt es sich um eine deutlich kleinere Menge als die Menge, die bis

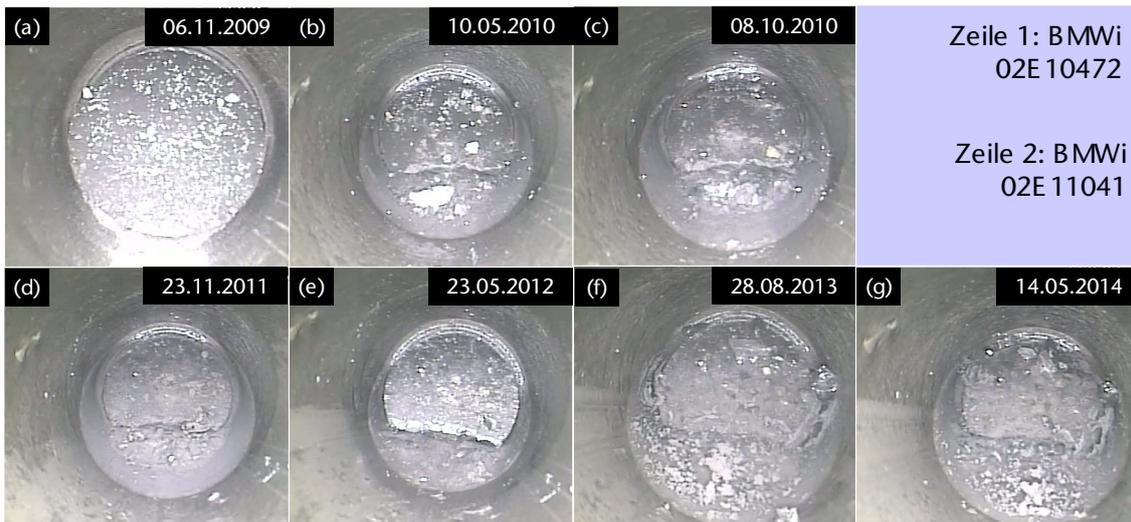


Bild 3.109: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung des Bohrlochtiefsten innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 mit der Ansammlung von Sickerwasser im Bohrlochtiefsten

zum gleichen Zeitpunkt dem Bohrloch GSM 135 auf der gegenüberliegenden Seite der Gallery 08 zugesickert ist, wie einem Vergleich von Bild 3.109(b) und Bild 3.103(b) entnommen werden kann. Ein weiterer Unterschied in der Grundwasserzutrittssituation zwischen den beiden schräg nach unten in die Sohle der Gallery 08 verlaufenden Bohrlöchern GSM 135 und GSM 225 besteht darin, dass im Bohrloch GSM 135 eine deutliche Zunahme von zugesickertem Wasser zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 festgestellt werden kann – erkennbar aus dem Vergleich von Bild 3.103(b) und Bild 3.103(c). Im Bohrloch GSM 225 ist dagegen zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 keine signifikante Zunahme des Wasserspiegels am Bohrlochtiefsten erfolgt – zu ersehen aus dem Vergleich von Bild 3.109(b) und Bild 3.109(c). Auch auf den zu den späteren Observationszeitpunkten entstandenen Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera ist keine deutliche Veränderung der am Bohrlochtiefsten aufgestauten Wassermenge zu identifizieren, wie der Betrachtung der Aufnahmenserie in Bild 3.109(d) bis Bild 3.109(g) entnommen werden kann. Zu einer künstlichen Beeinflussung der Menge von innerhalb des Bohrlochs GSM 225 befindlichem Wasser, beispielsweise zur Probennahme wie im Observationsbohrloch GSM 135, liegen keine Informationen vor. Die Menge von zusickerndem Wasser scheint sich somit über den gesamten Observationszeitraum hinweg mit der Menge an verdunstendem und gegebenenfalls auch versickerndem Wasser innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 225 in etwa die Waage zu halten.

(h) Observationsbohrloch GSM 315

(h 1) Ausgewählte Ergebnisse der Kalibermessungen im Bohrloch GSM 315

Die Positionierung des Bohrlochs GSM 315 kann Bild 3.110 entnommen werden.

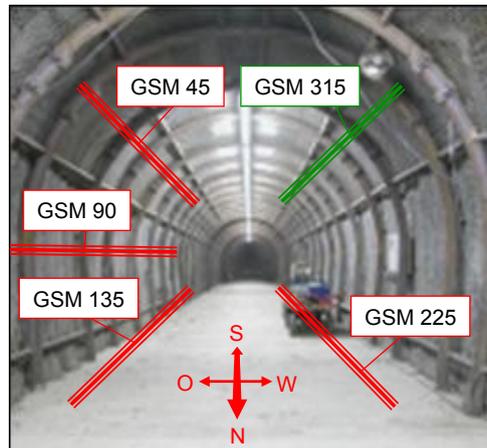


Bild 3.110: Blick in den südlichen Teil der Gallery 08 mit schematisch dargestellter Anordnung des Bohrlochs GSM 315 (Bohrlochverlauf in westlicher Richtung schräg nach oben) sowie der vier weiteren observierten GSM-Bohrlöcher

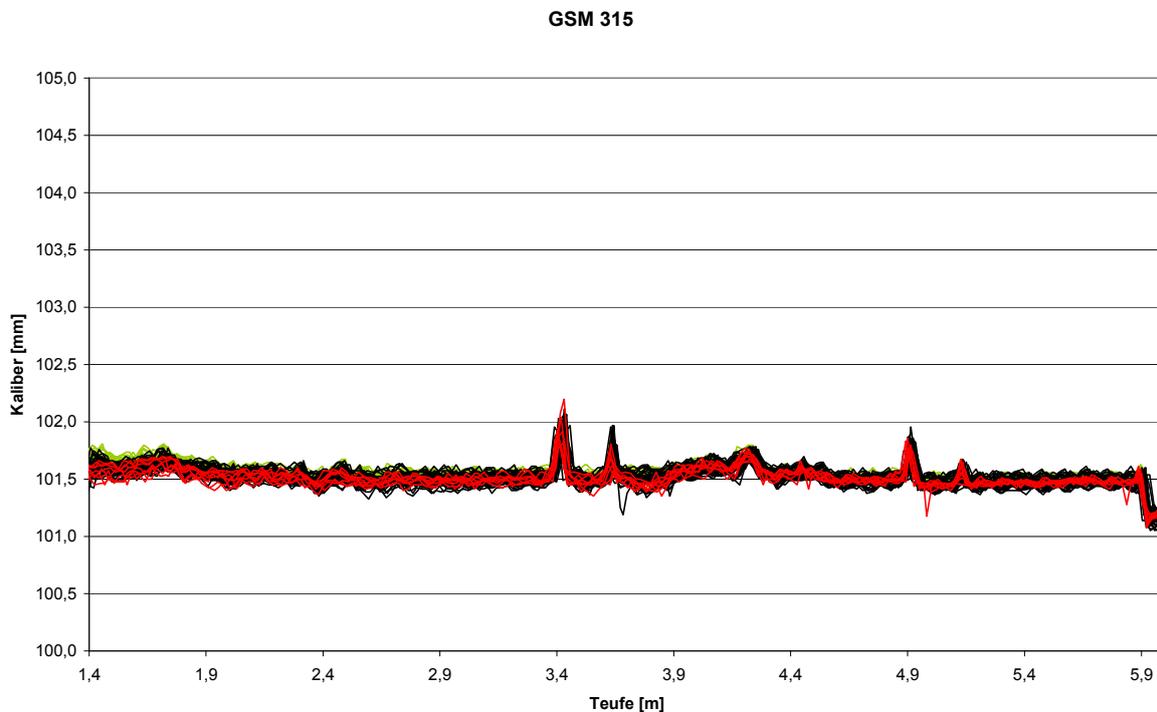


Bild 3.111: Zusammenstellung der Messergebnisse aller im Bohrloch GSM 315 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der ersten Befahrung vom 06.11.2009 sind in Grün dargestellt, während die Messergebnisse der letzten Befahrung vom 14.05.2014 rot dargestellt werden.

Gemäß Bild 3.110 verläuft das Bohrloch GSM 315 um $\delta = 45^\circ$ schräg geneigt nach oben in den westlichen Firstbereich der Gallery 08 und somit in den von der Hauptstörungszone abgewandten Bereich des Gebirges. Wie die in Bild 3.111 dargestellten Ergebnisse der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde im Bohrloch GSM 315 zeigen, resultiert aus der Lage und der Orientierung des Bohrlochs GSM 315 ein sehr ruhiger Verlauf der Messwertgraphen und damit in der Interpretation eine zeitabhängig ausgesprochen ereignisarme Entwicklung des Trag- und Deformationsverhaltens der Bohrlochwand.

Alle innerhalb des Bohrlochs GSM 315 gemessenen Kaliberwerte liegen innerhalb eines doch sehr schmalen Streubreitenbandes zwischen $101,1 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 102,2 \text{ mm}$. Bleiben drei kleine Peaks der Messwertgraphen, die in Bohrlochteufen von $t_{\text{BL}} \approx 3,4 \text{ m}$, $t_{\text{BL}} \approx 3,7 \text{ m}$ und $t_{\text{BL}} \approx 4,9 \text{ m}$ auftreten, sowie der unmittelbar dem Bohrlochtiefsten vorgelagerte Bereich unberücksichtigt, so verringert sich die Bandbreite der gemessenen Kaliberwerte noch erheblich.

Den Ausführungen in Abschnitt 3.2.4(b) und insbesondere der Darstellung in Bild 3.86(d) ist zu entnehmen, dass im Rahmen von *Lux et al. (2012)* auch aus den im Bohrloch GSM 315 generierten Messergebnissen eine leichte Konvergenz der Bohrlochkontur zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 geschlussfolgert werden konnte. Zwar ist die festgestellte Bohrlochkonvergenz im Observationsbohrloch GSM 315 nicht so deutlich ausgeprägt aufgetreten wie in den weiteren GSM-Observationsbohrlöchern und insbesondere ist die Bohrlochkonvergenz nicht so deutlich aufgetreten wie in den auf der östlichen Seite der Gallery 08 abgeteufte und vorangehend diskutierten Observationsbohrlöchern GSM 45 und GSM 135, aber dennoch ist eine zeitabhängige Entwicklung bezüglich des Deformationsverhaltens des Bohrlochs GSM 315 deutlich im Rahmen der Analyse der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde erkennbar gewesen. Die weitere zeitabhängige Entwicklung der Deformationsprozesse innerhalb des Bohrlochs GSM 315 nach dem 08.10.2010 ähnelt sehr stark der zeitabhängigen Entwicklung in den weiteren drei GSM-Observationsbohrlöchern. Daher ist auch aus der Betrachtung von Bild 3.111 keine eindeutig identifizierbare Fortsetzung des Konvergenzprozesses innerhalb des Bohrlochs GSM 315 im Observationszeitraum vom 08.10.2010 bis zum 14.05.2014 zu schlussfolgern. Die in Bild 3.111 in Grün dargestellten Messwertgraphen des ersten Befahrungstermins vom 06.11.2009 liegen zum Teil zwar minimal oberhalb der weiteren Messwertgraphen, werden aber zu sehr großen Teilen auch von der weiteren Messwertgraphenschar überdeckt.

Die im Vordergrund in Rot dargestellte Messwertgraphenschar des letzten Befahrungstermins vom 14.05.2014 liegt zwar leicht unterhalb der Messwertgraphen, die am 06.11.2009 aufgezeichnet worden sind, hebt sich jedoch nicht klar erkennbar von den an den weiteren Observationszeitpunkten generierten Messergebnissen ab, sodass sich auf Basis der Betrachtung der Messwertgraphen aller Befahrungen mit der Dreiarmkalibersonde auch für das Bohrloch GSM 315 keine Fortsetzung des in *Lux et al. (2012)* beschriebenen Konvergenzprozesses im Observationszeitraum zwischen dem 08.10.2010 und dem 14.05.2014 identifizieren lässt.

Zur detaillierten Analyse der Entwicklung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 315 sind in Bild 3.112 die Ergebnisse der zu jedem Observationszeitpunkt bei der Einfahrt unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 315 mit der Dreiarmkalibersonde durchgeführten Messungen erneut dargestellt.

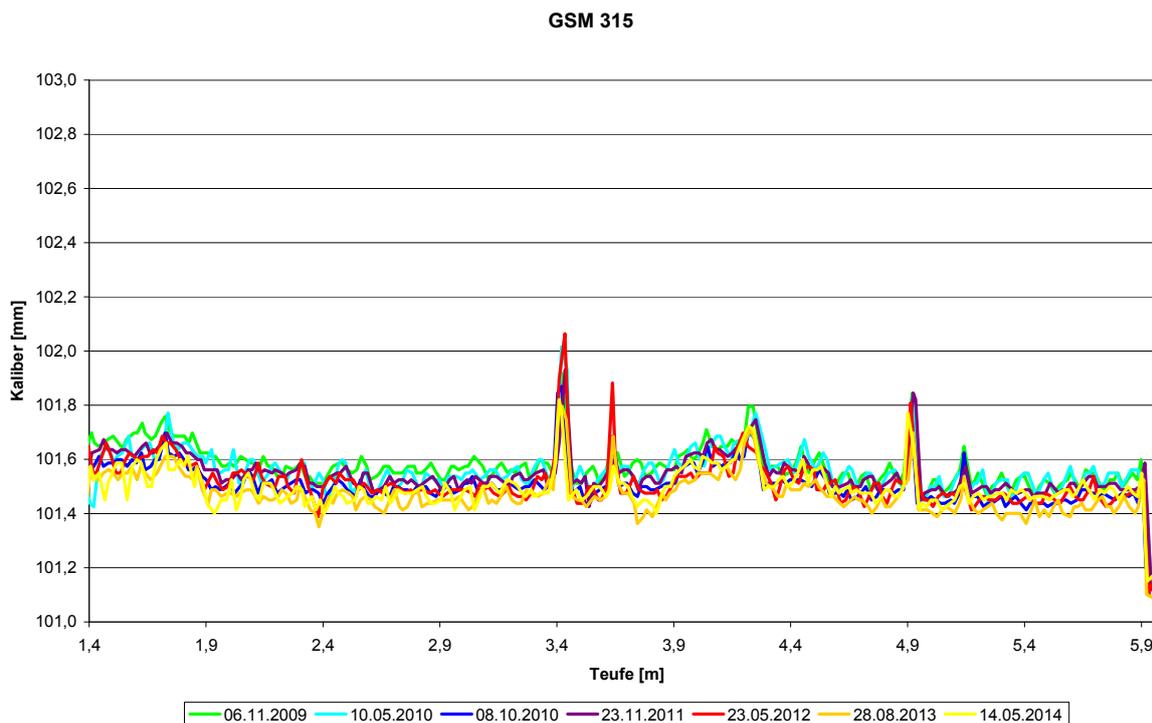


Bild 3.112: Zusammenstellung der Messergebnisse der Einfahrten unter $\phi = 0^\circ$ im Bohrloch GSM 315 mit der Dreiarmkalibersonde im Zeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014

Für die Darstellung der gemessenen Kaliberwerte ist in Bild 3.112 die bereits von der Diskussion der Messergebnisse aus den weiteren GSM-Observationsbohrlöchern bekannte, sehr detaillierte Auflösung mit einer Skalierung der y-Achse zwischen $101 \text{ mm} < d_{\text{BL}} < 103 \text{ mm}$ gewählt worden. Darüber hinaus sind auch für die Darstellung der Messergebnisse aus dem



Bohrloch GSM 315 den Messwertgraphen Farben entsprechend ihres jeweiligen Aufzeichnungsdatums zugeordnet worden. Dem Messwertgraphen des Observationstermins vom 06.11.2009 ist die Farbe Grün zugewiesen worden und der Messwertgraph des darauf folgenden Observationstermins vom 10.05.2010 ist türkisfarben dargestellt. Die Graphen der Messergebnisse der nachfolgenden Observationstermine sind in zeitlich aufsteigender Reihenfolge in den Farben Blau (08.10.2010), Violet (23.11.2011), Rot (23.05.2012) und Orange (28.08.2013) dargestellt, während der am letzten Observationstermin am 14.05.2014 generierte Messwertgraph an seiner gelben Farbe zu erkennen ist.

Auch bei der Betrachtung der sehr hoch aufgelösten Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde in Bild 3.112 lässt sich für das Bohrloch GSM 315 nach dem 08.10.2010 keine weitere eindeutige zeitabhängig voranschreitende Bohrlochkonvergenz erkennen, wie sie zunächst für den Zeitraum zwischen den Observationszeitpunkten am 10.05.2010 und am 08.10.2010 festgestellt werden konnte.

Zwar liegen die Ergebnisse der Messung vom vorletzten Observationstermin am 28.08.2013 beinahe durchgängig leicht unterhalb der Messungen der vorangegangenen Observationstermine, was auf eine erneut einsetzende Bohrlochkonvergenz zwischen dem 23.05.2012 und dem 28.08.2013 hinweisen könnte. Allerdings widerlegen die am nachfolgenden Observationstermin aufgezeichneten Messergebnisse vom 14.05.2014 die Annahme von weiteren Konvergenzprozessen nach dem 08.10.2010 im Bohrloch GSM 315, da sie beinahe durchgängig oberhalb der Messwerte liegen, die am 28.08.2013 von der Dreiarmkalibersonde aufgezeichnet worden sind.

Insgesamt weisen die Messwertgraphen aller Messungen, die innerhalb des ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 315 aufgezeichnet worden sind, auch in der sehr hohen Auflösung in Bild 3.112 einen sehr ruhigen und gut übereinstimmenden Verlauf auf, was als Indikator für eine große Bohrlochstabilität und für eine daraus resultierende Ereignislosigkeit abgesehen von den konvergenten Prozessen, die bis zum 08.10.2010 festgestellt werden konnten, gewertet werden kann. In Bezug auf das zeitabhängige Deformationsverhalten kann somit festgestellt werden, dass innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 315 die geringsten zeitabhängigen Deformationen und Bohrlochkonturveränderungen gemessen worden sind und dass das Bohrloch GSM 315 sich somit als das innerhalb des ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeit-

raums aus geomechanischer Sicht als das Bohrloch mit der größten Standfestigkeit der insgesamt fünf observierten GSM-Bohrlöcher erwiesen hat.

(h 2) Ausgewählte Ergebnisse der Videoobservation des Bohrlochs GSM 315

Nachfolgend wird repräsentativ anhand ausgewählter Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera die zeitabhängige Entwicklung von zwei Teufenbereichen innerhalb des Bohrlochs GSM 315 vorgestellt. Wie die Darstellung der Messergebnisse der Dreiarmlibersonde bereits erahnen lässt, haben sich innerhalb des Bohrlochs GSM 315 im Observationszeitraum zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014 abgesehen von der festzustellenden, überwiegend zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 ablaufenden Konvergenz der Bohrlochkontur keine signifikanten Bohrlochkonturveränderungen oder Bohrlochwandbeschaffenheitsveränderungen im Sinne von Gesteinsaufweichungen, Gesteinsabplatzungen, Gesteinsabschalungen oder Bohrlochkonturverbrüchen ergeben.

Dementsprechend präsentiert sich die Bohrlochwand auch auf allen sieben in Bild 3.113 dargestellten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera komplett ungeschädigt.

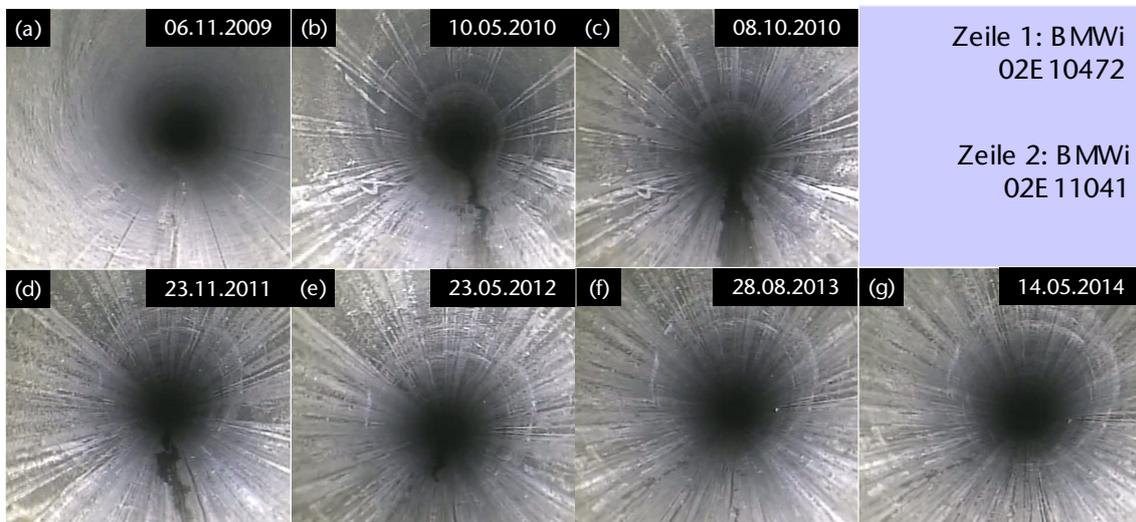


Bild 3.113: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 1,3$ m bis $t_{BL} \approx 1,5$ m

Allerdings ist der Betrachtung von Bild 3.113 eine Zunahme der Feuchtigkeit des Gesteins der Bohrlochwand im Verlauf des ersten Jahres des insgesamt ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums zu entnehmen. Während Bild 3.113(a) zunächst eine helle und komplett trocken erscheinende Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich zu Beginn

des Observationszeitraums zeigt, hinterlässt die Bohrlochwand auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 10.05.2010 in Bild 3.113(b) bereits einen dunkleren, weniger matten und somit feuchteren Eindruck als in Bild 3.113(a). Ein dunkler Streifen entlang der Bohrlochsohle lässt zudem darauf schließen, dass Wasser aus tiefer im Bohrloch und somit höher gelegenen Teufenbereichen entlang der Bohrlochsohle in einer Art Rinnsaal in den hier betrachteten Teufenbereich herunter gelaufen ist. Auf der in Bild 3.113(c) dargestellten Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera ist zu erkennen, dass der feuchte dunkle Streifen im Bereich der Bohrlochsohle des Bohrlochs GSM 315 sich verbreitert hat – ein Hinweis darauf, dass im Zeitraum zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 weiteres Wasser aus den höher gelegenen Bohrlochbereichen in den Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m und dann auch weiter in Richtung des Bohrlochmundes herunter gelaufen ist. Auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera vom 23.11.2011 in Bild 3.113(d) ist ebenfalls ein dunkler Streifen zu erkennen, der durch im Bereich der Bohrlochsohle in Richtung des Bohrlochmundes rinnendes Wasser hervorgerufen wird.

Allerdings ist der am 23.11.2011 zu beobachtende dunkle Streifen im Bereich der Bohrlochsohle wieder deutlich schmaler als der dunkle Streifen auf der Aufnahme vom 08.10.2010 und in seinen Ausmaßen eher mit dem am 10.05.2010 zu beobachtenden dunklen Streifen in Bild 3.113(b) zu vergleichen. Auf den weiteren drei innerhalb des Observationszeitraums im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m von der Axial-Bohrlochkamera aufgezeichneten Aufnahmen in Bild 3.113(e) bis Bild 3.113(g) wirkt das Gestein der Bohrlochwand zwar weiterhin feucht, jedoch verschwindet das zwischen dem 08.10.2010 und dem 23.11.2011 zunächst schmaler gewordene Rinnsaal im Bereich der Bohrlochsohle ab dem 23.05.2012 vollständig. Es scheint sich somit im auf der westlichen Seite der Gallery 08 unter $\delta \approx 45^\circ$ schräg nach oben abgeteufte Observationsbohrloch GSM 315 eine aus geohydraulischer Sicht vergleichbare Entwicklung zu ereignen wie sie vorangehend in Abschnitt 3.2.4(d2) für das auf der östlichen Seite der Gallery 08 unter $\delta \approx 45^\circ$ schräg nach oben abgeteufte Observationsbohrloch GSM 45 beschrieben wird. Zwar ist das auf der östlichen Seite der Gallery 08 befindliche Bohrloch GSM 45 insgesamt von einem stärkeren Feuchtigkeitsanstieg / Sickerwasserzutritt betroffen als das Observationsbohrloch GSM 315, jedoch kommt es auch im Bohrloch GSM 45 zunächst zu einer Wiederaufsättigung des durch den Bohrvorgang ausgetrockneten Gesteins in der Umgebung der Bohrlochkontur. Im Zuge der Wiederaufsättigung des Gesteins bildet sich in den Teufenbereichen nahe des Bohrlochmundes auch im Bohrloch GSM 45 ein kleines Rinnsaal im Bereich der Bohrlochsohle aus. In dem in Bild 3.91 zu



betrachtenden Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 0,7$ m bis $t_{BL} \approx 0,9$ m des Bohrlochs GSM 45 ist das Rinnsal im Bereich der Bohrlochsohle zunächst am 10.05.2010 noch als vergleichsweise schmal zu bezeichnen, bevor es am 08.10.2010 seine breiteste Ausdehnung erreicht, um danach wieder schmaler zu werden und sich bis zum 23.08.2013 komplett aufzulösen. Beiden schräg nach oben abgeteufen GSM-Observationsbohrlöchern scheint somit eine verstärkte hydraulische Aktivität um den Observationszeitpunkt am 08.10.2010 herum und somit $t \approx 1$ a nach dem Abteufen gemein zu sein.

Die Tatsachen, dass erstens zwischen den Observationszeitpunkten am 10.05.2010 und dem 08.10.2010 nicht nur in den Bohrlöchern GSM 45 und GSM 315, sondern in allen vier mit der Dreiarmkalibersonde befahrenen GSM-Observationsbohrlöchern die stärksten Konvergenzen gemessen worden sind, sowie dass zweitens nach dem 08.10.2010 keine weiteren eindeutigen Bohrlochkonvergenzen innerhalb von einem der GSM-Bohrlöcher gemessen werden konnten, können in Verbindung mit den Observationsergebnissen zum hydraulischen Verhalten der aufwärts orientierten Observationsbohrlöcher GSM 45 und GSM 315 als deutlicher Hinweis auf die Korrektheit der zuvor bereits in *Lux et al. (2012)* geäußerten These gewertet werden, dass zwischen dem hydraulischen und dem mechanischen Verhalten der GSM-Observationsbohrlöcher ein kausaler Zusammenhang besteht.

Wie der Vergleich der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.113(a) und Bild 3.113(g) verdeutlicht, haben sich über die vorangehend beschriebenen hydraulischen Veränderungen hinaus zwischen dem 06.11.2009 und dem 14.05.2014 keine signifikanten optisch feststellbaren Veränderungen der Bohrlochkontur oder der Bohrlochwandbeschaffenheit im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 1,3$ m und $t_{BL} \approx 1,5$ m ergeben.

Deutlich erkennbare Veränderungen von Bohrlochkontur oder Bohrlochwandbeschaffenheit haben sich im gesamten Observationszeitraum auch im Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,3$ m und $t_{BL} \approx 3,5$ m nicht ereignet, wie die Betrachtung von Bild 3.114 zeigt.

Zu erkennen ist in Bild 3.114 eine ringförmige, wenige Zentimeter breite Unregelmäßigkeit im Gestein der Bohrlochwand, die den Grund dafür darstellt, dass die Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde in der Teufe von $t_{BL} \approx 3,4$ m ihr absolutes Maximum mit einem gemessenen Kaliberwert von $d_{BL} \approx 102,1$ m erreichen. Bereits zum ersten Observationszeitpunkt am 06.11.2009 wirkt das Gestein der Bohrlochwand im betrachteten Teufenbereich zwischen $t_{BL} \approx 3,3$ m und $t_{BL} \approx 3,5$ m auf der Aufnahme der Axial-Bohrlochkamera eher feucht. Außer

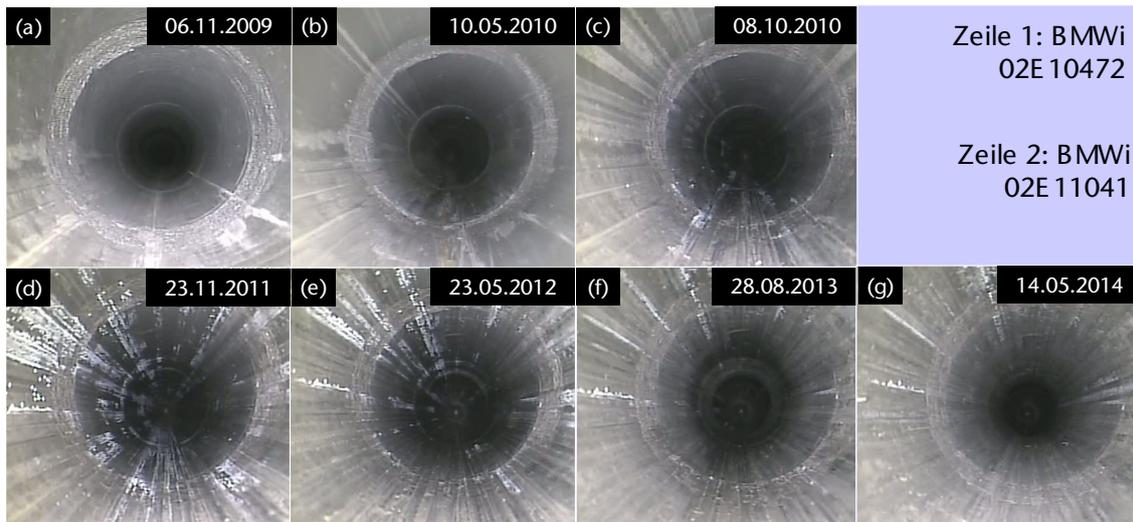


Bild 3.114: Dokumentation der zeitabhängigen Entwicklung innerhalb des Observationszeitraums vom 06.11.2009 bis zum 14.05.2014 im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,3$ m bis $t_{BL} \approx 3,5$ m

einem leichten Aufweichen des Gesteins der Bohrlochwand, das anhand der Beschaffenheit der Spuren der Dreiarmkalibersonde auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.114(b) und insbesondere in Bild 3.114(c) bis Bild 3.114(g) identifiziert werden kann, lassen sich im gesamten Observationszeitraum keine signifikanten Veränderungen der Bohrlochwand auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera erkennen. Der in der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.114(a) bis Bild 3.114(g) zu betrachtende Mangel an zeitabhängig auftretenden Veränderungen der Bohrlochkontur oder der Bohrlochwandbeschaffenheit kann als repräsentativ für die insgesamt große Stabilität der Bohrlochwand innerhalb des Bohrlochs GSM 315 über den gesamten Observationszeitraum hinweg betrachtet werden.

3.2.5 Fazit zu den im Rahmen dieses Vorhabens im URL Tournemire mit der Dreiarmkalibersonde und der Axial-Bohrlochkamera durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten

(a) Zusammenfassung der wichtigsten Observationsergebnisse

Abschließend werden zunächst die wichtigsten Observationsergebnisse, die innerhalb des Observationszeitraums vom 26.09.2007 bis zum 14.05.2014 vom LfD&G in den acht unterschiedlichen innerhalb des URL Tournemire gelegenen Observationsbohrlöchern generiert worden sind, tabellarisch in Tabelle 3.5 zusammengefasst.



<i>Bohrloch / Gallery</i>	<i>Observationszeitraum</i>	<i>Orientierung zum Schichtflächengefüge</i>	<i>mechanisches Verhalten</i>	<i>hydraulisches Verhalten</i>
GEM 90 / Gallery 96	26.09.2007 - 14.05.2014	näherungsw. parallel	überwiegend standfest, Schichtflächenversagen in weiten Bereichen, keine Konvergenz messbar	kein Sickerwasser, überwiegend leicht feuchte Bohrlochwände
GEM 180 / Gallery 96	26.09.2007 - 14.05.2014	näherungsw. orthogonal	sehr standfest, keine Konvergenz messbar	kein Sickerwasser, sehr trockene Bohrlochwände
GEM 270 / Gallery 96	26.09.2007 - 14.05.2014	näherungsw. orthogonal	sehr standfest, keine Konvergenz messbar	kein Sickerwasser, sehr trockene Bohrlochwände
GSM 45 / Gallery 08	06.11.2009 - 14.05.2014	$\delta \approx 45^\circ$	sehr standfest, vorübergehende Konvergenz zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 messbar	geringe Menge an Sickerwasser, überwiegend leicht feuchte Bohrlochwände
GSM 90 / Gallery 08	06.11.2009 - 14.05.2014	parallel	nur bedingt standfest, partieller Verbrauch der Bohrlochkontur im Teufenbereich von $t_{BL} \approx 5,0$ m bis $t_{BL} \approx 5,5$ m	erhebliche Menge an Sickerwasser, zunächst überwiegend leicht feuchte Bohrlochwände, später sehr feucht
GSM 135 / Gallery 08	06.11.2009 - 23.05.2012	$\delta \approx 45^\circ$	sehr standfest, vorübergehende Konvergenz zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 messbar	erhebliche Menge an Sickerwasser, überwiegend leicht feuchte Bohrlochwände
GSM 225 / Gallery 08	06.11.2009 - 14.05.2014	$\delta \approx 45^\circ$	sehr standfest, vorübergehende Konvergenz zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 messbar	geringe Menge an Sickerwasser, überwiegend leicht feuchte Bohrlochwände
GSM 315 / Gallery 08	06.11.2009 - 14.05.2014	$\delta \approx 45^\circ$	sehr standfest, vorübergehende Konvergenz zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 messbar	geringe Menge an Sickerwasser, überwiegend leicht feuchte Bohrlochwände

Tabelle 3.5: Zusammenstellung der wichtigsten Observationsergebnisse aus den insgesamt acht innerhalb des URL Tournemire observierten Bohrlöchern aus geomechanischer und geohydraulischer Sicht

Die zusammenfassende Gegenüberstellung der wichtigsten Observationsergebnisse in sehr kompakter Form in Tabelle 3.5 kann selbstverständlich die detaillierten Beschreibungen der Observationsergebnisse in den vorangegangenen Abschnitten 3.2.3 und 3.2.4 sowie die detaillierten Beschreibungen der Observationsergebnisse in *Lux et al. (2012)* mit der Darstellung von ausgewählten Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera und der Darstellung von ausgewählten Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde nicht ersetzen. Zur Erlangung von aus-

fürlichen Kenntnissen zu den innerhalb der observierten Bohrlöcher ablaufenden geomechanischen und geohydraulischen zeitabhängigen Prozessen ist daher die Lektüre von Abschnitt 3.2.3 und 3.2.4 sowie darüber hinaus auch die Lektüre der Ausführungen zum observierten Bohrloch(trag)verhalten in *Lux et al. (2012)* unbedingt zu empfehlen.

Allerdings sind auch der isolierten Betrachtung von Tabelle 3.5 bereits signifikante Tatsachen bezüglich des zeitabhängigen Verhaltens der Observationsbohrlöcher zu entnehmen. Die wichtigsten Tabelle 3.5 zu entnehmenden Informationen zum observierten geomechanischen und geohydraulischen Verhalten der acht innerhalb des URL Tournemire gelegenen Observationsbohrlöcher lauten wie folgt:

- (1) Innerhalb der Gallery 96 erweisen sich zwei der drei GEM-Observationsbohrlöcher über den gesamten, mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum hinweg als über ihre Länge ohne lokale Ausnahmen standfest.
- (2) Vier der fünf innerhalb der Gallery 08 abgeteuften GSM-Observationsbohrlöcher erweisen sich über den gesamten, mehr als viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum hinweg ebenfalls über ihre Länge ohne lokale Ausnahmen als standfest.
- (3) Somit sind nur innerhalb von zwei der insgesamt acht Observationsbohrlöcher partielle Verbrüche der Bohrlochkontur zu beobachten gewesen. Bei den beiden von Schädigungen der Bohrlochwand betroffenen Observationsbohrlöchern handelt es sich um die (näherungsweise) schichtungsparell abgeteuften Bohrlöcher GEM 90 und GSM 90. Während es im Observationsbohrloch GEM 90 zur Ausbildung eines klassischen Schichtflächenversagens in großen Bohrlochteufenbereichen kommt, ereignet sich innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 90 ein nicht schichtflächenbedingtes Herauslösen von Gestein aus der Bohrlochwand in einem entlang der Bohrlochlängsachse klar abgrenzbaren und relativ kurzen Teufenbereich.
- (4) In keinem der GEM-Observationsbohrlöcher ist ein Konvergenzprozess oder irgendein anderer zeitabhängiger Deformationsprozess der Bohrlochkontur anhand der Messungen mittels der Dreiarmkalibersonde festzustellen.
- (5) Innerhalb aller vier nach dem 10.05.2010 mit der Dreiarmkalibersonde befahrbaren GSM-Observationsbohrlöcher ist für den Zeitraum zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 eine Konvergenz der Bohrlochkontur festgestellt worden.



- (6) In keinem der drei GEM-Observationsbohrlöcher ist ein Zutritt von freiem Sickerwasser zu beobachten. Während die Observationsbohrlöcher GEM 180 und GEM 270 darüber hinaus auch über den gesamten Observationszeitraum hinweg eine vollständig trockene Bohrlochwand aufweisen, ist die Bohrlochwand des Observationsbohrlochs GEM 90 über große Teile des Observationszeitraums hinweg und in den meisten Teufenbereichen am ehesten als leicht feucht zu charakterisieren.
- (7) Abgesehen vom Zeitpunkt ihres Abteufens sind die Bohrlochwände aller GSM-Observationsbohrlöcher über den gesamten Observationszeitraum hinweg als leicht feucht zu charakterisieren. Innerhalb des schichtungsparellen Observationsbohrlochs GSM 90 ereignet sich gegen Ende des Observationszeitraums ein starker Wasserzutritt in das Bohrloch hinein, der zur Folge hat, dass weite Teile der Bohrlochwand des Bohrlochs GSM 90 nicht mehr nur leicht, sondern eher stark durchfeuchtet werden. Neben dem schichtungsparell verlaufenden Observationsbohrloch GSM 90 ist auch das abwärts gerichtete Observationsbohrloch GSM 135 von einem Zutritt erheblicher Mengen von freiem Sickerwasser betroffen. In den drei weiteren GSM-Observationsbohrlöchern können zu einigen Observationszeitpunkten geringere Mengen an zugesickertem Wasser observiert werden.

(b) *Abschließende Betrachtung zum observierten geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Langzeitverhalten der Observationsbohrlöcher*

Im Rahmen von *Lux et al. (2012)* ist als zentrale Erkenntnis zum hydraulischen Verhalten der innerhalb des URL Tournemire im Observationszeitraum vom 26.09.2007 bis zum 08.10.2010 untersuchten Observationsbohrlöcher dokumentiert worden, dass die hydraulische Situation in den westlich der Hauptstörungszone des URL Tournemire in der Gallery 08 gelegenen GSM-Bohrlöchern sich mit observierbaren Wasserzutritten in allen fünf Observationsbohrlöchern grundlegend anders gestaltet als in den östlich der Hauptstörungszone gelegenen, überwiegend trockenen GEM-Observationsbohrlöchern, für die nur innerhalb des Bohrlochs GEM 90 und somit nur in einem von drei Observationsbohrlöchern ein leichter Feuchtigkeitsanstieg im Gestein der Bohrlochwand observiert werden kann. Bezüglich des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens der observierten Bohrlöcher ist eine deutlich anhand der Betrachtung der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde identifizierbare Bohrlochkonvergenz in den GSM-Bohrlöchern als wahrscheinliche Folge der stärkeren hydraulischen Aktivi-



tät in der Umgebung der Gallery 08 identifiziert worden, während für die östlich der Hauptstörungszone gelegenen GEM-Bohrlöcher keine Bohrlochkonvergenzen aus den Messergebnissen der Dreiarmkalibersonde heraus interpretiert werden können.

Im Rahmen dieses Vorhabens haben sich keine signifikanten Veränderungen bezüglich des hydraulischen Verhaltens der GEM-Bohrlöcher observieren lassen. Während die Bohrlochwände der beiden schichtungsorthogonal abgeteufte Observationsbohrlöcher GEM 180 und GEM 270 auch im Observationszeitraum vom 23.11.2011 bis zum 14.05.2014 weiterhin keinen Feuchtigkeitsanstieg des Gesteins der Bohrlochwand aufgewiesen haben und somit über den gesamten mehr als sechseinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraum hinweg als trocken bezeichnet werden können, erweckt die Bohrlochwand des horizontal und somit nahezu schichtungsparallel in den Stoß der Gallery 96 abgeteufte Observationsbohrlochs GEM 90 auch zu den Observationsterminen in den Jahren 2011 bis 2014 in weiten Bohrlochteufenbereichen auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera einen leicht feuchten Eindruck.

In den beiden schichtungsorthogonalen Observationsbohrlöchern GEM 180 und GEM 270 konnten auch im Rahmen dieses Vorhabens keine signifikanten Konturverbrüche, Gesteinsabplatzungen oder Veränderungen der Bohrlochwandbeschaffenheit observiert werden, so dass für beide Observationsbohrlöcher auch im siebten bzw. im zehnten Jahr nach ihrem Abteufen eine große Standfestigkeit der Bohrlochwand festgestellt werden kann. Auch das schichtungsparallele Observationsbohrloch GEM 90 erweist sich über seine gesamte Teufe hinweg bis zum letzten Observationstermin am 14.05.2014 im Sinne einer guten Befahrbarkeit mit der Axial-Bohrlochkamera als standfest. Auf den vorderen, im Jahr 2004 abgeteufte ca. sechs Teufenmetern kommt es im Observationszeitraum vom 23.11.2011 bis zum 14.05.2014 lediglich zu einer geringfügigen Ausweitung des bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* observierten Schichtflächenversagens in Richtung des Bohrlochmunds und in Teilbereichen des im Jahr 2007 abgeteufte hinteren Teufenbereichs des Observationsbohrlochs GEM 90 beginnt sich nach und nach sehr langsam ein Schichtflächenversagen mit vergleichbaren Bruchstrukturen auszubilden, wie sie in großen Bereichen innerhalb der vorderen ca. sechs Teufenmeter zu beobachten sind.

Zusammenfassend kann für die innerhalb der Gallery 96 gelegenen GEM-Observationsbohrlöcher festgehalten werden, dass weder in Bezug auf die hydraulische noch in Bezug auf die geomechanische oder die geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte zeitabhängige Entwick-



lung Ereignisse im Rahmen des innerhalb des Bearbeitungszeitraums dieses Vorhabens gelegenen Observationszeitraums vom 23.11.2011 bis zum 14.05.2014 eingetreten sind, die auf Basis der zuvor im Rahmen von *Lux et al. (2012)* geschilderten Observationsergebnisse nicht zu erwarten gewesen wären. Vielmehr zeigen die drei GEM-Observationsbohrlöcher im weiteren Observationszeitraum vom 23.11.2011 bis zum 14.05.2014 eine konsequente und nicht durch überraschende Entwicklungen wie beispielsweise einen verstärkten Wasserzutritt ab einem bestimmten Observationszeitpunkt oder instantan eintretende Einzelereignisse wie beispielsweise größere Gesteinsabplatzungen aus der Bohrlochwand heraus oder Bohrlochkonturverbrüche geprägte Fortsetzung ihres zwischen dem 26.09.2007 und dem 08.10.2010 beobachteten zeitabhängigen geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Verhaltens.

Eine vergleichbare Aussage bezüglich der Konstanz der Entwicklung des zeitabhängigen geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Verhaltens lässt sich für die innerhalb der Gallery 08 gelegenen GSM-Observationsbohrlöcher auf Basis der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Observationsarbeiten nicht treffen. Zwar kommt es auch in den GSM-Observationsbohrlöchern im Observationszeitraum vom 23.11.2011 bis zum 14.05.2014 zu keinerlei weiteren Gesteinsabplatzungen und auch nicht zu Bohrlochkonturverbrüchen und somit zu keinerlei überraschenden Entwicklungen bezüglich des zeitabhängigen Tragverhaltens, jedoch sind im Rahmen dieses Vorhabens interessante Entwicklungen sowohl in Bezug auf das zeitabhängige Deformationsverhalten sowie auch in Bezug auf die zeitabhängige Entwicklung des geohydraulischen Verhaltens der GSM-Observationsbohrlöcher zu beobachten gewesen. Während sich die Veränderung in der Entwicklung bezüglich des Deformationsverhaltens nahezu gleichermaßen auf alle fünf beobachteten GSM-Observationsbohrlöcher bezieht, ist insbesondere für das horizontal abgeteufte und somit nahezu schichtungsparell verlaufende Bohrloch GSM 90 besonders zwischen dem 23.05.2012 und dem 28.08.2013 eine durchaus als spektakulär zu bezeichnende Entwicklung des geohydraulischen Verhaltens zu verzeichnen.

Während in allen vier aufgrund der Stabilität ihrer Bohrlochwand über den gesamten Observationszeitraum hinweg mit der Dreiarmkalibersonde befahrbaren Observationsbohrlöchern eine bereits ausführlich in *Lux et al. (2012)* beschriebene Bohrlochkonvergenz begrenzt auf den Zeitraum zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 festgestellt werden kann, ist im Zuge der Fortsetzung der Messungen mit der Dreiarmkalibersonde in den GSM-Observationsbohrlöchern im Rahmen dieses Vorhabens keine weitere eindeutige Bohrlochkonvergenz



festzustellen gewesen. Vielmehr erweckt die Betrachtung sämtlicher Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde aus den GSM-Observationsbohrlöchern den Eindruck, dass es in allen vier mit der Dreiarmkalibersonde befahrenen Bohrlöchern zwischen dem 08.10.2010 und dem 23.11.2011 bereits wieder zu einer Stagnation des zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 identifizierten Bohrlochkonvergenzprozesses gekommen ist. Auch zu den drei weiteren Observationsterminen bis zum 14.05.2014 konnte in keinem der vier Observationsbohrlöcher eine weitere Bohrlochkonvergenz eindeutig anhand der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde bestimmt werden.

Die Tatsache, dass im Verlauf des ca. viereinhalb Jahre lang andauernden Observationszeitraums innerhalb der vier Observationsbohrlöcher GSM 45, GSM 135, GSM 225 und GSM 315 offenbar lediglich zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 ein Konvergenzprozess stattgefunden hat, stellt ein weiteres Indiz dar für die bereits nach dem Observationstermin am 08.10.2010 im Rahmen von *Lux et al. (2012)* geäußerte These, dass die beobachteten Konvergenzprozesse nicht auf lediglich geomechanische Ursachen wie beispielsweise durch den Sekundärspannungszustand im Gebirge in der Umgebung des Bohrlochs induzierte zeitabhängige Deformationsprozesse allein zurückzuführen sein können, sondern dass aller Voraussicht nach mit der Re-Sättigung des zunächst durch den Bohrvorgang ausgetrockneten Gebirges in der Umgebung der Bohrlöcher einhergehende geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte Effekte für die Bohrlochkonvergenzen zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 verantwortlich sind (Aufweichung des Gesteins durch den Wiederaufsättigungsprozess (*softening*) und damit einhergehende Deformations- und Spannungsumlagerungsprozesse).

Die These, dass geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte Prozesse für die innerhalb der GSM-Observationsbohrlöcher anhand der Analyse der Messergebnisse der Dreiarmkalibersonde identifizierten Bohrlochkonvergenzen zwischen dem 10.05.2010 und dem 08.10.2010 verantwortlich sind, wird insbesondere auch durch die Observationsergebnisse gestützt, die mittels der Axial-Bohrlochkamera in den Teufenbereichen nahe des Bohrlochmunds der beiden schräg nach oben ins Gebirge abgeteufte Observationsbohrlöcher GSM 45 und GSM 315 generiert worden sind.

Anhand der Breite eines Rinnsals von im Bereich der Bohrlochsohle in Richtung des Bohrlochmundes heruntersickerndem Wasser können auf Basis der Betrachtung der Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus den Teufenbereichen nahe des Bohrlochmunds für die beiden



aufwärts gerichteten Observationsbohrlöcher Abschätzungen zur hydraulischen Aktivität innerhalb der Observationsbohrlöcher getätigt werden. Während die Teufenbereiche nahe des Bohrlochmunds in den Observationsbohrlöchern GSM 45 und GSM 315 auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera in Bild 3.91 und in Bild 3.113 unmittelbar nach dem Abteufen am Observationstermin am 06.11.2009 zunächst komplett trocken erscheinen, ergibt sich bis zum Observationstermin am 10.05.2010 eine Durchfeuchtung der Bohrlochwand sowie die Ausbildung eines Rinnsals durch den Bohrlöchern zugesickertes Gebirgswasser im Bereich der Bohrlochsohle. Während innerhalb von beiden aufwärts gerichteten Observationsbohrlöchern die Breite der Rinnsale bis zum 08.10.2010 anwächst, nimmt sie danach nicht etwa weiter zu, sondern bis zum Observationstermin am 23.11.2011 wieder ab und zum Observationstermin am 23.05.2012 respektive am 28.08.2013 sind sowohl im Observationsbohrloch GSM 45 wie auch im Observationsbohrloch GSM 315 die Rinnsale nicht mehr auf den Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera zu erkennen, was auf ein Nachlassen der hydraulischen Aktivität innerhalb der beiden aufwärts gerichteten Observationsbohrlöcher nach dem 08.10.2010 schließen lässt.

Das Nachlassen der hydraulischen Aktivität in den beiden Observationsbohrlöchern GSM 45 und GSM 315 könnte einen Indikator für ein Nachlassen der hydraulischen Aktivität auch in den weiteren GSM-Observationsbohrlöchern darstellen. Nachlassende hydraulische Aktivitäten mit geringeren Mengen von zusickerndem Gebirgswasser könnten wiederum dazu geführt haben, dass die wiederaufsättigungsbedingten Aufweichungsprozesse im Gestein der Bohrlochwände der observierten GSM-Bohrlöcher zum Erliegen gekommen sind oder dass gegebenenfalls sogar wieder Austrocknungs- und Verfestigungsprozesse im Gestein der Bohrlochwände eingetreten sind. Die aus der Verringerung der hydraulischen Aktivitäten resultierenden Verfestigungsprozesse könnten dann wiederum die Ursache dafür darstellen, dass es zu keinen weiteren klar identifizierbaren Deformationen der Bohrlochwände gekommen ist, weshalb im Rahmen dieses Vorhabens auch keine weiteren Bohrlochkonvergenzen in den GSM-Bohrlöchern gemessen worden sind. Weiteren Aufschluss könnten hier Daten aus Langzeitluftfeuchtigkeitsmessungen liefern, wie sie im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb eines Observationsbohrlochs im URL Mont Terri generiert worden sind. Aus organisations-technischen Gründen ist die Durchführung von derartigen Langzeitluftfeuchtigkeitsmessungen im URL Tournemire nicht möglich gewesen, sodass Messdaten zur Luftfeuchtigkeit innerhalb der Observationsbohrlöcher im URL Tournemire leider nicht vorliegen.

Bei der Betrachtung der Serie von Aufnahmen der Axial-Bohrlochkamera aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 3,1$ m bis $t_{BL} \approx 3,3$ m des Observationsbohrlochs GSM 90 entsteht aufgrund der auf der Aufnahme in Bild 3.94(d) vergleichsweise trocken anmutenden Bohrlochwand der Eindruck, es sei zwischen dem 08.10.2010 und dem 23.11.2011 innerhalb des schichtungsparell abgeteuften Observationsbohrlochs GSM 90 wie höchstwahrscheinlich in den weiteren vier GSM-Observationsbohrlöchern auch zu einem Nachlassen der hydraulischen Aktivität gekommen. Allerdings bestätigen die zu den letzten drei Observationsterminen zwischen dem 23.05.2012 und dem 14.05.2014 innerhalb des Bohrlochs GSM 90 entstandenen Aufnahmen die am 23.11.2011 aufgrund der in den GSM-Observationsbohrlöchern zu diesem Observationszeitpunkt beobachteten Entwicklungen durchaus plausibel erscheinende Annahme eines beginnenden Austrocknungsprozesses für das Bohrloch GSM 90 keineswegs. Vielmehr ist in den beiden Aufnahmeserien in Bild 3.94(e) bis Bild 3.94(g) und Bild 3.96(e) bis Bild 3.96(g) zu betrachten, dass sich bereits zum 23.05.2012 Sickerwasser im Bereich der Bohrlochsohle des Observationsbohrlochs GSM 90 angesammelt hat und dass die Menge von im Bereich der Bohrlochsohle aufgestautem freiem Sickerwasser zu den letzten beiden Observationsterminen noch erheblich zunimmt.

Während aus der kombinierten Betrachtung der Ergebnisse der Observation der GSM-Bohrlöcher mittels Dreiarmkalibersonde und Axial-Bohrlochkamera für die Observationsbohrlöcher GSM 45, GSM 225 und GSM 315 sowie in eingeschränktem Maße auch für das nur bis zum 23.05.2012 zu Observationszwecken zur Verfügung stehende Bohrloch GSM 135 ein Nachlassen der hydraulischen Aktivität sowie eine vermutlich mit dem Nachlassen der hydraulischen Aktivität einhergehende Stagnation des Konvergenzprozesses beobachtet werden kann (Stabilisierung der mechanischen und hydraulischen Bedingungen), ist somit für das Observationsbohrloch GSM 90 eine Destabilisierung der geohydraulischen Situation mit einem starken Sickerwasserzutritt in das Bohrloch hinein zu verzeichnen. Der zwischen dem 23.11.2011 und dem 23.05.2012 zunächst vergleichsweise langsam beginnende Wasserzutritt, der sich zwischen dem 23.05.2012 und dem 28.08.2013 in einer Phase, in der die hydraulischen Prozesse in den weiteren observierten GSM-Bohrlöchern klar erkennbar nachlassen, deutlich zu beschleunigen scheint, ist in dieser Form zu Beginn der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Observationsarbeiten auf Basis der bis dahin in *Lux et al. (2012)* beschriebenen Entwicklung nicht zu erwarten gewesen.



Somit zeigen die im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb der GSM-Bohrlöcher generierten Observationsergebnisse eindrucksvoll zwei konträre Entwicklungen mit einer Abnahme der hydraulischen Aktivität und der Deformationsprozesse des Gebirges in der Umgebung der Bohrlöcher im überwiegenden Teil der GSM-Bohrlöcher (GSM 45, GSM 225 und GSM 315 sowie im eingeschränkten Maße auch GSM 135) sowie mit einer starken Zunahme der hydraulischen Aktivität innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 90 auf.

Bereits im Rahmen von *Lux et al. (2012)* sind Überlegungen dazu angestellt worden, inwieweit das Vorhandensein von präexistenten Strukturen entlang der Bohrlochwand in einigen Teufenbereichen des Bohrlochs GSM 90 einen Einfluss auf das geomechanisch-geohydraulisch gekoppelte Tragverhalten der Bohrlochwand des Bohrlochs GSM 90 ausübt und inwieweit insbesondere die Ausbildung von Bruchstrukturen in der Bohrlochwand entlang der prä-existenten Strukturen auch einen Einfluss auf das geohydraulische Verhalten des Gebirges in der unmittelbaren Umgebung des Bohrlochs GSM 90 ausübt (Öffnung von Trennflächen und Klüften, Erhöhung der Gebirgspemeabilität durch EDZ-Ausbildung). Auf Basis der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten lässt sich keine eindeutige Erklärung dafür herleiten, wie es zu dem starken Wasserzutritt in das Observationsbohrloch GSM 90 hinein kommen konnte. Die Tatsache, dass der Wasserzutritt innerhalb des Observationsbohrlochs GSM 90 sich in einem Zeitraum ereignet, in dem innerhalb der weiteren GSM-Observationsbohrlöcher die Re-Sättigungsprozesse des Gesteins entlang der Bohrlochwand tendenziell abgeschlossen zu sein scheinen, führen allerdings zu der Annahme, dass der Wasserzutritt in das Bohrloch GSM 90 hinein sich entlang von bevorzugten Wegsamkeiten ereignet haben muss. Prädestiniert für die Ausbildung von bevorzugten Wegsamkeiten für Wasser im Gebirge scheinen insbesondere die Teufenbereiche zu sein, in denen es entlang von prä-existenten Strukturen, die gegebenenfalls durch ein Kluft- oder Trennflächengefüge hervorgerufen werden, zu einem Verbruch der Bohrlochwand gekommen ist.

Zwar nicht anhand der durchgeführten Bohrlochobservationsarbeiten belegbar, aber dennoch plausibel scheint ein Szenario, bei dem ein Trennflächengefüge als bevorzugte Wegsamkeit für Gebirgswasser aus einem wie auch immer gearteten tiefer im Gebirge gelegenen Reservoir gedient hat. Das Trennflächengefüge könnte zunächst durch das Abteufen des Bohrlochs GSM 90 aktiviert worden sein und sich später durch die im Rahmen der Bohrlochobservationsarbeiten identifizierten Bohrlochwandverbrüche noch weiter aufgeweitet haben, sodass das Gebirgswasser aus dem tiefer im Gebirge gelegenen Reservoir mit einigen Monaten bis Jah-



ren Verzögerung entlang des aufgeweiteten Trennflächengefüges dem Bohrloch zugesickert sein könnte.

Abschließende generalisierende Anmerkung:

Unabhängig davon, welche Mechanismen im Detail für den starken Wasserzutritt in das Observationsbohrloch GSM 90 hinein verantwortlich sind, stellt das um einige Jahre verzögert eintretende Zutreten von Wasser in einen untertägigen Hohlraum entlang von einem zunächst eher als wenig auffällig zu charakterisierenden Trennflächengefüge in einer grundsätzlich als sehr gering wasserdurchlässig beschriebenen Tongesteinsformation wie der innerhalb des URL Tournemire anstehenden Toarcium-Formation aus endlagertechnischer Sicht nahezu ein Worst-Case-Szenario dar, da sich übertragen auf die großmaßstäblichen Hohlräume eines Grubengebäudes zur Endlagerung radioaktiver Abfälle ein derartiger zeitverzögerter Wasserzutritt gegebenenfalls auch erst nach der Erkundungsphase und somit dann in der Betriebsphase oder auch noch später, erst nach Verschluss des Endlagers in die noch offenen bzw. auch schon versetzten Strecken und Kammern hinein ergeben könnte.

Derzeit werden in Fachkreisen Überlegungen angestellt, wonach eine Erkundung von potenziellen Endlagerstandorten von Übertage aus unter anderem auch auf Basis der Observation von Bohrlöchern durchgeführt werden soll. Die im Rahmen dieses Vorhabens innerhalb des Bohrlochs GSM 90 im URL Tournemire generierten Observationsergebnisse veranschaulichen eindrucksvoll, dass gerade in (vermeintlich) gering permeablen Tongesteinsformationen eine Observation des geomechanisch-geohydraulisch gekoppelten Langzeit(trag)verhaltens von Bohrlöchern über Zeiträume von vielen Jahren hinweg erforderlich ist, um eine realistische Bewertung der untertage innerhalb der Tongesteinsformation vorherrschenden mechanischen und hydraulischen Bedingungen zu ermöglichen.



4 SCHWERPUNKT „GESTEINSMECHANISCHES LABOR“: Mechanische und hydraulische Untersuchungen an Tonsteinmaterial der Lokation Mont Terri

4.1 Übersicht über die durchgeführten laborativen Untersuchungen

Ergänzend zu früheren Untersuchungen am Tongestein der Lokation Mont Terri, über die in *Lux et al. (2006)* sowie in *Lux & Seeska (2010)* berichtet wurde, sind im Rahmen dieses Vorhabens weitere laborative Untersuchungen zur Charakterisierung der Gesteinseigenschaften durchgeführt worden. Die untersuchten Tongesteinsprüfkörper sind aus den Bohrlöchern BDM-B1 bis BDM-B4 entnommen worden. Die laborativen Untersuchungen haben dem Erreichen von drei unterschiedlichen übergeordneten Zielen gedient. Die drei Hauptziele der gesteinsmechanischen laborativen Untersuchungen lauten wie folgt:

- (1) Charakterisierung der Kurzzeitfestigkeitseigenschaften des Gesteins im Bereich der DMB-Observationsbohrlöcher in Abhängigkeit von der Orientierung der Belastungsrichtung gegenüber dem Schichtungsgefüge und in Abhängigkeit von der Fazieszugehörigkeit,
- (2) Charakterisierung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens im einaxialen Dauerstandversuch in Abhängigkeit von der Umgebungsluftfeuchtigkeit und
- (3) Charakterisierung des Langzeitdeformationsverhaltens im triaxialen Dauerstandversuch.

Einen Überblick über das zum Erreichen der drei formulierten Hauptziele durchgeführte laborative Untersuchungsprogramm zeigt Tabelle 4.1.

In Spalte 2 von Tabelle 4.1 kann ersehen werden, aus welchem der vier unterschiedlichen Observationsbohrlöcher das verwendete Prüfkörpermaterial entnommen worden ist. Spalte 3 von Tabelle 4.1 zeigt an, aus welcher Gesteinsfazies des Opalinustons das Prüfkörpermaterial stammt. Der Begriff „shaly“ bezeichnet dabei die tonige Opalinustonfazies, „carbonate rich“ steht für die karbonatreiche sandige Fazies und „sandy“ wird zur Bezeichnung der sandigen Fazies des Opalinustons verwendet. Die nächsten zwei Spalten zeigen die genaue Teufe, aus der das Prüfkörpermaterial entnommen wurde, und eine Klassifizierung der Prüfkörper anhand der Ausrichtung der Schichtflächen an. Bild 4.1 gibt eine Übersicht über die Terminologie bei der Kategorisierung von Prüfkörpern in Abhängigkeit von der Orientierung ihrer Achse gegenüber dem Schichtungsgefüge und ordnet die aus den vier unterschiedlichen DM-B-Observationsbohrlöchern stammenden Prüfkörper den entsprechenden Kategorien zu.



Prüfkörper	Bohrloch	Fazies	Teufenbereich [m]	Prüfkörpertyp	Lagerungsart	Versuchsart
UC 1	BDM-B1	shaly	5,57 – 5,75	Z	DZ	UC
TC 1	BDM-B1	shaly	3,74 – 3,92	Z	DZ	TC
TC 2	BDM-B1	shaly	4,14 – 4,32	Z	DZ	TC
UC 2	BDM-B1	carb.-rich	18,75 – 18,93	Z	AF	UC
TC 3	BDM-B1	carb.-rich	13,50 – 13,68	Z	AF	TC
TC 4	BDM-B1	carb.-rich	17,70 – 17,88	Z	AF	TC
UC 3	BDM-B1	sandy	30,00 – 30,18	Z	AF	UC
TC 5	BDM-B1	sandy	27,47 – 27,65	Z	AF	TC
TC 6	BDM-B1	sandy	29,45 – 29,63	Z	AF	TC
UC 4	BDM-B3	carb.-rich	8,36 – 8,54	S	DZ	UC
TC 7	BDM-B3	carb.-rich	8,16 – 8,34	S	DZ	TC
TC 8	BDM-B3	carb.-rich	8,82 – 9,00	S	DZ	TC
UC 5	BDM-B4	shaly	12,30 – 12,48	P	AF	UC
TC 9	BDM-B4	shaly	11,82 – 12,00	P	AF	TC
TC 10	BDM-B4	shaly	12,10 – 12,28	P	AF	TC
UCc 1	BDM-B3	shaly	2,03 – 2,21	S	DZ	UCc
UCc 2	BDM-B3	shaly	2,39 – 2,57	S	DZ	UCc
UCc 3	BDM-B3	shaly	3,41 – 3,59	S	DZ	UCc
UCc 4	BDM-B3	shaly	3,66 – 3,84	S	DZ	UCc
UCc 5	BDM-B3	shaly	6,03 – 6,21	S	DZ	UCc
UCc 6	BDM-B3	shaly	6,23 – 6,41	S	DZ	UCc
UCc 7	BDM-B3	shaly	6,79 – 6,97	S	DZ	UCc
TCc 1	BDM-B2	shaly	5,72 – 5,90	S	DZ	TCc

Tabelle 4.1: Zusammenstellung des verwendeten Prüfkörpermaterials mit Informationen zu Art und Herkunft des Prüfkörpers sowie zur Zwischenlagerung und zur Art des am jeweiligen Prüfkörper durchgeführten Versuchs (S = senkrecht zum Schichtungsgefüge erbohrter Prüfkörper, P = parallel zum Schichtungsgefüge erbohrter Prüfkörper; AF = verschweißt in Aluminiumfolie, DZ = Druckzellenlagerung; UC = einaxialer Kompressionsversuch, TC = triaxialer Kompressionsversuch, UCc = einaxialer Dauerstandversuch mit Kompression, TCc = triaxialer Dauerstandversuch mit Kompression)

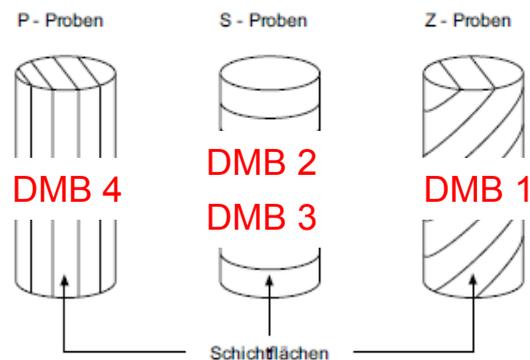


Bild 4.1: Orientierung von P-, S- und Z-Prüfkörpern gegenüber dem Schichtungsgefüge und Zuordnung der Prüfkörper aus den vier DM-B-Observationsbohrlöchern zu den drei unterschiedlichen Prüfkörperkategorien, modifiziert aus Nagra (2001)

Spalte 6 von Tabelle 4.1 enthält Informationen zur Zwischenlagerung des Prüfkörpermaterials, wobei die Abkürzung „DZ“ zur Kennzeichnung der Zwischenlagerung des Prüfkörpermaterials in den in Abschnitt 4.2 beschriebenen speziellen Triaxialdruckzellen des LfD&G verwendet wird, während die Abkürzung „AF“ auf die Vakuumverschweißung des Prüfkörpermaterials in Aluminiumfolie hinweist. Die siebte und letzte Spalte enthält schließlich die Information darüber, welche Art von Versuch an dem jeweiligen Prüfkörper durchgeführt worden ist. Die Abkürzung „UC“ bezeichnet hierbei einaxiale Kurzzeit-Kompressionsversuche, „TC“ wird zur Bezeichnung von Versuchen zur Bestimmung der triaxialen Kurzzeit-Kompressionsfestigkeit verwendet, die Abkürzung „UCc“ benennt einaxiale Dauerstandversuche mit Kompressionsbeanspruchung und „TCc“ zeigt an, dass an dem entsprechenden Prüfkörper ein triaxialer Dauerstandversuch mit Kompressionsbeanspruchung durchgeführt worden ist. Neben der Benennung der Versuchsart in Spalte 7 sind die Zeilen in Tabelle 4.1 zur besseren Übersichtlichkeit entsprechend der an dem Prüfkörpermaterial durchgeführten Versuchsart farblich differenziert dargestellt. Eine hellgelbe farbliche Hinterlegung einer Zeile symbolisiert die Durchführung eines einaxialen Kurzzeit-Kompressionsversuchs, ein weißer Hintergrund steht für einen triaxialen Kurzzeit-Kompressionsversuch, Zeilen mit Prüfkörpern, an denen einaxiale Dauerstandversuche mit Kompressionsbeanspruchung durchgeführt worden sind, sind gelb hinterlegt und der graue Hintergrund der letzten Zeile symbolisiert, dass der entsprechende Prüfkörper in einem triaxialen Dauerstandversuch unter Kompressionsbeanspruchung untersucht worden ist.

Die Kurzzeitfestigkeitsversuche sind grundsätzlich unmittelbar nach dem Transport der Bohrkerns und somit nur wenige Tage nach dem Erbohren der Bohrkerns durchgeführt worden,

weshalb neben den in den Triaxialdruckzellen transportierten und zwischengelagerten Bohrkernen auch in Aluminiumfolie vakuumverschweißte Bohrkern zur Herstellung der Prüfkörper verwendet worden sind.

Wie der Betrachtung von Tabelle 4.1 entnommen werden kann, sind im Rahmen der laborativen Untersuchungen fünf Serien von Kurzzeitversuchen an je drei Prüfkörpern durchgeführt worden. Eine Serie bestand dabei aus einem einaxialen Kompressionsversuch und zwei triaxialen Kompressionsversuchen. Die fünf Serien von Kurzzeit-Kompressionsversuchen sind an Prüfkörpern aus den folgenden Teufenbereichen / Bohrlöchern durchgeführt worden:

- (1) Teufenbereich innerhalb der tonigen Fazies von $t_{BL} \approx 3,74$ m bis $t_{BL} \approx 5,75$ m des Bohrlochs BDM-B1,
- (2) Teufenbereich innerhalb der karbonatreichen sandigen Fazies von $t_{BL} \approx 13,50$ m bis $t_{BL} \approx 18,93$ m des Bohrlochs BDM-B1,
- (3) Teufenbereich innerhalb der sandigen Fazies von $t_{BL} \approx 24,47$ m bis $t_{BL} \approx 30,18$ m des Bohrlochs BDM-B1,
- (4) Teufenbereich innerhalb der karbonatreichen sandigen Fazies von $t_{BL} \approx 8,16$ m bis $t_{BL} \approx 9,00$ m des Bohrlochs BDM-B3,
- (5) Teufenbereich innerhalb der tonigen Fazies von $t_{BL} \approx 11,82$ m bis $t_{BL} \approx 12,48$ m des Bohrlochs BDM-B4.

Somit sind Serien von Kurzzeitfestigkeitsversuchen an Prüfkörpermaterial (Z-Prüfkörper) aus allen drei vom Bohrloch BDM-B1 durchteuften Gesteinsfaziestypen durchgeführt worden.

Da sich bisherige laborative Untersuchungen zum gesteinsmechanischen Verhalten von Opalinuston schwerpunktmäßig auf die Charakterisierung der tonigen Fazies konzentriert haben und eine ausführliche Beschreibung der gesteinsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons dementsprechend auch nur für die tonige Fazies vorliegt, *Bock (2009)*, wird mit der Durchführung von Kurzzeitfestigkeitsversuchen an Gesteinsproben aus der karbonatreichen-sandigen Fazies und der sandigen Fazies wissenschaftliches Neuland betreten.

Aus dem Bohrloch BDM-B2 konnten bedauerlicherweise aufgrund des Auftretens von sog. *core discing* (Zerfallen der Bohrkern entlang der orthogonal durchteuften Schichtflächen in sehr kurze Gesteinsstücke) sowie von Kernverlusten in großen Teufenbereichen keine laborativ verwertbaren Prüfkörper (S-Prüfkörper) im Bereich der karbonatreichen sandigen und der



sandigen Fazies gewonnen werden. Auf eine laborative Untersuchung der Kurzzeitfestigkeit von S-Prüfkörpern aus dem Bereich der tonigen Fazies ist im Rahmen dieses Vorhabens verzichtet worden, da bereits im Rahmen des vorangegangenen BB-Experimentes diesbezügliche Untersuchungen an S-Prüfkörpern aus dem in unmittelbarer Nachbarschaft zum Bohrloch BDM-B2 gelegenen Bohrloch BBB1 durchgeführt worden sind.

Innerhalb des Bohrlochs BDM-B3 ist es im Gegensatz zum Bohrloch BDM-B2 möglich gewesen, S-Prüfkörper aus dem Bereich der karbonatreichen sandigen Fazies zu entnehmen, sodass für das Bohrloch BDM-B3 eine Serie von drei Kurzzeitfestigkeitsversuchen an Prüfkörpermaterial aus der karbonatreichen sandigen Fazies durchgeführt werden konnte. Die letzte der fünf Versuchsreihen zur Ermittlung der Kurzzeitfestigkeit ist an P-Prüfkörpern aus der tonigen Fazies, die aus dem Bohrloch BDM-B4 gewonnen worden sind, vorgenommen worden. Hierbei ist mit dem Prüfkörpermaterial aus dem Teufenbereich von $t_{BL} \approx 11,82$ m bis $t_{BL} \approx 12,48$ m in einem relativ großen Abstand zur Ortsbrust der Niche MI gewonnenes Prüfkörpermaterial verwendet worden, da Informationen zum Kurzzeitfestigkeitsverhalten des näher zur Ortsbrust der Niche MI gelagerten Gesteins bereits aus den im Rahmen des BB-Experimentes an Prüfkörpermaterial aus dem Bohrloch BBB2 durchgeführten laborativen Untersuchungen vorliegen, *Lux & Seeska (2010)*.

Weiter ist Tabelle 4.1 zu entnehmen, dass neben den insgesamt 15 Versuchen zur Ermittlung des Kurzzeitfestigkeitsverhaltens sieben einaxiale Dauerstandversuche zur Bestimmung des Langzeitdeformationsverhaltens an S-Prüfkörpern aus der tonigen Fazies, die aus dem Bohrloch BDM-B3 gewonnen worden sind, durchgeführt worden sind und dass zusätzlich ein triaxialer Dauerstandversuch an einem S-Prüfkörper, der aus dem Bohrloch BDM-B2 im Bereich der tonigen Fazies erbohrt worden ist, durchgeführt wurde. Um eine optimale Zwischenlagerung des für die insgesamt acht Dauerstandversuche verwendeten Prüfkörpermaterials zu gewährleisten, sind, wie ebenfalls Tabelle 4.1 zu entnehmen ist, ausschließlich in Triaxialdruckzellen zwischengelagerte Bohrkernmaterialien zur Herstellung des Prüfkörpermaterials für die Dauerstandversuche verwendet worden. Eine kurze Begründung zur Zwischenlagerung des Bohrkernmaterials in den Triaxialdruckzellen erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 4.2. Ausführliche Informationen zur Funktionsweise der Triaxialdruckzellen können *Czaikowski & Lux (2008)* entnommen werden.

4.2 Zwischenlagerung der Bohrkerne und Herstellung der Prüfkörper

Neben instantan von der beim Herausbohren erfolgenden Beanspruchungsänderung hervorgerufenen elastischen oder elastoplastischen Deformationen können durch den beim Herausbohren und bei der Zutageförderung der Bohrkerne eintretenden Abbau der einwirkenden äußeren mechanischen und hydraulischen Beanspruchungen sowie durch die veränderten klimatischen Bedingungen (Luftfeuchtigkeit) auch zeitabhängige Deformations- und Schädigungsprozesse hervorgerufen werden, wenn nicht durch eine geeignete Konservierung des erbohrten Bohrkernmaterials dafür gesorgt wird, dass das zutagegeförderte Gestein möglichst kurzfristig wieder einem Spannungszustand, der in seiner Größenordnung nahe dem in situ-Spannungszustand liegt, ausgesetzt wird und gleichzeitig ein Austrocknen verhindert wird. Daher sind die erbohrten Gesteinskerne aus den Bohrungen BDM-B1 bis BDM-B3 zum großen Teil unmittelbar nach ihrer Zutageförderung und der im direkten Anschluss daran durchgeführten Bohrkerndokumentation auf Prüfkörpergröße abgelängt und danach zunächst in speziell zur Bohrkern-/Prüfkörperaufbewahrung entwickelten Druckzellen bei einem isostatischen Druckzustand von $\sigma_{pc} = 3,5 \text{ MPa}$ konserviert worden. Bild 4.2 zeigt ein Exemplar der am LfD&G entwickelten Triaxialdruckzellen zur Konservierung von Tongesteinsprüfkörpern.



Bild 4.2: Triaxialdruckzelle zur Konservierung von Tongesteinsprüfkörpern des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik, Czaikowski & Lux (2008)

Nach der Entnahme aus den Druckzellen sind die Stirnflächen der zylindrischen Prüfkörper zur Gewährleistung planparalleler Endflächen auf der in Bild 4.3 gezeigten Drehbank des

LfD&G bearbeitet worden. Auf eine weitere Bearbeitung der Mantelflächen der Prüfkörper ist verzichtet worden, um die Beeinflussung der Prüfkörper bei der Versuchsvorbereitung auf ein absolut notwendiges Minimum zu reduzieren.



Bild 4.3: Drehbank zur Herstellung von Gesteinsprüfkörpern am Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik

4.3 Kurzzeitversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung

4.3.1 Versuchsaufbau und Versuchstechnik

Die Kurzzeitversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung (UC = Uniaxial Compression) sind auf der in Bild 4.4 gezeigten hydraulisch gesteuerten 250 kN-Druckprüfmaschine erfolgt. Nach dem Einbau zwischen die Druckplatten der Prüfmaschine sind die Prüfkörper mit einer konstanten Verzerrungsrate von $\dot{\epsilon} = 0,025 \text{ \% / min}$ bis zum Erreichen der Bruchlast in axialer Richtung kontinuierlich belastet worden. Die für die Versuchsauswertung erforderliche messtechnische Erfassung der spannungsabhängigen Axialstauchung ist mittels eines Induktivwegaufnehmers erfolgt. Der auf die Prüfkörper einwirkende Axialdruck ist durch Umrechnung des mittels Absolutdruckaufnehmer im Prüfzylinder gemessenen Hydraulikdruckes ermittelt worden. Die Versuchstemperatur hat der Raumtemperatur entsprechen (RT $\approx 25^\circ\text{C}$).



Bild 4.4: 250 kN-Druckprüfanlage des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik

4.3.2 Versuchsauswertung

Während der Kurzzeitversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung werden in Zeitintervallen von 0,5 Sekunden die Messwerte der drei Induktivwegaufnehmer sowie des Absolutdruckaufnehmers abgefragt und elektronisch gespeichert. Aus diesen Daten erfolgt die Berechnung der Axialverzerrung ε der Prüfkörper.

Bei der Beschränkung auf Verformungen von $\varepsilon \leq 2\%$ kann die Berechnung der Verzerrungen entsprechend der üblichen Verzerrungsdefinition als technische Verzerrung ε_t durchgeführt werden. Die technische Verzerrung ergibt sich als Quotient aus der vertikalen Veränderung der Prüfkörperlänge Δl und der Anfangslänge l_0 entsprechend Gleichung (4.1):

$$\varepsilon_t = \frac{\left(\frac{l_1 + l_2 + l_3}{3} \right)}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

mit

ε_t technische Verzerrung in %,

$l_1; l_2; l_3$ mit den drei Induktivwegaufnehmern gemessene Axialverformung in *mm* ,

l_0 Länge des unbeanspruchten Prüfkörpers in *mm* ,

Δl gemessene Axialverformung des Prüfkörpers in *mm* .



Bei Prüfkörperverformungen ($\varepsilon > 2\%$) wird anstelle der technischen Verzerrung ε_t die natürliche oder auch wahre (logarithmische) Verzerrung ε_{ln} verwendet, die sich als das Integral des Quotienten aus der momentanen (infinitesimalen) Änderung der Prüfkörperlänge dl und der momentanen (aktuellen) Länge l nach Gleichung (4.2) berechnet:

$$\varepsilon_{ln} = \left| \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \right| \cdot 100\% = \left| \ln \frac{l}{l_0} \right| \cdot 100\% = |\ln(1 - \varepsilon_t)| \cdot 100\% \quad (4.2)$$

mit

ε_{ln} wahre (logarithmische) Verzerrung in %,

l aktuelle Länge des (beanspruchten) Prüfkörpers in mm , $l = l_0 - \Delta l$,

l_0 Länge des unbeanspruchten Prüfkörpers in mm .

Der aufgebrachte Axialdruck wird aus dem messtechnisch ermittelten Hydraulikdruck im Prüfzylinder unter Berücksichtigung der Querschnittsflächen-Verhältnisse zwischen dem Druckkolben des Hydraulikzylinders und dem Prüfkörper gemäß Gleichung (4.3) berechnet:

$$P_p = P_K \cdot \frac{A_K}{A_p} \quad (4.3)$$

mit

P_p Axialdruck auf Prüfkörper in MPa ,

P_K Axialdruck im Hydraulikzylinder in MPa ,

A_K Querschnittsfläche des Druckkolbens (Hydraulikzylinder) in mm^2 ,

A_p Querschnittsfläche des Prüfkörpers in mm^2 .

Für die Auswertung können prinzipiell sowohl die unkorrigierte Spannungs-Verzerrungs-Kurve mit σ_{1u} entsprechend Gleichung (4.4) wie auch eine korrigierte Spannungs-Verzerrungs-Kurve aufgetragen werden. Da die erreichte maximale Prüfkörperverformung aus allen fünf im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Kurzzeitversuchen unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung gerade einmal $\varepsilon_{\max_bruch} = 0,79\%$ betragen hat und somit weit unter der vorgegebenen Grenze von $\varepsilon_{grenz} = 2\%$ gelegen hat, ist es für die Auswertung der Ergebnisse der Kurzzeitversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung im Rahmen dieses Vorhabens als hinreichend erachtet worden, die unkorrigierte Spannungs-Verzerrungs-Kurve zur Versuchsauswertung heranzuziehen. Auf eine lineare oder logarithmische Korrektur der



sich mit der Stauchung Δl ändernden Querschnittsfläche A der Prüfkörper zur Ermittlung der korrigierten Spannung konnte dementsprechend verzichtet werden. Für die unkorrigierte Spannung folgt:

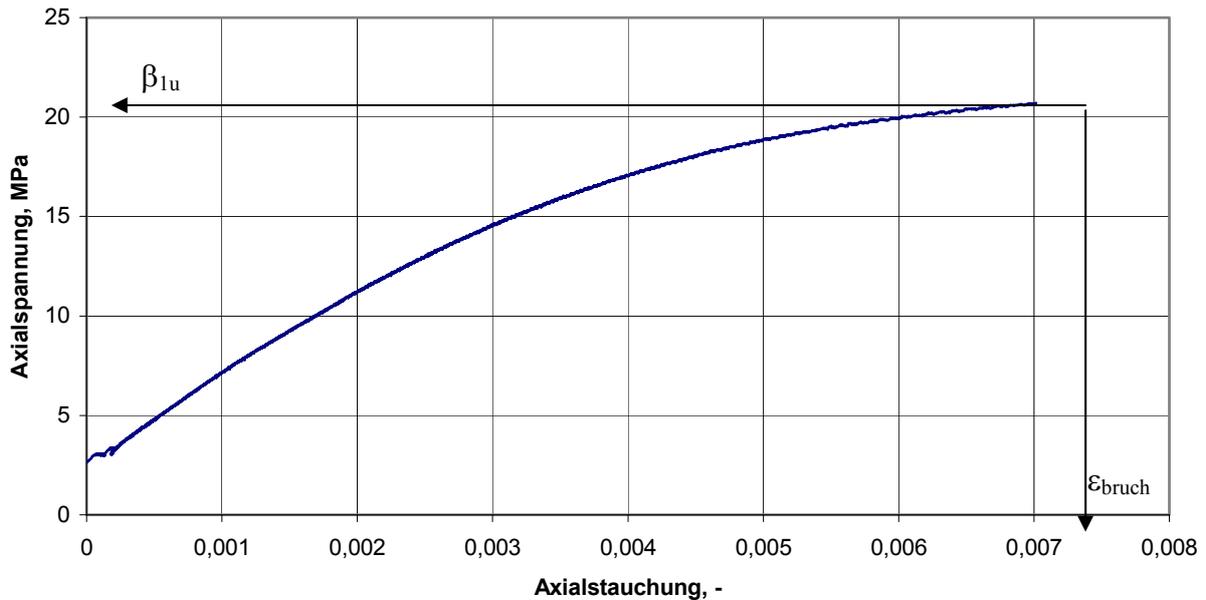


Bild 4.5: Festlegung von Kurzzeitbruchfestigkeit und Bruchstauchung bei UC-Versuchen

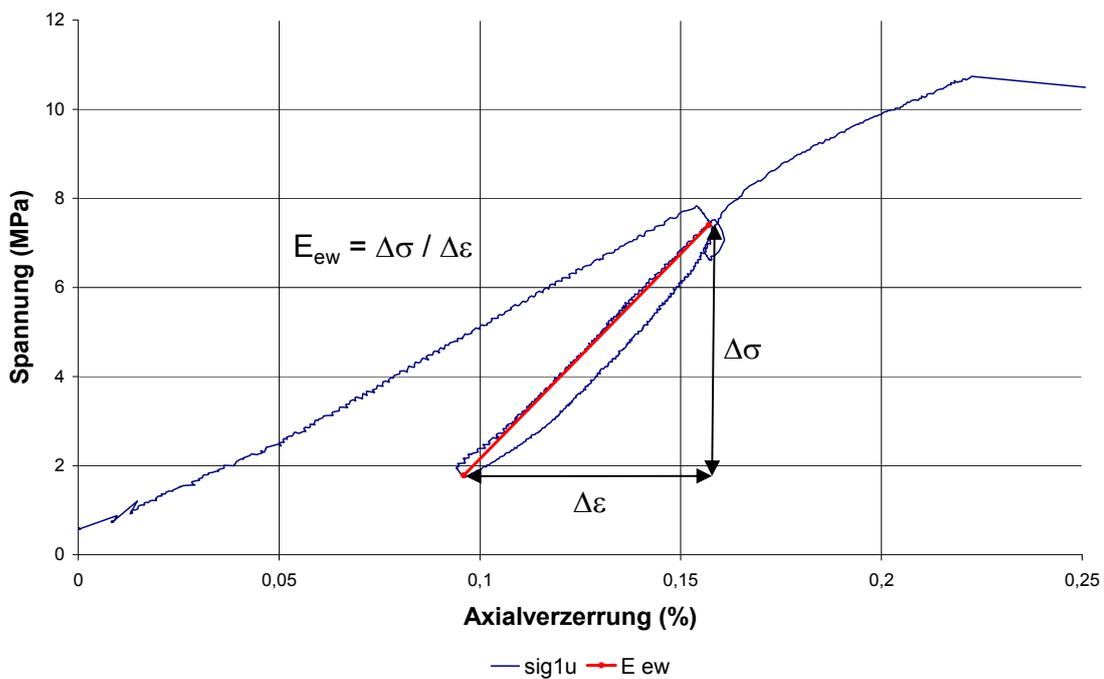


Bild 4.6: Ermittlung des Ent- und Wiederbelastungsmoduls E_{ew}



$$\sigma_{1u} = \frac{F_1}{A_0} \text{ mit } A_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \quad (4.4)$$

Dem Spannungs-Verzerrungs-Diagramm können die jeweilige Bruchfestigkeit β^D (= Höchstwert der Vertikalspannung) sowie die Bruchverzerrung $\varepsilon_{\text{Bruch}}$ entnommen werden.

Als Kurzzeitfestigkeit β_{1u} wird entsprechend Bild 4.5 der Spannungszustand definiert, bei dem während des Versuchs eine lokale Zerstörung im Prüfkörper mit der Folge einer deutlichen Lastabnahme eintritt. Die zu diesem Spannungswert korrespondierende Stauchung wird als Bruchstauchung $\varepsilon_{\text{Bruch}}^-$ bezeichnet.

In Bild 4.6 ist die Bestimmung des Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduls E_{ew} als Steigung der Spannungs-Verzerrungs-Kennlinie im Bereich der Entlastung / Wiederbelastung (Schleife) vor dem Bruch des Prüfkörpers dargestellt.

4.3.3 Messergebnisse einaxialer Druckversuche

Eine tabellarische Zusammenstellung der im Rahmen einaxialer Druckversuche ermittelten Verformungsmodule, Bruchfestigkeiten und Bruchstauchungen zeigt Tabelle 4.2.

Prüfkörper	Bohrloch	Fazies	Teufenbereich [m]	Prüfkörpertyp	E_{ew} [MPa]	β_{1u} [MPa]	$\varepsilon_{\text{Bruch}}$ [%]
UC 1	BDM-B1	shaly	5,57 – 5,75	Z	1856	4,51	0,39
UC 2	BDM-B1	carb.-rich	18,75 – 18,93	Z	4138	3,29	0,20
UC 3	BDM-B1	sandy	30,00 – 30,18	Z	5338	11,36	0,35
UC 4	BDM-B1	carb.-rich	8,36 – 8,54	S	5094	15,18	0,79
UC 5	BDM-B1	shaly	12,30 – 12,48	P	9213	10,74	0,22

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Ergebnisse einaxialer Druckversuche

4.4 Kurzzeitversuche unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung

4.4.1 Versuchsaufbau und Versuchstechnik

Als Prüfeinrichtung für die Kurzzeitversuche unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung (TC – Triaxial Compression) sind die bereits in Bild 4.4 gezeigten Belastungsrahmen in Ver-



- (1) Axialkolben
- (2) Deckelplatte
- (3) Zellenmantel
- (4) Bodenplatte

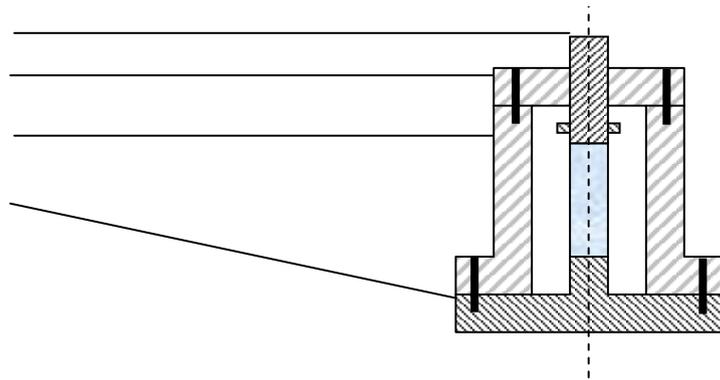


Bild 4.7: Schematische Skizze zum Aufbau einer Triaxialzelle



Bild 4.8: 2500 kN-Druckprüfanlagen des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik

bindung mit einer Triaxialzelle eingesetzt worden. Eine Prinzipskizze der Triaxialzellen zeigt Bild 4.7.

Wie der Betrachtung der Prinzipskizze in Bild 4.7 entnommen werden kann, ist der konstruktive Aufbau der Triaxialzellen charakterisiert durch die vier Module Axialkolben, Deckelplatte, Zellenmantel und Bodenplatte. Deckelplatte und Zellenmantel sind kraftschlüssig miteinander zu einer Zellenglocke verschraubt. Die Verbindung zwischen Bodenplatte und Zellenglocke erfolgt über reversible Schraubverbindungen jeweils nach Aufsetzen der Prüfkörper auf das untere Druckstück der Bodenplatte. Anschließend erfolgt die Befüllung der Triaxialzelle mit dem Manteldruckmedium (Hydrauliköl) über eine in der Bodenplatte befindliche Zuleitung. Nach vollständiger Befüllung der Triaxialzelle (Austritt des Manteldruckmediums über eine stirnseitige Entlüftungsbohrung) werden Zuleitung und Entlüftung verschlossen und die Triaxialzelle wird mittels eines verfahrbaren Schlittentisches in den Belastungsrahmen eingesetzt. Für die Durchführung der TC-Versuche sind die in Bild 4.8 gezeigten 2500 KN-Prüfanlagen eingesetzt worden.

Belastungsrahmen und Triaxialzellen sind so konstruiert, dass die Versuche entsprechend dem Kármán-Prinzip durchgeführt werden können, d.h. der auf die Mantelfläche des Prüfkörpers wirkende laterale Fluiddruck (Manteldruck) $\sigma_2 = \sigma_3$ und der Axialdruck σ_1 können unabhängig voneinander geregelt werden. Mit den verwendeten Triaxialprüfanlagen können Manteldrücke bis zu $\sigma_{2,3} = 75 \text{ MPa}$ erzeugt werden.

Die messtechnische Überwachung der Kurzzeitversuche unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung erfolgt mittels dreier um jeweils 120° versetzt angeordneter Induktivwegaufnehmer zur Erfassung der axialen Prüfkörperstauchung sowie zweier Absolutdruckaufnehmer zur Messung der axialen und radialen Prüfkörperbelastung.

Um die Prüfkörper gegen das Eindringen des Druckmediums zu schützen, werden sie vor Einbau in die Triaxialzelle mit einer undurchlässigen 3 mm dicken, flexiblen Gummiummantelung versehen.

Nach dem Einbau der Prüfkörper in die Triaxialzelle werden der Axialdruck und der Manteldruck unter gleichmäßiger isotroper Belastung der Prüfkörper bis zum Niveau des jeweils vorgegebenen Manteldrucks gesteigert. Die Versuchstemperatur entspricht der Temperatur des Hydrauliköls im Manteldruckkreislauf ($T = RT \approx 25^\circ\text{C}$). Ausgehend von dem isotropen Spannungszustand wird die Axialspannung σ_1 bei konstantem Manteldruck $\sigma_2 = \sigma_3$ und einer gleich bleibenden Verzerrungsrate von $\dot{\varepsilon} = 0,025 \text{ \% / min}$ bis zum Bruch der Prüfkörper gesteigert.



4.4.2 Versuchsauswertung

Die rechnergesteuerte Regelung der Hydraulikprüfanlagen erfolgt mittels automatischer Abfrage der Messwertaufnehmer in Zeitintervallen von 0,5 Sekunden mit nachfolgendem Soll-Ist-Abgleich der vorgegebenen Verzerrungsrate. Aufbauend auf den versuchsbegleitend gespeicherten Messwerten der drei Induktivwegaufnehmer sowie der Absolutdruckaufnehmer erfolgt die Berechnung der Axialverzerrung ε_1 der Prüfkörper entsprechend Gleichung (4.1). Die Berechnung der auf den Prüfkörper einwirkenden Axialspannung erfolgt auf der Grundlage der in Abschnitt 4.3.2 dokumentierten Gleichung (4.4).

Analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 wird als Kurzzeitfestigkeit bei den Triaxialversuchen der Spannungszustand definiert, bei dem während des Versuchs eine lokale Zerstörung mit der Folge einer deutlichen Kraftabnahme eintritt. Die zu diesem Spannungswert korrespondierende Stauchung wird als Bruchstauchung ε_{Bruch}^- bezeichnet. Die Bestimmung der Entlastungs- / Wiederbelastungsmoduln erfolgt ebenfalls in Analogie zu der in Abschnitt 4.3.2 skizzierten Vorgehensweise.

4.4.3 Messergebnisse triaxialer Druckversuche

Eine tabellarische Zusammenstellung der im Rahmen triaxialer Druckversuche ermittelten Verformungsmodule, Bruchfestigkeiten und Bruchstauchungen zeigt Tabelle 4.3.

4.5 Diskussion der Ergebnisse uniaxialer und triaxialer Kurzzeitfestigkeitsversuche unter Kompressionsbeanspruchung

In Bild 4.9 sind zunächst die Ergebnisse der laborativen Untersuchungen zur Kurzzeitfestigkeit für die neun aus Bohrkernmaterial aus dem Bohrloch BDM-B1 hergestellten Prüfkörper (Z-Prüfkörper) dargestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Form eines Diagramms, in dem für jeden der neun Prüfkörper $f(x) = (\beta_{1u} - \sigma_{2,3})/2$ über $x = (\beta_{1u} + \sigma_{2,3})/2$ aufgetragen wird. Der auf der y-Achse aufgetragene Zahlenwert entspricht der Schubspannung τ , die sich beim Erreichen der maximal durch den Prüfkörper ertragbaren Belastung kurz vor dem Prüfkörperversagen innerhalb des Prüfkörpers in einer gegenüber der Prüfkörperlängsachse um $\alpha = 45^\circ$ geneigten Ebene und somit näherungsweise auf den Schichtflächen der Z-Prüfkörper einstellt.



Prüfkörper	Bohrloch	Fazies	Teufenbereich [m]	Typus	$\sigma_{2,3}$ [MPa]	E_{ew} [MPa]	β_{1u} [MPa]	ϵ_{Bruch} [%]
TC 1	BDM-B1	shaly	3,74 – 3,92	Z	4,0	4109	14,82	0,66
TC 2	BDM-B1	shaly	4,14 – 4,32	Z	2,0	5292	11,73	0,47
TC 3	BDM-B1	carb.-rich	13,50 – 13,68	Z	4,0	17021	30,61	0,28
TC 4	BDM-B1	carb.-rich	17,70 – 17,88	Z	2,0	6800	11,53	0,28
TC 5	BDM-B1	sandy	27,47 – 27,65	Z	4,0	8333	19,67	0,39
TC 6	BDM-B1	sandy	29,45 – 29,63	Z	2,0	7156	19,88	0,54
Prüfkörper	Bohrloch	Fazies	Teufenbereich [m]	Typus	$\sigma_{2,3}$ [MPa]	E_{ew} [MPa]	β_{1u} [MPa]	ϵ_{Bruch} [%]
TC 7	BDM-B3	carb.-rich	8,16 – 8,34	S	4,0	7317	24,35	1,19
TC 8	BDM-B3	carb.-rich	8,82 – 9,00	S	2,0	13529	32,38	0,49
TC 9	BDM-B4	shaly	12,10 – 12,28	P	4,0	14444	28,36	0,44
TC 10	BDM-B4	shaly	11,82 – 12,00	P	2,0	11428	20,42	0,36

Tabelle 4.3: Zusammenstellung der Ergebnisse triaxialer Druckversuche

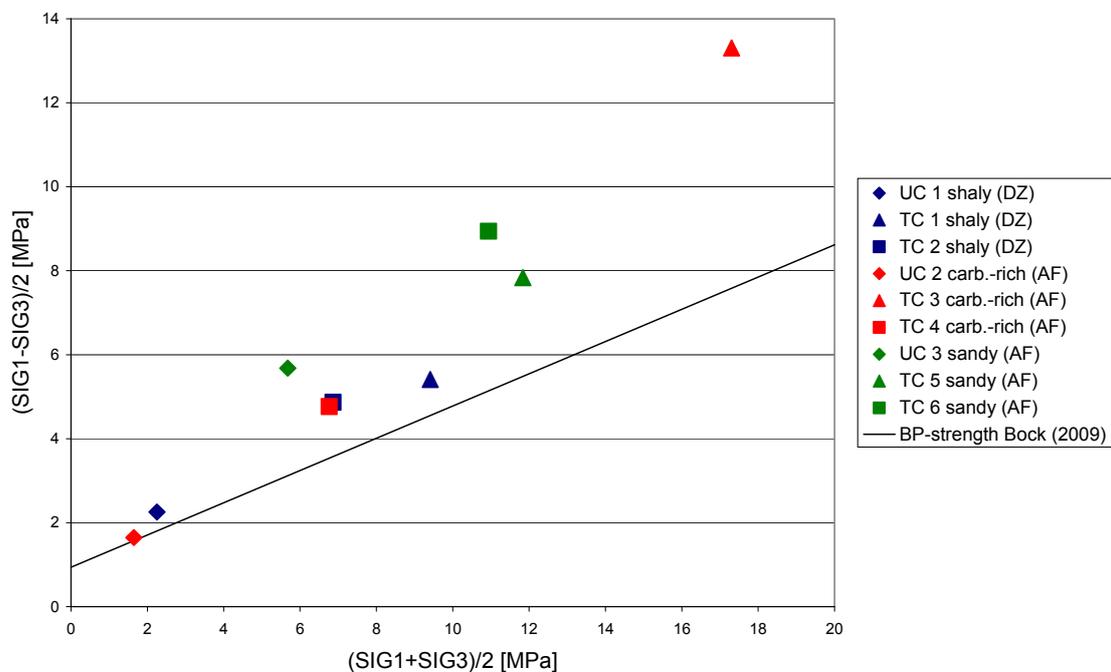


Bild 4.9: Gegenüberstellung der laborativen Befunde zur Bruchfestigkeit von Z-Prüfkörpern aus den drei unterschiedlichen von dem Bohrloch BDM-B1 durchteuften Opalinustonfaziestypen und der Schichtflächenscherfestigkeit für die tonige Fazies (shaly)



Der auf der y-Achse aufgetragene Zahlenwert repräsentiert die zum identischen Zeitpunkt auf die um $\alpha = 45^\circ$ gegenüber der Prüfkörperlängsachse geneigte Ebene einwirkende Normalspannung. Für das Gestein in den Schichtflächen des Opalinustons aus der tonigen Fazies (shaly facies) sind in direkten Scherversuchen Mohr'sche Scherfestigkeitsparameter von $c_{BP} = 0,94$ MPa und $\phi_{BP} = 21^\circ$ ermittelt worden, *Bock (2009)*. Zur Korrelation der im Rahmen dieses Vorhabens an Z-Prüfkörpern gemessenen Bruchfestigkeiten mit den in *Bock (2009)* beschriebenen Ergebnissen direkter Scherversuche ist die auf den in *Bock (2009)* genannten Scherfestigkeitsparametern basierende Mohr'sche Bruchgerade ebenfalls in das Diagramm in Bild 4.9 eingetragen worden.

Die Betrachtung des Diagramms in Bild 4.9 zeigt eine insgesamt sehr gute Übereinstimmung zwischen den in der Literatur dokumentierten Ergebnissen und den an den Z-Prüfkörpern aus der tonigen Fazies im Bereich des Bohrlochs BDM-B1 erhaltenen laborativen Ergebnissen. Zwar liegen die im einaxialen / triaxialen Druckversuch an den Z-Prüfkörpern erhaltenen Festigkeitswerte geringfügig oberhalb der dargestellten Mohr'schen Bruchgeraden, jedoch ist bei der Ergebnisgegenüberstellung zu beachten, dass das Gestein mit den Schichtflächen innerhalb der Z-Prüfkörper bedingt durch eine gewisse Variabilität in Bezug auf den Verlauf der Schichtflächen gegebenenfalls nicht genau unter einem Winkel von $\alpha = 45^\circ$ durch die in Prüfkörperlängsrichtung beaufschlagte maximale Hauptspannung σ_1 belastet worden ist.

Für das Prüfkörpermaterial aus der karbonatreichen sandigen Fazies (carb.-rich) sind bei Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} = 0$ MPa und $\sigma_{2,3} = 2$ MPa minimal kleinere Scherfestigkeiten ermittelt worden als für das Prüfkörpermaterial aus der tonigen Fazies, während bei der Betrachtung von Bild 4.9 für eine Mantelspannung von $\sigma_{2,3} = 4$ MPa eine deutlich höhere Scherfestigkeit des Prüfkörpers aus der karbonatreichen sandigen Fazies gegenüber dem Prüfkörper aus der tonigen Fazies festzustellen ist. Das Prüfkörpermaterial aus der sandigen Opalinustonfazies (sandy) weist für Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} = 0$ MPa und $\sigma_{2,3} = 2$ MPa deutlich höhere Scherfestigkeiten auf als das Prüfkörpermaterial aus den beiden anderen Faziestypen. Bemerkenswerterweise unterscheidet sich die axiale Belastbarkeit des unter einer Mantelspannung von $\sigma_{2,3} = 4$ MPa untersuchten Prüfkörpers aus der sandigen Opalinustonfazies jedoch kaum von der ertragbaren axialen Belastung unter einer Mantelspannung von $\sigma_{2,3} = 2$ MPa. Die für die Z-Prüfkörper aus der karbonatreichen sandigen und aus der sandigen Fazies erhaltenen laborativen Ergebnisse legen eine gewisse Inhomogenität des Gebirges in den beiden bisher nur wenig erforschten Faziestypen nahe. Zur hinreichend zuverlässigen Ermittlung der

an Prüfkörpern aus der karbonatreichen sandigen und der sandigen Fazies generierten Resultate ist es in Zukunft zunächst erforderlich, weitaus umfangreichere laborative Untersuchungen durchzuführen.

Bild 4.10 zeigt die Resultate einaxialer und triaxialer Bruchfestigkeitsversuche an P-Prüfkörpern aus der tonigen Fazies und an S-Prüfkörpern aus der karbonatreichen sandigen Fazies.

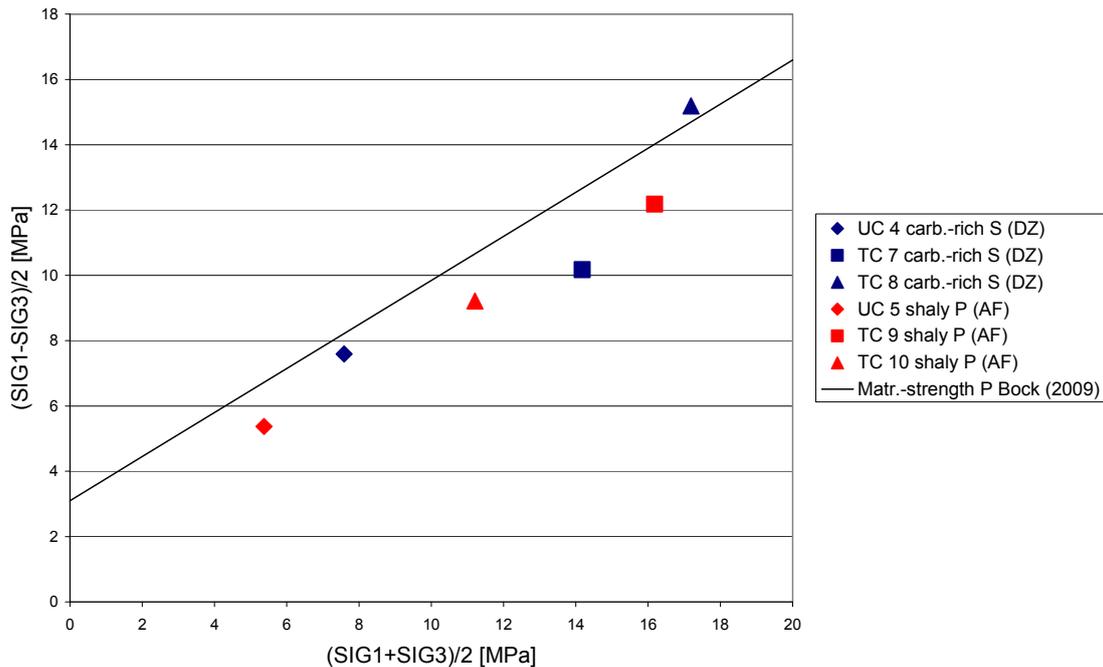


Bild 4.10: Gegenüberstellung der laborativen Befunde zur Bruchfestigkeit von P-Prüfkörpern aus der tonigen Fazies und von S-Prüfkörpern aus der karbonatreichen sandigen Fazies

Zur Korrelation der im Rahmen dieses Vorhabens für die P-Prüfkörper aus der tonigen Fazies (shaly) ermittelten Kurzzeitfestigkeiten mit den auf der Basis bisheriger laborativer Untersuchungen für diesen Prüfkörper- und Faziestyp ermittelten Kurzzeitfestigkeiten ist die auf den in Bock (2009) für das bi-lineare *Mohr-Coulomb*'sche Bruchkriterium für P-Prüfkörper angegebenen Scherfestigkeitsparametern basierende Mohr'sche Bruchgerade in das Diagramm in Bild 4.10 eingetragen worden. Für das bi-lineare *Mohr-Coulomb*'sche Bruchkriterium werden Scherfestigkeiten für Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} \leq 5$ MPa und $\sigma_{2,3} > 5$ MPa unterschieden. Entsprechend der für die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Kurzzeitfestigkeitsversuche gewählten Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} = 0$ MPa bis $\sigma_{2,3} = 4$ MPa sind die in Bock (2009) für den Bereich der Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} \leq 5$ MPa angegebenen Zahlen-



werte von $c_{M//} = 3,41$ MPa und $\varphi_{M//} = 34^\circ$ für die Gegenüberstellung in Bild 4.10 herangezogen worden.

Der Betrachtung des Diagramms in Bild 4.10 kann entnommen werden, dass bezüglich der P-Prüfkörper aus der tonigen Fazies eine gute Korrelierbarkeit zu den in *Bock (2009)* angegebenen Scherfestigkeitsparametern besteht, wobei die Scherfestigkeit der drei im Rahmen dieses Vorhabens beprobten Prüfkörper insgesamt unabhängig von der gewählten Mantelspannung etwas unterhalb von den in der Literatur angegebenen Scherfestigkeiten liegt.

Im einaxialen Kurzzeitfestigkeitsversuch weist der S-Prüfkörper aus der karbonatreichen sandigen Fazies eine klar erkennbar höhere Kurzzeitfestigkeit als der P-Prüfkörper aus der tonigen Fazies auf. Die bei Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} = 2$ MPa und $\sigma_{2,3} = 4$ MPa für die S-Prüfkörper aus der karbonatreichen sandigen Fazies generierten Resultate sind nur sehr schwer interpretierbar, da bei einer Mantelspannungen von $\sigma_{2,3} = 2$ MPa eine deutlich höhere axiale Belastbarkeit ermittelt worden ist als bei einer Mantelspannung von $\sigma_{2,3} = 4$ MPa. Hier könnte ein weiteres Indiz vorliegen für eine starke Inhomogenität bezüglich der Gesteinsqualität innerhalb der karbonatreichen sandigen Opalinustonfazies. Zur Absicherung dieser These besteht jedoch für die Zukunft noch erheblicher Untersuchungsbedarf.

4.6 Dauerstandversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung mit Regelung der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit

4.6.1 Versuchsaufbau und Versuchstechnik

Zur Durchführung der Dauerstandversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung (UCc) mit einer Regelung der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit sind zwei eigens für die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten laborativen Untersuchungen umgerüstete, servohydraulisch geregelte Zeitstandprüfer vom Typ RRP 1000 der Firma Carl Schenck AG eingesetzt worden. Die Zeitstandprüfer sind so konstruiert, dass eine Untersuchung von zylindrischen Prüfkörpern bei einer Axiallast von bis zu 1000 kN und bei Temperaturen von bis zu 200°C möglich ist (Bild 4.11). Darüber hinaus ist durch die im Vorfeld der Untersuchungen vorgenommenen Modifikationen die relative Umgebungsluftfeuchtigkeit innerhalb der Prüfstände mit einer maximalen Abweichung von $\Delta R_{H_max} = 3$ % gegenüber einem vorgegebenen Nennwert während der Versuchslaufzeit präzise automatisch regulierbar. Alle Zeitstandprüfer sind zur Überbrückung von evtl. Netzausfällen über eine 10 kVA-USV-Anlage abgesichert.

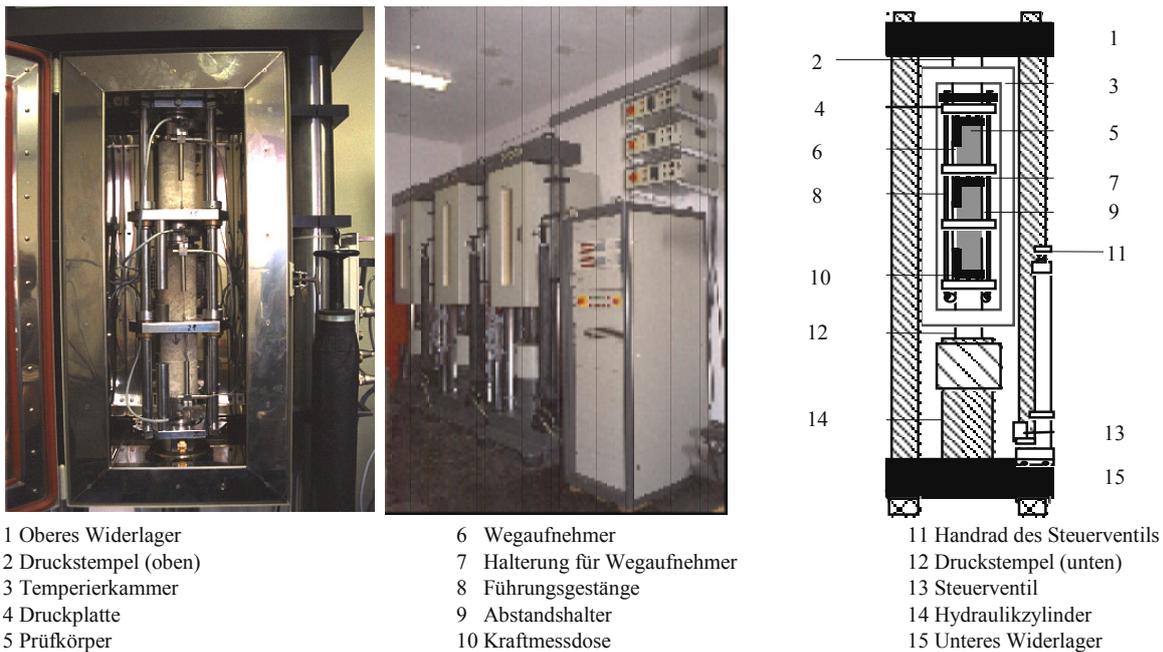


Bild 4.11: Zeitstandprüfer des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik

Die messtechnische Überwachung der einaxialen Dauerstandversuche erfolgt rechnergesteuert mittels der nachfolgend aufgeführten Messgeräte bzw. Steuerungssysteme:

- (1) drei Induktivwegaufnehmer, deren Mittelwert als Messwert für die Registrierung der axialen Prüfkörperstauchung herangezogen wird,
- (2) eine Kraftmessdose, die unmittelbar zwischen Prüfkörper und kopfseitiger Druckplatte die Prüfkörperbelastung ermittelt,
- (3) ein Absolutdruckaufnehmer zur kontinuierlichen Überwachung und Kontrolle des Hydraulikdruckes,
- (4) ein Pt 100 Aufnehmer mit nachgeschalteter Temperatursteuerung zur kontinuierlichen Regelung und Überwachung der versuchstechnisch vorgegebenen Temperatur sowie
- (5) ein Steuerungssystem zur kontinuierlichen Überwachung und Regelung der versuchstechnisch vorgegebenen relativen Luftfeuchtigkeit bestehend aus Verdampfer, Mischkammer, digitalem Massendurchflussmesser mit nachgeschaltetem digitalen Massendurchflussregler und einer digitalen Datenerfassungs- und Regelungseinheit.

Zur kontinuierlichen Registrierung der Versuchsdaten sind die analogen Signale der Weg-, Kraft-, Druck- und Temperaturlaufnehmer der Zeitstandprüfer in vorgegebenen Intervallen durch Vielstellenmessgeräte abgefragt und nach einer AD-Wandlung mittels Computer abgespeichert worden.



Nach dem Einbau der zylindrischen Prüfkörper ist mit einer Belastungsrate von $\dot{\sigma} \approx 1 \text{ MPa/min}$ die Axialbelastung aufgebracht worden. Zur Anpassung der Axiallast an die infolge Axialstauchung zunehmende Querschnittsfläche der Prüfkörper ist die Last entsprechend Gleichung (4.5) nachgeregelt worden. Es folgt:

$$\sigma_{1uc} = \frac{F_1}{A} \text{ mit } A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_t} \quad (4.5)$$

mit

σ_{1uc} linear korrigierte Vertikalspannung in *MPa* ,

F_1 Vertikalkraft in *MN* ,

A Querschnittsfläche des beanspruchten Prüfkörpers in *m²* ,

A_0 Querschnittsfläche des unbeanspruchten Prüfkörpers in *m²* ,

ε_t technische Verzerrung, dimensionslos.

4.6.2 Versuchsauswertung

Während der einaxialen Dauerstandversuche werden die Messwertaufnehmer jedes Zeitstandprüfers in Intervallen von 5 Minuten abgefragt und die ermittelten Messdaten elektronisch gespeichert. Zur Auswertung der einaxialen Dauerstandversuche sind die gemessenen Längenänderungen entsprechend Gleichung (4.6) in Kriechverzerrungen umgerechnet und in Abhängigkeit von der Versuchszeit in einem Verzerrungs-Zeit-Diagramm dargestellt worden. Für die Ermittlung der Kriechverzerrungen folgt:

$$\varepsilon_t = \frac{\left(\frac{l_1 + l_2 + l_3}{3} \right)}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

mit

ε_t technische Verzerrung in % ,

$l_1; l_2; l_3$ mit den drei Induktivwegaufnehmern gemessene Axialverformung in *mm* ,

l_0 Länge des unbeanspruchten Prüfkörpers in *mm* ,

Δl gemessene Axialverformung des Prüfkörpers in *mm* .

Eine Zusammenstellung der aus den durchgeführten Kriechversuchen unter einaxialer Kompression erhaltenen Messwerte in Form von Verzerrungs-Zeit-Diagrammen erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 4.6.3.

4.6.3 Messergebnisse einaxialer Dauerstandversuche mit Regelung der relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit

Eine tabellarische Zusammenstellung der im Rahmen der Dauerstandversuche unter einaxialer Kompressionsbeanspruchung ermittelten Ergebnisse zeigt Tabelle 4.4.

Bezeichn.	Bohrloch	Fazies	Teufen [m]	Prüfkörpertyp	R _H [%]	t / Laststufe [d]	σ_1 [MPa]	ε_t [%]
UCc 1	BDM-B3	shaly	2,03 – 2,21	S	70	14	4/6/8/10/12	2,1/2,3/2,5/2,6/2,7
UCc 2	BDM-B3	shaly	2,39 – 2,57	S	90	14	4/6/8/10/12	1,9/2,0/2,1/2,3/2,4
UCc 3	BDM-B3	shaly	3,41 – 3,59	S	50	30	4/6/8	2,4/2,5/2,6
UCc 4	BDM-B3	shaly	3,66 – 3,84	S	60	30	4/6/8/10	1,5/1,6/1,7/1,8
UCc 5	BDM-B3	shaly	6,03 – 6,21	S	80	30	4/6/8/10	1,2/1,4/1,6/1,8
UCc 6	BDM-B3	shaly	6,23 – 6,41	S	95	38	8	1,1
UCc 7	BDM-B3	shaly	6,79 – 6,97	S	97	38	8	1,3

Tabelle 4.4: Tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse einaxialer Dauerstandversuche mit variierter relativer Umgebungsluftfeuchtigkeit.

Die Tabelle enthält neben den bereits Tabelle 4.1 zu entnehmenden Informationen zu Herkunft und Art des Prüfkörpermaterials Informationen zu der während der Versuchsdurchführung eingestellten relativen Luftfeuchtigkeit, zu der Anzahl und Dauer der gefahrenen Laststufen sowie zu der aufgebrauchten Axialspannung.

Die analysierende Betrachtung der Darstellung aller im Rahmen der Durchführung der einaxialen Dauerstandversuche aufgezeichneten Verzerrungs-Zeit-Diagramme in Bild 4.12 zeigt, dass nach einer initialen (elastischen oder elastisch-plastischen) Deformation unmittelbar nach der Lastaufbringung/Lasterhöhung nur in einigen Fällen eine zeitabhängig eintretende Stauchung der Prüfkörper erfolgt ist. Im Anschluss an diese transiente Deformationsphase lässt sich für alle Prüfkörper bis auf die Sonderfälle UCc6 und UCc7 und sämtliche Laststufen ein horizontaler oder zumindest näherungsweise als horizontal zu beschreibender Verlauf der

Messwertgraphen im Verzerrungs-Zeit-Diagramm feststellen, sodass für das untersuchte Prüfkörpermaterial kein stationäres Kriechverhalten identifiziert werden konnte und sodass dementsprechend im Rahmen der Versuchsauswertung auch keine Bestimmung einer Kriechrate erfolgen konnte.

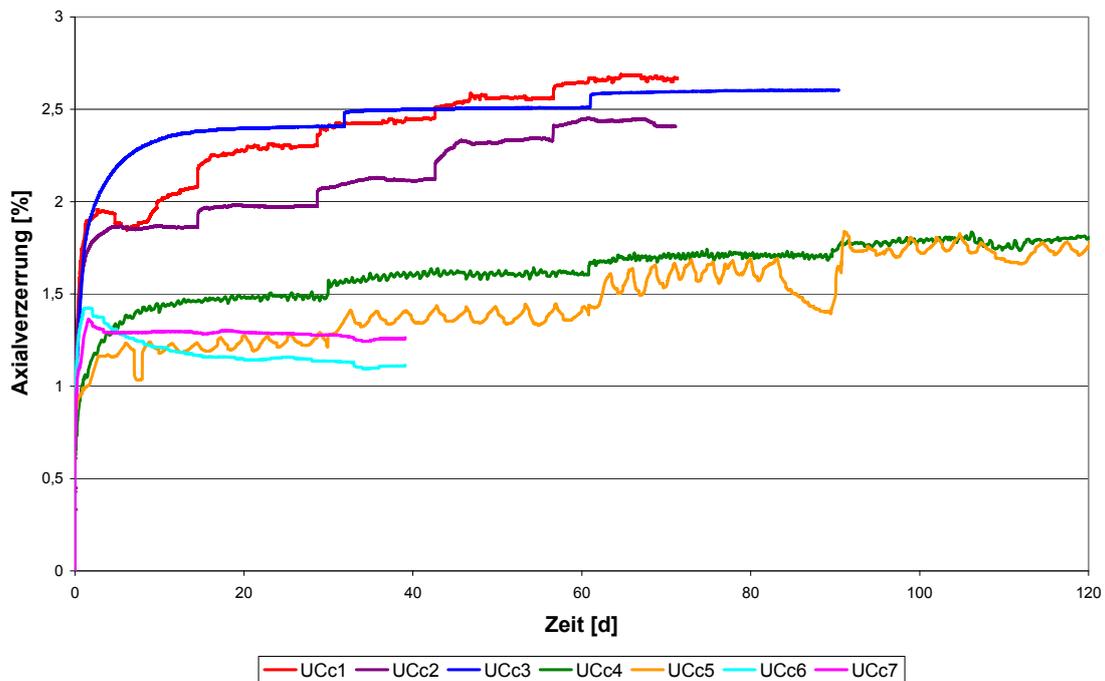


Bild 4.12: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für die durchgeführten einaxialen Dauerstandversuche mit Regelung der Umgebungsluftfeuchtigkeit (UCc1: $R_H = 70$ %; UCc2: $R_H = 90$ %; UCc3: $R_H = 50$ %; UCc4: $R_H = 60$ %; UCc5: $R_H = 80$ %; UCc6: $R_H = 95$ %; UCc7: $R_H = 97$ %)

Als dominierende Deformationsvorgänge können anhand der Analyse der Verzerrungs-Zeit-Diagramme eindeutig die mit der Aufbringung der jeweiligen Belastung verbundenen instantanen Deformationsvorgänge sowie in etwas eingeschränktem Maß auch noch zusätzliche transiente zeitabhängige Deformationsprozesse benannt werden. Daher ist es im Rahmen der Ergebnisauswertung als aussagekräftiger erachtet worden, anstelle von wie auch immer aus den Verzerrungs-Zeit-Graphen abgeleiteten Kriechraten die Axialverzerrung der Prüfkörper zum Ende jeder Laststufe anzugeben. Dementsprechend enthält Spalte 9 von Tabelle 4.4 eine Zusammenstellung der zum Ende jeder Laststufe gemessenen Axialverzerrungen der sieben untersuchten Prüfkörper. Zur Visualisierung des quantitativ deutlich differierenden Deformationsverhaltens der unterschiedlichen Prüfkörper sind die sieben ermittelten Verzerrungs-Zeit-Graphen in Bild 4.12 zunächst gemeinsam dargestellt, bevor nachfolgend in Bild 4.13 bis Bild

4.15 die Verzerrungs-Zeit-Graphen für eine detailliertere Betrachtung differenziert nach der Dauer der gefahrenen Laststufen dargestellt werden.

Es zeigt sich, dass die Prüfkörper nach dem Abschluss der ersten Laststufe stark unterschiedliche Axialverzerrungen aufweisen. Da wie Tabelle 4.4 entnommen werden kann, das gesamte Prüfkörpermaterial aus dem Teufenbereich von $t_{BL} = 2,03$ m bis $t_{BL} = 6,97$ m des Bohrlochs BDM-B3 stammt, kann aus dem Vergleich der Verläufe der Verzerrungs-Zeit-Graphen auf eine starke Inhomogenität bezüglich der Deformationseigenschaften der tonigen Opalinustonfazies im Bereich des Bohrlochs BDM-B3 geschlossen werden. Auffällig bei der Betrachtung des Diagramms in Bild 4.12 ist die Tatsache, dass sich innerhalb der ersten Laststufe die Prüfkörper UCc1 bis UCc3 deutlich stärker verformen als die Prüfkörper UCc4 bis UCc7. Die Prüfkörper UCc1 bis UCc3 stammen aus dem näher am Bohrlochmund gelegenen Teufenbereich von $t_{BL} = 2,03$ m bis $t_{BL} = 3,59$ m, während die Prüfkörper UCc4 bis UCc7 dem Teufenbereich von $t_{BL} = 3,66$ m bis $t_{BL} = 6,97$ m entnommen sind. Die Nähe des Teufenbereichs, aus dem das Prüfkörpermaterial gefördert worden ist, zur Kontur der Niche MI scheint somit einen entscheidenden Einfluss auf das instantane Deformationsverhalten der Prüfkörper und das zeitabhängige Deformationsverhalten der Prüfkörper während der ersten Laststufe zu haben. Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür könnte darin bestehen, dass das Gestein in der näheren Umgebung der Niche MI durch das Absinken der radial zur Kontur der Niche MI wirkenden Hauptspannungskomponente, die in etwa orthogonal zum Verlauf der Schichtflächen und somit auch in etwa in Richtung der Prüfkörperlängsachsen wirkt, in den ca. $t \approx 15$ Jahren nach dem Abteufen der Niche MI zeitabhängig dekomprimiert und darüber hinaus gegebenenfalls auch entfestigt worden ist. Im Rahmen der Durchführung der ersten Laststufe könnte die beschriebene Dekompaktion rückgängig gemacht worden sein, sodass sich im Anschluss an die Re-Kompaktion des Prüfkörpermaterials innerhalb der ersten Laststufe, die für die Prüfkörper UCc1 bis UCc5 mit $\sigma_1 = 4$ MPa und für die Prüfkörper UCc6 und UCc7 mit $\sigma_1 = 8$ MPa gefahren worden ist, das weitere Deformationsverhalten der unterschiedlichen Prüfkörper im Rahmen der Durchführung der weiteren Laststufen dann auch nicht mehr signifikant voneinander unterscheidet, wie Bild 4.12 entnommen werden kann.

Wie der kombinierten Betrachtung der Spalten 6 und 9 von Tabelle 4.4 und Bild 4.12 entnommen werden kann, scheint somit für die Prüfkörper UCc1 bis UCc5 die Teufe, aus der das Prüfkörpermaterial stammt, einen deutlich stärkeren Einfluss auf das Deformationsverhalten auszuüben als die Variation der Umgebungsluftfeuchtigkeit im Zahlenwertebereich von

$R_H = 50\%$ bis $R_H = 90\%$. Anders verhält es sich für die bei Umgebungsluftfeuchtigkeiten mit Zahlenwerten von $R_H = 95\%$ und $R_H = 97\%$ untersuchten Prüfkörper UCc6 und UCc7. Die Prüfkörper UCc6 und UCc7 haben statt einer zeitabhängigen Stauchung im Verlauf des Versuchs eine Längung in der Richtung der einaxialen Belastung erfahren. Die Längung der Prüfkörper in Belastungsrichtung ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf durch die hohe Umgebungsluftfeuchtigkeit zurückzuführende Quelleffekte hervorgerufen worden.

Es kann somit zusammenfassend festgehalten werden, dass für Luftfeuchtigkeiten von $R_H < 90\%$ innerhalb der Prüfstände kein signifikanter Einfluss der Luftfeuchtigkeitsvariationen auf das Deformationsverhalten der Prüfkörper festgestellt werden konnte, während es bei Luftfeuchtigkeiten von $R_H > 95\%$ offensichtlich zu Quelleffekten innerhalb der Prüfkörper mit der Folge einer zeitabhängig ablaufenden Längung der Prüfkörper gekommen ist.

Nachfolgend sind in Bild 4.13 nochmals die Verzerrungs-Zeit-Graphen für die beiden Versuche an den Prüfkörpern UCc1 und UCc2 mit den jeweils fünf über jeweils 14 Tage laufenden Laststufen dargestellt.

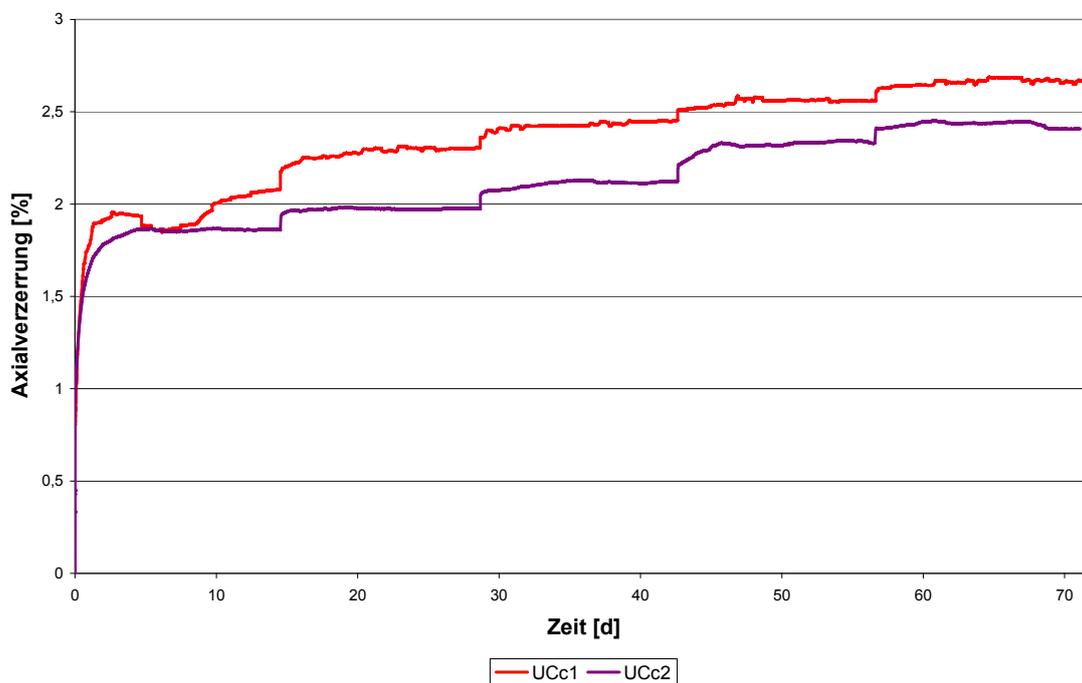


Bild 4.13: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für die Prüfkörper UCc1 und UCc2 mit fünf gefahrenen Laststufen mit einer Dauer von jeweils $\Delta t = 14\text{ d}$ (UCc1: $R_H = 70\%$; UCc2: $R_H = 90\%$)

Eine Korrelierbarkeit zwischen der während der Durchführung der Versuche eingestellten relativen Umgebungsluftfeuchtigkeit und dem zeitabhängigen Deformationsverhalten ist wie schon bei der Betrachtung von Bild 4.12 auch bei der Betrachtung der detaillierten Darstellung in Bild 4.13 nicht festzustellen. Um zu überprüfen, ob der bei der Betrachtung der Verzerrungs-Zeit-Graphen für die Prüfkörper UCc 1 und UCc 2 entstandene Eindruck, dass zeitabhängige Deformationsprozesse wenn überhaupt dann nur für kurze Zeit zu Beginn einer neuen Laststufe ablaufen, bevor die zeitabhängigen Deformationsprozesse stagnieren und die Verzerrungs-Zeit-Graphen einen näherungsweise horizontalen Verlauf annehmen, auch für längere Belastungszeiträume der Realität entspricht, sind im Anschluss an die Versuche an den Prüfkörpern UCc1 und UCc2 drei Versuche mit einer Dauer der einzelnen Laststufen von $\Delta t = 30$ d an den drei Prüfkörpern UCc3 bis UCc5 gefahren worden. Die detaillierte Darstellung der Verzerrungs-Zeit-Graphen der drei einaxialen Dauerstandversuche enthält Bild 4.14.

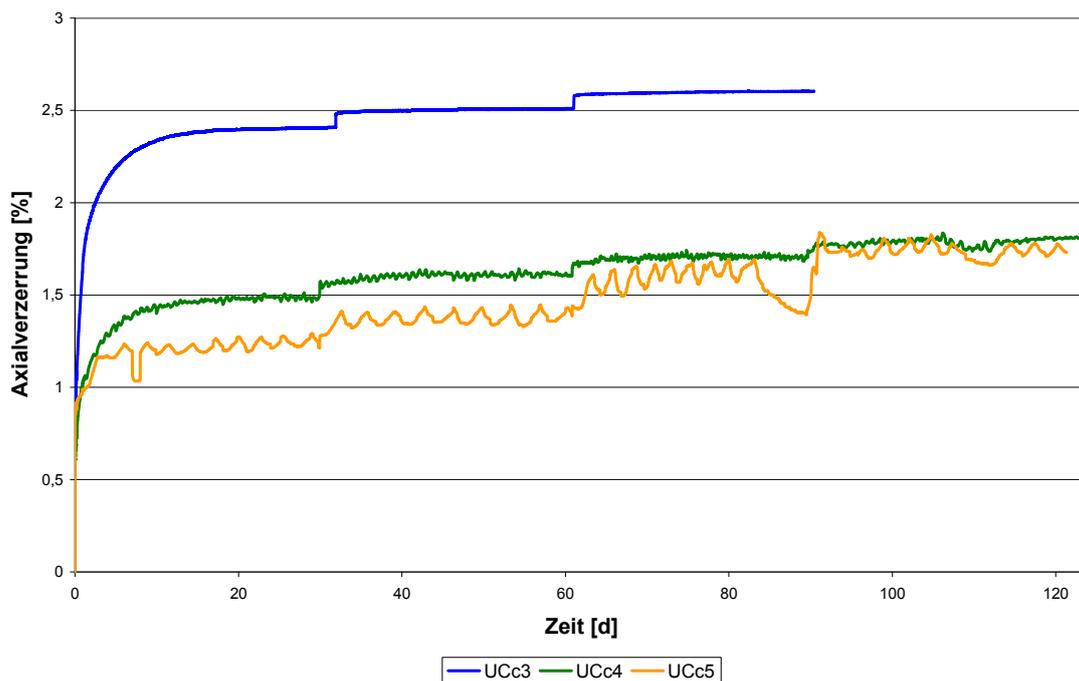


Bild 4.14: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für die Prüfkörper UCc3, UCc4 und UCc5 mit drei bzw. vier gefahrenen Laststufen mit einer Dauer von jeweils $\Delta t = 30$ d (UCc3: $R_H = 50$ %; UCc4: $R_H = 60$ %; UCc5: $R_H = 80$ %)

Die drei Versuche mit einer Dauer der einzelnen Laststufen von $\Delta t = 30$ d bestätigen den zuvor bei der Betrachtung der Versuchsergebnisse für die Prüfkörper UCc1 und UCc2 gewonnenen Eindruck, dass es nur zu Beginn der ersten Laststufe zu einer deutlich identifizierbaren zeitabhängigen Deformation der Prüfkörper kommt, die jedoch relativ schnell abklingt, sodass

gegen Ende der ersten Laststufe keine eindeutig anhand der Betrachtung der Verzerrungs-Zeit-Graphen zu identifizierende zeitabhängige Deformation mehr festzustellen ist. Für alle weiteren Laststufen sind die instantanen Deformationsprozesse gegenüber den zeitabhängigen Deformationsprozessen für die drei in Bild 4.14 dargestellten Versuchsergebnisse noch deutlich dominanter. Bereits sehr kurze Zeit nach der Lasterhöhung sind keine zeitabhängigen Deformationen mehr innerhalb eines der drei dargestellten Verzerrungs-Zeit-Graphen zu identifizieren und die drei Graphen nehmen jeweils einen horizontalen oder zumindest nahezu horizontalen Verlauf an.

Durch die Befeuchtung zur Regulierung der relativen Luftfeuchtigkeit innerhalb der Dauerprüfstände kann es trotz der im Vorfeld der Untersuchungen vorgenommenen Umbauarbeiten zur Spezialisierung der Prüfstände auf die Durchführung von Versuchen unter sehr feuchten Bedingungen zu Störungen der sensiblen Messtechnik innerhalb der Prüfstände kommen. Eine Störung der Messtechnik hat dazu geführt, dass der Versuch an Prüfkörper UCc3 bereits unmittelbar zu Beginn der vierten Laststufe abgebrochen werden musste. Des Weiteren sind, wie aus dem unruhigen Verlauf des orangefarbenen Messwertgraphen in Bild 4.14 entnommen werden kann, auch bei der Durchführung des Dauerstandversuchs für den Prüfkörper UCc5 Störungen der Steuerungselektronik aufgetreten. Das relativ starke Oszillieren des zugehörigen Verzerrungs-Zeit-Graphen ist somit nicht auf gesteinsmechanische Ursachen, sondern auf eine Beeinflussung der Steuerungselektronik durch aus der hohen Luftfeuchtigkeit resultierende Effekte zurückzuführen.

Bild 4.15 zeigt abschließend die detaillierte Abbildung der beiden Verzerrungs-Zeit-Graphen, die für die Prüfkörper UCc6 und UCc7 mit einer Axiallast von $\sigma_1 = 8 \text{ MPa}$ bei relativen Luftfeuchtigkeiten von $R_H = 95 \text{ \%}$ bzw. $R_H = 97 \text{ \%}$ aufgezeichnet worden sind. Deutlich zeigt sich in Bild 4.15 der Unterschied bezüglich des zeitabhängigen Deformationsverhaltens zu den weiteren fünf gefahrenen einaxialen Dauerstandversuchen.

Während die Prüfkörper UCc1 bis UCc5 bei Umgebungsluftfeuchtigkeiten von $50 \text{ \%} \leq R_H \leq 90 \text{ \%}$ jeweils kurze Zeit nach einer Lasterhöhung eine (näherungsweise) Stagnation des zeitabhängigen Deformationsverhaltens aufweisen, ist der Betrachtung des Diagramms in Bild 4.15 zu entnehmen, wie die beiden Prüfkörper sich bei einer gleichbleibenden Axiallast nach der anfänglichen belastungsbedingten Stauchung zeitabhängig über den gesamten $\Delta t = 38 \text{ d}$ lang andauernden Versuchszeitraum ausdehnen.

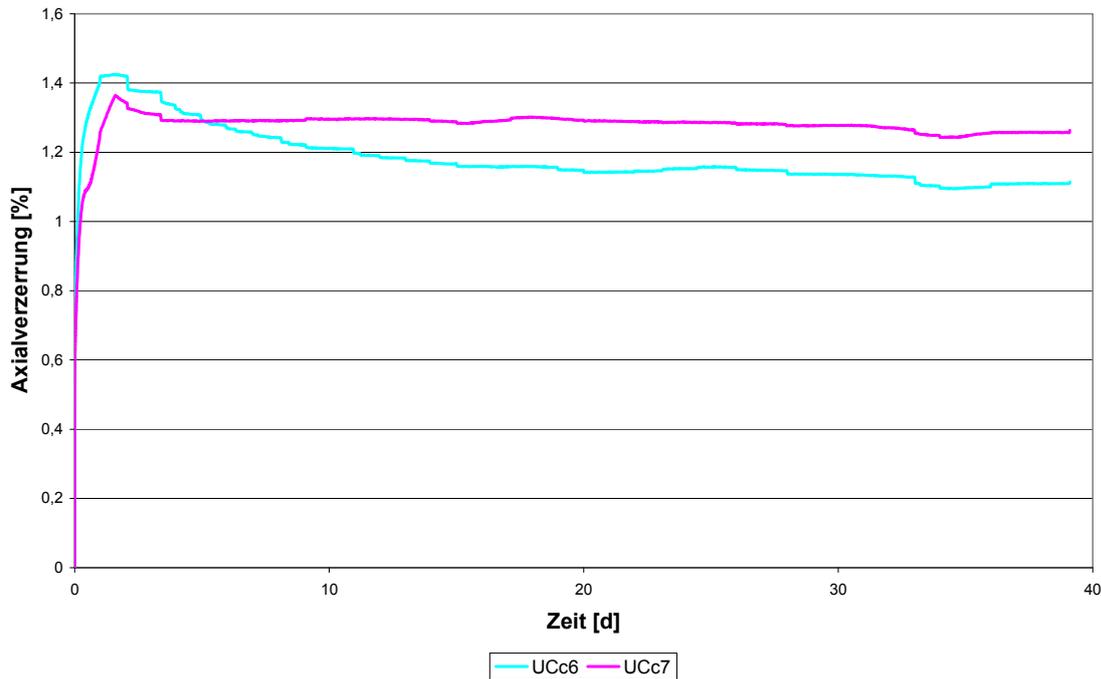


Bild 4.15: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für die Prüfkörper UCc6 und UCc7 mit einer gefährten Laststufe mit einer Dauer von jeweils $\Delta t = 38 d$ (UCc6: $R_H = 95 \%$; UCc7: $R_H = 97 \%$)

Insgesamt lassen sich aus den durchgeführten einaxialen Dauerstandversuchen die drei folgenden zentralen Erkenntnisse ableiten:

- (1) Für den Untersuchungsbereich der Umgebungsluftfeuchtigkeiten von $50 \% \leq R_H \leq 90 \%$ konnte kein eindeutiges kontinuierlich ablaufendes zeitabhängiges Deformationsverhalten im Sinne eines stationären Kriechens, wie es etwa für Steinsalz bekannt ist, identifiziert werden. Bereits kurz nach der Lasterhöhung bei Beginn einer neuen Laststufe nehmen die Verzerrungs-Zeit-Graphen unabhängig von der aufbrachten Axialspannung (4 MPa bis 12 MPa) und somit unabhängig von der vorherrschenden deviatorischen Belastung einen (nahezu) horizontalen Verlauf an. Allerdings ist aus dem Verlauf der Verzerrungs-Zeit-Graphen auch kein Konsolidationsprozess abzuleiten, der auch zu einer längerfristigen zeitabhängigen, von Gesteinspermeabilität und Beanspruchungsniveau abhängigen Deformation führen würde.
- (2) Für den Untersuchungsbereich der Umgebungsluftfeuchtigkeiten von $50 \% \leq R_H \leq 90 \%$ konnte keine Korrelation zwischen dem Deformationsverhalten (weder instantan noch zeitabhängig) und der Umgebungsluftfeuchtigkeit hergestellt werden. Einen weitaus dominanteren Einfluss insbesondere auf das instantane Deformationsverhalten scheint die

Teufe zu haben, aus der das Prüfkörpermaterial entnommen worden ist. Aus geringeren Teufen und damit näher zur Strecke entnommene Prüfkörper neigen zu deutlich größeren instantanen Deformationen insbesondere während der ersten Belastungsphase (→ Gebirgsentfestigung durch Streckenauffahrung?).

- (3) Die bei einer Umgebungsluftfeuchtigkeit von $R_H \geq 95\%$ laborativ untersuchten Prüfkörper aus größerer Teufe weisen ein grundsätzlich anderes zeitabhängiges Deformationsverhalten auf als die bei geringeren Umgebungsluftfeuchtigkeiten beprobten Prüfkörper. Offensichtlich bedingt durch Quelleffekte kommt es nach einer instantanen Stauchung der Prüfkörper auch unter vergleichsweise hohen axialen Belastungen (8 MPa) zu einer kontinuierlich voranschreitenden Prüfkörperextension.

4.7 Dauerstandversuch unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung

4.7.1 Versuchsaufbau und Versuchstechnik

Der Dauerstandversuch unter triaxialer Kompressionsbeanspruchung erfolgte auf der in Bild 4.16 gezeigten Prüfanlage. Ihr Aufbau ist gemäß der Schemaskizze in Bild 4.17 charakterisiert durch die 4 Module Axialkolben, Druckkammer, Dickwandiges Rohr und Bodenplatte. Eine konstruktive Besonderheit der in Bild 4.17 skizzierten Triaxialzelle gegenüber klassischen Anlagen ist die Integration der Axiallast erzeugung in die Triaxialzelle. Gegenüber klassischen Anlagen, bei denen die Axiallast über einen externen Zylinder unterhalb oder oberhalb der eigentlichen Triaxialzelle aufgebracht wird, kann durch die gezeigte Kombination von Triaxialzelle und Gleichgangzylinder (Axialdruckkammer) auf die sonst erforderliche Rahmenkonstruktion zur Ableitung der Axialkräfte verzichtet werden.

Die Hydraulikversorgung der Triaxialzellen erfolgt über ein Aggregat mit so genannter Bedarfsregelung. Dabei werden durch die online-Messung der Hydraulikdrücke kontinuierlich Soll- und Istwert verglichen. Bei Überschreitung eines vorgegebenen Differenzdruckes erfolgt rechnergesteuert die Aktivierung von Hydraulikmotor und Pumpe. Nachdem gegen die geschlossenen Ventile des jeweiligen Hydraulikkreislaufes der Sollwert durch kontinuierliche Druckerhöhung erreicht ist, erfolgt die computergestützte Öffnung des zugehörigen Elektromagnetventils mit nachfolgender Angleichung von Soll- und Istwert, Schließung des Elektromagnetventils und Abschaltung des Hydraulikaggregates.



Bild 4.16: Triaxialprüfanlage des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik

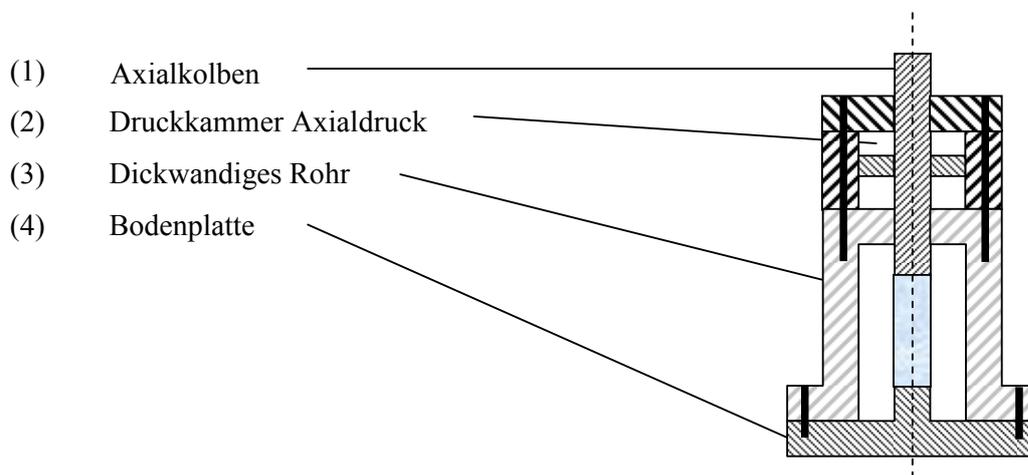


Bild 4.17: Prinzipskizze der Triaxialprüfanlage mit integrierter Axiallasterzeugung

Die Triaxialprüfanlage verfügt über insgesamt drei unabhängig voneinander regelbare Hydraulikkreisläufe (Axialdruckkreislauf, Manteldruckkreislauf, Innendruck / Infiltrationskreislauf). Die innerhalb der einzelnen Hydraulikkreisläufe zu- oder abgeführten Ölmengen können über zwischengeschaltete Gleichgangzylinder messtechnisch erfasst werden, sodass in Verbindung mit der Verformungsmessung in axialer Richtung die Volumenänderung der



Prüfkörper (Dilatanz / Kontraktanz) kontinuierlich aufgezeichnet werden kann. Die Ermittlung der Ölvolumina erfolgt rechnerisch durch Multiplikation der gegebenen Zylinderquerschnittsfläche mit dem jeweils induktiv gemessenen Kolbenhub. Die Genauigkeit der Messung kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Zylinderquerschnittsfläche mit 0,2ml bis 0,7ml angegeben werden. Als Leistungscharakterisierende Merkmale für den Regelbetrieb der Prüfanlagen sind zu nennen:

- * Maximale Axiallast: 404 kN
- * Maximaler Manteldruck: 35 MPa
- * Maximaler Fluiddruck: 35 MPa
- * Maximale Temperatur: 70°C
- * Maximaler Kolbenhub: 105 mm
- * Prüfkörperdurchmesser: 90 mm
- * Prüfkörperlänge: 180 mm

Die für die Versuchsauswertung erforderliche messtechnische Erfassung der Axialstauchung erfolgte mittels eines Induktivwegaufnehmers. Der auf die Prüfkörper einwirkende Axialdruck wird durch Umrechnung des mittels Absolutdruckaufnehmer im Prüfzylinder gemessenen Hydraulikdruckes ermittelt. Der Manteldruck entspricht dem im Radialdruckkreislauf gemessenen hydraulischen Druck. Zur Kontrolle und Regelung einer über die Versuchszeit konstanten Temperatur sind im Ringraum zwischen Triaxialzelle und Prüfkörper Pt-100 Sensoren installiert.

Zum Schutz gegen ein Eindringen des Druckmediums wurde der Prüfkörper vor dem Einbau in die Triaxialzelle mit einer Gummimanschette ummantelt. Nach dem Einbau des Prüfkörpers in die Triaxialzelle wurden zunächst durch wechselseitige Erhöhung von Axiallast und Manteldruck ein isotropes Spannungsniveau von $\sigma_{1,2,3} = 10$ MPa und eine Temperatur von $T = 30^\circ\text{C}$ eingestellt. Ausgehend von diesem isotropen Spannungszustand ist dann bei konstanter Mantelspannung $\sigma_{2,3}$ der versuchstechnisch vorgegebene Axialdruck $\sigma_1 = 25$ MPa mit einer gleichbleibenden Spannungsrate von $\dot{\sigma} = 1$ MPa/min eingestellt worden. Danach wurde unter Konstanthaltung des Manteldruckes die auf den verformten Prüfkörperquerschnitt bezo-



gene Axialspannung eingestellt. Dazu wurde durch einen elektronischen Regelkreis die Axialkraft entsprechend der zeitabhängigen Prüfkörperstauchung gesteigert.

Um gegebenenfalls durch die anhaltende kompressive Belastung aus dem Porenraum des Tongesteinsprüfkörpers ausgepresstem Porenwasser während der Versuchsdurchführung den Abfluss zu ermöglichen, ist an den Stirnseiten des Prüfkörpers je eine feinporige Metallplatte mit einer kleinen dahinter liegenden Kammer zum Auffangen des Porenwassers installiert worden.

4.7.2 Versuchsauswertung

Während der Durchführung des triaxialen Dauerstandversuchs wurden die installierten Messwertaufnehmer in Zeitintervallen von einer Sekunde abgefragt und an einen elektronischen Regelkreis übergeben. Aus den abgefragten und aufgezeichneten Daten sind die Berechnung der Axialverzerrung des Prüfkörpers entsprechend Gleichung (4.1) und die Berechnung der Axialspannung entsprechend Gleichung (4.3) und Gleichung (4.4) erfolgt.

Die elektronische Speicherung der in Zeitinkrementen von 1 Sekunde abgefragten Daten der Aufnehmer erfolgte in Zeitschritten von 5 Minuten. Zur Dokumentation der Ergebnisse des triaxialen Dauerstandversuchs unter Kompressionsbeanspruchung wird im nachfolgenden Abschnitt 4.7.3 der während der Versuchsdurchführung aufgezeichnete Verzerrungs-Zeit-Graph dargestellt und diskutiert.

4.7.3 Ergebnisse des triaxialen Dauerstandversuchs

(a) *Zum Deformationsverhalten*

Die wichtigsten Informationen zum verwendeten Prüfkörper und die wichtigsten Versuchsparmeter werden zunächst in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Neben den bereits in Tabelle 4.1 aufgeführten Informationen zum Prüfkörper kann Tabelle 4.5 entnommen werden, dass der Prüfkörper über einen Zeitraum von $\Delta t = 386$ d und somit über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr bei einem Spannungszustand von $\sigma_1 = 25$ MPa und $\sigma_{2,3} = 10$ MPa untersucht worden ist. Die deviatorische Belastung des Prüfkörpers hat somit über den gesamten Versuchszeitraum hinweg mit einem Zahlenwert von $\sigma_v = 15$ MPa

deutlich oberhalb der deviatorischen Beanspruchung gelegen, dem das Gestein vor dem Erbohren im URL Mont Terri ausgesetzt gewesen ist.

Bezeichn.	Bohrloch	Fazies	Teufe [m]	Prüfkörpertyp	Versuchsdauer [d]	Anz. Laststufen	σ_1 [MPa]	$\sigma_{2,3}$ [MPa]
TCC 1	BDM-B2	shaly	5,72 – 5,90	S	386	1	25	10

Tabelle 4.5: Tabellarische Zusammenstellung von Informationen zum verwendeten Prüfkörper sowie zur Versuchsdauer und der aufgetragenen Belastung für den triaxialen Dauerstandversuch

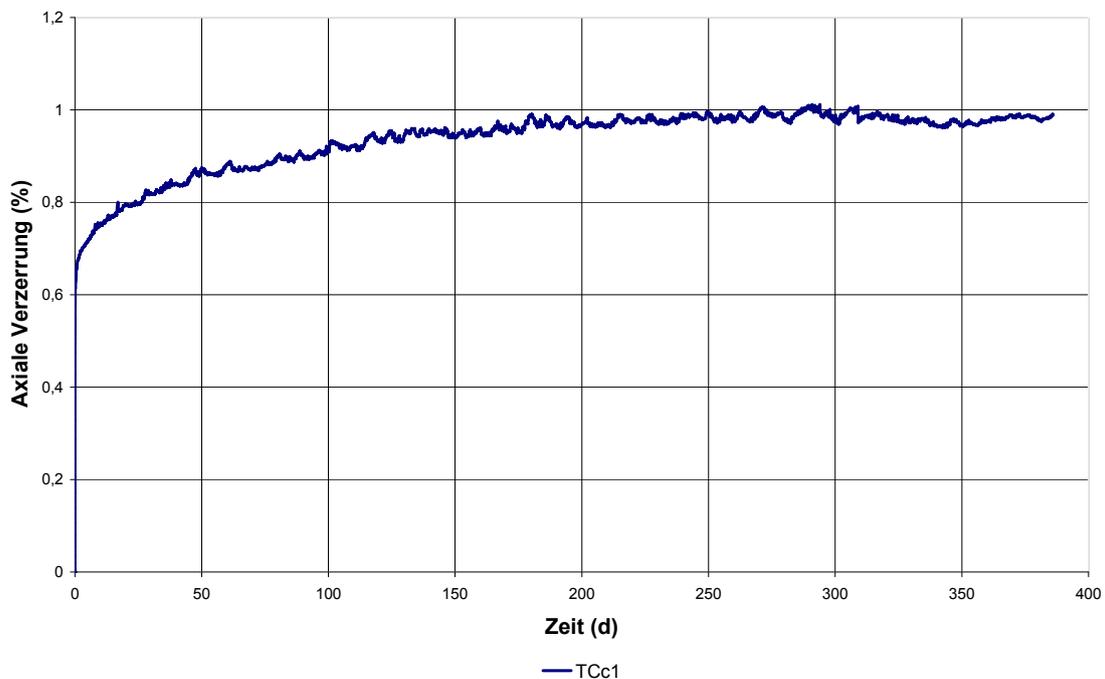


Bild 4.18: Verzerrungs-Zeit-Diagramm für den triaxialen Dauerstandversuch unter Kompressionsbeanspruchung (TCC-Versuch)

t [d]	0 (instantan)	25	50	100	150	200	250	300	350	386
ε_t [%]	0,65	0,80	0,87	0,93	0,95	0,98	0,99	0,99	0,97	0,99

Tabelle 4.6: Axiale Prüfkörperverzerrung zu ausgewählten Versuchszeitpunkten

Den während des Versuchs aufgezeichneten Verzerrungs-Zeit-Graphen zeigt Bild 4.18. Der Betrachtung des Verzerrungs-Zeit-Diagramms in Bild 4.18 kann entnommen werden, dass der Prüfkörper während der gesamten Versuchsdurchführung um insgesamt $\varepsilon \approx 1,0\%$ gestaucht worden ist. Aufgrund der tendenziell über die etwa ersten 250 Tage als stetig zu bezeichnende Abnahme der Deformationsgeschwindigkeit im Verlauf der Versuchsdurchführung bis hin zu einer dann (näherungsweise) Stagnation der Deformation gegen Ende des Versuchs ist es nicht möglich, eine stationäre Deformationsrate vergleichbar mit einer stationären Kriechrate zu bestimmen, wie sie üblicherweise für Steinsalzprüfkörper ermittelt wird.

Um das zeitabhängige Deformationsverhalten des Opalinuston-Prüfkörpers dennoch quantitativ zu charakterisieren, sind in Tabelle 4.6 die zu unterschiedlichen Versuchszeitpunkten gemessenen axialen Prüfkörperverzerrungen dargestellt.

Der Betrachtung von Bild 4.18 und Tabelle 4.6 kann entnommen werden, dass ca. zwei Drittel der Gesamtverformung auf instantan auftretende elastische und plastische Deformationen zurückzuführen sind und dass somit nur ca. ein Drittel der Gesamtverformung zeitabhängig erfolgt. Die zeitabhängigen Verformungsraten reduzieren sich mit zunehmender Standzeit auch bei der konstanten Beanspruchung deutlich. So erfolgen ca. 43 % der zeitabhängigen Verformungen innerhalb der ersten 25 Tage der Versuchslaufzeit. In den nächsten 25 Tagen erfolgen weitere ca. 20 % der zeitabhängigen Deformationen, sodass nach nur $t = 50$ d bereits ca. 63 % aller im Verlauf der Versuchsdurchführung zu verzeichnenden zeitabhängigen Deformationsprozesse abgeschlossen sind. In den folgenden 50 Tagen ereignen sich weitere ca. 17 % der zeitabhängigen Deformationen. Daher sind zum Versuchszeitpunkt $t = 100$ d nach Versuchsbeginn 80 % der zeitabhängigen Verformungen abgeschlossen. Wie der weiteren Betrachtung von Tabelle 4.6 entnommen werden kann, finden die restlichen 20 % der insgesamt gemessenen zeitabhängigen Deformationen zwischen den Versuchszeitpunkten $t = 100$ d und $t = 250$ d statt, was die bemerkenswerte Verlangsamung der ablaufenden Deformationsprozesse des untersuchten Opalinuston-Prüfkörpers über den Versuchszeitraum hinweg verdeutlicht. Zwischen dem Versuchszeitpunkt $t = 250$ d und dem Endzeitpunkt des Versuchs bei $t = 386$ d sind keine weiteren zeitabhängigen Deformationen mittels der angewendeten Versuchstechnik identifizierbar gewesen. Der Rückgang der Prüfkörperstauchung von $\varepsilon = 0,99\%$ auf $\varepsilon = 0,97\%$ und damit um $\Delta\varepsilon = 0,02\%$, d.h. eine Reduzierung der Stauchung um etwa 2 %, im Versuchszeitraum von $t = 300$ d bis $t = 350$ d und die anschließende Zunahme um



den gleichen Betrag sind vielleicht durch Temperaturschwankungen in der Umgebung des Prüfstandes bedingt.

Anhand des Verlaufs des Verzerrungs-Zeit-Graphen insbesondere im Bereich der letzten 116 Tage der Versuchsdurchführung entsteht der Eindruck, die zeitabhängigen Deformationsprozesse seien innerhalb des Versuchszeitraums vollständig zum Erliegen gekommen, was als ein erstes Indiz gegen das Auftreten von stationären zeitabhängigen Deformationsprozessen im Opalinuston gewertet werden kann. Um eine allgemeingültige und belastbare Aussage bezüglich des zeitabhängigen Deformationsverhaltens für Opalinuston aus der Lokation URL Mont Terri insbesondere in Bezug auf die Frage nach einem stationären Deformationsverhalten (= stationäres Kriechen?) formulieren zu können, ist jedoch in Zukunft die Durchführung einer größeren Anzahl von weiteren triaxialen Langzeitkompressionsversuchen mit Standzeiten von $\Delta t > 1$ a an Opalinuston-Prüfkörpern aus dem URL Mont Terri notwendig.

(b) Zum hydraulischen Verhalten

Ein möglicher Erklärungsansatz für das makroskopisch zu beobachtende zeitabhängige Deformationsverhalten des Prüfkörpers TCc1 könnte lauten, dass sich durch die mit dem Aufbringen des versuchstechnisch festgelegten Belastungszustands einhergehende Deformation der Gesteinsmatrix eine Kompaktion des wassergesättigten Porenraumes des Opalinustons ereignet. Aus der Kompaktion des Porenraumes resultiert bei hinreichend geringer Permeabilität der instantane Aufbau eines Porenwasserüberdrucks, der zeitabhängig nur langsam durch ein Austreten von Wasser aus dem Prüfkörper abgebaut werden kann. Um während der Versuchsdurchführung ein ungehindertes Austreten von Wasser und damit einen möglichst widerstandsfreien Abbau des Porenwasserüberdrucks zu ermöglichen, sind an den Stirnseiten des Prüfkörpers feinporige Filterplatten mit dahinterliegender Wasserauffangkammer installiert worden. Für den Fall, dass die gemessene zeitabhängige Prüfkörperstauchung auf das Auspressen von Porenwasser im Zuge des Porenwasserüberdruckabbaus aus dem Prüfkörper heraus (= Konsolidation) zurückzuführen ist, hätte sich das ausgepresste Porenwasser innerhalb der Filterplatten, hinter den Filterplatten in den Auffangkammern oder zwischen den Filterplatten und dem Prüfkörper bzw. zwischen dem Gummimantel und dem Prüfkörper ansammeln müssen. Wie den unmittelbar nach Beendigung des Versuchs entstandenen Aufnahmen in Bild 4.19 entnommen werden kann, haben sich jedoch keinerlei derartige Indizien für das Auspressen von Porenwasser aus dem Prüfkörper heraus identifizieren lassen.

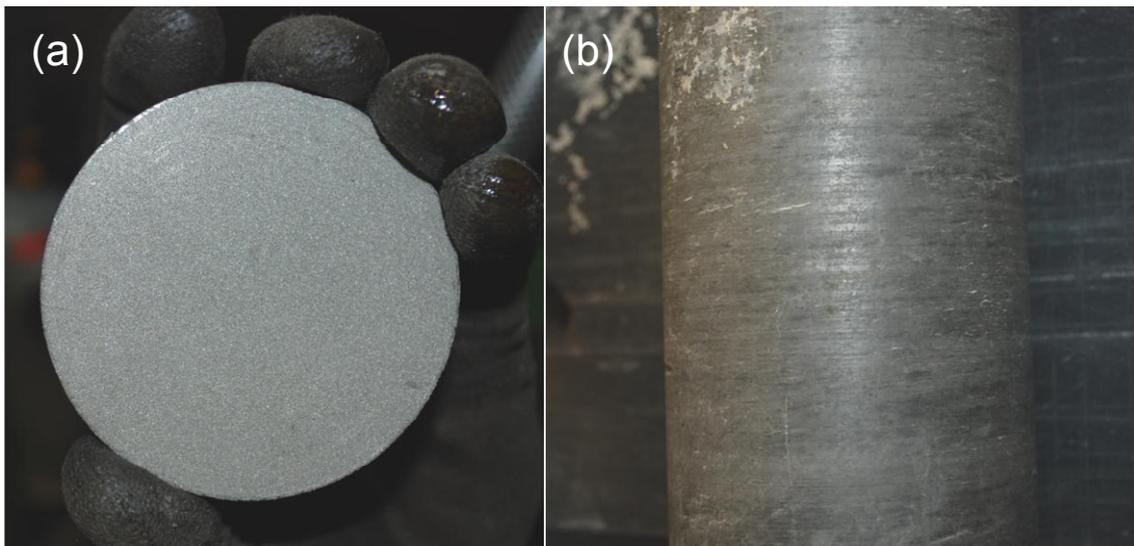


Bild 4.19: (a) Poröse Metallplatte und (b) Prüfkörperoberfläche mit aufgeschnittenem Gummimantel im Hintergrund ohne optisch identifizierbare Anzeichen von aus dem Prüfkörper ausgetretenem Porenwasser

Bild 4.19(a) zeigt stellvertretend für die observierte Trockenheit der porösen Metallplatten nach der Versuchsdurchführung die Oberseite der unterhalb des Prüfkörpers eingebauten Metallplatte und in Bild 4.19(b) ist ein Teil der vollständig trocken erscheinenden Prüfkörperoberfläche wenige Sekunden nach dem Aufschneiden des im Hintergrund von Bild 4.19(b) zu erkennenden Gummimantels abgebildet.

Auch das Wiegen der zwei Metallplatten vor und nach der Versuchsdurchführung hat keinen Hinweis auf einen Verbleib von gegebenenfalls aus dem Prüfkörper ausgepresstem Porenwasser liefern können. Mit einer Messgenauigkeit im Bereich von einem Zehntelgramm wurden vor und nach der Versuchsdurchführung für die beiden Metallfritten die identischen Massen von $M_1 = 61,6$ g und $M_2 = 61,4$ g ermittelt.

Somit konnte anhand der durchgeführten Untersuchungen kein Hinweis auf einen Austritt von Porenwasser aus dem Prüfkörper während der Versuchsdurchführung identifiziert werden. Es ist in diesem Zusammenhang allerdings hervorzuheben, dass bei der gemessenen axialen Stauchung des Prüfkörpers um $\Delta l_{\text{ges}} \approx 1,8$ mm, selbst wenn jegliche Deformation ausschließlich auf eine Abgabe von Porenwasser zurückzuführen wäre und eine Ausdehnung des Prüfkörpers in lateraler Richtung nicht stattfinden würde, was als äußerst unwahrscheinlich zu betrachten ist, lediglich eine Menge an Porenwasser von $V_{\text{PW}} \approx 11,5$ cm³ aus dem Prüfkörper ausgepresst worden wäre. Bei Austritt dieser Wassermenge aus dem Prüfkörper würde ein Feuchtfilm auf der Prüfkörpermantelfläche resultieren, der allerdings bei einer sofort



nach dem Prüfkörperausbau aus der Prüfanlage durchgeführten visuellen Bemusterung nicht festgestellt werden konnte. Eine derartig geringe Menge an Wasser, die sich gegebenenfalls auf die gesamte Prüfkörperoberfläche sowie auf die beiden Metallplatten verteilt, ist sowohl anhand der durchgeführten optischen Begutachtung sowie auch messtechnisch nur überaus schwer zu erfassen, sodass die augenscheinliche Trockenheit der Metallplatten, des Gummimantels und der Prüfkörperoberfläche zwar als Indiz dafür gewertet werden kann, dass kein Porenwasser aus dem Prüfkörper ausgetreten ist, sich dieser Sachverhalt aber auch nicht mit vollständiger Sicherheit auf Basis der durchgeführten Untersuchungen feststellen lässt.

Somit kann auf der Grundlage des triaxialen Dauerstandversuchs unter Kompressionsbeanspruchung weder bestätigt noch widerlegt werden, dass ein Zusammenhang besteht zwischen dem Porenwasserüberdruckabbau in den Porenräumen des Prüfkörpers und dem makroskopisch messtechnisch erfassbaren zeitabhängigen Deformationsverhalten des Opalinuston-Prüfkörpers. Allerdings kann aus dem Versuchsverlauf wohl tendenziell die Schlussfolgerung gezogen werden, dass trotz der relativ hohen deviatorischen Beanspruchung von $\sigma_v = 15$ MPa und dem hier vorliegenden triaxialen Beanspruchungszustand mit $\sigma_3 = 10$ MPa nach einer transienten Deformationsphase kein langfristiges stationäres Kriechen zu beobachten gewesen ist. Dass dieses tendenzielle Verhalten auch generalisiert werden kann, muss durch weitere Versuche gezeigt werden. Hier besteht für die Zukunft weiterer Forschungsbedarf, wobei insbesondere dem Sättigungsgrad des Prüfkörpers und der direkten Messung des Porenwasserdrucks vertiefende Beachtung zukommen sollte. Erste diesbezüglich am LfD&G durchgeführte Untersuchungen bei allerdings deutlich geringeren deviatorischen Beanspruchungen sind ausführlich in *Czaikowski (2011)* dokumentiert.



Literaturverzeichnis zu Teil I

- Blanco Martín, L.; Rutqvist, J.; Birkholzer, J.T.; Wolters, R.; Rutenberg, M.; Zhao, J.; Lux, K.-H. (2014):* Comparison of two modeling procedures to evaluate thermal-hydraulic-mechanical processes in a generic salt repository for high-level nuclear waste. Online-Tagungsband zum 48. „U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium“ der ARMA, 1.-4. Juni 2014, Minneapolis, Minnesota, USA, ARMA 14-7411.
- Blümling, P.; Bernier, F.; Lebon, P.; Martin, C.D. (2007):* The excavation damaged zone in clay formations – time-dependent behaviour and influence on performance assessment. Physics and Chemistry of the Earth, Band 32(8-14) (Tagungsband der 2. internationalen ANDRA-Konferenz „Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement“, 14.-18. März 2005, Tours, Frankreich), Seiten 588-599, Elsevier.
- Bock, H. (2001):* RA Experiment – Rock Mechanics Analyses and Synthesis: Data Report on Rock Mechanics. TR 2000-02. Technischer Bericht des Mont Terri Project, Schweiz.
- Bock, H. (2009):* RA Experiment: Updated Review of the Rock Mechanics Properties of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field Testing. TR 2008-04. Technischer Bericht des Mont Terri Project, Bern, Schweiz.
- Bollingerfehr, W.; Buhmann, D.; Filbert, W.; Keller, S.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Müller-Hoeppe, N.; Weber, J.R.; Wolf, Jens (2013):* Status of the safety concept and safety demonstration for an HLW repository in salt. TEC-15-2013-AB. Zusammenfassender Bericht zu den BMWi-Forschungsvorhaben „KOMTESSA“ mit den Förderkennzeichen 02E10719 und 02E10729, GRS/BGR/DBETEC, Peine.
- Bossart, P.; Thury, M. (2008):* Mont Terri Rock Laboratory – Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Berichte der Landesgeologie (Swiss Geological Survey), Nr. 3, Wabern, Schweiz.
- Cabrera, J. (2009):* The Tournemire Experimental Platform. Vortrag im Rahmen des von der IAEO in Zusammenarbeit mit dem IRSN organisierten Kurses „Regional Training Course on Underground Testing in Hard Clays as Geological Formation for Radioactive Waste Disposal – Highlights from IRSN Safety Research Performed at Tournemire to Support Regulatory Review“, 15.-19. Juni 2009, Tournemire, Frankreich.
- Cabrera, J.; Volant, P.; Baker, C.; Pettitt, W.; Young, R.P. (1999):* Structural and geophysical investigations of the EDZ (Excavation Disturbed Zone) in indurated argillaceous media:



- The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site, France. Rock Mechanics for Industry (Tagungsband zum 37. „U.S. Rock Mechanics Symposium“ der ARMA, 7.-9. Juni 1999, Vail, Colorado, USA), Seiten 957-964, A A Balkema Publishers.
- COMSOL Inc. (2011):* COMSOL Multiphysics 4.2, User's Guide. Offizielles Software-Benutzerhandbuch.
- Corkum, A.G. (2006):* Non-linear Behaviour of Opalinus Clay Around Underground Excavations. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Kanada. Ph.D.-Schrift.
- Cosenza, P.; Ghoreychi, M. (1994):* Thermo-hydro-chemico-mechanical processes in salt – Application to the measurement of permeability to gas and brine. Nuclear science and technology (Tagungsband *EUR 15734 EN* der Europäischen Kommission zur internationalen PEGASUS-Konferenz, 3.-4. Juni 1993, Köln), Seiten 149-170, EU-Veröffentlichung.
- Czaikowski, O. (2011):* Laborative und rechnerische Untersuchungen zu geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen im Tongestein im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Heft Nr. 17 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld. Dissertation.
- Czaikowski, O.; Komischke, M.; Lux, K.-H.; Rutenberg, M.; Seeska, R.; Wieczorek, K. (2015):* Comparative modelling and simulation of selected in-situ measurements performed at URL Mont Terri using FLAC-TOUGH and CODE_BRIGHT. Posterpräsentation auf der 6. internationalen Konferenz „Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement“, ONDRAF/NIRAS, 23.-26. März 2015, Brüssel, Belgien.
- Czaikowski, O.; Lux, K.-H. (2006):* Physical modelling and numerical simulation of long-term deformation behaviour of indurated clay with special consideration of anisotropic effects and in situ measurements. Tagungsband des regionalen ISRM-Symposiums „Eurock 2006 – Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics“, 9.-12. Mai 2006, Lüttich, Belgien, Seiten 487-492, Taylor & Francis.
- Czaikowski, O.; Lux, K.-H. (2008):* New method for ageing resistant storage of argillaceous rock samples to achieve reproducible experimental results even after long intermediate storage times. Physics and Chemistry of the Earth, Band 33(S1) (Tagungsband der 3. internationalen ANDRA-Konferenz „Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive



Waste Confinement“, 17.-20. September 2007, Lille, Frankreich), Seiten S444-S447, Elsevier.

Düsterloh, U.; Lux, K.-H. (2003): Geologische und geotechnische Barrieren – Gedanken zur Nachweisführung. Clausthaler Kolloquium zur Endlagerung 2003, 8.-9. Mai 2003, Heft Nr. 14 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Seiten 89-120.

Eberth, S. (2008): Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge. Heft Nr. 15 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld. Dissertation.

Faust, B.; Krüger, R.; Lucke, A.; Tertel, S. (2011): JIFE – Java Application for Interactive Nonlinear Finite-Element Analysis in Multi-Physics. Offizielles Software-Benutzerhandbuch.

Hampel, A.; Günther, R.-M.; Salzer, K.; Minkley, W.; Pudewills, A.; Leuger, B.; Zapf, D.; Rokahr, R.; Herchen, K.; Wolters, R.; Düsterloh, U. (2010): Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz. Synthesebericht zum BMBF-Forschungsvorhaben mit den Förderkennzeichen 02C1577 bis 02C1617.

Hou, Z. (2002): Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung. Heft Nr. 13 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld. Habilitationsschrift.

Hou, Z.; Lux, K.-H. (2004): A new coupling concept for the hydro-mechanical interaction of clay stone and rock salt in underground waste repositories. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Band 41(3) (Tagungsband zum 1. ISRM-SINOROCK-Symposium, 18.-21. Mai 2004, Yichang/Drei-Schluchten-Talsperre, China), Seite 495 (CD-ROM, 6 Seiten), Elsevier.

Hunsche, U.; Cristescu, N.D. (1997): Time Effects in Rock Mechanics. John Wiley & Sons.

Inderbitzin, L.; Möri, A.; Nussbaum, C.; Bossart, P. (2004): RA Experiment: Structural geological interpretation of the collapsed borehole BED-C3. TN 2003-33. Unveröffentlichte Technische Mitteilung des Mont Terri Project, Schweiz.



- Jobmann, M.; Amelung, P.; Billaux, D.; Polster, M.; Schmidt, H.; Uhlig, L. (2007):* Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland. Abschlussbericht zum BMWA-Forschungsvorhaben „GENESIS“ mit dem Förderkennzeichen 02E9733, DBETEC, Peine. (Haupt- und Anlagenband)
- Kock, I.; Eickemeier, R.; Frieling, G.; Heusermann, S.; Knauth, M.; Minkley, W.; Navarro, M.; Nipp, H.-K.; Vogel, P. (2012):* Integritätsanalyse der geologischen Barriere. GRS-286. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9.1 des BMU-Forschungsvorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“, BGR/GRS/IfG, Köln.
- Kolditz, O.; Bauer, S.; Bilke, L.; Böttcher, N.; Delfs, J.-O.; Fischer, T.; Görke, U.-J.; Kalbacher, T.; Kosakowski, G.; McDermott, C.I.; Park, C.-h.; Radu, F.; Rink, K.; Shao, Hua; Shao, Haibing; Sun, F.; Sun, Y.; Singh, A.K.; Taron, J.; Walther, M.; Wang, W.; Watanaabe, N.; Wu, Y.; Xie, M.; Xu, W.; Zehner, B. (2012):* OpenGeoSys: an open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media. *Environmental Earth Sciences*, Band 67(2), Seiten 589-599, Springer-Verlag.
- Krone, J. (2005):* Versuch eines Fazits hinsichtlich der Entwicklung von Endlagerkonzepten im Salz und Ton. Workshop: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein, 19.-20. Januar 2005, DBE, Peine.
- Lux, K.-H. et al. (2002a):* Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd, Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H. et al. (2002b):* Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen. Gutachten im Auftrag des AkEnd, Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H.; Czaikowski, O. (2005):* Rock-Mechanical Investigation for Validation of the Hou/Lux-T Constitutive Model Based on Underground Measurements in Argillaceous Rock Mass. Posterpräsentation auf der 2. internationalen ANDRA-Konferenz „Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement“, 14.-18. März 2005, Tours, Frankreich.



- Lux, K.-H.; Czaikowski, O.; Rutenberg, M.; Seeska, R.; Düsterloh, U. (2012):* Untersuchungen zur Validierung von Modellansätzen für Tongestein anhand von Feldexperimenten am Standort Tournemire (F) im Rahmen DECOVALEX-THMC. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E10427, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H.; Czaikowski, O.; Wolters, R.; Düsterloh, U. (2005a):* Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. *PSP-Element WS-0029*. Abschlussbericht im Auftrag des BfS, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H.; Czaikowski, O.; Wolters, R.; Düsterloh, U. (2006):* Laborative und numerische Grundlagenuntersuchungen zur Übertragbarkeit von Stoffmodellansätzen und EDV-Software für Endlager im Salzgestein auf Endlager im Tongestein. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E9632, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H.; Düsterloh, U.; Wolters, R. (2009):* Weiterentwicklung der EDV-Software INFIL zur Simulation des druckgetriebenen Infiltrationsprozesses von Fluiden in ein nicht permeables Barrieren-Gebirge (Salinar). Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02C1355, Clausthal-Zellerfeld.
- Lux, K.-H.; Hou, Z.; Düsterloh, U.; Wolters, R. (2005b):* Experimental Studies of Strength and Creep Behaviour as well as New Developments of the Hou/Lux-T Constitutive Model for Claystone. Posterpräsentation auf der 2. internationalen ANDRA-Konferenz „Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement“, 14.-18. März 2005, Tours, Frankreich.
- Lux, K.-H.; Seeska, R. (2010):* Möglichkeiten der Datenerhebung von Übertage zur Standortbewertung von Endlagern im Tonsteingebirge. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 3607R02596 im Auftrag des BfS, Clausthal-Zellerfeld.
- Martin, C.D.; Lanyon, G.W.; Bossart, P.; Blümling, P. (2004):* Excavation Disturbed Zone (EDZ) in Clay Shale: Mont Terri. *TR 2001-01*. Technischer Bericht des Mont Terri Project, Schweiz.
- Müller-Hoeppe, N.; Breustedt, M.; Wolf, Johanna; Czaikowski, O.; Wiczorek, K. (2012):* Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. *GRS-288*. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9.2 des BMU-Forschungsvorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“, DBETEC/GRS, Braunschweig.



- Nagra (2001):* Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht. *NTB 00-01*. Technischer Bericht der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, Schweiz. (Text- und Beilagenband)
- Niandou, H.; Shao, J.F.; Henry, J.P.; Fourmaintraux, D. (1997):* Laboratory Investigation of the Mechanical Behaviour of Tournemire Shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Band 34(1), Seiten 3-16, Elsevier.
- Rejeb, A. (2003):* Time-dependent behaviour of Tournemire argillites (France). Tagungsband des 10. internationalen ISRM-Felsmechanik-Kongresses „Technology roadmap for Rock Mechanics“, 8.-12. September 2003, Gauteng, Südafrika, Seiten 955-960.
- Rejeb, A.; Rouabhi, A.; Millard, A.; Maßmann, J.; Uehara, S. (2008):* DECOVALEX-THMC Project – Task C – Hydro-mechanical response of the Tournemire argillite to the underground openings excavation: unsaturated zones and mine-by-test experiment. *2008:44*. Abschlussbericht, Staatliches Kernkraftinspektorat (SKI), Stockholm, Schweden.
- Rübel, A.; Mönig, J. (2010):* Projekt VerSi: Endlagerung im Tongestein – Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes, Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz. *GRS-A-3535/4*. Abschlussbericht zum Teil 4 des BMU-Forschungsvorhabens mit dem Förderkennzeichen 3607R02538, Braunschweig.
- Rutenberg, M.; Czaikowski, O.; Lux, K.-H. (2012):* Time-Dependent Deformation of Claystone Rock Mass—Numerical Simulation and Field Measurement Data. Tagungsband *EUR 25527 EN* der Europäischen Kommission zur internationalen TIMODAZ/THERESA-Konferenz „Impact of Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical (THMC) processes on the safety of underground radioactive waste repositories“, 29. September-1. Oktober 2009, Luxemburg, Luxemburg, S. 459-463, EU-Veröffentlichung.
- Rutenberg, M.; Lux, K.-H. (2011):* Numerical simulation of the time-dependent deformation behaviour of claystone rock mass at the Tournemire site with 2D and 3D models. *Physics and Chemistry of the Earth*, Band 36(17-18) (Tagungsband der 4. internationalen ANDRA-Konferenz „Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement“, 29. März-1. April 2010, Nantes, Frankreich), Seiten 1913-1921, Elsevier.
- Rutqvist, J.; Wu, Y.-S.; Tsang, C.-F.; Bodvarsson, G. (2002):* A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous



- rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Band 39(4), Seiten 429-442, Elsevier.
- Schmidt, H.-H. (2001): Grundlagen der Geotechnik. 2. Auflage, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden.*
- Schulze, O.; Hunsche, U. (2005): Dilatanz und Permeabilität im Steinsalz und Tonstein. Workshop: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein, 19.-20. Januar 2005, DBE, Peine.*
- Tsang, C.-F.; Bernier, F.; Davies, C. (2005): Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Band 42(1), Seiten 109-125, Elsevier.*
- UPC (1994/2014): CODE_BRIGHT User's Guide. Offizielles Software-Benutzerhandbuch, Polytechnische Universität Katalonien (Universitat Politècnica de Catalunya), Barcelona, Spanien. (Versionen: 1994 Original, 2014 überarbeitet für Version 4.4)*
- Valès, F.; Bergues, J.; Nguyen Minh, D.; Gharbi, H.; Rejeb, A. (2002): Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire argillite (France). Tagungsband des 5. nordamerikanischen Felsmechanik-Symposiums und der 17. Konferenz der Tunnelling Association of Canada (NARMS-TAC 2002), „Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity“, 7.-10. Juli 2002, Toronto, Kanada, Seiten 1399-1406.*
- Wallner, M. (2003): Ergebnisse aus 25 Jahren Forschung der BGR zum Steinsalz. Clausthaler Kolloquium zur Endlagerung 2003, 8.-9. Mai 2003, Heft Nr. 14 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Seiten 74-88.*
- Zhang, C.-L.; Czaikowski, O.; Komischke, M.; Wieczorek, K. (2014): Thermo-Hydro-Mechanical Processes in the Nearfield around a HLW Repository in Argillaceous Formations – Volume II: In-situ-Investigations and Interpretative Modelling. GRS-313. Abschlussbericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E10377, Braunschweig.*
- Zhang, C.-L.; Dittrich, J.; Müller, J.; Rothfuchs, T. (2002): Experimental Study of the Hydro-mechanical Behaviour of the Callovo-Oxfordian Argillites. GRS-187. Bericht zum BMWi-Forschungsvorhaben mit dem Förderkennzeichen 02E9420, Braunschweig.*

