

DISS. ETH Nr. 17303

EINFLUSS DER BODENSÄTTIGUNG AUF DIE STABILITÄT VON HÄNGEN

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTORIN DER WISSENSCHAFTEN
der
ETH ZÜRICH

vorgelegt von:

ANDREA THIELEN
Dipl.-Ing. RWTH Aachen

geboren am
24.3.1977
von
Deutschland

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. Sarah M. Springman
Prof. Dr.-Ing. Pieter A. Vermeer
Dr. Sven Friedel

2007

Abstract

During the last years the topic of natural hazards gained more and more national and global significance. Caused by the climatic change it comes more frequently to extreme meteorological events, accompanied by instabilities, whereby the most endangered slopes are those, which are too steep for the existing soil conditions and are held together by suction effects. This thesis shall make a contribution to the understanding and quantifying of this stabilizing effect.

Investigations took place on a natural slope, in whose immediate vicinity frequently instabilities could be observed. A soil model was constructed under geological aspects and based on geophysical and geotechnical test results. This combination of methods arised as particularly suitable, not only to determine without destruction the layering of the soil but also the spatial soil saturation conditions. A measuring field was installed, in order to perform during a two years lasting field test meteorological measurements and to observe the water regime of the soil. Most important hydrological realization was the seasonally two-phase slope behaviour concerning the soil saturation, which shows a typical summer and winter character. In the summer the soil saturation of the upper layer varies strongly in dependence of the climatic influences and in larger depths saturation continuously decreases. In winter the upper layer is durably saturated by rainfall events and further precipitation water infiltrates into larger depths. In silty sand layers, this saturating process takes place gradually, in clayey sand layers more continuously. Also concerning the influence of rainfall events the summer and winter characteristic shows up. If the upper soil layer is relatively saturated (in winter), the infiltrating water causes a relatively small reduction of suctions in all depths, if the upper soil layer is relatively dry (in summer), a rainfall event predominantly causes a reduction of suctions in the upper layer. In both cases the change of suction correlates positively with the amount of precipitation.

In the laboratory the water retention curves, water permeability as well as the shear strength with the help of triaxial tests on saturated samples and suction-controlled direct shear tests on saturated and unsaturated samples was determined. The water retention curves show a hysteresis concerning drainage and saturation process, whereby volume changes due to suctions are very small. The permeability becomes significantly smaller with rising suctions. The maximum shear strength is increased by the influence of suctions and this inc-

crease grows nonlinearly with rising suctions. With rising suction also the maximum dilatancy increases in a nonlinear manner.

Results from field and laboratory tests were introduced in a two-dimensional numerical model of the water regime and in a stability analysis. The quality of the model could be judged as very good, since it was able to reflect the field measuring data and to compute correctly the seasonal changes of soil saturation. The stability of the slope was ensured at each time and was largest when also suctions reached the largest values. Simulations of rainfall events have shown that in times of high soil saturation a rainfall event does not have a significant effect on further saturation and the factor of safety, however under dry soil conditions has a long-term influence on saturation in all depths and on stability. The rainfall intensity is with same rainfall duration not important and the duration has with the same intensity only a small influence. The latter could not be observed in the field, because heavy rainfall events did not arise in reality and therefore a comparison between field and simulation data was difficult. In times of high soil saturation the cohesion caused by roots and the effect of suctions have only a small influence on the safety factor, in times of low saturation the influence is more important. With complete neglect of suction effects the slope was to be classified as not safe after the principle of global safety.

The thesis made a contribution to extend the understanding of the behaviour of unsaturated soil slopes. The combination of field and laboratory tests with computer-aided modelling turned out as very suitable. Main realization is that the soil saturation has a strong influence on the stability of the investigated slope and therefore also on other slopes with similar soil structure. Although the investigated slope was stable at each time, the stability analyses showed that the safety factor approaches the critical value under fully saturated conditions, which would already cause failure in steeper slopes.

Based on this thesis further field tests should be performed and the test program in the laboratory should be extended regarding the use of more complex material laws for the modelling of the soil behavior. Spatial effects concerning the water regime and stability should be investigated by three-dimensional modelling using elasto plastic material laws. Regarding an optimal risk management concerning natural hazards further parameter studies should be performed in form of further modelling of hypothetical slopes.

Zusammenfassung

Das Thema Naturgefahren hat in den letzten Jahren in der Schweiz und global an Bedeutung gewonnen. Im Zuge des Klimawandels kommt es immer häufiger zu extremen meteorologischen Ereignissen, einhergehend mit Instabilitäten, wobei die am meisten gefährdeten Hänge jene sind, die zu steil für die vorliegenden Bodenbedingungen sind und durch Saugspannungseffekte zusammengehalten wurden. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag leisten, diesen stabilisierenden Effekt besser zu verstehen und zu quantifizieren.

Untersuchungen erfolgten am Beispiel eines Versuchshanges, in dessen unmittelbarer Umgebung häufig Instabilitäten auftraten. Ein Bodenmodell wurde unter geologischen Aspekten und auf Grundlage von geophysikalischen und geotechnischen Untersuchungsergebnissen erstellt. Diese Methodenkombination stellte sich als besonders geeignet dar, nicht nur die Schichtung des Bodens, sondern auch den räumliche Bodenfeuchtezustand zerstörungsfrei zu bestimmen. Ein Messfeld wurde eingerichtet, um in einem zwei Jahre dauernden Feldversuch den Hang meteorologisch zu überwachen und den Wasserhaushalt des Bodens zu beobachten. Wichtigste hydrologische Erkenntnis war das saisonal zweiphasige Hangverhalten bezüglich der Bodenfeuchte, welches einen typischen Sommer- und Wintercharakter aufweist. Im Sommer schwankt die Bodenfeuchte der obersten Schicht stark in Abhängigkeit der Wettereinflüsse. In grösseren Tiefen nimmt sie kontinuierlich ab, wohingegen im Winter die oberste Schicht durch Regenereignisse dauerhaft aufgesättigt wird und weiteres Niederschlagswasser bis in grössere Tiefen infiltriert. Dabei erfolgt die Auf-sättigung im siltigen Sand stufenhaft, im tonigen Sand kontinuierlich. Auch bezüglich des Einflusses von Regenereignissen zeigt sich die Sommer- und Wintercharakteristik. Ist die oberste Bodenschicht relativ gesättigt (im Winter), verursacht das infiltrierende Regenwasser eine relativ kleine Reduktion der Saugspannungen in allen Tiefen. Ist die oberste Bodenschicht dagegen trocken (im Sommer), verursacht ein Niederschlagsereignis eine Reduktion der Saugspannungen vorwiegend in der obersten Bodenschicht. Die Saugspannungsänderung korreliert in beiden Fällen positiv mit der Niederschlagsmenge.

Im Rahmen eines Laborprogramms wurden die Wasserretentionskurven, die Wasserdurchlässigkeit sowie die Scherfestigkeit mit Triaxialversuchen an gesättigten und saugspannungskontrollierten Direktscherversuchen an gesättigten und ungesättigten Proben bestimmt. Die Wasserretentionskurven zeigen

eine Hysterese bezüglich Austrocknung und Aufsättigung, wobei Volumenänderungen aufgrund von Saugspannungen als gering einzustufen sind. Die Durchlässigkeit verkleinert sich sehr stark mit steigender Saugspannung. Durch den Einfluss der Saugspannungen wird die maximale Scherfestigkeit erhöht. Diese Erhöhung wächst nichtlinear mit steigender Saugspannung. Mit steigender Saugspannung nimmt die maximale Dilatanz nichtlinear zu.

Erkenntnisse aus Feld- und Laborversuchen gingen anschliessend in eine zweidimensionale numerische Modellierung des Wasserhaushalts und in eine Stabilitätsanalyse für den untersuchten Hang ein. Die Qualität des Modells konnte als sehr gut beurteilt werden, da es mit der im Rahmen der Kalibrierung optimierten Parameterwahl im Stande war, die Feldmessdaten wiederzugeben und die saisonalen Bodenfeuchteänderungen korrekt zu berechnen. Die Stabilität des Versuchshanges war zu jeder Zeit gewährleistet und genau dann am grössten, wenn auch die Saugspannungen im Hang die grössten Werte aufweisen. Simulationen von Niederschlagsereignissen haben gezeigt, dass ein Regen bei hoher Bodensättigung keine signifikante weitere Aufsättigung erzeugt und den Sicherheitsfaktor kaum beeinflusst, sich hingegen bei trockenen Bodenverhältnissen in allen Tiefen langfristige Auswirkungen auf die Hangsättigung und die Stabilität zeigen. Dabei zeigt die Variation der Regenintensität bei gleicher Regendauer keinen Einfluss und die Regendauer bei gleicher Intensität hat nur einen geringen. Letzteres konnte im Rahmen der Feldversuche nicht beobachtet werden, was daran liegt, dass Starkregenereignisse in der Realität nicht aufgetreten sind und so ein Vergleich zwischen Feld und Simulationsdaten schwierig war. Bei grosser Bodensättigung hat die Kohäsion durch Wurzelwerk und der Effekt der Saugspannungen nur einen geringen Einfluss auf den Sicherheitsfaktor. In Zeiten niedriger Sättigung ist der Einfluss von grösserer Bedeutung. Bei völliger Vernachlässigung von Saugspannungseffekten war der Versuchshang nach dem Verfahren der Globalsicherheit als nicht sicher einzustufen.

Die vorliegende Arbeit hat einen Beitrag geleistet, das Verständnis für das Verhalten von ungesättigtem Boden in Hängen zu erweitern. Die Kombination von Feld- und Laborversuchen mit computerunterstützter Modellierung hat sich dabei als sehr geeignet herausgestellt. Haupterkennnis ist, dass die Bodensättigung einen starken Einfluss auf die Stabilität des untersuchten und somit auch auf andere Hänge mit ähnlicher Bodenstruktur hat. Obwohl der untersuchte Hang zu jedem Zeitpunkt stabil war, haben die Stabilitätsanalysen gezeigt, dass sich der Sicherheitsfaktor bei Vollsättigung dem kritischen Wert nähert, was bei steileren Hängen bereits zum Versagen führen würde.

Aufbauend auf die vorliegende Arbeit sollten für ein besseres Verständnis der Hydrologie weitere Feldversuche durchgeführt werden und das Versuchsprogramm im Labor sollte im Hinblick auf die Verwendung komplexerer Stoffgesetze zur Modellierung des Bodenverhaltens erweitert werden. Räumliche Effekte bezüglich des Wasserhaushalts und der Stabilität sollten durch dreidimensionale Modellierung unter Verwendung elasto-plastischer Stoffgesetze überprüft werden. Im Hinblick auf ein optimales Risikomanagement bezüglich Naturgefahren sollten des Weiteren Parameterstudien in Form weiterer Modellierungen an hypothetischen Hängen durchgeführt werden.