

Ronald Haselsteiner

Eine Methode zur Abschätzung von Porenwasserüberdrücken in Kerndichtungen und Gründungen aus Ton bei Steinschüttdämmen

Kurzfassung

Eine Methode zur Abschätzung von Porenwasserüberdrücken für Dammbauwerke wird vorgestellt. Die Methode basiert auf die eindimensionale Konsolidierungstheorie von Terzaghi. Für die praktische Anwendung im Fall von Dammbauwerken sind Konsolidierungskurven verfügbar, welche den Porenwasserdruckabbau in Böden beschreiben. Dieser eindimensionale Ansatz wurde weiter verfolgt und auf einen Steinschüttdamm mit Tonkerndichtungen, der bereichsweise auf einem lateritischen Ton gegründet werden sollte, angewandt.

Ronald Haselsteiner

A method for the estimation of excess pore water pressures in clay cores and foundations of rockfill dams

Abstract

A method for the estimation of excess pore water pressure of embankment dams is presented. The method is based on the one-dimensional Terzaghi consolidation theory. For the practical application for embankment dams consolidation curves are available which describe the pore water pressure dissipation in soils. This one-dimensional approach was being pursued further and applied for a rockfill dam with clay core which should partly be founded on a lateritic clay.

1 Einleitung

Aufgrund der Notwendigkeit immer wirtschaftlichere Entwürfe im Rahmen von Wasserkraftprojekten zu entwickeln, um auch mit anderen Energieträgern konkurrenzfähig zu sein, wird seit geraumer Zeit dazu tendiert, große Schüttdämme auf ungünstigen Untergrund zu gründen und so weit als möglich, das zur Verfügung stehende, nahe der Baustelle befindliche Baumaterial zu verwenden. Je nach Randbedingungen sind Erdschüttdämme meist nur in diesen Fällen im Vergleich zu RCC oder CFRD aus wirtschaftlicher Sicht konkurrenzfähig.

In Steinschüttdämmen mit Kerndichtung können bereits während der Bauzeit im Kern und/oder, wenn auf kompressiblen, undurchlässigen Böden gegründet wird, im Untergrund Porenwasserdrücke (PWD) auftreten, welche die Standsicherheit gefährden können. Sofern die Steinschüttdämme auf geeignetem Fels gegründet werden, spielen etwaige Porenwasser(über)drücke für die Standsicherheit im Kern keine Rolle, weil der Kern von den Steinschüttungen gestützt wird und sich keine ungünstigen Gleitkreise durch wenig feste Bereiche ausbilden können. Falls jedoch auf undurchlässigen, kompressiblen Schichten gegründet wird, stellen sich bei hohen

Porenwasserdrücken geringe effektiven Spannungen ein, was zu einer Rutschung führen kann, wie dies anhand von zahlreichen Fallbeispielen aus der Praxis gezeigt wird [1]. Ein gangbarer Weg, um Schäden während der Bauzeit und auch kurz danach zu vermeiden, ist es, die Porenwasserdrücke im Vorhinein abzuschätzen, in den entsprechenden Lastfällen die abgeschätzten PWD zu berücksichtigen und während des Baus und danach die PWD durch Messungen zu kontrollieren. Für den Fall, dass die Messwerte die Werte, die für die Ermittlung der Standsicherheit verwendet wurden, überschreiten, sind Maßnahmen zu treffen. In erster Linie kommt hier eine Verlangsamung des Baus in Betracht oder eine Beschleunigung der Konsolidierung durch die Verwendung von zusätzlichen Entwässerungsmaßnahmen. Natürlich sind auch Geokunststoffe ein probates Mittel, um im Zuge von Bodenbewehrung die Widerstandsfähigkeit der betroffenen Böden zu erhöhen oder die Entwässerungsfähigkeit der Böden zu verbessern.

Die Vorhersage von PWD bei der Konsolidierung von Böden mit einer zufriedenstellenden Genauigkeit ist eine komplexe Aufgabe [3]. 2D und 3D-Modelle, die den Entwässerungs- und Konsolidierungsprozess mit Hilfe von finiten Elementen koppeln, sind teuer und zeitintensiv. Zudem sind die Ergebnisse auch nur so gut, wie die Eingabeparameter, die wiederum einer breiten Streuung unterworfen sein können. Die notwendigen Sensitivitätsanalysen zur Darstellung der Schwankungsbereiche der Ergebnisse steigern den Aufwand zusätzlich. Die vorgestellte eindimensionale Ansatz hat unter Anderem den Vorteil, dass er nur wenige Eingangsparameter bedarf, die durch eine begrenzte Anzahl von Labor- und/oder Felduntersuchungen ermittelt werden können. Die Programmierarbeit ist begrenzt. Der Autor hat hier die mit Microsoft Excel kompatible Programmiersprache Visual Basic verwendet. Belastbare Ergebnisse mitsamt Sensitivitätsanalyse können rasch erhalten werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse und deren Anwendung innerhalb der Standsicherheitsberechnung ist für praktische Anwendungen geeignet und steht den aufwendigen Modellen in Genauigkeit und Aussagekraft nicht unbedingt nach.

2 Berechnungen und Ergebnisse

2.1 Allgemeines

Für ein Wasserkraftprojekt sind in Bauwerksachse ein Steinschüttdamm mit Tonkerndichtung in drei Abschnitten zu planen. Zwischen den drei Dämmen befinden sich andere Bauwerke der Wasserkraftanlage, wie z. B. die Hochwasserentlastungen und das Kraftwerk. Während der mittlere Steinschüttdamm auf Fels gegründet werden kann, befinden sich im Bereich des linken und rechten Ufers 5-15 m mächtige Tone, die aus einem in-situ Laterisierungsprozess entstanden sind. Die lateritischen Tone sollten nicht entfernt, sondern als Gründung und als Material für die Kerndichtung verwendet werden. Die Steinschüttdämme haben eine Höhe von ca. 30 m, eine Kronenbreite von 10 m und Böschungsneigungen von ca. V:H = 1:1,7.

2.2 Eingangs- und Bodenparameter

Wie bereits erwähnt, wurde für das Kernschüttmaterial der lateritische Ton verwendet, auf dem gleichzeitig gegründet werden sollte. Die Eigenschaften und bautechnischen Bodenparameter von lateritischen Tonen werden in [2] behandelt. Die wichtigsten Bodenparameter, die zum Großteil aus Laborversuchen abgeleitet wurden, sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Wesentlicher Eingangsparameter war neben den in Tabelle 1 aufgeführten Bodenparametern der Baufortschritt v_{con} [m/d], der das Höhenwachstum der Dämme bezeichnet. Gemäß dem zum Zeitpunkt der Planung aktuellen Zeitplan sollten die Steinschüttdämme mit einem Baufortschritt von

$v_{con} = 0,10-0,30$ m/d errichtet werden. Da die Dammhöhen gegeben sind, konnte hiermit die Bauzeit für die einzelnen Dämme vor der Ausführung abgeschätzt werden. Dass sich während des Baus nicht selten andere Zeitpläne ergeben, muss der Autor nicht extra erwähnen.

Tabelle 1: Bautechnische Bodenparameter des lateritischen Tons nach [2]

Parameter	Einheit	Lateritischer Ton
Durchlässigkeit k	m/s	$10^{-6}-10^{-9}$
Elastizitätsmodul E	MPa	5-10
Konsolidierungsbeiwert c_v	m ² /s	10^{-7}
Wichte γ	kN/m ³	16-22
Porösität n	%	26-46
Fließgrenze w_L	%	32-69
Plastizität PI	%	6-40
Optimaler Wassergehalt n_{opt}	%	14-32
Kohäsion c' (konsolidiert, dräniert)	kN/m ²	15
Scherwinkel ϕ' (konsolidiert, dräniert)	°	25
Kohäsion c_u (unkonsolidiert, undräniert)	kN/m ²	50

2.3 Berechnungen

Basierend auf der eindimensionalen Konsolidierungstheorie von Terzaghi [5] wurden entsprechende Konsolidierungskurven (Nr. 1 nach [4]) aus der Literatur ausgewählt (Bild 1) und hiermit zeitabhängig der Porenwasserdruckverlauf bzw. der Porenwasserdruckabbau infolge von schichtweisem Einbau berechnet. Dabei wurde davon ausgegangen, dass zum Zeitpunkt des Einbaus einer belastenden Bodenschicht, sich der volle Porenwasserdruck als Auflast einstellt. Bei Kern und Untergrund wurde eine zweiseitige Entwässerungsmöglichkeit angenommen, die im Kern horizontal und im Untergrund vertikal ausgerichtet ist. Der Untergrund weist das für in-situ verwitterten Laterit typische Boden- und Felsprofil auf, weshalb eine zweiseitige Entwässerung gerechtfertigt werden kann [3]. Der Untergrundbereich direkt unter dem Kern wurde im Anbetracht einer möglichen dreidimensionalen Entwässerung vereinfachend ebenfalls mit einer beidseitigen Entwässerungsmöglichkeit betrachtet.

Für die Berechnung der Standsicherheit bzw. der Böschungstabilität der Steinschüttdämme wurden die Porenwasserüberdrücke über den Porenwasserdruckkoeffizienten B -bar angesetzt, der angibt, welcher Anteil der Auflast als Porenwasserüberdruck wirkt.

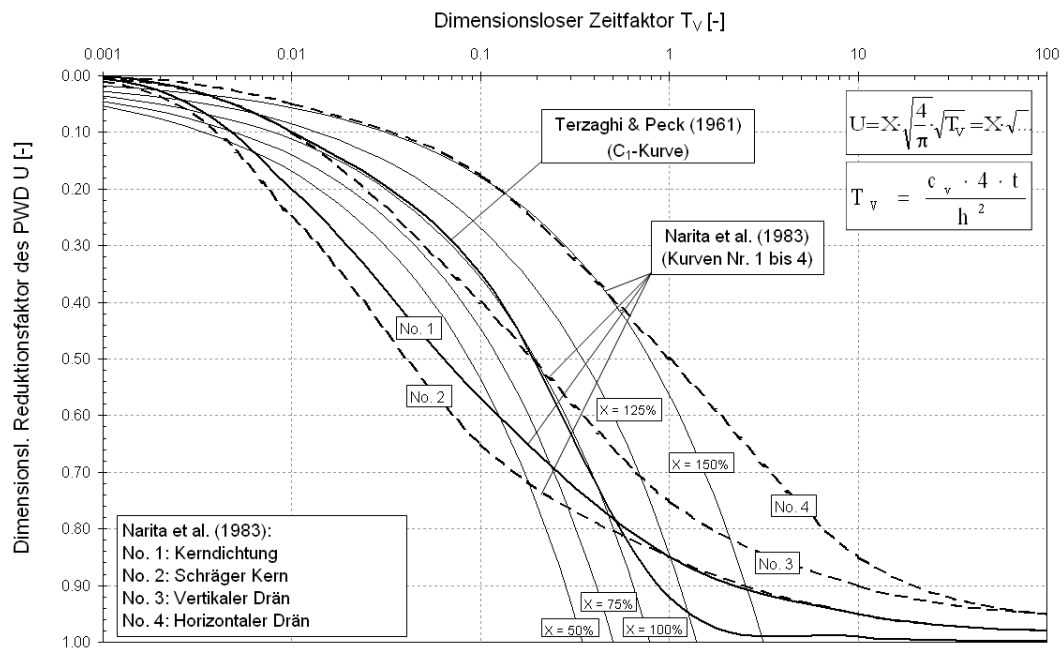


Bild 1: Dimensionsloser Zeitfaktor T_v und Reduktionsfaktor des Porenwasserdrucks U bzw. Konsolidierungskurven nach [4] und [5]

Die Abschätzung der Porenwasserüberdrücke wurde für die Lastfälle „Fertigstellung“ und „Erster Einstau“ durchgeführt. Wie es international üblich ist, wurde das globale Sicherheitskonzept zur Festlegung der notwendigen Sicherheiten verwendet. Für beide betrachtete Lastfälle wurde eine Sicherheit von $\eta = 1,3$ gefordert. Bei einem der Dämme war der Lastfall „Erster Einstau“ besonders kritisch, da der Einstau direkt nach Fertigstellung des Dammes erfolgen sollte. Weiter wurden auch Fälle untersucht, bei dem Erdbebenlasten und Konsolidierungszustände überlagert wurden, um abzuschätzen, inwiefern die Standsicherheit des Bauwerks bei einem Erdbeben während des Baus oder kurz nach dem Bau gefährdet ist. Eine Bemessung des Steinschüttdammes auf derartige Lastfälle war aber nicht vorgesehen.

2.4 Ergebnisse

Als Ergebnisse wurden die Porenwasserdruckkoeffizienten an ausgewählten Referenzpunkten ermittelt, die dann in der Standsicherheitsberechnung Verwendung fanden. Da die Porenwasserdruckkoeffizienten (B -bar) nur bereichsweise konstant angegeben werden konnten und eine präzise Adaption des Modells für die unterschiedlichen Lastfälle und Berechnungsschritte zu aufwendig war, wurden die berechneten Koeffizienten mit einem Reduktionsfaktor versehen, was der tatsächlichen Porenwasserdruckverteilung entlang einer Scherfuge gerecht werden sollte. Die Porenwasserdrücke werden auf diese Art und Weise in den Bereichen mit hohen, realen Porenwasserdrücken etwas unterschätzt.

In Bild 2 sind die berechneten Porenwasserdruckkoeffizienten abhängig vom Konsolidierungskoeffizienten dargestellt. Da die geometrischen und geohydraulischen Verhältnisse für den Kern und den Untergrund ähnlich waren, wurden vereinfachend für beide Bereiche gültige Kurven jeweils für die unterschiedlichen Baufortschritte ermittelt. Es ist zu erkennen, dass bei c_v -Werten $c_v < 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ sich der volle Porenwasserüberdruck einstellen kann. Dies wäre in etwa der Fall für hoch kompressible Tone mit einer Durchlässigkeit von $k_{\text{sat}} \leq 10^{-8} \text{ m/s}$ der Fall. Bei relativ hohen Werten $c_v > 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ sind die möglichen Porenwasserdrücke vernachlässigbar, wie dies auch

durch die unterschiedlichen Bodenbereiche in Bild 2 angedeutet wird. Zwar kann es in voll gesättigten Sanden auch zu Porenwasserüberdrücken kommen, die die effektiven Spannungen verschwinden lassen und eine Verflüssigung verursachen, doch ist dies für das betrachtete System nicht von Bedeutung, da Sand nicht gesättigt eingebaut wird und sich die Porenwasserüberdrücke im Untergrund aufgrund der hohen Durchlässigkeit schnell abbauen. Der Nachweis gegen die Verflüssigungsgefahr der Baumaterialien, auch bei Erdbebeneinwirkung, wird i.d.R. getrennt geführt.

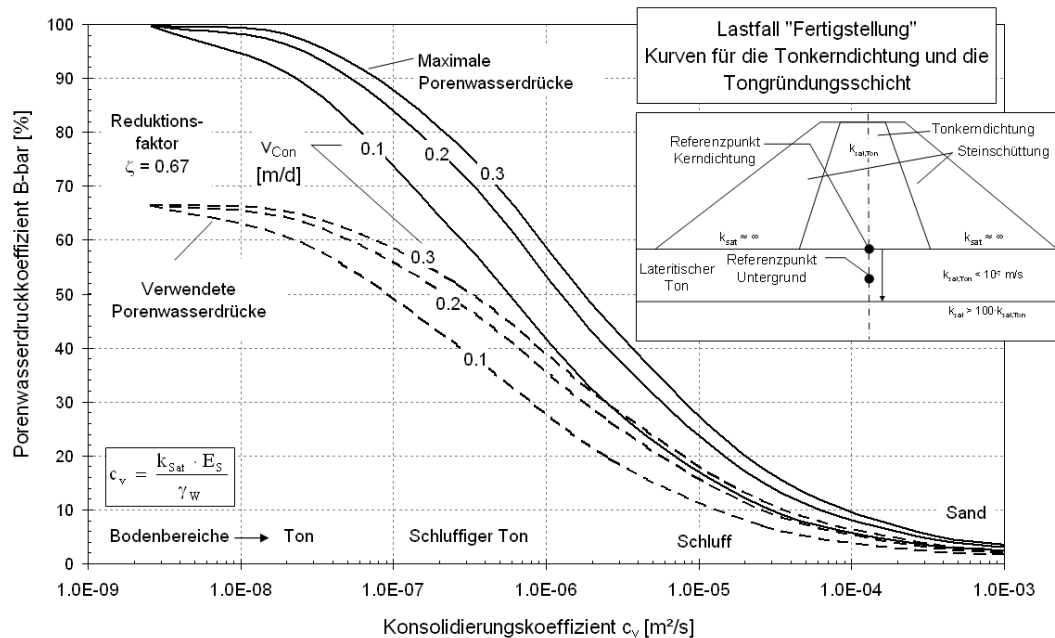


Bild 2: Porenwasserdruckkoeffizient \bar{B} abhängig vom Konsolidierungskoeffizienten c_v für unterschiedliche Baufortschritte für den Lastfall „Fertigstellung“

In Anbetracht der Konsolidierungswerte aus den Laboruntersuchungen ($c_v = 2,6 \cdot 10^{-7} m^2/s$) wurde angenommen, dass im Kern und in der Gründung etwa 40 bis 55 % der Überlagerungsspannung als gemittelter und bereichsweise konstanter Porenwasserüberdruck auftritt und im Lastfall „Fertigstellung“ berücksichtigt werden muss.

Im Vergleich zu Werten aus der Literatur [3] liegen die Ergebnisse in einem vernünftigen Bereich. Da es sich beim vorliegenden Ton um einen steifen Boden handelt, was durch die gewählten Entwurfparameter nicht unbedingt berücksichtigt wurde, war zu erwarten, dass die tatsächlichen Porenwasserüberdrücke geringer ausfallen, als angenommen wurde. Aufgrund der begrenzten Felduntersuchungen und aufgrund von baubetrieblichen Unsicherheiten wurde dieser Ansatz auf der sicheren Seite von allen beteiligten Parteien akzeptiert. Konsequenzen waren jedoch, dass bereichsweise Belastungsbermen angebracht werden mussten, um die Gleitflächen zu verlängern, was das Bauvolumen und die Kosten natürlich vergrößerten. Die vorläufigen Messungen auf der Baustelle bestätigen die Tendenz, dass die Messwerte unter den mittels des geschilderten Ansatzes abgeschätzten PWD liegen.

Im Lastfall „Erster Einstau“ konnte abhängig vom Zeitpunkt der Fertigstellung bis zum Zeitpunkt des Einstaus noch einmal eine Reduktion von 0-90% des Porenwasserdruckes ermittelt werden. Einer der Steinschüttdämme wird direkt nach Fertigstellung eingestaut, sodass hier theoretisch kein Porenwasserüberdruckabbau angesetzt werden kann. Bei den anderen zwei Dämmen liegen

zwischen Fertigstellung und Einstau 7-10 Monate, was eine erhebliche Konsolidierung bis zu 90 % der maximalen Porenwasserüberdrücke zulässt.

3 Zusammenfassung

Die vorliegende Ausarbeitung beschreibt die Ergebnisse einer eindimensionalen Berechnung der möglichen Porenwasserdrücke in der Kerndichtung und im Untergrund eines Steinschüttdammes abhängig vom Konsolidierungsbeiwert und dem Baufortschritt. Zur Abschätzung des Porenwasserüberdruckabbaus wurden bereits von [4] und [5] entwickelte Konsolidierungskurven verwendet und auf die in der Planung und Ausführung befindliche Dammbauwerke angewendet. Hierzu war es notwendig, den lagenweisen Einbau der Bodenschichten mit Hilfe eines Modells abzubilden. Die Ergebnisse sind in Rahmen der in der Literatur zu findenden Referenzdaten [3]. Die ersten, auf der Baustelle gemessenen PWD zeigen, dass die angenommenen Werte auf der sicheren Seite liegen und die tatsächlichen Porenwasserüberdrücke geringer ausfallen. Dies kann einerseits mit dem langsameren Baufortschritt und andererseits mit der vermuteten höheren, vertikalen Durchlässigkeit des Untergrundes zusammenhängen.

Autor

Dr.-Ing. Ronald Haselsteiner

Fichtner GmbH & Co. KG, Turkey

Büyükdere Cad. Polat Han No: 87/5

34387 Mecidiyeköy – Istanbul, Turkey

Ronald.Haselsteiner@fichtner.de

Literatur

[1] Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G.: Geotechnical Engineering of Dams. A. A. Balkema Publishers, Leiden London New York Philadelphia Singapore, 2005

[2] Haselsteiner, R.; Schütz, H.-G.; Osan, C.; Somdalen, B.: Lateritic Soils for Dam Foundations and Dam Cores -Two Case Studies and Their Typical Properties. Long Term Behaviour of Dams (LTBD09), Technical University Graz, Austria, 12th –13th October 2009

[3] Hunter, G.; Fell, R.; Khalili, N.: The deformation Behaviour of Embankments on Soft Ground. UNICIV Report No. R-391, University of New South Wales, Sydney 2052 Australia, 2000

[4] Narita, K.; Okumura, T.; Murata, N.; Ohne, Y.: A simplified method of estimating construction pore pressures in earth dams. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 43-55, 1983

[5] Terzaghi, K.; Peck, R. B.: Die Bodenmechanik in der Baupraxis. Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, 1961

Verzeichnis der Bildunterschriften und Tabellenüberschriften

Bild 1: Dimensionsloser Zeitfaktor T_v und Reduktionsfaktor des Porenwasserdrucks U bzw. Konsolidierungskurven nach [4] und [5]

Bild 2: Porenwasserdruckkoeffizient B -bar abhängig vom Konsolidierungskoeffizienten c_v für unterschiedliche Baufortschritte für den Lastfall „Fertigstellung“

Tabelle 1: Bautechnische Bodenparameter des lateritischen Tons nach [2]