

Erdwiderstandsbeiwerte bei geneigter Geländeoberfläche

von H.-G. Kempfert

SCHRIFTENREIHE

des

Fachgebietes Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund

Heft 21

Festschrift

des Arbeitskreises "Baugruben"

zum 65. Geburtstag von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Anton Weissenbach

1 EINLEITUNG

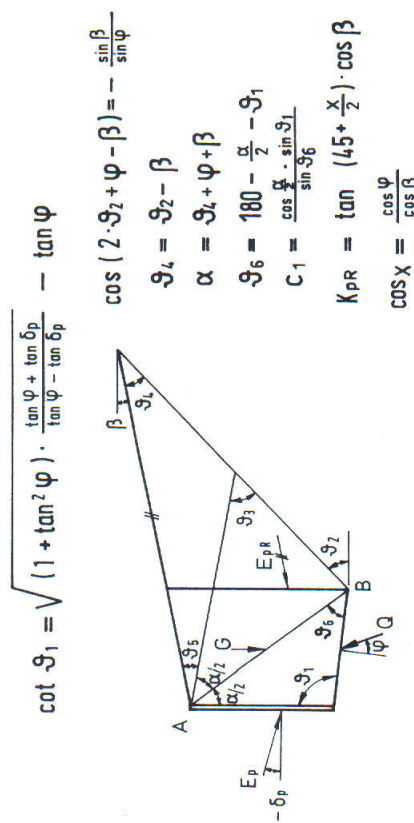
In einem Aufsatz mit dem Titel "Beitrag zur Ermittlung des Erdwiderstandes" [1] hat Weissenbach die wesentlichen Grundlagen der Problematik der Berechnung des Erdwiderstandes dargestellt. Dabei wurden insbesondere auch eine vergleichende zahlenmäßige Bewertung der in der Literatur veröffentlichten Berechnungsansätze zum Erdwiderstandsbeiwert vorgenommen, womit für praktische Berechnungen auf der sicheren Seite liegende Empfehlungen vorhanden sind.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die Berechnungsformeln nach Weissenbach/Streck [2], [3] für geneigte Geländeoberfläche ergänzt, was seinerzeit [1] noch nicht vorlag und die entsprechenden Zahlenwerte in den Parametervergleichen eingefügt. Des Weiteren werden Ergebnisse einer Parameterstudie [4] mit der kinematischen Elementmethode (KEM) zur Ermittlung der Erdwiderstandsbeiwerte dargestellt. Die Berechnungen schließen auch Randbedingungen für kohäsive Böden und einer Neigung der Geländeoberfläche $|\pm \beta|$ größer als der Reibungswinkel φ des Bodens ein, was bei den vorstehend genannten klassischen Ansätzen bekanntlich nicht berücksichtigt werden kann. Ebenso werden Kohäsionsbeiwerte mit aufgenommen. Es gelten die Vorzeichendifinition der DIN 4085 [5].

Die ergänzenden Berechnungsergebnisse werden nach den von Weissenbach in [1] aufgestellten Kriterien vergleichend bewertet.

2 ERDWIDERSTANDSBEIWERTE NACH DEM GLEITSCHEMA VON STRECK FÜR GENEIGTE GELÄNDEOBERFLÄCHEN

Die Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Gleitschema von Streck/Weissenbach wurden vom Verfasser in [6] auf die geneigte Geländeoberfläche erweitert. Bild 1 zeigt dazu das System und die abgeleiteten Gleichungen für die Erdwiderstandsbeiwerte.



infolge Bodeneigengewicht:

$$K_{pgh} = \frac{1}{\tan (\vartheta_1 - \varphi) \cdot \tan \delta_p} \cdot [(c_1 + c_1' + c_1' \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \tan \beta) \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + (c_1 + c_1 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \tan \beta)^2 \cdot (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan (\vartheta_1 - \varphi))] \cdot K_{PR}$$

infolge Kohäsion:

$$K_{pch} = [(1 + \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \tan \beta) \cdot (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan (\vartheta_1 - \varphi))] \cdot \sqrt{K_{PR}} + \frac{1}{2} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot (\cot \vartheta_1 + \tan (\vartheta_1 - \varphi)) \cdot \frac{c_1}{\tan (\vartheta_1 - \varphi) + \tan \delta_p}$$

Bild 1: System und Berechnungsformeln für die Erdwiderstandsbeiwerte zum Gleitschema Streck nach [6]

Bild 2 enthält Zahlenwerte zu K_{pgh} als Beispiel für einen Wandreibungswinkel $\delta_p = - 1/3 \cdot \varphi$.

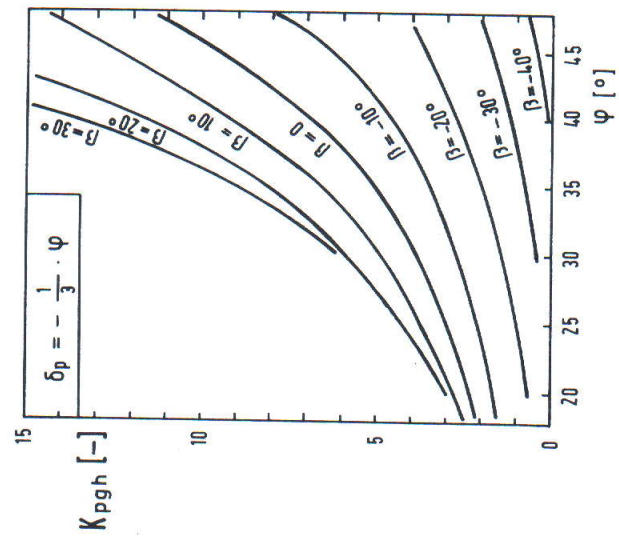


Bild 2: Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Gleitschema Streck für

$$\delta_p = - 1/3 \cdot \varphi [6]$$

In Abschnitt 4 wird ein zahlenmäßiger Vergleich vorgenommen.

3 ANWENDUNG DER STARRKÖRPERMECHANISMEN MIT HILFE DER KINEMATISCHEN ELEMENTMETHODE (KEM)

3.1 Grundlagen

Die KEM wurde mittels Parametervariation auf das Erdwiderstandsproblem angewendet [4]. Die theoretischen Grundlagen des Verfahrens und ergänzende Literaturhinweise sind in [7] zusammengestellt. Verwendet wurde ein Berechnungsprogramm nach Gußmann, K2SOIL Version 2.02. Bei den Parametervariationen wurde der Reibungswinkel des Bodens zwischen $15^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$,

der Wandreibungswinkel δ_p , der Böschungswinkel β und die Kohäsion c variiert.

Die nachfolgend wiedergegebenen Berechnungsergebnisse sind auch unter dem Aspekt der derzeitigen Diskussionen über das neue Sicherheitskonzept mit der Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf die Scherparameter des Bodens interessant. Dabei gewinnt die Starrkörpermethode an Bedeutung.

3.2 Vorgehensweise bei den Berechnungen

Für die durchgeführte Parameterstudie mit der KEM zum Erdwiderstand wurde als Zielfunktion die horizontale Erddrucklast E_{ph} gewählt, wobei durch Variationen der Bruchmechanismen und der Bruchgeometrie die äußere Arbeit zu minimieren ist. Damit verbunden ist eine weitgehend translatorische Wandverschiebung.

Zur zweckmäßigen Diskretisierung des Systems wurden Vorberechnungen mit unterschiedlicher Elementanzahl durchgeführt. Die Ergebnisse ergaben sich analog zu [8], so daß für die weiteren Berechnungen je nach Randbedingungen 2 bis 5 Elemente verwendet wurden. Letztere jeweils ab Reibungswinkel $\varphi \geq 30^\circ$.

Abweichend von [7], [8], in den summarische Erdwiderstandsbeiwerte bei kohäsiven Böden angegeben sind, wurde eine Trennung zwischen den Erdwiderstandsanteilen aus Bodeneigengewicht und Kohäsion vorgenommen, um einen unmittelbaren Vergleich mit Ergebnissen aus analytischen Verfahren vornehmen zu können. Dies setzt allerdings hinsichtlich der Gleitlinienwahl gewisse Annahmen voraus.

Entsprechend der beispielhaften Darstellung nach Bild 3 sind zwei Berechnungsstrategien zur Ermittlung von K_{pgh} und K_{pch} möglich:

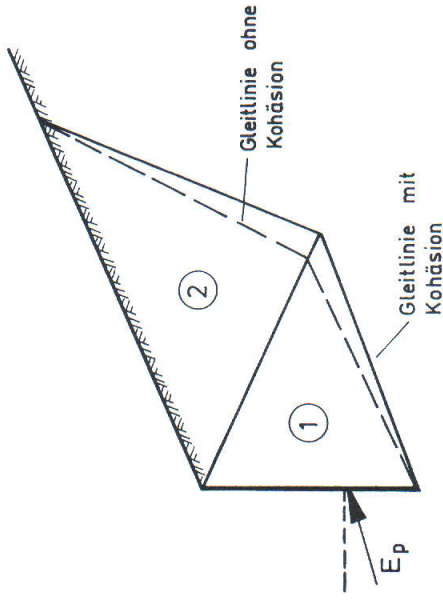


Bild 3: Gleitlinienformen für Berechnungen mit und ohne Kohäsion

a) Endgeometrie aus Berechnung mit Kohäsion:

Aus einer Berechnung mit Reibung und Kohäsion wird die maßgebliche Bruchkörpergeometrie bestimmt und bei festgehaltener Geometrie in einer zweiten Berechnung ohne Kohäsion der Erdwiderstandsbeiwert infolge Bodeneigengewicht ermittelt.

b) Endgeometrie aus Berechnung ohne Kohäsion:

Die Bruchkörpergeometrie aus einer vorlaufenden Berechnung ohne Kohäsion wird festgehalten und der endgültigen Berechnung mit Kohäsion zugrundegelegt.

Aus Vergleichsberechnungen hat sich ergeben, daß die Methode b) geringfügig kleinere Gesamtdrucklasten ergibt als die Methode a). Letztere liefert aber für unterschiedliche Wandgeometrien und Kenngrößen einheitlichere Erdwiderstandsbeiwerte im Gegensatz zur Methode a). Der Parameterstudie wurde deswegen die Vorgehensweise nach b) zugrunde gelegt.

3.3 Berechnungen für kohäsive Böden und $|\pm\beta| > \varphi$

Bekanntlich lassen sich für kohäsive Böden mit $|\pm\beta| > \varphi$ für die Gleichungen der Erdwiderstandsbeiwerte keine Lösungen angeben. Aufgrund der Kohäsionswirkung sind diese Böden bei steilen Böschungsneigungen dennoch standsicher und können auch Erdwiderstand aufnehmen. Eine Berechnungslösung kann für diesen Fall nur grafisch, siehe z.B. [9], oder durch Näherungslösungen [10] erreicht werden.

Bei den Berechnungen mit der KEM wurde vorausgesetzt, daß sich in der Nähe der Böschungsoberfläche infolge der Kohäsionswirkung keine Teilgleitflächen ausbilden können. Abweichend von [8], in dem summarische Erdwiderstandsbeiwerte als Funktion vom

$$K_p = f(\gamma, c, h)$$

angegeben sind, wurde in der Parameterstudie wegen der Vergleichbarkeit mit konventionellen Ansätzen wiederum gemäß Abschnitt 3.2 vorgegangen und explizite Werte für K_{pgh} und K_{pch} ermittelt.

4 ERGEBNISSE DER PARAMETERSTUDIEN

4.1 Ergebnisvergleich der Erdwiderstandsbeiwerte K_{pgh}

Gemäß der in Abschnitt 1 dargelegten Zielsetzung dieses Beitrages sind nachfolgend die Ergebnisvergleiche zum Erdwiderstandsbeiwert K_{pgh} infolge Bodeneigengewicht nach [1] durch die Berechnungsergebnisse nach Abschnitt 2 und 3 ergänzt worden. Die einzelnen Verfahren finden sich in [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18].

Aus den umfangreichen Zahlenrechnungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Ergebnisse für einen Reibungswinkel von $\varphi = 30^\circ$ grafisch aufbereitet worden. Bild 4 zeigt dazu den Verlauf der Erdwiderstandsbeiwerte für die verschiedenen Verfahren bei Variation der Böschungsneigung.

Werden nun die Ergebnisse auf den Bildern 4a bis c hinsichtlich ihrer Anwendungsempfehlung bei praktischen Berechnungen bewertet, so gilt dafür der von Weißenbach in [1] festgelegte Grundsatz, daß demjenigen Verfahren der Vorzug zu geben ist, welches die jeweils kleinsten Erdwiderstandsbeiwerte liefert. Es sei hier aber ergänzt: dieses Prinzip kann nur gelten, wenn die mechanischen Grundlagen und Annahmen zur Modellbildung der Erdwiderstandskörper die wirklichen Verhältnisse hinreichend berücksichtigen.

Für den hier gezeigten Anwendungsbereich sind alle Verfahren bei Anwendung auf eine fallende Böschung ($\beta < 0$) geeignet. Auszuschließen ist lediglich das Verfahren von Coulomb für große negative Wandreibungswinkel, was allgemein bekannt ist [5].

Bei ansteigender Böschungsneigung weichen die einzelnen Verfahren mit zunehmenden negativen Wandreibungswinkeln erwartungsgemäß ganz erheblich voneinander ab. Betrachtet man die KEM etwa als Mittelwert der erreichbaren K_{pgh} -Werte und infolge der dabei berücksichtigten inneren Scherkräfte im Gleitkörper als möglichen oberen Grenzwert, so können alle Verfahren zur Anwendung empfohlen werden, die kleinere Beiwerte als die KEM liefern. Unterzieht man sich der Mühen einer KEM-Berechnung, sind die damit erzielten Erdwiderstände gerade noch zu akzeptieren. Besonders hervorzuheben ist, daß die Anwendung der KEM über die Grenzen der analytischen Verfahren hinaus $|\pm\beta| > \varphi$ möglich ist und auch glaubhafte Ergebnisse für diesen Anwendungsfall liefern kann.

Das Verfahren Streck/Weißenbach/Kempfert [2], [3], [6] liefert für nicht zu große negative Wandreibungswinkel gute Ergebnisse (Kleinstwerte), fällt aber in der Nähe von $\delta_p = -\varphi$ aus der allgemeinen Tendenz heraus. Die Anwendung sollte auf $\delta_p \leq |2/3 \varphi|$ bzw. für ebenes Gelände auf $\delta_p \leq 27,5^\circ$ beschränkt bleiben.

Insgesamt bestätigen sich die Aussagen nach Weißenbach [1].

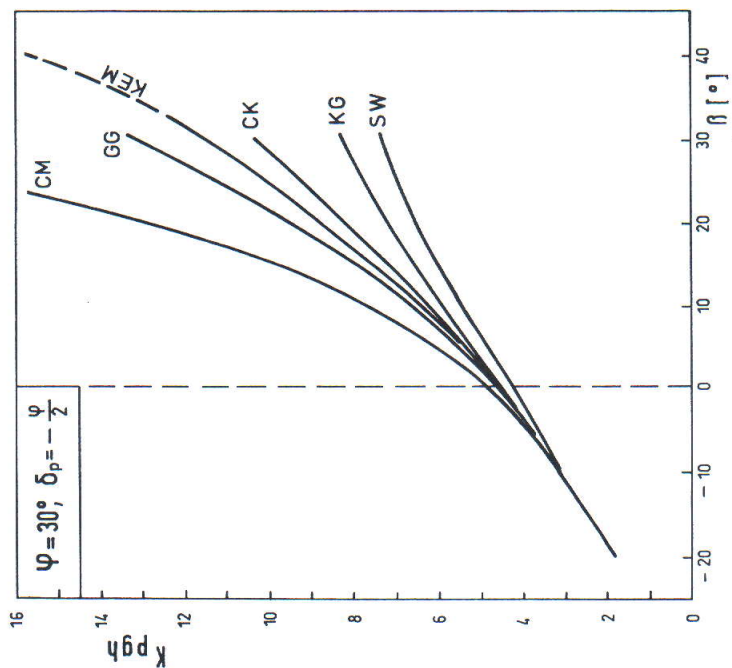
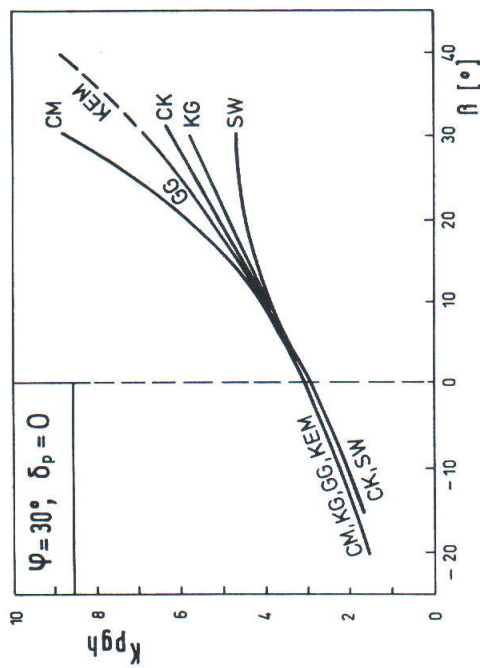
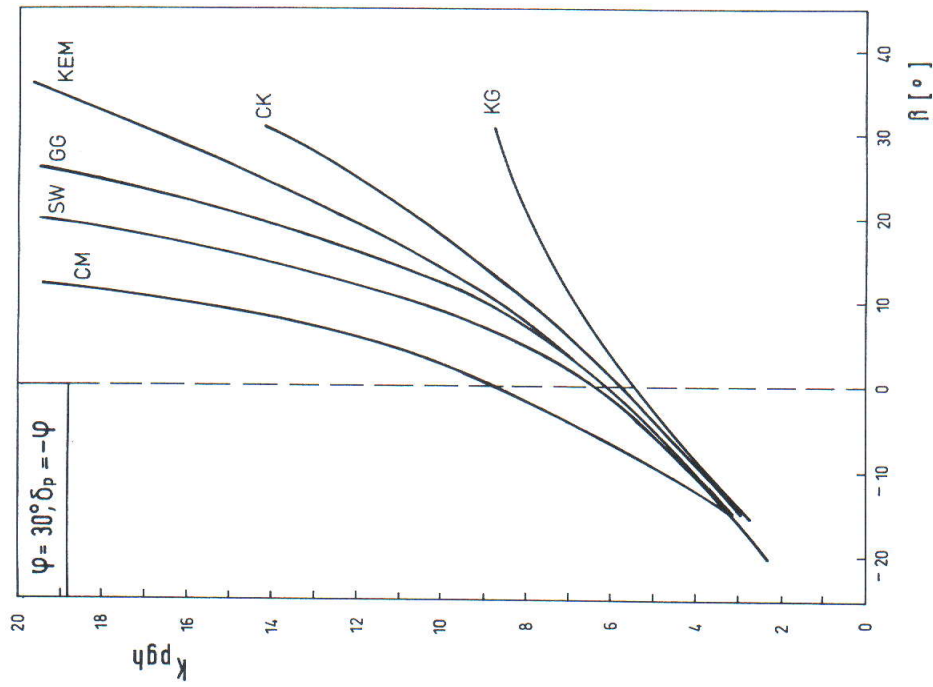


Bild 4 a: Erdwiderstandsbeiwerte infolge Bodeneigengewicht für unterschiedliche Verfahren, Legende siehe Bild 4 b, c



Legende:

CM: Coulomb / Müller-Breslau

KG: Krey / Groß

GG: Goldscheider / Gudehus

CK: Caquot / Kérisel

SW: Streck / Weissenbach / Kempfert

KEM: Kin. Elem. Methode

Bild 4 b, c: Erdwiderstandsbeiwerte infolge Bodeneigengewicht für unterschiedliche Verfahren

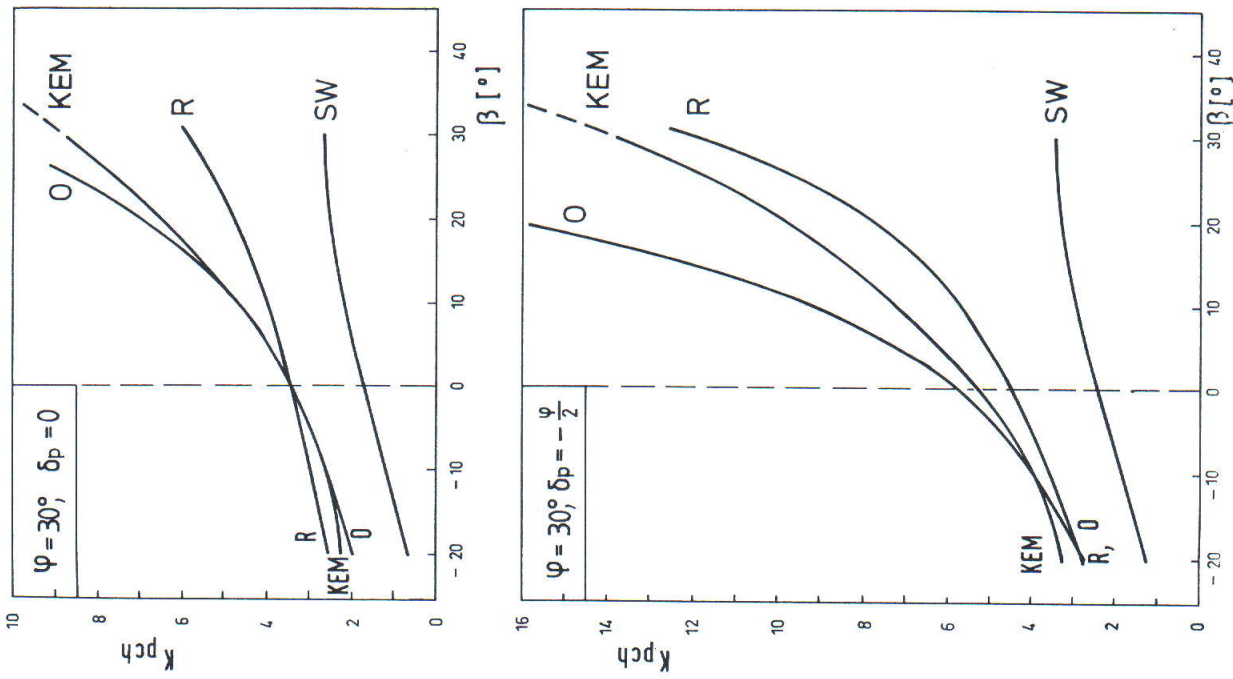


Bild 5 a: Erdwiderstandsbeiwerte infolge Kohäsion für unterschiedliche Verfahren, Legende siehe Bild 5 b, c

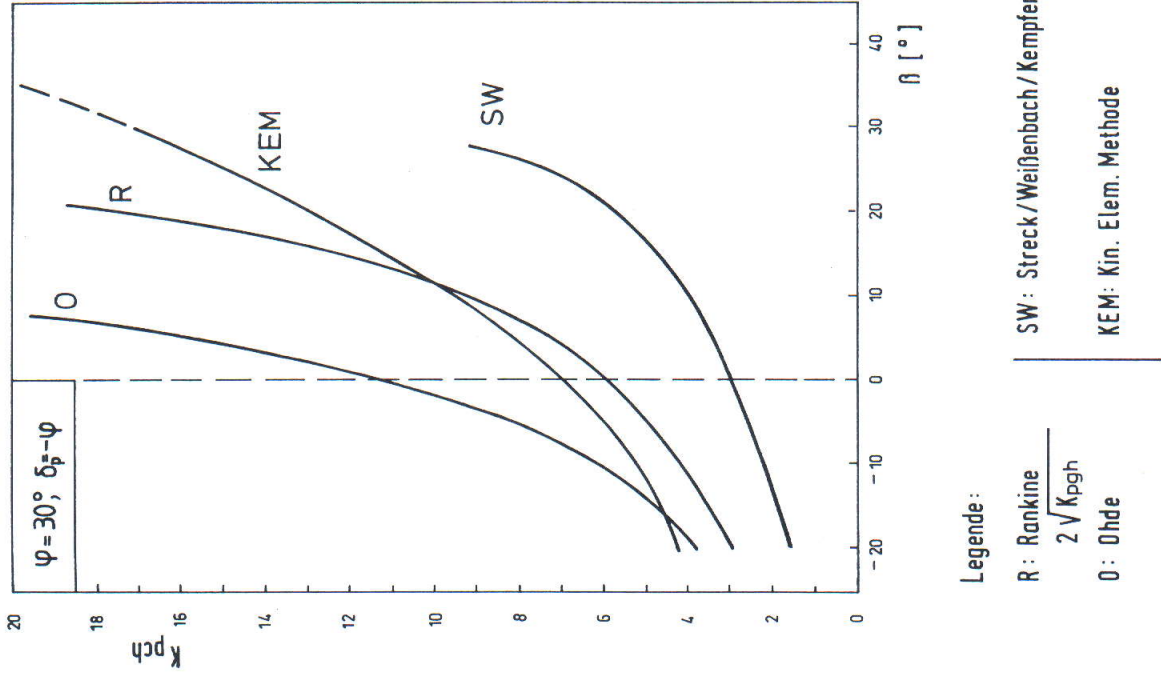


Bild 5 b, c: Erdwiderstandsbeiwerte infolge Kohäsion für unterschiedlicher Verfahren

4.2 Ergebnisvergleich der Erdwiderstandsbeiwerte K_{pch}

In Bild 5 sind die entsprechenden Ergebnisse für die Erdwiderstandsbeiwerte K_{pch} infolge Kohäsion ebenfalls vergleicht dargestellt.

Die verfügbaren Verfahren für die Ermittlung der Kohäsionsbeiwerte sind gegenüber den Beiwerten infolge Bodeneigengewicht deutlich geringer. In Bild 5 fällt auf, daß das in DIN 4085 [5] empfohlene Verfahren nach Ohde für die Ermittlung von K_{pch} überwiegend die zahlenmäßig größten Erdwiderstandsbeiwerte infolge Kohäsion liefert und damit stark auf der unsicheren Seite liegt. Auf die Anwendung dieser Beiwerte sollte für $\beta > 0$ und insgesamt für $\delta_p > |1/2 \varphi|$ verzichtet werden.

Die Kohäsionsbeiwerte nach dem Verfahren Streck/Weißenbach/Kempfert sind insgesamt sehr niedrig und im Vergleich auch zu den Erdwiderstandsbeiwerten infolge Bodeneigengewicht wenig wirklichkeitsnah.

Für die Anwendung zu empfehlen sind danach die bisher übliche Vorgehensweise mit $K_{pch} = 2 \sqrt{K_{pgh}}$ (Rankine), die auch weitgehend in den vorhandenen EDV-Programmen realisiert sind. Bei größeren negativen Wandreibungswinkeln und stark steigender Geländeoberfläche sind die üblichen Einschränkungen hinsichtlich der Bezugsgröße K_{pgh} (s. Abschn. 4.1) nach Coulomb zu beachten.

Die KEM liefert für diesen Anwendungsfall etwas größere, aber ebenfalls glaubhafte Werte. Die Anwendung auf $|\pm\beta| > \varphi$ ist möglich.

Literatur

- [1] WEIßENBACH, A. (1983): Beitrag zur Ermittlung des Erdwiderstandes. Bauingenieur 58; S. 161-173.
- [2] WEIßENBACH, A. (1975): Baugruben, Teil 2: Berechnungsgrundlagen. Ernst & Sohn, Berlin.
- [3] STRECK, A. (1926): Beitrag zur Frage des passiven Erd- drucks. Bauingenieur 7, S. 1-3, 32-37.

- [4] DOMINGUEZ, M./STRÖHLE, K. V. (1992): Einsatz der Kinematischen Elementmethode (KEM) in der Geotechnik am Beispiel Erdwiderstand. Diplomarbeit Nr. 33, Fachgebiet Geotechnik, FH Konstanz (unveröffentlicht.).
- [5] DIN 4085: Berechnung des Erddrucks, Berechnungsgrundlagen, Februar 1987.
- [6] KEMPFERT, H.-G. (1987): Zum Trag- und Verformungsverhalten von im Baugrund eingespannten, nahezu starren Gründungskörpern bei ebener oder geneigter Geländeoberfläche. Schriftenreihe des Fachgebietes Baugrund-Grundbau, Universität Dortmund, Heft 1.
- [7] GUSMANN, P. (1992): Die Methode der Kinematischen Elemente und adaptive Optimierung. Bauingenieur 67, S. 409-417.
- [8] GUSMANN, P. (1986): Die Methode der Kinematischen Elemente. Mitt. 25. Baugrundinstitut der Universität Stuttgart.
- [9] VOGT, N (1988): Vorschlag für die Bemessung der Gründung von Lärmschutzwänden. Geotechnik H. 4, S. 210-214.
- [10] KEMPFERT, H.-G. (1989): Dimensionierung kurzer horizontal belasteter Pfähle. Bauingenieur 64, S. 201-207.
- [11] CAQUOT, A./KERISEL, J. (1948): Tables de butée et de poussée. Gauthier-Villars Paris.
- [12] CAQUOT, A./KERISEL, J. (1956): Traité de Mécanique des sols. Paris: Gauthier-Villars.
- [13] CAQUOT, A./KERISEL, J. (1973): Tables de butée et de poussée. Gauthier-Villars Paris.
- [14] GOLDSCHIEDER, M./GUDEHUS, G. (1974): Verbesserte Standortsicherheitsnachweise. DGE: Vorträge der Baugrundtagung in Frankfurt.
- [15] GROSS, H. (1980): Berechnung von Erdwiderstandsbeiwerten nach der Gradientenmethode. Bauingenieur 55, S. 469-472.
- [16] KREY, H./EHRENBERG, J. (1936): Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes. Ernst & Sohn, Berlin.
- [17] MÜLLER-BRESLAU, H. (1906): Erddruck auf Stützmauern. Stuttgart.
- [18] OHDE, J. (1938): Zur Theorie des Erddrucks unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung. Bautechnik 16, S. 150-159, 176-180, 241-245, 331-335, 480-487, 570-571, 753-761.