

DISS. ETH NO. 21415

**GEOMECHANICAL ANALYSIS OF EXCAVATION-INDUCED ROCK MASS BEHAVIOR
OF FAULTED OPALINUS CLAY
AT THE MONT TERRI UNDERGROUND ROCK LABORATORY
(SWITZERLAND)**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

RETO THÖNY

MSc of Science in Earth Sciences, ETH Zurich

born on 22. December 1981
citizen of Zillis-Reischen, Graubünden

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Löw

Dr. Florian Amann

Dr. Edward A. Button

Prof. Dr. Mark S. Diederichs

2014

EXTENDED ABSTRACT

Clay rock formations are widely accepted as potential host rocks for deep geological disposal of nuclear waste as they inherently exhibit favorable isolation characteristics in their natural state. However, due to unfavorable rock mechanical characteristics such as a relatively low strength and a brittle failure behavior the rock mass around an excavation may exhibit substantial perturbations. Thus, construction of underground openings in clay rocks may lead to the formation of a distinct excavation damage zone (EDZ) when redistributed stresses exceed the rock mass strength in the near-field of the tunnel. Exploring the contributing factors that influence the redistributed stress field and the EDZ damage around an advancing tunnel are particularly relevant in the context of risk assessment of deep geological disposal facilities for nuclear waste in clay rock formations.

To investigate the geomechanical processes associated with the rock mass response of faulted Opalinus Clay during conventional tunneling, a full-scale mine-by experiment was carried out in the Gallery 08 at the Mont Terri Underground Rock Laboratory (URL) in Switzerland. Excavation of the mine-by section was carried out concurrently with the construction of the Gallery 08. The mine-by section has a 5 m high horseshoe-shaped profile with a length of 32.5 m and was excavated full-face in 23 steps using a roadheader. The tunnel advanced approximately perpendicular to the bedding strike and in the direction of bedding dip (approximately 45°). The displacements and deformations in the surrounding rock mass were measured by geotechnical instrumentation including borehole inclinometer, extensometer and deflectometer, together with high resolution geodetic displacement measurements and laser scanning measurements of the excavation surfaces. Complimentary data was gathered from structural and geophysical characterization of the surrounding rock mass, comprising detailed geological mapping of the excavation surfaces, borehole logging data and seismic velocity tomography.

Analysis and interpretation of the gained field data was carried out in three parts:

In the first part complementary geological and geophysical characterization techniques on the tunnel and borehole-scale were used for a qualitative and quantitative analysis of the structural and kinematic relationship between the natural and excavation-induced fracture network surrounding the mine-by experiment. Integrating the results from seismic refraction tomography, borehole logging, and tunnel surface mapping revealed that spatial variations in fault frequency along the tunnel axis alter the rock mass deformability and strength which has a substantial effect on the location and radial extent of induced damage on both, the borehole and the tunnel-scale. It could be demonstrated that failure mechanisms, orientations and frequencies of excavation-induced fractures are significantly influenced by the occurrence and characteristics of tectonic faults. At the sidewalls where fault plane reactivation or bedding shear was kinematically constrained, extensional fracturing tangential to the tunnel circumference was the dominating failure mode. At the tunnel face and the tunnel invert, where fault and bedding planes were kinematically free, extensional brittle failure and shearing along bedding planes was dominant in sparsely faulted (0 - 1 fault/m²) tunnel sections, while a combination of shearing along fault planes associated with extensile failure

prevailed in tunnel sections that are intersected by 1 - 3 faults/m². With increasing fault density (> 4 faults/m²), reactivation of densely spaced fault planes became more evident indicating a transition from extensional macroscopic failure to shearing. Based on geological and geophysical data a new conceptual model of the EDZ geometry around the mine-by section was established. The model suggests a strongly damaged inner zone with a consistent radial extent of 0.5 - 1.5 m and less damaged outer zones with a radial extent of 4 m within fault zones and 2 - 3 m in between the fault zones. The depth of the inner zone seems to be unaffected by variations in fault plane density, while the radial extent of the outer zone is substantially influenced by pre-existing tectonic structures.

In the second part excavation-induced displacements and deformations around the mine-by experiment were analyzed on the fracture and the tunnel-scale to assess the influence of pre-existing faults and fault zones on the short- and long-term rock mass response. Displacements and deformations were continuously monitored throughout the excavation of the mine-by experiment and after its construction using borehole inclinometer, extensometers and deflectometer as well as high resolution geodetic and laser scanning measurements. Displacement monitoring data from the mine-by experiment revealed that the rock mass response of faulted Opalinus Clay is substantially governed by both the rock anisotropy and the kinematic failure behavior of individual fault planes, while the overall rock mass behavior correlates more with variations in larger-scale deformability and strength heterogeneities. Integration of the deformation measurements considering both the fracture and the tunnel-scale revealed that individual fault planes were most influential on the rock mass response at the tunnel face, crown and the invert, but were less influential at the sidewalls and at larger depths in the rock mass. At the sidewalls, where fault plane reactivation was of minor relevance due to their unfavorable orientation, the rock mass response was dominated by extensional fracturing through the intact rock matrix resulting in large displacements (up to 40 mm) adjacent to minor and major fault zones. Such excavation-induced fractures showed the potential to evolve into large spalls at the sidewalls, which decisively influenced the local stability of the tunnel. These findings suggest that in faulted Opalinus Clay both, deformations at the fracture and the tunnel-scale must be considered to understand the excavation-induced rock mass response and thus the associated spatial and temporal evolution of the displacement field associated with the development of the EDZ.

In the third part site-specific three-dimensional numerical modeling was used to examine the spatial and temporal evolution of the redistributed stress field around the mine-by section during its step-wise excavation. Elastic analyses demonstrated that deformability and strength heterogeneities in Opalinus Clay, primary caused by multi-scale fault zones, resulted in substantial stress concentrations in the adjacent rock mass leading to an enhanced potential for induced fracturing. Thus, numerical modeling requires considerations of both the rock anisotropy due to the bedding as well as the rock mass heterogeneity and anisotropy due to faults and fault zones to adequately reproduce the failure mechanisms and the associated displacement field observed during the mine-by experiment. Numerical model results showed that the observed spatial variations in failure depth and in the displacement pattern are reasonably reproduced with the utilized linear elasto-plastic model by using constitutive material properties derived from conventional laboratory testing. Although not explicitly implemented in the elasto-

plastic model, information regarding the kinematic failure modes of bedding and fault planes was gained from elastic stress path analysis and determined to be highly informative for identifying potential failure modes associated with variably orientated structural weaknesses.

ZUSAMMENFASSUNG

Für die geologische Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen erlangen Tongesteine aufgrund ihres hohen Einschlussvermögens zunehmend Akzeptanz als Wirtsgesteine. Die geringe Gesteinsfestigkeit und das spröde Bruchverhalten wirken sich beim Bau eines Untertagebauwerkes jedoch negativ auf das umgebende Gestein aus und können unter genügend hohen Gebirgsspannungen zu einer hohlraumnahen Auflockerungszone führen. Das Verständnis über die durch den Tunnelbau induzierten Spannungsumlagerungen um den Hohlraum, sowie deren Einflussfaktoren sind daher für den Bau und die Risikoabschätzung von zukünftigen, geologischen Tiefenlager in Tongesteinen von grosser Bedeutung.

Um die geomechanischen Prozesse und das damit verbundene Gebirgsverhalten in tektonisch überprägtem Opalinuston während des Tunnelvortriebs zu untersuchen, wurde in der Gallery 08 des Felslabors Mont Terri ein massstabgetreues Experiment auf der Tunnelskala durchgeführt. Der untersuchte Tunnelabschnitt hat einen hufeisenförmigen Querschnitt mit einem Durchmesser von rund 5 Metern und wurde während des Auffahrens der Gallery 08 ausgebrochen. Der Vollausschuss des 32.5 m langen Tunnelabschnittes erfolgte in 23 Abschlüssen mit Hilfe eines Roadheaders. Das Gebirgsverhalten und die damit verbundenen Deformationen um den Tunnelhohlraum wurden zum einen mit Hilfe von Deformationsmessgeräten in Bohrlöchern (Inklinometer, Deflektometer, Extensometer) und zum anderen mit geodätischen und Laserscanner Messungen an der Tunneloberfläche erfasst. Zusätzliche Daten umfassen geologische Kartierungen der Tunneloberflächen, Bohrkernanalysen, optische und geophysikalische Bohrlochmessungen, sowie seismische Refraktionsmessungen an der Tunneloberfläche.

Die Analyse und die Interpretation der gewonnenen Messdaten wurden in drei Schritten durchgeführt:

Im ersten Schritt wurde das natürliche und das durch den Tunnelbau induzierte Trennflächengefüge mit Hilfe von geologischen und geophysikalischen Messmethoden qualitativ und quantitativ erfasst. Seismische Geschwindigkeitsmessungen, Bohrkernaufnahmen und Tunnelkartierungen haben ergeben, dass räumliche Variationen der tektonischen Trennflächen entlang der Tunnelachse zu Festigkeits- und Steifigkeitsheterogenitäten im Gebirgsverband führen. Diese Gebirgsheterogenitäten haben sowohl auf der Bohrlochskala, sowie auf der Tunnelskala einen wesentlichen Einfluss auf die Lokalität und die radiale Ausdehnung von induzierten Brüchen um den Hohlraum. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl der Bruchmechanismus, die Orientierung, als auch die Häufigkeit von induzierten Brüchen entscheidend von den prä-existenten Klüften und deren Eigenschaften abhängen. An den Tunnelwänden, an denen die Klüfte kinematisch nicht frei sind, dominiert sprödes Bruchverhalten tangential zum Hohlraumrand. An der Tunnelbrust und an der Sohle sind die tektonischen Scher- und Schichtungsflächen durch den Tunnelausbruch kinematisch frei. In Tunnelabschnitten mit einer tektonischen Trennflächenhäufigkeit von 0 - 1 Trennfläche pro Quadratmeter dominieren vor allem Spröd- und Scherbrüche entlang von Schichtungsflächen. In Tunnelabschnitten mit einer tektonischen Trennflächenhäufigkeit zwischen 1 - 3 Trennflächen pro Quadratmeter treten vorwiegend reaktivierte Scherflächen und dadurch induzierte Extensionsbrüche

auf. Mit zunehmender Trennflächenhäufigkeit ändert sich das Bruchverhalten von vorwiegend sprödem Bruchverhalten zu hauptsächlichem Scherversagen entlang von prä-existenten Trennflächen. Basierend auf geologischen und geophysikalischen Messdaten wurde ein konzeptuelles Modell der Auflockerungszone für den untersuchten Tunnelabschnitt erstellt. Die Auflockerungszone besteht aus einer inneren, stark gestörten Zone mit einer radialen Ausdehnung zwischen 0.5 - 1.5 m und einer äusseren, weniger stark gestörten Zone mit einer radialen Ausdehnung von bis zu 4 m innerhalb von Störzonen und 2 - 3 m zwischen den Störzonen. Die innere Zone weist eine relative konstante Ausdehnung über den gesamten Tunnelabschnitt auf, während die radiale Ausdehnung der äusseren Zone, aufgrund der sich ändernden Trennflächenhäufigkeit, entlang der Tunnelachse stark variiert.

Um den Einfluss von prä-existenten, tektonischen Trennflächen und Störzonen auf das kurz- und langfristige Gebirgsverhalten zu untersuchen, wurden die durch den Vortrieb induzierten Verschiebungen und Deformationen auf zwei verschiedenen Grössenskalen analysiert (Trennflächen- und Tunnelskala). Das Gebirgsverhalten und die damit verbundenen Deformationen und Verschiebungen während und nach dem Ausbruch des untersuchten Tunnelabschnittes wurden zum einen mit Hilfe von Deformationsmessgeräten in Bohrlöchern und zum andern mit geodätischen und Laserscanner Messungen an der Tunneloberfläche erfasst. Die Messresultate haben gezeigt, dass das Gebirgsverhalten in stark tektonisiertem Opalinuston, sowohl von individuellen Trennflächen und deren Versagensmechanismen, als auch von den grossskaligen Gebirgsfestigkeits- und Steifigkeitsheterogenitäten bestimmt wird. Die Untersuchungen haben zusätzlich ergeben, dass Verschiebungen an individuellen Trennflächen vorwiegend an der Tunnelfirste, der Sohle und der Tunnelbrust auftreten. Das Bruchverhalten an den Tunnelwänden wird vor allem von spröden Bruchprozessen dominiert, welche im Nahbereich von Störzonen zu stark erhöhten Verformungen führen. Feldbeobachtungen haben ergeben, dass diese Verformungen im Zusammenhang mit grossskaligen Abschalungen an den Seitenwänden stehen, welche die Tunnelstabilität wesentlich beeinflussen. Diese Resultate zeigen, dass sowohl kleinskalige als auch grossskalige Deformationsprozesse berücksichtigt werden müssen, um das vortriebsinduzierte Gebirgsverhalten in tektonisch überprägtem Opalinuston und die damit verbundenen Deformationen zu verstehen.

Im dritten Schritt wurde mit Hilfe von dreidimensionalen, numerischen Modellierungen die zeitliche und räumliche Entwicklung der durch den Vortrieb induzierten Spannungen um den Hohlraum untersucht. Elastische Modellierungen haben gezeigt, dass Festigkeits- und Steifigkeitsheterogenitäten im Opalinuston zu erheblichen Spannungskonzentrationen im angrenzenden Gestein führen, was eine potentielle Erhöhung von spannungsinduzierten Brüchen zur Folge hat. Numerische Modellresultate haben ergeben, dass im Feld beobachtete Bruchtiefen und Verschiebungsmagnituden adäquat reproduziert werden können. Die dafür verwendeten Materialeigenschaften stammen ausschliesslich aus Laboruntersuchungen. Obwohl individuelle, tektonische Scher- und Schichtflächen nicht explizit im numerischen Modell implementiert wurden, haben elastische Spannungspfadanalysen wertvolle Informationen hinsichtlich deren kinematischen Versagensmechanismen ergeben.