

Ein Beitrag zur Frage der Restscherfestigkeit von Tonböden

von Erik Würger

1. Grundlagen

Die Scherfestigkeit der feinkörnigen Böden und insbesondere der Tone gehört seit jeher zu den schwierigsten Fragen der Bodenmechanik. Vor etwa 50 Jahren gelang K. TERZAGHI [1] durch das Erkennen des zeitweiligen Auftretens von Über- und Unterdrücken im freien Porenwasser der Tone und durch die Unterscheidung zwischen effektiven und totalen Spannungen ein entscheidender Durchbruch. Trotz dieses Fortschrittes blieben aber noch viele Unklarheiten hinsichtlich der Scherfestigkeit der Tone bestehen.

Seit jeher war es üblich, die Scherfestigkeit der bindigen Böden gemäß dem Coulomb'schen Ansatz durch zwei Parameter auszudrücken, nämlich die Kohäsion und den Winkel der inneren Reibung, welcher den der Normalspannung proportionalen Teil der Scherfestigkeit charakterisiert. Nach B. TIEDEMANN [2] sollte jedoch der Neigungswinkel der Bruchgeraden mit der Horizontalen — auch Scherwinkel genannt — keineswegs der wahre Winkel der inneren Reibung einer Tonprobe sein. Da nämlich eine erstverdichtete Tonprobe eine gewisse Eigenfestigkeit erworben hat, sollte die der Auflast proportionale Scherfestigkeit aus zwei Teilen bestehen, nämlich aus einem von der Größe der Porenzahl e abhängigen Kohäsionsanteil und einem Reibungsanteil, welcher durch den wahren Winkel der inneren Reibung gegeben sein sollte. Dieser wurde durch Scherversuche mit normal- und überverdichteten Proben bestimmt. Im Scherdiagramm wurden dann zwei Bruchpunkte für je eine erstverdichtete und überverdichtete Probe mit gleicher Porenzahl e aufgesucht und die Neigung ihrer Verbindungsgeraden gegen die Horizontale ergab den wahren Winkel der inneren Reibung. Umfangreiche Scherversuche, welche von J. HVORSLEV [3] mit dem Scherapparat von H. KREY [4], aber auch mit dem von ihm entwickelten Kreisringscherapparat im Erdbaulaboratorium der Technischen Universität Wien durchgeführt wurden, zeigten die durch die Versuchsgenauigkeit gegebenen Grenzen dieses Verfahrens auf. Die Ergebnisse von späteren direkten Scherversuchen mit Tonproben, welche von H. BORO-WICKA [5, 6, 7, 8] mehrmals unter Umkehr der Scherrichtung bei Konstanthaltung des Porenanteiles langsam abgeschert wurden, führten bei Anwendung der Hypothese von TIEDEMANN zu

dem Schluß, daß beim Scherbruch normalverdichteter Tonproben die Kohäsion Null sein muß und daher der Scherwinkel gleich dem Winkel der inneren Reibung des jungfräulich verdichteten Tones ist.

Die sogenannte Kohäsion der bindigen Böden ist kein unveränderlicher, von der Porenzahl abhängiger Wert. Da sie durch die jeweiligen Kontaktkräfte an den Berührungsstellen der Körner hervorgerufen wird, diese aber insbesondere bei Annäherung an den Bruchzustand durch Kornbewegungen und Kornumlagerungen gestört und abgemindert werden, ist die Kohäsion nicht als ein Bodenkennwert anzusehen, sondern vielmehr als ein Wert, welcher vom jeweiligen Zustand des Bodens, aber darüber hinaus auch von den vorausgegangenen Deformationen abhängig ist. Die zeitlichen Veränderungen der Eigenfestigkeit der bindigen Böden sind daher viel größer als bisher in den Scherhypothesen vorausgesetzt wurden. Die Vorstellung eines zeitlich und örtlich veränderlichen Binnendruckes im Korngerüst als Ursache der Eigenfestigkeit der bindigen Böden entspricht daher besser den tatsächlichen Gegebenheiten.

Die höhere Scherfestigkeit überverdichteter Tonproben beim Abscheren unter konstanter Auflast hat ihre Ursache darin, daß der bei Versuchsbeginn in der Probe infolge der Überverdichtung vorhandene Binnendruck zufolge der geringen Scherdeformation bei Erreichen der Reibungsfestigkeit noch nicht auf Null abgemindert ist.

Bei einer großen Gruppe von Tönen wird im Stadium des erstmaligen Abscherens eine Harnischfläche ausgebildet, indem die Plättchen des Kolloidtones in eine bestimmte Richtung eingeregelt werden. In diesen glatten und glänzenden Flächen ist der Reibungsbeiwert bzw. der Reibungswinkel auf einen Bruchteil des ursprünglichen Wertes abgesunken, weshalb solche Böden auch als rutschgefährdete Böden bezeichnet werden.

Der Winkel der inneren Reibung φ beim erstmaligen Abscheren jungfräulich verdichteter Proben und der Restscherwinkel φ_r sind zwei charakteristische Größen für das homogenisierte Material, welche als untere Grenzwerte angesehen werden müssen. Die Kenntnis dieser beiden Werte läßt weitgehende Rückschlüsse auf das Verhalten eines bindigen Bodens in der Natur zu. Die Ermittlung der beiden Reibungswinkel φ und

φ_r erfolgt im Erdbaulaboratorium der Technischen Universität Wien seit vielen Jahren mit Hilfe des Wiener Routinescherversuches. Bei diesem wird eine homogenisierte Probe an der Fließgrenze in die Scherbüchse eingebracht und meist unter einer Auflast von 50,0 N/cm² konsolidiert. Nach dem Umsetzen in den Scherapparat wird sie unter Konstanzhaltung der Porenzahl langsam abgeschert, wobei im Bruchzustand der Winkel der inneren Reibung erhalten wird. Nach Entfernen der Scherlast bei konstanter Porenzahl wird bei konstanter Auflast mehrmals rasch abgeschert, wobei sich am Schluß ein Winkel φ_r ergibt. Aufbauend auf langjährige Erfahrungen mit diesem Verfahren sollten durch zusätzliche Versuche die vorhandenen Kenntnisse vertieft und ausgebaut werden.

2. Versuchsböden

Insgesamt wurden vier verschiedene Böden untersucht, die beim Wiener Routinescherversuch nach dem mehrmaligen Abscheren einen starken Abfall der Scherfestigkeit aufwiesen. Als erster Versuchsboden diente ein roter Tonschiefer aus der Flyschzone im Nordwesten Wiens, dessen Kolloidtonanteil 47% Masseanteile aufwies. Der Winkel der inneren Reibung beim erstmaligen

Abscheren nach dem Wiener Routinescherversuch betrug 17° und seine Restscherfestigkeit sank nach dem mehrmaligen Abscheren unter konstanter Auflast auf 4° ab. Wie röntgenographische Untersuchungen des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der Universität Wien zeigten, bestand der Kolloidton aus 30% Muskovit, 45% Chlorit, 15% Quarz und 10% anderen Mineralen. Montmorillonit wurde keiner festgestellt.

Der zweite Versuchsboden war eine Schlierprobe aus dem Bereich des Donaukraftwerkes Abwinden—Asten in Oberösterreich. Ihr Kolloidtonanteil betrug 26%, der sich mineralogisch aus 20% Muskovit, 40% Montmorillonit, 15% Kaolinit, 10% Chlorit, sowie 5% Quarz und 10% anderen Mineralen zusammensetzte. Auch bei dieser Probe zeigte sich ein starker Abfall des Winkels der inneren Reibung von 24° auf einen Restscherwinkel von 5°.

Der dritte und vierte Versuchsboden waren Tegelproben aus dem Wiener Raum. Der dritte stammte aus dem Bereich des Wehres I des verbesserten Hochwasserschutzes in Wien, Floridsdorf. Diese Probe besaß einen Kolloidtonanteil von 36% und ihr Winkel der inneren Reibung betrug 24° bei einem Restscherwinkel von 6°. Der Mineralbestand des Kolloidtonanteiles beider Tegelproben setzte sich wie beim Versuchsboden

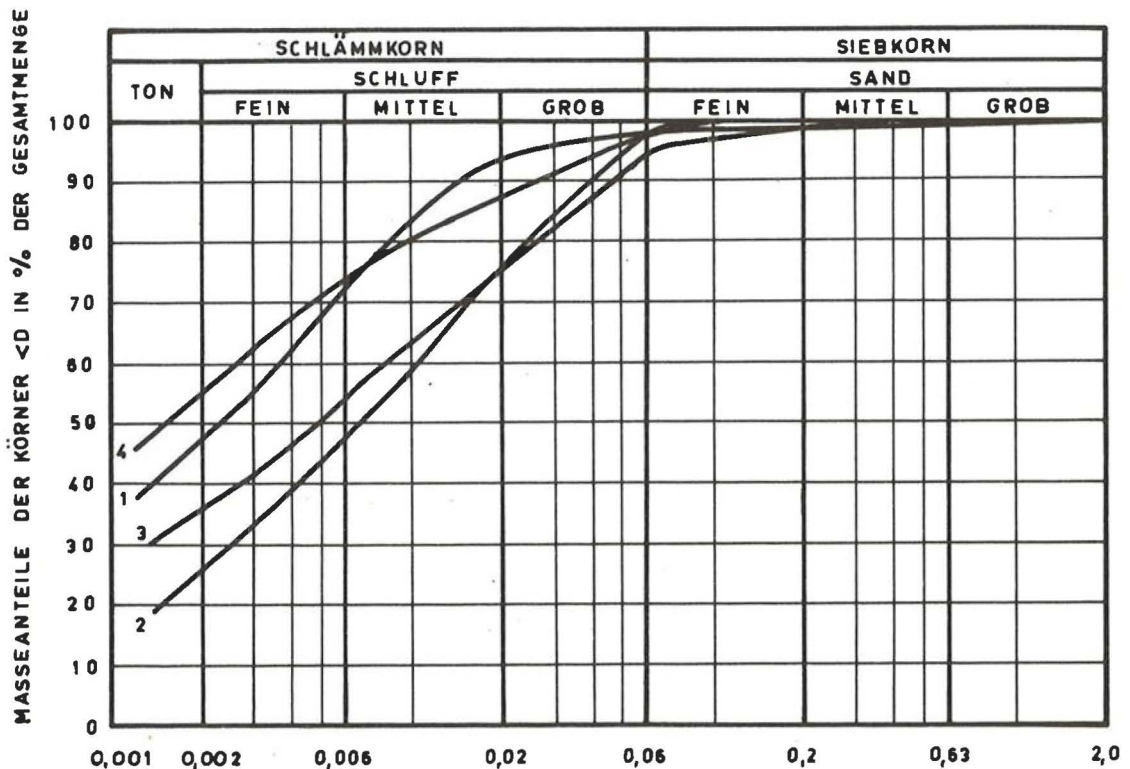


Abb. 1: Versuchsböden

2 hauptsächlich aus Montmorillonit, Kaolinit, Muskovit und Chlorit zusammen.

Mit diesen vier Versuchsböden wurden Wiener Routinescherversuche durchgeführt mit dem Ziel, die Kenntnisse über das Verhalten der Tone in folgenden Punkten zu erweitern:

- Verhalten bei verschiedenen und insbesondere bei kleinen Auflasten,
- Abhängigkeit vom Sättigungsgrad,
- Einfluß einer Vorbelastung auf die Scherfestigkeit,
- Einfluß der Länge des Scherweges.

Weiters wurde mit Proben aus der Flyschzone im Nordwesten Wiens der Einfluß der Korngrößenverteilung auf die Scherfestigkeit untersucht.

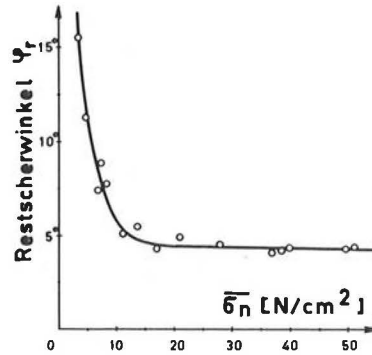


Abb. 3: Restscherwinkel bei Wiener Routinescherversuchen mit verschiedenen hohen Normalspannungen vor Versuchsbeginn
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

3. Verhalten bei verschiedenen und insbesondere bei kleinen Auflasten

Es wurden gestörte Proben mit jeweils verschieden hohen Normalspannungen σ_n belastet und dann abgeschert, um feststellen zu können, ab welcher Normalspannung sich eine Harnischfläche ausbildet und ob die Größe der Normalspannung σ_n bei wiederholtem Abscheren einen Einfluß auf die Feststellung des minimalen Wertes der Restscherfestigkeit hat. Mit dem Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer aus Salmansdorf) wurden im einzelnen folgende Versuche durchgeführt:

- Gestörte Proben wurden mit verschiedenen hohen Normalspannungen σ_n vor Versuchsbeginn gemäß dem Wiener Routinescherversuch abgeschert. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt.
- Gestörte Proben wurden unter verschiedenen hohen Normalspannungen konsolidiert. Dann wurden sie in der Scherebene durchgeschnitten und die Restscherfestigkeit durch mehrmaliges rasches Abscheren unter dieser Normalspannung bestimmt.

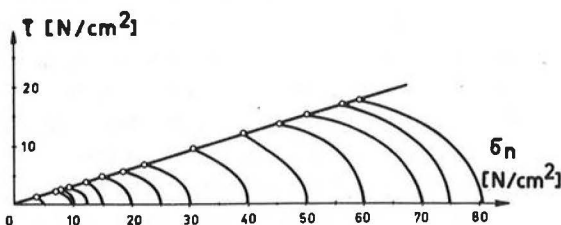


Abb. 2: Wiener Routinescherversuch mit verschiedenen Normalspannungen σ_n vor dem erstmaligen Abscheren
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

Bei beiden Untersuchungsreihen zeigte sich folgendes:

Bei einer Normalspannung $\bar{\sigma}_n \leq 5,0 \text{ N/cm}^2$ ist überhaupt kein Abfall der Scherfestigkeit gegenüber dem Winkel der inneren Reibung feststellbar. Die Ausbildung einer sogenannten Harnischfläche tritt ab einer Normalspannung $\bar{\sigma}_n$ von ungefähr $10,0 \text{ N/cm}^2$ auf. Erst ab dieser Normalspannung ergibt sich auch gemäß Abbildung 3 der minimale Restscherwinkel φ_r .

Zum Zustand der entstandenen Harnischflächen ist festzustellen, daß sich beim Wiener Routinescherversuch stärkere Unebenheiten ausbildeten als bei den vorher durchgeschnittenen Proben gemäß der zweiten Versuchsreihe. Dies trat bei höheren Normalspannungen besonders stark in Erscheinung. Offenbar wurden die Tonpartikeln in der erzwungenen Scherfläche nicht gänzlich in die Scherrichtung ausgerichtet und daher die Ausbildung dieser Unebenheiten verursacht, wodurch geringfügige Erhöhungen der Werte φ_r bewirkt wurden.

4. Abhängigkeit vom Sättigungsgrad

Zur Feststellung der Abhängigkeit der Scherparameter vom Sättigungsgrad wurden gestörte, homogenisierte Proben mit einem Wassergehalt, der an der Fließgrenze lag, in die Scherbüchse eingebaut und stufenweise bis auf eine Normalspannung σ_n von $50,0 \text{ N/cm}^2$ belastet.

Nach ihrer Konsolidation wurden sie verschieden lange Zeiten (bis zu 277 Tage) ohne Wasserzugabe im belasteten Zustand belassen und nach dem Umsetzen in den Scherapparat

entsprechend dem Wiener Routinescherversuch abgeschert. Infolge der unterschiedlichen Belastungszeiten ohne Wasserzugabe vor dem eigentlichen Abscheren ergaben sich willkürliche Sättigungsgrade der einzelnen Proben. Diese Austrocknung der Proben führte zu Kapillarspannungen und somit beim erstmaligen Abscheren zu einer wesentlichen Erhöhung der Scherfestigkeit. In Abbildung 4 sind die

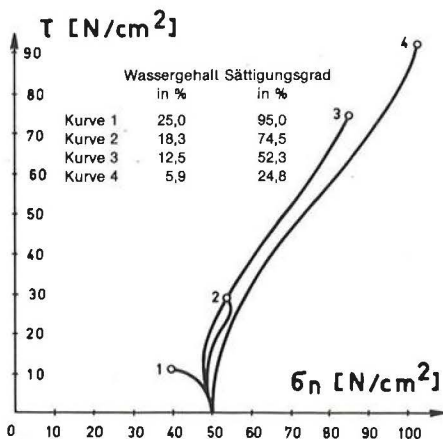


Abb. 4: Abhängigkeit vom Sättigungsgrad
Direkte Scherversuche mit Konstanthaltung der Porenzahl e
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

Spannungswege und Bruchpunkte beim Versuchsboden 1 dargestellt. Bei allen Proben bildeten sich Harnischflächen aus, dennoch zeigte sich eine deutliche Zunahme der Restscherfestigkeit bei abnehmendem Wassergehalt und damit verbundenem geringeren Sättigungsgrad der gestörten Proben (Abb. 5). Bei sehr geringem Sättigungsgrad lag der Restscherwinkel knapp

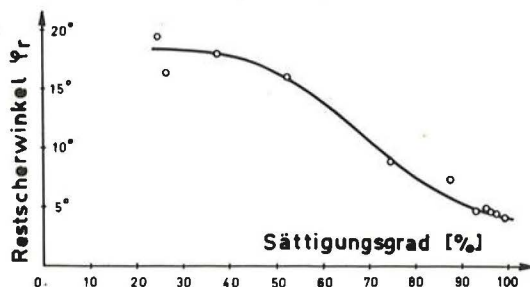


Abb. 5: Abhängigkeit der Restscherfestigkeit vom Sättigungsgrad
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

unter dem Winkel φ einer erstverdichteten, voll wassergesättigten Probe.

Um weitere Aufschlüsse über den Einfluß der Wassersättigung auf die Restscherfestigkeit zu erhalten, wurden Proben der Versuchsböden 1 und 2 wie beim Wiener Routinescherversuch üblich ausgehend von einer Anfangslast von $50,0 \text{ N/cm}^2$ abgeschert, wobei sich ein Restscherwinkel von 4° bzw. 5° ergab. Im Anschluß daran wurden die Proben mehrere Tage an der Luft getrocknet, wobei der Wassergehalt von $23,6\%$ auf $6,7\%$ bzw. beim Versuchsboden 2 von $30,1\%$ auf $5,0\%$ abfiel. Infolge dieser Austrocknung stieg der Restscherwinkel bis auf $16,4^\circ$ bzw. $24,0^\circ$ an. Bei neuerlicher Wassersättigung der Proben stieg der Wassergehalt auf $21,0\%$ bzw. $28,0\%$ an, der Restscherwinkel fiel wiederum auf den Ausgangswert von 4° bzw. 5° ab.

Alle diese Untersuchungen zeigen, daß die Ausbildung einer Harnischfläche den Abfall der Scherfestigkeit auf extrem niedrige Werte ermöglicht, daß jedoch der entscheidende Faktor zum tatsächlichen Auftreten der minimalen Werte der Restscherfestigkeit die volle Wassersättigung in der Scherfläche ist. Es können sich bei relativ schwach wassergesättigten Böden wohl infolge Scherdeformationen Harnischflächen ausbilden, der Winkel der inneren Reibung, der beim erstmaligen Abscheren unter Konstanthaltung der Porenzahl ermittelt wurde, muß jedoch nicht notwendigerweise auf den Restscherwinkel abfallen. Bei einem Sättigungsgrad von ca. 25% trat beim Versuchsboden 1 fast überhaupt keine Änderung des beim erstmaligen Abscheren einer voll wassergesättigten Probe festgestellten Winkels der inneren Reibung auf. Beim Versuchsboden 2 zeigte sich dieselbe Erscheinung bei einer Wassersättigung von ca. 15% . Dieses Phänomen deckt sich auch mit jenem bei Rutschungen in der Natur, welche fast immer nach starken Regenfällen auftreten. Nach den Versuchsergebnissen hängt dies nicht allein mit dem Auftreten zusätzlicher Wasserdrücke zusammen, sondern auch mit dem Abfall des Restscherwinkels auf den minimalen Wert.

Bei der Betrachtung ungestörter Bodenproben aus rutschgefährdeten Gebieten ist immer wieder zu erkennen, daß in situ zum Teil kleine Harnischflächen bestanden, ohne daß bisher in der Natur äußerlich sichtbare Verformungen oder Rutschungen aufgetreten sind. Erst bei einer vollen Wassersättigung des Bodens, wie sie nach starken und ergiebigen Niederschlägen, bzw. einer Änderung der Wasserverhältnisse im Untergrund auftreten, aktivieren sich die bereits vorhandenen Gleitflächen und führen zu oft ausgedehnten Rutschungen.

5. Einfluß einer Vorbelastung auf die Scherfestigkeit

Um den Einfluß einer Vorbelastung auf die Größe der Scherparameter zu untersuchen, wurden überverdichtete Bodenproben abgeschert. Erstverdichtete Proben wurden hierbei in üblicher Weise unter einer lotrechten Last von 50,0 bis 475,0 N/cm² konsolidiert und dann auf 50,0 N/cm² entlastet. Nach Abklingen des Schwellvorganges wurden sie einem Wiener Routinescherversuch unterworfen. Beim erstmaligen Abscheren der Tegelproben aus Wien bei konstanter Porenzahl lagen gemäß Abbildung 6 die Bruchpunkte mit guter Näherung auf einer Geraden durch den Ursprung. Dies beweist, daß bei allen fünf abgescherten Proben die Eigenfestigkeit im Bruchzustand auf Null abgesunken war. Im Gegensatz dazu war beim erstmaligen Abscheren überverdichteter Tonschieferproben gemäß Abbildung 8 die Eigenfestigkeit nur bei geringer Überverdichtung im Bruchzustand auf Null abgesunken, während bei hohen Vorbelastungen beim Bruch noch eine erhebliche Eigenfestigkeit (Binnendruck) vorhanden war.

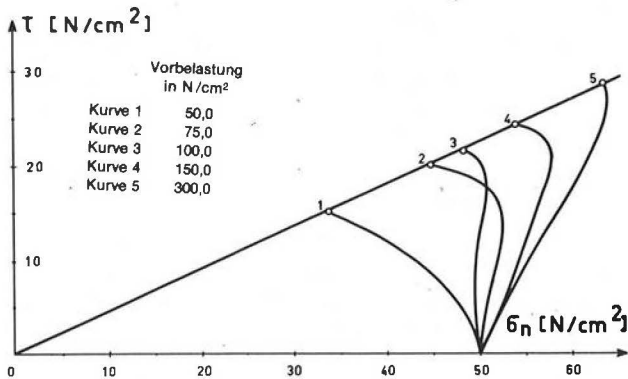


Abb. 6: Wiener Routinescherversuch mit verschiedenen hoch vorbelasteten Proben
Versuchsboden 3 (Wiener Tegel)

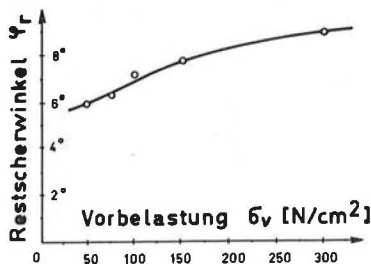


Abb. 7: Abhängigkeit des Restscherwinkels von der Vorbelastung
Versuchsboden 3 (Wiener Tegel)

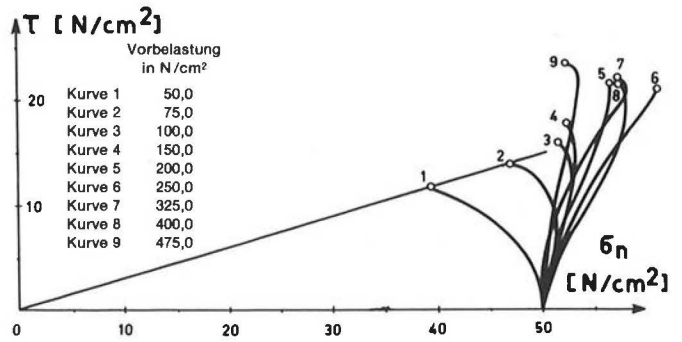


Abb. 8: Wiener Routinescherversuch mit verschiedenen hoch vorbelasteten Proben
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

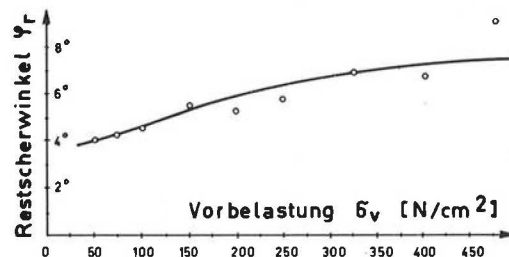


Abb. 9: Abhängigkeit des Restscherwinkels von der Vorbelastung
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

Im Bruchzustand bildete sich bei allen Proben eine Harnischfläche aus. Die Restscherfestigkeit wurde gemäß Abbildung 7 und 9 durch die Vorbelastung um 2—3° gegenüber derjenigen erstbelasteter Proben erhöht. Dies ist offenbar auf stärkere Unebenheiten der Scherfläche, zum Teil auch auf die nicht vollständige Wassersättigung der Probe zurückzuführen.

6. Einfluß der Länge des Scherweges

Eine kennzeichnende Eigenschaft der sogenannten Rutschtone ist die Fähigkeit zu progressiven Brucherscheinungen. Sie bewirkt, daß mit fortschreitender Scherdeformation die Gleitsicherheit des Bodens immer weiter absinkt und eine beginnende Rutschung nur schwer zum Stillstand zu bringen ist.

In der Abbildung 10 ist der Zusammenhang zwischen dem Abfall des Winkels der inneren Reibung auf die Restscherfestigkeit und der

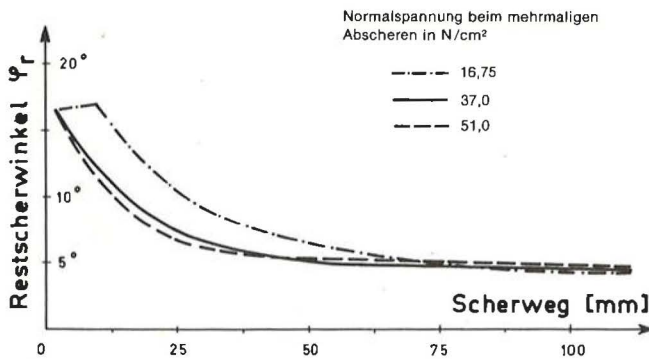


Abb. 10: Abhängigkeit der Restscherfestigkeit vom Scherweg
Versuchsboden 1 (roter Tonschiefer)

Länge des Scherweges beim Versuchsboden 1 dargestellt. Bei diesen Untersuchungen wurde überdies die Normalspannung $\bar{\sigma}_n$ beim mehrmaligen Abscheren variiert, wobei sich zeigte, daß bei einer höheren Normalspannung $\bar{\sigma}_n$ das Absinken der Scherfestigkeit rascher erfolgte als bei kleineren Normalspannungen. Dies wird offenbar durch die unterschiedliche Ausrichtung der einzelnen Tonpartikeln in der Scherfläche bewirkt.

Die Länge des Scherweges wurde durch Addition der horizontalen Verformungen jedes einzelnen Abschervorganges ermittelt. Der Abfall der Scherfestigkeit erfolgte bei allen vier Versuchsböden relativ rasch. Schon nach einem ca. 2,0 bis 3,0 cm langen Scherweg traten sehr niedrige Werte der Restscherfestigkeit auf, die dann nur noch geringfügig unterschritten wurden. Man darf allerdings nicht außer acht lassen, daß das mehrmalige Abscheren bei ständigem Wechsel der Scherrichtung im Scherapparat eine, zumindest anfänglich auftretende mehrmalige Umlagerung einzelner Tonpartikeln bewirkt, was sicherlich eine Verlängerung des Scherweges bis zur Erzielung des niedrigsten Wertes der Restscherfestigkeit gegenüber einem Versuch mit Beibehaltung des Schersinnes bedeutet.

Bei kleineren Normalspannungen kommt es beim erstmaligen Wechsel der Scherrichtung sogar zu einer geringen Erhöhung der Scherfestigkeit, die durch Unterdrücke im freien Porenwasser erklärbar ist.

Es ist also nur eine sehr geringe Scherdeformation notwendig, um ein Absinken des Winkels der inneren Reibung auf die Restscherfestigkeit zu erreichen, wobei der Mineralbestand des Kolloidtones keinen Einfluß darauf nimmt. Dies bestätigen auch Erfahrungen in der Natur. Hier finden sich schon infolge früherer geringer Verformungen oft Harnischflächen in Böden, die äußerlich keinerlei Anzeichen einer Rutschung erkennen lassen.

7. Einfluß der Korngrößenverteilung auf die Scherfestigkeit

Bei den im Erdbaulaboratorium der Technischen Universität Wien durchgeführten Untersuchungen der Scherfestigkeit von bindigen Böden mittels direkter Scherversuche werden die gestörten Proben für den Wiener Routineversuch derart aufbereitet, daß Korngrößenanteile von mehr als 2,0 mm Durchmesser abgesiebt werden. Diese Methode hat sich bei Sedimentationsböden, wozu auch der Wiener Tegel zählt, bestens bewährt. Die festgestellten Winkel der inneren Reibung und die Restscherfestigkeiten stellten die niedrigsten erreichbaren Werte dar.

Bei einer Gruppe von Böden, wie Mergeln, Phylliten u. ä. kann jedoch der Wiener Routineversuch bei Absiebung der Körner über 2,0 mm Durchmesser zu hohe Werte der Restscherfestigkeit ergeben. Dies kann laut H. BRANDL [9] einerseits daran liegen, daß bei der Homogenisierung des Bodens die natürliche schieferige Struktur des Bodens zerstört wird, andererseits werden aber in der Mehrzahl der Fälle die Ursachen darin zu suchen sein, daß die in der Natur im Laufe der Zeit stattfindende Zersetzung in Feinstbestandteile unter Laboratoriumsbedingungen in kurzer Zeit nicht nachgeahmt werden kann. Der natürliche Zersetzungsvorgang kann aber dadurch vorweggenommen werden, daß von vornherein ein verfeinertes Korngemisch untersucht wird, bei welchem auch gröbere Fraktionen unter 2,0 mm Korngröße ausgesiebt werden.

Deshalb wurde bei Proben aus der Flyschzone im Nordwesten Wiens das Größtkorn zwischen 0,063 mm und 2,0 mm variiert und die Scherparameter bestimmt. Die in Abbildung 11 dargestellten

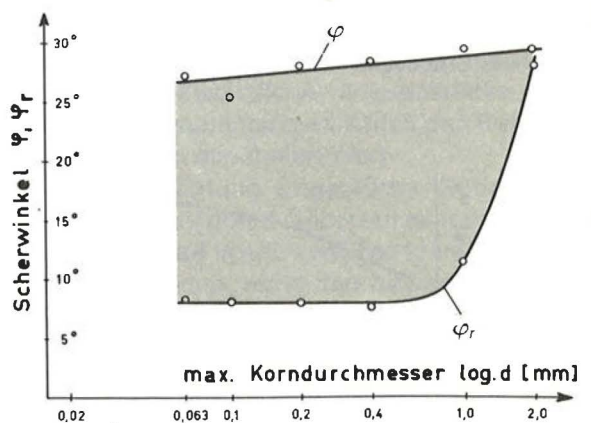


Abb. 11: Reibungswinkel als Funktion des Größtkorns
Verwitterungsboden aus der Flyschzone
 φ Winkel der inneren Reibung
 φ_r Restscherwinkel

Ergebnisse zeigen, daß die Variation des Größtkorns zwischen 0,063 und 2,0 mm auf den Scherwinkel bei erstmaligem Abscheren nur einen geringen Einfluß ausübt, daß aber der Restscherwinkel durch den Kornanteil zwischen 1,0 und 2,0 mm in entscheidender Weise beeinflußt werden kann. Deshalb empfiehlt es sich bei solchen Böden, die Restscherfestigkeit verfeinerter Korngemische zu untersuchen.

8. Mineralogische Untersuchungen

Bei einigen gestörten Proben derselben Bodenart zeigten sich beim Wiener Routinescherversuch Unterschiede bei der Bestimmung des Restscherwinkels. In einigen Fällen wurden große Differenzen zwischen den beim erstmaligen Abscheren aufgetretenen Winkeln φ und den Restscherwinkeln φ_r festgestellt. Es traten aber auch Fälle ein, bei denen fast kein Abfall der Scherfestigkeit gemessen wurde. Deshalb wurde der Kolloidtonanteil dieser Proben auf seine mineralogischen Eigenschaften untersucht. Der Beitrag von T. C. KENNEY [10] über den Einfluß der Mineralbestandteile auf die Restscherfestigkeit natürlicher Böden ließ vermuten, daß nur Montmorillonit einen extremen Abfall auf 4° verursacht, wogegen sich danach bei Kaolinit, Muskovit und Illiten Restscherwinkel von 15° bis 26° ergeben sollten.

Die Untersuchungen zeigten aber, daß neben Montmorillonit auch Chlorit zu ganz minimalen Restscherwinkeln von 4° führen kann. Beim Versuchsboden 1, dessen Restscherfestigkeit 4° betrug, war kein Montmorillonit feststellbar, jedoch 45% Chlorit. Andererseits zeigte sich aber auch, daß bei gleichem Mineralbestand des Kolloidtones ganz unterschiedliche Größen der Restscherfestigkeit auftraten.

Es läßt sich somit generell feststellen, daß die Kenntnis des Mineralbestandes des Kolloidtones zwar ein notwendiges Kriterium für die Möglichkeit des Absinkens der Scherfestigkeit von Tonböden auf extrem niedrige Winkel ist, aber nicht ein hinreichendes. Ein wesentlicher Faktor ist die volle Wassersättigung der Probe sowie das Nichtvorhandensein größerer Einzelkörner in der Scherfläche. Weiters darf die lotrechte Normalspannung, bei welcher die Restscherfestigkeit bestimmt wird, eine gewisse Größe nicht unterschreiten.

9. Schlußfolgerungen

Auf Grund der umfangreichen Untersuchungen des Einflusses verschiedener Parameter auf die Scherfestigkeit von Rutschtonen können folgende Kriterien aufgestellt werden, bei deren Einhaltung die kleinsten Reibungswinkel φ und φ_r von Rutschtonen im Wiener Routinescherversuch ermittelt werden.

- (1) Der Wiener Routinescherversuch mit gestörten Proben aus Sedimentationsböden ist mit einem Kornanteil kleiner 2,0 mm durchzuführen. Bei Verwitterungsböden hingegen soll das Größtkorn 0,4 mm sein.
- (2) Der Wassergehalt der gestörten Probe soll beim Einbau in die Scherbüchse gleich der Fließgrenze sein.
- (3) Es ist volle Wassersättigung der gestörten Probe während der Konsolidation unter der gewünschten Normalspannung σ_n vor dem eigentlichen Abschervorgang sicherzustellen.
- (4) Die aufgebrachten Normalspannungen σ_n vor dem Abscheren sollen zwischen $30,0 \text{ N/cm}^2$ und $70,0 \text{ N/cm}^2$ liegen.
- (5) Die Normalspannung $\bar{\sigma}_n$, unter der das mehrmalige rasche Abscheren zur Bestimmung der Restscherfestigkeit erfolgt, soll mindestens $10,0 \text{ N/cm}^2$, besser aber größer als $15,0 \text{ N/cm}^2$ sein.

Literaturverzeichnis

- [1] TERZAGHI, K.: "The Shearing Resistance of Saturated Soils and the Angle between the Planes of Shear". Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts (1963).
- [2] TIEDEMANN, B.: „Über die Schubfestigkeit bindiger Böden“. Die Bautechnik 15 (1937), H. 30.
- [3] HVORSLEV, J.: „Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden“. Diss. TH. Wien 1936.
- [4] KREY, H.: „Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes“. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1932.
- [5] BOROWICKA, H.: „The Mechanical Properties of Soil“. Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1/6, Paris 1961.
- [6] BOROWICKA, H.: „Die mechanischen Eigenschaften der Böden“. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TH. Wien (1961), Heft 3.

- [7] BOROWICKA, H.: „Der Wiener Routine-scherversuch“. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TH. Wien (1963), Heft 5.
- [8] BOROWICKA, H.: „10 Jahre Wiener Routine-scherversuch“. Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, TH. Wien (1970), Heft 11.
- [9] BRANDL, H.: „Die Sicherung von hohen Anschnitten in rutschgefährdeten Verwitterungsböden“. Proceedings der Sechsten Europäischen Konferenz für Bodenmechanik und Grundbau, Vol. 1.1, Wien 1976.
- [10] KENNEY, T. C.: „The Influence of Mineral Composition on the Residual Strength of Natural Soils“. Proceedings of the Geotechnical Conference, Oslo 1967.