

Untersuchung zum Einfluss der Korngeometrie auf den Reibungswinkel (Determination of the influence of the grain geometry on the friction angle)

Vincent Nutschan

Einleitung

Der Reibungswinkel ist in nahezu jeder Berechnung des Grundbaus ein notwendiger Eingangsparameter. Beispiele dafür sind die Berechnungen zur Standsicherheit von Böschungen, Erddruckberechnungen, Gleitsicherheits- und Grundbruchnachweise. Der Reibungswinkel kann durch verschiedene Versuche, klassisch der Rahmenscherversuch oder der Triaxialversuch, bestimmt werden. Eine weitere Möglichkeit den kritischen Reibungswinkel zu bestimmen, stellt der Schüttkegelversuch dar. Da es sich bei diesem Versuch um einen vergleichsweise einfachen Versuchsaufbau handelt und keine geregelte Durchführung bzw. Normung vorhanden ist, wird untersucht inwieweit die Variation der Durchführung und der Auswertung des Versuches Auswirkungen auf den erzeugten Böschungswinkel und somit den kritischen Reibungswinkel hat. Weiterhin wird der Einfluss der Kornform auf den Reibungswinkel untersucht. Bei den untersuchten Böden handelt es sich um Sande verschiedener Korngrößenverteilungen (Abb. 1) und Kornformen.

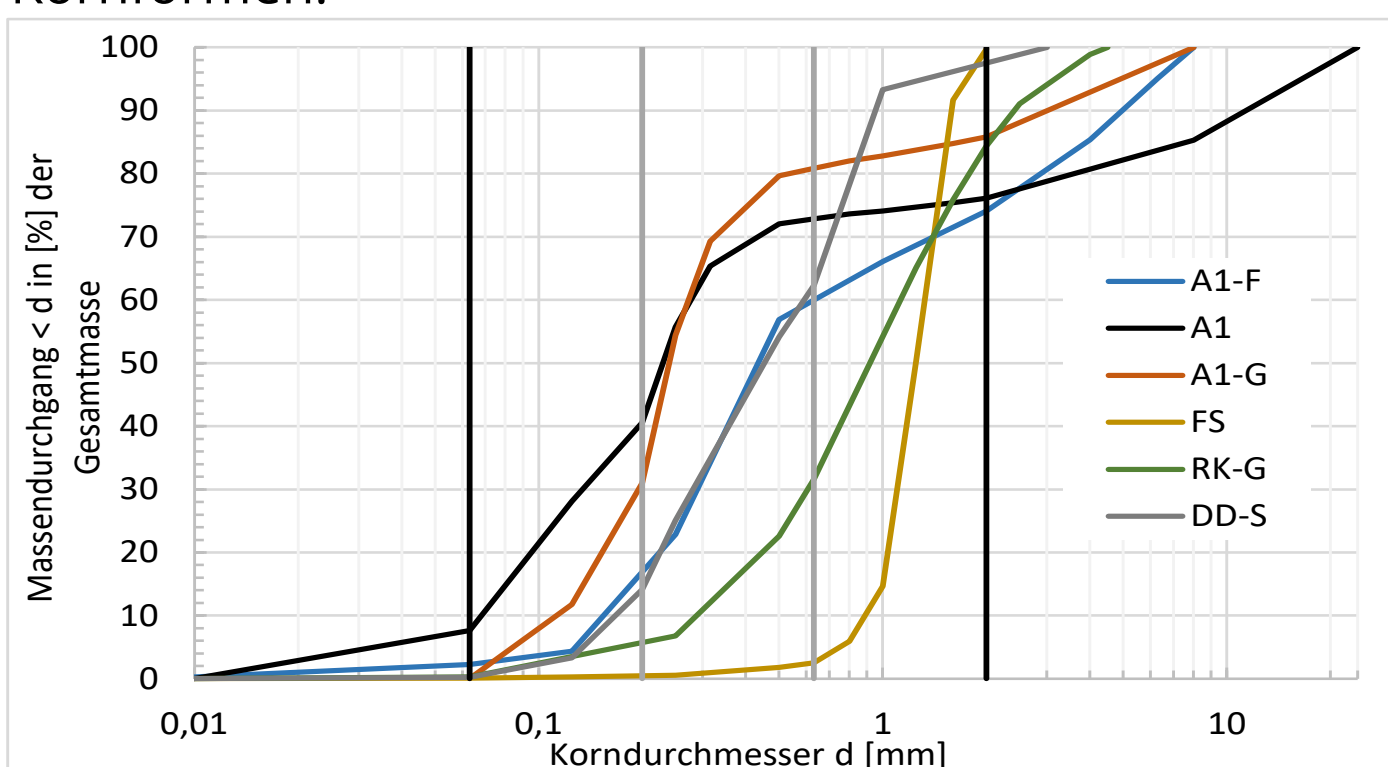


Abb. 1: Sieblinien der Versuchsböden

Kornformen

Weitestgehend besteht Einigkeit darüber, dass sich die Kornform in drei verschiedenen Größenordnungen beschreiben lässt (Zirkularität, Rundheit, Rauheit) und diese auch einen Einfluss auf die Eigenschaften wie Reibungswinkel und Packungsdichte eines Bodens besitzen (Clayton et al. 2009; Santamaria und Cho 2004). Eine Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten und deren Anwendungsgrenzen besteht jedoch nicht.

Zirkularität

Die Zirkularität beschreibt, wie stark die Kornform der eines Kreises (2D) ähnelt. Die gängigste Methodik zur Bestimmung dieses Parameters besteht darin, den Umfang der Projektion eines Kornes U_{Korn} auf eine Ebene, ins Verhältnis zum Umfang eines Kreises U_{Kreis} gleichen Flächeninhalts wie das Korn zu setzen.

$$Z = \frac{U_{\text{Kreis}}}{U_{\text{Korn}}} = \frac{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot A_{\text{Korn}}}}{U_{\text{Korn}}}$$

Eine Auswertung dieses Parameters anhand einfacher Geometrien (Vielecke und Ellipsen mit verschiedenen Verhältnissen von Haupt- zu Nebenachse) zeigt jedoch, dass der Wert der Zirkularität nur sehr vage Aussagen über die tatsächliche Form des Kornes zulässt, wie Abb. 2 verdeutlicht, wo beide geometrische Figuren dieselbe Zirkularität besitzen.

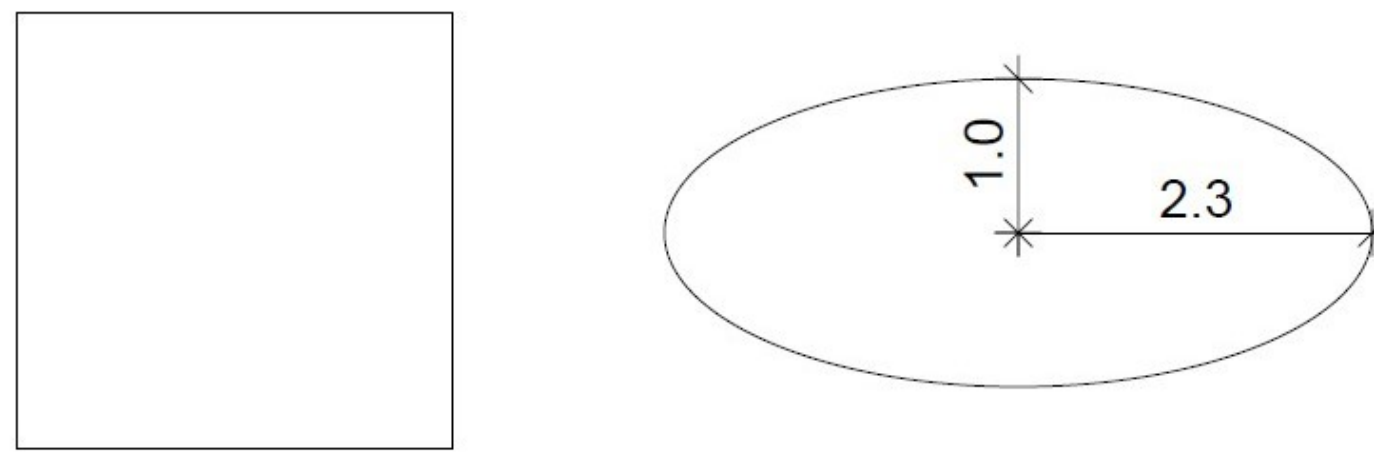


Abb. 2: Quadrat und Ellipse gleicher Zirkularität ($Z = 0,886$)

Rundheit

Die Rundheit beziffert, wie spitz oder rund einzelne Ausformungen an der Oberfläche des Kornes sind. Dazu wird in der Regel der durchschnittliche Radius r_i , der in die einzelnen Oberflächenmerkmale einzuschreibenden Kreise ins Verhältnis zum Radius des größten in das Korn einzuschreibenden Kreis $r_{\text{in-max}}$ gesetzt.

$$R = \frac{\sum r_i}{n \cdot r_{\text{in-max}}}$$

Beispielhaft zeigt Abb. 3 den Mittelwert (Punkt), sowie in Ordinateurichtung die Streuung in Form der einfachen Standardabweichung (nach oben und unten). Die Fehlerbalken in Abszissenrichtung zeigen die Streuung des verwendeten minimalen (links) und maximalen (rechts) minimalen Feretdurchmessers als Standardabweichung an.

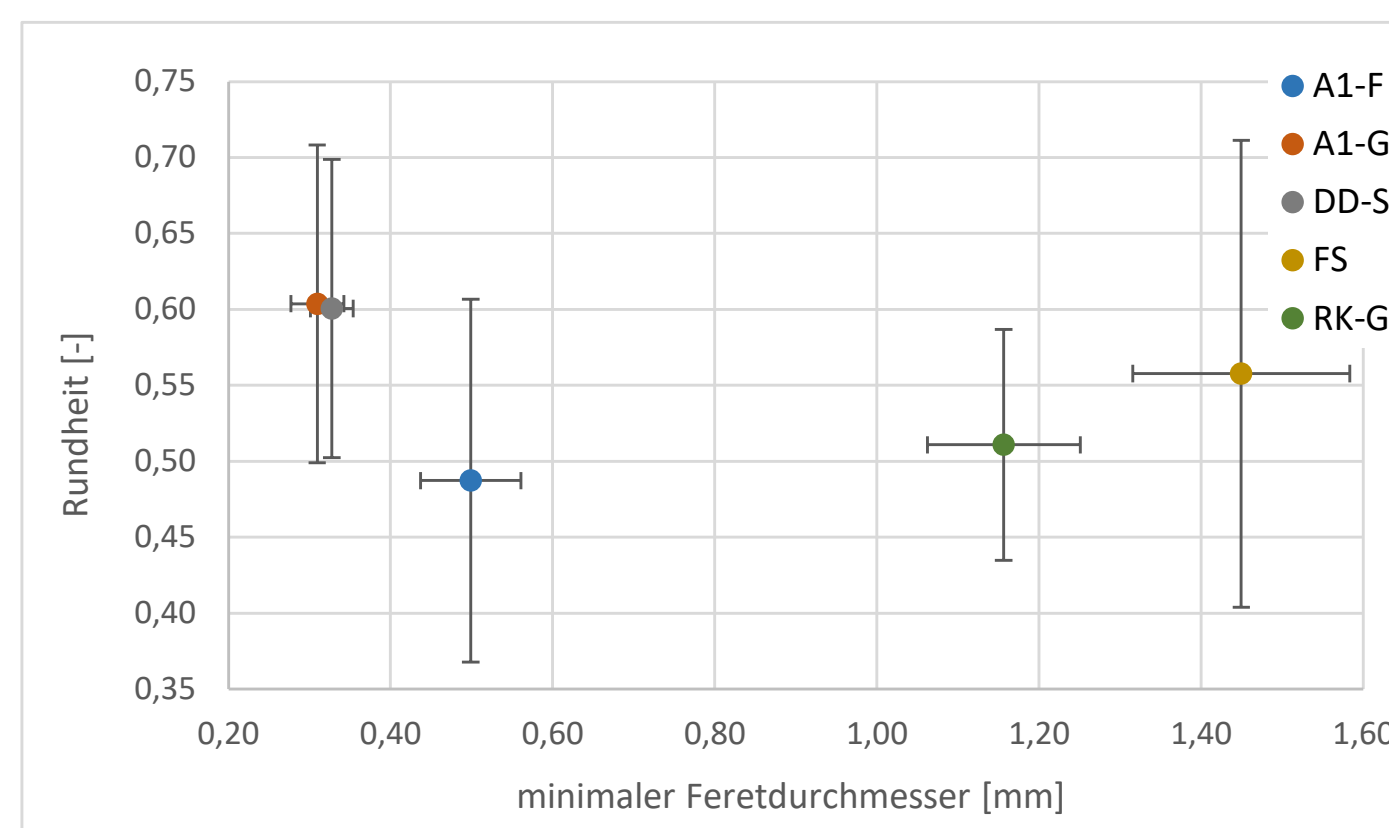


Abb. 3: Rundheit der Versuchsböden mit einfacher Standardabweichung

Reibungswinkel

Zur Bestimmung des Reibungswinkels wurden Falltürversuche, Rahmenscherversuche und Schüttkegelversuche durchgeführt. Besonders die Schüttkegelversuche wurden dabei detailliert ausgewertet, um die Auswirkungen verschiedener Einflüsse auf das Versuchsergebnis zu untersuchen. Die wesentlichen Erkenntnisse bestehen darin, dass der Schüttkegelversuch besonders bei grobkörnigen, enggestuften Sanden (FS und RK-G) von der Verwendung hoher Massen ($m > 1000$ g) profitiert, da dadurch die Streuung der Ergebnisse signifikant sinkt und die Wiederholbarkeit somit verbessert wird, was Versuchsreihen mit jeweils 10 Teilversuchen zeigen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Unterlage des Schüttkegels ebenfalls Auswirkungen auf das Ergebnis hat, wobei mit zunehmender Glätte der Unterlage ein Abfall des Reibungswinkels zu erkennen ist.

Möglichkeiten zur Bestimmung des Reibungswinkels:

- Messschieber (Trigonometrischer Zusammenhang zwischen Durchmesser und Höhe) → schnell, ungenau
- Winkelmesser (direkte Messung mit Anglometer) → schnell, mäßige Genauigkeit

- Photometrie (Auswertung von Bildern des Schüttkegels) → hohe Genauigkeit, großer Aufwand ohne Automatisierung
- Laser (Vermessung des Kegels mit Linienlaser und Approximation durch mathematische Funktionen) → hoher Aufwand ohne Automatisierung, hohe vermeintlich beste Genauigkeit

Zur Bestimmung des Kegelvolumens ist bevorzugt der Laser zu verwenden und das Volumen als Rotationsvolumen aus einer mathematischen Funktion der Kegelsilhouette zu bestimmen.

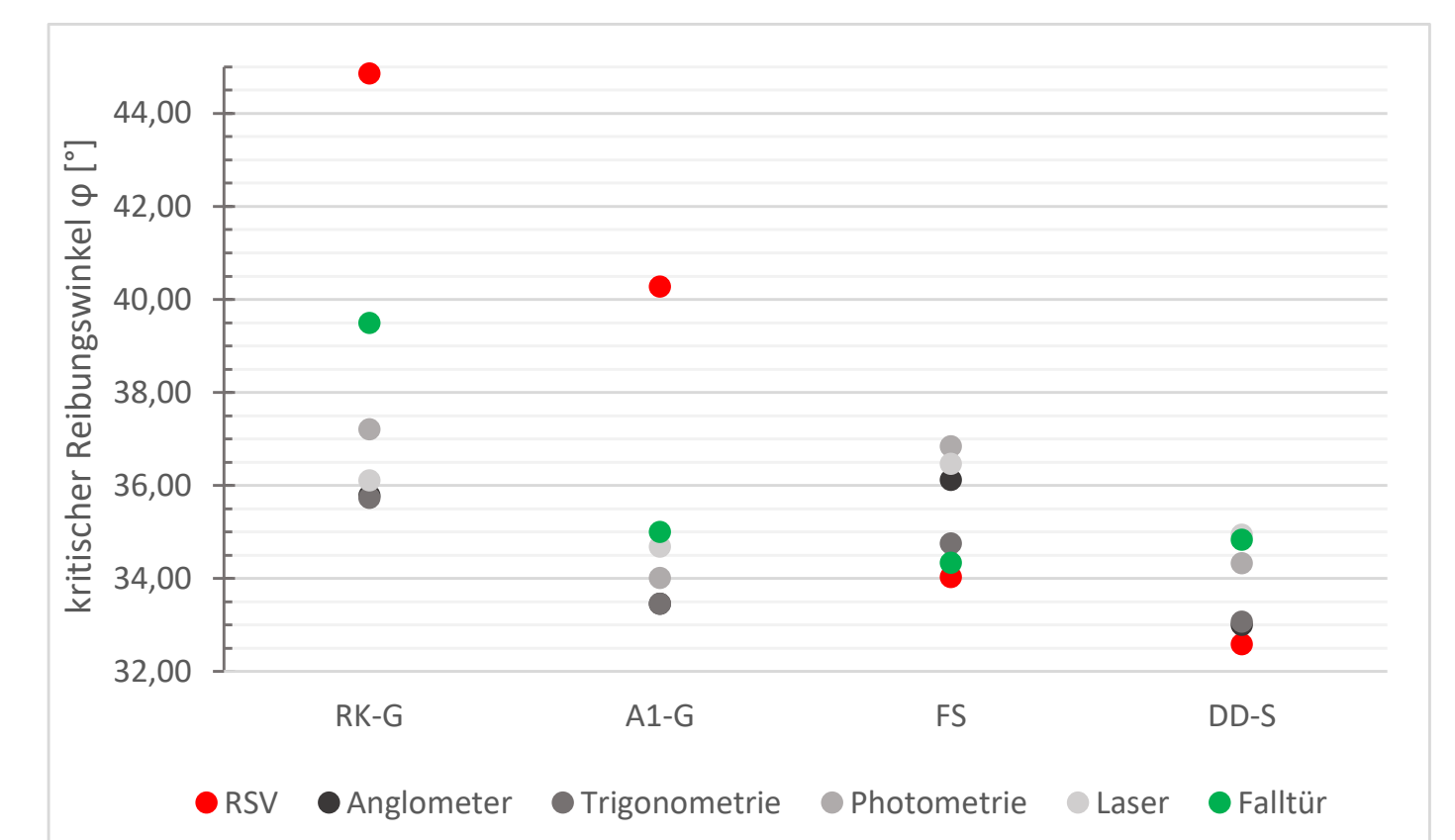


Abb. 4: Zusammenfassung kritischer Reibungswinkel der verschiedenen Versuchsmethoden

Um eine Korrelation zwischen der Kornform und dem Reibungswinkel darzustellen, werden die Mittelwerte der Ergebnisse aus Abb. 4 in Abhängigkeit der Zirkularität dargestellt.

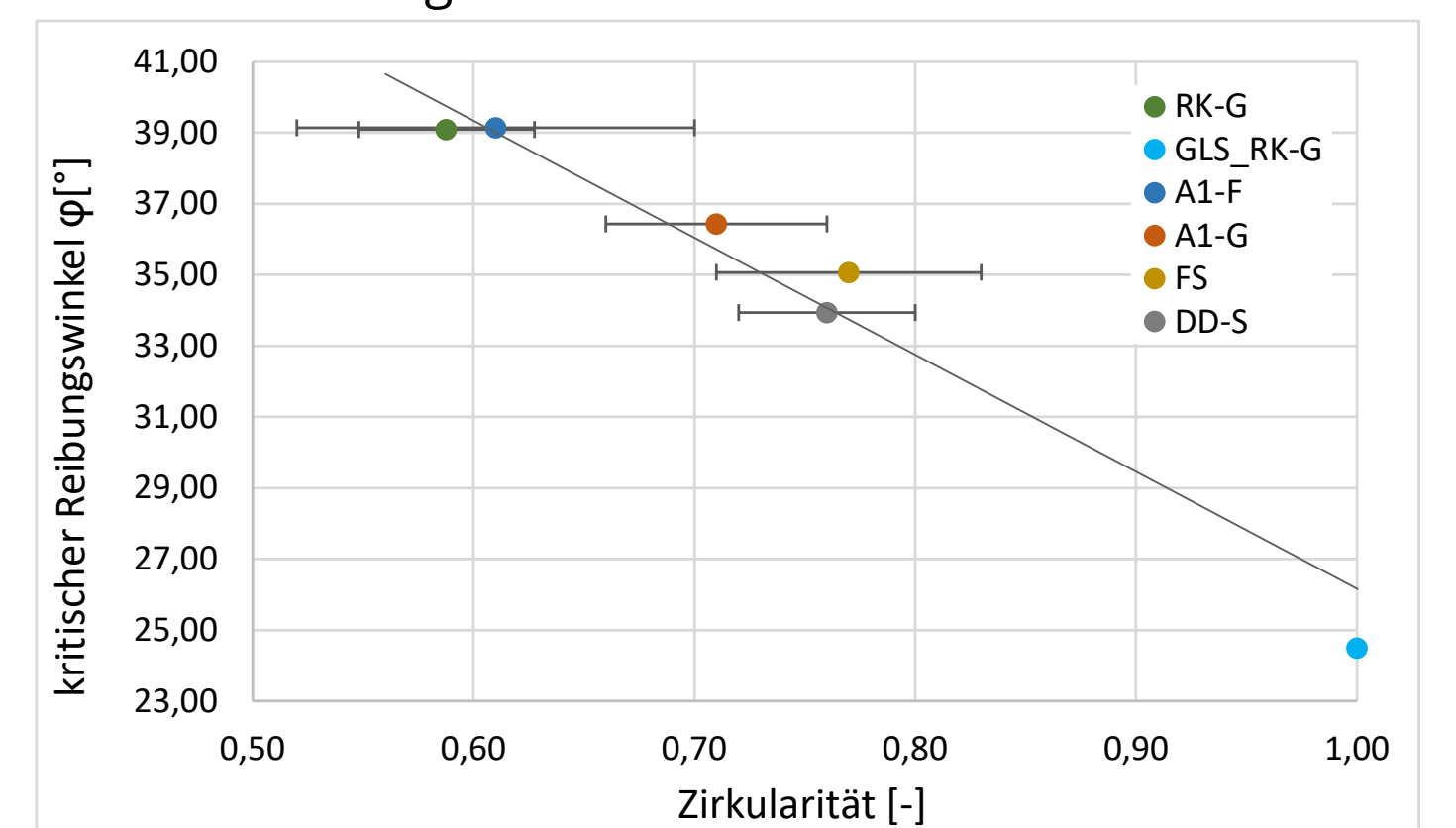


Abb. 5: Reibungswinkel in Abhängigkeit der Zirkularität

Trotz der zum Teil hohen Streuung ist ein Trend zu verzeichnen, wobei der Reibungswinkel mit einem steigenden Kornformparameter abnimmt.

Durch präzisere Verfahren zur Bestimmung der Kornform und konkretere Anwendungsgrenzen ist eine deutlichere Korrelation zwischen Kornform und Reibungswinkel zu erwarten, was jedoch mit höherem Aufwand und Komplexität bei der Bestimmung der Kornform (z. B. 3D-Analyse) verbunden ist.

Projekt

Diplomarbeit

Hochschullehrer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, TU Dresden

Wissenschaftliche Betreuung

Dr.-Ing. Markus Uhlig, TU Dresden
M. Sc. Božana Bačić, TU Dresden

Literatur

Clayton, C.R.I.; Abbireddy, C.O.R.; Schiebel, R. (2009) A method of estimating the form of coarse particulates. In: *Géotechnique*, 6, S. 493–501.
Santamaria, J.C; Cho, G.C (2004) Soil behaviour: The role of particle shape. Conference on Advances in Geotechnical Engineering

Abgabe

Juli 2023