



## Doctoral Thesis

# On the delayed failure of geotechnical structures in low permeability ground

**Author(s):**

Schuerch, Roberto

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010872874> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO 23681

**ON THE DELAYED FAILURE OF GEOTECHNICAL STRUCTURES  
IN LOW PERMEABILITY GROUND**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ROBERTO SCHUERCH

MSc, ETH Zurich

Born on 08.10.1985

Citizen of

Lugano

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Georg Anagnostou

Prof. Dr. Donatella Sterpi

2016

## Abstract

This Thesis investigates the problem of time-dependent stability of geotechnical structures (such as trenches or tunnels) in medium- to low-permeability water-bearing grounds, typically clayey or silty soils. The peculiarity of these soils is that they respond to excavation with a delay. The time-dependency can be traced back to the swelling process triggered by the dissipation of the excavation-induced negative excess pore pressures. Unstable conditions may necessitate improvement or reinforcement of the ground or the application of a support (e.g. by compressed air or pressurized bentonite slurry in the case of tunnel face). As such measures may present economical and operational disadvantages, the question of whether and for how long the excavation can remain stable without support is of great practical relevance. The *stand-up time* (time lapsing between end of the excavation and the occurrence of failure), and thus the feasibility of refraining from ground reinforcement, improvement or support, depends essentially on soil strength and permeability.

The goal of the Thesis is to develop a computational method that allows the estimation of the stand-up time, and thus improve construction safety and economy. The main objectives towards this goal are: (i) analysis of the mechanism of delayed failure by means of fully coupled hydraulic-mechanical continuum-mechanical simulations, investigation into the role of the constitutive behaviour of the ground (particularly that of plastic dilation), and development of a practical method of dealing with the numerical problem of mesh-sensitivity which occurs, due to the localization of deformations when assuming non-associated plastic flow, in any geotechnical structure at failure; (ii) planning and performing experiments and validation of the computational method and assumptions; (iii) systematic investigation of the stand-up time of the tunnel face and working-out of design charts.

The equations governing the coupled hydraulic-mechanical process of delayed failure are solved numerically with the finite element method. Emphasis is placed on the numerical manifestation of failure, on the role of the plastic dilatancy and, finally, on the influence of the spatial discretization. The Thesis shows that under the frequently made simplifying assumption of a constant positive dilation angle, coupled analyses inevitably lead to a constant deformation rate at failure, while failure is commonly associated with accelerating displacements. Models that allow for shearing under constant volume lead to accelerating displacements, but inherently exhibit numerical stability problems close to the failure state, because a solution satisfying the two balance equations does not exist. Moreover, the assumption of non-associated plastic flow leads to a dependency of the stand-up time to the coarseness of the mesh: the finer the latter, the lower the stand-up time. The Thesis shows, based upon analytical computations, that the mesh-dependency of the stand-up time is mainly due to the structural softening that occurs even in a perfectly plastic material if the flow rule is non-associated. In numerical simulations, the shear strains become localized in a band which is about 1–2 finite elements thick. The coarser the finite element mesh, the thicker the numerically predicted shear band, the smaller the shear strains, the less pronounced the structural softening and the higher the predicted stand-up time. For very coarse finite element meshes (which practically prevent structural softening) the stand-up time tends to a constant value. *Vice-versa*, for sufficiently fine spatial discretization (allowing for considerable structural softening up to that corresponding to purely plastic shearing), the stand-up time depends almost linearly on the element size. This finding is valuable from the practical viewpoint, as it allows determining stand-up time by performing a few computations with a relatively fine meshes and extrapolating their results to the mesh size that corresponds to the expected, grain-size-dependent thickness of the shear band (practically zero considering the dimensions of typical geotechnical structures). In case of relatively simple problems an upper and lower bound of the numerically computed stand-up time can be determined analytically.

The experimental part of the Thesis aims to observe delayed failure under controlled conditions and consists of uniaxial loading tests and centrifuge tests (the latter simulate the excavation of an underwater vertical cut in over-consolidated clay). The experimental results were interpreted also numerically, using material constants which were determined by means of laboratory tests or based upon theoretical considerations, independently from the delayed failure tests ("class A" model validation). The numerical analyses show that, the simple, but widely used, linearly plastic, perfectly plastic model with Mohr-Coulomb yield condition (MC model) and isochoric plastic flow generally underestimates the stand-up time. The reason is that it does not account for the plastic volumetric strains accompanying shearing, which temporarily perpetuate negative excess pore pressures, thus delaying failure. The Modified Cam Clay model (MCC), which is known to overestimate strength on the dry side of the yield surface, generally overestimates the stand-up time when used in combination with computationally manageable spatial discretization (*i.e.* fine, but still not as much as it would be necessary on account of the experimentally observed very thin shear bands). However, stand-up times very close to the observed ones are obtained by extrapolating the numerical results to the size of the shear band. In conclusion, the MCC model allows for a reasonably accurate prediction of the stand-up time in a typical over-consolidated clay, while the MC model in combination with a fine (but still manageable) discretization provides a conservative estimate. The conclusions are based upon the numerical results obtained for the material constants proposed in the literature. To this respect it is important to note that an inconsistency exists between the proposed Young's modulus of the MC model and the MCC parameters. The effect of the assumption about the Young's modulus on the results, and so on the conclusions of the present study, is significant (taking the value of the Young's modulus consistently with the MCC parameters would have led to a remarkably longer stand-up time). Additional laboratory tests would be required in order to validate the proposed constants.

The findings arising from the comparison between numerical and experimental results made it possible to investigate systematically the effect of the decisive geotechnical parameters on the time-dependency of tunnel face stability. Based upon the results of a comprehensive parametric study (covering a wide range of conditions), dimensionless design charts were worked-out which allow to estimate stand-up time of shallow tunnels for a given geotechnical situation, thus assisting decision-making during planning and execution in soft ground tunnelling.

## Zusammenfassung

Diese Dissertation untersucht die zeitabhängige Stabilität von Geländeeinschnitten und Tunneln in wasserführenden, tonigen oder siltigen Lockergesteinen mittlerer bis niedriger Durchlässigkeit. Die Besonderheit dieser Lockergesteine besteht darin, dass sie auf den Ausbruch erst mit einer Verzögerung reagieren. Die Zeitabhängigkeit ist durch den Konsolidationsvorgang bedingt, welcher durch den ausbruchsbedingten, negativen Porenwasserüberdruck ausgelöst wird. Zur Vermeidung einer Instabilität kann eine Bodenverbesserung oder -verstärkung bzw. das Aufbringen eines Stützdrucks erforderlich sein (z.B. mittels Druckluft oder einer druckbeaufschlagter Bentonit-Stützflüssigkeit im Falle der Tunnelortsbrust). Da derartige Massnahmen wirtschaftliche oder baubetriebliche Nachteile mit sich bringen können, ist die Frage der *Standzeit* – definiert als die Zeit zwischen Ausbruch und Instabilität – für die Praxis von grosser Relevanz. Die Standzeit und somit die Möglichkeit eines Verzichts auf Verstärkungs-, Verbesserungs- oder Stützmassnahmen hängt im Wesentlichen von der Festigkeit und der Durchlässigkeit des Lockergesteins ab.

Ziel der Doktorarbeit ist die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens, mit dem sich die Standzeit abschätzen, und somit die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Bauausführung erhöhen lässt. Zu diesem Zweck wurde zunächst das Phänomen verzögert auftretender Instabilitäten mittels hydraulisch-mechanisch gekoppelter, kontinuumsmechanischer Simulationen rechnerisch interpretiert, der Einfluss des Stoffgesetzes (insbesondere der plastischen Volumendilatanz) auf das Modellverhalten untersucht und eine praktikable Methode zur Behandlung des numerischen Problems der Netzabhängigkeit bei der Verformungslokalisierung, die bei jeder geotechnischen Struktur im Versagensfall auftritt, entwickelt. Anschliessend wurden Experimente zur Validierung der Berechnungsverfahren und Annahmen geplant und durchgeführt. Nach diesen grundlegenden theoretischen und experimentellen Arbeiten wurde das Problem der Standzeit der Ortsbrust systematisch untersucht und Bemessungsdiagramme ausgearbeitet.

Die dem gekoppelten, hydraulisch-mechanischen Prozess der verzögerten Instabilität zu Grunde liegenden Gleichungen werden numerisch mit der Methode der finiten Elemente gelöst. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die numerische Äusserung einer Instabilität, auf die Rolle der plastischen Dilatanz und schliesslich auf den Einfluss der räumlichen Diskretisierung gelegt. In der Dissertation wird gezeigt, dass unter der häufig getroffenen, vereinfachenden Annahme eines konstanten positiven Dilatanzwinkels die gekoppelten Analysen unvermeidlich zu einer konstanten Verformungsrate beim Versagen führen, wohingegen Instabilitäten gemeinhin mit sich beschleunigenden Verschiebungen assoziiert werden. Modelle, die ein volumentreues Abscheren erfassen, ergeben sich beschleunigende Verschiebungen, weisen jedoch inhärenterweise numerische Stabilitätsprobleme in der Nähe des Versagenszustands auf, weil es keine Lösung gibt, die gleichzeitig die Gleichgewichts- und Massenerhaltungsbedingungen erfüllt. Des Weiteren führt die Annahme eines nichtassozierten plastischen Fliessgesetzes zu einer Netzabhängigkeit der Standzeit: je feiner das Netz, desto geringer ist die Standzeit. Auf der Grundlage analytischer Überlegungen wird nachgewiesen, dass die Netzabhängigkeit der Standzeit hauptsächlich auf die sogenannte strukturelle Entfestigung zurückzuführen ist, die selbst beim idealplastischen Materialverhalten auftritt, wenn die Fliessregel nichtassoziert ist. In numerischen Simulationen bilden sich die Scherverformungen in einem Band mit einer Stärke von 1–2 finiten Elementen aus. Je gröber das Netz, umso breiter ist die numerisch prognostizierte Scherfuge, umso geringer sind die Scherverformungen, umso weniger ausgeprägt ist die strukturelle Entfestigung und umso höher ist die prognostizierte Standzeit. Bei sehr groben Netzen, die eine strukturelle Entfestigung praktisch verunmöglichen, tendiert die Standzeit zu einer oberen Grenze. Umgekehrt erlauben sehr feine Netze eine beträchtliche strukturelle Entfestigung bis hin zu Werten, die rein-plastischen Scherverformungen entsprechen, und die Standzeit tendiert zu einer unteren Grenze. Bei einer relativ einfachen Problemstellung kann der obere und der untere Grenzwert

der numerisch ermittelten Standzeit analytisch bestimmt werden. Die numerischen Simulationen zeigen, dass bei einer hinreichend feinen räumlichen Diskretisierung die Standzeit praktisch linear mit der Elementgrösse abnimmt. Dieses Ergebnis ist nützlich, weil es die Extrapolation der Ergebnisse von Berechnungen mit relativ groben Netzen erlaubt.

Der experimentelle Teil der Doktorarbeit umfasst einachsige Druckversuche mit verzögertem Bruch sowie Zentrifugenversuche. Letztere simulieren den Aushub einer Unterwasserbaugrube in überkonsolidiertem Ton. Die Versuchsergebnisse werden unter Verwendung von Materialkonstanten numerisch interpretiert, die anhand von Laborversuchen Dritter oder basierend auf theoretischen Überlegungen unabhängig von den Versuchen der vorliegenden Arbeit ermittelt wurden. Die numerischen Analysen zeigen, dass das in der Praxis häufig verwendete, linearelastische idealplastische Modell mit Mohr-Coulomb-Fliessflächenbedingung (MC-Modell) ohne plastische Volumendilatanz die Standzeit im Allgemeinen unterschätzt. Der Grund hierfür ist, dass die plastischen Volumendehnungen, die durch dieses Modell nicht berücksichtigt werden, den negativen Porenwasserüberdruck temporär aufrechterhalten und somit die Instabilität verzögern. Das Modified Cam Clay-Modell (MCC-Modell), das bekanntermassen die Grösse der Fliessfläche auf der trockenen Seite überschätzt, überschätzt im Allgemeinen die Standzeit, wenn es in Verbindung mit einer rechnerisch handhabbaren räumlichen Diskretisierung eingesetzt wird (d.h. zwar fein, aber noch nicht in dem Masse, wie es aufgrund der experimentell beobachteten, sehr dünnen Scherbänder erforderlich wäre). Standzeiten, die den beobachteten Werten sehr nahe kommen, lassen sich jedoch durch Extrapolieren der numerischen Ergebnisse auf die Dicke der Scherfuge erzielen. Zusammenfassend erlaubt das MCC-Modell eine ausreichend genaue Vorhersage der Standzeit in typischen überkonsolidierten Tonen, während das MC-Modell in Verbindung mit einer feinen (aber noch handhabbaren) Diskretisierung eine konservative Schätzung liefert. Diese Schlussfolgerungen basieren auf den Ergebnissen der vergleichenden numerischen Berechnungen, die mit in der Literatur angegebenen Materialkonstanten durchgeführt wurden. Allerdings besteht diesbezüglich eine Inkonsistenz zwischen dem vorgeschlagenen Elastizitätsmodul des MC Stoffgesetzes und den Parametern des MCC Modells. Die Annahme über das Elastizitätsmodul beeinflusst erheblich die Voraussagen über das Verhalten des MC Modells und somit auch die aus den vergleichenden Berechnungen gezogenen Schlussfolgerungen; würde man statt des in der Literatur vorgeschlagenen Elastizitätsmoduls einen Wert annehmen, der konsistent mit den Parametern des MCC Modells ist, so würde man eine viel längere Standzeit erhalten. Zur Klärung der erwähnten Parameterinkonsistenz sind weiterführende Laboruntersuchungen erforderlich.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde der Effekt der entscheidenden geotechnischen Parameter auf die Standzeit der Ortsbrust systematisch untersucht. Aufgrund einer umfassenden Parameterstudie wurden dimensionslose Bemessungsdiagramme erstellt, die eine rasche Abschätzung der Standzeit von oberflächennahen Tunnels für gegebene geotechnische Bedingungen ermöglichen und somit eine nützliche Entscheidungshilfe bei Planung und Durchführung von Tunnelvorrieben im Lockergestein darstellen.