

DISS. ETH NO. 17575

**A THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF  
EXCAVATION-INDUCED PERTURBATIONS IN  
THE OPALINUS CLAY AT THE MONT TERRI  
ROCK LABORATORY**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

SALINA YONG

Masters of Science in Geotechnical Engineering  
University of Alberta

01November1973

citizen of Canada

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Loew  
Dr. Corrado Fidelibus  
Prof. Dr. Peter K. Kaiser

2007

# Extended Abstract

In Switzerland, the Opalinus Clay is under consideration as a potential host rock for the deep geological disposal of nuclear waste. The construction of an underground opening perturbs the surrounding rock mass and leads to the creation of an Excavation Damaged/disturbed Zone (EDZ/EdZ), which may in turn lead to significant changes in hydraulic properties. Consideration of an overconsolidated argillaceous host rock adds mechanical complexities as these materials are inherently transitional and rarely isotropic. The Opalinus Clay at the Mont Terri Rock Laboratory in Switzerland is anisotropic and heterogeneous as bedding is thin and pronounced (thereby leading to intact rock anisotropy) while small-scale tectonic shears are prevalent (thereby leading to rock mass heterogeneity). Understanding the response of rock to excavation requires consideration of the structure of both the intact rock and the rock mass as failure can be structurally-controlled and/or stress-driven. While past and present investigations focus on the intact rock anisotropy caused by the bedding, none have considered the rock mass heterogeneity caused by the tectonic shears. This thesis examines the role of geological heterogeneity and its three-dimensional effect on the rock damage incurred by the construction of the EZ-B Niche at the Mont Terri Rock Laboratory.

The EZ-B Niche was excavated sequentially during a recent expansion of the Rock Laboratory, which resulted in the excavation of the adjoining Gallery04. Construction of the niche (6-7m long) was completed with a pneumatic hammer and involved eight excavation steps: one for the full-face excavation of the niche entrance, six for the excavation of the main body, and one for the excavation of the invert. A number of boreholes were also drilled from and around the niche. Three observation boreholes were drilled after the niche entrance was excavated but before the niche body was excavated. After the niche was completed, a remaining 12 boreholes were drilled in three planes with two vertical planes near the middle of the niche and one horizontal plane at the springline that included two additional boreholes in the final face of the niche. The rock mass surrounding the niche was monitored before, during, and after the niche excavation. This thesis considers geological mapping, drillcore mapping, digital optical televiewer imaging, single-hole seismic measurements, and geodetic displacement measurements.

Analysis and interpretation of the field data was carried out in two parts. The first focused on the EDZ/EdZ around Gallery04 as inferred from the induced fractures mapped in the entrance of the EZ-B Niche. Geological mapping of the niche entrance provided evidence that the tectonic shears influenced induced fracturing. Two sets of tectonic shears were intersected by the EZ-B Niche: one sub-parallel with bedding and one that is sub-horizontal. The stress redistribution in the surrounding rock mass was provided by two- and three-dimensional continuum and discontinuum numerical modelling to account for the tectonic shears and the intact rock anisotropy. Two-dimensional numerical modelling showed that induced fracturing mapped in the west entrance wall was most likely affected only by mobilisation of the bedding-parallel shears whereas induced fracturing in the east entrance wall was affected by mobilisation of both the bedding-parallel and sub-horizontal shears. As a result, induced fractures propagated sub-perpendicular to the bedding-parallel shears in the west wall and sub-perpendicular to the sub-horizontal shears in the east wall. In the surrounding intact rock, three-dimensional numerical modelling showed that mobilisation of the tectonic shears resulted in stress levels conducive for extensional (i.e. spalling) failure. Results from numerical simulations showed that when the tectonic shears are accounted for (i.e. more deformable than the surrounding intact rock), the stress field was influenced in a similar manner whether or not the intact rock was isotropic or anisotropic. This suggested that rock mass heterogeneity (i.e. due to the tectonic shears), rather than intact rock anisotropy (i.e. due to the bedding), played a key role in inducing the fractures mapped in the EZ-B Niche entrance.

In the second part of the analysis and interpretation, perturbations around the EZ-B Niche were assessed. Geological mapping of drillcore and digital optical televiewer imaging identified only a limited number of visible induced fractures. However, rock mass perturbations were clearly seen in the borehole seismic measurements and intensity changes in borehole instabilities. As a result, field data (drillcore mapping, digital optical televiewer imaging, and single-hole seismic measurements) were integrated to define the extent of the EDZ/EdZ around the niche. The EDZ/EdZ around the EZ-B Niche consisted of a thin zone of macroscopic fracturing (averaging 20cm) and a thicker zone of seismic wave amplitude

disturbance (ranging 50-100cm), which also coincided roughly with the depth where borehole instabilities commenced. Three-dimensional continuum numerical modelling showed that damage in the niche EDZ/EdZ could be attributed to spalling type failure in regions of high deviatoric stress and low confinement. In this case, damage increased and coincided with a decreasing spalling limit (i.e. ratio between the minimum and maximum principal stresses) as the excavation boundary was approached. Hence, damage around the EZ-B Niche in regions of high deviatoric stress and low confinement is related to micro-cracking resulting from redistributed stress levels in excess of the crack initiation threshold but below macroscopic failure.

Pertaining to nuclear waste storage, the relevance of the findings in this thesis is in the scale of the field experiment, which considers an excavation size that may be comparable to a repository scale. Although induced fractures in argillaceous rocks are expected to seal hydraulically due to physical and chemical alterations, design of tunnel support and engineered barriers necessitate determination of the EDZ/EdZ extent and associated failure mechanisms with confidence. With few macroscopic extensional fractures identified, this thesis demonstrated that the degree of rock damage can be correlated to changes in the spalling limit. In addition and most importantly, this study showed that excavation-induced perturbations in anisotropic rock mass can be strongly influenced by elastic and plastic shear on discrete tectonic discontinuities. Hence, determination of relevant mechanical properties for the tectonic discontinuities encountered in the Opalinus Clay at the Mont Terri Rock Laboratory needs to be carried out in future work.

# Zusammenfassung

Seit dem Projekt Entsorgungsnachweis wird in der Schweiz der Opalinuston als bevorzugtes Wirtsgestein zur geologischen Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle detailliert untersucht. Durch den Bau eines Tiefenlagers im Opalinuston (und anderen Gesteinstypen) werden mechanische Risse um den Hohlraum induziert und es bildet sich eine hohlraumnahe Auflockerungszone (Excavation Damaged/disturbed Zone, EDZ/EdZ), welche einen signifikanten Einfluss auf die anfänglichen hydraulischen Gebirgseigenschaften zur Folge hat. Überkonsolidierte Tonschiefer bringen zusätzlich eine mechanische Komplexität mit sich, da diese Materialien sowohl spröde wie duktile Verformungseigenschaften haben und selten isotrop sind. Der intakte Opalinuston ist aufgrund seiner sedimentären marinen Genese sehr feinkörnig und schichtartig aufgebaut und verhält sich im Labormassstab mechanisch anisotrop. Zusätzlich treten im Massstab der Untertagebauwerke im Felslabor Mont Terri viele tektonische Scherflächen auf, die zu einer markanten grossskaligen Heterogenität des Gebirges führen. Um die Reaktion des Gebirges auf die Ausbrucharbeiten um ein zukünftiges Endlager verstehen zu können, muss darum sowohl die Struktur des intakten Gesteins als auch des Gebirges berücksichtigt werden, da das Gebirge sowohl strukturbedingt als spannungsbedingt versagen (d.h. den elastischen Verformungsbereich überschreiten) kann. Während sich die bisherigen Untersuchungen zum mechanischen Verhalten des Opalinustons auf die sedimentär angelegte Anisotropie des intakten Gesteins konzentrierten, gab es bisher keine Untersuchung zu den Auswirkungen der aus den tektonischen Trennflächen resultierenden Gebirgheterogenität. Die vorliegende Arbeit untersucht die Rolle aller geologischen Heterogenitäten auf das dreidimensionale Bruchverhalten des Opalinustons während des Ausbruchs der EZ-B Nische im Felslabor Mont Terri, welche eine ähnlichen kreisförmigen Querschnitt wie die geplanten Endlagerstollen (Durchmesser von rund 4 Meter) hat.

Die 6-7 Meter lange EZ-B Nische wurde während einer im Jahr 2004 durchgeführten Erweiterung des Felslabors („Gallery04“) mit einem pneumatischen Hammer ausgebrochen. Der Bauvorgang der Nische bestand aus acht Schritten: Dem Vollausbuch des Nischeneingangs, sechs je eintägigen Abschlägen des kreisförmigen Nischenkörpers und einem Ausbruch einer horizontalen 30 cm tiefen Sohle. Zusätzlich wurden vier Piezometerbohrungen und zahlreiche Kernbohrung aus dem Inneren der Nische sowie um die Nische herum erstellt: Vier Piezometerbohrungen und drei lange horizontale Kernbohrungen wurden nach Ausbruch des Nischeneingangs, jedoch vor jenem des Hauptkörpers der Nische ausgebrochen. Nach der Fertigstellung der Nische wurden 12 weitere Kernbohrungen in drei Ebenen erstellt: in zwei vertikalen Ebenen nahe der Mitte der Nische und einer horizontalen Ebene mittig durch die endgültige Tunnelbrust. Die Reaktionen des die Nische umgebenden Gebirgskörpers wurden an den Ausbruchsoberflächen sowie in den Bohrungen systematisch vor, während und nach dem Ausbruch der Nische detailliert erfasst. Die in dieser Arbeit ausgewerteten Daten umfassen geologische Kartierungen, Bohrkernanalysen, digitale optische Bohrloch-Televierermessungen, Bohrloch-Refraktionsseismik sowie geodätische Verformungsmessungen.

Die Analyse und Interpretation dieser Felddaten wurde in zwei Schritten durchgeführt. Der erste Schritt konzentrierte sich auf die EDZ/EdZ um die Gallery04, die aus den durch die Gallery04 verursachten Rissen besteht, welche im Eingangsbereich der EZ-B Nische kartiert werden konnten. Die geologische Kartierung des Nischeneingangs deutet klar darauf hin, dass tektonische Scherflächen die Bildung von EDZ-Rissen beeinflussen. Zwei Familien mm-dünner tektonischer Scherflächen wurden in der EZ-B Nische angetroffen: die dominante Familie liegt sub-parallel zu den mit 45 Grad nach SSE einfallenden Schichtungsflächen mit einem Abstand von 0.2-1.0 Metern, die zweite Familie tritt nur lokal auf und liegt sub-horizontal. Die induzierten Spannungsumlagerungen im Opalinuston wurden durch zwei- und dreidimensionale, numerische Kontinuums- und Diskontinuums-Modellierungen berechnet, wobei die tektonische Scherflächen und die Gesteinsanisotropie berücksichtigt wurden. Zweidimensionale numerische Modellierungen zeigen, dass die induzierten Risse in der Westwand des Nischeneingangs sehr wahrscheinlich einzig durch die Mobilisierung der schichtparallelen Scherflächen beeinflusst wurden, während die induzierten Risse in der Ostwand durch die Mobilisierung sowohl von den schichtparallelen als auch sub-horizontalen Scherflächen beeinflusst wurden. Darum breiteten sich die dominierenden

induzierten Risse in der Westwand nahezu senkrecht auf die schichtparallelen Scherflächen und in der Ostwand nahezu senkrecht auf die sub-horizontalen Scherflächen aus. Für das umgebende Gebirge zeigen dreidimensionale numerische Modellrechnungen, dass die Mobilisierung tektonischer Scherflächen zu Spannungsverhältnissen führt, welche extensive Dehnungsrisse (d.h. Spalling) begünstigen. Die Ergebnisse der numerischen Modellierung zeigen auch, dass bei Berücksichtigung tektonischer Scherflächen (d.h. durch eine erhöhte Verformbarkeit verglichen mit dem intakten Umgebungsgestein) das Spannungsfeld sowohl für isotrope als auch anisotrope Gebirgseigenschaften auf ähnliche Weise beeinflusst wurde. Dies legt nahe, dass die Gebirgheterogenität auf Grund tektonischer Scherflächen eine Schlüsselrolle bei der Bildung der kartierten neuen Risse am EZ-B Nischeneingang spielte und nicht so sehr die primäre Anisotropie des intakten Gesteins auf Grund der sedimentären Schichtung.

Im zweiten Schritt der Analyse und Interpretation wurden die durch den Ausbruch induzierten Gebirgsveränderungen um die EZ-B Nische untersucht. Geologische Bohrkernaufnahmen und optische Bohrloch-Televiweraufnahmen zeigten lediglich eine geringe Anzahl von makroskopisch sichtbaren, Ausbruchs-induzierten Rissen. Hingegen können aus seismischen Bohrlochmessungen und spannungsinduzierten Bohrlochrandausbrüchen klare Gebirgsstörungen identifiziert werden. Darum wurden für die Erfassung der Ausdehnung der EDZ/EdZ um die EZ-B Nische verschiedenste Felddaten integriert. Die EDZ/EdZ um die EZ-B Nische besteht aus einer geringmächtigen Zone makroskopischer Risse (im Mittel 20 cm) und einer mächtigeren Zone (50-80 cm), die sich durch Veränderungen in den Amplituden und Geschwindigkeiten seismischer Wellen auszeichnet, und auch in etwa mit der Tiefe übereinstimmt, in der Bohrlochinstabilitäten auftreten. Dreidimensionale numerische Kontinuumsmodellrechnungen zeigen, dass das Gebirgsversagen in der EDZ/EdZ der Nische auf extensive Zugrisse (Spalling) in Bereichen hoher deviatorischer Spannungen und geringer Seitendrucke zurückzuführen ist. In diesem Fall nimmt das Ausmass der Gebirgsschädigung mit sinkendem Verhältnis zwischen der minimalen und maximalen Hauptspannung, d.h. in Richtung auf die Nischenwand zu. Daher kann die dominierende Gebirgsschädigung in der Umgebung der EZ-B Nische mit der Bildung mikroskopischer Risse erklärt werden, die in Regionen entstehen, wo die Spannungsumlagerungen zu hohen sekundären Deviatorspannungen und geringer Einspannung (Seitendrucke) führen, welche aber nur selten den Grenzwert überschreiten, der zur Ausbildung makroskopischer Risse notwendig wäre.

Die hier vorgestellten Prozesse sind auch für Endlagerstollen relevant, da der Querschnitt der EZ-B Nische vergleichbare Dimensionen hat. Die kurze Länge der EZ-B Nische reduziert durch die noch wirksame Bruststützung das Ausmass der zu erwarteten Gebirgsschädigungen im Vergleich zu den langen geplanten Endlagerstollen.

Obwohl man davon ausgeht, dass sich induzierte Risse in Tonschiefern nach ihrer Bildung wieder durch chemische und physikalische Alterationen hydraulisch abdichten, ist es für die Planung der Tunnelausbruchsmethoden, der Sicherungs- und Stützmittel, der Absperrbauwerke und technischen Barrieren von Bedeutung, die Ausdehnung der EDZ/EdZ sowie die damit verbundenen Bruchmechanismen mit hoher Zuverlässigkeit zu verstehen. Die um die EZ-B Nische nur in geringer Häufigkeit auftretenden makroskopischen Extensionsbrüche sowie die seismischen Gebirgsveränderungen zeigen, dass der Grad der spröden Gebirgsdeformationen mit dem Verhältnis der minimalen zur maximalen Sekundärspannung (Spalling Limit) korreliert werden kann. Ein weiteres und sehr wichtiges Ergebnis dieser Arbeit ist, dass das mechanische Gebirgsverhalten und die ausbruchsbedingten Gebirgsveränderungen in anisotropen Tonschiefern sehr stark durch elastische und plastische Scherungen von diskreten tektonischen Diskontinuitäten beeinflusst werden können. Daher bedarf es zukünftiger Untersuchungen zur Bestimmung der relevanten mechanischen Parameter dieser tektonischen Diskontinuitäten im Felslabor Mont Terri.