

Assessment on the swelling and disintegration potential of weak and weathered rocks in water tunnels of hydropower projects – a contribution based on use of laboratory testing methods

FORFATTER	Lena Selen
PROSJEKT I HYDROCEN	WP 1, 1.2
DATO	12.09.2022
SAMARBEIDSPARTNERE	NTNU, Statkraft



Mål

Målet med forskningen er å øke forståelsen av svellemekanismer og desintegrering av berg i vanntunneler gjennom svakt berg, og å optimalisere laboratorieundersøkelser av svellende/ svakt berg for å forutsi potensielle utfordringer tilknyttet stabilitet og behov for sikring i vanntunneler.

Bakgrunn

I samarbeid med Statkraft gjennomførte Lena Selen en doktorgradsstudie om svelle- og desintegreringspotensialet til svake og forvitrede bergarter i vanntunneler i vannkraftprosjekter basert på bruk av laboratorietestingsmetoder. Ph.d.-arbeidet var en videreføring av en masteroppgave (2017) med lignende tema, også i samarbeid med Statkraft. Hovedvekten ble lagt på svellepotensiale, slaking og desintegrering og mineralogisk sammensetning av det innsamlede bergmaterialet. I tillegg ble egenskaper tilknyttet struktur og tekstur for intakte bergarter undersøkt. Det meste av laboratoriearbeidet ble utført ved laboratoriet til NTNU/SINTEF hvor testutstyr, laboratorieforhold, forberedelsesprosedyrer og testmetodikk ble inspisert og utforsket i detalj. I tillegg ble det utført en lignende undersøkelse ved det bergmekaniske laboratoriet til Karlsruhe Institute of Technology hvor svelletester og mineralogiske analyser ble utført på lignende bergmateriale.

Metodene som er undersøkt brukes hyppig for å beskrive svelleoppførselen og holdbarheten til forskjellige bergmaterialer, dvs.; mineralogisk analyse (XRD), test for frissvelling, ødometertester (svelletrykk) og slake durability tester. Utfyllende analyser av strukturelle og tekstuelle trekk ble inkludert for å oppfylle kravene til en vurdering av adferden til svellende bergarter, som tynnslipsanalyse (TS), SEM-analyse og kornstørrelsesfordelingsanalyser. Testpakken inkluderte både standardiserte testprosedyrer og prosjektspesifikke modifikasjoner av de valgte testene, med sikte på å vurdere de ekstraordinære forholdene i vannkraftvanntunneler.

I tillegg ble modifiserte flatjacks instrumentert i tilløpstunnelen til Moglice HPP i desember 2018 og januar 2019. Det ble tatt prøver av bergarter fra teststedet for laborativurderinger. Målet var å bruke flatjacks for å overvåke in-situ svelletrykk og deformasjon i tilløpstunnelen under full drift av vannkraftverket.

Funn/resultater

Forskningen avdekket viktige begrensninger i testprosedyrer som ofte brukes i vurderingene av materialegenskaper til svake og forvitrede bergarter, og følgelig på deres relaterte klassifiseringssystemer. De viktigste funnene kan oppsummeres som følger:

- Det visuelle utseendet til innsamlede prøver på et gitt sted kan være likt blant bergarter med lik opprinnelse, men ulik historie med forvitring/ending. Dette betyr at lignende mekanisk oppførsel ikke kan tas for gitt.
- Antakelsen om at spesifikke leirmineraler og anhydritt skal være de viktigste kontrollerende parametrene for svellepotensiale gjelder ikke alltid, og et snevert fokus på disse mineralene kan føre til neglisjering av andre svellende bergartskomponenter som zeolitter og amorfe bergartskomponenter. Dette kan føre til at feiltolkninger oppstår når flere mekanismer spiller sammen på svellingsadferden til den intakte bergarten.
- Identifisering av forvitrede bergstrukturer er avgjørende da et bergmateriale som tidligere var kompetent, kan endre sine mekaniske egenskaper på grunn av forvitring og omvandling. Til tross for likheter i det strukturelle rammeverket, kan fordelingen av forvitrede og amorfe deler i bergartens tekstur, tilstedeværelsen av mikrostrukturer og naturen til eventuelle mikrofrakturer føre til fysisk svelling selv når mindre eller ingen svellende leirmineraler oppdages.
- Prepareringsteknikker som skal produsere «worst case scenario» for å studere svellepotensiale, hvor bergmaterialet pulveriseres til pulver, er funnet noe misvisende når de brukes for å oppdage svellepotensialet i intakte bergarter. Denne prepareringsteknikken kan akselerere den potensielle svellingen av svellende leirmineraler slik at man får resultatet hurtigere, men andre viktige faktorer som kontrollerer svelleoppførselen til den intakte bergarten ignoreres av denne prosedyren.

- XRD-analyse kan, avhengig av metoden som brukes, ikke i tilstrekkelig grad kvantifisere det mineralogiske innholdet i forvitret bergmateriale. Svake og svellende bestanddeler kan enten kamufleres, ødelegges under preparering eller neglisjeres i analyseprosedyren.
- Ulike institusjoner opererer med ulike laboratorietesttilnærminger som gjør en felles database med sammenlignbare testresultater for klassifiseringsformål er utfordrende å oppnå. Overvurdering av sikringsbehov kan forekomme når bergarten inneholder svellende leirmineraler, men hvor bergstrukturen ikke favoriserer vanninntrengning til materialet og dermed svelling. På den annen side kan undervurderinger av sikringsbehov oppstå når bergarten inneholder mindre eller ingen svellende leirmineraler og de strukturelle trekkene og/eller naturen av forvitring/omvandling favoriserer andre svellemekanismer.

Nyttiggjøring/verdiskapning

Resultater fra prosjektet kan brukes til å optimalisere metodikken for testprosedyrer og til å gi mer pålitelige resultater som kan brukes videre til sikringsoptimalisering. På denne måten reduseres risikoen i prosjektet og kostnadene knyttet til både sikringsarbeid og reparasjonskostnader ved kollaps.

Konklusjon

For fremtidig forskning var følgende emner blant forslagene:

- Forbedringer knyttet til påvisning av svellemineraler, preparering av prøver for svellestester og implementering av prosjektrelatert eksponering av bergartene for fuktsvingninger i testprosedyrene, er sterkt påkrevd for å optimere både undersøkelsesprosedyrene og sikringsløsningene.
- In-situ testing bør planlegges nøye før utførelse for å muliggjøre installasjon av nødvendig utstyr under bygging av tunnelen og minimere interferens med etablert sikring.
- Prøveresultater fra laboratoriet må korreleres med feltobservasjoner og in-situ målinger i prosjekter for å finne en sammenheng mellom de målte egenskapene til bergarten og in-situ oppførselen til bergmassen. Feltobservasjonene kan omfatte målbar deformasjon/spenningsutvikling av/i tunnelprofilen eller visuell degradering av utført sikring.
- Den foreslåtte flatjack-testen i dette studiet kan gi interessante data om in-situ svellingen av den instrumenterte tunnelen i Albania. Dataene kan korreleres til tilsvarende laboratorieresultater fra denne forskningen, og analyser av hvorvidt eksperimentet er vellykket eller ikke kan være et interessant tema for fremtidig forskningsarbeid.

English version:

Objective

The aim of the research is to increase the understanding of swelling mechanisms and the degradation of rock in water tunnels through weak rock, and to optimize laboratory investigations of swelling/weak rock in order to predict potential challenges associated with stability and the need for protection in water tunnels for hydropower projects.

Background

In cooperation with Statkraft, Lena Selen conducted a PhD study on the swelling and disintegration potential of weak and weathered rocks in water tunnels of hydropower projects based on use of laboratory testing methods. The PhD work was a continuation of a MSc thesis (2017) with similar topic, also in cooperation with Statkraft. The main emphasis was on swelling potential, slake durability and mineralogical composition of the sampled rock material. In addition, structural and textural features of the intact rock were examined. Most of the laboratory work was performed at the laboratory of NTNU/SINTEF where test equipment, laboratory conditions, preparation procedures and test methodologies were inspected and explored in detail. In addition, a similar examination was performed at the rock mechanical laboratory of Karlsruhe Institute of Technology where swelling tests and mineralogical analyses were performed on similar rock material.

The methods investigated are frequently used to describe the swelling behavior and durability of different rock materials, i.e.; mineralogical analysis (XRD), the free swelling test, the oedometer swelling pressure test and the slake durability test. Complementary analyses on the structural and textural features were included in order to fulfill the requirements for a reasonable assessment of swelling rock behavior, as thin section analysis (TS), SEM-analysis and grain-size distribution analyses. The test suite included both standardized test procedures and project-specific modifications of the chosen tests, aiming to assess the extraordinary conditions in hydropower water tunnels.

In addition, modified flatjacks were instrumented in the headrace tunnel of Moglice HPP in December 2018 and January 2019. Rocks from the test location were sampled for laboratory assessments. The aim was to use flatjacks for the monitoring in-situ swelling pressure and deformation in the headrace tunnel during full operation of the hydropower plant.

Results/Findings

The research revealed important limitations in test procedures frequently used in the assessments on material properties of weak and weathered rocks, and consequently on their related classifications systems. The most important findings can be summarized as follows:

- The visual appearance of collected samples at a given location may be similar among rock types with equal origin but different history of weathering / alteration. This means that similar mechanical behaviour cannot be taken for granted.
- The assumption on specific clay minerals and anhydrite to be the main controlling parameters on swelling potential do not always apply, and a narrow focus on these minerals may lead to the neglect of other swelling rock components such as zeolites and amorphous rock components. Consequently, misinterpretations may occur when several mechanisms interplay on the swelling behavior of the intact rock.
- The identification of weathered rock structures is crucial as a previously competent rock material may change its mechanical properties due to weathering and alteration. Despite similar structural framework, the distribution of weathered and amorphous constituents in the rock texture, the presence of microstructures and the nature of eventual microfractures may lead to physical swelling even when minor or no swelling clay minerals are detected.

- Remolding techniques aiming to produce a “worst case scenario” on swelling potential, as consequent pulverizing rock materials to powder aiming to investigate swelling of clays, are found somewhat misleading when applied to detect the swelling potential of intact rocks. The remolding technique used for swelling tests may accelerate the potential swelling of swelling clay minerals, however, other important factors controlling the swelling behavior of the intact rock might be ignored through by this procedure.
- The XRD analysis may, dependent on the methodology used, not sufficiently quantify the mineralogical content of weathered rock material. Weak and swelling constituents may either be camouflaged, destroyed during preparation or neglected in the analysis procedure.
- Different institutions operate with different laboratory test approaches which make a common database of comparable test results for classification purposes challenging to obtain.
- Overestimations on support requirements may occur when the rock contains swelling clay minerals but their distribution in the rock structure do not favor water ingress to the material and swelling to occur. On the other hand, underestimations on support requirements may occur when the rock contains minor or no swelling clay minerals and the structural features and/or the nature of weathering/alteration favor other swelling mechanisms to occur.

Relevance/utilization

Results from the project can be utilized to optimize the methodology of test procedures to provide reliable results that can be further used for security optimization. In this way, the risk in the project and the costs associated with both security work and repair costs in the event of a collapse are reduced.

Conclusion

For future research, the following topics were among the suggestions:

- Improvements related to the detection of swelling minerals, the preparation of samples for swelling tests and the implementation of the project-related exposure of the rocks to moisture fluctuations in the testing procedures, are strongly required in order to optimize both the investigation procedures and support solutions.
- In-situ measurements should be carefully planned prior to execution in order to enable installation of the required equipment during excavation and minimize the interference with the applied support.
- Laboratory test results must be correlated to field observations and in-situ measurements in projects in order to find a correlation between the measured properties of the rock and the in-situ behavior of the rock mass. The field observations may include measurable deformation/stress of tunnel walls or visual degradation of the tunnel lining.
- The proposed flatjack-test of this study may produce interesting data on the in-situ swelling of the instrumented tunnel in Albania. The data can be correlated to the corresponding laboratory results of this research and analyses on whether or not the experiment is successful can be an interesting topic for future research work.

Referanser og lenker til publikasjoner og avhandling /references and links to publications and thesis

Selen, Lena; Panthi, Krishna Kanta; Vistnes, Gunnar. An analysis on the slaking and disintegration extent of weak rock mass of the water tunnels for hydropower project using modified slake durability test. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 2020 ; Volum 79.(Issue 4) s. 1919-1937 <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01656-2> This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Selen, Lena; Panthi, Krishna Kanta; Vistnes, Gunnar. An investigation on the compositional features and swelling potential of two weak rock types affecting their slake durability

Selen, Lena; Panthi, Krishna Kanta; Vergara, Maximiliano R.; Mørk, Mai Britt Engeness. Investigation on the Effect of Cyclic Moisture Change on Rock Swelling in Hydropower Water Tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02266-1> This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Selen, Lena; Panthi, Krishna Kanta. A discussion on the laboratory testing approaches for swelling rocks at three European institutions.

Selen, Lena; Panthi, Krishna Kanta; Tunbridge, Lloyd; Schönborn, Thomas. Field testing of weak rock deformation in water tunnels: A practical review of the flatjack test. I: Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development. CRC Press 2019 ISBN 978-0-367-42284-4. s. 1716-1723 (<https://doi.org/10.1201/9780367823177>)

Selen, Lena. (2020) Assessment on the swelling and disintegration potential of weak and weathered rocks in water tunnels of hydropower projects - a contribution based on use of laboratory testing methods. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2686655>