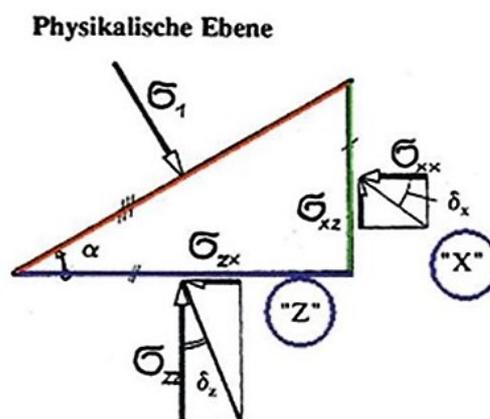


Bodenwinkel

In den Schriften der derzeitigen und neuen Erddrucklehre bestehen sehr unterschiedliche Darstellungen zu den Erdkräften, speziell zu deren Lage und Intensität. Teils begründen sich diese Differenzen in der Nutzung unterschiedlicher Erdwinkel und durch wirksame Abweichungen bei der Erddruckermittlung von den reinen Grundlagen der Physik. Diesen Kontroversen wird nachgegangen unter Heranziehung der Schriften der Technischen Universität München TUM, Zentrum Geotechnik und jener der neuen Erddrucklehre, zu finden in dieser Webseite.

Über die Methodik der Winkelmessung wird in der Schrift ‚Scherfestigkeit I‘ der TUM unter I.4, S. I.11 vorgetragen. Der Zusammenhang zwischen Winkelmessung und Erddruckberechnung wird dargestellt auf S. 1.5 mit dem Bild I01.70: Physikalische Ebene und Mohr’scher Spannungskreis.

Anzumerken bleibt, dass zur Messung der Scherfestigkeit und des Scherwinkels in den gezeigten Armaturen immer Druck auf den Probekörper ausgeübt wird, obwohl in freier Natur diese Belastung der Geländeoberfläche kaum auftritt. Zudem dürfte in Fachkreisen bekannt sein, dass sich ungestörte Bodenproben zur Einspannung in den Armaturen nur aus maximal fünf Bodensorten ziehen lassen. Unberücksichtigt bei diesen Messungen bleibt der Einfluss der vielfältigen Bodeneigenschaften, wie trocken, feucht, nass und unter Wasser. Folglich können die in den Armaturen gewonnenen Messergebnisse zum Scherwinkel nicht relevant sein für all die anderen Bodenarten.



Die Ausführungen werden fortgesetzt in nachstehender Schrift:

Bodenwinkel, deren Messung und Wertung

Schrift:

Bodenwinkel, deren Messung und Wertung

Es wird der Nachweis geführt, dass es nicht möglich ist, über die wenigen von der derzeitigen Lehre durchgeführten Messungen an in Armaturen eingespannten Erdkörpern für alle Bodenarten gleich geltende Bodenwinkel und Schereigenschaften zu bestimmen. Hierzu vorgestellt wird Bildmaterial und Erläuterungen gegeben.

Unter dem Sammelbegriff "Boden" werden in der neuen Erddrucklehre alle Bodenarten zusammengefasst, unterschiedslos ihrer Entstehung aus magmatischen, metamorphen oder sedimentären Ursprungsgesteinen und der bisherigen Einteilung nach bindigen und nicht bindigen Böden. Böden mit extremen Korn-, Richtungs- und Verteilungsgefüge verlieren bei steigender Berechnungshöhe an Bedeutung für die Erddruckberechnung. Der Begriff "Boden" erfasst somit alle Felsgesteine, ihre Auflösungsprodukte bis hin zum Staub. Bei Auflockerung oder Verdichtung von Böden und Wasseraufnahme ändern sich deren Eigenschaften und Volumina und lassen neue Bodenarten entstehen. In Erweiterung des Mehrphasensystems der Bodenmechanik hat die neue Erddrucklehre über die Raum- und Gewichtsteile von Boden einen Weg aufbereitet alle Eigenschaften von Böden im trockenen, feuchten und nassen Zustand sowie von Böden unter Wasser zu berechnen. Buch: 3 Berechnung von Bodeneigenschaften, S. 85ff.

Um Vergleiche zwischen den Lehren anstellen zu können, sind für die neue Lehre neue Symbolzeichen und Begriffe eingeführt worden: Buch: S. 21ff.

Besondere Aufmerksamkeit gehört den Erdwinkeln, sie legen bei vorgegebener Berechnungshöhe die Größen fest der Kraftfläche, der Gewichtskraft sowie der Kräfte bzw. Erdspannungen im Erdkörper. Für den Erdwinkel θ , den die derzeitige Lehre an in Armaturen eingespannten Erdkörpern unter Druck gemessen hat, verwendet sie folgende Begriffe: Gleitwinkel, Bruchwinkel und Scherwinkel. Die neue Lehre fasst den Bruch- und Gleitwinkel zusammen zum natürlichen Neigungswinkel β und ordnet dem Scherwinkel eine andere Bedeutung zu. Der Scherwinkel s stellt sich ein, wenn Boden auf natürlicher Weise abgleitet und eine Hanglinie ausbildet ($\tan s =$

$\tan \beta / 2$). Zudem ändert sich der Winkel β , wenn auf die Geländeoberfläche eine Auflast / Kraft aufgetragen wird. Der Kraftfluss, ob vertikal oder horizontal wandelt den Winkel β zu β_e oder β_e' .

Für den Abtrag / Verteilung der Auflast in das anstehende Erdreich ist die Kraft zunächst umzuwandeln in eine Erdsäule mit gleicher Grundfläche und der Höhe h_e , die sich errechnet über die aufgetragene Gewichtskraft dividiert durch die Bodendichte des anstehenden Bodens.

Weitere Erläuterungen hinsichtlich der Erdwinkel, deren Messung, Platzierung und Einfluss auf Erddruckberechnungen geben die Beschreibungen des nachstehenden Bildmaterials.

Neue Lehre, Buch: 2.5.3, S. 66ff.

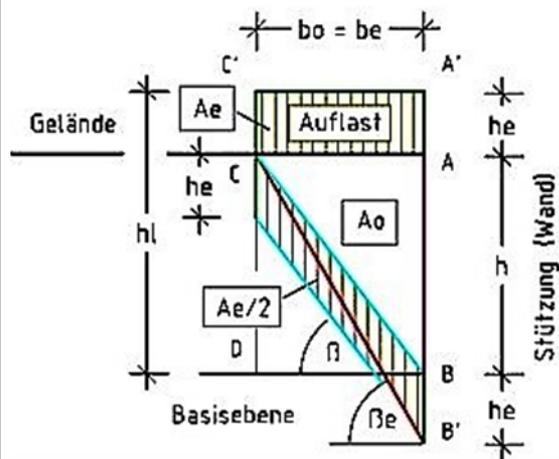


Abb. 30

Kraftfläche C-A-B mit dem Neigungswinkel β wandelt sich durch die auf die Geländeoberfläche aufgetragene Auflast

Die Auflast, in der Ansicht gekennzeichnet durch die Fläche A_e , bildet im Erdreich eine gleichgroße Fläche aus, die sich in einen aktiven und einen reaktiven Part teilt. Wird der vertikale Kraftabbau der Auflast gewährleistet, bildet sich die Neigungsebene unter Auflast C-B' mit dem Neigungswinkel β_e aus.

Neue Erddrucklehre, Buch: 2.5.3, S. 67

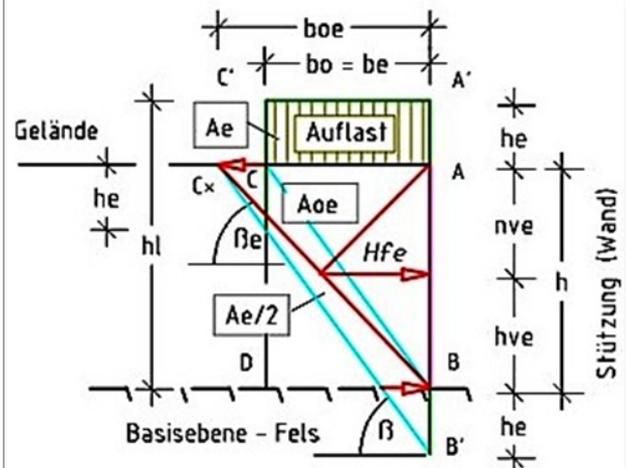


Abb. 31

Kraftabtrag der Auflast bei behindertem vertikalen Kraftfluss und Kraftumlenkung in horizontale Richtung

Wird im Erdreich unterhalb der Basisebene (Punkt B) die Ausbreitung der Auflastfläche A_e durch eine Sperrschicht unterbunden, breitet sich die Abtragsfläche A_e horizontal bis zum Punkt C^x aus. Damit entsteht die "Neigungsebene unter Auflast" C^x -B mit dem abgeflachten Neigungswinkel β_e' .

Winkel $\beta_e \neq \beta_e'$

Auch bei einem Betonprobewürfel, der unter Druck gesetzt wird, wandelt sich die vertikale Kraft in horizontale Kräfte um.



Abb. 38
Bruchverläufe im Beton-Probewürfel

Auch bei einem Betonprobewürfel, der unter Druck gesetzt wird, wandelt sich die vertikale Kraft in horizontale Kräfte um und lassen erkennbare Bruchverläufe entstehen.

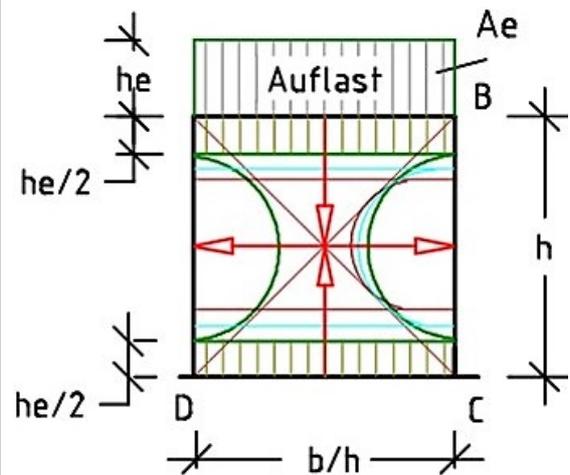


Abb. 39
Der Druck / Auflast baut sich zunächst vertikal ab und lässt die aktive und reaktive Kräftebene mit der Höhe $he/2$ entstehen. Hiernach wandelt sich der Kraftüberschuss in horizontale Kräfte um, die dann den Würfel sprengen.

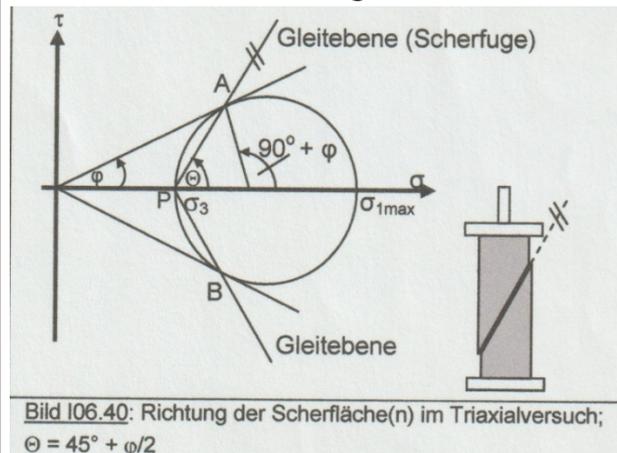
Neue Lehre, Buch: 2.1, S. 49ff.



Abb. 19a
Glaszylinder mit Sandfüllung

Es dürfte nachvollziehbar sein, dass ähnliche Kraftverläufe, wie sie sich beim Betonprobewürfel zeigen, auch bei einem zylindrischen Körper einstellen. Unter dieser Annahme gäbe es nicht die "eine" Bruchebene im Probekörper, wie die derzeitige Lehre diese im Bild I06.40 vorstellt.

Schrift TMU: Scherfestigkeit 1.6, S. I.14f.

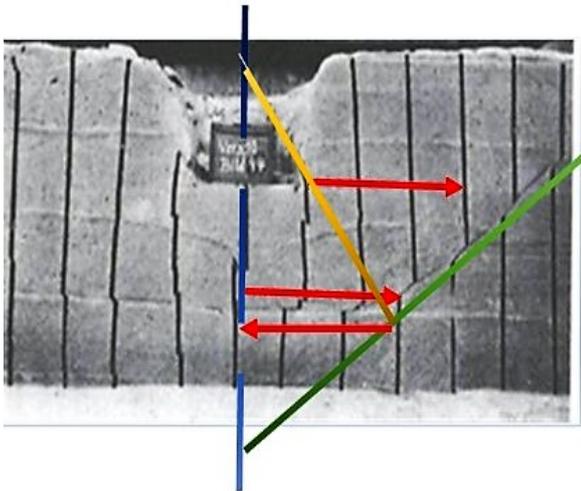


Anmerkung:

Da innerhalb bei in Armaturen eingespannten Erdkörpern der vertikale Kraftabbau behindert wird, kann sich der Bruchwinkel $\theta = \vartheta$ nur bei horizontaler Kraftausbreitung im Probekörper messen lassen. Der Winkel θ wäre damit identisch mit dem Neigungswinkel $\theta e'$. Die Abb. 19a gibt Anlass zu denken, dass in Armaturen vorgegebene Einbauten die Ausbildung der Scherebene erzwingen.

Dem Thema ‚Bodenverhalten bei vertikalem Lastauftrag‘ hat sich auch die Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (DEGEBO) an der Technischen Universität Berlin gewidmet und im Heft 28. S.122 die nachstehende Versuchsanordnung veröffentlicht.

DEGEBO Berlin, Heft 28. S. 122.



Das Bild 01 zeigt ein flach gegründetes Einzelfundament in nichtbindigem Boden, aufgebaut auf starrem Betonfußboden.

Auch hier behindert die Betonschicht den vertikalen Abbau der Auflast im Boden, so dass horizontale Kräfte sich ausbilden und seitliche Bodenverschiebungen verursa-

Erddruck-Studie: März 2015, 5.5.7, S.19 und Buch 2.3, S. 55f.

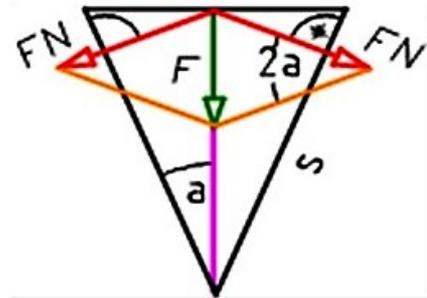


Abb. 26 zeigt innere Kräfte des physikalischen Keils bei vertikaler Belastung F .

Die Versuchsanordnung der DEGEBO und der physikalische Keil bestätigen die bisher in den Abb. gezeigten Anordnungen der Kräfte, Wirkungen und Kraftumwandlung bei behindertem vertikalen Kraftfluss.

Neben den unterschiedlichen Erdwinkeln wählen die Lehren auch bei den Kraft- und Spannungsverteilungen differenzierte Verfahren. Zunächst ähnlich wird über einen Erdkeil, dessen Spitze nach unten zeigt, die Gewichtskraft ermittelt. Während die neue Lehre diese Keilform zur Kraftermittlung beibehält, wählt die derzeitige Lehre für ihren Spannungsnachweis einen Keil, dessen Keilspitze nach oben zeigt. Zudem verkleinert sie die Keilfläche über einen steileren Winkel.

Schrift TMU: Erddruck, P.5.3.2, S. P.10

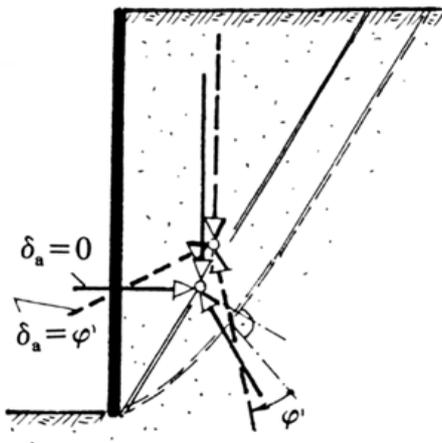


Bild P05.60

Schnitt und Kräfteck der Kräfte in einem Punkt

Gezeigt wird eine konvexe Krümmung der Bruchfläche infolge einer positiven Wanddrehung mit Lage und Neigung der Erddruckkraft im unteren Drittel der Berechnungshöhe. Durch die Rauigkeit der Wand kann sich der Wandreibungswinkel $\delta_a = \varphi'$ ergeben, der die Erddruckkraft aus der Horizontalen in die Schräglage bringt.

Neue Erddrucklehre, Buch: 2.6, S. 68f.

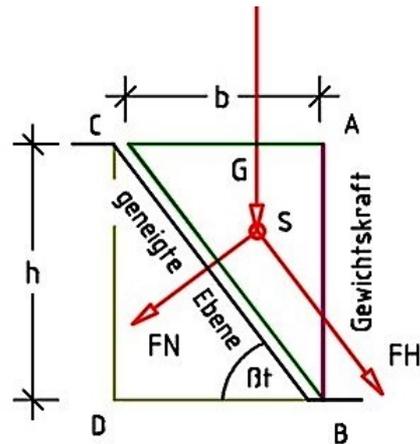


Abb. 32

Erdkeil mit Ansatz der Gewichtskraft G , der Normalkraft FN und der Hangabtriebskraft FH im Schwerpunkt S .

Mit nachfolgenden Abbildungen wird der Nachweis geführt, dass sich bei dem Kraftansatz im Keilschwerpunkt ein anderes Kraftbild einstellt als jenes gezeigt im Bild P05.60.

In der Anmerkung wird ausgeführt über Wanddrehung, Reibungswinkel und Schräglage der Erddruckkraft.

Anmerkungen zum Bild P05.60

Bei der Vielzahl eigener Versuchsanordnungen mit trockenen, feuchten und nassen Böden haben sich gekrümmte Bruchebenen nie eingestellt. Auch kann die Rauigkeit einer Wand, wegen fehlender Bodenbewegung hinter der Wand, keinen Wandreibungswinkel $\delta_a = \varphi'$ ausbilden, der zudem die Erddruckkraft aus der Horizontalen in die Schräglage bringen kann. Der dargestellten Kraftbündelung in einem Punkt wurde nachgegangen in den Abb. 32 - 36. Wanddrehungen sowie Wandkippen, wie die derzeitige Lehre diese beschreibt, sind bei praxisnaher Betrachtung als Baumängel zu werten, die sich möglicherweise aus fehlerhaften Erddruckberechnungen entwickelt haben.

Neue Erddrucklehre, Buch: 2.6, S. 68f.

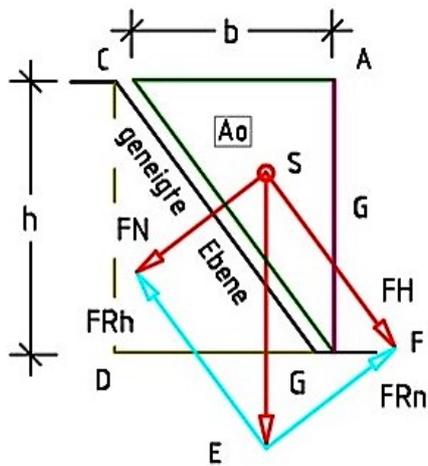


Abb. 33

Das Parallelogramm der Kräfte entsteht, wenn G unterhalb von S angesetzt und den aktiven Kräften FN und FH ihre reaktiven Kräfte hinzugefügt werden.

Neue Erddrucklehre, Buch: 2.6, S. 68f.

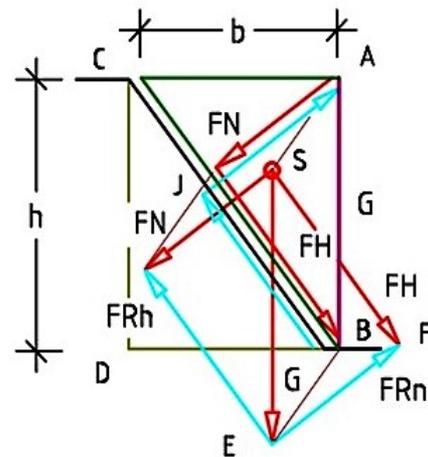


Abb. 34

Mit der Verschiebung der Kraft G in die Ebene $A-B$ nehmen auch die Normalkraft FN und die Hangabtriebskraft FH ihre neuen Positionen im Erdkeil ein.

Neue Erddrucklehre, Buch: 2.6, S. 68f.

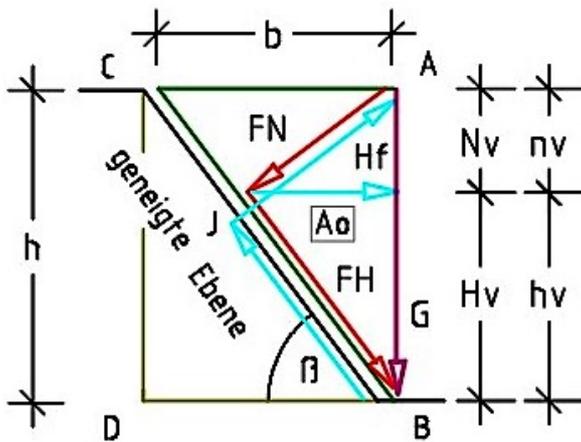


Abb. 35

Im Erdkeil C-A-B zugeordnet sind den Kräften FN und FH die aktiven und reaktiven Krafrichtungen, sie verlaufen konträr. Bei der Erddruckkraft Hf vereinen sich aktive und reaktive Krafrichtung und nehmen den gleichen Weg zur der den Boden stützenden Wand.

Neue Erddrucklehre, Buch: 2.6, S. 68f.

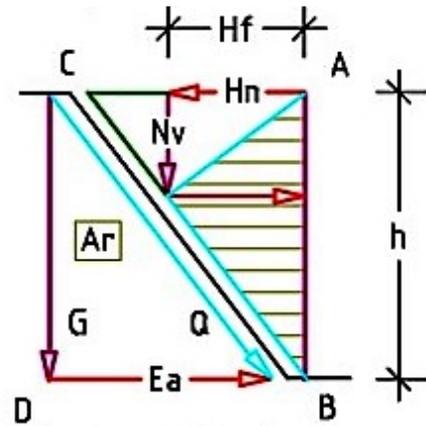


Abb. 36

Die Gewichtskraft aus der schraffierten Fläche mit der Berechnungstiefe a entspricht der vertikalen Kraft Hv . In gleicher Weise lässt sich die horizontale Kraft Hf ermitteln über die Gewichtskraft, die sich errechnet über die Keilfläche mit der Höhe nv und der Breite hf multipliziert mit der Bodendichte.

Neue Lehre, Buch: 2.6, S. 78.

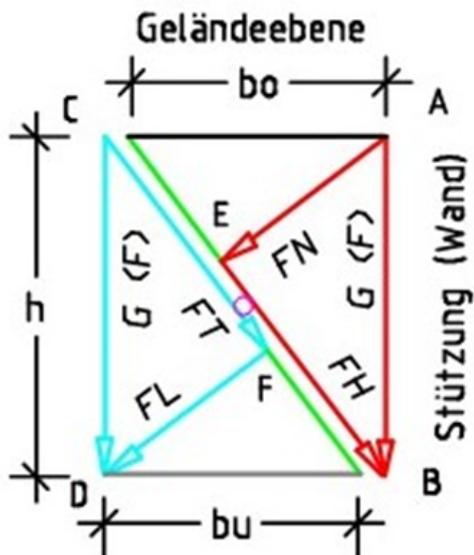


Abb. 41

Als Erdblock wird in der neuen Lehre der Erdkörper benannt, der sich errechnet über die Fläche C-A-B-D multipliziert mit der Berechnungstiefe a . Innerhalb des Blocks bilden sich oberhalb der Neigungsebene die aktiven und unterhalb in der Fläche C-B-D die reaktiven Kräfte aus.

Neue Erddrucklehre, Buch: 3.2, S. 95.

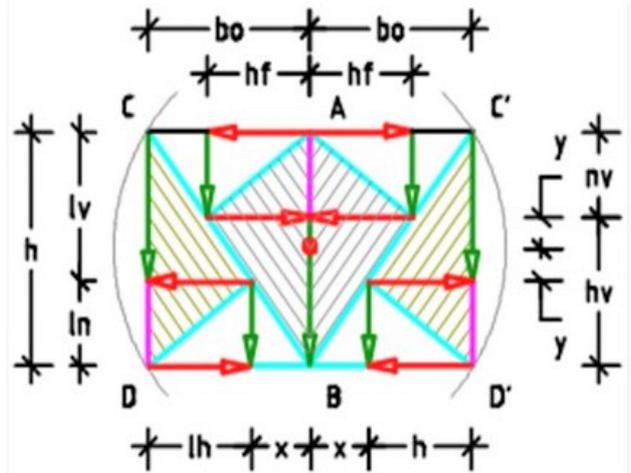


Abb. 53

Zeigt innerhalb eines Kreises die aktiven und reaktiven Kraftflächen mit ihren Abmessungen, die sich ermitteln lassen über den Neigungswinkel β des anstehenden Bodens. Zudem zeigen die Krafrichtungen innerhalb der beiden Erdblöcke ($bo \cdot h \cdot a$) das Gleichgewicht der Kräfte an. Der rote Punkt markiert den Kreismittelpunkt.

Schrift TMU: P Erddruck, P.5.3, S. P.10

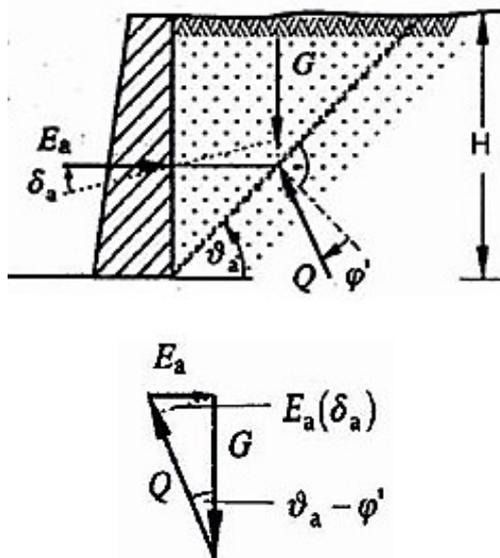


Bild P05.50

Schnitt und Kräfteck der Kräfte, Gewichtskraft, Quer- und Erddruckkraft in einem Punkt auf der Bruchebene

Die Gewichtskraft G errechnet sich über die Keilfläche mit der Höhe H und dem Winkel ϑ_a . Die Erddruckkraft E_a ist für alle Bodenarten gleich in der Höhe $H/3$ anzusetzen.

Schrift TMU: P Erddruck, P.5.7, S. P.14

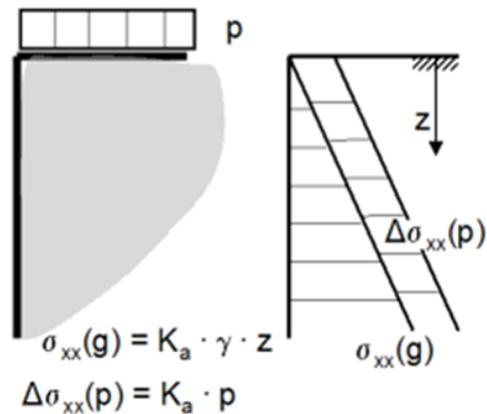


Bild P05.120

Erdspannungen aus belasteter Geländeoberfläche mit größter horizontaler Erdspannung in der Basisebene.

Für die Spannungsberechnung ist die für die Ermittlung der Gewichtskraft dargestellte Keilfläche zu ändern (Bild P05.50). Der Wandel wird vollzogen über den vorgegebenen Winkel und der vertikalen Spiegelung der Keilfläche. Hiernach zeigt sich die größte horizontale Spannung in der Basisebene des Erdkörpers.

Anmerkung zum Bild P05.120

In der Schrift 'Übergabe' – Eigene Versuchsanordnung, Abb. 5 – wurde der Nachweis geführt, dass sich keine horizontalen Erdspannungen / Kräfte ausbilden in der Basisebene von Erdkörpern gegen die den Boden stützende Wand. Damit dürfte die Vorgabe der derzeitigen Lehre zur Lage der maximalen horizontalen Spannung unbelegbar sein.

Schrift TMU: Scherfestigkeit, S. I.5

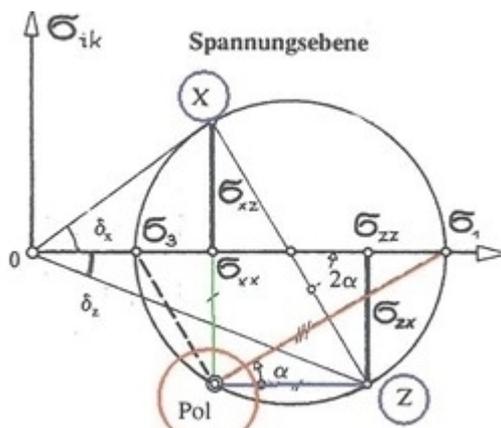


Bild I01.70: Mohr'scher Spannungskreis

Die derzeitige Lehre nutzt den Spannungskreis, um die Richtungsänderungen wirkender Spannungen einschließlich der Hauptspannung zu begründen, wie im Bild P05.120 dargestellt.

Unter dieser Prämisse soll sich die vertikale Gewichtskraft umwandeln in eine horizontale Kraft und auf der Abszisse ihren Platz finden zwischen den Spannungen $\delta 1$ und $\delta 3$.

Des Weiteren ist gegen die Spannungsverteilung nach derzeitiger Lehre gegenzuhalten, dass sich vertikale Kräfte oder Spannungen innerhalb eines Körpers nicht ohne äußeren Zwang in horizontale Kräfte umwandeln.

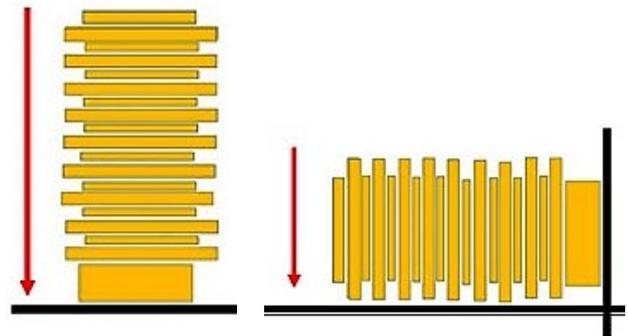


Abb. 402 und 404

Die Bodenpressung unter einem Gebäude ändert sich nachvollziehbar, wenn man dieses kippt und auf die Seite legt. Aus dem Beispiel lässt sich ableiten, eine Spannungs- oder Kraftumwandlung über den Mohr'schen Spannungskreis kann nur zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Zusammenfassung

Es gilt, dem Leser die unterschiedlichen Ansätze bei der Erddruckberechnung nach derzeitiger und neuer Erddrucklehre näher zu bringen. Hierzu wird Bildmaterial herangezogen und nach physikalischen Grundsätzen beurteilt. Besonderes Interesse gilt dem Hauptwinkel, seiner Messung und Anwendung. Er bestimmt die Größen der Kraftfläche, der Gewichtskraft und Erddruckkraft. Die derzeitige Lehre nennt diesen Winkel: 'Gleit-, Bruch- oder Scherwinkel', die neue Lehre 'Neigungswinkel'.

Bisher wird der Gleitwinkel θ an in Armaturen eingespannter Erdkörper unter Druckausübung gemessen. Für die Anfertigung derartiger Probekörper eignen sich fünf Bodenarten. Bei dieser Winkelmessung bleiben unberücksichtigt die natürli-

chen Bodeneigenschaften einschließlich des von Boden aufgenommenen Wassers, Abb. 31. Der Gleitwinkel θ könnte verglichen werden mit dem Neigungswinkel $\theta e'$, der sich nur einstellt bei belasteter Geländeoberfläche und gleichzeitiger Behinderung des vertikalen Kraftabbaus infolge einer Sperrschicht aus Beton oder Felsgestein. Somit dürfte der Winkel $\theta e'$ maximale Anwendung finden bei höchstens 0,1% der anfallenden Erddruckberechnungen. Da die derzeitige Lehre und Eurocode 7 die Anwendung des Gleitwinkels θ für alle Erddruckberechnungen vorgibt, können die Ergebnisse dieser Berechnungen nur fehlerhaft sein.

Ebenso unwirklich, wie die Vorgabe des Gleitwinkels θ , ist die Anordnung der maximalen horizontalen Erdspannung / Erddruckkraft in der Basisebene der Erdkörper, Bild P05.120. Die derzeitige Lehre begründet diese Lage mit dem Mohr'schen Spannungskreis, er soll es erlauben, die vertikale Gewichtskraft G auf die Abszisse zu legen, wo sie die Strecke $\delta 1$ bis $\delta 3$ einnehmen soll, Bild I01.70. Wohl kein Statiker würde davon ausgehen, dass die Bodenbelastung unter einem stehenden Hochhaus unverändert bleibt, wenn man das Gebäude kippt und auf die Seite legt, Abb. 402 und 404. Es dürfte damit belegt sein, dass die Berechnung und Verteilung der Erdspannungen nach derzeitiger Lehre abwegig sind.

Ein weiterer Punkt, der die derzeitigen Erddruckberechnungen zu fehlerhaften Ergebnissen führt, ist die Vielzahl empirischer Zahlenwerte für Erdwinkel, Bodeneigenschaften und anderer Parameter, die zur freien Auswahl in Tabellen vorgehalten werden, siehe Schrift ‚Bodenkennwerte‘ Abb. 1. Die breite Streuung der angebotenen Werte erlaubt es einem Aufsteller sein Bauvorhaben in einen günstigeren Kostenrahmen zu versetzen und einem Gutachter bei einem Schadensfall die Versäumnisse ohne sachlichen Bezug der einen oder anderen Partei zuzuweisen.

Der freien Auswahl von empirischen Zahlenwerten bietet die neue Lehre Einhalt durch die Berechenbarkeit aller Bodeneigenschaften, wie Bodendichte, Reibungszahl, Neigungswinkel, Scherwinkel, Belastbarkeit von Böden und weiteres. Diese Ermittlungen berücksichtigen die Eigenschaften von Böden im trockenen, feuchten oder nassen Zustand und von Böden unter Wasser und den Veränderungen, die sich einstellen, wenn Böden Wasser aufnehmen oder abgeben, verdichtet oder

aufgelockert werden. Bereits bei Änderung einer Bodeneigenschaft entsteht eine neue Bodenart mit eigenen Eigenschaften, d.h. eine Manipulation mit Bodenwerten schließt sich aus.

Fazit:

Die Berechnung des Erddrucks nach den Vorgaben der derzeitigen Lehre oder Eurocode 7 sowie den daraus entwickelten Normen und Regelwerke sind gesichert mehrfach fehlerhaft, deren Anwendung kann zu Bauschäden führen.

Eine Überarbeitung nachstehender DIN ist angeraten:

DIN 1054 / EC/7, DIN 4020 bis DIN 4023, DIN 4030, DIN 18196, DIN 18300, DIN 19682-1+2, DIN 19682-2, DIN 19682-12, DIN EN 1997-1, DIN EN ISO 14688-1, DIN EN ISO 14688-2, DIN EN ISO 14689-1 und weitere.