

Bernd Schuppener, Martin Ziegler, Thomas Richter,
Armin Doster, Harald Huber, Johann Buß, Carsten Pohl,
Magnus Geduhn, Elias Tafur

Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunormen durch pränormative Arbeit

Teilantrag 6: Geotechnik

F 2927

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9364-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

PraxisRegelnBau

Initiative Praxisgerechte Regelwerke im Bauwesen e.V.
Kurfürstenstraße 129 ■ 10785 Berlin



Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunormen durch pränormative Arbeit

-Teil Antrag 6: Geotechnik

BBSR-Forschungsvorhaben

Az.:II 3-F20-10-1-085_PG6 / SWD-10.08.18.7-12.30

Zuwendungsbescheid vom 20.09.2012

ENDBERICHT

Berichtszeitraum:

September 2012 bis September 2014

Forschende Stelle:

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)
Gutenbergstr. 43, 45128 Essen

Aufgestellt:

18.09.2014

Projektleiter:	Dr.-Ing. Bernd Schuppener
Leiter der Arbeitsgruppe:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler
Sachbearbeiter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter
Sachbearbeiter:	Dr.-Ing. Armin Doster
Sachbearbeiter:	Dr.-Ing. Harald Huber
Sachbearbeiter:	Prof. Dr.-Ing. Johann Buß
Sachbearbeiter:	Dr.-Ing. Carsten Pohl
Sachbearbeiter:	Dr.-Ing. Magnus Geduhn
Sachbearbeiter:	Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Elias Tafur

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Dieser Endbericht umfasst 155 Seiten

Der Anhang umfasst 31 Seiten

Vorstand:	Prof. Manfred Nußbaumer (München), Dr. Hans-Peter Andrä (Stuttgart), Dr. Volker Cornelius (Darmstadt)
Geschäftsführer:	Dr. Lars Meyer (Berlin)
Sitz des Vereins:	Der Verein ist eingetragen unter VR 30946 B beim Vereinsregister am Amtsgericht Charlottenburg von Berlin

Inhaltsverzeichnis

0	Einführung.....	11
0.1	Ausgangslage und Problematik.....	11
0.2	Ziel und Vorgehensweise	12
0.3	Struktur des Berichts	13
0.4	Bearbeiter.....	14
1	Flächengründungen	15
1.1	Anamnese	15
1.1.1	Verfahren zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen.....	15
1.1.2	Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte	15
1.2	Diagnose	19
1.2.1	Randbedingungen.....	20
1.2.2	Durchgeführte Berechnungen und Nachweise	21
1.2.3	Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte	22
1.2.4	Bestimmung der Einwirkungen und Beanspruchungen.....	22
1.2.5	Bestimmung der Widerstände.....	22
1.2.6	Festlegung der Vergleichsgröße	23
1.2.7	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I	24
1.2.8	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II	50
1.2.9	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III	67
1.2.10	Besonderheiten.....	75
1.3	Therapie	76
2	Stützbauwerke - Baugrubenwände.....	84
2.1	Anamnese	84
2.1.1	Verfahren zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen.....	84
2.1.2	Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte	84

2.2	Diagnose – Beispiel 1	87
2.2.1	Randbedingungen.....	87
2.2.2	Durchgeführte Berechnungen und Nachweise	88
2.2.3	Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte	89
2.2.4	Bestimmung der Einwirkungen und Beanspruchungen	89
2.2.5	Bestimmung der Widerstände	89
2.2.6	Festlegung der Vergleichsgröße	89
2.2.7	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I	90
2.2.8	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II	93
2.2.9	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III	99
2.2.10	Besonderheiten.....	105
2.3	Diagnose - Beispiel 2.....	105
2.3.1	Randbedingungen.....	105
2.3.2	Festlegung der Vergleichsgröße	106
2.3.3	Vergleich der Ergebnisse nach den Nachweisverfahren aus ausgewählten europäischen Ländern	106
2.4	Therapie	106
3	Pfahlgründungen – axial beanspruchte Pfähle	108
3.1	Anamnese	108
3.1.1	Grenzzustandsgleichung.....	108
3.1.2	Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte	109
3.2	Diagnose	112
3.2.1	Vergleich der Nachweisverfahren (Stufe I).....	112
3.2.2	Vergleich der äquivalenten Sicherheiten (Stufe II).....	114
3.2.3	Vergleich der äquivalenten Sicherheiten (Stufe III).....	115
3.3	Therapie	117
4	Pfahlgründungen – quer beanspruchte Pfähle.....	120

4.1	Anamnese	120
4.2	Diagnose	122
4.2.1	System.....	122
4.2.2	Durchgeführte Berechnungen und Nachweise	125
4.2.3	Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte	125
4.2.4	Bestimmung der Widerstände	126
4.2.5	Festlegung der Vergleichsgröße	126
4.2.6	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I	126
4.2.7	Einfluss des Bettungsmoduls	128
4.2.8	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II	129
4.2.9	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III	130
4.3	Therapie	130
5	Böschungen	132
5.1	Anamnese	132
5.1.1	Verfahren zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen.....	132
5.1.2	Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte	133
5.2	Diagnose	137
5.2.1	Randbedingungen „Einfache Böschung / homogener Baugrund“	137
5.2.2	Durchgeführte Berechnungen und Nachweise	138
5.2.3	Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte	139
5.2.4	Bestimmung der Einwirkungen und Beanspruchungen	139
5.2.5	Bestimmung der Widerstände	139
5.2.6	Festlegung der Vergleichsgröße	139
5.2.7	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I	140
5.2.8	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II	142
5.2.9	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III	146
5.3	Schlussfolgerungen einfache Böschungen	146

5.4	Erweiterte Untersuchungen (komplexe Böschungen)	146
5.4.1	Randbedingungen Komplexe Baugrundsituation	146
5.4.2	Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I und II	147
5.5	Therapie	150
6	Zusammenfassung und Fazit	151
7	Unterlagen.....	153

Symbole

In diesem Bericht werden folgende Symbole verwendet:

Lateinische Buchstaben

A'	effektive Sohlfläche
a	Fundamentlänge
a_d	Bemessungswert der geometrischen Größen
b	Fundamentbreite
b_{erf}	erforderliche Fundamentbreite
$B_{h,d}$	Bemessungswert der Bettungsreaktionen
B_k	Erdauflagerkraft unter charakteristischen Einwirkungen
c	Kohäsion im drainierten Zustand
c'	wirksame Kohäsion
c_k	charakteristischer Wert der Kohäsion im drainierten Zustand
c_u	Kohäsion im undrainierten Zustand
$c_{u,d}$	Bemessungswert der Kohäsion im undrainierten Zustand
$c_{u,k}$	charakteristischer Wert der Kohäsion im undrainierten Zustand
d	Einbindetiefe des Fundaments
d'	Ersatzeinbindetiefe des Fundaments
$E_{G,k}$	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen
$E_{\text{ges},k}$	charakteristischer Wert der Gesamteinwirkungen
E_k	charakteristische Beanspruchung
$E_{m,d}$	Bemessungswert der Beanspruchungen für die Gesamtstandsicherheit
$E_{\text{ph},d}$	Bemessungswert des Erdwiderstands
$E_{\text{ph},k}$	Resultierende des charakteristischen passiven Erddrucks (Erdwiderstand)
$E_{Q,k}$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkungen
$e_{\text{ph},k}$	charakteristischer Wert des horizontalen Erdwiderstands
F_{cd}	Bemessungswert der Einwirkungen für axial beanspruchte Pfähle
K_{FI}	Beiwert zur Berücksichtigung der Schadensfolgeklassen
$G_{F,k}$	charakteristischer Wert des Fundamenteigengewichts
$H_{G,k}$	charakteristischer Wert der ständigen horizontalen Einwirkung
H_k	charakteristischer Wert der horizontalen Belastung aus Tragwerkslasten
$H_{Q,k}$	charakteristischer Wert der veränderlichen horizontalen Einwirkung
H/V	Lastneigung
h_s	Sockelhöhe

k_s	Bettungsmodul
$k_{s,k}$	charakteristischer Wert des Bettungsmoduls
M_k	charakteristisches Moment
N	Normalkraft in der Scherfuge
Q/G	Verhältnis veränderlicher zu ständiger Einwirkungen
R_{cd}	Bemessungswert der Widerstände für axial beanspruchte Pfähle
R_k	charakteristischer Widerstand
$R_{m,d}$	Bemessungswert der Widerstände für die Gesamtstandsicherheit
$R_{n,k}$	charakteristischer Wert des Grundbruchwiderstands
$R_{n,k,EC7}$	charakteristischer Wert des Grundbruchwiderstands, gerechnet mit der in EC7-1 vorgeschlagenen Grundbruchformel
R_b	Spitzendruck
$R_{b,k}$	charakteristischer Wert des Spitzendrucks
$R_{ges,k}$	charakteristischer Wert des Gesamtwiderstands
R_s	Mantelreibung
$R_{s,k}$	charakteristischer Wert der Mantelreibung
S	Bermenbreite
t_{erf}	erforderliche Einbindetiefe der Baugrubenwand
V_d	Bemessungswert der vertikalen Einwirkung
$V_{G,k}$	charakteristischer Wert der ständigen vertikalen Einwirkung
V_k	charakteristischer Wert der vertikalen Belastung aus Tragwerkslasten
$V_{Q,k}$	charakteristischer Wert der veränderlichen vertikalen Einwirkung
X_k	charakteristischer Wert der geotechnischen Kenngröße
w_k	charakteristischer Wert der Pfahlverschiebung

Griechische Buchstaben

α	Neigung der Fundamentsohle gegen die Horizontale
β	Böschungsneigung
γ	Wichte
γ_k	charakteristischer Wert der Wichte
γ_b	Teilsicherheitsbeiwert für den Spitzendruck
γ_c'	Teilsicherheitsbeiwert für die wirksame Kohäsion
γ_{cu}	Teilsicherheitsbeiwert für die Scherfestigkeit im undrainierten Zustand
γ_E	Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchungen

γ_f	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung ungünstiger Größenabweichungen der Einwirkungen (Streuung)
γ_F	Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen oder Teilsicherheitsbeiwert, der die Parameterstreuung und die Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite berücksichtigt
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für die ständigen Einwirkungen
γ_{GI}	Teilsicherheitsbeiwert für den Gleitwiderstand
γ_{Gr}	Teilsicherheitsbeiwert für den Grundbruchwiderstand
$\gamma_{\phi'}$	Teilsicherheitsbeiwert für den (wirksamen) Reibungswinkel oder Scherwinkel
γ_d	Beiwert zur Berücksichtigung von Sicherheitsklassen
γ_{qu}	Teilsicherheitsbeiwert für die einaxiale Druckfestigkeit
γ_{Sd}	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Berechnungsmodell der Einwirkungen bzw. der Beanspruchungen
γ_m	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung ungünstiger Abweichungen der Baustoff- oder Produkteigenschaft (Material) bzw. der Streuung des Umrechnungsbeiwerts
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert, der die Parameterstreuung und die Modellunsicherheit auf der Widerstandsseite berücksichtigt
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für die veränderlichen Einwirkungen
γ_s	Teilsicherheitsbeiwert für die Mantelreibung
γ_{Sd}	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Berechnungsmodell der Einwirkungen bzw. der Beanspruchungen
γ_R	Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstände
γ_{Rd}	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Widerstandsmodell
δ	Sohlreibungswinkel oder Neigungswinkel des Erddrucks gegen die Horizontale in einem Lamellenschnitt
δ_p	Wandreibungswinkel auf der passiven Seite
η	globale Sicherheit oder äquivalente Sicherheit im Sinne einer globalen Sicherheit
$\eta_{\text{äqui}}$	äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor
$\eta_{\text{äqui,EC7}}$	äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor, ermittelt mit der in EC7-1 vorgeschlagenen Grundbruchformel
η_E	Modellfaktor
η_x	Umrechnungsbeiwert zwischen Probeneigenschaften und maßgebenden Eigenschaften im Bauteil (darf schon in X_k implizit berücksichtigt werden)
μ	Ausnutzungsgrad der Widerstände
$\sigma_{h,k}$	charakteristischer Wert der Bettungsspannungen

φ	Reibungswinkel
φ'	wirksamer Reibungswinkel
φ_{cv}	kritischer Reibungswinkel
φ_k	charakteristischer Reibungswinkel im drainierten Zustand
φ_d	Bemessungswert des Reibungswinkels
$\varphi_{u,k}$	charakteristischer Reibungswinkel im undrainierten Zustand
$\psi_{0,1}$	Kombinationsbeiwert

Abkürzungen

In diesem Bericht werden folgende Abkürzungen verwendet:

BS-A	außergewöhnliche Bemessungssituation
BS-P	ständige Bemessungssituation
BS-T	vorübergehende Bemessungssituation
CC	Schadensfolgeklassen (Consequence Classes)
CEN	Europäisches Komitee für Normung (Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardization)
DA	Nachweisverfahren (Design Approach)
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EAB	Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“
EB	Gleitfläche entlang einer horizontalen Bruchfläche im Boden
EC0	DIN EN 1990: Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung
EC7-1	DIN EN 1997-1: Eurocode 7- Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln
EC7-2	DIN EN 1997-2: Eurocode 7- Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds
EK	Einwirkungskombination
EN	europäische Norm
ES	Gleitfläche entlang der geneigten Sohlfläche
GZ	Grenzzustand
GZG	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustände der Tragfähigkeit
LF	Lastfall
NA	Nationaler Anhang
NDP	national festzulegende Parameter (National Determined Parameters) im NA
PG6	Projektgruppe 6: Geotechnik
PRB	Initiative Praxisgerechte Regelwerke im Bauwesen e. V.
RC	Zuverlässigkeitsklasse (Reliability Class)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SK	Sicherheitsklasse (Security Class)

Länderkennzeichen (ISO 3166-1):

AT - Österreich

BE - Belgien

CH - Schweiz

CZ - Tschechische Republik

DE - Deutschland

DK - Dänemark

ES - Spanien

FI - Finnland

FR - Frankreich

GR - Griechenland

IE - Irland

IT - Italien

NL - Niederlande

NO - Norwegen

PL - Polen

SE - Schweden

SL - Slowakei

UK - Großbritannien

0 Einführung

0.1 Ausgangslage und Problematik

Mit Einführung des Teilsicherheitskonzepts in Europa sind Teilsicherheitsbeiwerte sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite berücksichtigt. In der Vornorm des Eurocodes 7-1 (ENV 1997-1:1995) waren für die Bemessung drei Fälle (A, B und C) mit gekoppelten Teilsicherheitsbeiwerten für die Einwirkungen und die geotechnischen Kenngrößen (z. B. $\tan \phi$ oder c) definiert. Der Fall A galt nur für den Nachweis gegen Aufschwimmen. Die Fälle B und C waren für die geotechnische und konstruktive Bemessung vorgesehen, wobei im Fall B nur die Einwirkungen mit Teilsicherheitsbeiwerten erhöht wurden, während im Fall C Einwirkungen und geotechnische Kenngrößen mit Teilsicherheitsbeiwerten faktorisiert wurden. Für die Bemessung von Pfahlgründungen wurden die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Baugrundwiderstände Spitzendruck und Mantelreibung angewendet, da diese direkt meistens aus Pfahlprobelastungen oder Drucksondierungen (CPT) ermittelt werden. Die somit übliche Abminderung der geotechnischen Kenngrößen wäre bei der Bemessung von axial beanspruchten Pfählen nicht praktikabel gewesen.

Aufbauend auf der ENV 1997-1 (1995) wurden in den darauf kommenden Versionen des Eurocodes 7-1 (EC7-1) drei Nachweisverfahren für die Bemessung geotechnischer Bauwerke definiert, die die Lastfälle B und C ersetzten. Diese unterschieden sich darin, in welcher Form die Teilsicherheitsbeiwerte bei den Einwirkungen, den geotechnischen Kenngrößen und den Widerständen angesetzt werden und ob die Faktorisierung vor oder erst nach der eigentlichen statischen Berechnung zur Ermittlung der Beanspruchungen vorgenommen wird.

Im Nachweisverfahren 1 (DA1) sind zwei Kombinationen von Teilsicherheitsbeiwerten zu untersuchen. Für die meisten geotechnischen Bauwerke werden bei der Kombination 1 (DA1.1) lediglich die Einwirkungen mit Teilsicherheitsbeiwerten erhöht und entspricht daher dem alten Fall B. Bei der Kombination 2 (DA1.2) werden wie im alten Fall C die geotechnischen Kenngrößen mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert und die Einwirkungen erhöht. Nur für die Bemessung von axial beanspruchten Pfählen und Ankern werden bei DA1.1 und DA1.2 auch Teilsicherheitsbeiwerte auf die Baugrundwiderstände (z. B. Spitzendruck, Mantelreibung, etc.) angesetzt. Eine Faktorisierung der geotechnischen Kenngrößen bei DA1.2 erfolgt nur, um ungünstige Einwirkungen infolge z. B. negativer Mantelreibung oder Querbelastung zu ermitteln.

Beim Nachweisverfahren 2 (DA2) werden die Einwirkungen und die Baugrundwiderstände faktorisiert. Dies entspricht der Vorgehensweise wie bei der Bemessung von Pfählen in ENV 1997-1 (1995). Eine Variation von DA2 ist DA2*, das in Deutschland angewendet wird. Dabei werden erst die aus der statischen Berechnung erhaltenen Beanspruchungen und nicht schon die Einwirkungen durch Teilsicherheitsbeiwerte erhöht. Wenn die Widerstände von den Einwirkungen abhängen wie z. B. beim Grundbruchwiderstand, werden diese im Gegensatz zu DA2 mit charakteristischen Einwirkungen ermittelt.

Beim Nachweisverfahren 3 (DA3) werden wie bei DA1.2 die Einwirkungen und die geotechnischen Kenngrößen faktorisiert. DA1.2 und DA3 unterscheiden sich durch die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen, wobei bei DA3 unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte auf die Tragwerkslasten und auf die geotechnischen Einwirkungen verwendet werden. Nur für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit werden auch auf die Tragwerkslasten die Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnischen Einwirkungen angesetzt.

DA1.2 macht diese Unterscheidung hingegen nicht und verwendet immer die Teilsicherheitsbeiwerte für die geotechnischen Einwirkungen.

Nach der ersten Weiterentwicklung des EC7-1 ergeben sich unter Berücksichtigung der zwei Kombinationen bei DA1 und der Unterscheidung zwischen DA2 und DA2* tatsächlich fünf verschiedene Nachweisverfahren. Darüber hinaus dürfen in jedem CEN-Mitgliedsland das zu verwendende Nachweisverfahren sowie die damit gekoppelten Teilsicherheitsbeiwerte national festgelegt werden. Außerdem differieren die geotechnischen Berechnungsmodelle für z. B. den Erddruck, den Grundbruchwiderstand etc. Somit muss sich ein Geotechniker in Europa mit verschiedenen Nachweisverfahren, unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten und verschiedenen Berechnungsmodellen auseinandersetzen, um die geotechnische Bemessung in Europa durchführen zu können. Diese Vielfalt von Möglichkeiten bei der Bemessung macht den EC7-1 (DIN EN 1997-1 in Deutschland) nicht besonders praxistauglich und verringert dadurch die Durchgängigkeit des Marktes für Baufirmen in Europa.

Die oben erläuterten Unterschiede der Nachweisverfahren, die unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerte sowie die in der Geotechnik oft vorhandene direkte Abhängigkeit der Widerstände von den Einwirkungen führen daher zwangsläufig zu unterschiedlichen Bemessungen und dementsprechend Sicherheitsniveaus. Ob die Unterschiede dabei signifikant sind, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens untersucht.

Hinsichtlich der Verbesserung der Praxistauglichkeit des EC7-1 sowie eines angestrebten einheitlichen Sicherheitsniveau in Europa ist eine Harmonisierung der Nachweisverfahren unbedingt erforderlich.

Des Weiteren ist die Festlegung der charakteristischen Werte der geotechnischen Kenngrößen nicht eindeutig geregelt. Wenn statistische Verfahren angewendet werden können, werden in EC7-1 Grenzwerte für die Wahrscheinlichkeit, den Vertrauensbereich oder die Fraktile vorgegeben. Dies scheitert jedoch sehr oft an der geringen Datenbasis, da meist nur wenige Aufschlüsse vorhanden sind. Sonst ist ihre Festlegung in EC7-1 vage formuliert. Sie sind gemäß 2.4.5.2 (2)P als „vorsichtige Schätzung“ festzulegen:

„Der charakteristische Wert einer geotechnischen Kenngröße ist als vorsichtige Schätzung desjenigen Wertes festzulegen, der im Grenzzustand wirkt.“

Aus diesem Grund können sich neben den Unterschieden in den Nachweisverfahren auch Unterschiede infolge unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Festlegung der charakteristischen Werte der geotechnischen Kenngrößen ergeben. Um die Vergleichbarkeit der Nachweisverfahren zu ermöglichen, werden im Rahmen des Forschungsvorhabens für alle Nachweisverfahren die gleichen charakteristischen Werte für die geotechnischen Kenngrößen angenommen.

0.2 Ziel und Vorgehensweise

Ziel des Forschungsvorhabens ist die pränormative Forschung im Vorfeld der praxisgerechten Überarbeitung und Weiterentwicklung des Eurocode 7-1 für die Bemessung in der Geotechnik mit dem Zweck europäisch harmonisierte Regeln zu schaffen. Dazu wird im Rahmen der Initiative PraxisRegelnBau (PRB) innerhalb der Projektgruppe 6 das Arbeitspaket AP4 - Harmonisierung behandelt, das sich neben der Vertretung in der entsprechenden Evolution Group EG 8 des SC7 im Wesentlichen mit der Erstellung von Vergleichsrechnungen beschäftigt. Diese werden als Eigenleistung in das BMVBS-Forschungsvorhaben „Verbesserung der Praxistauglichkeit der Baunormen – Teilantrag 6: Geotechnik“ eingebracht.

Diese Arbeiten erfolgen in einem dreistufigen Verfahren:

1. Anamnese

Unter diesem Punkt wird der Status Quo des jetzigen Eurocodes 7-1 erhoben. Dazu erfolgt die Auflistung und Gegenüberstellung, welche Nachweisverfahren in den einzelnen Ländern zum Einsatz kommen, wie die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen und Widerstände für die Grenzzustandsgleichungen ermittelt werden und mit welchen Sicherheitsfaktoren die Nachweise geführt werden.

2. Diagnose

Zu diesem zweiten Schritt werden durch Vergleichsrechnungen die Unterschiede der einzelnen Nachweisverfahren und die Sensitivität gegenüber den Eingangsparametern aufgezeigt.

3. Therapie

Auf Grundlage der Erkenntnisse der Diagnose werden Vorschläge zur Harmonisierung der Nachweisverfahren erarbeitet und durch weitere Vergleichsrechnungen validiert.

0.3 Struktur des Berichts

Da die Vorgehensweise bei den einzelnen geotechnischen Anwendungen unterschiedlich ist, wird jede Anwendung in ein eigenes Kapitel behandelt. Betrachtet werden die Themengruppen

- Flächengründungen
- Baugruben
- Pfahlgründungen
- Böschungen

Für jede Themengruppe werden jeweils konsequent die Schritte Anamnese – Diagnose – Therapie durchlaufen. Die Diagnose erfolgt dabei immer in drei Stufen:

Stufe I: Nachweise mit den im EC7-1 vorgeschriebenen bzw. vorgeschlagenen Regelungen.

Stufe II: Nachweise mit den im EC7-1 vorgeschriebenen und in den Nationalen Anhängen einzelner Länder vorgesehenen Regelungen.

Stufe III: Wie Stufe II, aber zusätzlich Anwendung nationaler Regelungen bei der Bestimmungsgleichung von Einwirkungen und Widerständen.

Ziel der Vergleichsrechnungen in den Stufen II und III ist, die Unterschiede zwischen den Sicherheitsniveaus verschiedener europäischer Länder zu zeigen und somit eine Grundlage für die Diskussion zur Harmonisierung der Nachweisverfahren mit einheitlichen Teilsicherheitsbeiwerten auf europäischer Ebene zu schaffen.

Die pränormativ erarbeiteten Normentexte und die NDP-Zusammenstellung werden in separaten Dokumenten zusammengefasst und sind nicht Inhalt dieses Berichts.

Die Nachweise gegen hydraulisch verursachtes Versagen erfolgen nicht mit den drei im EC7-1 definierten Nachweisverfahren für die Grenzzustände GEO und STR, daher wird das hydraulische verursachte Versagen separat im Rahmen der Harmonisierungsarbeiten von PRB behandelt und ist nicht Bestandteil dieses Berichts.

Das Kapitel Verankerung von EC7-1 wurde vom deutschen DIN Ausschuss für Anker bearbeitet. Das überarbeitete Kapitel 8 „Verankerung“ ist auch Bestandteil der deutschen Einsprüche im Rahmen des „systematic review“ des EC7. Aus diesem Grund wurden keine Vergleichsrechnungen für die Bemessung von Verankerungen durchgeführt.

0.4 Bearbeiter

Die Themengruppen wurden in der Arbeitsgruppe definiert, von jeweils zwei Bearbeitern untersucht (siehe Tabelle 0.1) und anschließend in der Arbeitsgruppe vorgestellt, diskutiert und ggf. korrigiert. Die Bearbeiter sind in der Praxis tätige Geotechniker, die in Ingenieurbüros, Baufirmen oder Bauindustrieverbänden langjährige Erfahrungen mit der Anwendung von Normen in der Geotechnik haben.

Tabelle 0.1: Mitarbeiter der PRB-PG6, AP4

Name	Adresse
Dr.-Ing. Bernd Schuppener	Pforzheimerstr. 1, 76344 Eggenstein- Leopoldshafen
Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter	GuD Consult GmbH Darwinstr. 13, 10589 Berlin
Dr.-Ing. Carsten Pohl	ELE Beratende Ingenieure Susannastraße 31, 45136 Essen
Prof. Dr.-Ing. Johann Buß	GGU-Software GmbH Am Hafen 22, 38112 Braunschweig
Dr.-Ing. Armin Doster	DC-Software Doster & Christmann GmbH Hannah-Arendt-Weg 3, 80997 München
Dr.-Ing. Harald Huber	LGA - Landesgewerbeanstalt Bayern Lothstr. 19, 80797 München
Dipl.-Ing. Dr. Herbert Walter	Ingenieurkonsulent für Bauingenieurwesen Dr.-Adolf-Altman-Straße 24, 5020 Salzburg
Dr.-Ing. Magnus Geduhn	IMS Ingenieurgesellschaft mbH Stadtdeich 7, 20097 Hamburg
Dr.-Ing. Walter Steiner	B+S AG Muristrasse 60, CH-3000 Bern
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Elias Tafur	Geotechnik im Bauwesen an der RWTH Aachen Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

1 Flächengründungen

1.1 Anamnese

Für die Bemessung von Flächengründungen nach EC7-1 sind drei Nachweisverfahren vorgesehen, die sich dadurch unterscheiden, ob die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Einwirkungen und die geotechnischen Kenngrößen bzw. direkt auf die Widerstände aufgeschlagen werden und ob diese Faktorisation vor oder erst nach der eigentlichen statischen Berechnung vorgenommen wird. Für die Teilsicherheitsbeiwerte werden im EC7-1 zwar Werte vorgeschlagen, ihre Festlegung ist aber wie auch die Wahl des Nachweisverfahrens nationale Entscheidung.

Des Weiteren werden im EC7-1 Verfahren für die Ermittlung der geotechnischen Einwirkungen und Widerstände vorgeschlagen. Der informative Anhang C des EC7-1 enthält ein Verfahren für die Ermittlung des Erddrucks und der informative Anhang D stellt ein Verfahren für die Ermittlung des Grundbruchwiderstands vor. Die europäischen Länder können in den nationalen Anhängen diesen Vorschlägen folgen oder aber auch eigene Verfahren festlegen. Im Gegensatz dazu ist die Ermittlung des Gleitwiderstands im EC7-1 normativ geregelt, sodass sie in allen europäischen Ländern in gleicher Weise durchgeführt wird.

1.1.1 Verfahren zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen

Auf ein Fundament wirken hauptsächlich Tragwerkslasten in Form von Schnittgrößen auf der Oberkante des Fundaments und untergeordnet geotechnische Einwirkungen wie der Erddruck oder der Wasserdruck. Im Rahmen der durchgeführten Berechnungen werden keine Erd- und Wasserdrücke berücksichtigt.

Der Gleitwiderstand wird in EC7-1 bei unkonsolidierten Verhältnissen (Anfangszustand) über die Kohäsion im undrainierten Zustand, bei konsolidierten Verhältnissen (Endzustand) über die Reibung zwischen Sohlfläche und Boden ermittelt. Im Endzustand wird nach EC7-1 der kritische Reibungswinkel ϕ'_{cv} für die Bestimmung des Sohlreibungswinkels δ verwendet. Einige Länder wie Deutschland und Österreich haben für die Größe des Sohlreibungswinkels den charakteristischen Reibungswinkel ϕ'_k national festgelegt. Des Weiteren ist in Deutschland geregelt, dass bei einer geneigten Sohlfläche zwei Prüfflächen beim Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten untersucht werden müssen. Eine Prüffläche ist die Sohlfläche und die andere ist eine Bruchfläche im Boden, bei der neben der Reibung auch die Kohäsion des Bodens auf der Widerstandsseite angesetzt wird.

Im EC7-1 wird für die Berechnung des Grundbruchwiderstands eine dreigliedrige Formel vorgeschlagen, die Beiwerte für die Berücksichtigung der Tragfähigkeit des Bodens, der Lastneigung, der Form des Fundaments und der Sohlneigung beinhaltet. Die europäischen Länder haben zwar unterschiedliche Grundbruchformeln, die aber meist dieselbe dreigliedrige Struktur aufweisen. Jedoch unterscheiden sie sich in der Bestimmung der Beiwerte. Außerdem gibt es Länder, die den Einfluss zusätzlicher anderer Faktoren berücksichtigen, z. B. Deutschland mit Beiwerten zur Berücksichtigung der Böschungsneigung und der Bermbreite.

1.1.2 Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte

Für die Fundamentbemessung dürfen die drei im EC7-1 definierten Nachweisverfahren verwendet werden. Diese unterscheiden sich dadurch, ob die Einwirkungen bzw.

Beanspruchungen, die Bodenkenngrößen oder die Baugrundwiderstände mit den Teilsicherheitsbeiwerten faktorisiert werden.

Im Nachweisverfahren 1 (DA1) sind zwei Kombinationen von Teilsicherheitsbeiwerten zu untersuchen. Während bei der Kombination 1 (DA1.1) lediglich die Tragwerkslasten mit Teilsicherheitsbeiwerten erhöht werden, werden bei der Kombination 2 (DA1.2) die Bodenparameter (Reibungswinkel und die Kohäsion im drainierten bzw. undrainierten Zustand) mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert und nur die veränderlichen Tragwerkslasten erhöht.

Beim Nachweisverfahren 2 (DA2) werden die Einwirkungen und die Baugrundwiderstände (Gleitwiderstand und Grundbruchwiderstand) faktorisiert, wobei die für die Ermittlung der Baugrundwiderstände erforderlichen Einwirkungen bereits faktorisiert sind. Eine Variation von DA2 ist DA2*, das in Deutschland und den meisten anderen europäischen Staaten angewendet wird. Dabei werden die Beanspruchungen und nicht die Einwirkungen durch Teilsicherheitsbeiwerte erhöht, d.h. die Faktorisierung der Einwirkungen findet erst nach der statischen Berechnung statt, in der die Beanspruchungen bestimmt werden. Auf der Widerstandsseite werden der Grundbruchwiderstand und der Gleitwiderstand mit charakteristischen Einwirkungen ermittelt.

Beim Nachweisverfahren 3 (DA3) werden wie bei DA1.2 die Einwirkungen und die Bodenkenngrößen faktorisiert. Allerdings sind die Teilsicherheitsbeiwerte für die Tragwerkslasten bei DA3 (Gruppe A1 in Tabelle 1.2) höher als bei DA1.2 (Gruppe A2 in Tabelle 1.2).

Im Rahmen der Vergleichsrechnungen wurden die europäischen Länder Dänemark (DK), Deutschland (DE), Frankreich (FR), Großbritannien (UK), Irland (IE), Italien (IT), Österreich (AT), Polen (PL), Schweiz (CH) und Schweden (SE) berücksichtigt. Tabelle 1.1 zeigt die in jedem Land zulässigen Nachweisverfahren für die Bemessung von Flächengründungen.

Tabelle 1.1: Nachweisverfahren in ausgewählten europäischen Ländern für die Bemessung von Flächengründungen

Land	Zulässige Nachweisverfahren	Kombination der Teilsicherheitsbeiwerte nach EC7-1	
Dänemark DK	DA3	A1 „+“ M2 „+“ R3	
Deutschland DE	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2	
Frankreich FR	DA2	A1 „+“ M1 „+“ R2	
Großbritannien UK	DA1	DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
Irland IE	DA1 DA2 DA3	DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1 A1 „+“ M1 „+“ R2 A1 „+“ M2 „+“ R3
Italien IT	DA1 DA2	DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R2 A1 „+“ M1 „+“ R3
Österreich AT	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2	
Polen PL	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2	
Schweiz CH	GZ Typ 2	entspricht A1 „+“ M2 „+“ R2	
Schweden SE	DA3	A1 „+“ M2 „+“ R3	

In Tabelle 1.2 bis Tabelle 1.4 sind die in den untersuchten europäischen Ländern verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung von Fundamenten zusammengefasst.

Tabelle 1.2: Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen

Einwirkung / Beanspruchung		ständig		veränderlich	
		ungünstig	günstig	ungünstig	günstig
EC7-1	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
DK ¹⁾	A1 / 6.10a) ²⁾	1,20 K _{FI}	1,00 K _{FI}	0,00	0,00
	A1 / 6.10b) ²⁾	1,00	0,90 ³⁾ / 1,00 ³⁾	1,50 K _{FI}	0,00
DE	A1	1,35	1,35 ⁴⁾	1,50	0,00
FR	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
UK	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
IE	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
IT	A1	1,30	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
AT	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
PL	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
CH ⁴⁾	A1	1,35 1,20 ⁶⁾	0,90 ⁶⁾ 0,80 ⁷⁾ / 1,00 ⁸⁾ 0,70 ⁹⁾	1,50 1,45 ¹⁰⁾	-
SE ⁹⁾	A1 / 6.10a) ²⁾	γ_d 1,35	1,00	$\gamma_d \cdot 1,50$	0,00
	A1 / 6.10b) ²⁾	γ_d 0,89 · 1,35	1,00	$\gamma_d \cdot 1,50$	0,00

- 1) Berücksichtigung von Schadensfolgeklassen CC mit dem Beiwert K_{FI}.
- 2) Gl. 6.10a) und 6.10b) nach DIN EN 1990, siehe Anhang A.
- 3) 0,9 für Tragwerkslasten und 1,0 für Bodeneigengewicht und Grundwasser.
- 4) In Deutschland gibt es allgemein nur einen Teilsicherheitsbeiwert für die ständigen Einwirkungen und wird nicht zwischen günstige und ungünstige ständige Einwirkungen unterschieden. Nur bei Zugpfählen wird ein Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung aus günstigen ständigen Einwirkungen berücksichtigt.
- 5) Für den Grenzzustand Typ 2, der das Erreichen des Tragwiderstands des Tragwerks oder eines seiner Teile umfasst. Diese Fälle werden im Wesentlichen durch die Baugrund- und Baustoffeigenschaften und die geometrischen Größen bestimmt.
- 6) Für den Wasserdruck nach SIA 267 (2003).
- 7) Für ständige Einwirkungen und Erdaufasten nach SIA 267 (2003).
- 8) Für ständige Einwirkungen und Erdaufasten nach SIA 267 (2013).
- 9) Für den Erddruck nach SIA 267 (2003).
- 10) Für Bahnverkehrslasten.
- 11) Berücksichtigung von Sicherheitsklassen mit dem Beiwert γ_d .

Tabelle 1.3: Verwendete Teilsicherheitseinwirkungen für die Bodenkenngrößen

Bodenkenngröße		Reibungswinkel	Kohäsion im drainierten Zustand	Kohäsion im undrainierten Zustand	Einaxiale Druckfestigkeit	Wichte
EC7-1	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
DK	M2	1,20	1,20	1,80	1,80	1,00
DE	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
FR	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
UK	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
IE	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
IT	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,60	1,00
AT	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PL	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CH	M2	1,20	1,50	1,50	1,50	1,00
SE	M2	1,30	1,30	1,50	1,50	1,00

Tabelle 1.4: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Baugrundwiderstände

Widerstand		Grundbruch	Gleiten
EC7-1	R1	1,00	1,00
	R2	1,40	1,10
	R3	1,00	1,00
DK	R3	1,00	1,00
UK	R1	1,00	1,00
DE	R2	1,40	1,10
FR	R2	1,40	1,10
IT	R1	1,00	1,00
	R2	1,80	1,10
	R3	2,30	1,10
IE	R1	1,00	1,00
	R2	1,40	1,10
	R3	1,00	1,00
AT	R2	1,40	1,10
PL	R2	1,40	1,10
CH	R2	1,00 – 1,20	1,00 – 1,20
SE	R3	1,00	1,00

Dänemark ist das einzige Land der untersuchten Länder, das für die Bemessung Schadensfolgekassen und die Gleichungen 6.10a) und 6.10b) von EC0 für die Bildung des Bemessungswerts der Einwirkungen berücksichtigt. Schweden berücksichtigt analog zu Dänemark Sicherheitsklassen und macht ebenfalls Gebrauch von den Gleichungen 6.10a) und 6.10b) von EC0 bei der Bildung des Bemessungswerts der Einwirkungen. Es ist aber anzumerken, dass in Dänemark bei der Anwendung von Gleichung 6.10a) nur eine reine ständige Bemessung durchgeführt wird, während in Schweden das nicht erlaubt ist. In Schweden sind daher bei der Anwendung von Gleichung 6.10a) auch veränderliche Einwirkungen zu berücksichtigen, wobei die Leiteinwirkung mit einem Kombinationsbeiwert $\psi_{0,1}$ beaufschlagt wird (siehe Anhang A und [U 20]). Genaueres über die Teilsicherheitsbeiwerte in Dänemark und Schweden sowie über die Gleichungen 6.10a) und 6.10b) von EC0 ist im Anhang A dieses Berichts zu finden.

In der Schweiz dürfen gemäß SIA 267 Teilsicherheitsbeiwerte für die Baugrundwiderstände zwischen 1,0 und 1,2 zur Abdeckung der Modellunsicherheiten ausgewählt werden (siehe Tabelle 1.4). Ein Wert von 1,0 darf angenommen werden, wenn für die Ermittlung des Baugrundwiderstandes ein zuverlässiges, erprobtes Berechnungsverfahren verwendet wird. Bei einer Grundbruchberechnung eines Streifenfundaments mit ebenem Gelände und waagerechter Fundamentsohle wäre das beispielsweise der Fall. Handelt es sich hingegen um die Grundbruchberechnung eines Fundaments an einer Böschungskante, sind die Berechnungsverfahren weniger präzise und ein Wert größer 1,0 muss angenommen werden.

Bemerkung:

Im Nationalen Anhang von Italien [U 18] sind für die Fundamentbemessung die Nachweisverfahren DA1 (DA1.1 und DA1.2) und DA2 zulässig. Bei DA1.2 werden in Italien gemäß der Kombination der Teilsicherheitsbeiwerte auch die Baugrundwiderstände faktorisiert (siehe Tabelle 1.1 und Tabelle 1.2). Dies widerspricht der Definition des Nachweisverfahrens DA1.2, bei dem nur die Einwirkungen und die Bodenkenngrößen faktorisiert werden. Darüber hinaus sind die festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte für den Grundbruchwiderstand und den Gleitwiderstand im Kapitel Flächengründungen der italienischen Norm andere als diejenigen im Kapitel Stützbauwerke. Während die im Kapitel Stützbauwerke festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte den in EC7-1 empfohlenen Werten entsprechen, sind die Teilsicherheitsbeiwerte im Kapitel Flächengründungen deutlich größer (siehe Tabelle 1.4).

Nach Anfrage bei einem italienischen Kollegen wurde klar, dass in Italien die Teilsicherheitsbeiwerte bauwerksabhängig festgelegt worden sind. Die Teilsicherheitsbeiwerte wurden in Italien aus dem alten, globalen Sicherheitsfaktor umgerechnet. Da für Fundamente ein höherer globaler Sicherheitsfaktor als für Stützbauwerke verwendet wurde, sind die Teilsicherheitsbeiwerte für die Fundamente höher. Dazu noch werden bei DA1.2 zusätzlich die Baugrundwiderstände faktorisiert, um ein ähnliches Sicherheitsniveau wie beim globalen Sicherheitskonzept zu erhalten.

1.2 Diagnose

Im Rahmen der Diagnose wurden umfangreiche Vergleichsrechnungen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Nachweisverfahren und die verwendeten Verfahren für die Ermittlung der geotechnischen Einwirkungen und Widerstände hinsichtlich des Sicherheitsniveaus und der Wirtschaftlichkeit bei der Bemessung von Fundamenten bewerten zu können. Hierfür wurden die im Kapitel 0 definierten Stufen wie folgt festgelegt:

Stufe I: Berechnung mit den drei Nachweisverfahren nach EC7-1. Für die Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände wird jeweils nur ein Verfahren verwendet.

Stufe II: Berechnung mit den national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerten und Nachweisverfahren für AT, CH, DE, DK, FR, IE, IT, PL, SE und UK. Für die Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände wird jeweils nur ein einziges Verfahren verwendet.

Stufe III: Berechnungen mit den länderspezifischen Teilsicherheitsbeiwerten, Nachweisverfahren und Besonderheiten, z. B. den verschiedenen Verfahren für die Ermittlung des Grundbruchwiderstands für AT, CH, DE, DK, IE, IT und UK.

1.2.1 Randbedingungen

Ein typisches Stützenfundament wurde mit einer konstanten Einbindetiefe von 0,8 m und einem waagerechten Gelände für die ständige Bemessungssituation BS-P berechnet. Nur in einigen Fällen wurden eine Böschung und eine Berme berücksichtigt. Die Geometrie des Fundaments wurde bei den ersten Berechnungen quadratisch gewählt. In weiteren Berechnungen wurde eine andere Geometrie untersucht, wobei ein Streifenfundament und ein rechteckiges Fundament mit einem Seitenverhältnis a zu b von 1,5 berechnet wurden.

Die Berechnungen wurden für eine konstante Bodenwichte von 17 kN/m^3 durchgeführt. Die Scherfestigkeitsparameter ϕ , c und c_u wurden variiert, wobei bei den Parametern im undrainierten Zustand von einem Grundwasserstand auf Fundamentsohlenniveau ausgegangen wurde.

Als Einwirkungen sind lediglich Tragwerkslasten berücksichtigt worden. Bei den ersten Berechnungen wurde als vertikale Einwirkung eine ständige Einwirkung aus dem Tragwerk $V_{G,k}$ sowie das Eigengewicht des Fundaments $G_{F,k}$ und als horizontale Einwirkung eine veränderliche Einwirkung $H_{Q,k}$ angesetzt. Zur Untersuchung des Verhältnisses von veränderlichen zu ständigen Einwirkungen Q/G (Verhältnis in vertikaler Richtung $V_{Q,k}/V_{G,k}$ und in horizontaler Richtung $H_{Q,k}/H_{G,k}$) wurden in weiteren Berechnungen auch eine veränderliche vertikale Einwirkung $V_{Q,k}$ und eine ständige horizontale Einwirkung $H_{G,k}$ berücksichtigt. Geotechnische Einwirkungen wie der Erddruck wurden bei diesem Beispiel nicht berücksichtigt. Abbildung 1.1 zeigt die untersuchten geometrischen Parameter und die Einwirkungen für ein quadratisches Fundament.

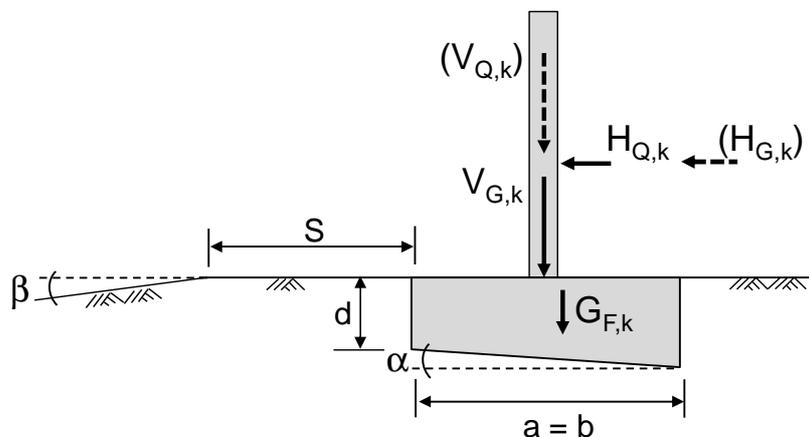


Abbildung 1.1: untersuchte geometrische Parameter und Fundamenteinwirkungen

1.2.2 Durchgeführte Berechnungen und Nachweise

Die erforderliche Fundamentbreite wurde getrennt für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und gegen Grundbruch ermittelt. Da der Gleitwiderstand und der Grundbruchwiderstand von den Einwirkungen abhängen, wurden Einwirkungskombinationen ausgewählt, bei denen sich hohe Beanspruchungen bei geringeren Widerständen ergeben. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten wurden daher die vertikalen Einwirkungen als günstige Einwirkungen und die horizontalen Einwirkungen als ungünstige Einwirkungen berücksichtigt. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch wurden zwei Einwirkungskombinationen (EK1 und EK2) untersucht. Bei der ersten ergab sich die größte vertikale Beanspruchung (EK1), wobei alle Einwirkungen als ungünstig berücksichtigt wurden. Bei der zweiten ergab sich die größte Exzentrizität (EK2), wobei die vertikalen Einwirkungen als günstig und die horizontalen Einwirkungen als ungünstig angesetzt wurden. Bei der Untersuchung des Verhältnisses Q/G ($H_{Q,k}/H_{G,k}$ oder $V_{Q,k}/V_{G,k}$) wurden zusätzlich die Einwirkungskombinationen EK3 und EK4 untersucht. Bei EK3 wurde keine veränderliche vertikale Einwirkung berücksichtigt, während die anderen Einwirkungen als ungünstig angesetzt wurden. EK4 entspricht nahezu EK1 mit dem Unterschied, dass die ständigen vertikalen Einwirkungen als günstig angesetzt wurden. Die Unterscheidung zwischen günstigen und ungünstigen Einwirkungen wurde nicht für das Nachweisverfahren DA2* bzw. Länder, die nach DA2* die geotechnische Bemessung durchführen, vorgenommen.

In Stufe I wurden Berechnungen für die Nachweisverfahren DA1 (DA1.1 und DA1.2), DA2, DA2* und DA3 durchgeführt. Neben der Berechnung der erforderlichen Fundamentbreiten für jedes Nachweisverfahren wurde auch eine „globale“ Berechnung (nach dem alten globalen Sicherheitskonzept) als „Referenzberechnung“ durchgeführt. Dabei wurde für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten eine Sicherheit von 1,5 und für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch eine Sicherheit von 2,0 angesetzt.

Danach wurden in Stufe II Berechnungen mit den national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerten und Nachweisverfahren für die europäischen Länder AT, CH, DE, DK, FR, IE, IT, PL, SE und UK durchgeführt.

In Stufe III wurden Berechnungen für AT, CH, DE, DK, IE, IT und UK durchgeführt. Dafür wurden die in jedem Land vorgeschriebenen Nachweisverfahren sowie ihre nationalfestgelegten Verfahren zur Ermittlung der Einwirkungen und der Widerstände verwendet. Hierbei wurde keine globale Berechnung durchgeführt.

Für die Berechnungen der Nachweisverfahren wurden folgende Parameter variiert:

Grenzzustand Gleiten:

- Lastneigung H/V : 0,3 – 0,4
- Reibungswinkel φ : 20 – 25°
- Kohäsion im drainierten Zustand c : 0 – 20 kN/m²
- Kohäsion im undrainierten Zustand c_u : 25 – 75 kN/m²
- Sohlneigung α : 0 – 12°
- Verhältnis $V_{Q,k}/V_{G,k}$ und $H_{Q,k}/H_{G,k}$: 0 – 3,0

Grenzzustand Grundbruch:

- Lastneigung H/V : 0 – 0,4
- Reibungswinkel φ : 20 – 40°
- Kohäsion im drainierten Zustand c : 0 – 20 kN/m²
- Kohäsion im undrainierten Zustand c_u : 25 – 75 kN/m²
- Sohlneigung α : 0 – 12°
- Böschungswinkel β : 0 – 25°
- Bermbreite S : 0 – 2 m
- Verhältnis $V_{Q,k}/V_{G,k}$ und $H_{Q,k}/H_{G,k}$: 0 – 3,0

1.2.3 Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte

Die für die Berechnungen erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte sind in den Tabelle 1.2 bis Tabelle 1.4 für die untersuchten europäischen Länder zusammengefasst. Bei den durchgeführten Berechnungen wurden für DK eine mittlere Schadensfolgeklasse mit dem Faktor $K_{FI} = 1,0$ und für SE eine mittlere Sicherheitsklasse mit dem Faktor $\gamma_d = 0,91$ ausgewählt. Außerdem wurde für SE auf der sicheren Seite vereinfacht ein Kombinationsbeiwert $\psi_{0,1}=1,0$ angesetzt.

Für CH wurde ein Teilsicherheitsbeiwert für die Baugrundwiderstände von 1,0 ausgewählt. Wenn die ständigen Einwirkungen günstig wirken, wurde bei den Berechnungen ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,0 nach SIA 267 (2013) angesetzt. Um den Unterschied zwischen SIA 267 (2003) und SIA 267 (2013) zu zeigen, wurde zusätzlich eine Berechnung mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 0,8 nach SIA 267 (2003) durchgeführt.

1.2.4 Bestimmung der Einwirkungen und Beanspruchungen

Da keine geotechnischen Einwirkungen berücksichtigt wurden, wurde bei den Berechnungen für die charakteristische vertikale Einwirkung aus Tragwerklasten eine ständige Einwirkung von 500 kN angesetzt. Das Eigengewicht des Fundaments wurde aus der erforderlichen Fundamentfläche multipliziert mit der Einbindetiefe von 0,8 m und mit einer typischen Wichte für Stahlbeton von 25 kN/m³ ermittelt. Die charakteristische horizontale veränderliche Einwirkung wurde in Abhängigkeit der ausgewählten Lastneigung der Tragwerklasten ermittelt. Wenn die Lastneigung im Endzustand nicht variiert wurde, wurde eine Lastneigung von 0,35 gewählt. Damit ergab sich eine charakteristische horizontale Einwirkung von 175 kN. Für den Anfangszustand wurde eine Lastneigung von 0,1 bzw. eine charakteristische horizontale Einwirkung von 50 kN gewählt.

Bei den Berechnungen mit einer Variation des Verhältnisses Q/G betrug die Summe der vertikalen charakteristischen Einwirkungen ebenfalls 500 kN bzw. der horizontalen charakteristischen Einwirkungen 175 kN.

1.2.5 Bestimmung der Widerstände

Der Gleitwiderstand wurde für alle Stufen nach EC7-1 ermittelt. Dabei wurde bei den Berechnungen der europäischen Länder keine Unterscheidung zwischen kritischem Reibungswinkel ϕ'_{cv} und charakteristischem Reibungswinkel ϕ'_k für die Bestimmung des Sohlreibungswinkels δ im Endzustand gemacht. Es wurde vereinfacht der charakteristische Reibungswinkel angesetzt. Im Anfangszustand ergibt sich der Gleitwiderstand bei Tonböden aus

$$\min = \left\{ A \times c_{u,d} \text{ oder } \frac{(A \times c_{u,k})}{\gamma_{GI}} ; 0,4 \times V_d \right\} \quad \text{Gl. 1.1}$$

mit:

A' = effektive Sohlfläche [m²]

γ_{GI} = Teilsicherheitsbeiwert für den Gleitwiderstand [-]

$c_{u,k}$ = charakteristischer Wert der Kohäsion im undrainierten Zustand [kN/m²]

$c_{u,d}$ = Bemessungswert der Kohäsion im undrainierten Zustand [kN/m²]

V_d = Bemessungswert der vertikalen Einwirkung [kN]

Die Bedingung $0,4 \times V_d$ berücksichtigt die Möglichkeit, dass Wasser oder Luft in die Sohlfläche zwischen Fundament und einem undrainierten Tonboden eindringen kann.

Der Grundbruchwiderstand wurde für den Vergleich der Nachweisverfahren in Stufe I und Stufe II nach DIN 4017 ermittelt, weil mit DIN 4017 auch der Einfluss einer Böschungsneigung bzw. die Länge einer Berme berücksichtigt werden kann. Das Verfahren in DIN 4017 entspricht für $\alpha=\beta=0$ und $c = 0 \text{ kN/m}^2$ dem Verfahren in Anhang D des EC7-1. Für den Vergleich der europäischen Länder in Stufe III wurde der Grundbruchwiderstand nach dem jeweils in den Nationalen Anhängen festgelegten Verfahren ermittelt:

- AT: ÖNORM B 4435-2
- DE: DIN 4017
- DK: Anhang D des EN 1997-1 DK NA
- IE: Anhang D des EC7-1
- IT: Anhang D des EC7-1
- UK: Anhang D des EC7-1
- CH: nach Lang et. al bzw. VSS-Stützmauerbuch

1.2.6 Festlegung der Vergleichsgröße

Als Vergleichsgröße wurde in Anlehnung an [U 28] ein äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor $\eta_{\text{äqui},i}$ gewählt. Hierfür wurde zunächst für jedes Nachweisverfahren bzw. jedes Land die erforderliche Fundamentbreite $b_{\text{erf},i}$ ermittelt. In Abhängigkeit der ermittelten Fundamentbreite wurden danach der charakteristische Widerstand und die charakteristische Beanspruchung berechnet. Anschließend wurde das Verhältnis charakteristischer Widerstand zu charakteristischer Beanspruchung gebildet, das dem äquivalenten globalem Sicherheitsfaktor $\eta_{\text{äqui},i}$ entspricht.

$$\eta_{\text{äqui},i} = \frac{R_{k,i}(b_{\text{erf},i})}{E_{k,i}(b_{\text{erf},i})} \quad \text{Gl. 1.2}$$

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten im Endzustand bildet sich der äquivalente Sicherheitsfaktor für eine waagerechte Fundamentsohle wie folgt:

$$\eta_{\text{äqui},i} = \frac{R_{k,i}(b_{\text{erf},i})}{E_{k,i}(b_{\text{erf},i})} = \frac{[V_{k,i} + G_{F,k,i}(b_{\text{erf},i})] \cdot \tan \varphi_k}{H_{k,i}} \quad \text{Gl. 1.3}$$

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch bildet sich der äquivalente Sicherheitsfaktor für eine waagerechte Fundamentsohle wie folgt:

$$\eta_{\text{äqui},i} = \frac{R_{k,i}(b_{\text{erf},i})}{E_{k,i}(b_{\text{erf},i})} = \frac{R_{n,k,i}(b_{\text{erf},i})}{[V_{k,i} + G_{F,k,i}(b_{\text{erf},i})]} \quad \text{Gl. 1.4}$$

mit:

$H_{k,i}$ = charakteristische horizontale Belastung aus Tragwerkslasten [kN]

$V_{k,i}$ = charakteristische vertikale Belastung aus Tragwerkslasten [kN]

$G_{F,k,i}(b_{\text{erf},i})$ = Eigengewicht des Fundaments abhängig von der Fundamentbreite [kN]

$R_{n,k,i}(b_{\text{erf},i})$ = charakteristischer Grundbruchwiderstand abhängig von der Fundamentbreite [kN]

Es ist zu beachten, dass bei dieser Bestimmung des äquivalenten globalen Sicherheitsfaktors der untersuchten europäischen Länder das verwendete Verfahren zur Ermittlung der Widerstände eingeht. Während beim Gleitwiderstand noch alle Länder das Verfahren nach EC7-1 verwenden, wurden beim Grundbruchwiderstand die jeweils in den Nationalen Anhängen festgelegten Verfahren verwendet. Somit ergab sich ein äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor, der das Sicherheitsniveau bezogen auf das national festgelegte Verfahren widerspiegelt (siehe Abbildung 1.75).

Um den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor der untersuchten europäischen Länder jedoch vergleichbar zu machen, wurde daher der äquivalente globale Sicherheitsfaktor jedes Landes mit dem Verfahren zur Ermittlung des Grundbruchwiderstands nach EC7-1 ermittelt. Hierfür wurde die erforderliche Fundamentbreite $b_{\text{erf},i}$ verwendet, die mit dem national festgelegten Verfahren jedes Landes ermittelt wurde (siehe Abbildung 1.76). Es ergibt sich allgemein folgende Gleichung:

$$\eta_{\text{äqui,EC7,i}} = \frac{R_{k,EC7,i}(b_{\text{erf},i})}{E_{k,i}(b_{\text{erf},i})} = \frac{R_{n,k,EC7,i}(b_{\text{erf},i})}{[V_{k,i} + G_{k,i}(b_{\text{erf},i})]} \quad \text{Gl. 1.5}$$

mit:

$V_{k,i}$ = charakteristische vertikale Belastung aus Tragwerklasten [kN]

$G_{k,i}(b_{\text{erf},i})$ = Eigengewicht des Fundaments abhängig von der Fundamentbreite [kN]

$R_{n,k,EC7,i}(b_{\text{erf},i})$ = charakteristischer Grundbruchwiderstand nach EC7-1 abhängig von der Fundamentbreite [kN]

1.2.7 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I

Bei den durchgeführten Berechnungen in Stufe I sowie II und III entsprechen ϕ_k und c_k den Scherparametern im drainierten Zustand, $\phi_{u,k}$ und $c_{u,k}$ den Scherparametern im undrainierten Zustand.

Lastneigung

Abbildung 1.2 und Abbildung 1.3 zeigen die erforderliche Fundamentbreite für den Grenzzustand der Sicherheiten gegen Gleiten und gegen Grundbruch im Endzustand für eine Variation der Lastneigung H/V . Dabei ist zu sehen, dass mit steigender Lastneigung die erforderliche Fundamentbreite nicht linear zunimmt. Da aus der Darstellung der erforderlichen Fundamentbreite keine eindeutige Aussage über das Sicherheitsniveau der Nachweisverfahren gemacht werden kann, wird in Abbildung 1.4 und Abbildung 1.5 der äquivalente globale Sicherheitsfaktor dargestellt.

Dieser ergibt sich unterschiedlich für die verschiedenen Nachweisverfahren. Dabei liegt der äquivalente globale Sicherheitsfaktor von DA3 deutlich über den anderen. Beim DA1 zeigt sich hier, dass die Kombination 2 (DA1.2) maßgebend ist. Beim Grenzzustand der Sicherheit

gegen Gleiten ergeben sich ähnliche Sicherheitsniveaus für DA1.2 und DA2 bzw. DA2*. Außerdem verlaufen die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor parallel, d.h. das Sicherheitsniveau ist gegen das Nachweisverfahren invariant und hängt nur von der Größe der Teilsicherheitsbeiwerte ab. Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch dagegen sind sie sehr unterschiedlich und liegen beim DA1.2 für Lastneigungen größer 0,05 über DA2*.

In Abbildung 1.5 ist für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch bei einer Variation der Lastneigung der Übergang der maßgebenden Einwirkungskombination durch einen Pfeil dargestellt. Vor dem Pfeil ist die Einwirkungskombination EK1 maßgebend, danach EK2.

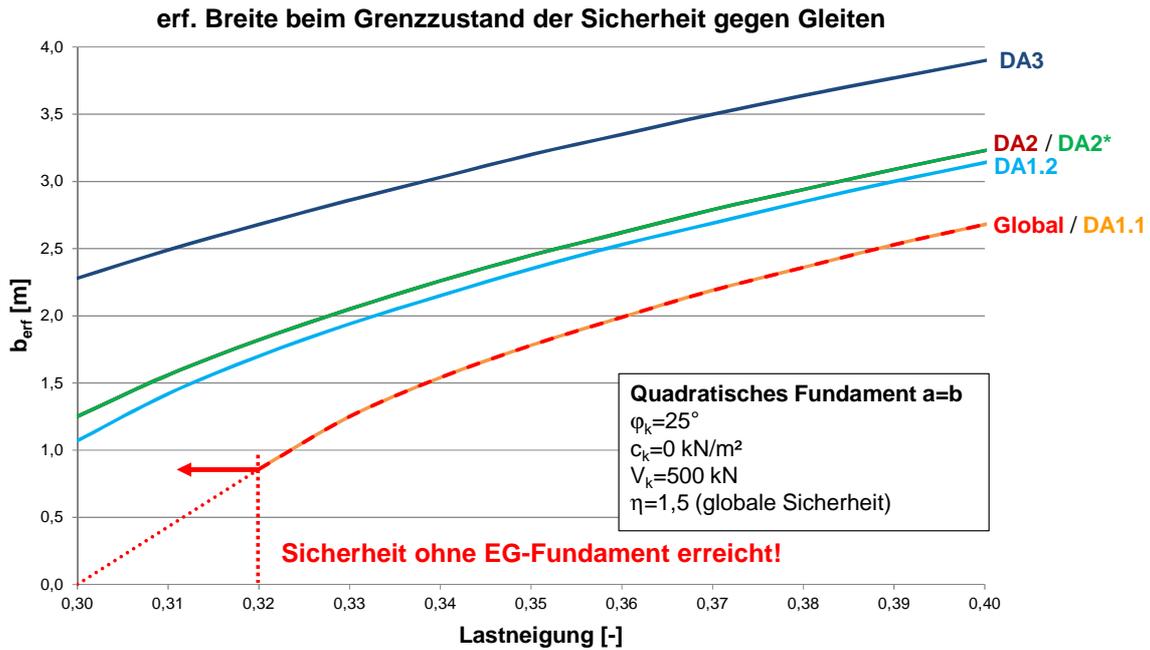


Abbildung 1.2: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

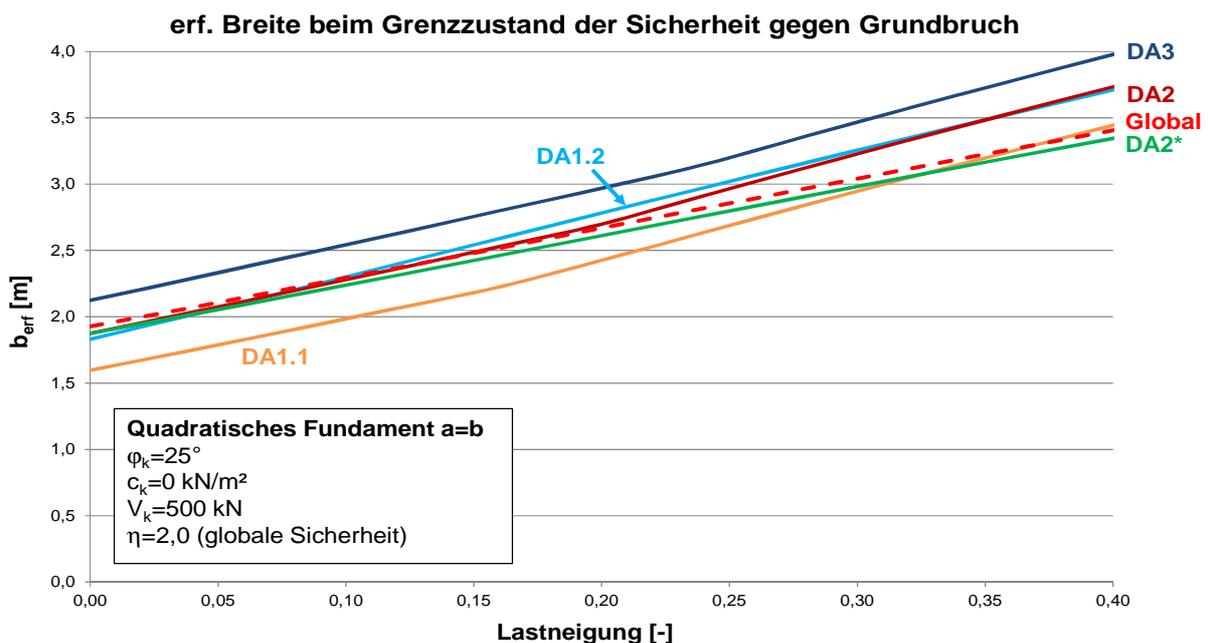


Abbildung 1.3: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

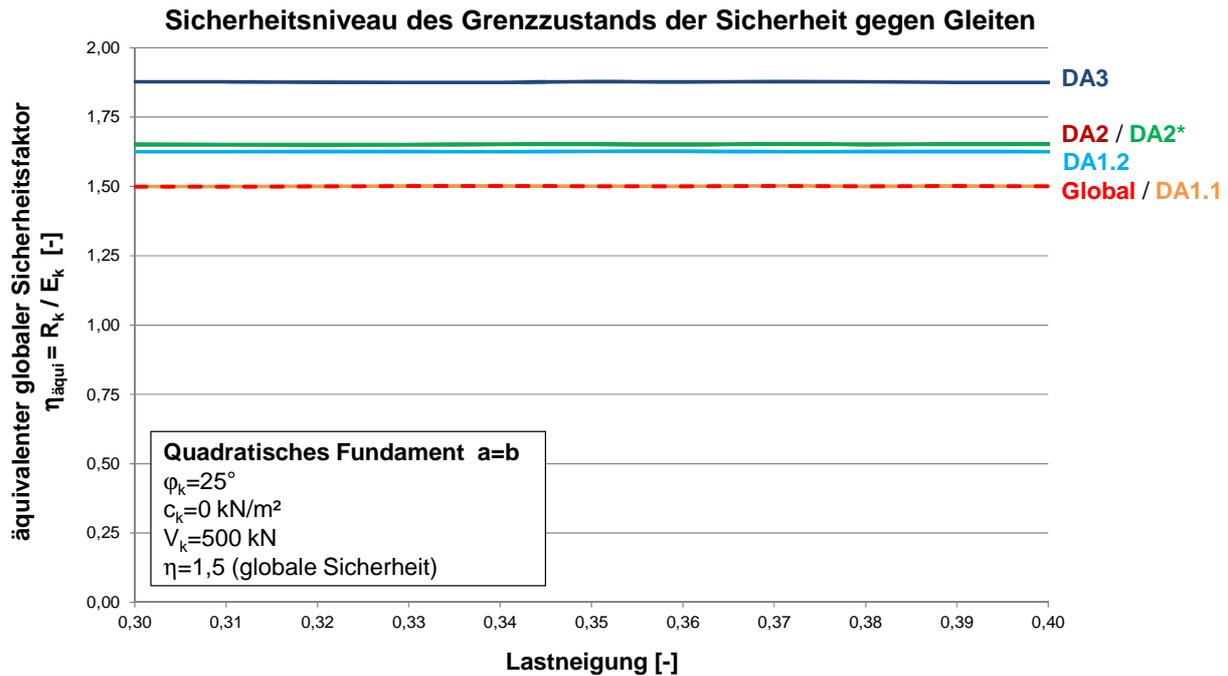


Abbildung 1.4: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Lastneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

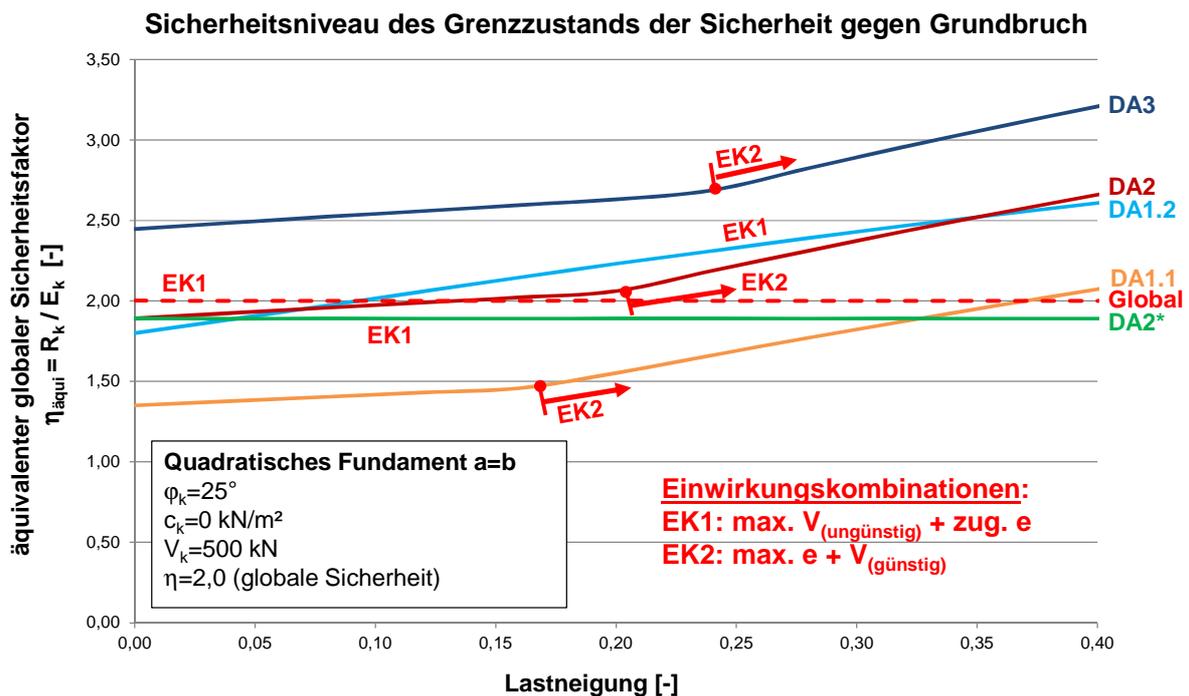


Abbildung 1.5: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Lastneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

Reibungswinkel

Für eine Variation des Reibungswinkels ergeben sich für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch mit zunehmendem Reibungswinkel kleinere erforderliche Fundamentbreiten (siehe Abbildung 1.6 und Abbildung 1.7). Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergeben sich dieselben konstanten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren wie für eine Variation der Lastneigung (siehe Anhang B). Für den

Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch haben sie die gleiche Tendenz, jedoch liegt DA1.1 meistens über DA2* (siehe Abbildung 1.8).

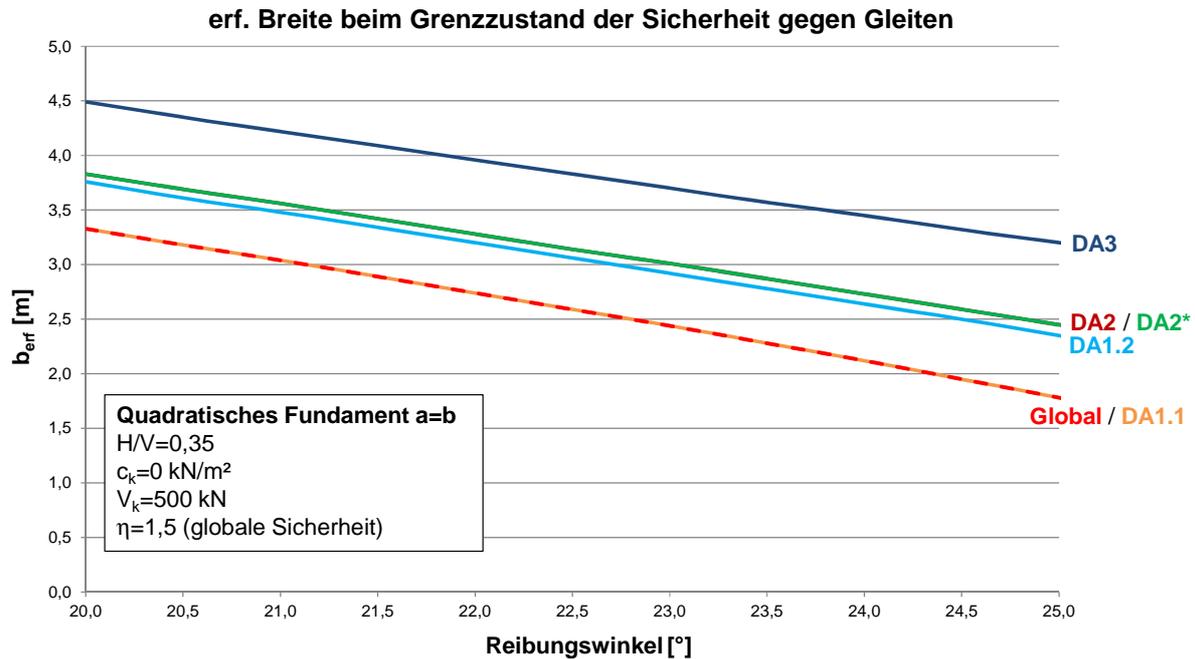


Abbildung 1.6: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

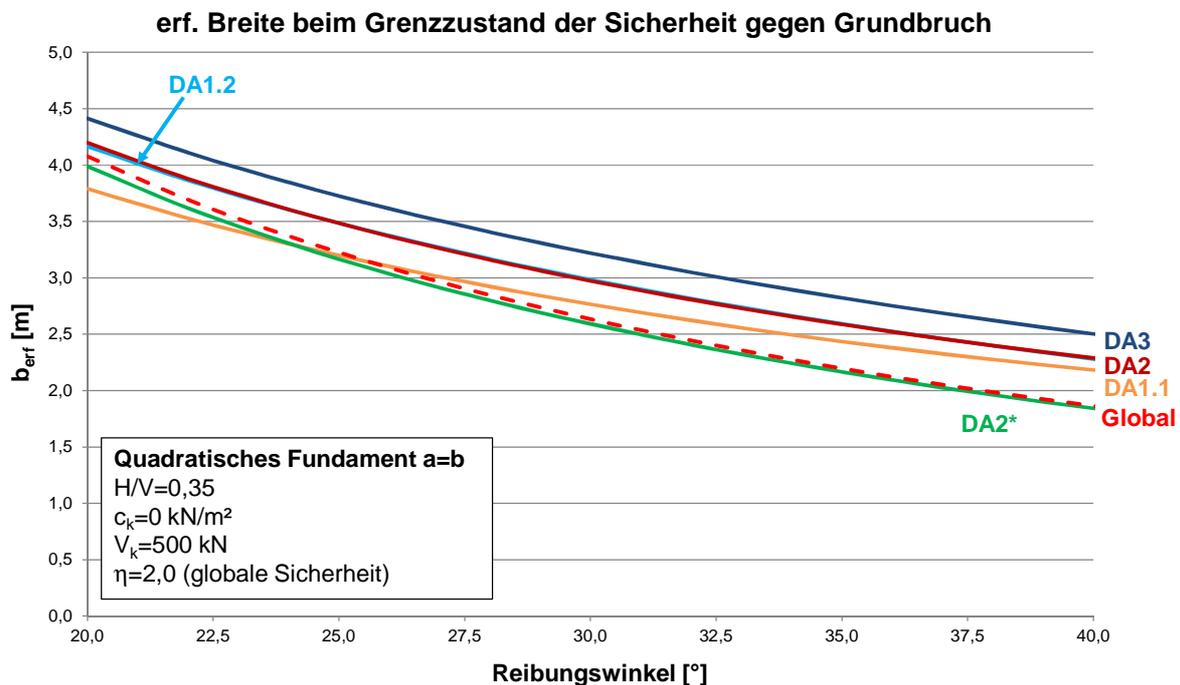


Abbildung 1.7: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

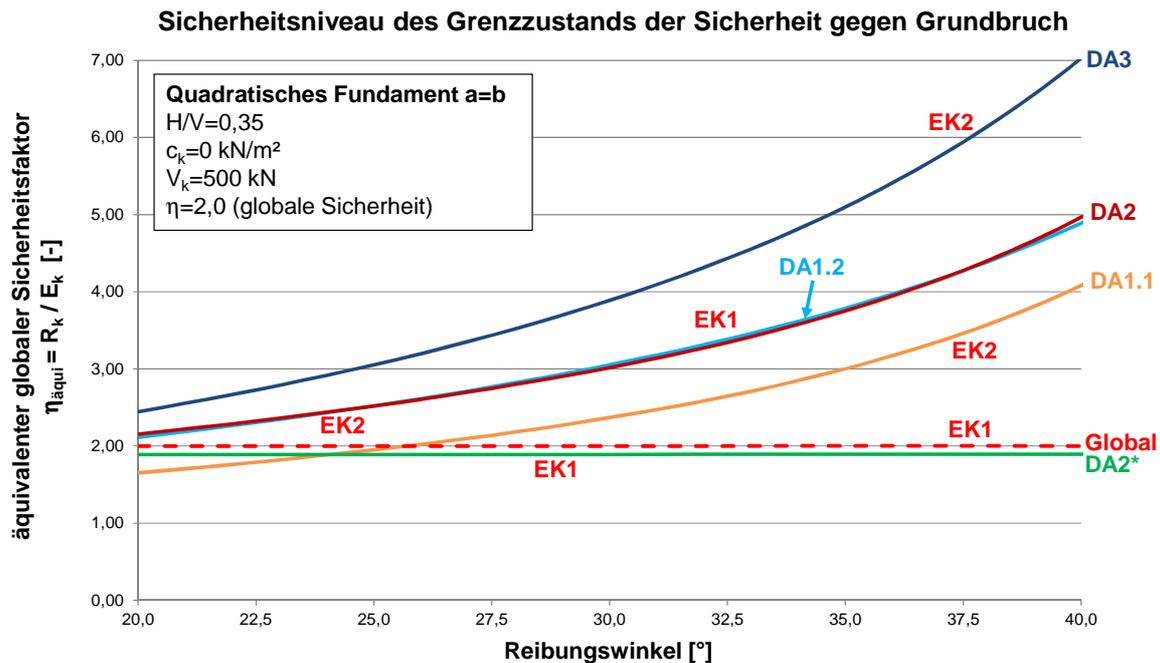


Abbildung 1.8: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

Kohäsion im drainierten Zustand

Um den Einfluss der Kohäsion für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten zu untersuchen, wurde eine Sohlneigung von 5° angenommen. Hierbei wurden zwei Gleitflächen untersucht: eine entlang der geneigten Sohlfläche und eine entlang einer horizontalen Bruchfläche im Boden. Letztere war immer maßgebend, obwohl hier eine Kohäsion bei der Berechnung des Gleitwiderstands berücksichtigt wurde (siehe Anhang B).

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch wurden die Berechnungen mit und ohne eine Sohlneigung von 5° durchgeführt.

Für beide Grenzzustände ergibt sich bei der erforderlichen Fundamentbreite und beim äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor die gleiche Tendenz wie bei der Variation des Reibungswinkels. Allerdings liegt DA1.2 meistens unter DA2 für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch (siehe Anhang B).

Kohäsion im undrainierten Zustand

Für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch wurden bei den Berechnungen der Anfangs- und der Endzustand berücksichtigt. Im Endzustand wurde immer mit konstanten Scherparametern ($c_k=5 \text{ kN/m}^2$ und $\varphi_k=20^\circ$) gerechnet, während im Anfangszustand die Kohäsion c_u im undrainierten Zustand variiert wurde.

Um den direkten Einfluss der Kohäsion im undrainierten Zustand für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten zu untersuchen, wurde die Bedingung $0,4 \times V_d$ auf der Widerstandsseite (siehe Kap. 1.2.5) nicht berücksichtigt. Die Berechnungen wurden sowohl für den Anfangs- als auch für den Endzustand durchgeführt, wobei der Anfangszustand immer maßgebend war.

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergibt sich bei der erforderlichen Fundamentbreite die gleiche Tendenz wie bei der Variation des Reibungswinkels oder der

Kohäsion im drainierten Zustand (siehe Anhang B). In Abbildung 1.9 wird der äquivalente globale Sicherheitsfaktor dargestellt, wobei gut zu erkennen ist, dass die Kurven von DA1.1, DA2 und DA3 nahezu parallel verlaufen. Im Vergleich zu den anderen Parametervariationen sind die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren mit Ausnahme von DA2* nicht konstant, sondern steigen mit zunehmender Kohäsion. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei DA1.1, DA1.2, DA2 und DA3 die effektive Sohlfäche A' (siehe Gl. 1.1) mit Bemessungsgrößen ermittelt wird. Somit sind die Sicherheiten nicht nur bei einer Abminderung des Gleitwiderstandes oder der Kohäsion im undrainierten Zustand, sondern auch bei der Berechnung von A' enthalten. Dies führt zu höheren äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren.

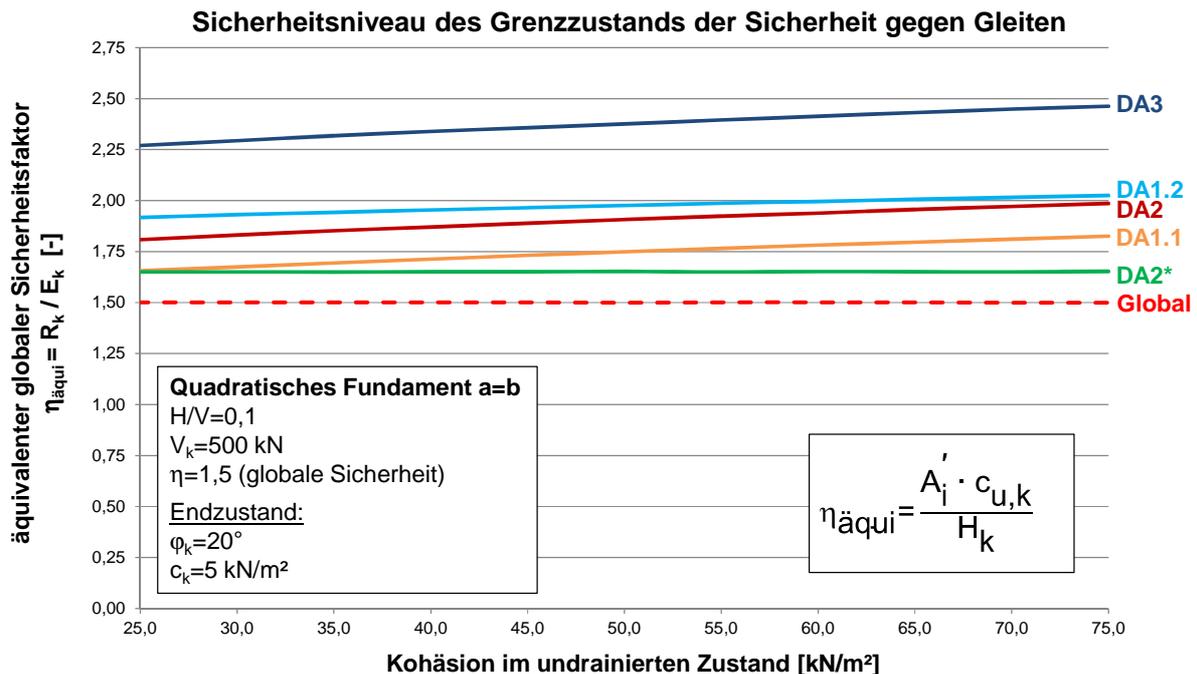


Abbildung 1.9: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die verschiedenen Nachweisverfahren

Abbildung 1.10 zeigt die erforderliche Fundamentbreite für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. In der Abbildung ist ein Übergang des maßgebenden Bemessungszustands vom Anfangszustand auf den Endzustand zu verzeichnen. Damit wird gezeigt, dass die unterschiedlichen Faktorisierungskonzepte der Nachweisverfahren den maßgebenden Bemessungszustand beeinflussen. Beispielsweise liegt der Übergang bei DA1.2 oder DA3 bei niedrigeren Kohäsionen als bei DA2, DA2* oder DA1.1.

In dem Bereich, wo noch der Anfangszustand maßgebend ist, ergeben sich für DA2, DA3 und den globalen Fall fast identische Ergebnisse. Sie unterscheiden sich bei der Fundamentbreite nur um wenige Zentimeter. Die Ergebnisse von DA1.2 liegen deutlich unterhalb der Ergebnisse von DA3. Das zeigt, dass wenn die Kohäsion im undrainierten Zustand und die Einwirkungen faktorisiert werden, die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen einen starken Einfluss auf die Bemessung hat. Hingegen liegen die Ergebnisse von DA2* nur geringfügig unterhalb der Ergebnisse von DA2. Somit hat eine Faktorisierung der Einwirkungen keinen großen Einfluss auf die Bemessung, wenn der Grundbruchwiderstand faktorisiert wird.

Abbildung 1.11 zeigt den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor. In dem Bereich, wo der Anfangszustand maßgebend ist, ergeben sich für DA1.1, DA1.2, DA2 und DA3 leicht

steigende Sicherheitsfaktoren mit zunehmender Kohäsion. Wenn der Endzustand maßgebend ist, bleibt der äquivalente globale Sicherheitsfaktor konstant.

erf. Breite beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch

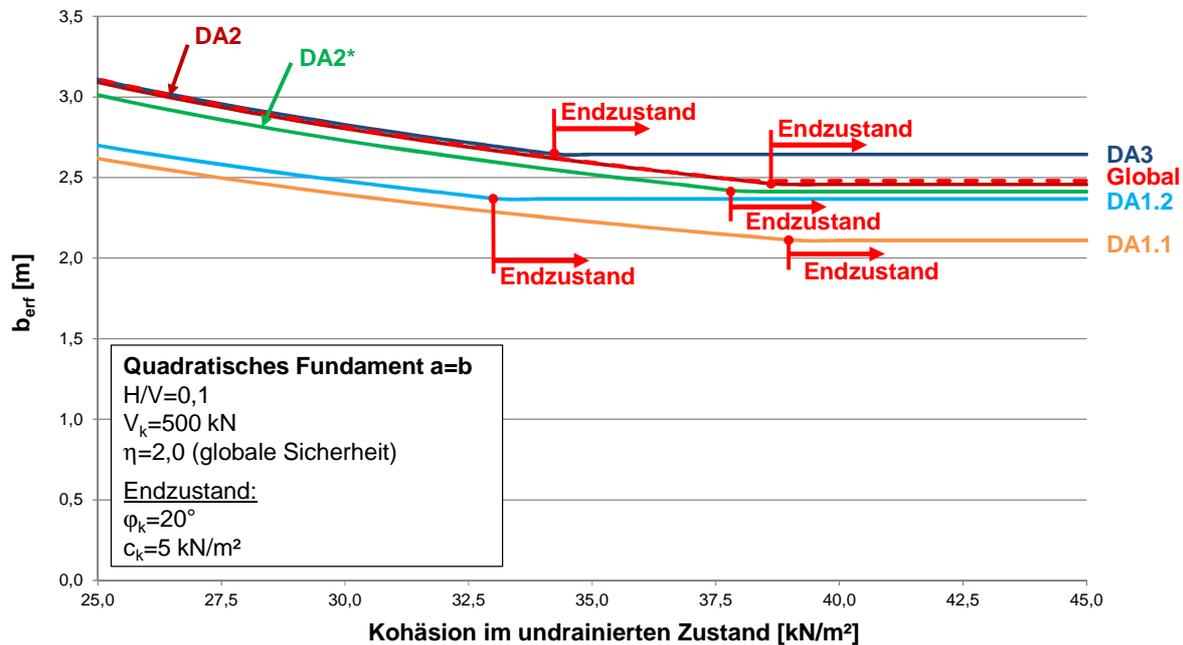


Abbildung 1.10: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die verschiedenen Nachweisverfahren

Sicherheitsniveau des Grenzzustands der Sicherheit gegen Grundbruch

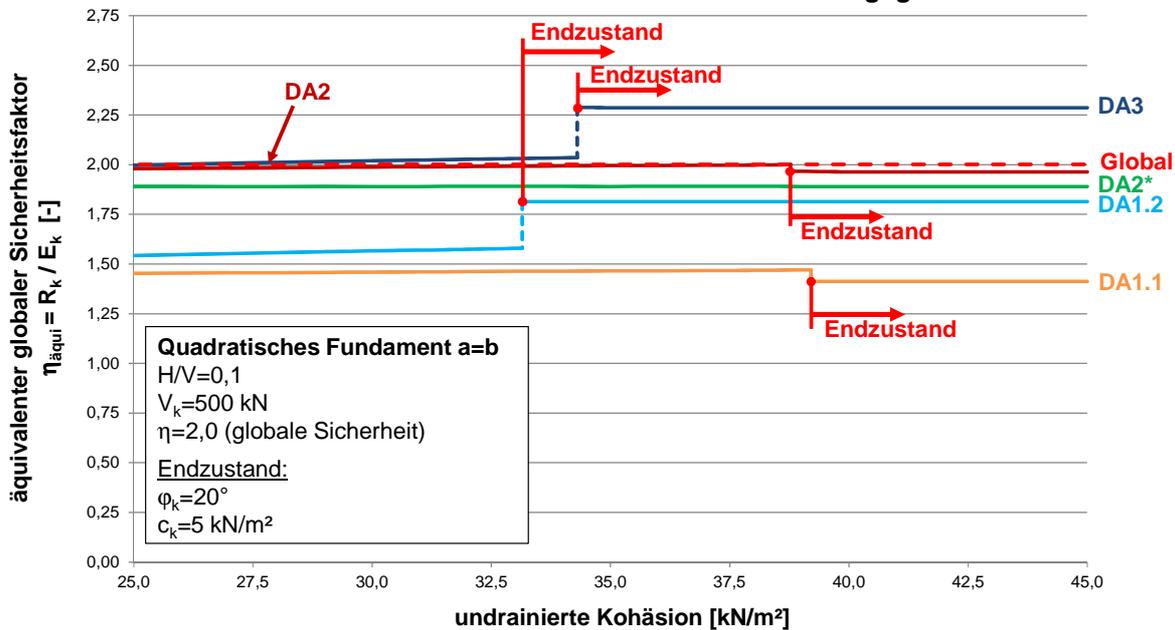


Abbildung 1.11: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die verschiedenen Nachweisverfahren

Sohlneigung

Bei der Untersuchung einer Variation der Sohlneigung wurden Berechnungen sowohl für einen nichtbindigen als auch für einen bindigen Boden mit c_k=5 kN/m² durchgeführt. Wie bei der

Variation der Kohäsion im drainierten Zustand wurden für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten eine Gleitfläche entlang der geneigten Sohlfläche (ES) und eine Gleitfläche entlang einer horizontalen Bruchfläche im Boden (EB) untersucht. Bei der Gleitfläche entlang der geneigten Sohlfläche ergibt sich die Beanspruchung für den Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten parallel zur Fundamentsohle. Hierbei werden die vertikalen und horizontalen Einwirkungen in sohlflächenparallele und sohlflächennormale Einwirkungen umgerechnet. Da die sohlflächenparallele Komponente der vertikalen Einwirkung der entsprechenden Komponente der horizontalen Einwirkung entgegenwirkt, wird die sohlflächenparallele Beanspruchung mit zunehmender Sohlneigung kleiner. Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch führt dies auch zu einer Abnahme der Lastneigung mit zunehmender Sohlneigung, was sich günstig auf die Bemessung auswirkt (siehe Abbildung 1.12).

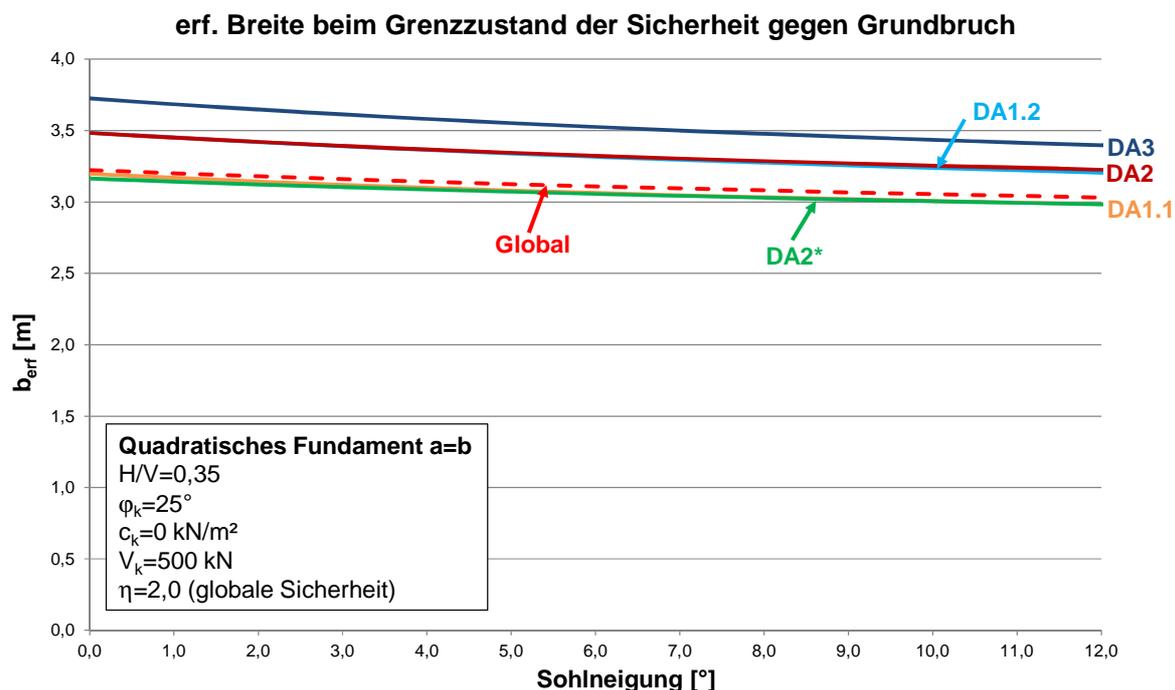


Abbildung 1.12: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ist für den nichtbindigen Boden bei Sohlneigungen größer null die Gleitfläche entlang einer horizontalen Bruchfläche im Boden maßgebend. Der äquivalente globale Sicherheitsfaktor ist wie bei der Variation der Lastneigung oder des Reibungswinkels konstant (siehe Anhang B).

Für den bindigen Boden ist hingegen ein Übergang der maßgebenden Gleitfläche zu verzeichnen. Für sehr kleine Sohlneigungen ist die Gleitfläche entlang der geneigten Sohlfläche maßgebend, zwischen 1° und 2° findet dann der Übergang zur Gleitfläche im Boden statt. Abbildung 1.13 und Abbildung 1.14 zeigen die erforderliche Fundamentbreiten und die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für die verschiedenen Nachweisverfahren. In dem Bereich, in dem die maßgebende Gleitfläche der geneigten Sohlfläche entspricht, steigt die Kurve für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor mit zunehmender Sohlneigung an. Es ist hier auch zu erkennen, dass die Kurven nahezu parallel sind. Wenn die Bruchfläche im Boden maßgebend ist, bleibt der äquivalente globale Sicherheitsfaktor konstant.

Für DA2 und DA2* ergeben sich fast identische Ergebnisse, abgesehen von geringfügigen Abweichungen, wenn die geneigte Sohlfläche die maßgebende Gleitfläche ist. Die größten

erforderlichen Fundamentbreiten bzw. die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren werden für DA3 berechnet.

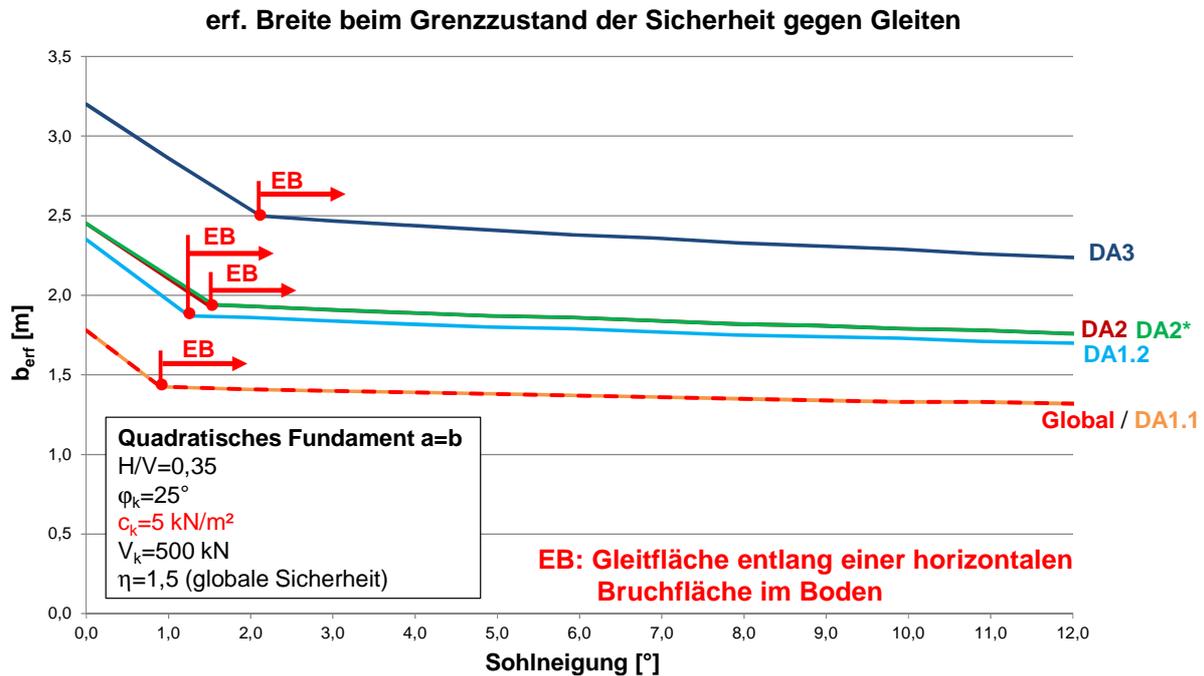


Abbildung 1.13: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

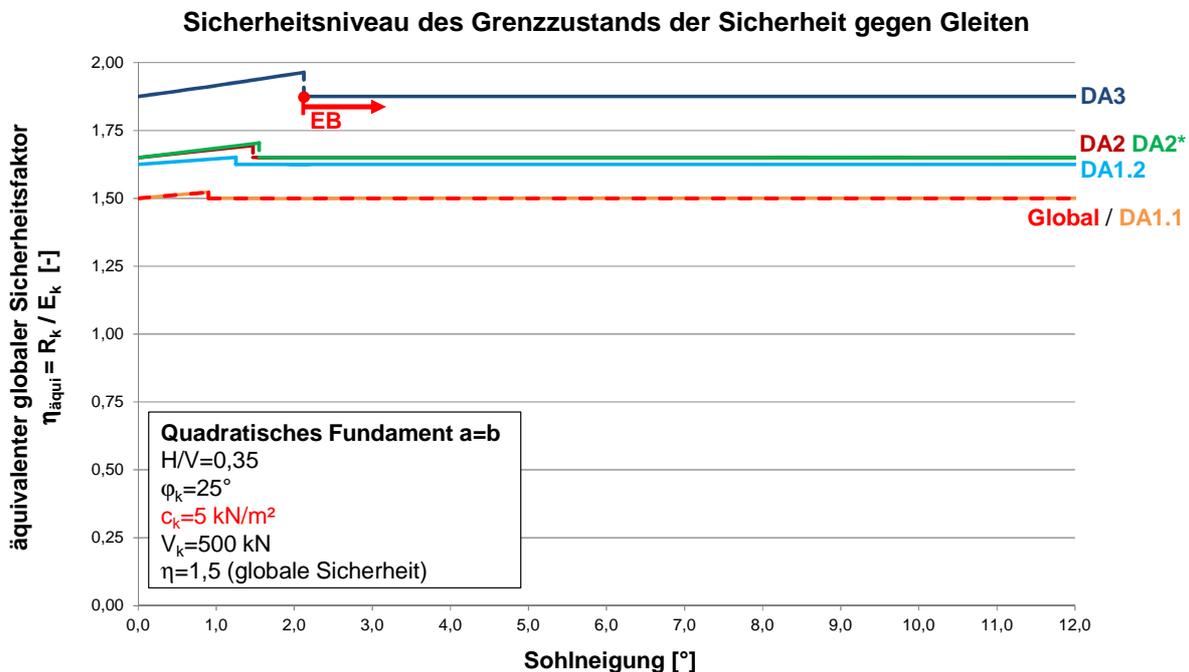


Abbildung 1.14: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch ergeben sich ähnliche Ergebnisse für den nichtbindigen und den bindigen Boden. Beim bindigen Boden werden wegen der Berücksichtigung einer Kohäsion kleinere erforderlichen Fundamentbreiten bzw. höhere äquivalente globale Sicherheitsfaktoren berechnet. In Abbildung 1.15 ist gut zu erkennen, dass sich DA2 und DA1.2 bzw. DA2* und DA1.1 im Vergleich zur Abbildung 1.12 unterscheiden.

Allerdings ist die Tendenz der Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor beim nichtbindigen und bindigen Boden gleich. Mit Ausnahme von DA2* nimmt der äquivalente globale Sicherheitsfaktor mit steigender Sohlneigung ab, wobei sich für DA3 die höchsten Sicherheitsfaktoren ergeben (siehe Abbildung 1.16). Außerdem sind die Kurven von DA1.1, DA2 und DA3 nahezu parallel.

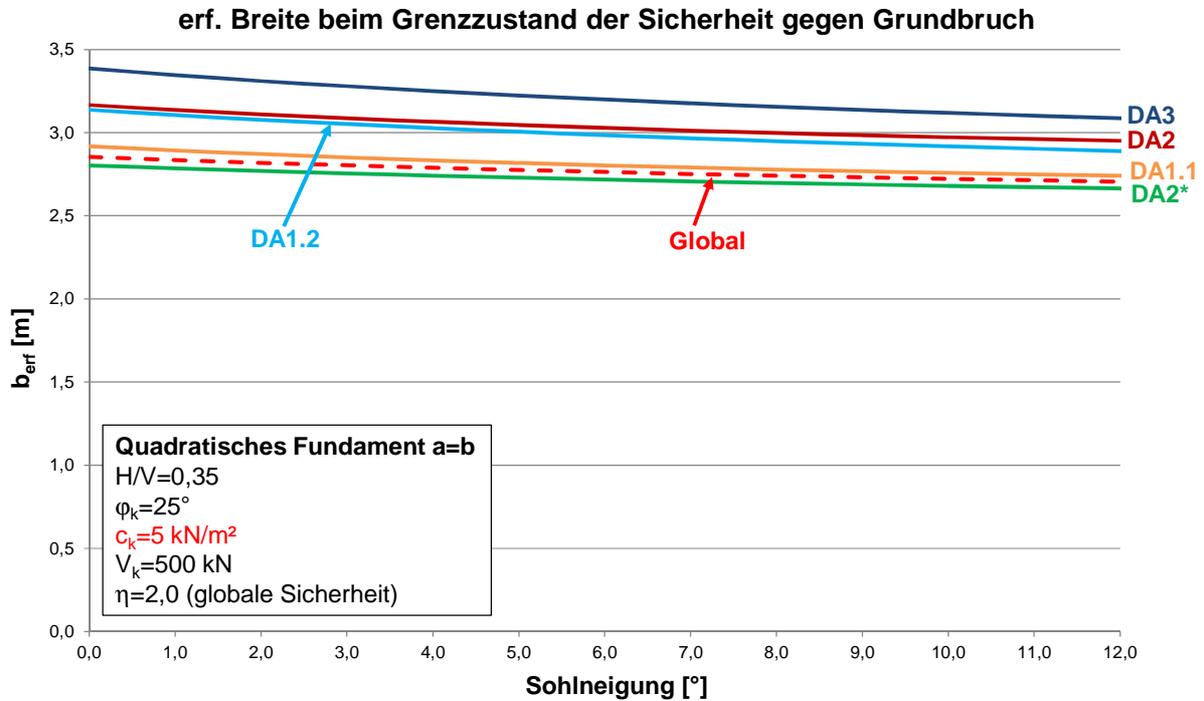


Abbildung 1.15: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

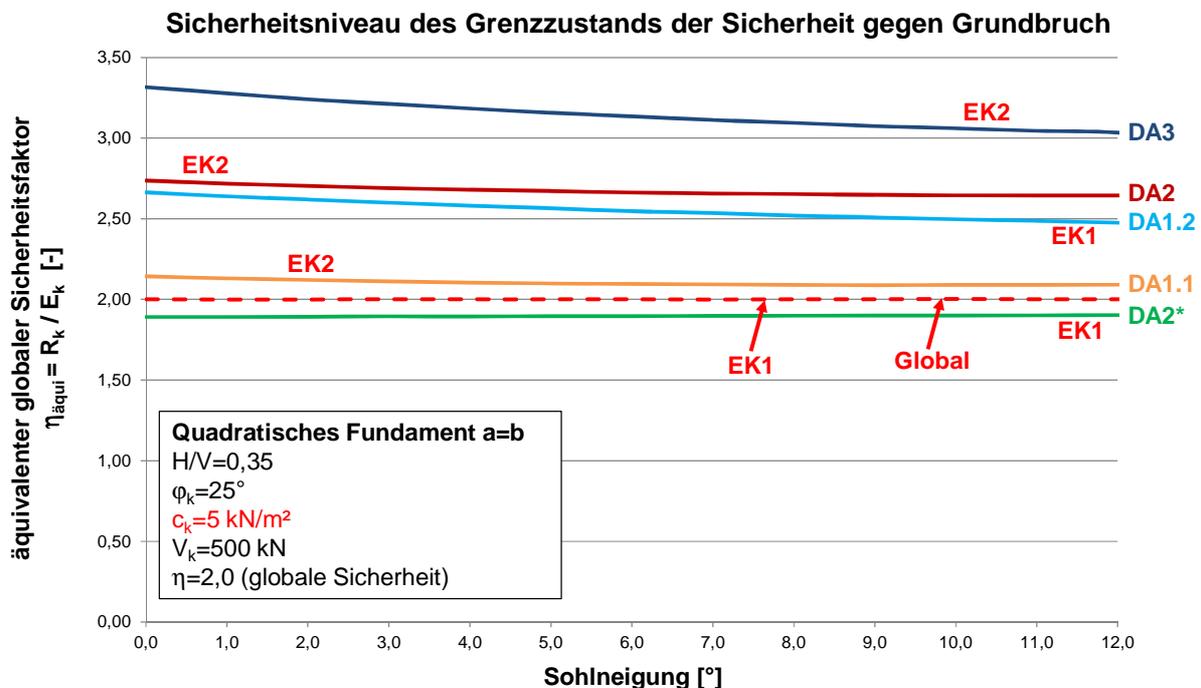


Abbildung 1.16: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Böschungswinkel und Bermenbreite

Ein Böschungswinkel β oder eine Bermenbreite S haben keinen Einfluss auf die Sicherheit gegen Gleiten, weil bei der Berechnung des Gleitwiderstands auf der sicheren Seite liegend kein passiver Erddruck angesetzt wurde. Daher wurden bei der Untersuchung des Einflusses des Böschungswinkels und der Berücksichtigung einer Bermenbreite nur Berechnungen für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch durchgeführt. Wie für die Variation der Sohlneigung wurde das Stützenfundament für einen nichtbindigen und einen bindigen Boden bemessen.

Bei den Berechnungen für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch wurden nach DIN 4017 Böschungswinkel untersucht, die kleiner sind als der Reibungswinkel des Bodens. Bei der Berücksichtigung einer Bermenbreite wurde $\beta = 10^\circ$ angesetzt. Bei der Berechnung des Grundbruchwiderstands wird die Bermenbreite über eine Ersatzeinbindetiefe $d' = d + 0,8 \cdot S \cdot \tan \beta$ berücksichtigt. Nach DIN 4017 ist jedoch eine Vergleichsrechnung mit $\beta = 0^\circ$ und $d' = d$ durchzuführen. Der kleinere Wert zwischen der Berechnung mit $d' \neq d$ und der Vergleichsrechnung ist maßgebend.

Abbildung 1.17 zeigt die erforderliche Fundamentbreite für eine Variation des Böschungswinkels für den nichtbindigen Boden. Es ist gut zu erkennen, dass mit steigendem Böschungswinkel die erforderliche Fundamentbreite nichtlinear zunimmt. Bei großen Böschungswinkeln ergeben sich für das hier berechnete Beispielfundament unrealistische Abmessungen, z. B. Fundamentbreiten über 5,0 m ab einem Böschungswinkel von ca. 18° für DA3. Daher sind die Berechnungen teilweise als akademisch zu betrachten.

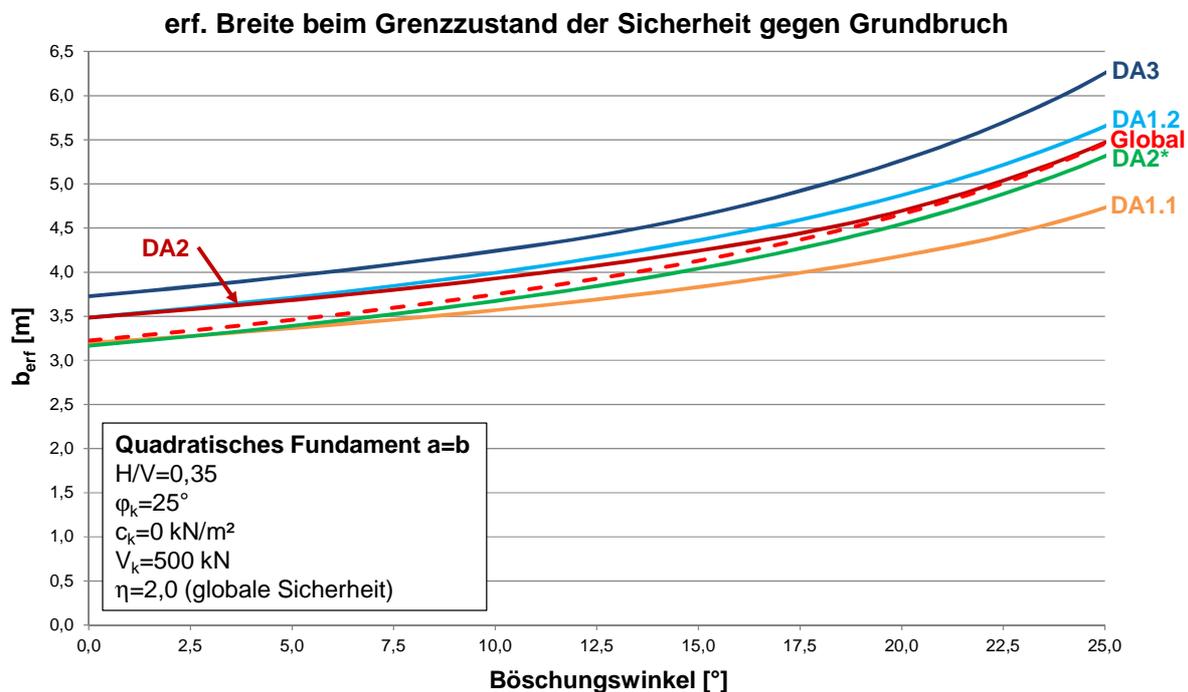


Abbildung 1.17: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

Abbildung 1.18 zeigt den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für den nichtbindigen Boden, wobei ein Übergang der maßgebenden Einwirkungskombination für DA1.1, DA2 und DA3 durch einen Knick zu verzeichnen ist. Bis zu diesem Übergang ist die Einwirkungskombination EK2 maßgebend, danach EK1. Der Übergang ist bei den Berechnungen für den bindigen

Boden nicht mehr vorhanden, wie in Abbildung 1.19 dargestellt wird. Außerdem führt die Berücksichtigung einer Kohäsion dazu, dass DA2 bei geringen Böschungswinkeln über DA1.2 liegt, was für den nichtbindigen Boden nicht der Fall war. Allerdings sind die Kurven von DA1.1, DA2 und DA3 für beide Bodenarten nahezu parallel.

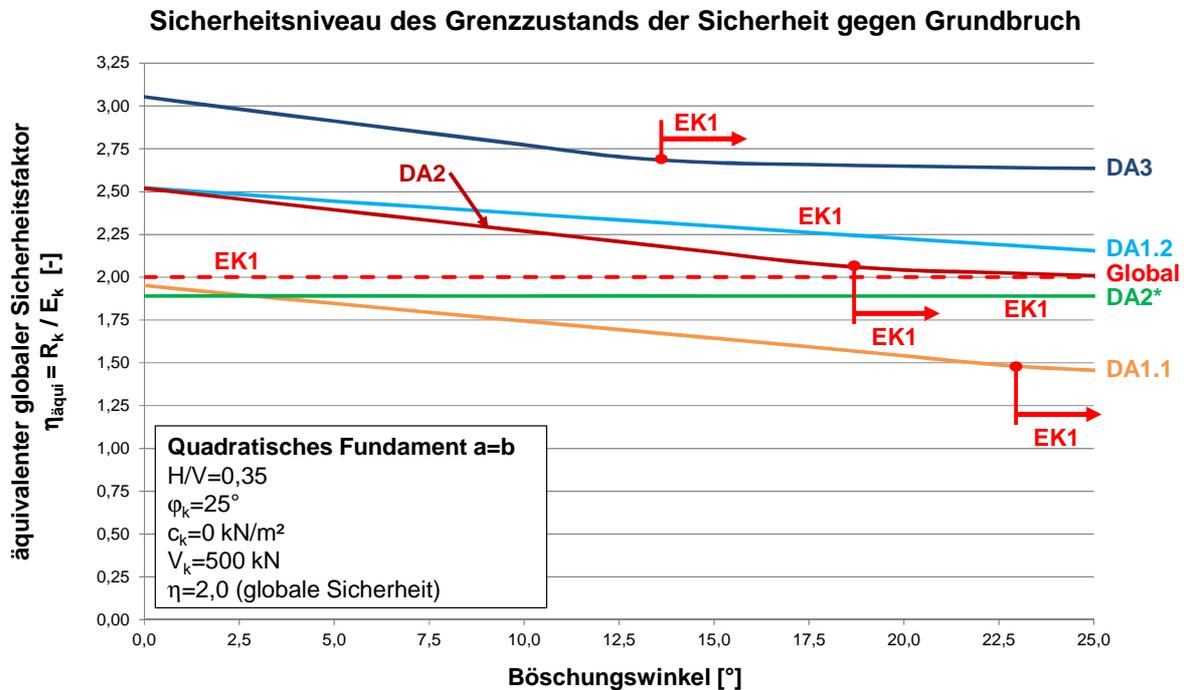


Abbildung 1.18: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

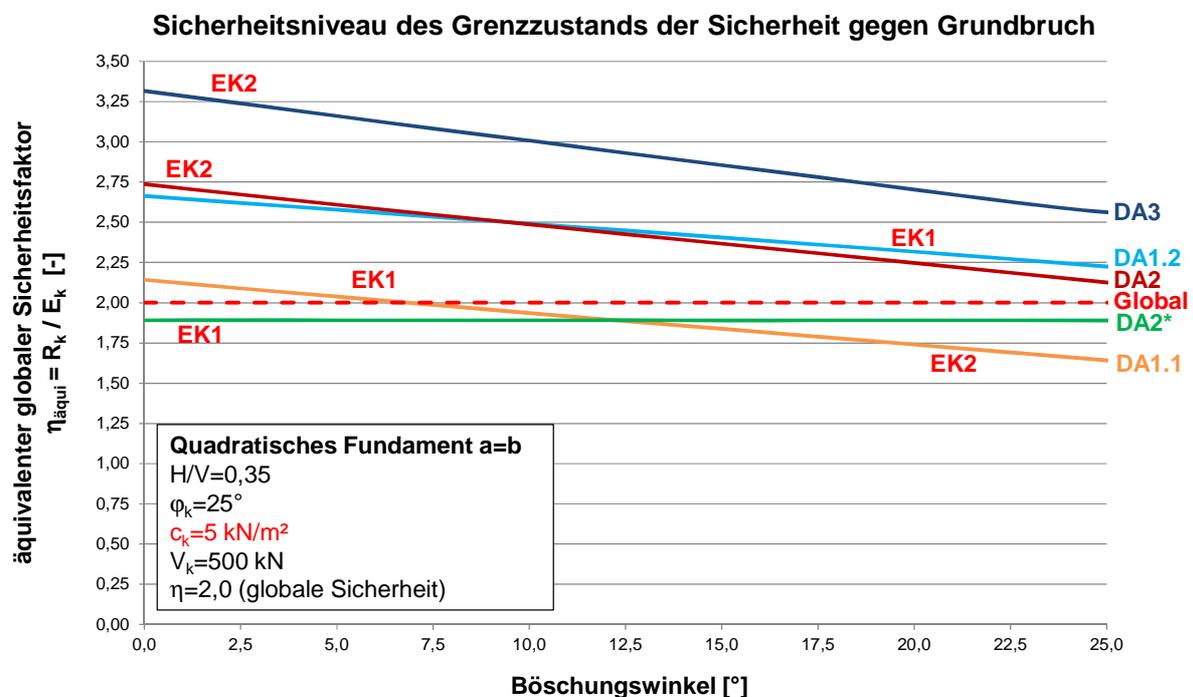


Abbildung 1.19: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Für die Variation der Bermenbreite war die Berechnung mit $d' \neq d$ immer maßgebend. Es ergeben sich erforderliche Fundamentbreiten, die mit steigender Bermenbreite linear abnehmen (siehe Abbildung 1.20). Der äquivalente globale Sicherheitsfaktor nimmt hingegen leicht zu oder bleibt wie z. B. bei DA1.2 oder DA2* konstant (siehe Abbildung 1.21). Beim bindigen Boden liegen die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor von DA2 im Vergleich zum nichtbindigen Boden teilweise oberhalb denen von DA1.2. Derselbe Effekt ist zwischen DA1.1 und DA2* zu beobachten (siehe Abbildung 1.22).

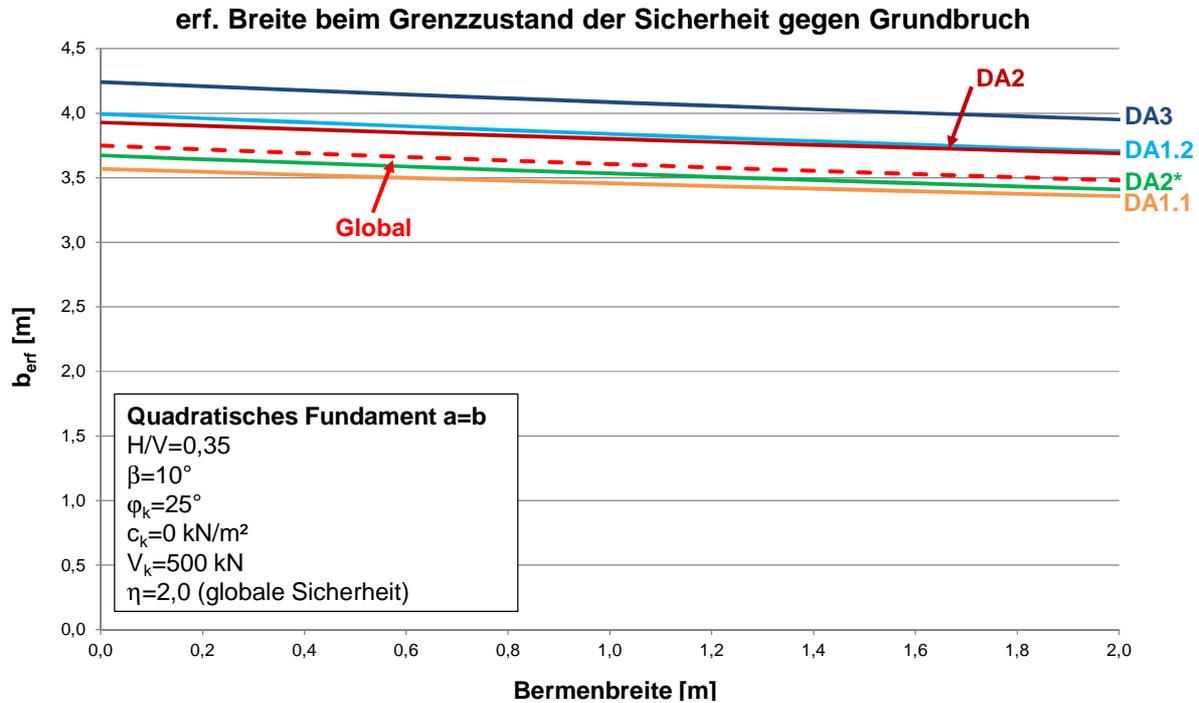


Abbildung 1.20: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Bermenbreite für die verschiedenen Nachweisverfahren

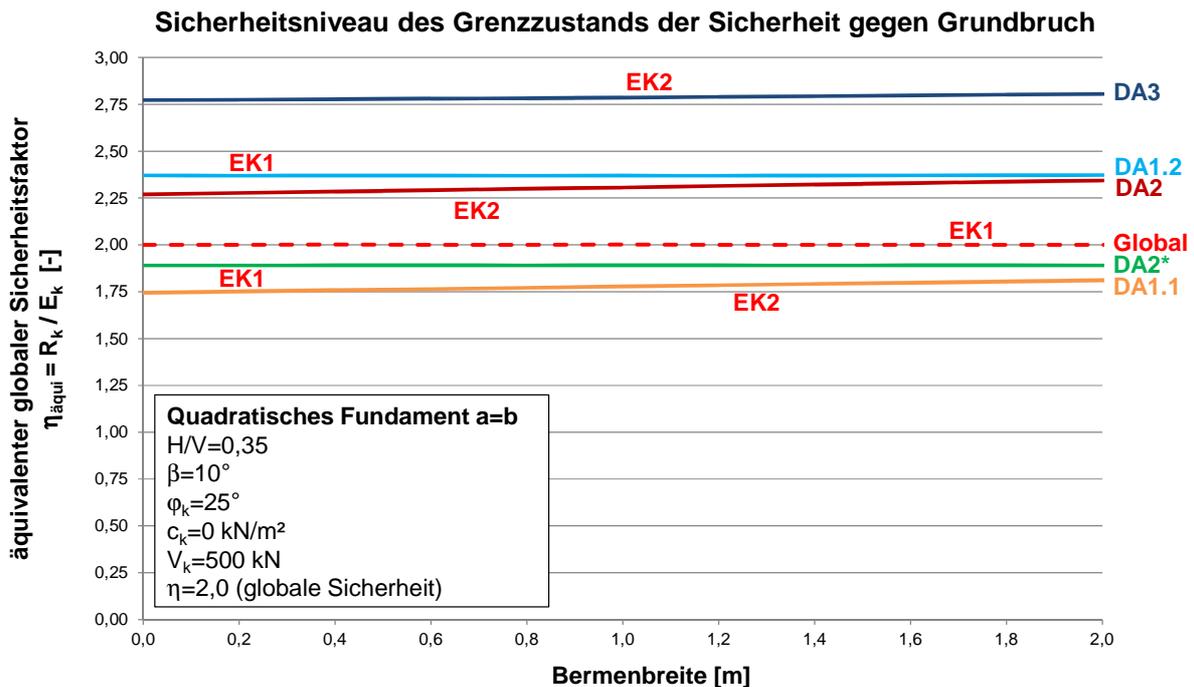


Abbildung 1.21: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Bermenbreite für die verschiedenen Nachweisverfahren

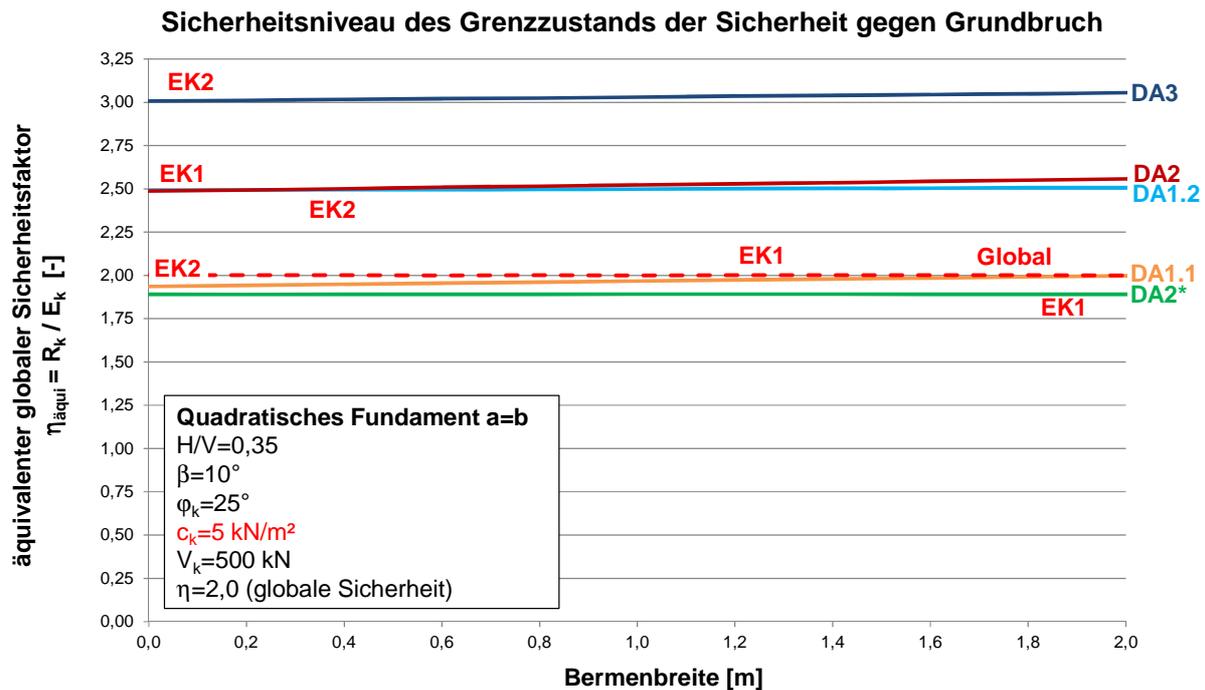


Abbildung 1.22: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Bermenbreite für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Hebelarm

Für die Variation des Hebelarms der horizontalen Einwirkung wurden zunächst Berechnungen unter Berücksichtigung von Parametern im drainierten Zustand mit $c_k=0 \text{ kN/m}^2$ und $\varphi_k=25^\circ$ durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Einfluss von Parametern im undrainierten Zustand untersucht. Hierfür wurden immer eine Berechnung für den Anfangszustand mit den undrainierten Parametern $c_{u,k}=25 \text{ kN/m}^2$ und $\varphi_{u,k}=0^\circ$ und eine Berechnung für den Endzustand mit den drainierten Parametern $c_k=5 \text{ kN/m}^2$ und $\varphi_k=20^\circ$ durchgeführt.

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten hat eine Variation des Hebelarms im Endzustand keinen Einfluss auf die Bemessung, da der Gleitwiderstand nur von der vertikalen Einwirkung und von $\tan \delta$ abhängt. Einen Einfluss des Hebelarms gibt es nur für eine Bemessung im Anfangszustand mit Parametern im undrainierten Zustand. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch beeinflusst hingegen eine Variation des Hebelarms immer die Bemessung.

In Abbildung 1.23 wird die erforderliche Fundamentbreite für eine Variation des Hebelarms zwischen 0 und 10 m dargestellt. Dabei wird gezeigt, dass sich bei großen Hebelarmen für das hier gerechnete Beispielfundament unrealistische Abmessungen ergeben. Ab einem Hebelarm von 4,5 m ist sogar für einige Nachweisverfahren der Nachweis der Begrenzung einer klaffenden Fuge nicht erfüllt. Daher sind die Ergebnisse für große Hebelarme als akademisch zu betrachten. Für die Berechnungen wurden dann Hebelarme zwischen 0 und 2,0 m gewählt (siehe Abbildung 1.24).

Abbildung 1.25 zeigt den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. Mit steigendem Hebelarm nehmen die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren zu. Dabei ist wie für andere Parametervariationen gut zu erkennen, dass

die Kurven von DA1.1, DA2 und DA3 parallel verlaufen. Außerdem liegt DA1.2 für Hebelarme bis 1,0 m über DA2, danach unterhalb DA2.

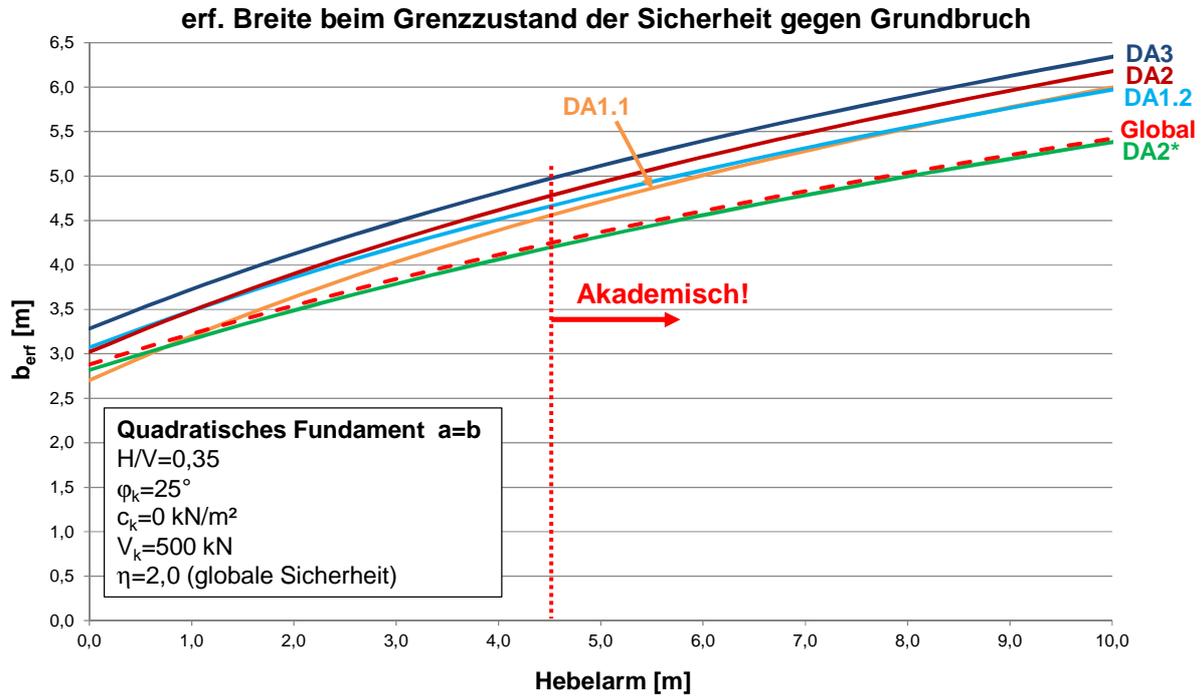


Abbildung 1.23: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Hebelarms für Werte zwischen 0 und 10 m für die verschiedenen Nachweisverfahren

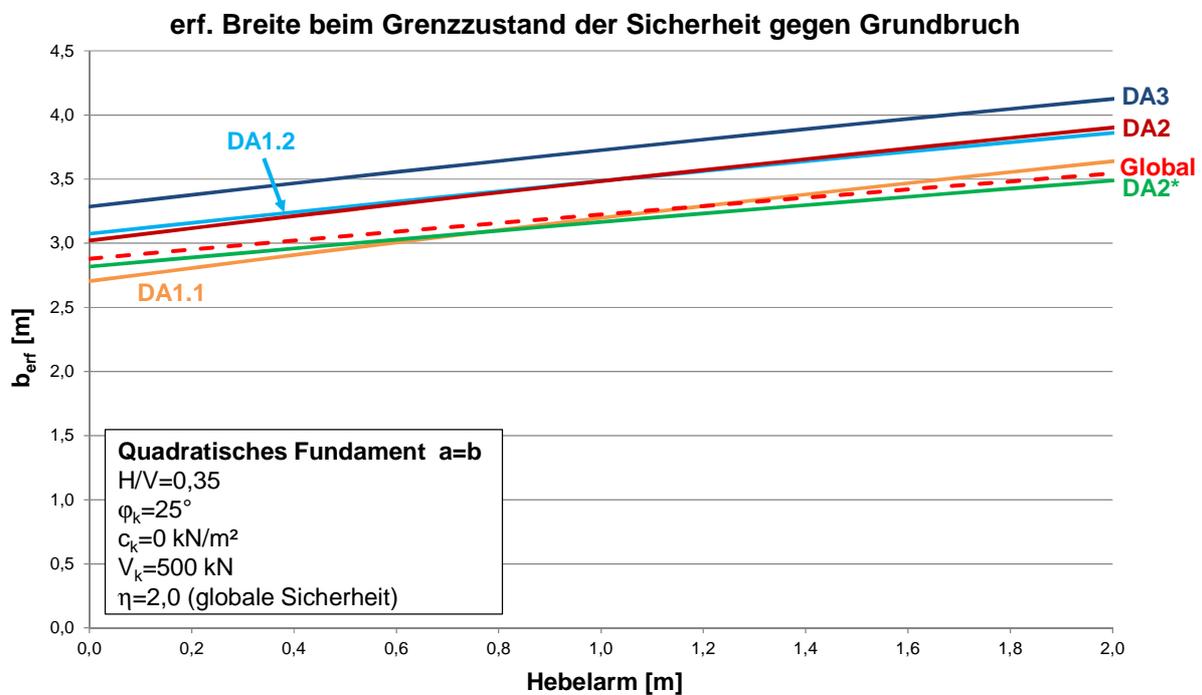


Abbildung 1.24: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Hebelarms für Werte zwischen 0 und 2 m für die verschiedenen Nachweisverfahren

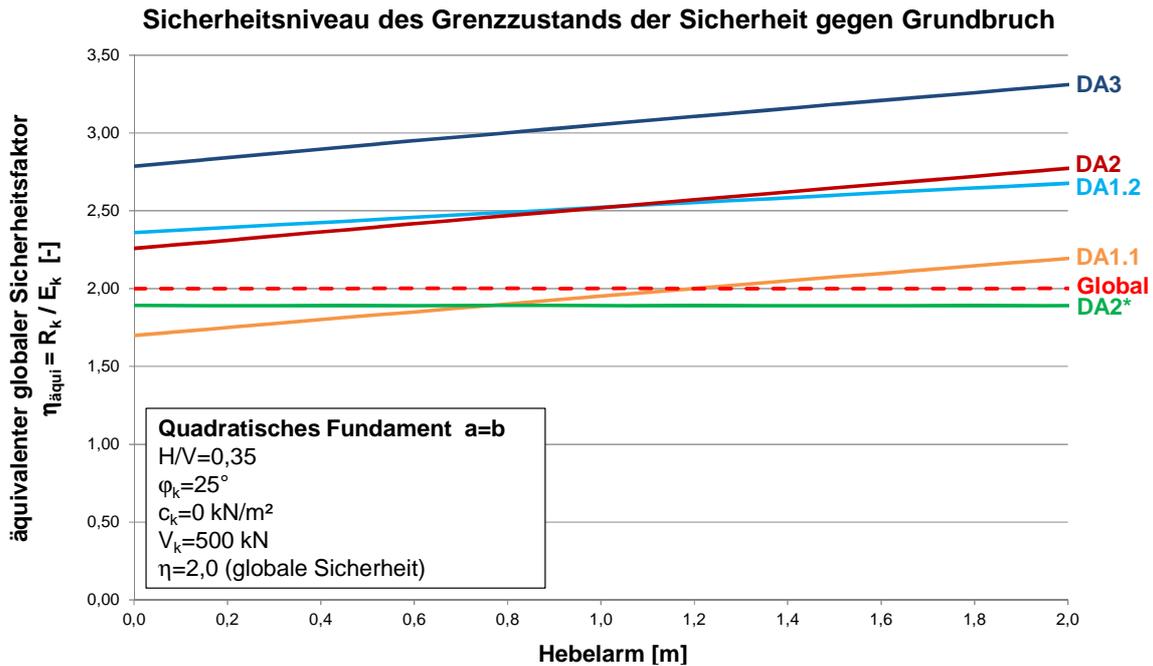


Abbildung 1.25: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Hebelarms für Werte zwischen 0 und 2 m für die verschiedenen Nachweisverfahren

Bei der Untersuchung mit Parametern im drainierten und undrainierten Zustand war immer der Anfangszustand für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch maßgebend. Für beide Grenzzustände steigen die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor aller Nachweisverfahren mit Ausnahme von DA2* mit zunehmendem Hebelarm linear an. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch ist der Anstieg des äquivalenten globalen Sicherheitsfaktors deutlich flacher als für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten (siehe Abbildung 1.26 und Abbildung 1.27).

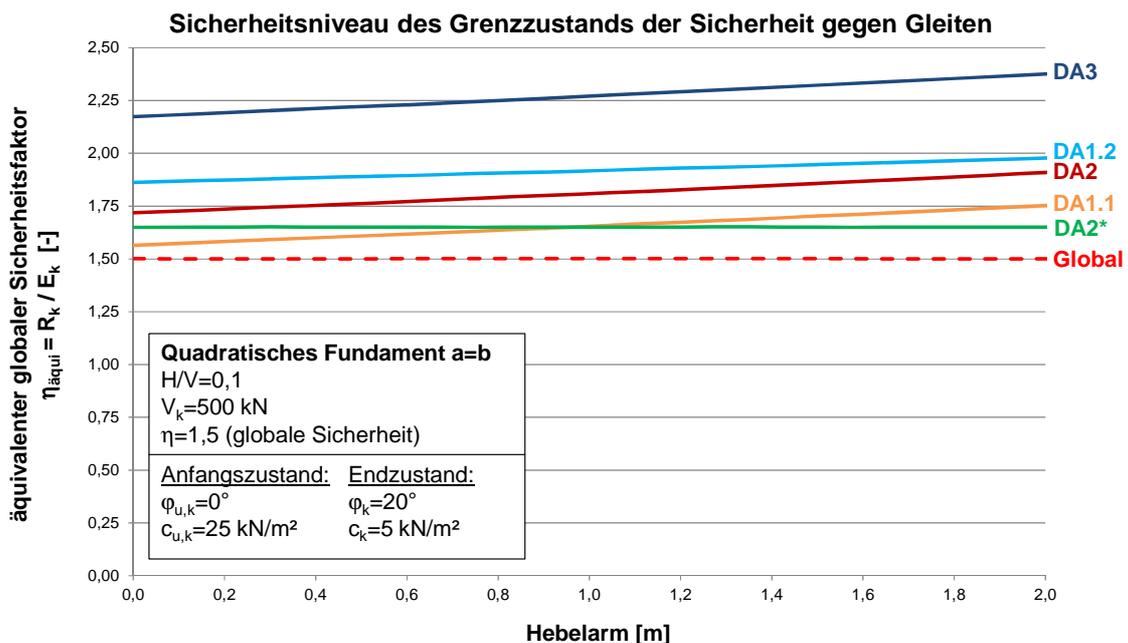


Abbildung 1.26: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Hebelarms für die verschiedenen Nachweisverfahren

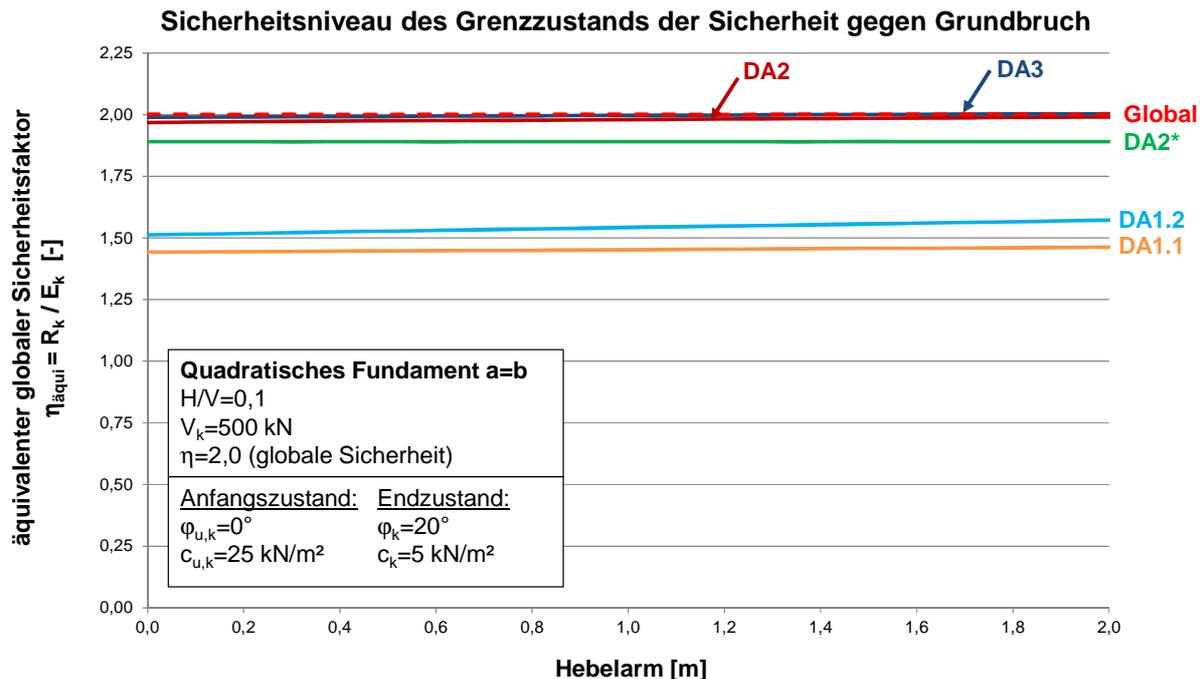


Abbildung 1.27: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Hebelarms für die verschiedenen Nachweisverfahren

Sowohl für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten als auch der Sicherheit gegen Grundbruch verlaufen die Kurven von DA1.1, DA2 und DA3 nahezu parallel, wobei sich für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch fast identische äquivalente globale Sicherheitsfaktoren für DA2 und DA3 ergeben (siehe Abbildung 1.27).

Der im Rahmen der Berechnungen festgestellte Einfluss des Hebelarms gilt, wenn das aus Hebelarm und horizontaler Einwirkung resultierende Moment in das Fundament übertragen werden kann. Für den Fall, dass zwischen Stütze und Fundament z. B. ein Gelenk eingebaut wird, gibt es keinen Einfluss des Hebelarms auf die Bemessung bzw. das Sicherheitsniveau.

Verhältnis veränderlicher zu ständiger Einwirkungen

Bei der Untersuchung des Verhältnisses der veränderlichen zu den ständigen Einwirkungen wurde der Anteil von veränderlichen und ständigen Einwirkungen sowohl in horizontaler Richtung ($H_{Q,k}/H_{G,k}$) als auch in vertikaler Richtung ($V_{Q,k}/V_{G,k}$) variiert. Bei der Variation in nur einer Richtung blieb das Verhältnis in der anderen Richtung konstant (immer gleich 1,0). Darüber hinaus wurden wie bei der Variation des Hebelarms Berechnungen unter Berücksichtigung von Parametern im undrainierten Zustand durchgeführt.

In Abbildung 1.28 und Abbildung 1.29 ist der äquivalente globale Sicherheitsfaktor für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten dargestellt. Während für eine Variation des vertikalen Verhältnisses die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren konstant bleiben, nehmen die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für eine Variation des horizontalen Verhältnisses bei geringen Verhältnissen schnell zu. Ab einem Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ von ca. 2,5 verlaufen sie nahezu parallel. Es ist gut zu erkennen, dass DA1.2 erst ab einem Verhältnis von ca. 0,8 maßgebend ist. Ab diesem Verhältnis dominieren die horizontalen veränderlichen Einwirkungen. Wie bei den meisten Parametervariationen ergeben sich für DA3 die höchsten und für DA1 (DA1.1 oder DA1.2) die niedrigsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren.

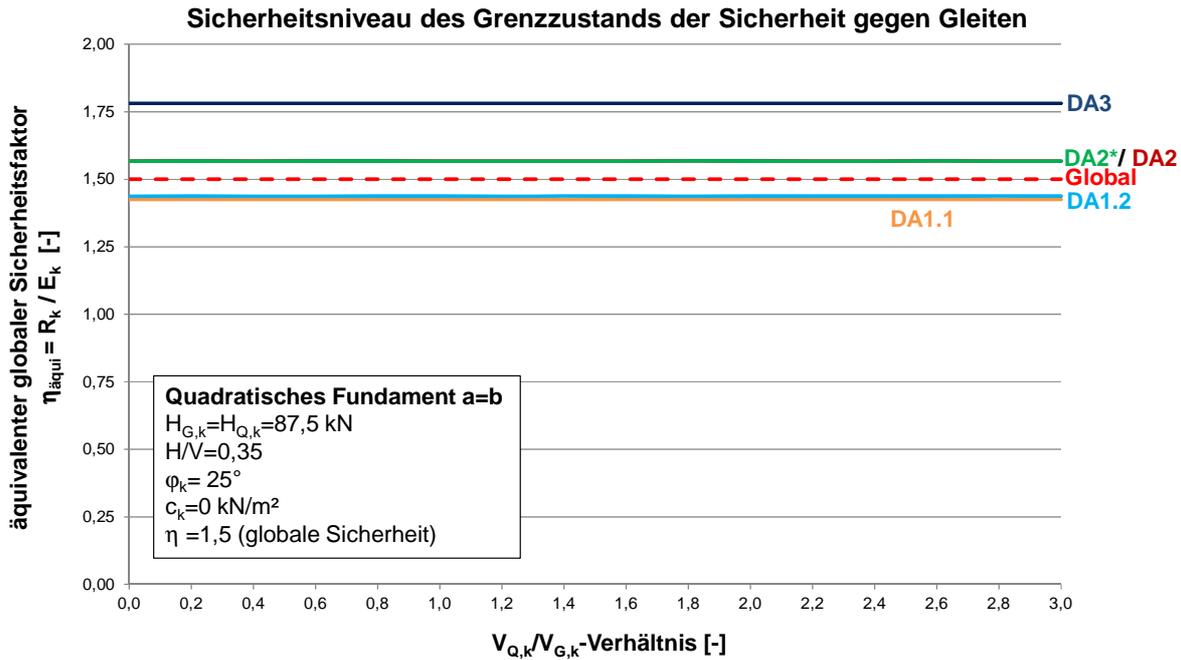


Abbildung 1.28: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k} / V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

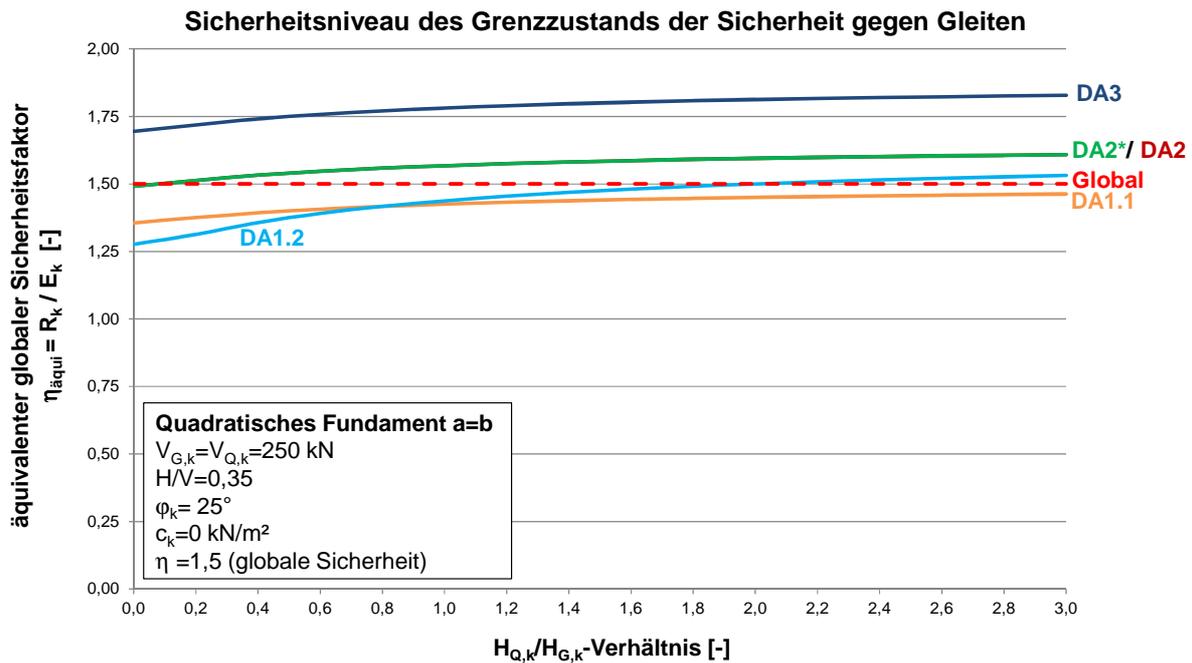


Abbildung 1.29: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k} / H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch ergibt sich für die Verhältnisse in beide Richtungen ein ähnlicher Verlauf der Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor (siehe Abbildung 1.30 und Abbildung 1.31). Wesentliche Unterschiede ergeben sich nur bei DA1. Während in Abbildung 1.30 DA1.1 ab einem Verhältnis $V_{Q,k} / V_{G,k}$ von ca. 0,9 kritischer als DA1.2 ist, ist in Abbildung 1.31 DA1.2 ab einem Verhältnis $H_{Q,k} / H_{G,k}$ von ca. 1,1 maßgebend.

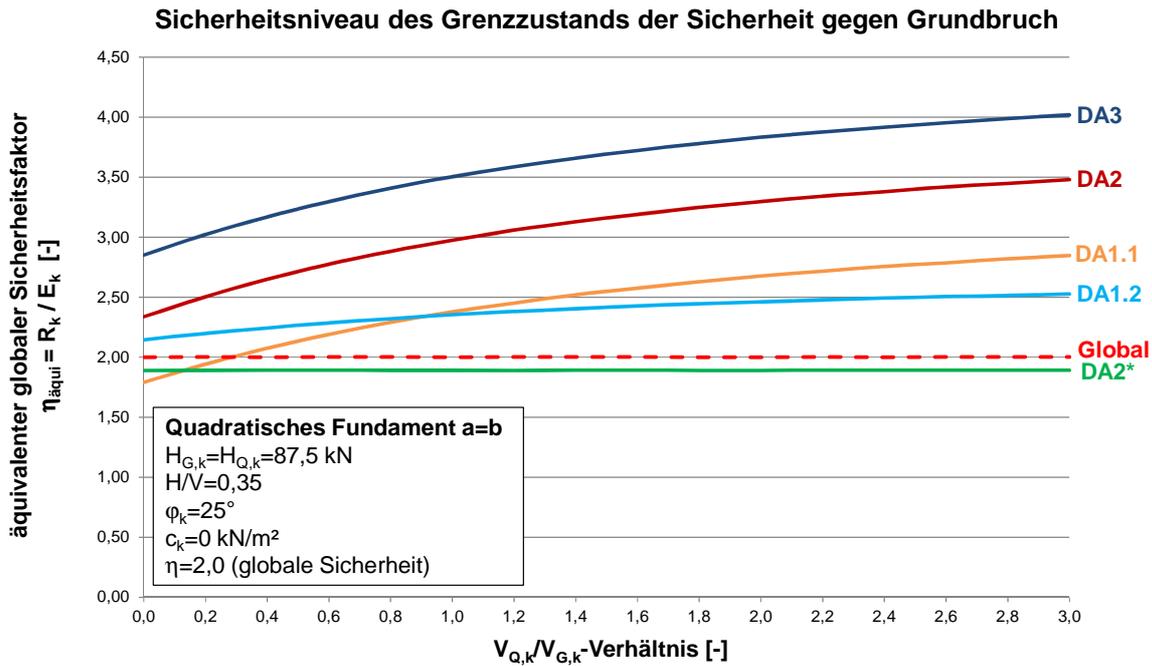


Abbildung 1.30: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

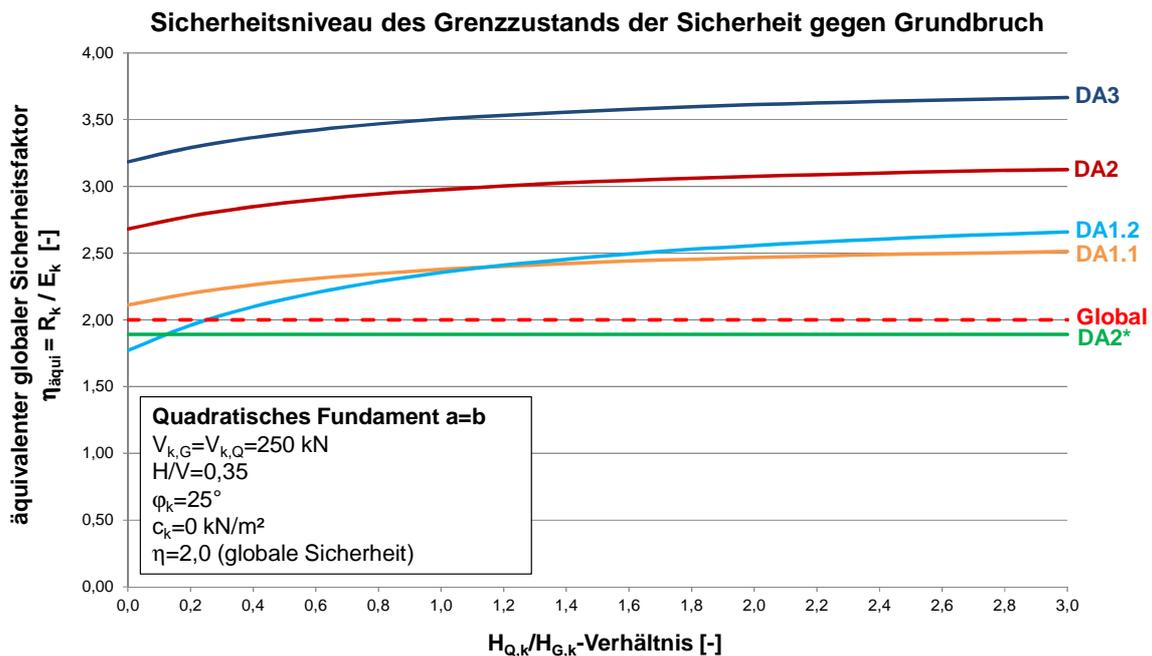


Abbildung 1.31: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

Im Falle der horizontalen Beanspruchung von Stützenfundamenten sind hauptsächlich die veränderlichen horizontalen Einwirkungen gegenüber den ständigen dominant. Hierbei liegt in den meisten Fällen das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ über 1,1, sodass DA1.2 maßgebend ist. Nur für große veränderliche vertikale Einwirkungen kann DA1.1 kritischer sein.

Unter Berücksichtigung von drainierten und undrainierten Zuständen ist der Anfangszustand für beide Grenzzustände maßgebend. Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergibt

sich eine ähnliche Tendenz wie bei dem Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch mit Parametern im drainierten Zustand (siehe Abbildung 1.32 und Abbildung 1.33). Besonders für die Variation von $H_{Q,k}/H_{G,k}$ fällt auf, dass der äquivalente globale Sicherheitsfaktor für DA2* nicht mehr konstant ist.

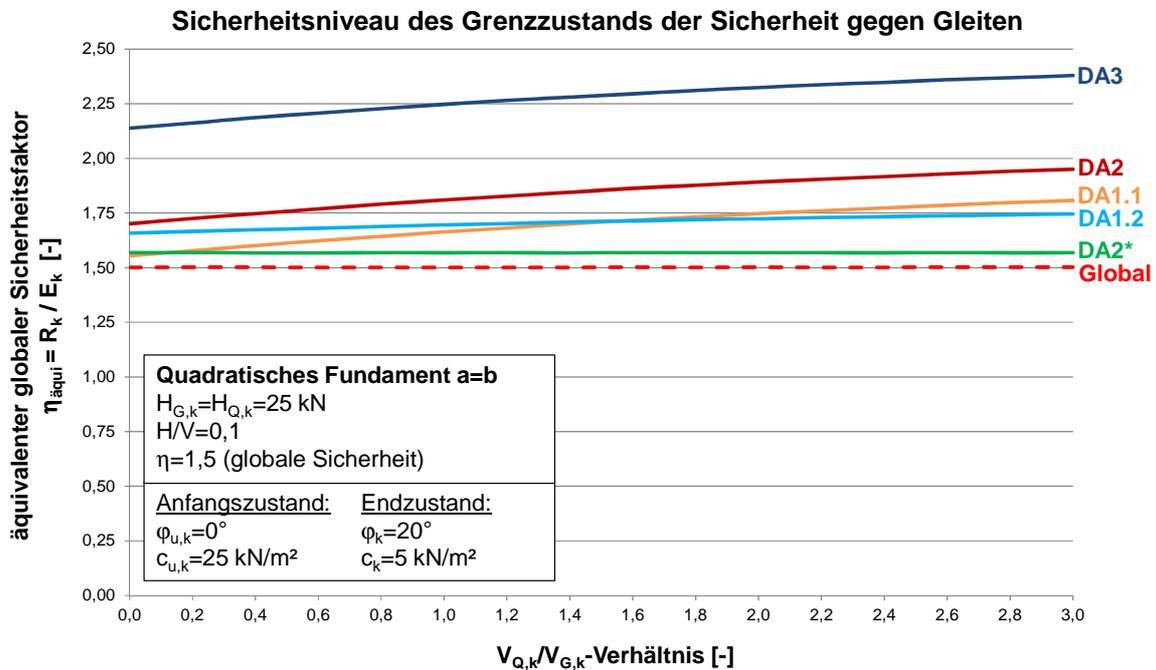


Abbildung 1.32: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

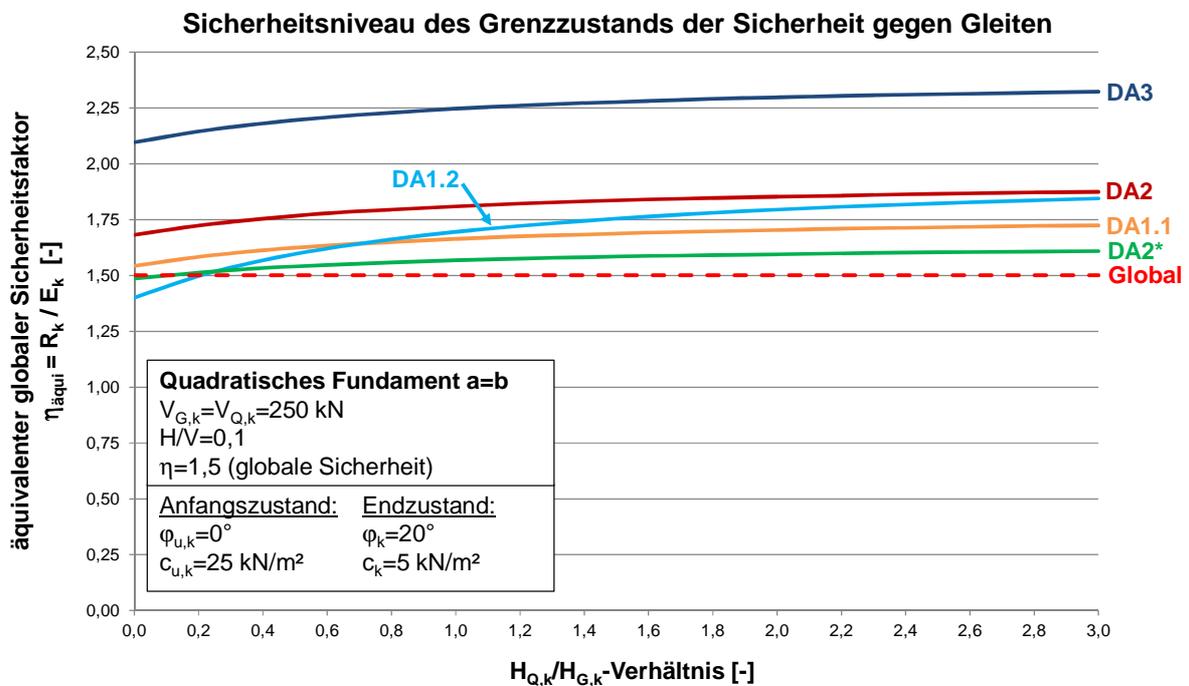


Abbildung 1.33: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

Abbildung 1.34 und Abbildung 1.35 zeigen den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. Ab einem Verhältnis $V_{Q,k}/V_{G,k}$ von ca. 2,0

bzw. $H_{Q,k}/H_{G,k}$ von ca. 1,0 verlaufen die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor nahezu parallel. Unabhängig vom variierten Verhältnis sind die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren von DA2, DA2*, DA3 und dem globalen Fall fast gleich und liegen deutlich oberhalb von DA1.1 bzw. DA1.2.

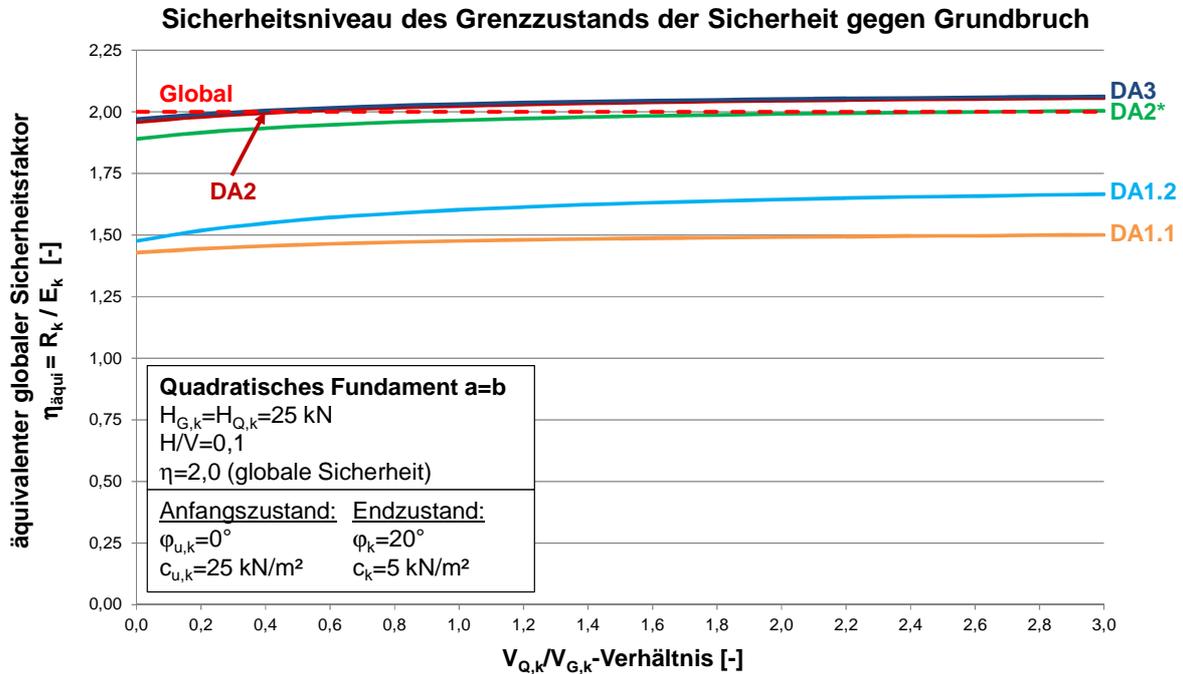


Abbildung 1.34: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

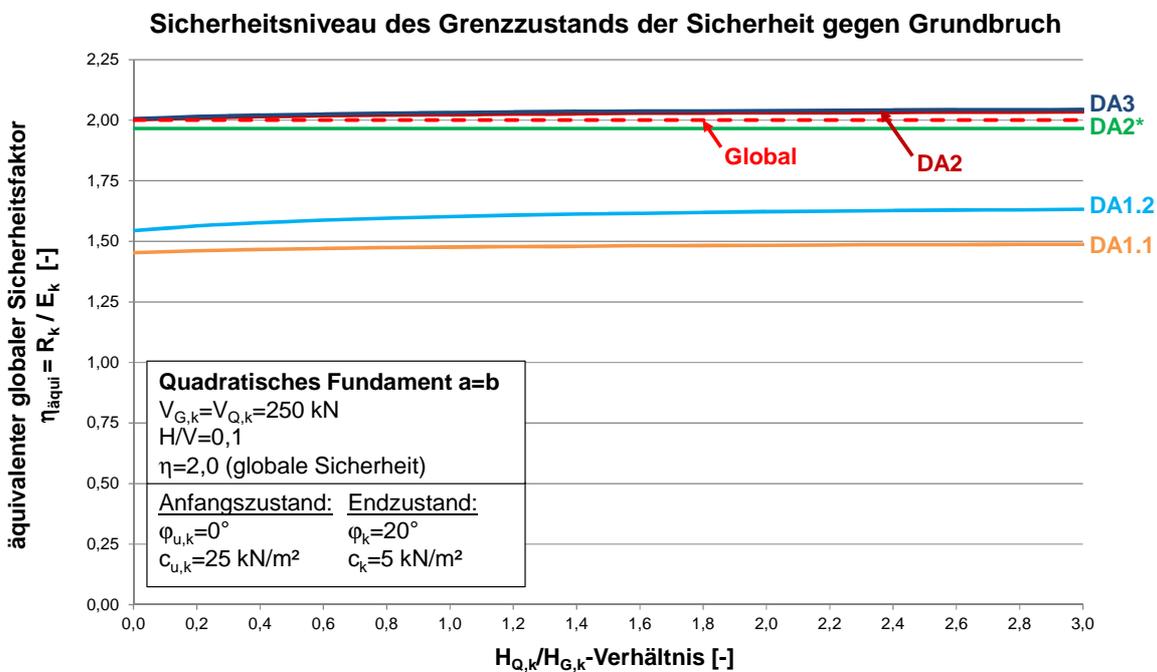


Abbildung 1.35: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

Geometrie

Bei der Untersuchung verschiedener Geometrien wurden zusätzliche Berechnungen für ein Streifenfundament und ein rechteckiges Fundament mit einem Seitenverhältnis a zu b von 1,5 durchgeführt. Die Belastung auf das rechteckige Fundament entspricht der Belastung auf das quadratische Fundament. Bei dem Streifenfundament wurde hingegen eine vertikale Belastung von 100 kN/m angesetzt. Die horizontale Belastung ergab sich aus der angenommenen Lastneigung, die der vom quadratischen Fundament entspricht.

Bei fast allen Parametervariationen für das rechteckige Fundament und das Streifenfundament weisen die Kurven für die erforderliche Fundamentbreite und für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor denselben Verlauf wie die Kurven für das quadratische Fundament auf. Der Einfluss der Geometrie ist nur durch die teilweise unterschiedlichen berechneten Werten der erforderlichen Fundamentbreiten und des äquivalenten globalen Sicherheitsfaktors zu erkennen. Hierfür können Abbildung 1.36 bis Abbildung 1.39 mit Abbildung 1.7 und Abbildung 1.8 für eine Variation des Reibungswinkels verglichen werden.

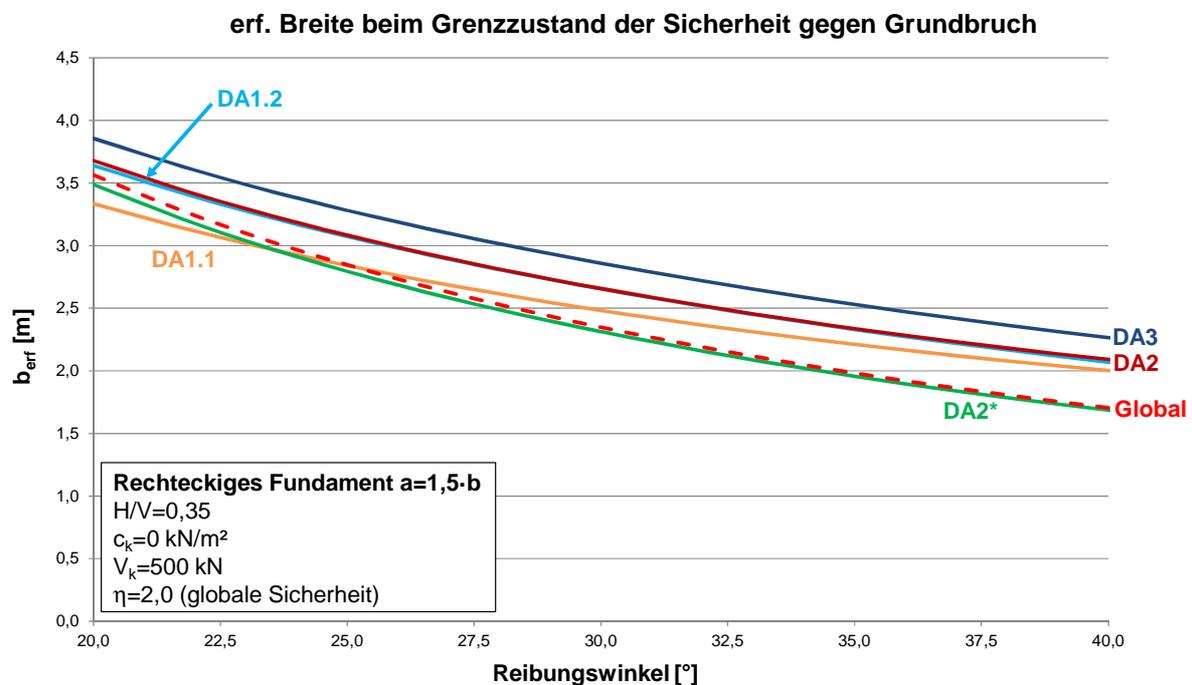


Abbildung 1.36: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, rechteckiges Fundament

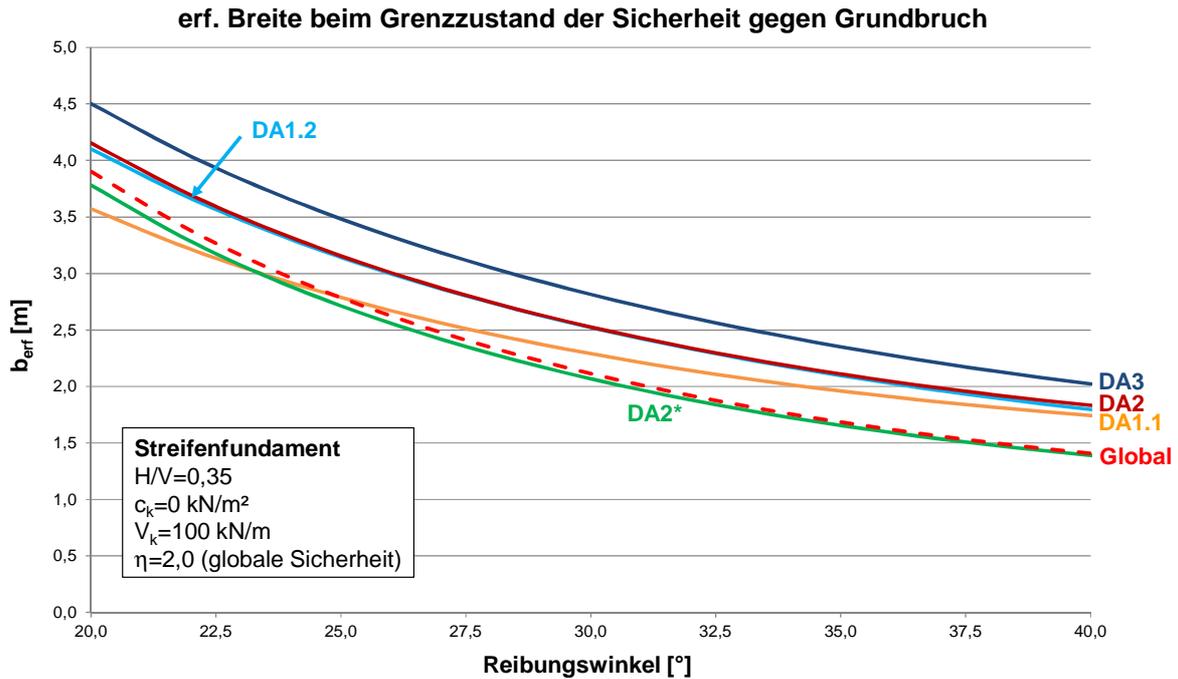


Abbildung 1.37: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

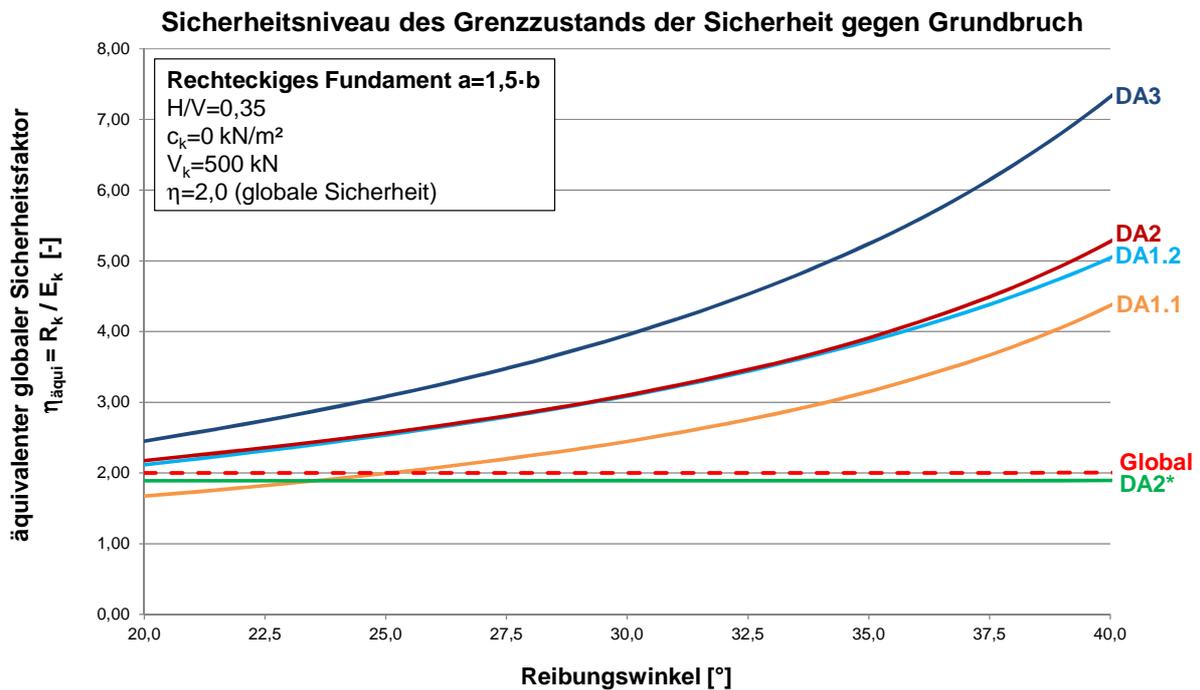


Abbildung 1.38: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, rechteckiges Fundament

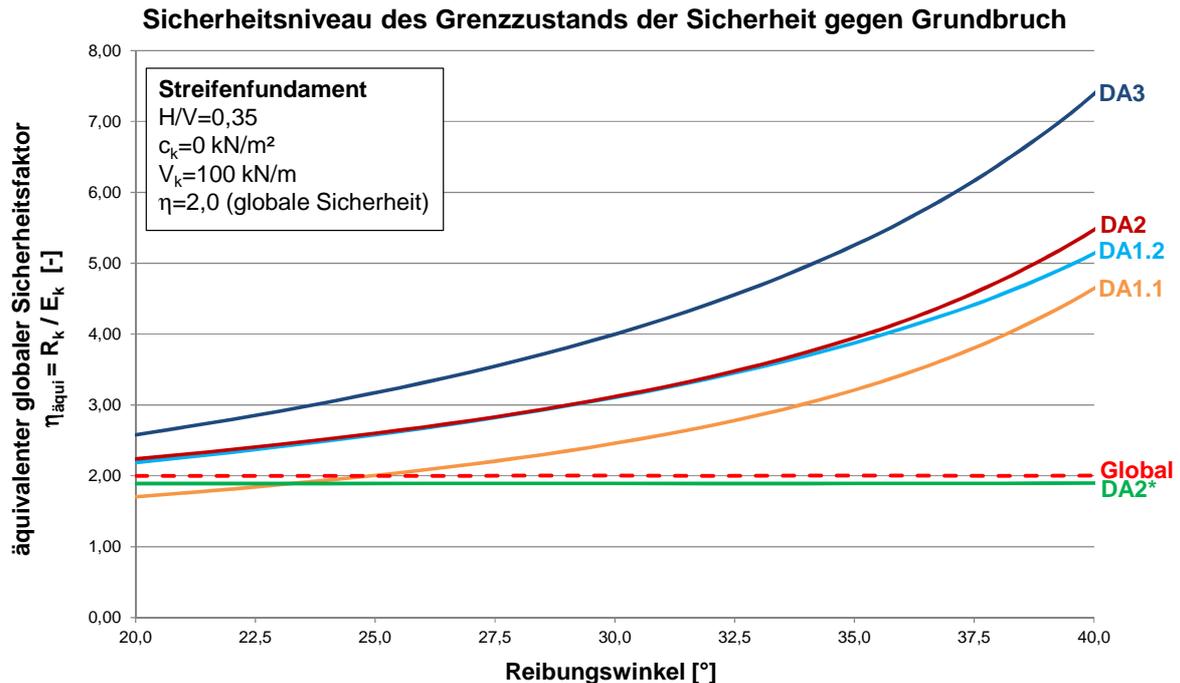


Abbildung 1.39: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

Der Einfluss der Geometrie ist deutlicher beim Streifenfundament für DA1, wenn undrainierte Verhältnisse beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten untersucht werden, wobei sich der Anfangszustand immer als maßgebend ergab. Abbildung 1.40 bis Abbildung 1.43 zeigen den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für eine Variation der Verhältnisse $H_{Q,k}/H_{G,k}$ und $V_{Q,k}/V_{G,k}$. Dabei ist in Abbildung 1.40 und Abbildung 1.41 gut zu erkennen, dass im Vergleich zu einem quadratischen oder rechteckigen Fundament DA1.2 erst bei hohen Verhältnissen $H_{Q,k}/H_{G,k}$ (ungefähr ab $H_{Q,k}/H_{G,k} = 4,5$) gegenüber DA1.1 maßgebend ist. Für eine Variation des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ sind größere vertikale Einwirkungen erforderlich als die angenommenen 100 kN/m, damit DA1.2 wie beim quadratischen Fundament gegenüber DA1.1 maßgebend wird.

Da die Geometrie mit Ausnahme einzelner Fälle (nur DA1 für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten mit undrainierten Verhältnissen) nur einen geringfügigen Einfluss auf das Sicherheitsniveau hat, wird auf eine Untersuchung der Geometrie in Stufe II und III verzichtet.

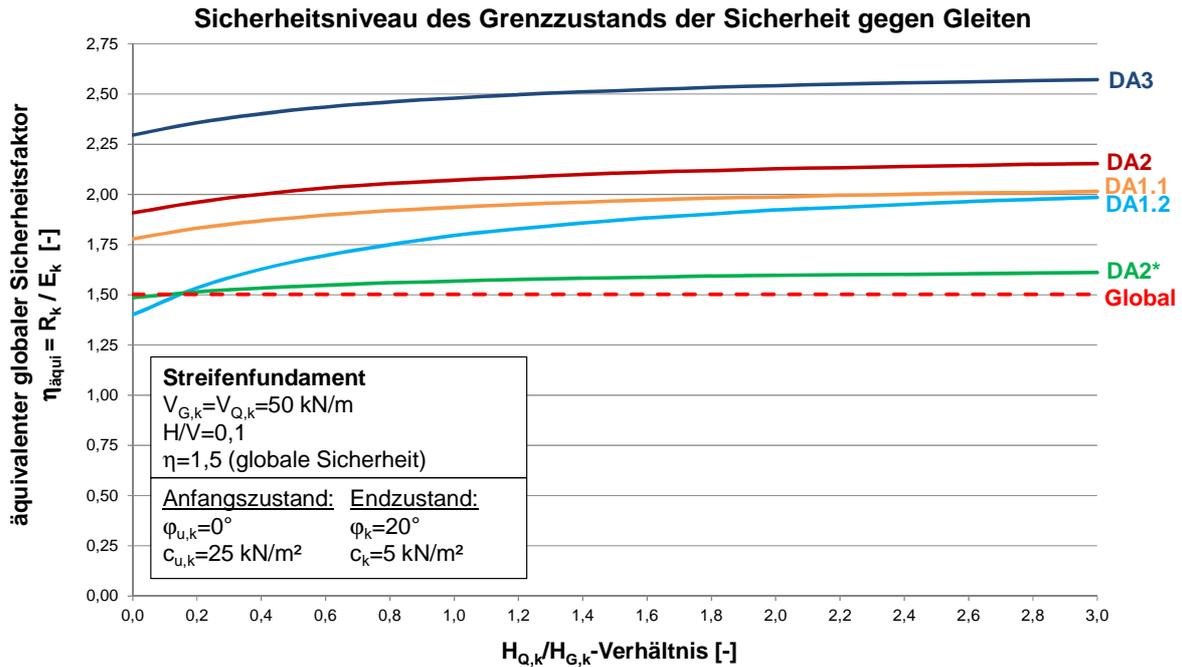


Abbildung 1.40: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse für das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ zwischen 0 und 3,0 für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

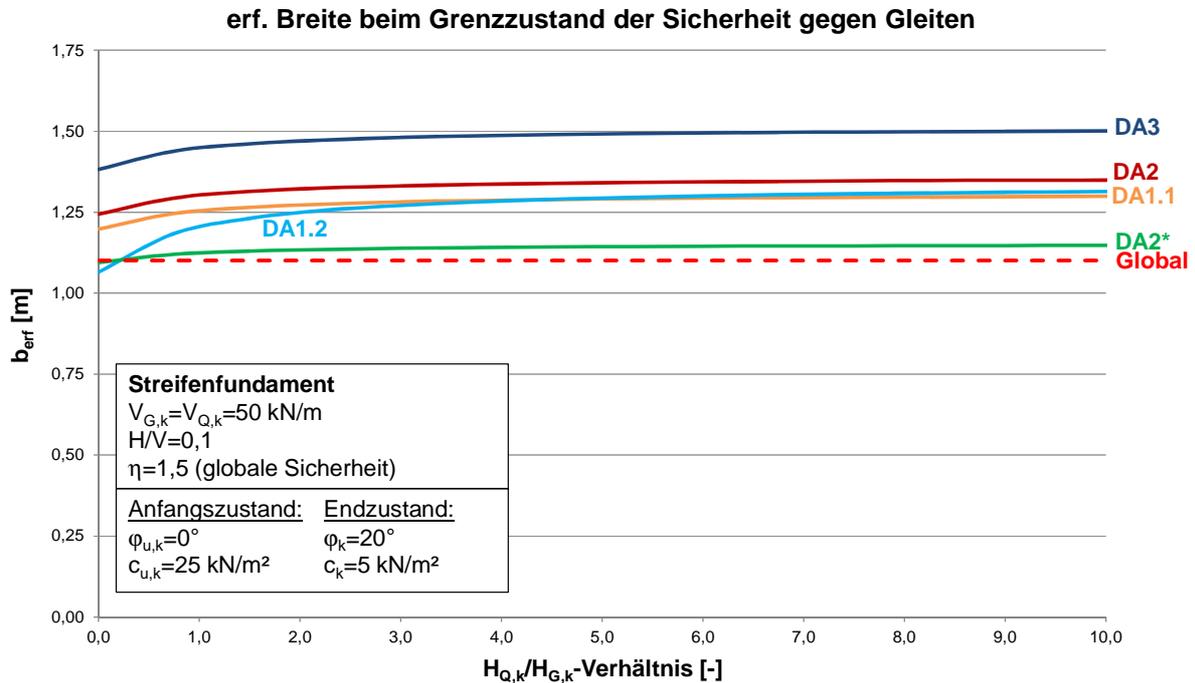


Abbildung 1.41: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse für das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ zwischen 0 und 10 für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

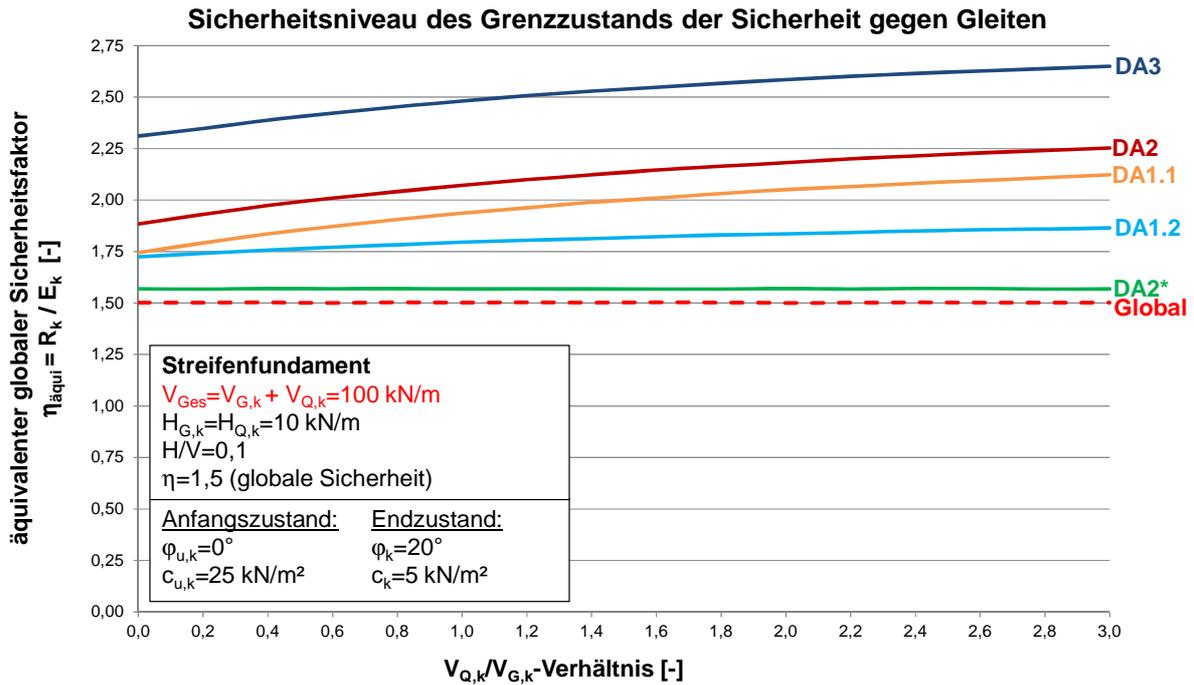


Abbildung 1.42: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse mit $V_{Ges} = 100 \text{ kN/m}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

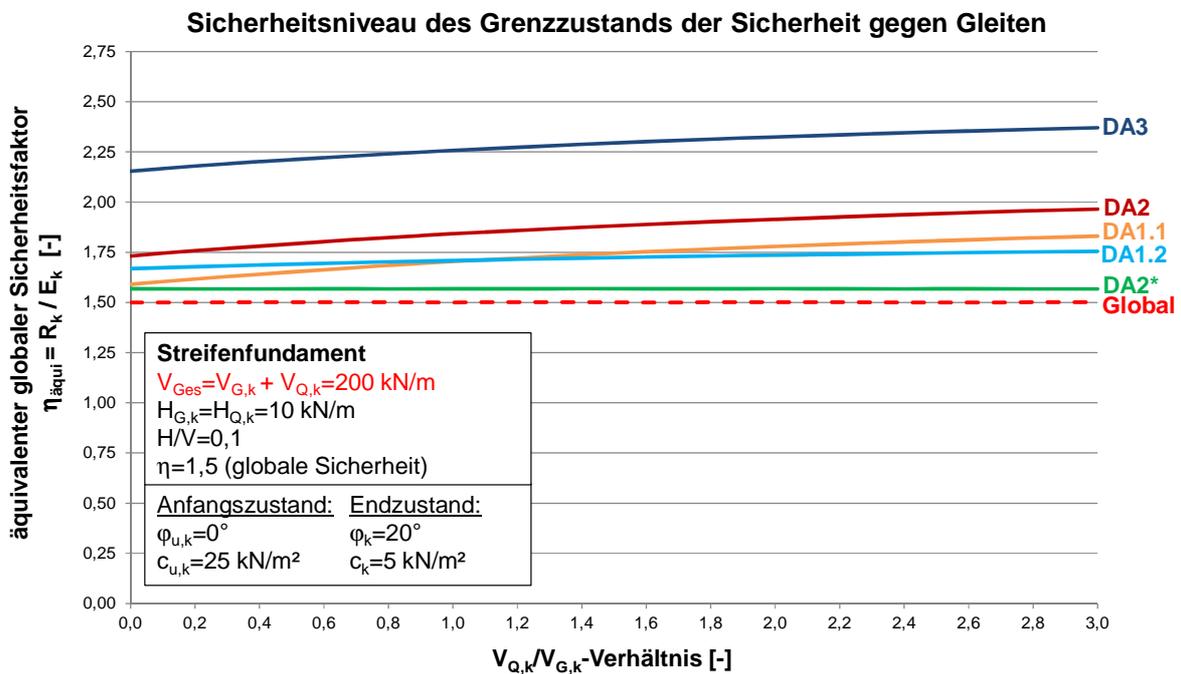


Abbildung 1.43: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse mit $V_{Ges} = 200 \text{ kN/m}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

1.2.8 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II

Lastneigung

In Stufe II wird der Einfluss der national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte und Nachweisverfahren auf die erforderliche Fundamentbreite und das Sicherheitsniveau untersucht. Abbildung 1.44 und Abbildung 1.45 zeigen die berechneten erforderlichen Fundamentbreiten für eine Variation der Lastneigung.

In IE sind alle drei Nachweisverfahren zulässig. Dabei stellt sich DA3 als maßgebend heraus. Bei Ländern wie UK oder IT, die DA1 verwenden, ist immer die Kombination 2 (DA1.2) maßgebend. DA1.2 von IT unterscheidet sich von DA1.2 von UK dadurch, dass auch die Baugrundwiderstände faktorisiert werden (siehe Bemerkung in Kap. 1.1.2). Außerdem ist in IT auch DA2 zulässig, jedoch ist immer DA1.2 maßgebend.

Bei Ländern wie DK oder IE, die DA3 als Nachweisverfahren verwenden, ergeben sich größere Fundamentbreiten beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten als bei den anderen Ländern. Obwohl UK und IT mit DA1.2 auch die Bodenkenngößen und die Einwirkungen faktorisieren, liegen die Ergebnisse unter denen von DK oder IE. Das liegt hauptsächlich daran, dass die Teilsicherheitsbeiwerte für die veränderlichen Einwirkungen von UK und IT niedriger sind als die beispielsweise von DK oder IE (siehe Tabelle 1.2).

Die Berechnungen für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch zeigen, dass sich bei Ländern mit DA3 meistens größere Fundamentbreiten ergeben als für Länder, die DA2/DA2* (z. B. DE, AT oder FR) oder DA1.2 (UK) verwenden. Allerdings liegen die Ergebnisse von IT immer über den Ergebnissen der anderen Länder. Das lässt sich durch den hohen Betrag des Teilsicherheitsbeiwerts für den Grundbruchwiderstand in IT erklären.

Für CH ergeben sich ähnliche Fundamentbreiten wie für SE oder IE, weil für den Grundbruchwiderstand ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,0 angenommen wird (siehe Kap. 1.2.3). Somit werden nur die Einwirkungen und Bodenkenngößen wie in SE oder IE faktorisiert.

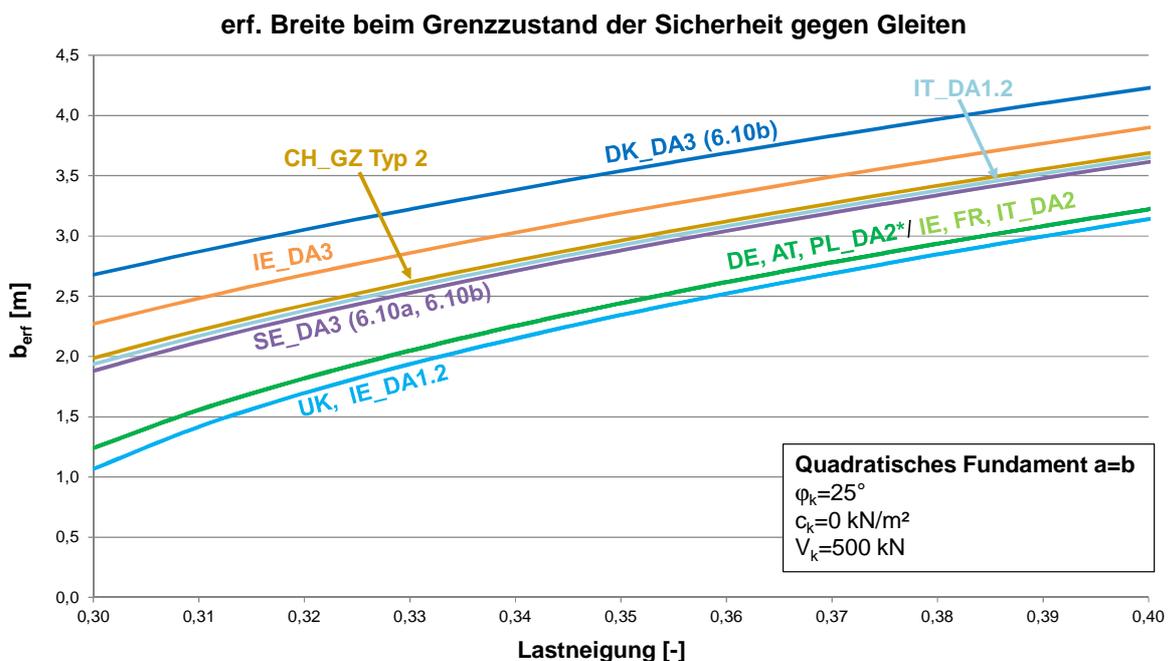


Abbildung 1.44: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe II untersuchten Länder

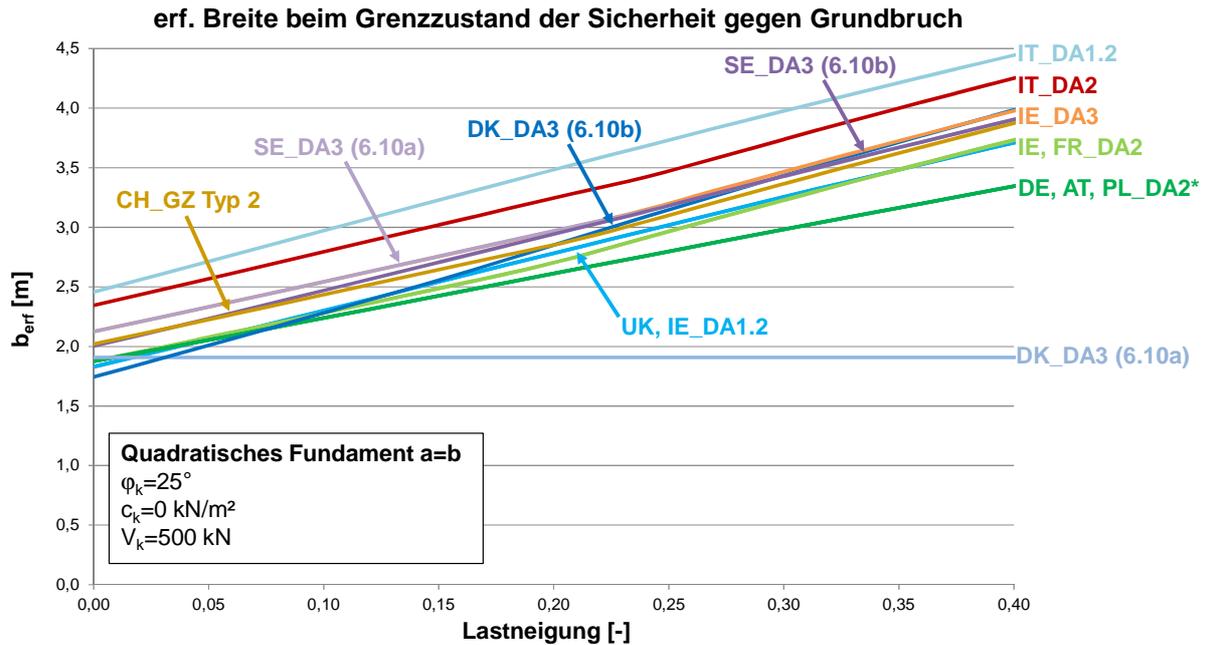


Abbildung 1.45: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe II untersuchten Länder

In Abbildung 1.46 werden für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten zusätzlich zu den erforderlichen Fundamentbreiten nach SIA 267 (2013) die Fundamentbreiten nach SIA 267 (2003) dargestellt. Bei SIA 267 (2003) wird für die günstigen ständigen Einwirkungen ein Teilsicherheitsbeiwert von 0,8 angesetzt. Daraus ergeben sich ein geringerer Gleitwiderstand und eine größere Exzentrizität, was zu deutlich größeren Fundamentbreiten als nach SIA 267 (2013) führt. In SIA 267 (2013) wird wie in EC7-1 ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,0 festgelegt. Daher ergeben sich nach SIA 267 (2013) ähnliche Fundamentbreiten wie bei den anderen europäischen Ländern.

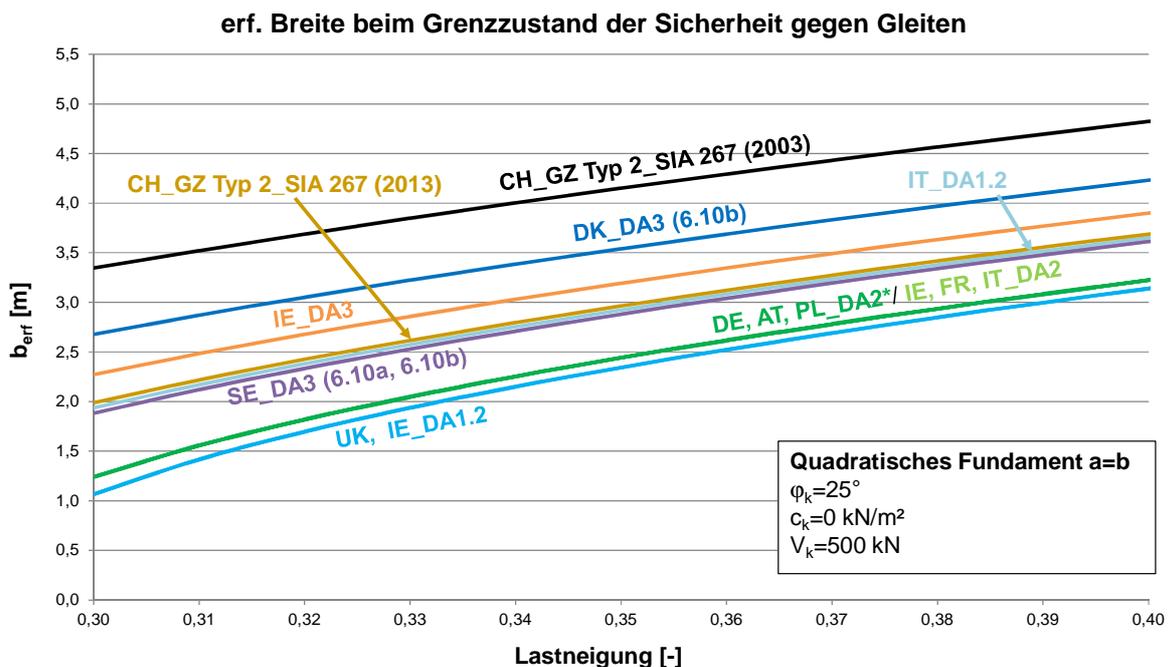


Abbildung 1.46: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe II untersuchten Länder, Vergleich SIA 267 (2003) mit SIA 267 (2013)

Abbildung 1.47 zeigt die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten. Die Ergebnisse sind ähnlich wie in Stufe I, wobei der äquivalente globale Sicherheitsfaktor immer konstant bleibt. Die höchsten Sicherheitsfaktoren ergeben sich für DK bzw. für Länder mit DA3. Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerte zurückzuführen.

Des Weiteren wird bei DA1.2 von IT neben $\tan \delta$ auch der Gleitwiderstand abgemindert. Daher ergibt sich ein höheres Sicherheitsniveau als für DA1.2 von UK.

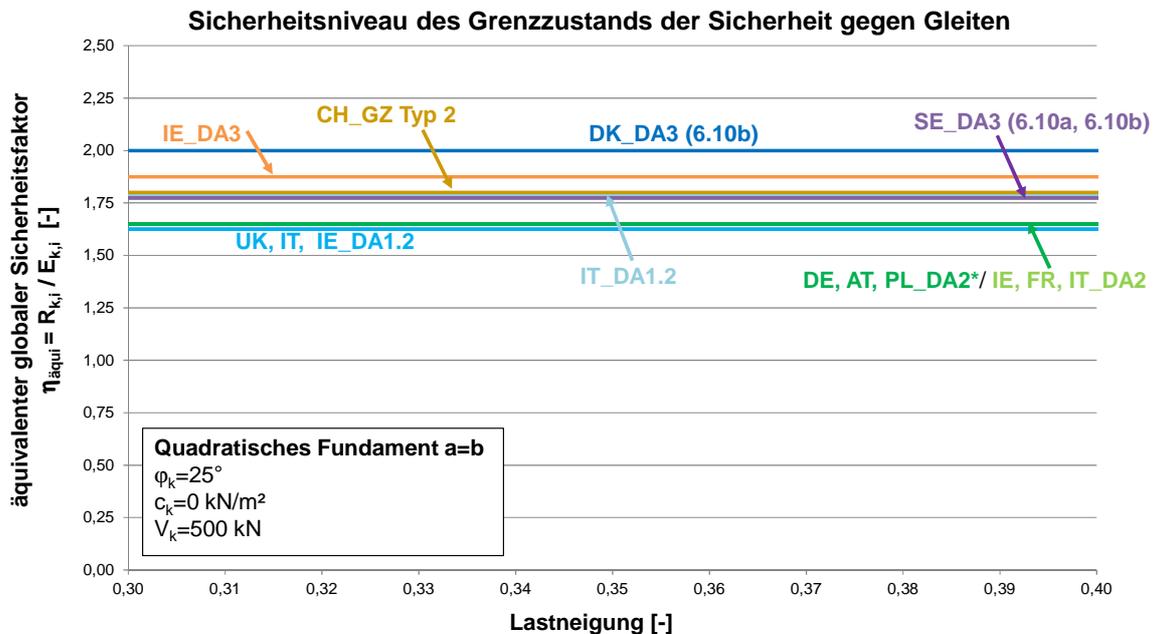


Abbildung 1.47: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe II untersuchten Länder

Abbildung 1.48 zeigt die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. Während bei DE, AT und PL mit DA2* das Sicherheitsniveau konstant bleibt, steigt der äquivalente globale Sicherheitsfaktor der anderen Länder mit zunehmender Lastneigung. Bei der Berechnung für DK (6.10a) ergibt sich unabhängig von der Lastneigung immer dieselbe Fundamentbreite und demzufolge auch derselbe globale äquivalente Sicherheitsfaktor, weil bei der Anwendung von Gleichung 6.10a) nur eine reine ständige Berechnung durchgeführt wurde (siehe Kap. 1.1.2) und somit keine veränderliche horizontale Einwirkung berücksichtigt wurde. Nur für geringe Lastneigungen ist für DK Gleichung 6.10a) maßgebend. Bei den anderen Parametervariationen ist immer eine Bemessung mit Gleichung 6.10b) kritischer, sodass nur die Ergebnisse nach Gleichung 6.10b) dargestellt werden.

Während die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren der meisten Länder zwischen 1,6 und 3,1 liegen, sind diese für IT (DA1.2) wegen der Faktorisierung der Bodenkenngrößen, der Einwirkungen und des Grundbruchwiderstands immer über 3,0. Somit ergibt sich für IT das höchste Sicherheitsniveau.

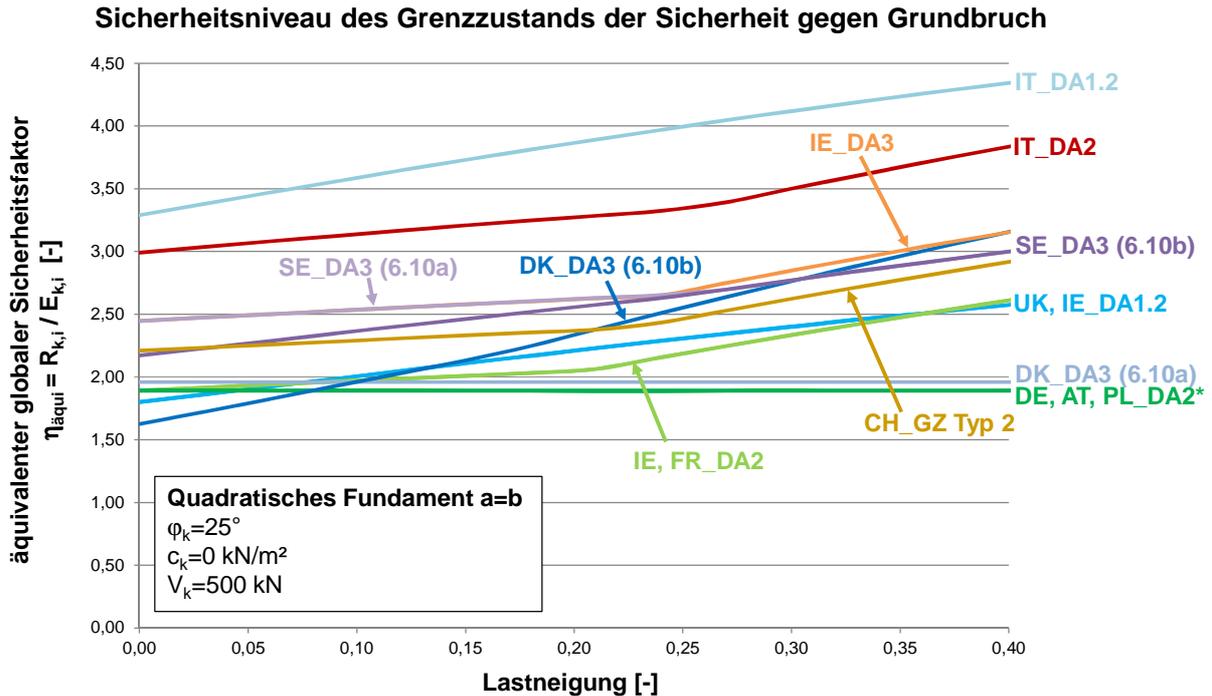


Abbildung 1.48: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe II untersuchten Länder

Reibungswinkel

Für eine Variation des Reibungswinkels ergeben sich für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ähnliche erforderliche Fundamentbreiten wie in Stufe I. Hier weisen Länder mit DA3 wie im Falle der Variation der Lastneigung größere Fundamentbreiten auf (siehe Abbildung 1.49). Der ermittelte äquivalente globale Sicherheitsfaktor ist identisch mit dem Sicherheitsfaktor für eine Variation der Lastneigung und deswegen hier nicht explizit aufgeführt.

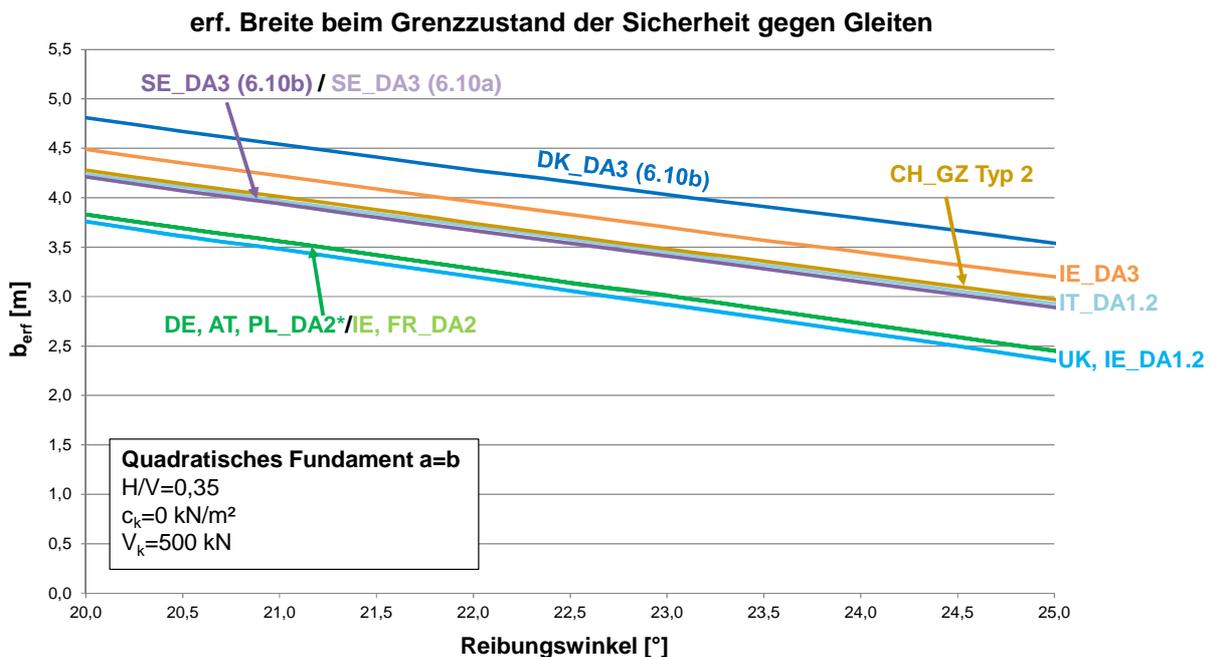


Abbildung 1.49: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die in Stufe II untersuchten Länder

Die Abbildung 1.50 und Abbildung 1.51 zeigen die Ergebnisse für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. Es ergeben sich für die meisten Länder mit DA1.2, DA2 und DA3 ähnliche erforderliche Fundamentbreiten, die über den Ergebnissen von Ländern mit DA2* wie DE oder AT liegen. Obwohl sich die Fundamentbreiten dieser Länder (z. B. DK, IE, SE oder CH) nur um wenige Zentimeter unterscheiden, weisen sie unterschiedliche Sicherheitsniveaus auf.

Für DA1.2 von IT ergeben sich die größten Fundamentbreiten und die höchsten Sicherheitsfaktoren.

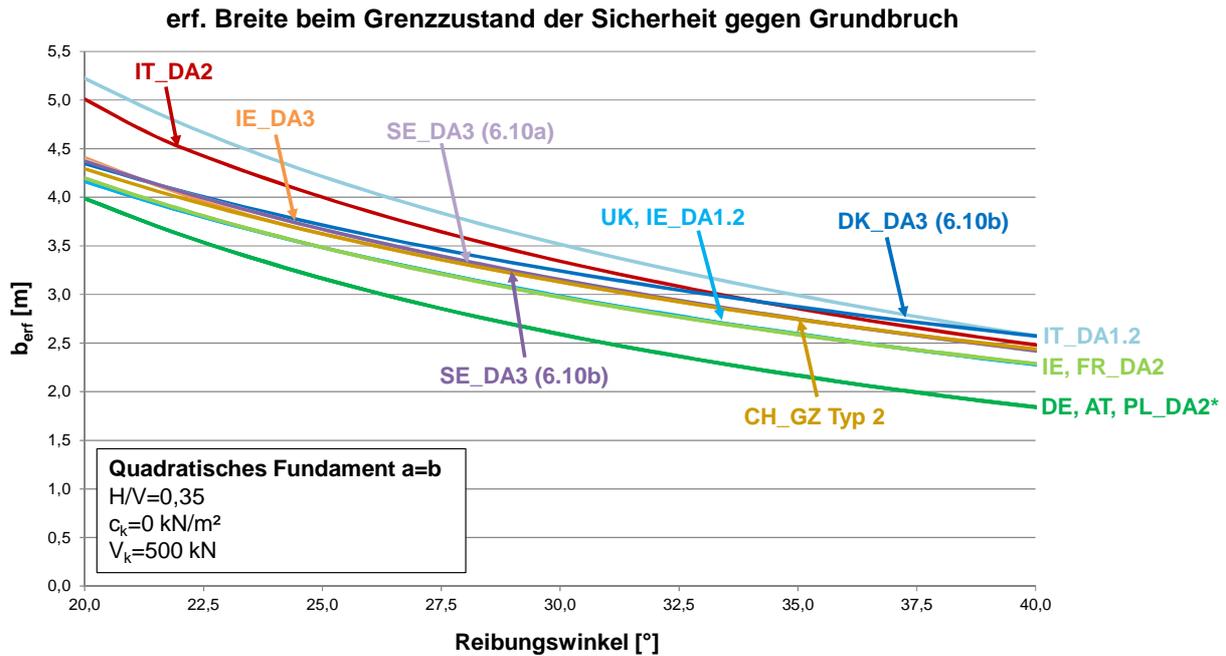


Abbildung 1.50: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die in Stufe II untersuchten Länder

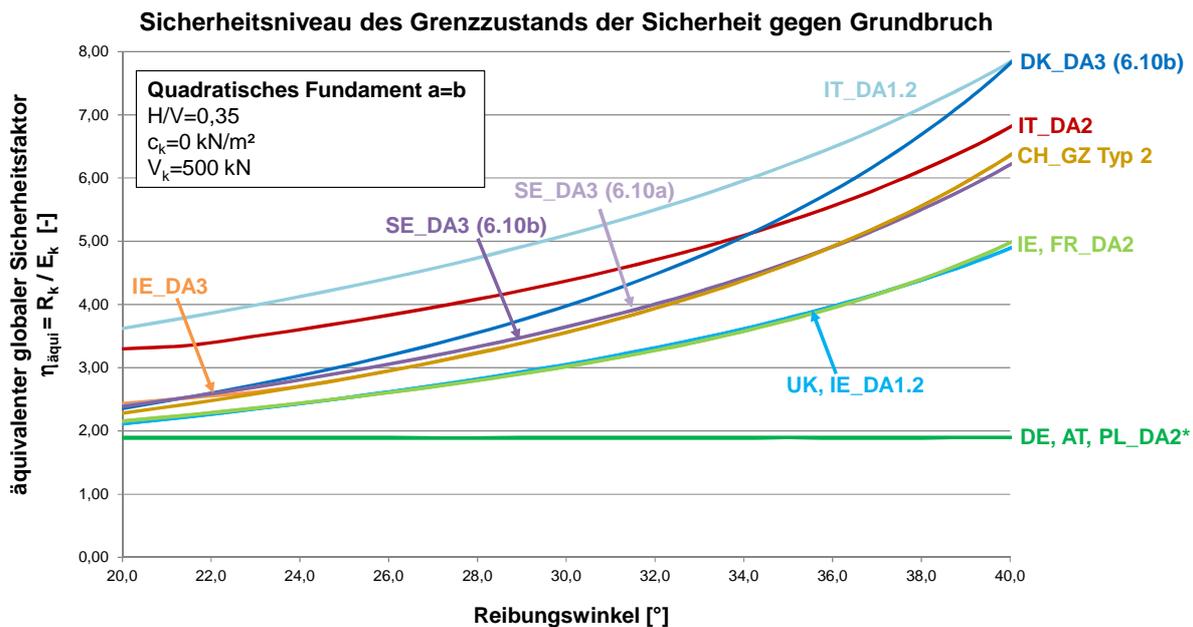


Abbildung 1.51: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die in Stufe II untersuchten Länder

Kohäsion im drainierten Zustand

Wie in Stufe I wurden in Stufe II für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und Grundbruch Berechnungen mit einer Sohlneigung von 5° durchgeführt. Für beide Grenzzustände ergibt sich bei der erforderlichen Fundamentbreite und beim äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für die meisten Länder eine ähnliche Tendenz wie bei der Variation des Reibungswinkels (siehe Abbildung 1.52 und Abbildung 1.53).

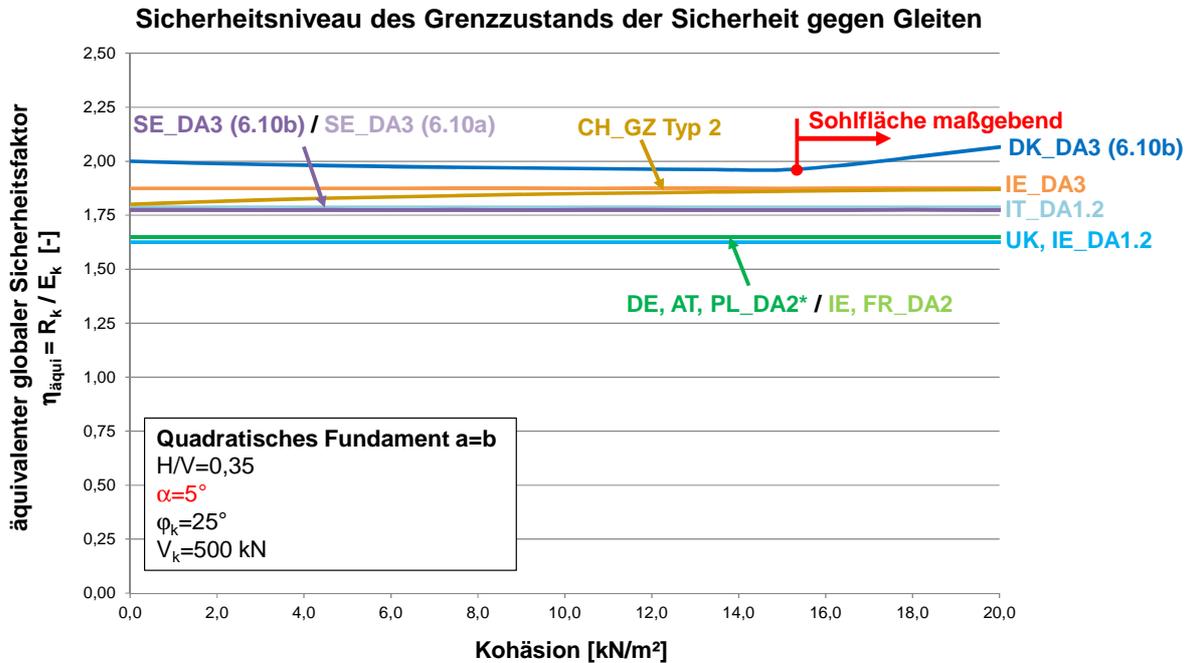


Abbildung 1.52: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion im drainierten Zustand für die in Stufe II untersuchten Länder

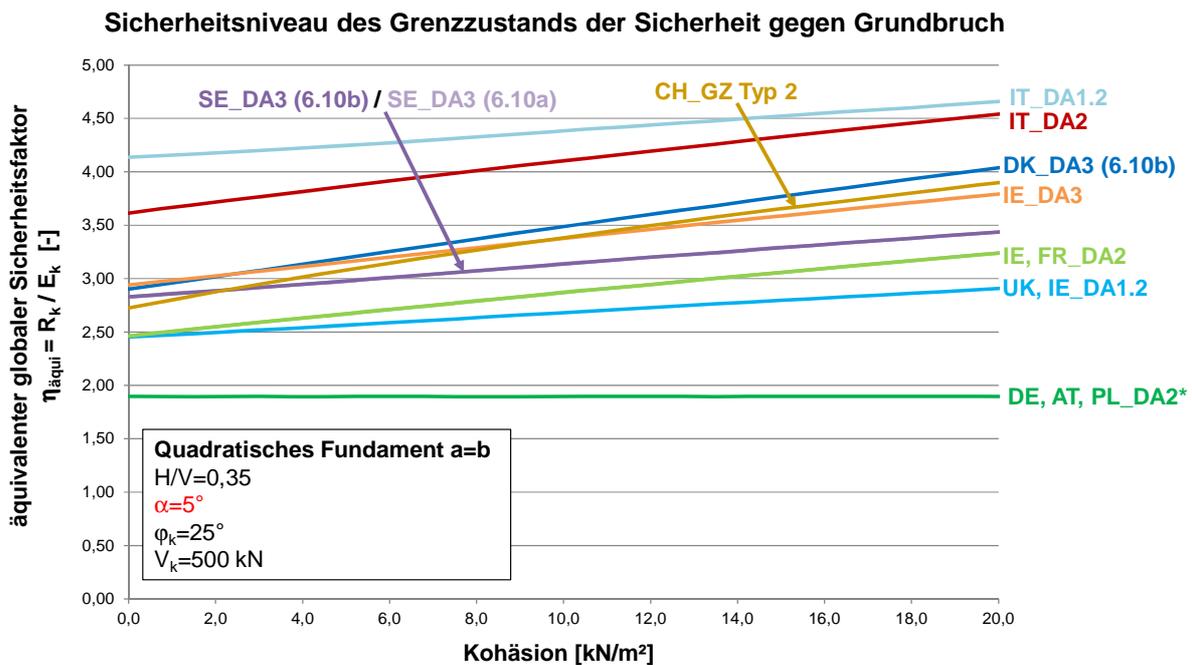


Abbildung 1.53: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion im drainierten Zustand für die in Stufe II untersuchten Länder

Abbildung 1.52 zeigt jedoch für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, dass sich für DK und CH keine konstanten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren ergeben. Das ist dadurch zu erklären, dass für DK im Vergleich zu den anderen Ländern eine Gleitfläche entlang der geneigten Sohlfäche ab einer Kohäsion von 16 kN/m² maßgebend ist und dass für CH unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte für den Reibungswinkel und die Kohäsion verwendet werden (siehe Tabelle 1.3).

Kohäsion im undrainierten Zustand

Abbildung 1.54 zeigt die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten. Die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor sind mit Ausnahme von DE, AT und PL (Länder, die mit DA2* rechnen) nicht konstant. Die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren ergeben sich für DK, die deutlich oberhalb der anderen liegen. Das ist dadurch zu erklären, dass in DK für die günstigen ständigen Einwirkungen ein Teilsicherheitsbeiwert von 0,9 anzusetzen ist. So ergeben sich größere Exzentrizitäten, wodurch eine größere effektive Fläche A' erforderlich wird.

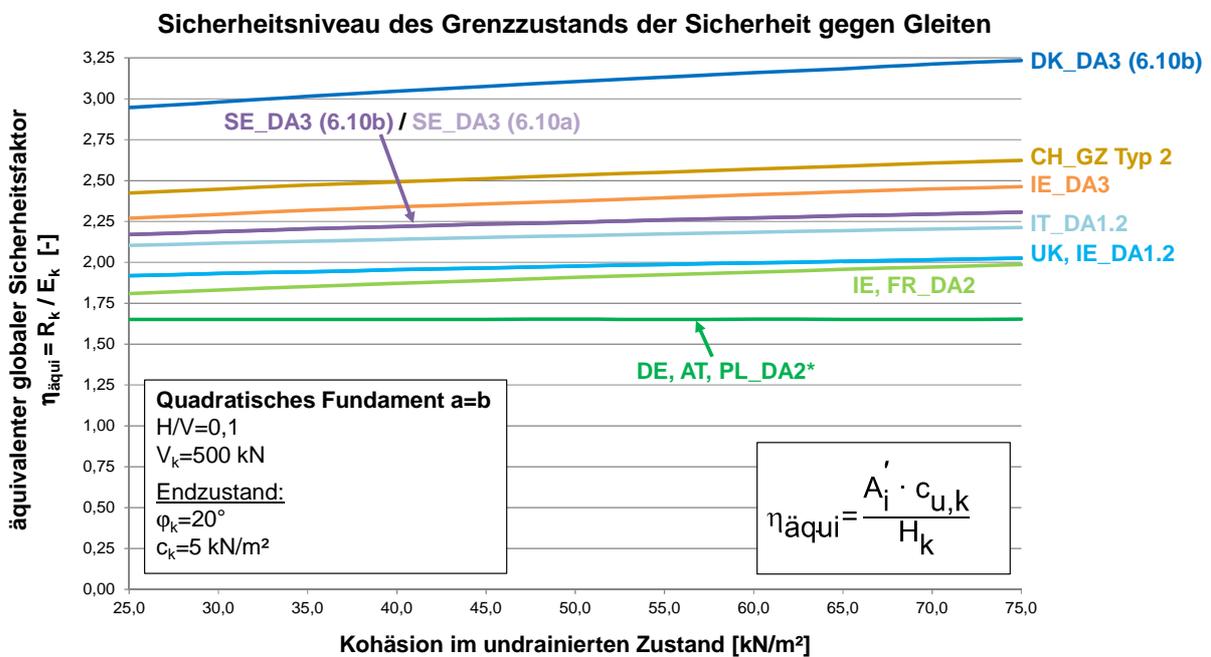


Abbildung 1.54: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der undrainierten Kohäsion für die in Stufe II untersuchten Länder

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch zeigt sich tendenziell das gleiche Verhalten wie in Stufe I. Mit steigender Kohäsion ist ein Übergang vom Anfangszustand auf den Endzustand zu verzeichnen. Allerdings ist in Abbildung 1.55 gut zu erkennen, dass nicht nur das Nachweisverfahren, sondern auch die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte den Übergang beeinflusst. Obwohl in DK, IE und SE das Nachweisverfahren DA3 verwendet wird, liegt der Übergang für DK bei deutlich höheren Kohäsionen als für IE oder SE. Hierbei wird in DK als Teilsicherheitsbeiwert für die Kohäsion im undrainierten Zustand 1,8 angesetzt, während in IE bzw. SE der Teilsicherheitsbeiwert 1,40 bzw. 1,50 beträgt.

Die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren bzw. die größten erforderlichen Fundamentbreiten ergeben sich für IT.

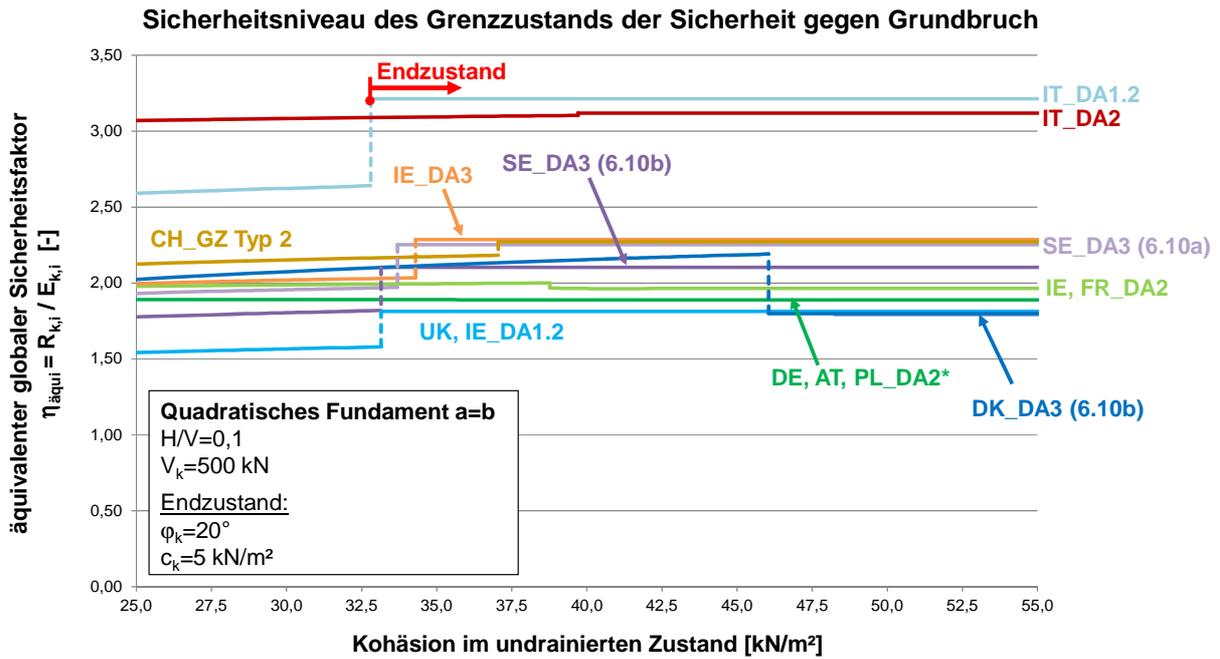


Abbildung 1.55: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die in Stufe II untersuchten Länder

Sohlneigung

Für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch ergeben sich die gleichen Verläufe der Kurven für die erforderliche Fundamentbreite und für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor wie in Stufe I. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergeben sich für DK sowohl für den nichtbindigen als auch für den bindigen Boden mit $c_k=5 \text{ kN/m}^2$ die größten erforderlichen Fundamentbreiten bzw. die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren (siehe beispielsweise Abbildung 1.56).

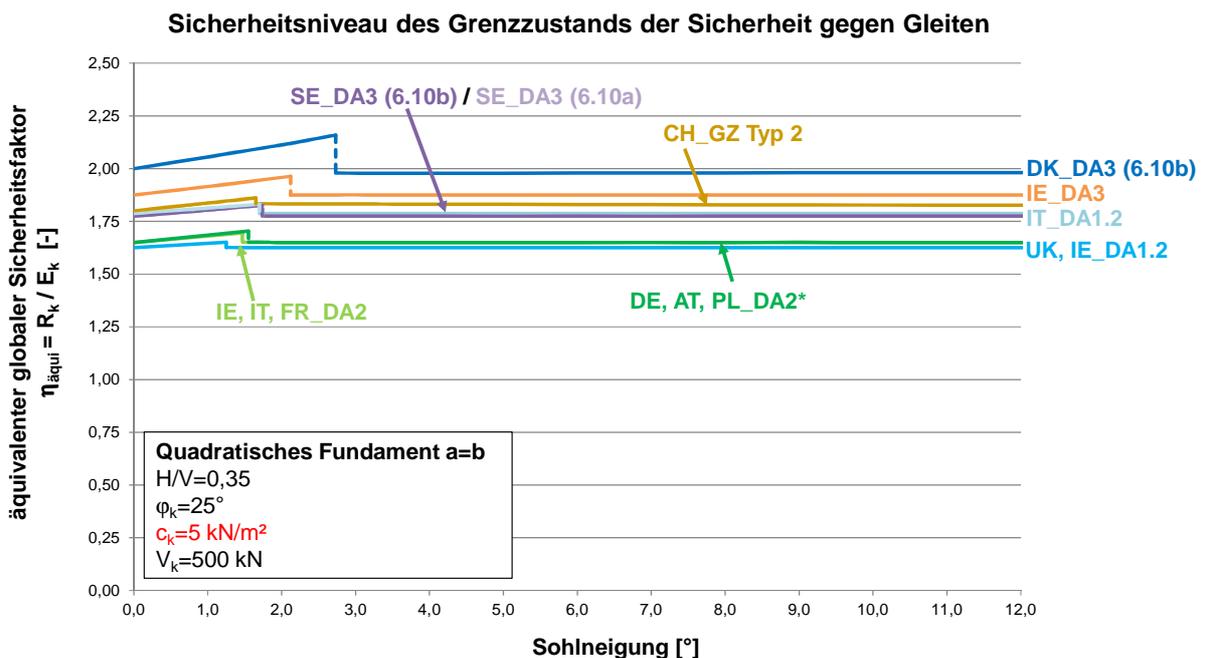


Abbildung 1.56: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Sohlneigung für die in Stufe II untersuchten Länder, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch ergeben sich für IT die größten erforderlichen Fundamentbreiten bzw. die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren (siehe beispielsweise Abbildung 1.57). Wie bei den anderen Parametervariationen haben die hohen Teilsicherheitsbeiwerte für den Grundbruchwiderstand von IT eine große Auswirkung auf die Bemessung.

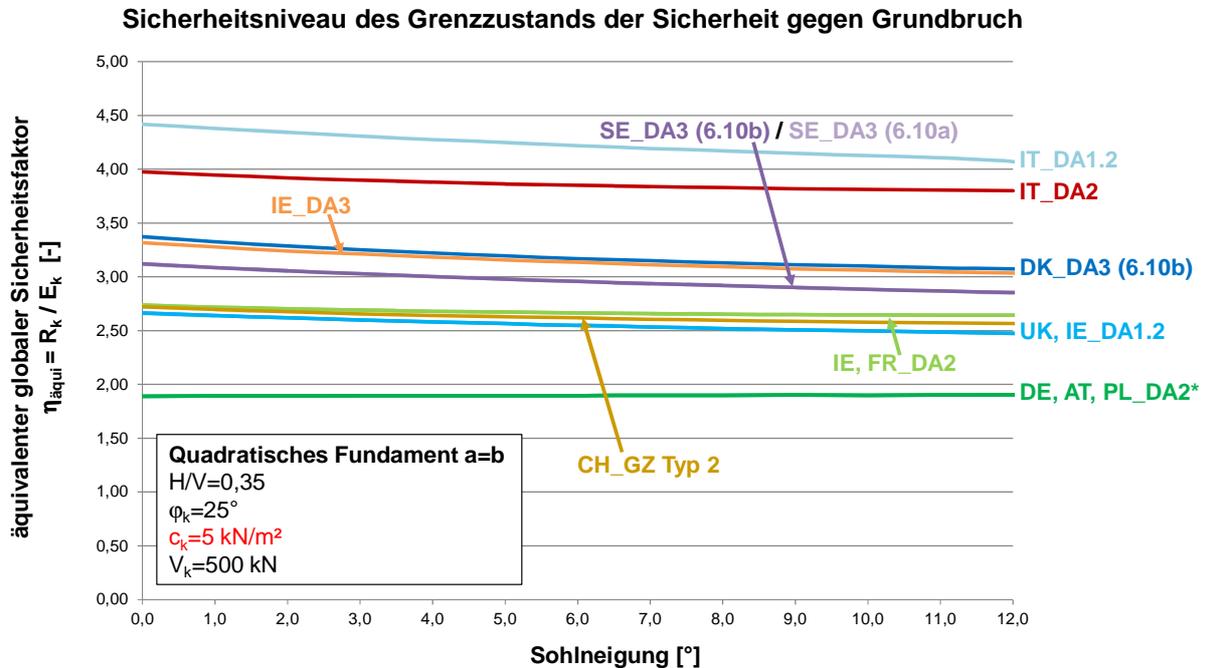


Abbildung 1.57: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Sohlneigung für die in Stufe II untersuchten Länder, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Böschungswinkel und Bermenbreite

Abbildung 1.58 und Abbildung 1.59 zeigen den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Böschungswinkels für einen nichtbindigen und einen bindigen Boden. Dabei ist zu erkennen, dass für DK die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren mit steigendem Böschungswinkel schneller abnehmen als die der anderen Länder. Während in Stufe I ein Übergang der maßgebenden Einwirkungskombination nur für den nichtbindigen Boden zu verzeichnen ist, ist dieser Übergang in Stufe II für IT (DA2) auch für den bindigen Boden vorhanden. Die hohen Teilsicherheitsbeiwerte von IT haben daher nicht nur einen Einfluss auf die Höhe des Sicherheitsniveaus, sondern auch auf die maßgebende Einwirkungskombination.

Abbildung 1.60 und Abbildung 1.61 zeigen den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Bermenbreite für einen nichtbindigen und einen bindigen Boden. Durch die Berücksichtigung einer Kohäsion beim bindigen Boden erhöhen sich die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren. Außerdem ergibt sich für CH, DK, IE und SE ein ähnliches Sicherheitsniveau. Der Einfluss der hohen Teilsicherheitsbeiwerte für den Grundbruchwiderstand für IT spiegelt sich in den hohen berechneten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren wider.

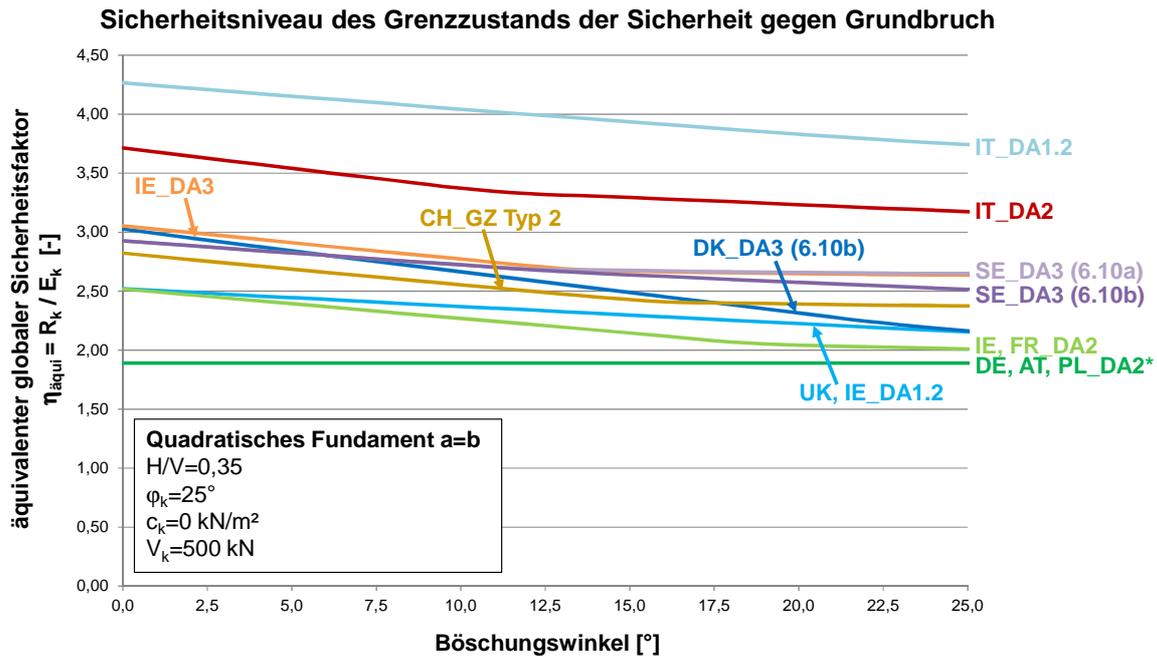


Abbildung 1.58: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die in Stufe II untersuchten Länder

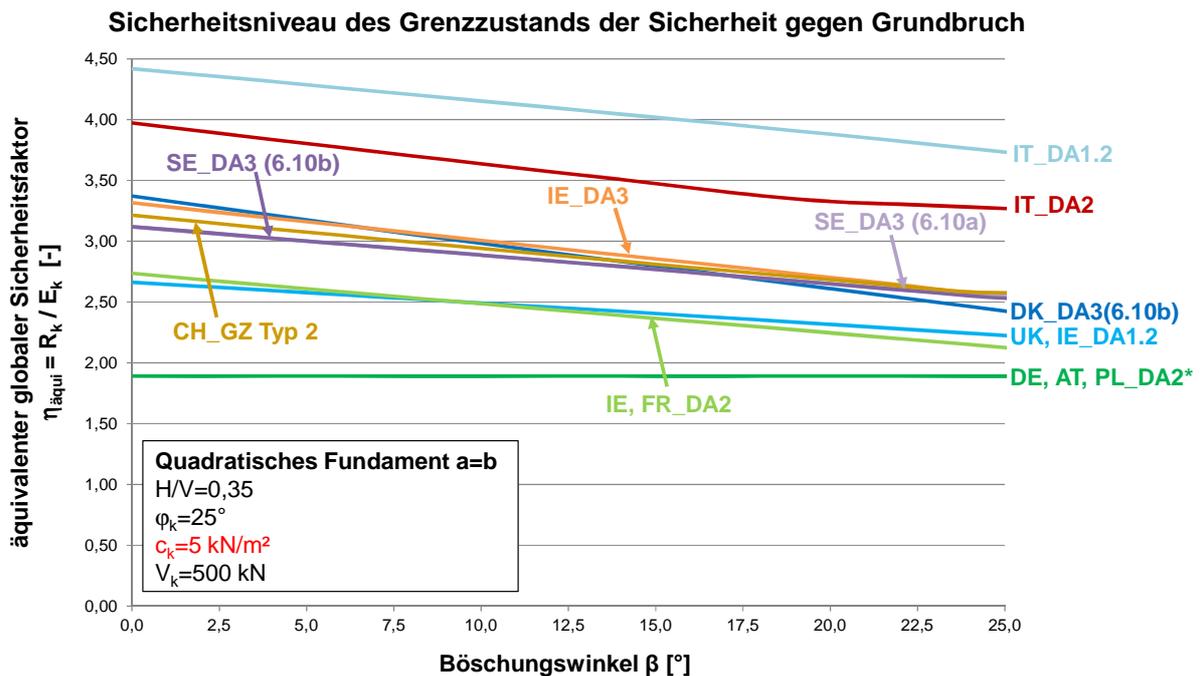


Abbildung 1.59: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die in Stufe II untersuchten Länder, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

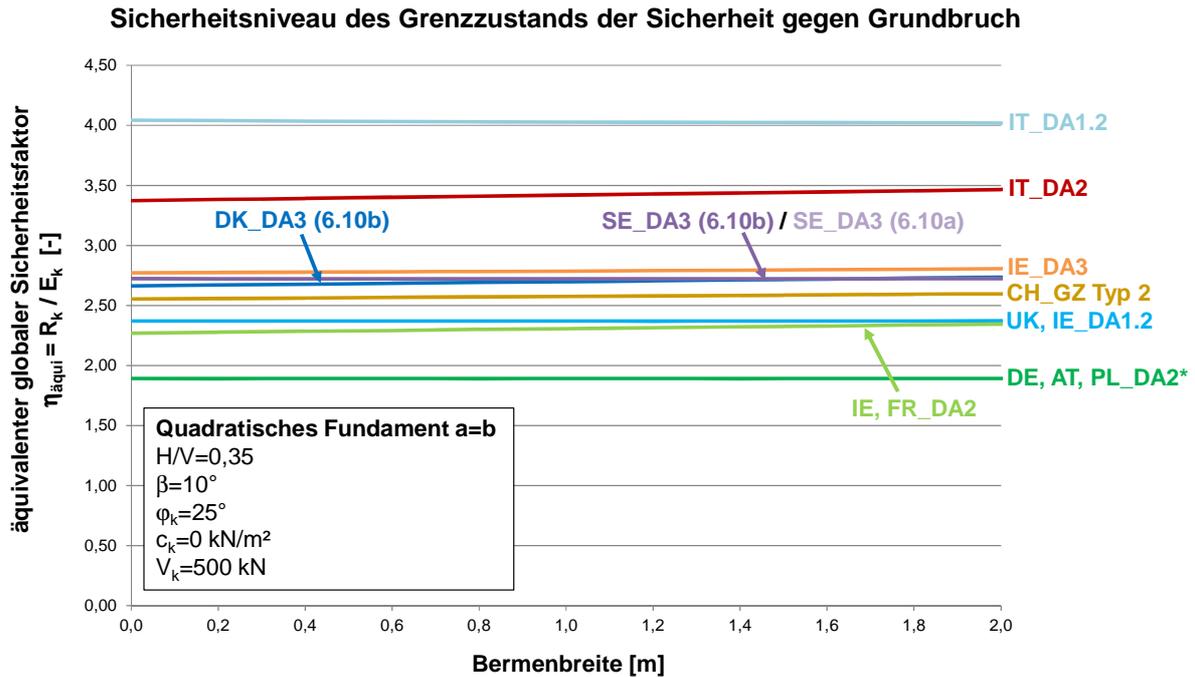


Abbildung 1.60: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Bermenbreite für die in Stufe II untersuchten Länder

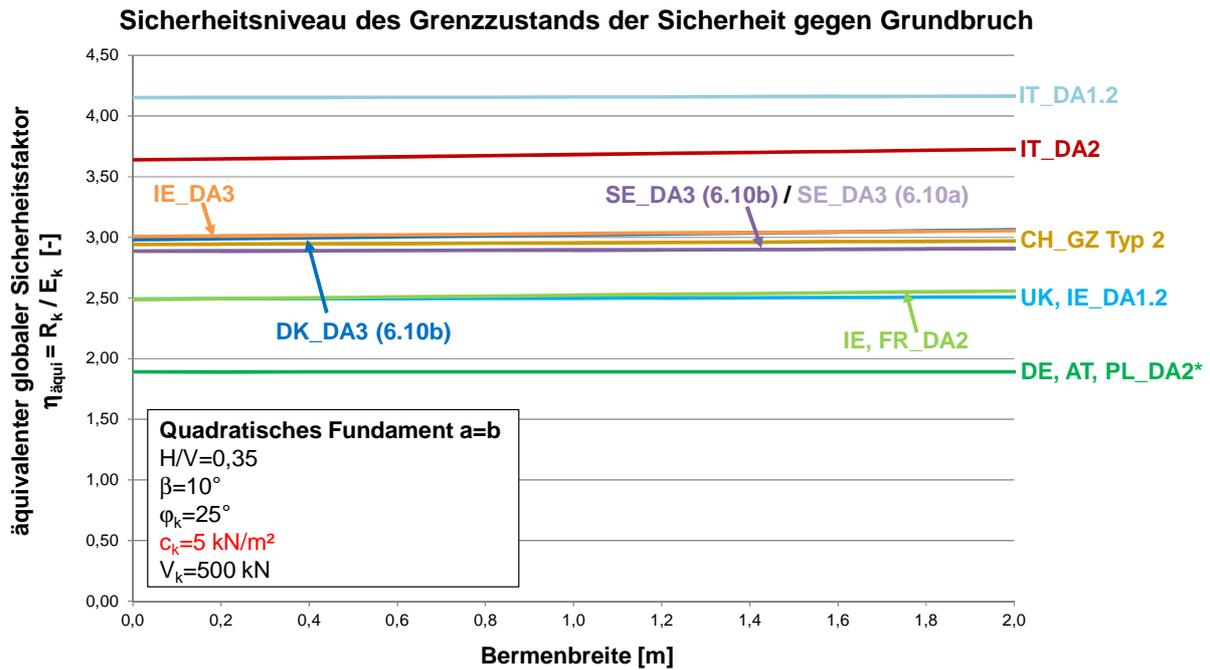


Abbildung 1.61: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Bermenbreite für die in Stufe II untersuchten Länder, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Hebelarm

Für die Variation des Hebelarms haben hauptsächlich die national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte nur einen Einfluss auf das Sicherheitsniveau und nicht auf den Verlauf der Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor. Abbildung 1.62 bis Abbildung 1.64 zeigen die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch für eine Untersuchung mit

Parametern im drainierten bzw. undrainierten Zustand. Der Verlauf der Kurven entspricht dem von Stufe I. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergeben sich die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für DK (siehe Abbildung 1.63). Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch sind die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren von IT am höchsten, wobei für drainierte Verhältnisse DA1.2 und für undrainierte Verhältnisse hingegen DA2 maßgebend ist.

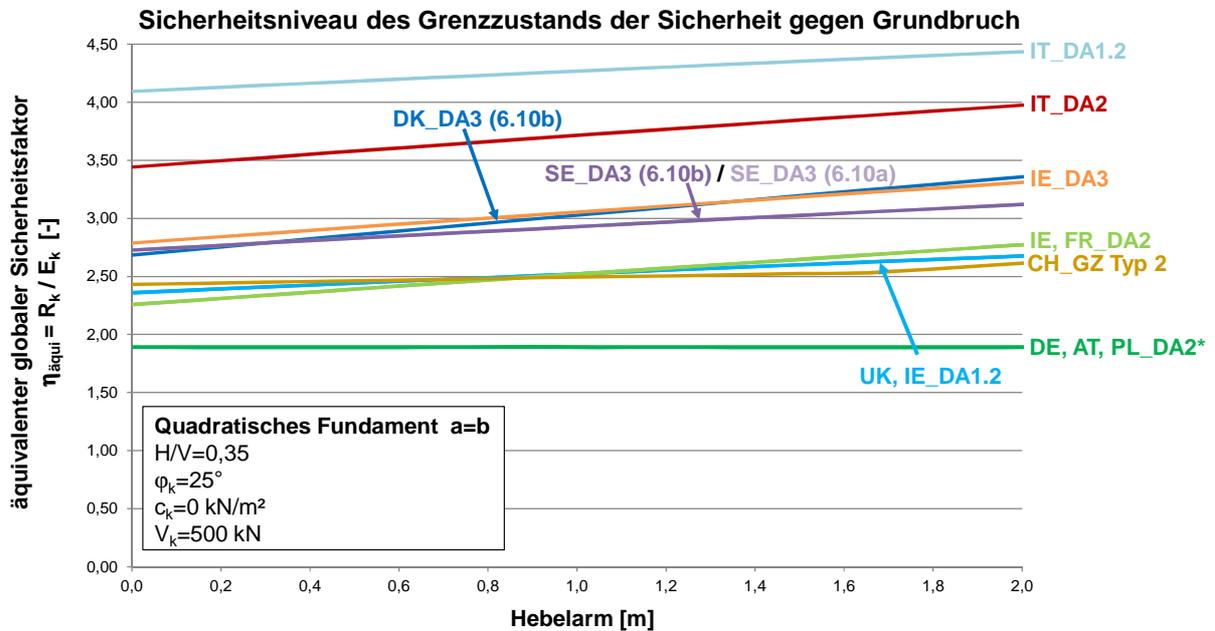


Abbildung 1.62: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Hebelarms für die in Stufe II untersuchten Länder

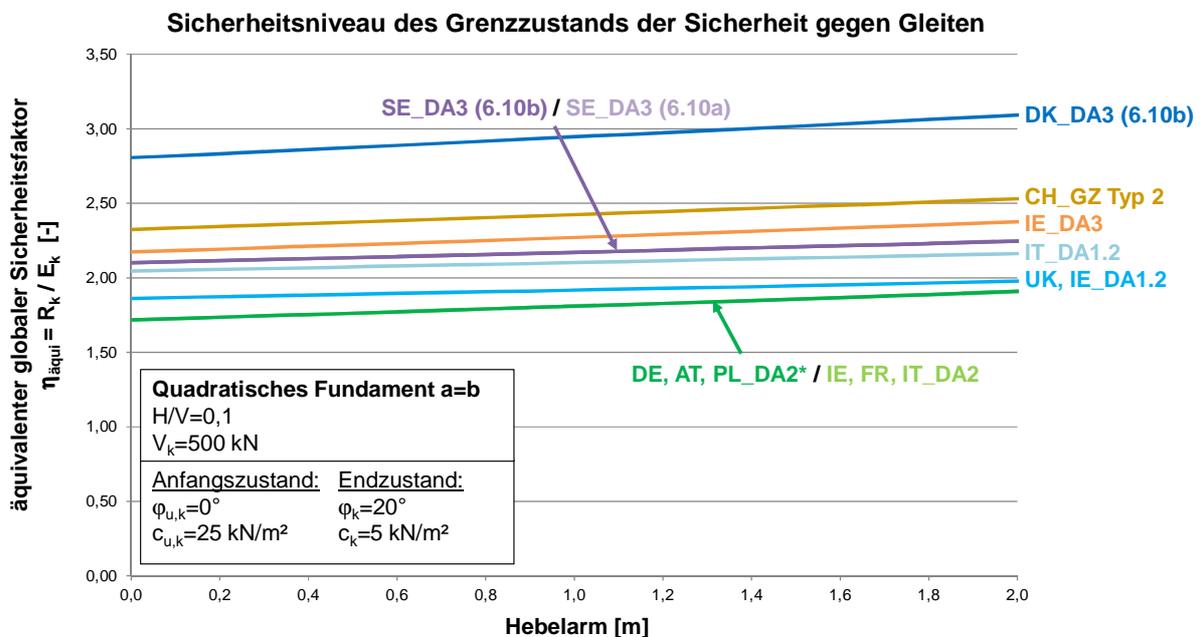


Abbildung 1.63: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Hebelarms für die in Stufe II untersuchten Länder

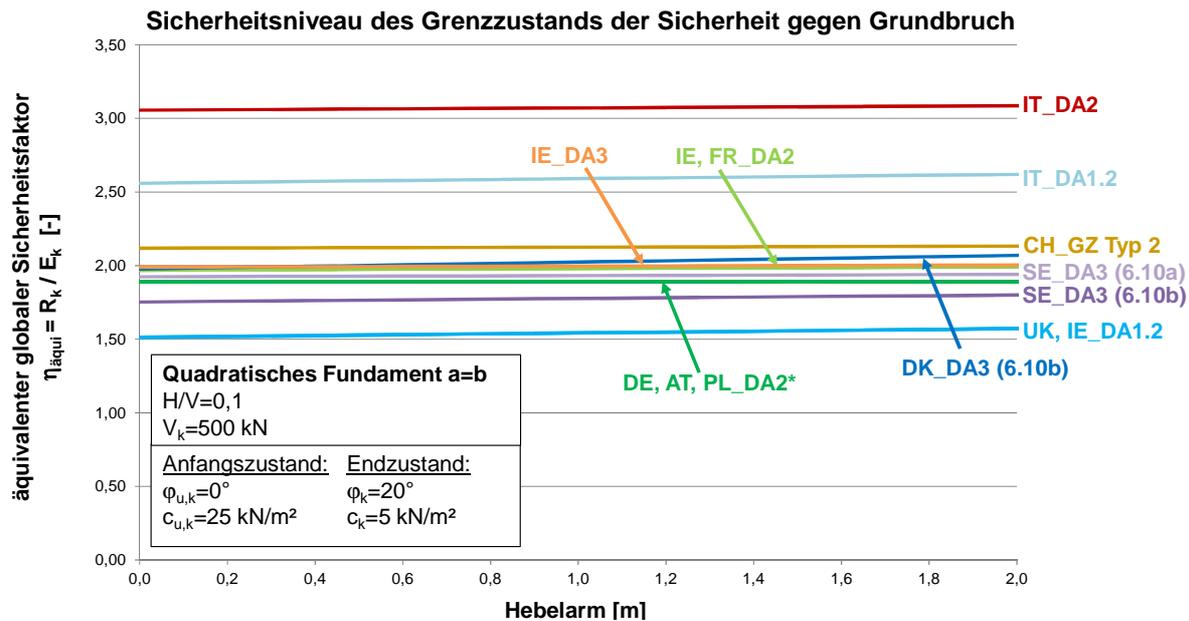


Abbildung 1.64: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Hebelarms für die in Stufe II untersuchten Länder

Verhältnis veränderlicher zu ständiger Einwirkungen

Für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch mit drainierten Verhältnissen ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor wie in Stufe I (siehe Abbildung 1.65 bis Abbildung 1.68). Jedoch ist für eine Variation des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ (siehe Abbildung 1.66 und Abbildung 1.68) gut zu erkennen, dass die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren von DK mit steigendem Verhältnis stärker zunehmen als die der anderen Länder. Außerdem sind die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren von Ländern mit demselben Nachweisverfahren unterschiedlich, da die Länder teilweise unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte verwenden.

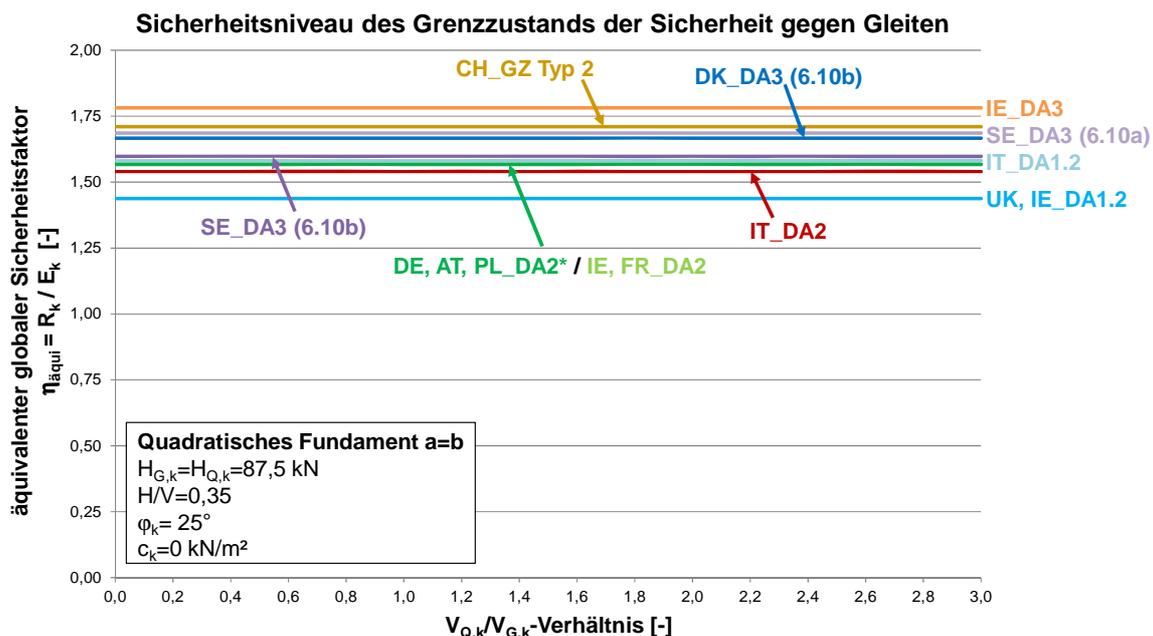


Abbildung 1.65: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

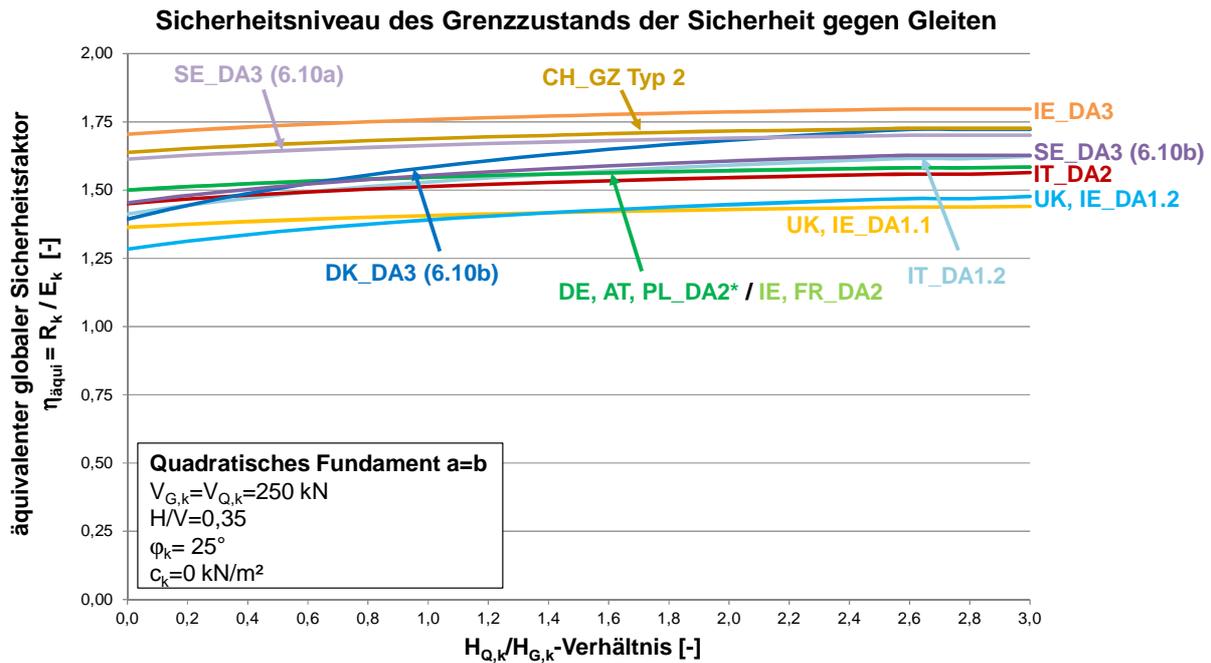


Abbildung 1.66: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergeben sich die größten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren bzw. erforderlichen Fundamentbreiten für IE (DA3). Hingegen ergeben sich für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren bzw. die größten erforderlichen Fundamentbreiten für IT.

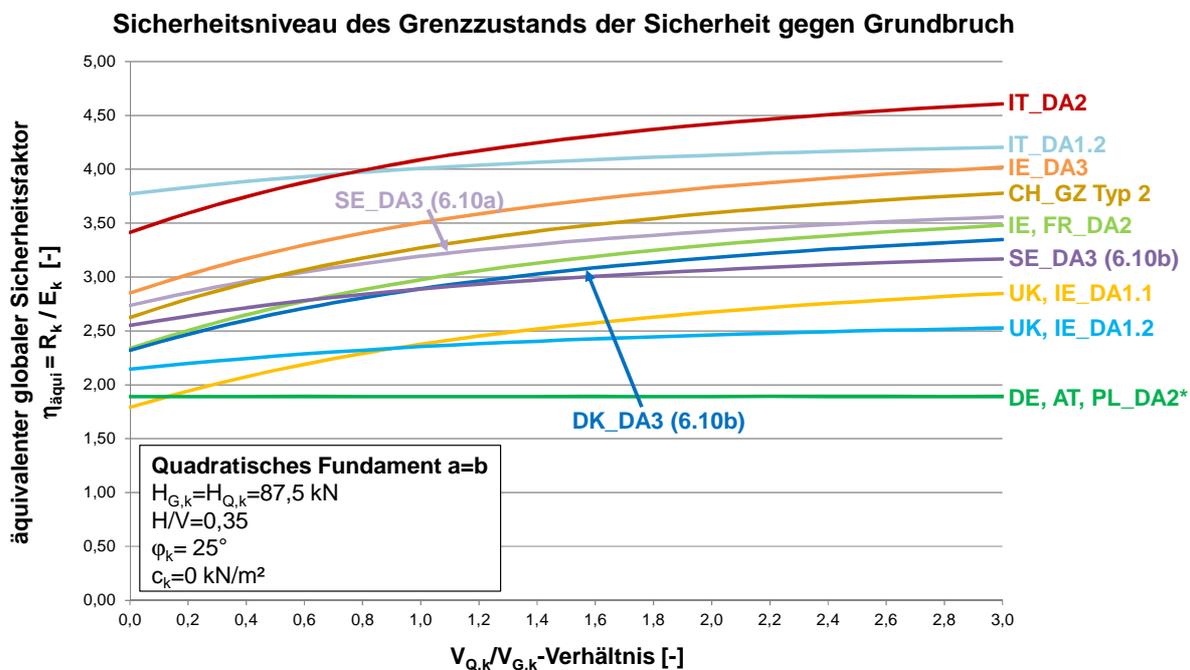


Abbildung 1.67: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

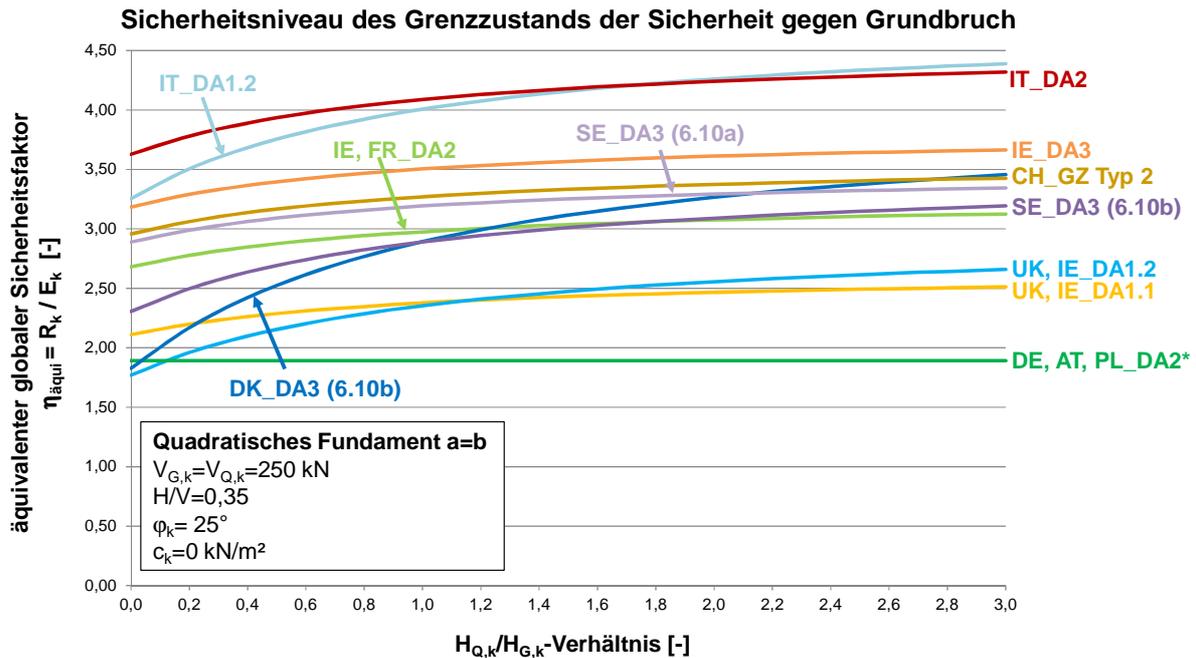


Abbildung 1.68: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k} / H_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

Abbildung 1.69 bis Abbildung 1.72 zeigen die äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch für eine Untersuchung mit drainierten und undrainierten Verhältnissen. Dabei war immer der Anfangszustand mit undrainierten Verhältnissen maßgebend. Wie bei der Untersuchung mit ausschließlich drainierten Verhältnissen ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor wie in Stufe I. Teilweise ist der Verlauf der Kurven für DK anders, wobei bei kleinen Verhältnissen die Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor eine größere Steigung haben als die Kurven der anderen Länder (siehe Abbildung 1.70 oder Abbildung 1.71). Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergeben sich die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren in der Regel für DK, während für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch IT (DA2) die höchsten Sicherheitsfaktoren aufweist.

Es ist gut zu sehen, dass Länder wie DK und SE; die nach DA3 bemessen, durch die Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte ein niedrigeres Sicherheitsniveau bei drainierten Verhältnissen als das von DA3 festgelegt haben. Hingegen ist diese Tendenz bei undrainierten Verhältnissen nicht zu erkennen. In Abhängigkeit der gewählten Höhe der Teilsicherheitsbeiwerte für die Kohäsion im undrainierten Zustand kann das Sicherheitsniveau oberhalb dessen von DA3 liegen.

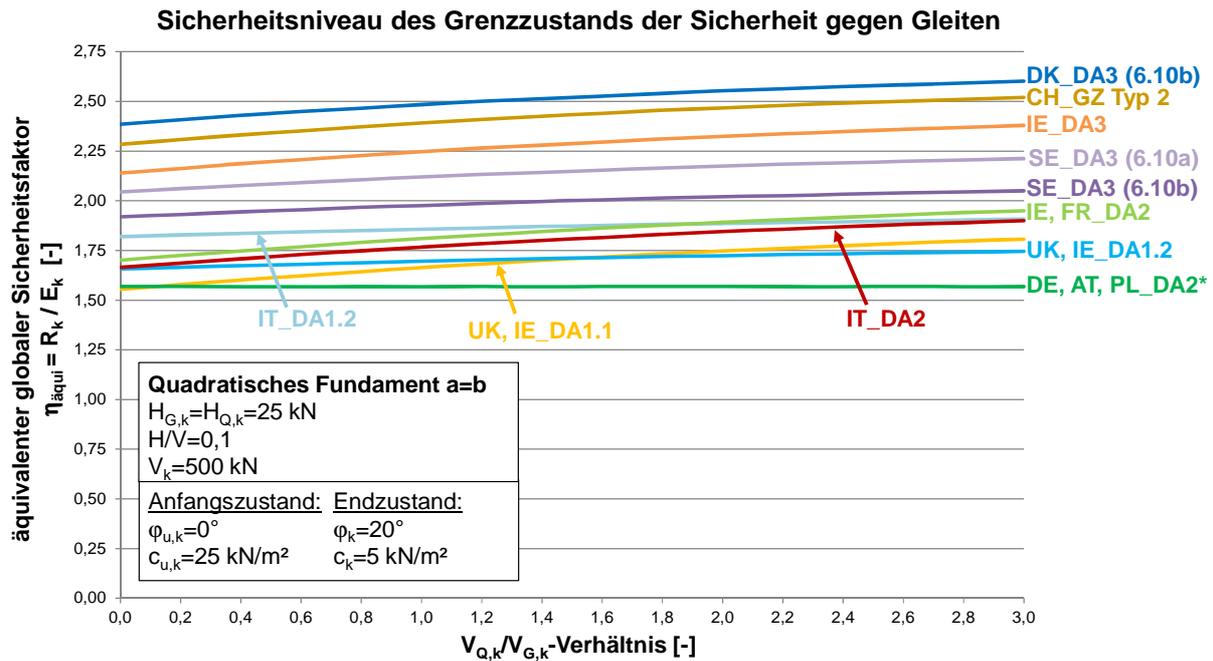


Abbildung 1.69: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

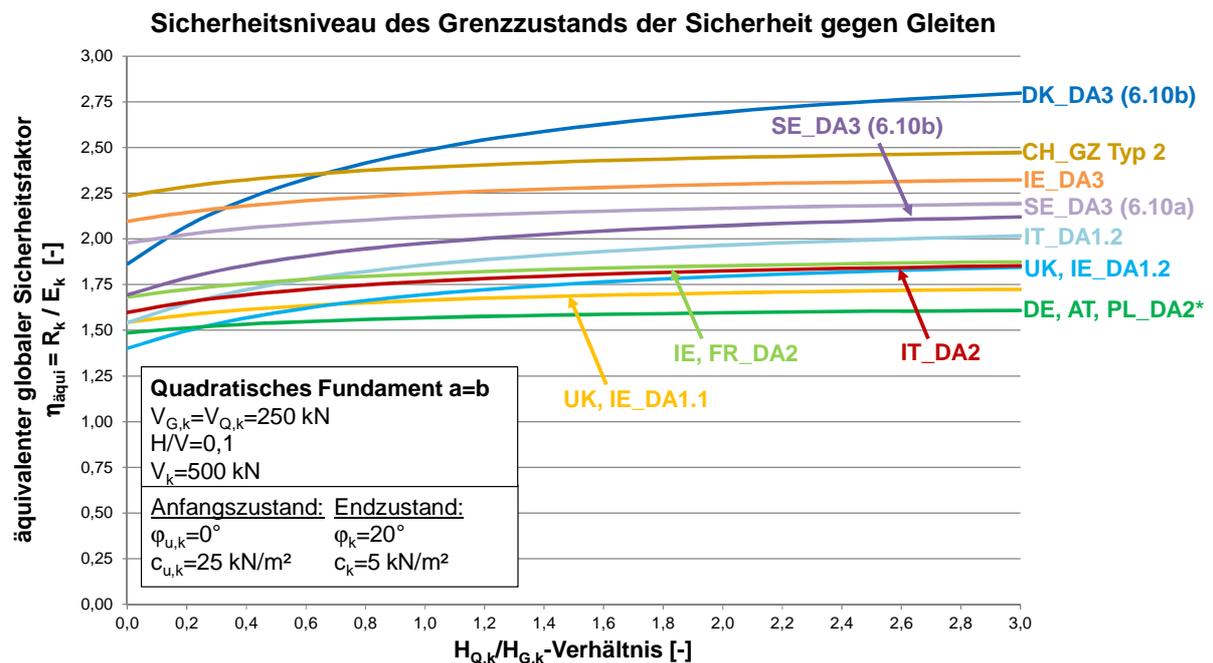


Abbildung 1.70: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

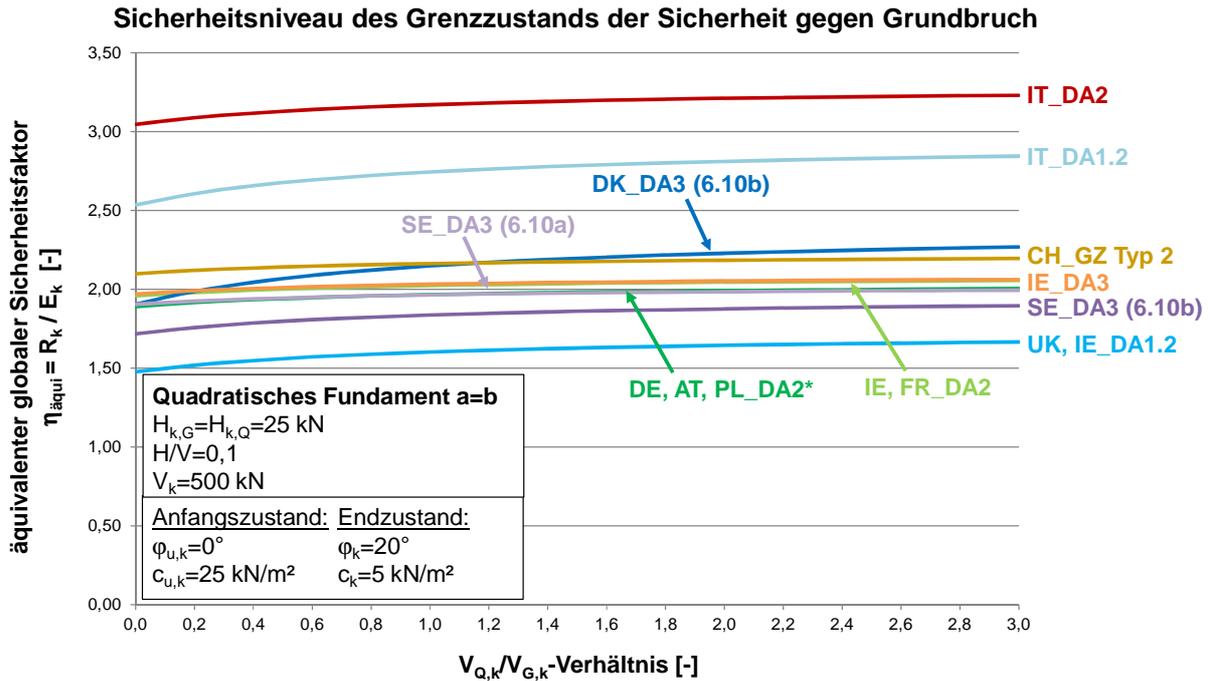


Abbildung 1.71: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

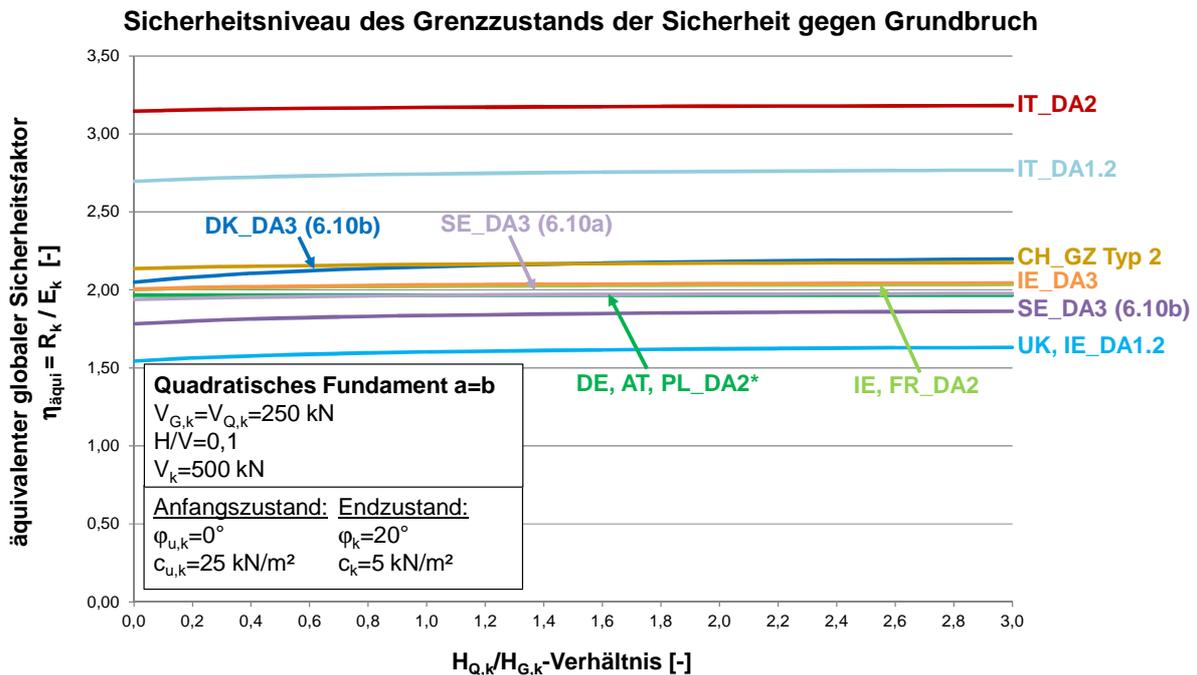


Abbildung 1.72: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

1.2.9 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III

Lastneigung

Abbildung 1.73 und Abbildung 1.74 zeigen die erforderlichen Fundamentbreiten für eine Variation der Lastneigung für AT, CH, DE, DK, IE, IT und UK. Für UK mit DA1 ist immer die Kombination 2 (DA1.2) maßgebend. Es ergeben sich für verschiedene Länder die gleichen Ergebnisse, wenn die Länder dasselbe Nachweisverfahren und dasselbe Verfahren zur Ermittlung des Widerstands (z. B. AT und DE für Gleiten oder UK und IE mit DA1 für Grundbruch) verwenden. Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergibt sich derselbe Verlauf der Kurven wie in Stufe II, weil alle Länder dasselbe Verfahren für die Ermittlung des Gleitwiderstands verwenden. Daher wird in Stufe III nur der Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch untersucht.

Beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch ergeben sich teilweise andere Fundamentbreiten als in Stufe II (siehe Abbildung 1.74). Der größte Unterschied ist bei DK zu sehen, wobei im Fall einer hohen Lastneigung von ca. 0,4 ähnliche Fundamentbreiten wie bei IT berechnet wurden. Trotz der Unterschiede bei der Berechnung des Grundbruchwiderstands ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Kurven wie in Stufe II.

Abbildung 1.75 zeigt das Sicherheitsniveau nach den national festgelegten Verfahren für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. Hier steigt für CH, DK (6.10b), IE, IT und UK der äquivalente Sicherheitsfaktor mit zunehmender Lastneigung an. Bei IT ergibt sich immer das höchste Sicherheitsniveau. Bei DE und AT ergeben sich die gleichen konstanten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren trotz unterschiedlicher erforderlicher Fundamentbreiten, da beide Länder dasselbe Nachweisverfahren (DA2*) mit den gleichen Teilsicherheitsbeiwerten und eine Grundbruchformel mit ähnlichem Aufbau für die Beiwerte verwenden. Bei DK (6.10a) ergab sich ein ähnliches konstantes Sicherheitsniveau wie bei AT oder DE.

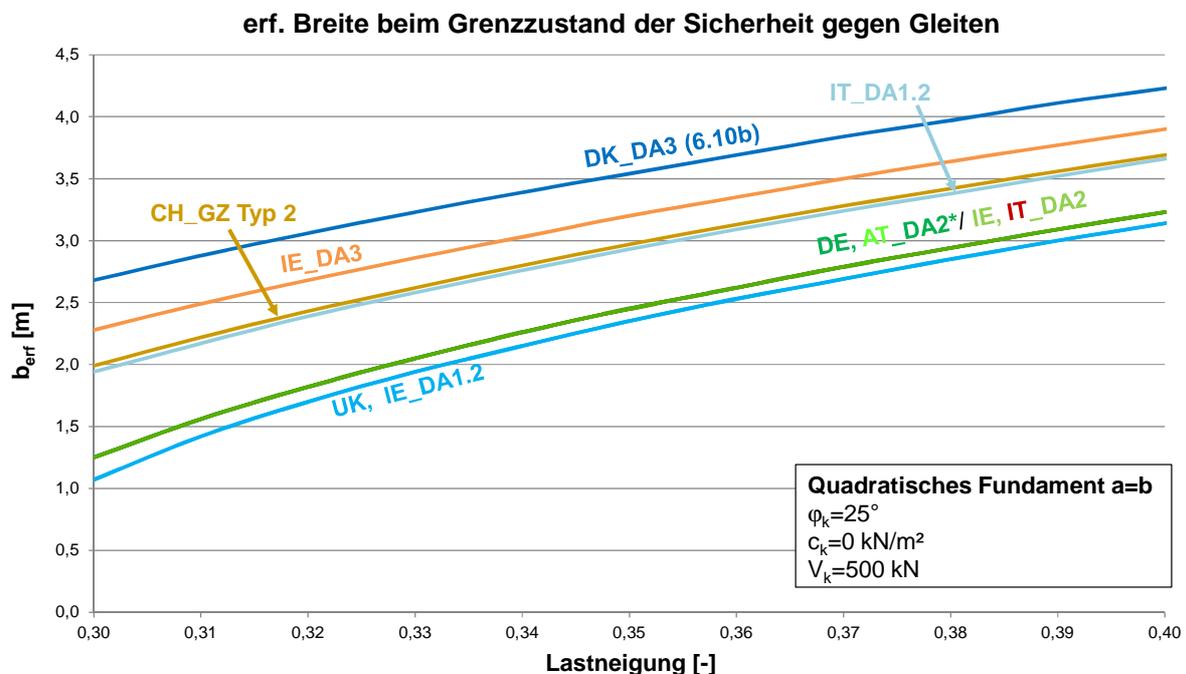


Abbildung 1.73: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe III untersuchten Länder

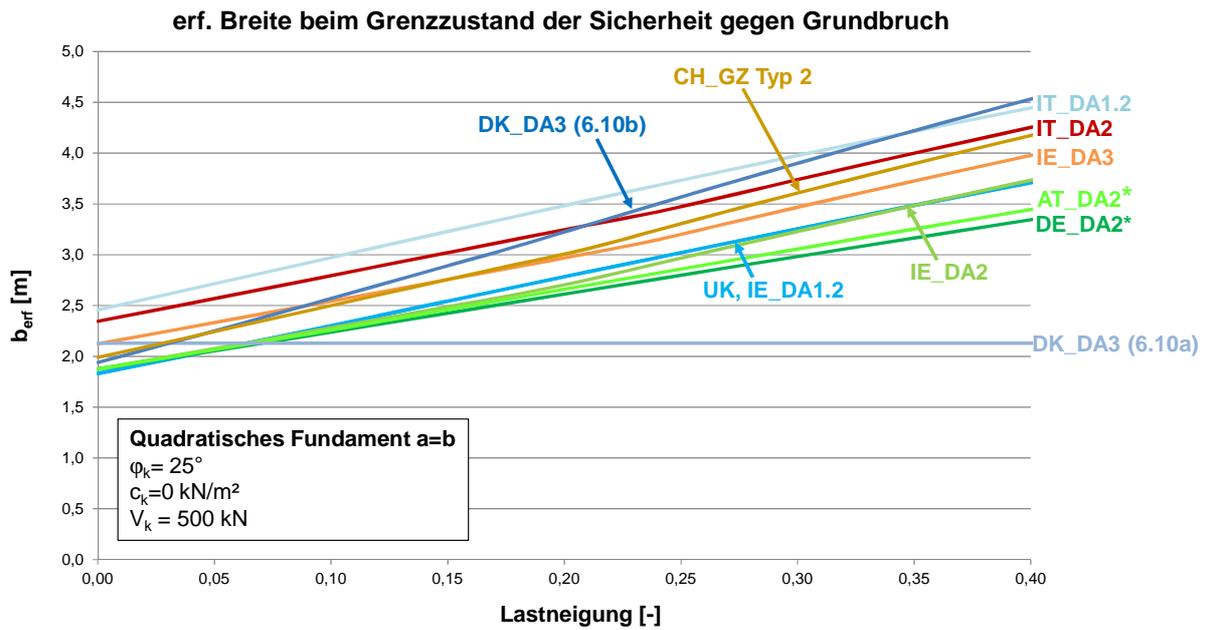


Abbildung 1.74: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe III untersuchten Länder

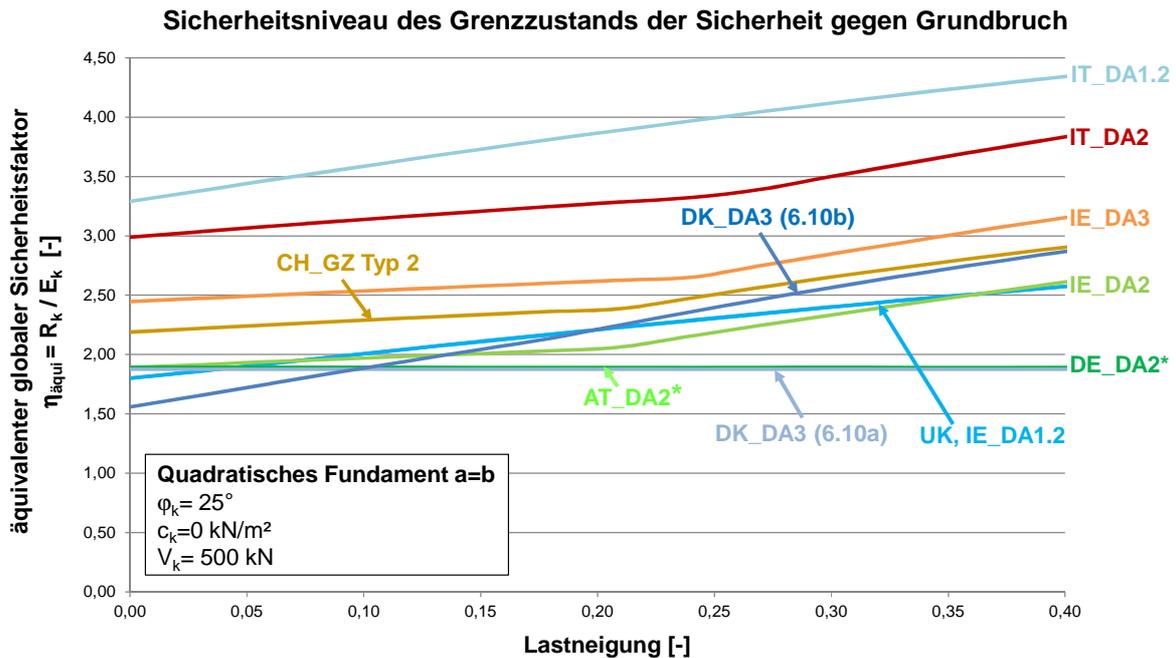


Abbildung 1.75: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe III untersuchten Länder

Abbildung 1.76 zeigt das sich nach EC7-1 ergebende Sicherheitsniveau für die untersuchten Länder (siehe Kap 1.2.6). Da UK, IE und IT das Verfahren zur Ermittlung des Grundbruchwiderstands nach EC7-1 verwenden, ist der äquivalente globale Sicherheitsfaktor derselbe wie in Abbildung 1.75. Bei IT ergibt sich meistens das höchste Sicherheitsniveau.

In DE wird zwar ein anderes Verfahren verwendet, es ergibt sich aber trotzdem dasselbe Sicherheitsniveau wie in Abbildung 1.75, da bei den vorgegebenen Randbedingungen die Grundbruchformel in DIN 4017 der Grundbruchformel in EC7-1 entspricht.

Bei AT, CH und DK ergeben sich andere Ergebnisse als in Abbildung 1.75. Bei CH und DK werden höhere äquivalente globale Sicherheitsfaktoren ermittelt und für Lastneigungen größer als 0,37 bzw. 0,34 liegt der Sicherheitsfaktor von CH bzw. DK sogar über dem von IT. Die Tendenz des Verlaufs bleibt wie in Abbildung 1.75 steigend. Bei AT ergeben sich auch höhere äquivalente globale Sicherheitsfaktoren. Außerdem ist die Kurve für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor nicht mehr konstant sondern mit zunehmender Lastneigung steigend.

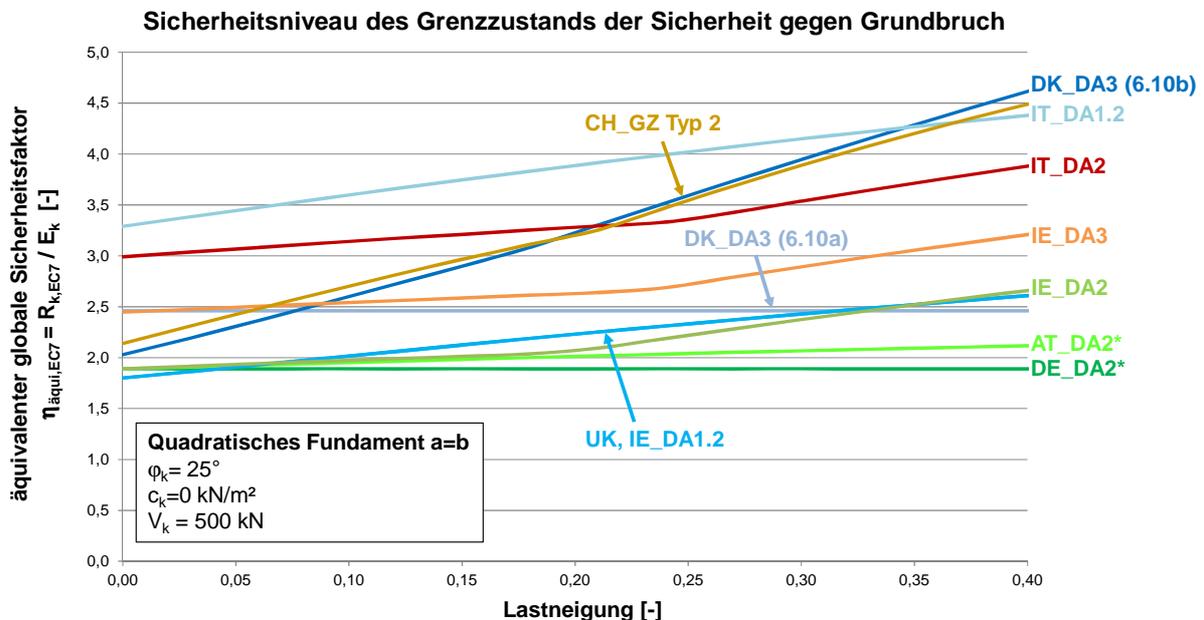


Abbildung 1.76: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 in Abhängigkeit der Lastneigung für die in Stufe III untersuchten Länder

Reibungswinkel

In Abbildung 1.77 sind die Fundamentbreiten für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch dargestellt. Da in Stufe III die nationalen Grundbruchformeln verwendet werden, ergeben sich teilweise andere Fundamentbreiten als in Stufe II. Beispiele dafür sind die Fundamentbreiten von AT und DK, die deutlich größer sind. Außerdem ergeben sich für DK ab einem Reibungswinkel von ca. 24,5° die größten Fundamentbreiten.

Abbildung 1.78 zeigt den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor nach EC7-1. Die Tendenz der Kurvenverläufe ist ähnlich wie in Stufe II. Für AT ergibt sich wie für die Variation der Lastneigung eine Kurve, die mit zunehmendem Reibungswinkel steigt und nicht mehr konstant ist. Für DK weist die Kurve eine deutlich höhere Steigung auf und es ergeben sich sogar äquivalente globale Sicherheitsfaktoren über 10,0.

Hier ist zu erwähnen, dass für DK nur die Ergebnisse nach Gleichung 6.10b) dargestellt werden, weil Gleichung 6.10b) gegenüber Gleichung 6.10a) bei der Bemessung immer maßgebend war. Bei den anderen Parametervariationen wurde analog verfahren.

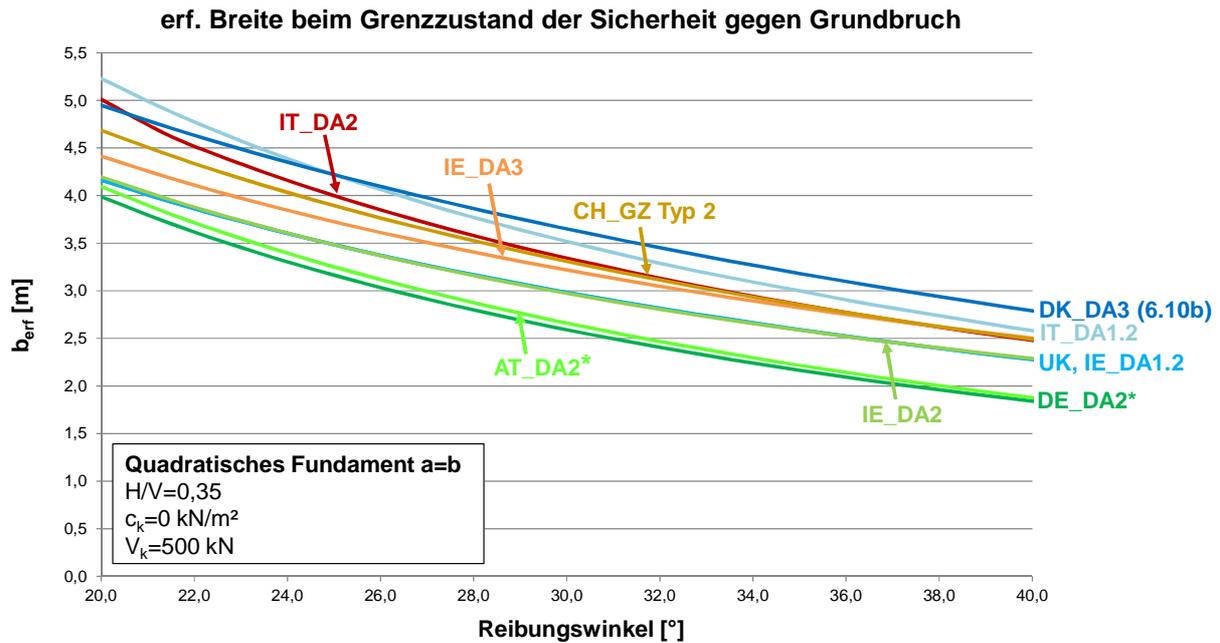


Abbildung 1.77: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die in Stufe III untersuchten Länder

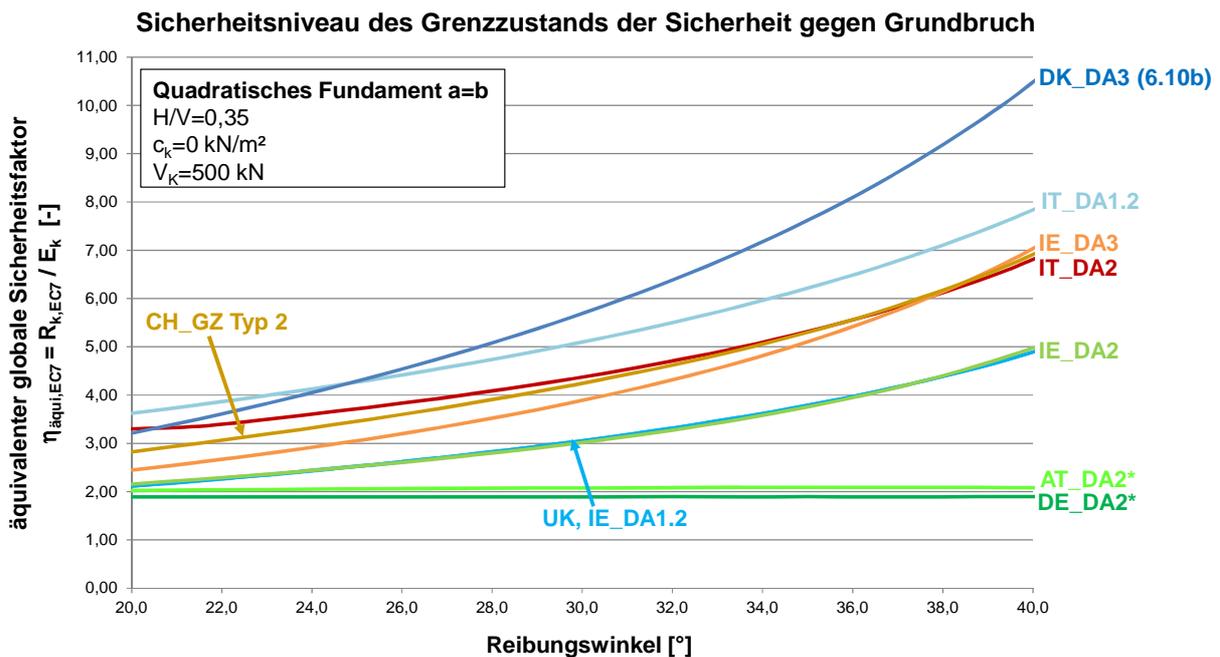


Abbildung 1.78: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die in Stufe III untersuchten Länder

Kohäsion im drainierten Zustand

Analog zur Variation der Lastneigung und des Reibungswinkels ergeben sich im Vergleich zu Stufe II größere Fundamentbreiten und äquivalente globale Sicherheitsfaktoren für AT, CH, DE und DK. Das wird für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor nach EC7-1 beispielsweise in Abbildung 1.79 dargestellt, wobei wie bereits in Stufe I und II bei der Bemessung eine Sohlneigung von 5° berücksichtigt wurde. Wie für die Variation der Lastneigung oder des Reibungswinkels ergeben sich die höchsten äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren meistens für IT.

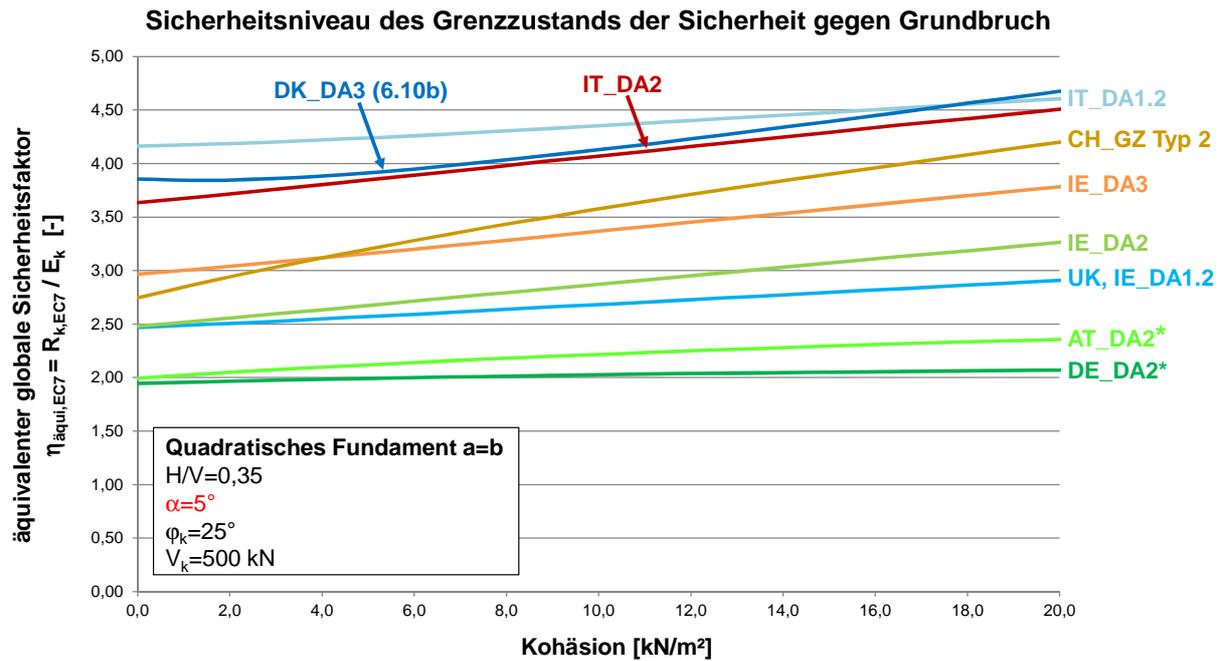


Abbildung 1.79: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 in Abhängigkeit der Kohäsion im drainierten Zustand für die in Stufe III untersuchten Länder

Kohäsion im undrainierten Zustand

Die erforderliche Fundamentbreite und der äquivalente globale Sicherheitsfaktor in Stufe III für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch sind denen in Stufe II sehr ähnlich. Jedoch ergeben sich für Länder wie AT, CH, DE und DK teilweise andere Ergebnisse (vergleiche Abbildung 1.55 mit Abbildung 1.80).

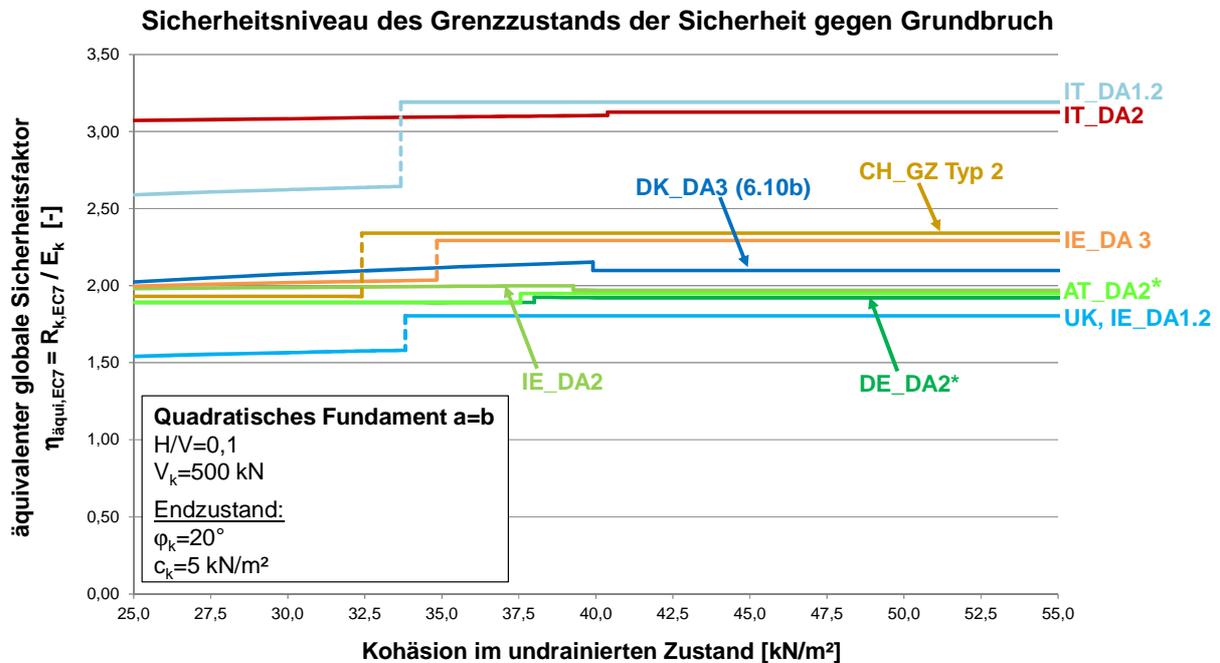


Abbildung 1.80: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die in Stufe III untersuchten Länder

Abbildung 1.80 zeigt den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor nach EC7-1, wobei für AT und DE im Vergleich zu Stufe II ein Übergang vom Anfangszustand auf den Endzustand zu verzeichnen ist. Außerdem befindet sich für CH und DK dieser Übergang bei niedrigeren Kohäsionen.

Sohlneigung

Die im Rahmen der Untersuchung ausgewählten Grundbruchformeln weisen unterschiedliche Beiwerte auf, um den Effekt einer Sohlneigung zu berücksichtigen. Deswegen ergeben sich im Vergleich zu Stufe II andere erforderliche Fundamentbreiten. Nur für DE sind die Fundamentbreiten identisch, da in Stufe II der Grundbruchwiderstand nach DIN 4017 berechnet wurde. Für AT, CH und DK ist der Unterschied zur Stufe II deutlicher, wobei die Kurven für die erforderliche Fundamentbreite und für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor deutlich schneller abnehmen (siehe beispielsweise Abbildung 1.81).

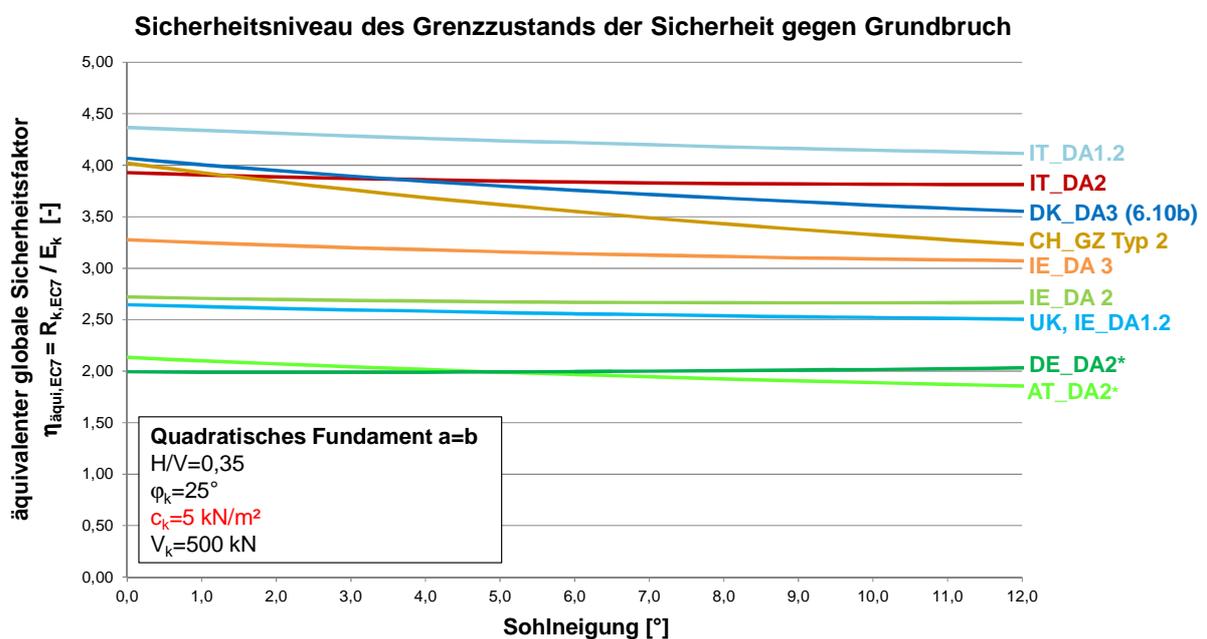


Abbildung 1.81: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 in Abhängigkeit der Sohlneigung für die in Stufe III untersuchten Länder, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

Böschungswinkel und Bermenbreite

Da nicht alle ausgewählten Grundbruchformeln Beiwerte zur Berücksichtigung einer Böschung und einer Bermenbreite enthalten, werden in Stufe III keine Vergleichsrechnungen für eine Variation dieser Parameter durchgeführt.

Hebelarm

Bei einer Variation des Hebelarms ergeben sich für Länder wie AT, CH und DK andere Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor im Vergleich zu Stufe II. Insbesondere für die Berechnungen nur mit Parametern im drainierten Zustand ergeben sich für CH und DK deutlich höhere äquivalente globale Sicherheitsfaktoren, wobei DK das höchste Sicherheitsniveau erreicht (siehe Abbildung 1.82). Für die Berechnungen mit Parametern im drainierten und undrainierten Zustand ist nur für DK eine Erhöhung der äquivalenten globalen Sicherheitsfaktoren zu erkennen, während für CH eine Abnahme der Sicherheitsfaktoren zu verzeichnen ist (siehe Abbildung 1.83).

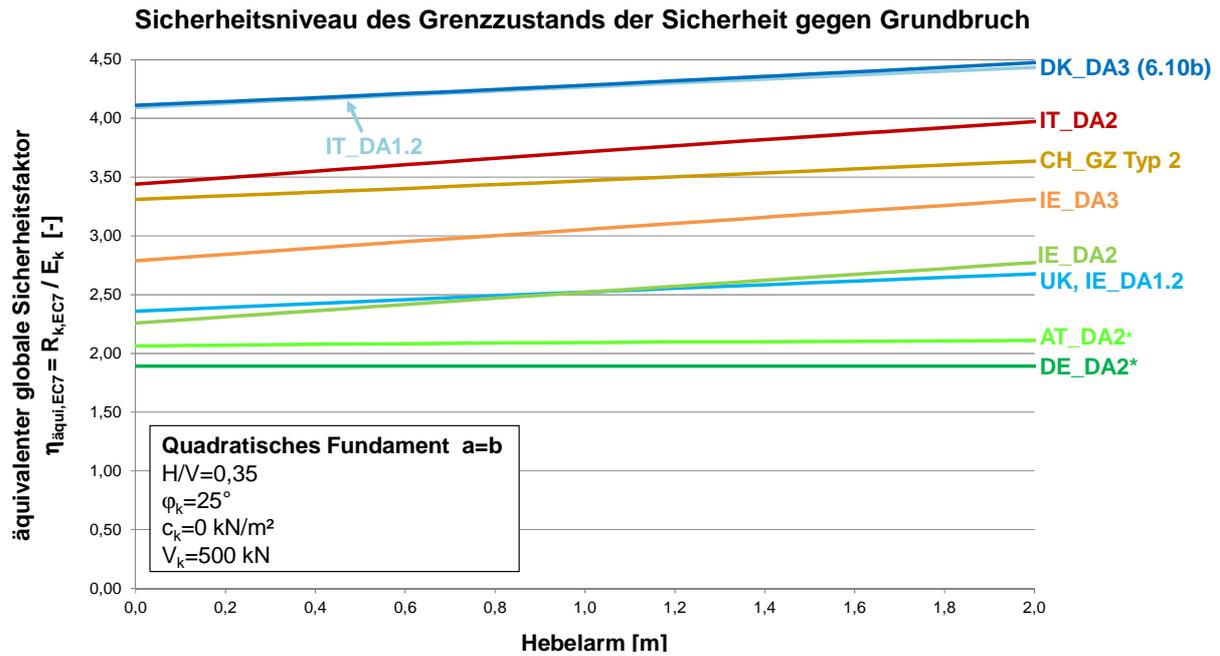


Abbildung 1.82: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 in Abhängigkeit des Hebelarms für die in Stufe III untersuchten Länder

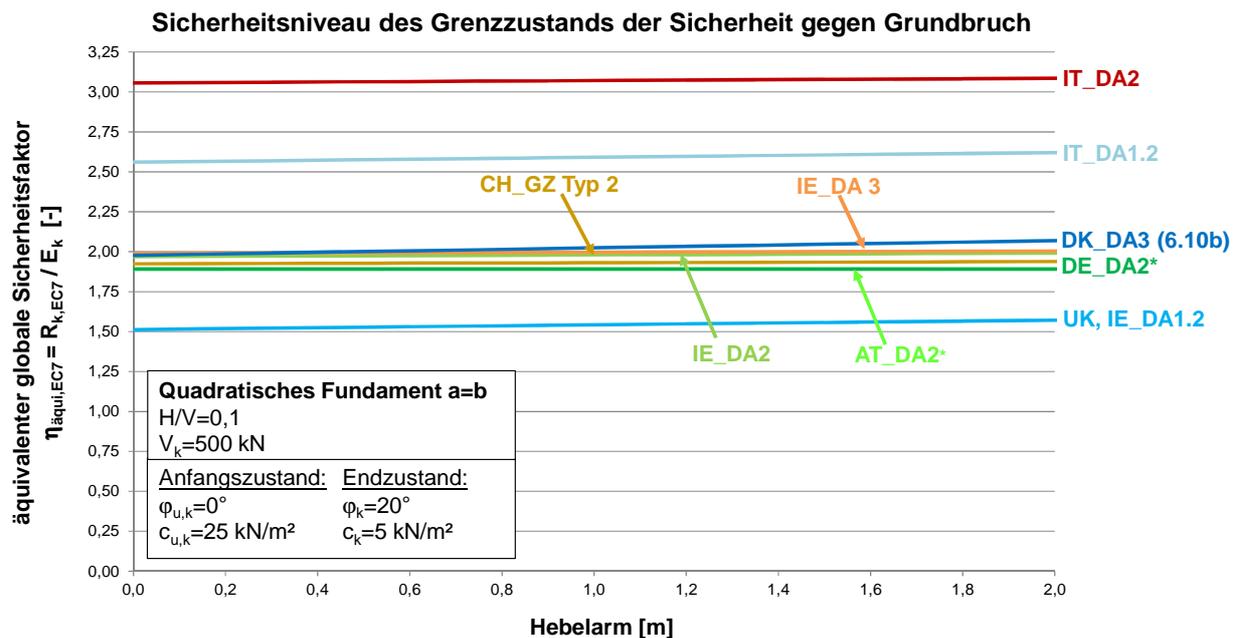


Abbildung 1.83: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach EC7-1 für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Hebelarms für die in Stufe III untersuchten Länder

Verhältnis veränderlicher zu ständiger Einwirkungen

Wie bei den anderen Parametervariationen ergeben sich im Vergleich zu Stufe II wesentliche Unterschiede nur bei den Kurven für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor von AT, DK und CH für drainierte Verhältnisse. In Abbildung 1.84 und Abbildung 1.85 ist gut zu sehen, dass sich höhere äquivalente globale Sicherheitsfaktoren für AT, DK und CH wegen der konservativeren Grundbruchformel ergeben. Teilweise liegen die Kurven von DK sogar oberhalb von IT.

Bei der Untersuchung mit drainierten und undrainierten Verhältnissen hat nur die Grundbruchformel von CH einen günstigen Einfluss auf die Berechnung. Die Kurve für den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor von CH ist niedriger als in Stufe II (siehe Abbildung 1.86 und Abbildung 1.87). Das ist dadurch zu erklären, dass CH Beiwerte zur Berücksichtigung der Einbindetiefe (Tiefenfaktoren) verwendet, die einen günstigen Einfluss auf die Bemessung haben. Dieser Effekt ist bei undrainierten Verhältnissen zu erkennen, während bei drainierten Verhältnissen die deutlich ungünstigeren Lastneigungsbeiwerte den günstigen Effekt der Tiefenfaktoren übertreffen.

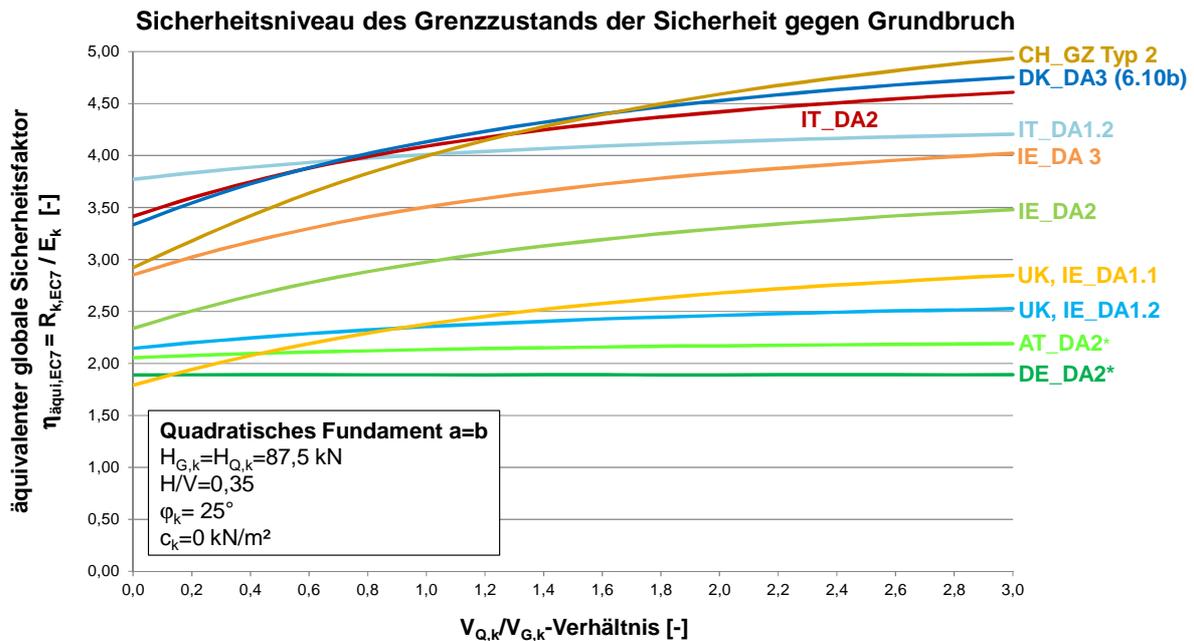


Abbildung 1.84: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die in Stufe III untersuchten Länder

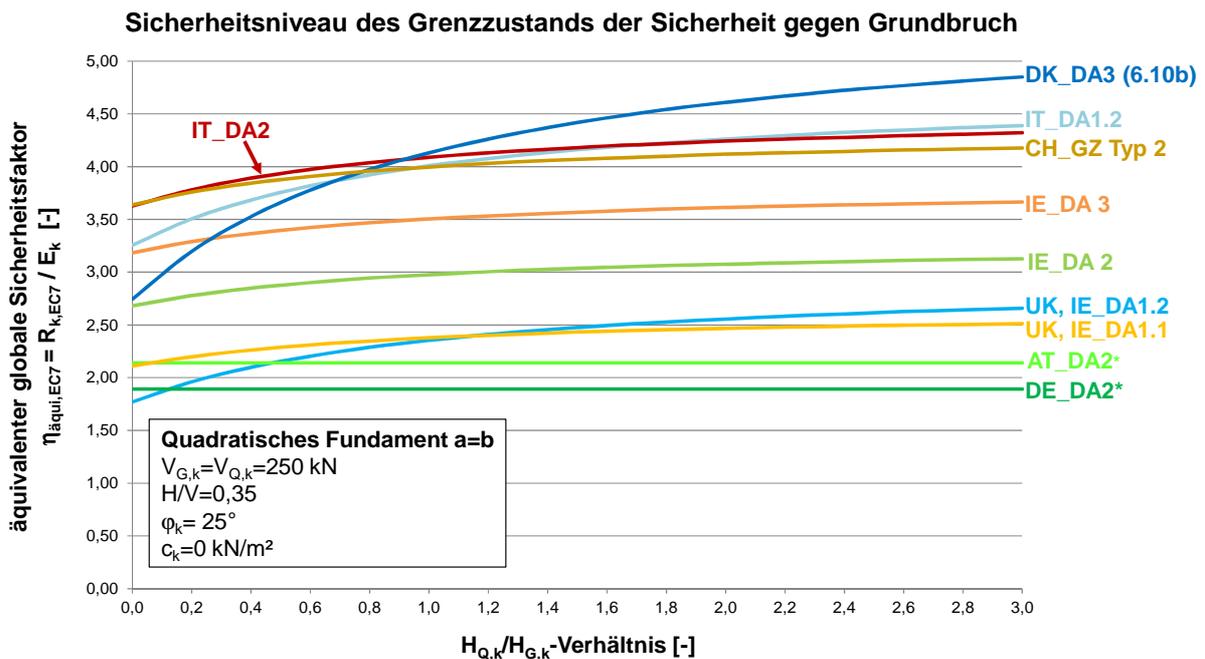


Abbildung 1.85: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die in Stufe III untersuchten Länder

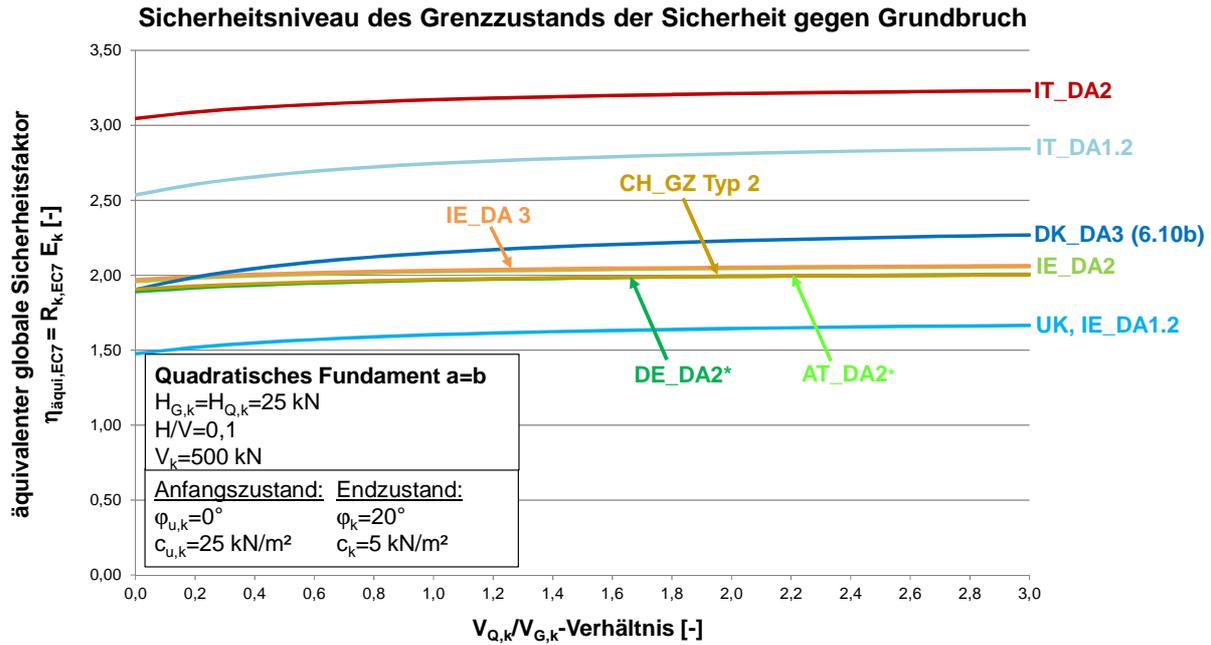


Abbildung 1.86: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k} / V_{G,k}$ für die in Stufe II untersuchten Länder

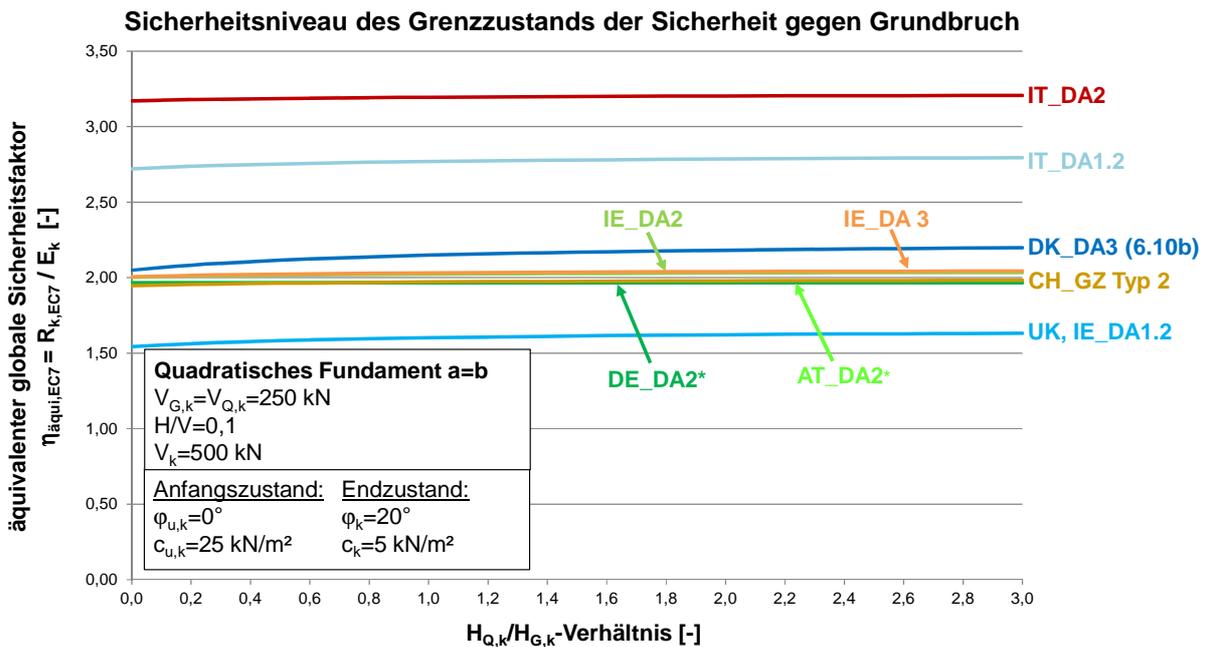


Abbildung 1.87: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k} / H_{G,k}$ für die in Stufe III untersuchten Länder

1.2.10 Besonderheiten

Die Berechnung des äquivalenten globalen Sicherheitsfaktors für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch nach dem Verfahren in EC7-1 führt in einigen Fällen zu höheren Werten als eine Berechnung nach den national festgelegten Verfahren. Das deutet darauf hin, dass die national festgelegten Verfahren zur Ermittlung des Grundbruchwiderstands einiger Länder meistens konservativer sind als das Verfahren nach EC7-1.

1.3 Therapie

Aus den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Für alle Parametervariationen stellte sich beim Nachweisverfahren DA1 heraus, dass die Variante mit abgeminderten Scherparametern DA1.2 (Kombination 2 der Teilsicherheitsbeiwerte) fast immer maßgebend war. Nur für Fälle mit großen vertikalen veränderlichen Einwirkungen ist DA1.1 geringfügig kritischer.
2. Bei beiden Nachweisen der Sicherheit gegen Gleiten und Grundbruch weist das Nachweisverfahren DA3 immer das höchste Sicherheitsniveau auf.
3. Im Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten weisen die Nachweisverfahren DA1.2 und DA2 bzw. DA2* ein ähnliches Sicherheitsniveau auf.
4. Die Kurven für den äquivalenten Sicherheitsfaktor von DA2 und DA3 verlaufen in den meisten Fällen für die Grenzzustände der Sicherheit gegen Gleiten und der Sicherheit gegen Grundbruch nahezu parallel, sodass sie durch Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte ineinander überführt werden können.
5. DK und SE sind Länder, die bei der Bildung der Bemessungswerte der Einwirkungen zusätzlich Schadensfolgeklassen oder Sicherheitsklassen sowie unterschiedliche Kombinationen für die Einwirkungen berücksichtigen. Dabei sind in DK immer eine reine ständige Bemessung und eine Bemessung mit ständigen und veränderlichen Einwirkungen durchzuführen, während in SE eine reine ständige Bemessung nicht zulässig ist. Außerdem weichen die national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, Bodenkenngößen und Baugrundwiderstände von denen des EC7-1 ab.
6. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergibt sich bei den untersuchten Ländern ein Unterschied im Sicherheitsniveau nur aus den verwendeten Teilsicherheitsbeiwerten (siehe Stufe II und III). Hingegen hängt das Sicherheitsniveau für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch auch von den verwendeten Modellen für die Grundbruchberechnung ab (siehe Stufe III). Diesbezüglich ergibt sich meistens eine konservativere Bemessung, wenn die Länder ein anderes Verfahren zur Ermittlung des Grundbruchwiderstands als das in EC7-1 angegebene Verfahren verwenden.
7. Die meisten Länder, die mit DA3 bemessen, haben ein höheres Sicherheitsniveau als die anderen. In manchen Fällen weist Italien mit DA2 oder DA1.2 wegen der verwendeten extrem hohen Teilsicherheitsbeiwerte für die Baugrundwiderstände höhere Sicherheiten auf.
8. Da in Deutschland bislang keine Schadensfälle bekannt wurden, die bei Ansatz realistischer Bodenkenngößen zu einem Versagen aufgrund mangelnder rechnerischer Abmessungen geführt haben, ist mit den Ländern, die nach DA1.2, DA2 bzw. DA3 bemessen, zu diskutieren, aus welchen Gründen sie die im Vergleich unwirtschaftlicheren Abmessungen in Kauf nehmen, obwohl dies aus Gründen der Standsicherheit nicht notwendig wäre.

Im Hinblick auf die Harmonisierung der Nachweisverfahren wurden zusätzliche Berechnungen mit Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte von DA2 und DA3 durchgeführt, um ein identisches Sicherheitsniveau für beide Nachweisverfahren zu ermitteln. Abbildung 1.88 und Abbildung 1.89 zeigen die beste Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte für eine Variation des Reibungswinkels. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergibt sich das gleiche Sicherheitsniveau für DA3 und DA2, wenn $\gamma_{\phi'}$ und γ_{GI} gleich sind. Für $\gamma_{\phi'}$ und γ_{GI} gleich 1,20 ergab sich ein Sicherheitsniveau, das zwischen dem von DA3 und DA2 liegt. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch ergab sich die beste Anpassung für $\gamma_{\phi'}$ gleich 1,18 und γ_{Gr} gleich 1,65, wobei es im Vergleich zur Sicherheit gegen Gleiten kein gleiches Sicherheitsniveau für DA2 und DA3 erreicht wurde.

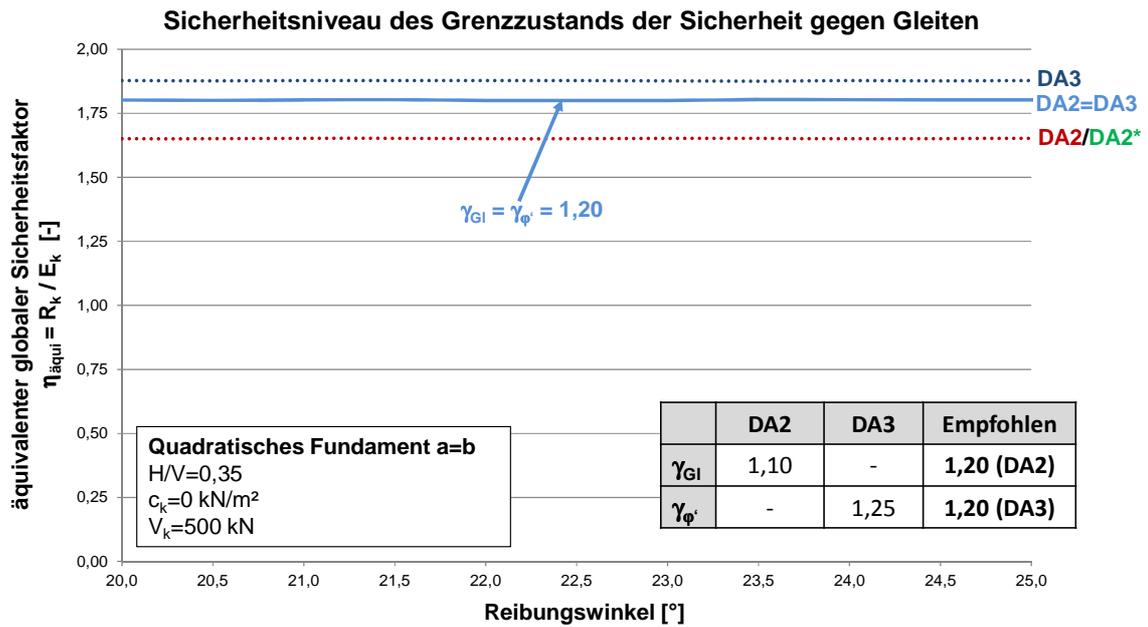


Abbildung 1.88: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte von DA2 und DA3 für eine Variation des Reibungswinkels

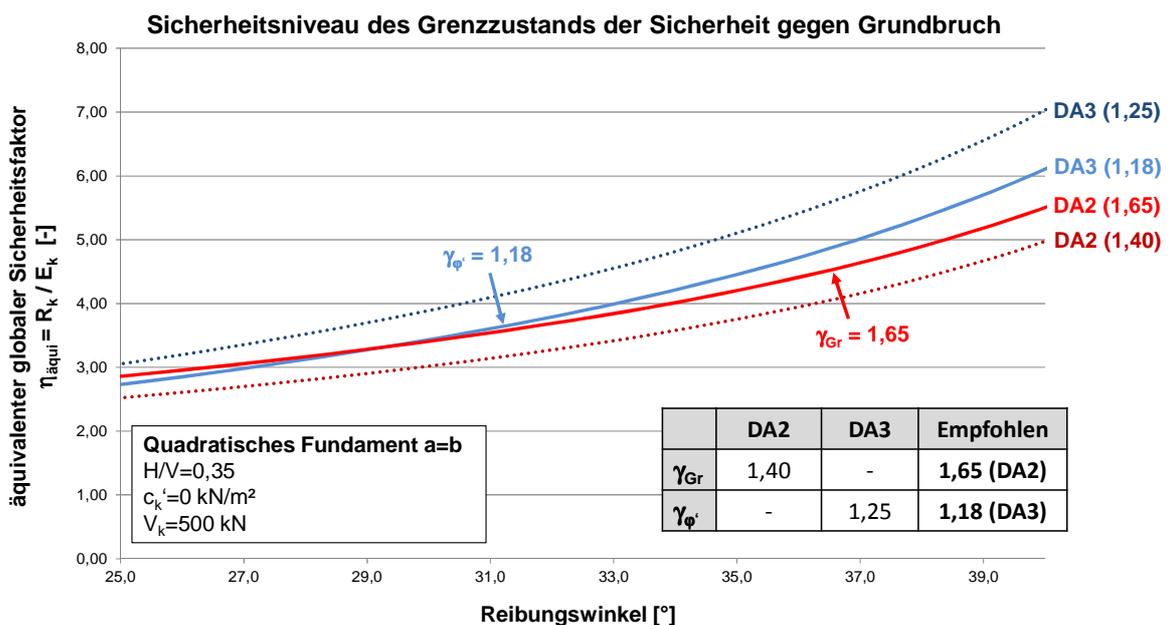


Abbildung 1.89: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte von DA2 und DA3 für eine Variation des Reibungswinkels

In Tabelle 1.5 sind die Paare von Teilsicherheitsbeiwerten für die beste Gleichung des Sicherheitsniveaus von DA2 und DA3 für die untersuchten Parametervariationen zusammengefasst. Für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten ergaben sich andere Paare von Teilsicherheitsbeiwerten als für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch. Auch zwischen dem drainierten und dem undrainierten Zustand treten bei den Teilsicherheitsbeiwerten Diskrepanzen auf. Eine erfolgreiche Anpassung konnte daher nicht durchgeführt werden. Zur Harmonisierung der Nachweisverfahren ist entweder ein bestehendes Nachweisverfahren auszuwählen oder ein neues Nachweisverfahren vorzuschlagen.

Tabelle 1.5: Beste Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte von DA2 und DA3 für die verschiedenen Parametervariationen

Parameter-variation	Gleiten			Grundbruch		
	DA2	DA3		DA2	DA3	
	γ_{GI}	$\gamma_c = \gamma_\phi$	γ_{cu}	γ_{Gr} (25° / 40°)	$\gamma_c = \gamma_\phi$ (25° / 40°)	γ_{cu}
Drainierter Zustand						
ϕ	1,2	1,2	-	1,65	1,18	-
H/V	1,2	1,2	-	1,62 / 1,75	1,2 / 1,15	-
Q/G	1,2	1,2	-	1,60 / 1,75	1,2 / 1,15	-
c	1,2	1,2	-	1,65	1,2	-
Undrainierter Zustand						
c_u	1,25	-	1,25	1,4	-	1,4

Das in Europa zu verwendende Nachweisverfahren soll gleichzeitig eine sichere und wirtschaftliche Bemessung erlauben. Im Hinblick auf eine Bewertung der Nachweisverfahren sind für den Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch für eine Variation des Reibungswinkels das Sicherheitsniveau und die erforderliche Fundamentbreite in den Abbildung 1.90 und Abbildung 1.91 für die verschiedenen Nachweisverfahren dargestellt.

In Abbildung 1.90 wird gezeigt, dass eine Bemessung mit dem in Deutschland verwendeten Nachweisverfahren DA2* mit Faktorisierung der Beanspruchung und des Grundbruchwiderstands ein fast identisches Sicherheitsniveau aufweist wie das schon bewährte alte Globalensicherheitskonzept für einen Sicherheitsfaktor von 2,0. Eine Bemessung mit DA2 mit Faktorisierung der Einwirkungen sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite führt zu höheren Sicherheitsfaktoren, die mit zunehmenden Reibungswinkeln überproportional steigen. Diese überproportionale Zunahme der Sicherheitsfaktoren wird verstärkt, wenn in DA3 statt des Grundbruchwiderstands der Reibungswinkel faktorisiert wird. Die mit DA2 und DA3 erreichten Sicherheitsfaktoren sind wegen der Nichtlinearität des Grundbruchwiderstands insbesondere für große Reibungswinkel überproportional hoch. Daher können die Nachweisverfahren DA2 und DA3 mit Faktorisierung der Einwirkungen bzw. der Bodenkenngrößen als sehr konservativ bzw. unwirtschaftlich angesehen werden. Dies wird ebenfalls in Abbildung 1.91 gezeigt, wobei mit DA2 bzw. DA3 ca. 24% bzw. 36% größere Fundamentbreiten erforderlich sind als mit DA2*. Ein echter Vergleich ist jedoch schwierig, da bei DA2* meist unklar bleibt, wie die Streuung der Parameter bei der Festlegung der charakteristischen Werte berücksichtigt wurde.

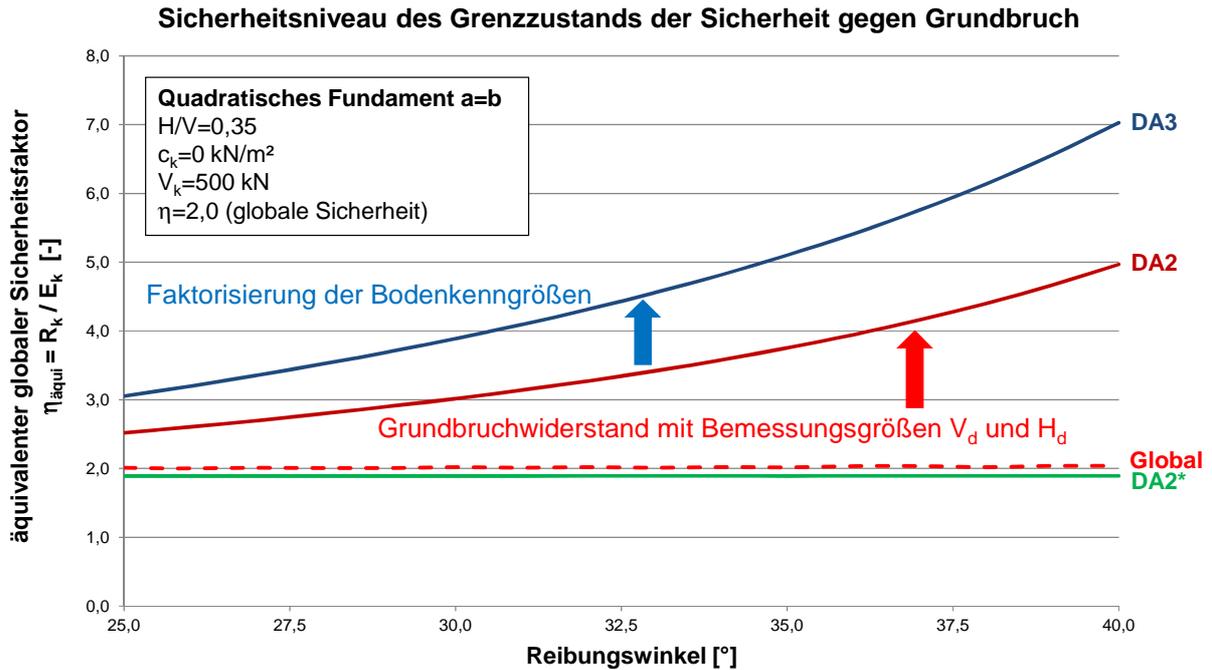


Abbildung 1.90: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, Bewertung des globalen äquivalenten Sicherheitsfaktors für eine Variation des Reibungswinkels

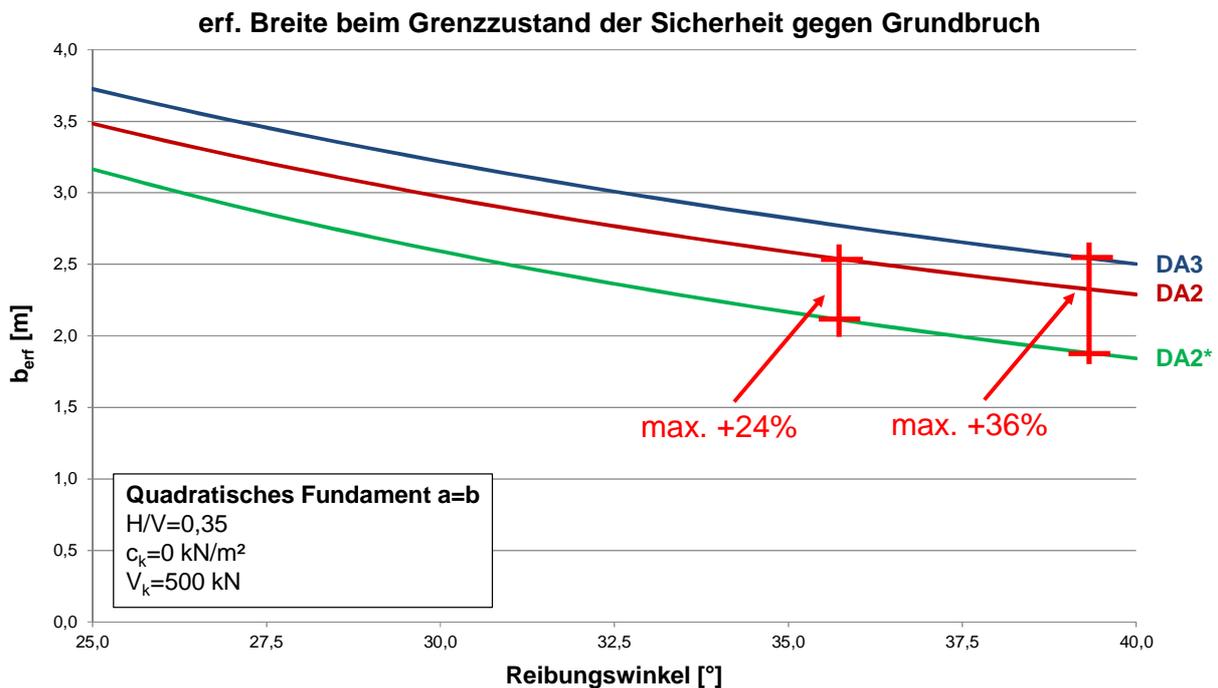


Abbildung 1.91: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, Bewertung der erforderlichen Fundamentbreite für eine Variation des Reibungswinkels

In EC0 (DIN EN 1990) sind die allgemeinen Regeln für die Bildung der Bemessungswerte der Beanspruchungen und der Widerstände für die Tragwerksbemessung festgelegt. Dabei sind Teilsicherheitsbeiwerte zur Berücksichtigung der Parameterstreuung (γ_f bzw. γ_m) und der Modellunsicherheit (γ_{Sd} bzw. γ_{Rd}) anzuwenden (siehe Gl 1.6 und 1.7). Im Vergleich zu EC7-1 gehen in EC0 die Einwirkungen auf der Widerstandsseite nicht ein.

Für die Beanspruchung (Auswirkung):

$$E_d = \gamma_{Sd} \cdot E(\gamma_f \cdot F_{rep}; a_d) \quad \text{Gl. 1.6}$$

Für den Widerstand (Tragfähigkeit):

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\left(\eta_x \cdot \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d\right) \quad \text{Gl. 1.7}$$

mit:

a_d = Bemessungswert der geometrischen Größen

η_x = Umrechnungsbeiwert zwischen Probeneigenschaften und maßgebenden Eigenschaften im Bauteil (darf schon in X_k implizit berücksichtigt werden)

γ_f = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung ungünstiger Größenabweichungen der Einwirkungen (Streuung)

γ_{Sd} = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Berechnungsmodell der Einwirkungen bzw. der Beanspruchungen

γ_m = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung ungünstiger Abweichungen der Baustoff- oder Produkteigenschaft (Material) bzw. der Streuung des Umrechnungsbeiwerts

γ_{Rd} = Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Widerstandsmodell

Vereinfacht darf auch nur ein Teilsicherheitsbeiwert verwendet werden, der sich aus der Multiplikation zwischen dem Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Parameterstreuung und dem zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit ergibt. Somit ergeben sich ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = \gamma_f \cdot \gamma_{Sd}$ für die Beanspruchung bzw. ein Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = \gamma_m \cdot \gamma_{Rd}$ für den Widerstand, der entweder auf die Einwirkungen oder auf die Beanspruchungen bzw. auf das Material oder auf den charakteristischen Widerstand angewendet werden darf. Unter Berücksichtigung dieser Vereinfachungen und der Einwirkungen auf der Widerstandsseite sind die verschiedenen Nachweisverfahren im EC7-1 entstanden.

Hinsichtlich der Harmonisierung der Nachweisverfahren wäre es eigentlich naheliegend, dass es in der Geotechnik wegen der Nichtlinearität der geotechnischen Modelle keine Vereinfachung bei den Teilsicherheitsbeiwerten vorgenommen wird. So ergäbe sich ein Nachweisverfahren DA0, das Teilsicherheitsbeiwerte zur Berücksichtigung der Streuung auf die Einwirkungen und Bodenkenngrößen und zur Berücksichtigung der Modellunsicherheit auf die berechneten Beanspruchungen und Baugrundwiderstände verwendet:

$$E_d = \gamma_{Sd} \cdot E(\gamma_f \cdot F_{rep}; a_d) \quad \text{Gl. 1.8}$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\left(\gamma_f \cdot F_{rep}; \frac{X_k}{\gamma_m}; a_d\right) \quad \text{Gl. 1.9}$$

Abbildung 1.92 und Abbildung 1.93 zeigen eine Berechnung mit dem vorgeschlagenen Nachweisverfahren DA0. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch die Anwendung von DA0 die

unrealistische hohe Nichtlinearität in DA3 oder DA2 gedämpft wird. Äquivalente globale Sicherheitsfaktoren zwischen 2,5 und 3,25 werden erreicht, die ungefähr den alten Sicherheitsfaktoren in Europa (zwischen 2 und 3) nach dem Globalensicherheitskonzept entsprechen.

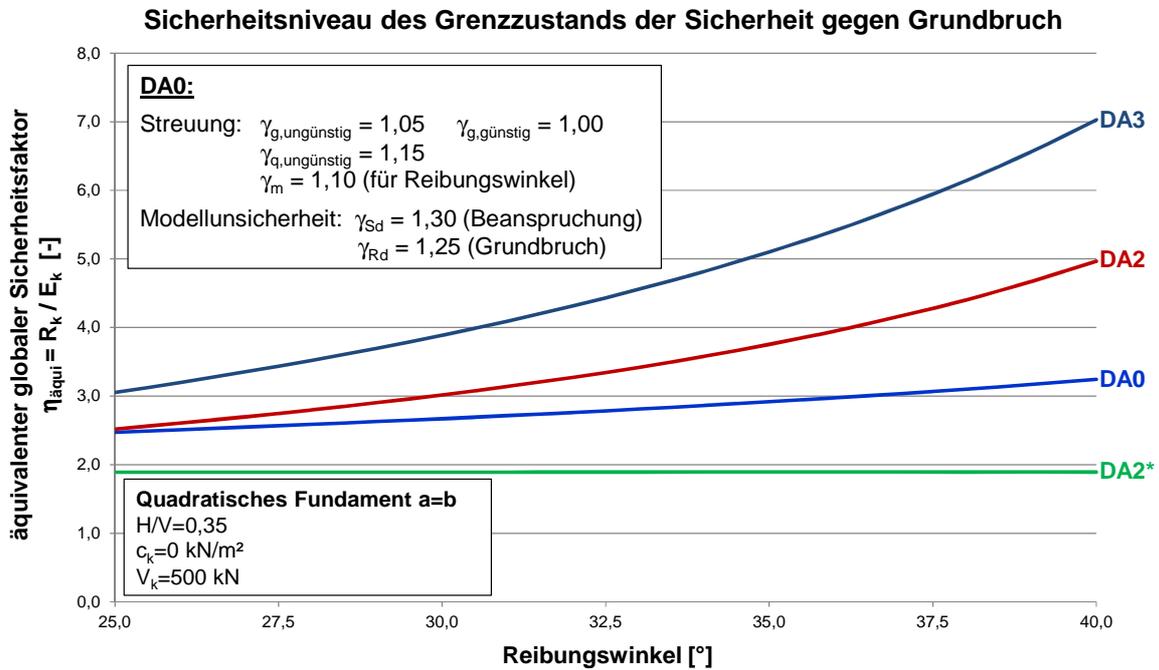


Abbildung 1.92: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, globaler äquivalenter Sicherheitsfaktor für eine Variation des Reibungswinkels mit vorgeschlagenem DA0

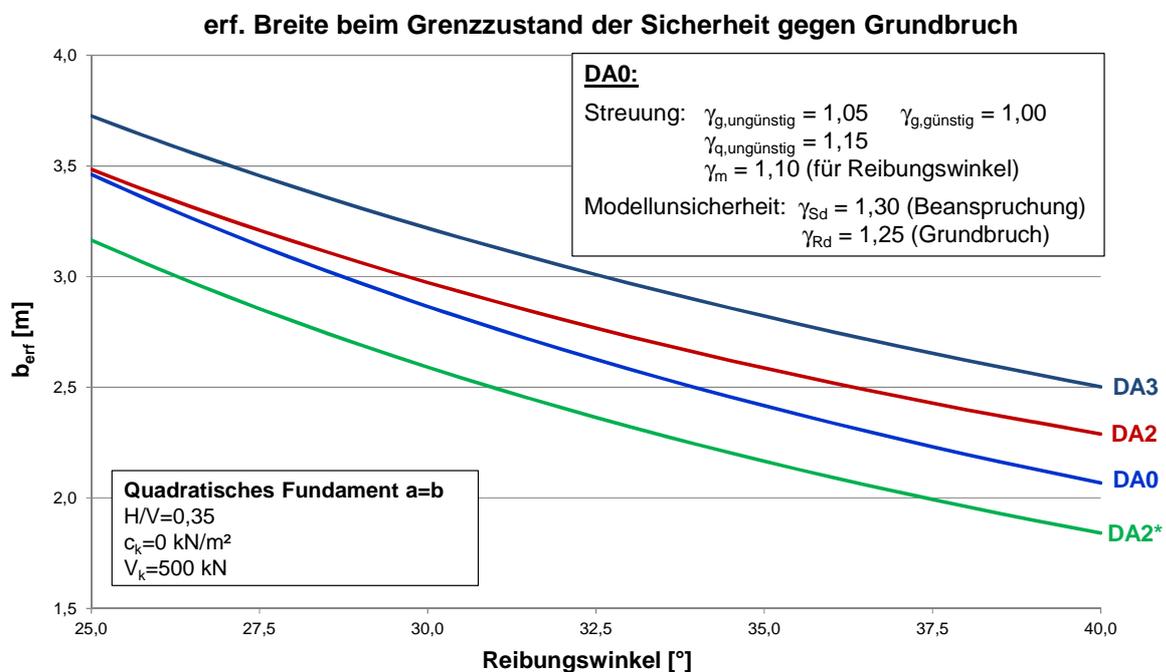


Abbildung 1.93: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite für eine Variation des Reibungswinkels mit vorgeschlagenem DA0

Wenn bei der Ermittlung der charakteristischen Werte allerdings schon die Streuung der Parameter (siehe Absatz 2.4.5 des EC7-1) berücksichtigt wurde, kann die Berücksichtigung

der Parameterstreuung mit Teilsicherheitsbeiwerten bei der geotechnischen Bemessung entfallen. Der Bemessungswert der Beanspruchung und des Widerstands werden dann wie bei DA2* ermittelt:

$$E_d = \gamma_{Sd} \cdot E(F_{rep}; a_d) \quad \text{Gl. 1.10}$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R(F_{rep}; X_k; a_d) \quad \text{Gl. 1.11}$$

Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 1.94, wobei bei der Berechnung eines quadratischen Fundaments die Parameterstreuung bei DA2* bei der Ermittlung des charakteristischen Reibungswinkels berücksichtigt wurde. Hierfür wurde der charakteristische Reibungswinkel aus dem arithmetisch gemittelten Reibungswinkel abgeschätzt, wobei gegenüber diesem eine mögliche ungünstige Streuung in Form von -2° bis -4° berücksichtigt wurde. Da bei DA0 die Streuung über den Teilsicherheitsbeiwert γ_m berücksichtigt wird, wurde dafür als Berechnungsreibungswinkel der mittlere Reibungswinkel angenommen. Es ist zu sehen, dass sich für eine Berücksichtigung der Streuung von ca. -3° bei DA2* nahezu identische erforderliche Fundamentbreiten im Vergleich zu DA0 ergaben. Bei Reibungswinkeln unterhalb $32,5^\circ$ liegt DA2* etwas über DA0 und damit auf der sicheren Seite. Oberhalb $32,5^\circ$ liegt DA2* geringfügig unterhalb DA0. Je nach angesetzter Streubreite liegen die erforderlichen Fundamentbreiten entweder oberhalb oder unterhalb DA0. Der Ansatz der Streuung ist daher entscheidender für die Berechnung als das Nachweisverfahren selbst. In Abbildung 1.94 werden auch die erforderlichen Fundamentbreiten für DA3 dargestellt. Da dort bei der Faktorisierung des Reibungswinkels sowohl die Streuung als auch die Modellunsicherheit eingeht, wirkt sich die Nichtlinearität in der Bestimmung des Grundbruchwiderstands unverhältnismäßig hoch aus, was sich in größeren erforderlichen Fundamentbreiten widerspiegelt.

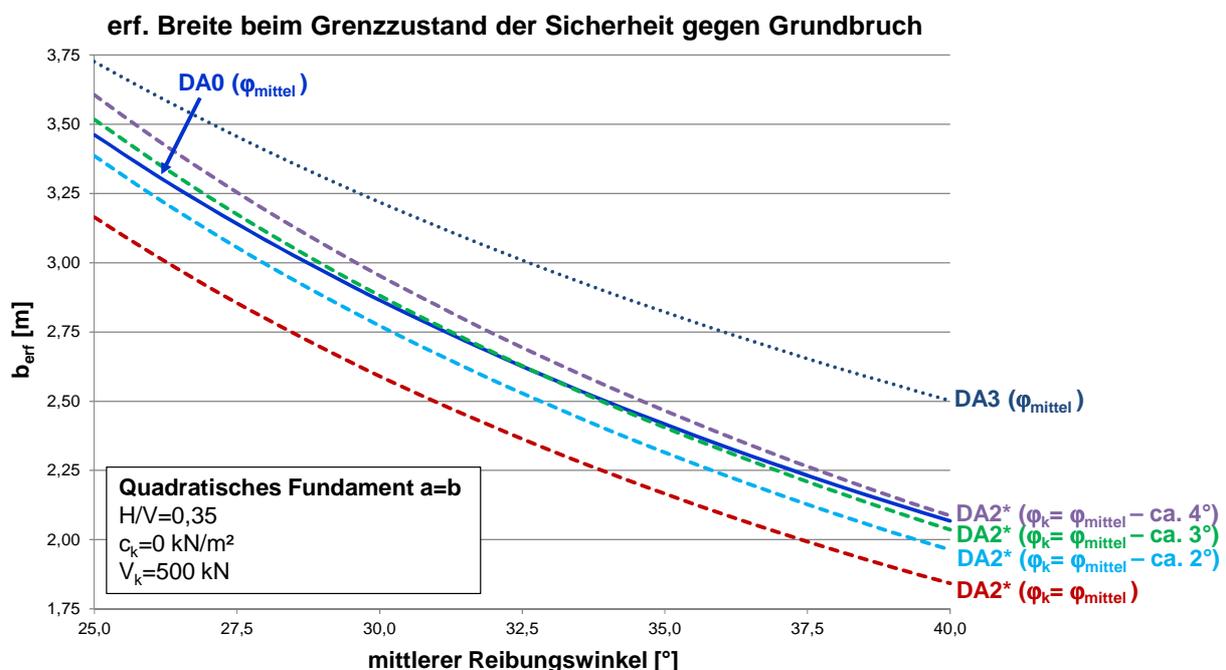


Abbildung 1.94: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, Einfluss der Parameterstreuung auf die erforderliche Fundamentbreite für eine Variation des mittleren Reibungswinkels

Unter Berücksichtigung des erhöhten Berechnungsaufwands durch die zusätzliche Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten zur Berücksichtigung der Parameterstreuung bei DA0 kann man sich für die geotechnische Bemessung von Flächengründungen auf DA2* verständigen. Voraussetzung dafür ist, dass die Streuung der Eingangsparameter realitätsnah abgeschätzt wird. Unter dieser Voraussetzung erlaubt DA2* im Vergleich zu den anderen Nachweisverfahren eine wirtschaftlichere Bemessung, die auch einfacher zu handhaben ist und insbesondere keine neue Berechnung für den Nachweis des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit erfordert.

2 Stützbauwerke - Baugrubenwände

2.1 Anamnese

Für die Berechnung von Baugruben sowie für die anderen geotechnischen Anwendungen gelten die im EC7-1 definierten Nachweisverfahren. Wie bereits in Kapitel 1.1 erläutert, unterscheiden sich die Nachweisverfahren dadurch, ob die Einwirkungen, die geotechnischen Kenngrößen oder die Baugrundwiderstände faktorisiert werden und wann diese Faktorisierung stattfindet. EC7-1 schlägt zwar Teilsicherheitsbeiwerte vor, ihre Festlegung obliegt aber wie auch die Wahl des Nachweisverfahrens der nationalen Regelung.

Darüber hinaus werden in EC7-1 Verfahren für die Ermittlung geotechnischer Einwirkungen und Widerstände vorgeschlagen, die für die Bemessung einer Baugrubenwand angesetzt werden. Bei den geotechnischen Einwirkungen wird im Anhang C.2 ein Verfahren für die Ermittlung des aktiven Erddrucks vorgeschlagen. Bei den Widerständen wird ebenfalls in EC7-1 Anhang C.2 das Verfahren für die Bestimmung des passiven Erddrucks angegeben. Anhang C ist nicht normativ, sondern informativ. Daher können die europäischen Länder in nationalen Normen diesem Vorschlag folgen oder aber auch ein eigenes Verfahren festlegen.

2.1.1 Verfahren zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen

Auf eine Baugrubenwand wirken hauptsächlich Erddrücke aus Bodeneigengewicht und Auflasten. Viele Länder benutzen für die Ermittlung des Erddrucks national festgelegte Verfahren, z. B. DIN 4085 in Deutschland oder ÖNORM B4434 in Österreich. Im Rahmen der durchgeführten Berechnungen wird der Erddruck gemäß Anhang C.2 des EC7-1 berücksichtigt, in Stufe III gemäß den nationalen Normen.

2.1.2 Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte

Für die Bemessung von Baugrubenwänden dürfen die drei in EC7-1 definierten Nachweisverfahren verwendet werden. Da das Nachweisverfahren 1 (DA1) zwei Kombinationen von Teilsicherheitsbeiwerten aufweist, sind immer zwei Berechnungen durchzuführen. Bei der Kombination 1 (DA1.1) werden lediglich die aktiven Erddrücke aus Bodeneigengewicht, Auflasten und evtl. andere Einwirkungen mit Teilsicherheitsbeiwerten erhöht. Bei der Kombination 2 (DA1.2) werden die Bodenparameter (Reibungswinkel und die drainierte bzw. undrainierte Kohäsion) mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert und die veränderlichen Einwirkungen erhöht. Bei der Faktorisierung der Einwirkungen sind die Teilsicherheitsbeiwerte bei DA1.2 niedriger als bei DA1.1. Beim Nachweisverfahren 2 (DA2) werden die Einwirkungen und die Baugrundwiderstände (passiver Erddruck) faktorisiert. Auf der Widerstandsseite wird der passive Erddruck mit charakteristischen Einwirkungen ermittelt. Beim Nachweisverfahren 3 (DA3) werden wie bei DA1.2 die Einwirkungen und die Bodenkenngößen faktorisiert.

Im Rahmen der Vergleichsrechnungen wurden die europäischen Länder Deutschland (DE), Frankreich (FR), Großbritannien (UK), Italien (IT), Österreich (AT), Schweiz (CH), Dänemark (DK), Polen (PL) und Schweden (SE) berücksichtigt. Tabelle 2.1 zeigt die in jedem Land zulässigen Nachweisverfahren für die Bemessung von Baugrubenwänden.

Tabelle 2.1: Nachweisverfahren in ausgewählten europäischen Ländern für die Bemessung von Stützbauwerken

Land	Zulässige Nachweisverfahren	Kombination der Teilsicherheitsbeiwerte nach EC7-1
Deutschland DE	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2
Frankreich FR	DA2	A1 „+“ M1 „+“ R2
Großbritannien UK	DA1 DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
Italien IT	DA1 DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
Schweiz CH	GZ Typ 2	entspricht A1 „+“ M1 „+“ R2
Österreich AT	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2
Dänemark DK	DA3	A1 oder A2 „+“ M2 „+“ R1 , sowie Gl. 6.10a oder 6.10b nach EN 1990
Polen PL	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2
Schweden SE	DA3	A1 oder A2 „+“ M2 „+“ R1, sowie Gl. 6.10a oder 6.10b nach EN 1990

In Tabelle 2.2 bis Tabelle 2.6 sind die für die Bemessung der Baugrubenwände verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, Teil 1

Einwirkung / Beanspruchung		EC7-1		DE	FR	UK		IT		CH
		A1	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A2	A1
ständig	ungünstig	1,35	1,00	1,35	1,35	1,35	1,00	1,35	1,00	1,35
	günstig	1,00	1,00	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
veränderlich	ungünstig	1,50	1,30	1,50	1,50	1,50	1,30	1,50	1,30	1,50
	günstig	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 2.3: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, Teil 2

Einwirkung / Beanspruchung		AT	DK		PL	SE	
		A1	A1/A2 Gl. 6.10a	A1/A2 Gl. 6.10b	A1	Gl. 6.10a	Gl. 6.10b
ständig	ungünstig	1,35	1,20	1,00	1,35	1,35	0,89·1,35
	günstig	1,00	1,00	0,90 ¹⁾ / 1,00 ²⁾	1,00	1,00	1,00
veränderlich	ungünstig	1,50	0,00	1,50	1,50	1,5·ψ _{0,1}	1,50
	günstig	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

¹⁾ Last aus Gebäude

²⁾ Lasten aus Boden und Grundwasser

Tabelle 2.4: Verwendete Teilsicherheitseinwirkungen für die Bodenkenngrößen, Teil 1

Bodenkenngröße	EC7-1		DE	FR	UK		IT		CH	AT
	M1	M2	M1	M1	M1	M2	M1	M2	M1	M1
Reibungswinkel	1,00	1,25	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,00
Kohäsion im drainierten Zustand	1,00	1,25	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,00
Kohäsion im undrainierten Zustand	1,00	1,40	1,00	1,00	1,00	1,40	1,00	1,40	1,00	1,00
Einaxiale Druckfestigkeit	1,00	1,40	1,00	1,00	1,00	1,40	1,00	1,40	1,00	1,00
Wichte	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 2.5: Verwendete Teilsicherheitseinwirkungen für die Bodenkenngrößen, Teil 2

Bodenkenngröße	DK	PL	SE
	M2	M1	M2
Reibungswinkel	1,20*K _{FI}	1,00	1,30
Kohäsion im drainierten Zustand	1,20*K _{FI}	1,00	1,30
Kohäsion im undrainierten Zustand	1,80*K _{FI}	1,00	1,50
Einaxiale Druckfestigkeit	1,80*K _{FI}	1,00	1,50
Wichte	1,00*K _{FI}	1,00	1,00

Tabelle 2.6: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Baugrundwiderstände

Widerstand	EC7-1			DE	FR	UK	IT	CH	AT	DK	PL	SE
	R1	R2	R3	R2	R2	R1	R1	R3	R2	R3	R2	R3
Erdwiderstand	1,00	1,40	1,00	1,40	1,40	1,00	1,00	1,00	1,40	1,00	1,40	1,00

In der Schweiz gilt gemäß SIA 267 (Abs. 12.5.2.1 und Figur 10) die Sonderbehandlung, dass der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung aus Erddruck nur bis zur Baugrubensohle aufgebracht wird, im Bereich der Einbindelänge ist nur der charakteristische Erddruck anzusetzen.

In Dänemark wird nach dem DA3 vorgegangen und die Sicherheitsbeiwerte auf ständige ODER auf ständige und veränderliche Einwirkungen angesetzt, d.h. es werden zwei Bemessungssituationen (nach Gleichung 6.10a und Gleichung 6.10b aus EC0) berechnet, die ungünstigere ist maßgebend. Für Dänemark wurde die Schadensfolgeklasse CC2 mit $K_{FI} = 1.0$ angesetzt. Somit sind die Teilsicherheitsbeiwerte A1 und A2 bei den ständigen Lasten gleich.

In Schweden wird ebenfalls nach dem DA3 vorgegangen, aber die Sicherheitsbeiwerte auf ständige UND auf veränderliche Einwirkungen angesetzt. Schweden berücksichtigt für Gleichung 6.10a bei den veränderlichen Lasten einen Kombinationsbeiwert $\psi_{0,1}$. In dieser Vergleichsberechnung wurde vereinfachend $\psi_{0,1}=1,0$ angesetzt, somit ist im Beispiel immer Gleichung 6.10a maßgebend.

2.2 Diagnose – Beispiel 1

Im Rahmen der Diagnose wurden bei den Baugrubenberechnungen die Stufe I bis III wie folgt festgelegt:

Stufe I: Berechnungen mit den Nachweisverfahren DA1, DA2 (DA2*) und DA3, d. h. die Teilsicherheitsbeiwerte und die Erddruckermittlung erfolgt nach EC7-1.

Stufe II: Berechnungen mit Berücksichtigung der Nationalen Anhänge mit den dort festgelegten Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerten für AT, CH, DE, FR, IT, UK, DK, PL und Schweden. Die Erddruckermittlung erfolgt nach EC7-1.

Stufe III: Berechnungen mit Berücksichtigung der länderspezifischen Erddruckermittlung und sonstiger nationalen Regelungen (ähnlich der EAB) für AT, CH, DE und DK.

2.2.1 Randbedingungen

Als Beispiel wurde eine einfach verankerte Spundwand gewählt gemäß dem mehrfach veröffentlichten Beispiel von Prof. A. Weißenbach (z. B. in [U 29]):

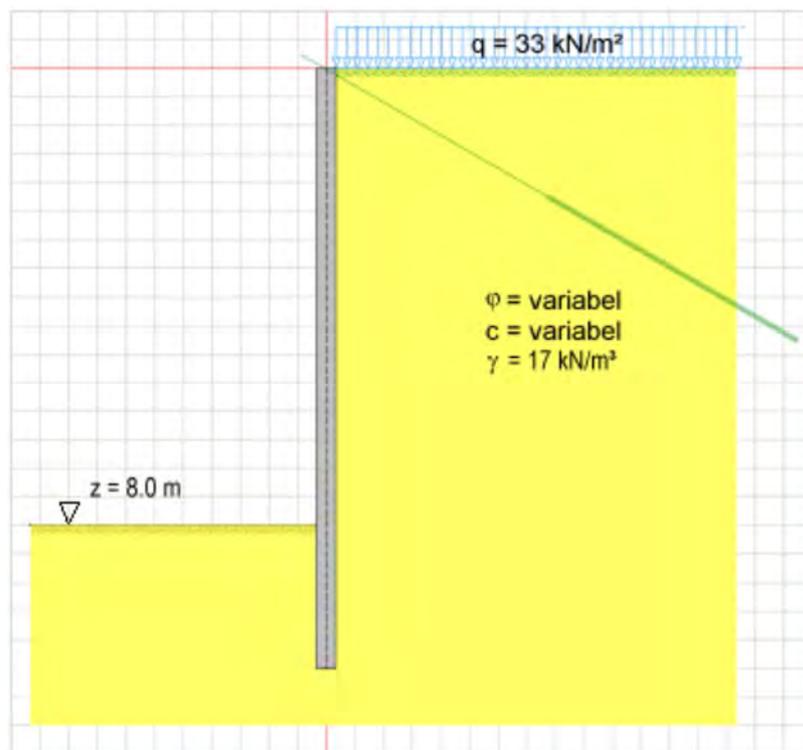


Abbildung 2.1: Geometrie der Baugrubenwand

Als statisches System ergibt sich hier ein Träger auf zwei Stützen: Anker + Erdauflager (siehe Abbildung 2.2).

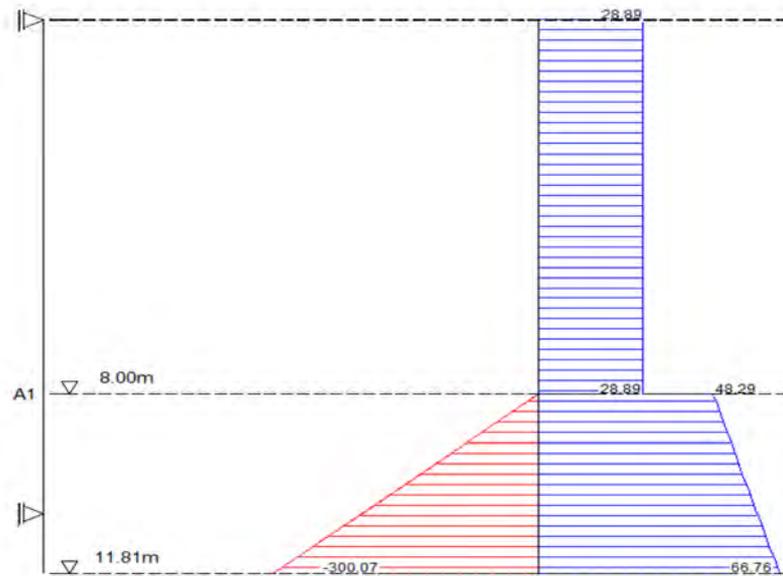


Abbildung 2.2: Statisches System

Als Bemessungssituation wurde die ständige Bemessungssituation BS-P angesetzt, da in anderen Ländern mit Ausnahme von AT keine unterschiedlichen Bemessungssituationen verwendet werden und mit BS-P die Teilsicherheitsbeiwerte denen des EC7-1 und der meisten Nationalen Anhänge entsprechen. Das Gelände ist waagrecht, die Bodenparameter ϕ' und c' wurden variiert.

2.2.2 Durchgeführte Berechnungen und Nachweise

Es wurde die erforderliche Einbindetiefe der Spundwand für die verschiedenen Nachweisverfahren verglichen: zunächst für die drei Nachweisverfahren DA1, DA2 bzw. DA2* und DA3 mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach EC7-1 (Stufe I), danach mit den national festgelegten Nachweisverfahren und Sicherheitsbeiwerten gemäß der Nationalen Anhänge für AT, DE, DK, FR, IT, PL, SE und UK sowie nach der SIA 267 für CH mit Erddruckberechnung nach EC7-1 (Stufe II) und schließlich mit den national festgelegten Nachweisverfahren und Sicherheitsbeiwerten sowie Berechnungsverfahren für den Erddruck für AT, CH, DE und DK (Stufe III).

Das Berechnungsverfahren ist hierbei so gelöst, dass es für die Nachweisverfahren DA2 und DA2* gleichwertig ist. Die Verwendung von DA2* mit charakteristischer Berechnung und nachträglicher Multiplikation der charakteristischen Schnittgrößen mit Teilsicherheitsbeiwerten ist dann problematisch, wenn unterschiedliche Teilsicherheitsbeiwerte eingehen (z. B. im BS-P ständige Einwirkungen mit Faktor 1,35, Ruhedruck mit Faktor 1,20, veränderliche Einwirkungen mit Faktor 1,50). Ist die Berechnung nichtlinear, z. B. bei Anpassung einer elastischen Bettung an den passiven Erddruck, dann wäre der Anteil der verschiedenen Einwirkungen davon abhängig, in welcher Reihenfolge die Einwirkungen aufgebracht werden. Außerdem wirkt sich z. B. eine veränderliche Blocklast (mit einem anderen Teilsicherheitsbeiwert als der aktive Erddruck als ständige Einwirkung) nur in einem bestimmten Tiefenbereich auf die Belastung aus, d. h. bei Ankern und elastischer Bettung in unterschiedlichen Tiefen ergibt sich nicht der selbe Faktor zwischen charakteristischen und Bemessungswerten. Deshalb wird zunächst ohne den nichtlinearen Effekt, z. B. mit elastischer Bettung ohne Adaption, der Faktor bestimmt, der sich zwischen Bemessungswerten und charakteristischen Auflagerkräften, Bettungskräften usw. ergibt. Die Adaption der

Bettungsspannungen ist mit charakteristischen Werten vorzunehmen. Für die Ermittlung von Bemessungswerten der Schnittkräfte werden die Bettungsspannungen mit dem ermittelten Faktor auf Bemessungswerte umgerechnet.

Vergleichsweise wurde auch eine „globale“ Berechnung (nach dem alten globalen Sicherheitskonzept) als „Referenzberechnung“ durchgeführt. Dabei wurde als Sicherheitsbeiwert für den passiven Erddruck der Wert 2,0 angesetzt, der besser der Gesamtsicherheit aus den Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen und Widerstände $1,35 \cdot 1,40 = 1,89$ entspricht als eine Globalsicherheit von 1,5.

Für die Berechnungen der Nachweisverfahren wurden folgende Parameter variiert:

Berechnung ohne Kohäsion:

- Reibungswinkel ϕ' : 20 – 40°

Berechnung mit Kohäsion

- Reibungswinkel ϕ' : 20 – 40°
- Kohäsion c : 0 - 30 kN/m²

2.2.3 Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte

Die für die Berechnungen erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte sind in den Tabelle 2.2 bis Tabelle 2.6 für die untersuchten europäischen Ländern zusammengefasst.

2.2.4 Bestimmung der Einwirkungen und Beanspruchungen

Als Auflast ist eine großflächige Verkehrslast von 33,33 kN/m² auf dem Gelände vorhanden. Die Auflast wird nicht als geotechnische Einwirkung, sondern als "Einwirkung aus dem Tragwerk" angesetzt, so dass beim Nachweisverfahren 3 mit den Sicherheitsbeiwerten aus A1 anstatt A2 zu arbeiten ist, im Unterschied zu Nachweisverfahren 1 Kombination 2 (DA1.2). Der Erddruck wird bis zur Baugrubensohle in ein Rechteck umgelagert.

Um die Ergebnisse vergleichbar zu halten, wurde der Erddruck in Stufe I und II nicht nach den unterschiedlichen nationalen Normen, sondern gemäß EC7-1, Anhang C.2, angesetzt.

2.2.5 Bestimmung der Widerstände

Der passive Erddruck wurde ebenfalls in Stufe I und II nach EC7-1, Anhang C.2, angesetzt. Die erforderliche Einbindetiefe wurde iteriert, so dass gemäß der Bedingung $E_d = R_d$ die Erdauflagerkraft aus den Einwirkungen dem passiven Erddruck entspricht.

2.2.6 Festlegung der Vergleichsgröße

Als Vergleichsgröße wurde in Anlehnung [U 28] ein äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor $\eta_{\text{äqui},i}$ gewählt. Hierfür wurde zunächst für jedes Nachweisverfahren die erforderliche Einbindetiefe $t_{\text{erf},i}$ ermittelt. In Abhängigkeit der Einbindetiefe wurden danach der charakteristische Widerstand und die charakteristische Beanspruchung berechnet. Anschließend wurde das Verhältnis charakteristischer Widerstand zu charakteristischer Beanspruchung gebildet, das dem äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor $\eta_{\text{äqui},i}$ entspricht.

$$\eta_{\text{äqui},i} = \frac{R_{k,i}(t_{\text{erf},i})}{E_{k,i}(t_{\text{erf},i})} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdauflagers bildet sich der äquivalente globale Sicherheitsfaktor wie folgt:

$$\eta_{\text{äqui},i} = \frac{R_{k,i}(t_{\text{erf},i})}{E_{k,i}(t_{\text{erf},i})} = \frac{E_{\text{ph},k,i}}{B_{k,i}}$$

Gl. 2.2

mit:

$E_{\text{ph},k,i}$ = Resultierende des charakteristischen passiven Erddrucks [kN/m]

$B_{k,i}$ = Erdauflagerkraft unter charakteristischen Einwirkungen [kN/m]

2.2.7 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I

Abbildung 2.3 zeigt die erforderliche Einbindetiefe für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdauflagers sowie den äquivalenten globalen Sicherheitsfaktor für eine Variation des Reibungswinkels φ' **ohne Kohäsion** (siehe auch Tabelle 2.7 und Tabelle 2.8).

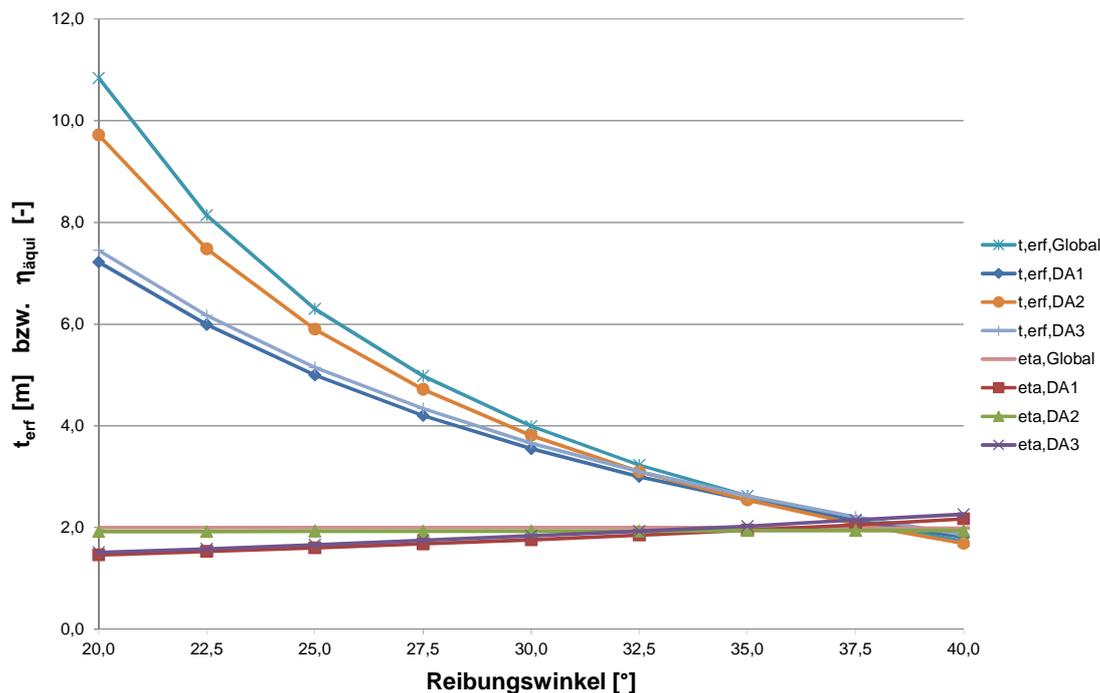


Abbildung 2.3: erforderliche Einbindetiefe (obere Kurven) und äquivalente globale Sicherheit (untere Kurven) bei verschiedenen Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdauflagers, ohne Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Tabelle 2.7: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach EC7-1, ohne Kohäsion

φ [°]	Global t_{erf} ($\eta=2,0$)	Erdauflager B_k global	Erdwiderst. $E_{\text{ph},k}$ global	Global $\eta=E_{\text{ph},k}/B_k$	DA1 t_{erf} (DA1.2)	DA2(*) t_{erf}	DA3 t_{erf}
20,0	10,84	1289,40	2578,17	2,00	7,22	9,72	7,45
22,5	8,14	833,9	1668,09	2,00	5,99	7,48	6,17
25,0	6,30	576,63	1153,13	2,00	5,00	5,90	5,15
27,5	4,98	417,91	835,20	2,00	4,20	4,72	4,34
30,0	3,99	313,58	626,43	2,00	3,55	3,81	3,66
32,5	3,23	241,84	484,30	2,00	3,00	3,10	3,10
35,0	2,62	190,07	380,98	2,00	2,54	2,54	2,62
37,5	2,13	151,39	301,93	1,99	2,14	2,07	2,21
40,0	1,73	122,28	243,53	1,99	1,81	1,69	1,86

Tabelle 2.8: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach EC7-1, ohne Kohäsion

φ [°]	DA1 $\eta = E_{ph,k}/B_k$ (DA1.2)	DA2(*) $\eta = E_{ph,k}/B_k k$	DA3 $\eta = E_{ph,k}/B_k$
20,0	1,46	1,92	1,51
22,5	1,53	1,92	1,58
25,0	1,60	1,93	1,66
27,5	1,68	1,93	1,75
30,0	1,76	1,93	1,84
32,5	1,85	1,93	1,93
35,0	1,95	1,94	2,03
37,5	2,05	1,94	2,15
40,0	2,17	1,94	2,26

Bei der „globalen“ Berechnung und bei DA2 ist der äquivalente globale Sicherheitsfaktor fast konstant (ca. 2,0 bzw. 1,9). Bei DA1 und DA3 steigt die äquivalente globale Sicherheit mit steigendem Reibungswinkel an von ca. 1,5 bis ca. 2,2. Die erforderlichen Einbindetiefen sind bei DA1 und DA3 bei geringem Reibungswinkel deutlich kleiner als bei DA2, bei hohem Reibungswinkel aber sogar größer als bei DA2.

Zusätzlich wurde der Bemessungswert für die Ankerkraft in kN verglichen. Dieser wird in Tabelle 2.9 für alle Nachweisverfahren zusammengefasst.

Tabelle 2.9: Ankerkraft bei Nachweisverfahren nach EC7-1

φ [°]	global A_k	DA1 A_d	DA2(*) A_d	DA3 A_d
20,0	1015	1413	1618	1382
22,5	845	1184	1293	1178
25,0	710	1002	1061	1014
27,5	602	856	886	881
30,0	515	736	749	721
32,5	444	635	639	674
35,0	384	556	550	592
37,5	333	502	474	521
40,0	289	454	410	459

Die Ankerkraft ergibt sich im DA2(*) für niedrigere Reibungswinkel höher als im DA1 und DA3, da die Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungen und auf Widerstände angesetzt werden. Bei hohen Reibungswinkeln sind die Ankerkräfte in DA1 und DA3 etwas höher, weil sich hier der Teilsicherheitsbeiwert auf den Reibungswinkel stärker auswirkt. Der Unterschied zwischen DA1 Kombination 2 (DA1.2) zu DA3 ergibt sich daraus, dass im DA3 ein höherer Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen aus dem Tragwerk gilt. Bei der Berechnung mit

globaler Sicherheit existieren keine Bemessungswerte, da der Sicherheitsbeiwert im Material (Ankerstahl) angesetzt wird. Die Ankerkraft entspricht hier einem charakteristischen Wert.

Neben der Variation des Reibungswinkels wurden auch Berechnungen mit Berücksichtigung der Kohäsion aber ohne Mindesterdrunderdruck durchgeführt, wobei nur die Kohäsion für Reibungswinkel zwischen 20° und 27,5° angesetzt wurde. So ergaben sich folgende Reibungswinkel-Kohäsions-Paare: 20°/30kN/m², 22,5°/20kN/m², 25°/15kN/m² und 27,5°/5kN/m². Die Größe der Kohäsion wurde dabei in etwa so gewählt, dass sich für ein Spannungsniveau $\gamma^*H=17 \cdot 8 = 136 \text{ kN/m}^2$ - dies entspricht dem erdseitigen Niveau der Baugrubensohle im Berechnungsbeispiel - ein Ersatzreibungswinkel von ca. 30° ergibt.

Abbildung 2.4 zeigt die erforderliche Einbindetiefe für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers sowie die äquivalente globale Sicherheit für eine Variation des Reibungswinkels ϕ' mit Kohäsion (siehe auch Tabelle 2.10 und Tabelle 2.11).

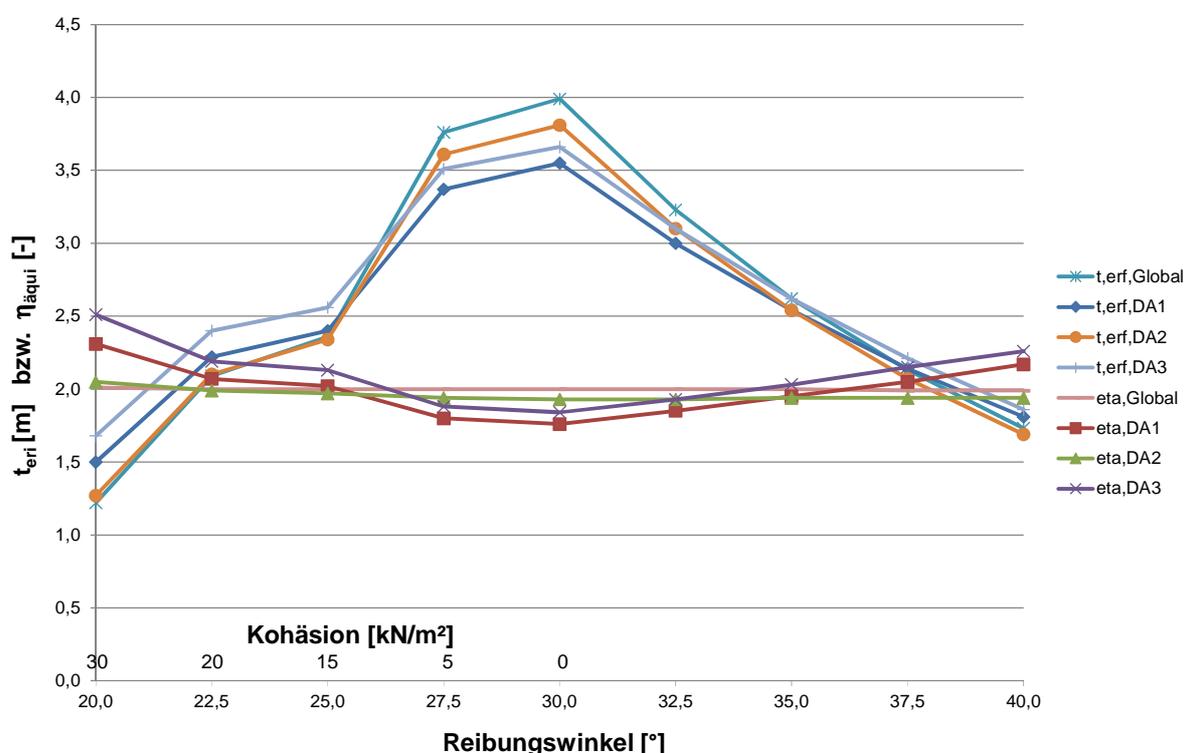


Abbildung 2.4: erforderliche Einbindetiefe (obere Kurven) und äquivalente globale Sicherheit (untere Kurven) verschiedenen Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers, mit Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel.

Tabelle 2.10: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach EC7-1, mit Kohäsion

ϕ [°]	c [kN/m ²]	Global t_{erf} ($\eta=2,0$)	Erdauflager B_k global	Erdwiderst. $E_{ph,k}$ global	Global $\eta = E_{ph,k}/B_k$	DA1 t_{erf} (DA1.2)	DA2(*) t_{erf}	DA3 t_{erf}
20,0	30,0	1,22	95,63	191,80	2,01	1,50	1,27	1,68
22,5	20,0	2,09	153,65	307,70	2,00	2,22	2,10	2,40
25,0	15,0	2,36	172,39	344,74	2,00	2,40	2,34	2,56
27,5	5,0	3,76	290,98	581,73	2,00	3,37	3,61	3,51

Tabelle 2.11: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach EC7-1, mit Kohäsion

φ [°]	c [kN/m ²]	DA1 $\eta = E_{ph,k}/B_k$ (DA1.2)	DA2(*) $\eta = E_{ph,k}/B_k k$	DA3 $\eta = E_{ph,k}/B_k$
20,0	30,0	2,31	2,05	2,51
22,5	20,0	2,07	1,99	2,19
25,0	15,0	2,02	1,97	2,13
27,5	5,0	1,80	1,94	1,88

Aus den Ergebnissen ist es zu erkennen, dass der äquivalente Sicherheitsfaktor von DA1 und DA3 für 20°/30kN/m² über dem Niveau von DA2(*) bzw. einer globalen Berechnung liegt und mit abnehmender Kohäsion und zunehmendem Reibungswinkel bis $\varphi = 30^\circ$ abnimmt, danach aber für die reinen Reibungsböden wieder zunimmt. Der äquivalente Sicherheitsfaktor von DA2(*) bleibt annähernd konstant auf dem Niveau einer globalen Berechnung.

2.2.8 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II

In Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 werden die Ergebnisse der Berechnungen für die untersuchten europäischen Länder für eine Variation des Reibungswinkels dargestellt (siehe auch Tabelle 2.12 und Tabelle 2.13). Für UK und IT mit DA1 war die Kombination 2 (DA1.2) immer maßgebend. Es ergaben sich für verschiedene Länder die gleichen Ergebnisse, wenn die Länder dasselbe Nachweisverfahren und dieselben Teilsicherheitsbeiwerte verwenden.

Zur Vergleichbarkeit wurde die Berechnung des Erddrucks gemäß EC7-1, Anhang C, beibehalten. Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte wurden gemäß dem Nationalen Anhang gewählt, für CH gemäß SIA 267 (Unterschied im Ansatz nach SIA 267: Einwirkungen nur bis zur Aushubsohle mit Teilsicherheitsbeiwert multiplizieren) (für CH: wurde der Wandreibungswinkel passiv δ_p manuell auf $-2/3 \cdot \varphi$ gesetzt, da standardmäßig $\delta_p = -\varphi/2$).

Bei Verwendung der Bemessungssituation BS-P (in DE früher: LF1) werden gemäß dem Nationalen Anhang für AT, DE, FR und PL zum Nachweisverfahren 2 dieselben Teilsicherheitsbeiwerte verwendet, so dass die Ergebnisse identisch sind. Bei BS-T würden sich geringere Einbindetiefen und äquivalente globale Sicherheitsfaktoren ergeben. Die Bemessungssituationen werden allerdings nur in AT und in DE verwendet.

Für UK und IT sind im Nachweisverfahren 1 die Teilsicherheitsbeiwerte identisch, so dass für diese beiden Länder die Ergebnisse gleich sind. Für CH sind die Ergebnisse günstiger durch die Sonderbehandlung der Sicherheit auf die Einwirkungen nur bis zur Aushubsohle.

Für DK ergeben sich im Nachweisverfahren 3 ähnliche Ergebnisse wie bei den Ansätzen mit Nachweisverfahren 1, für SE größere Einbindetiefen und äquivalente globale Sicherheitsfaktoren wegen des Ansatzes der Sicherheiten auf ständige und veränderliche Einwirkungen. Dabei liegen für SE und insbesondere für DK die Teilsicherheitsbeiwerte für die Bodenkenngrößen höher als bei den anderen Ländern.

Insgesamt ergibt sich das gleiche Bild wie in Stufe I (Vergleich der Nachweisverfahren nach EC7-1), d.h. konstante äquivalente Sicherheitsfaktoren für Länder mit DA2 und ansteigende äquivalente globale Sicherheitsfaktoren für Länder mit DA1 oder DA3.

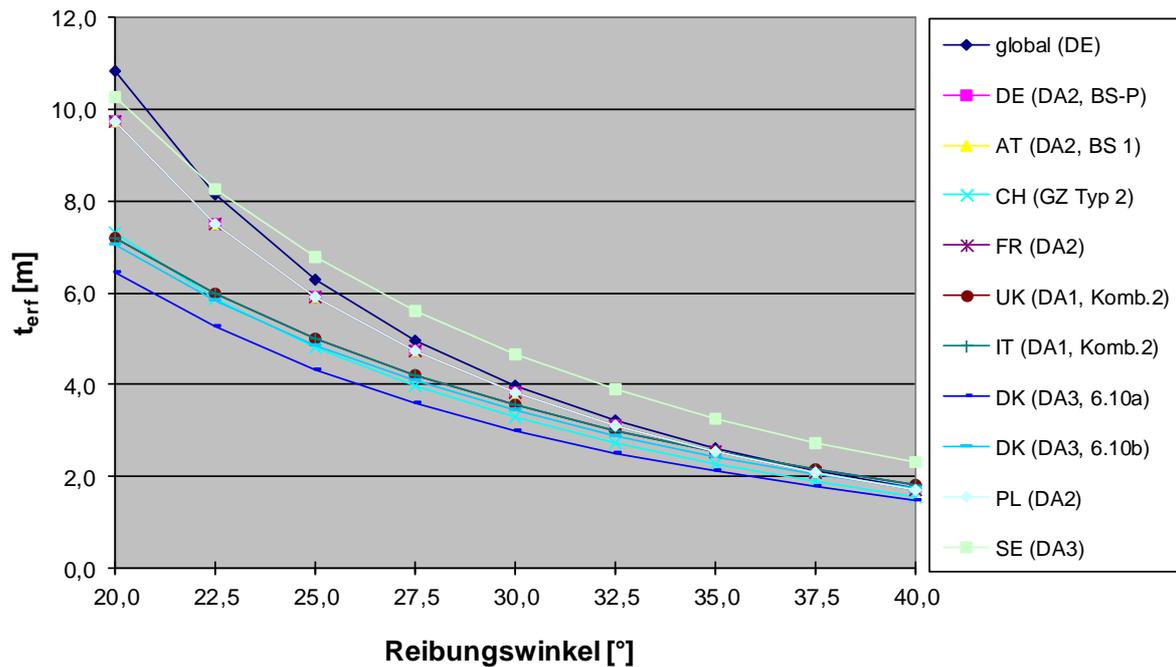


Abbildung 2.5: erforderliche Einbindetiefe nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers, ohne Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

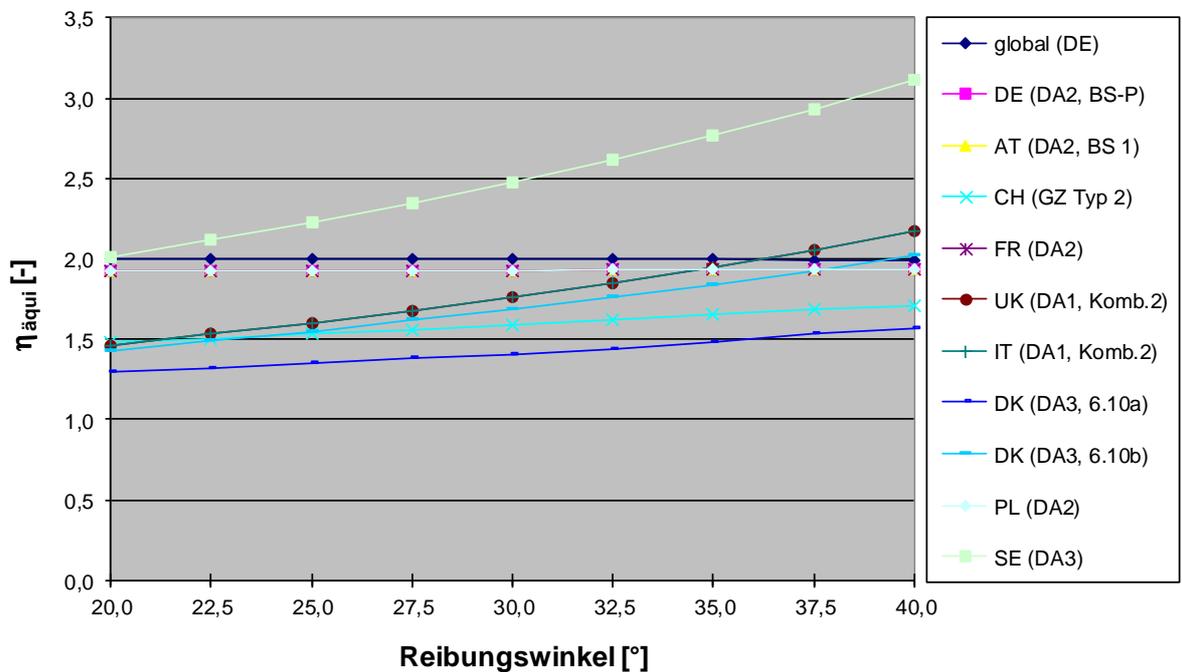


Abbildung 2.6: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers, ohne Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Tabelle 2.12: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, ohne Kohäsion

φ [°]	global (DE)	DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	FR (DA2)	UK (DA1.2)	IT (DA1.2)	DK		PL (DA2*)	SE (DA3)
								(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)		
20,0	10,84	9,73	9,73	7,30	9,73	7,22	7,22	6,45	7,05	9,73	10,28
22,5	8,14	7,49	7,49	5,88	7,49	5,99	5,99	5,25	5,83	7,49	8,28
25,0	6,30	5,90	5,90	4,80	5,90	5,00	5,00	4,33	4,86	5,90	6,77
27,0	4,98	4,72	4,72	3,96	4,72	4,21	4,21	3,59	4,08	4,72	5,60
30,0	3,99	3,81	3,81	3,28	3,81	3,55	3,55	3,00	3,43	3,81	4,66
32,5	3,23	3,10	3,10	2,73	3,10	3,00	3,00	2,51	2,89	3,10	3,90
35,0	2,62	2,53	2,53	2,27	2,53	2,54	2,54	2,11	2,44	2,53	3,27
37,5	2,13	2,07	2,07	1,89	2,07	2,15	2,15	1,77	2,06	2,07	2,74
40,0	1,73	1,69	1,69	1,56	1,69	1,81	1,81	1,48	1,73	1,69	2,30

Tabelle 2.13: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, ohne Kohäsion

φ [°]	global (DE)	DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	FR (DA2)	UK (DA1.2)	IT (DA1.2)	DK		PL (DA2*)	SE (DA3)
								(DA3, 6.10a)	((DA3, 6.10b)		
20,0	2,00	1,92	1,92	1,48	1,92	1,46	1,46	1,30	1,43	1,92	2,01
22,5	2,00	1,93	1,93	1,50	1,93	1,53	1,53	1,32	1,49	1,93	2,12
25,0	2,00	1,93	1,93	1,53	1,93	1,60	1,60	1,35	1,55	1,93	2,23
27,5	2,00	1,93	1,93	1,56	1,93	1,68	1,68	1,38	1,62	1,93	2,35
30,0	2,00	1,93	1,93	1,59	1,93	1,76	1,76	1,41	1,69	1,93	2,48
32,5	2,00	1,94	1,94	1,62	1,94	1,85	1,85	1,44	1,76	1,94	2,62
35,0	2,00	1,94	1,94	1,65	1,94	1,95	1,95	1,48	1,84	1,94	2,77
37,5	1,99	1,94	1,94	1,69	1,94	2,06	2,06	1,53	1,93	1,94	2,93
40,0	1,99	1,94	1,94	1,71	1,94	2,17	2,17	1,57	2,02	1,94	3,12

Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8 zeigen die Ergebnisse für die Berechnungen nach den Nationalen Anhängen **mit Kohäsion** (siehe auch Tabelle 2.14 und Tabelle 2.15).

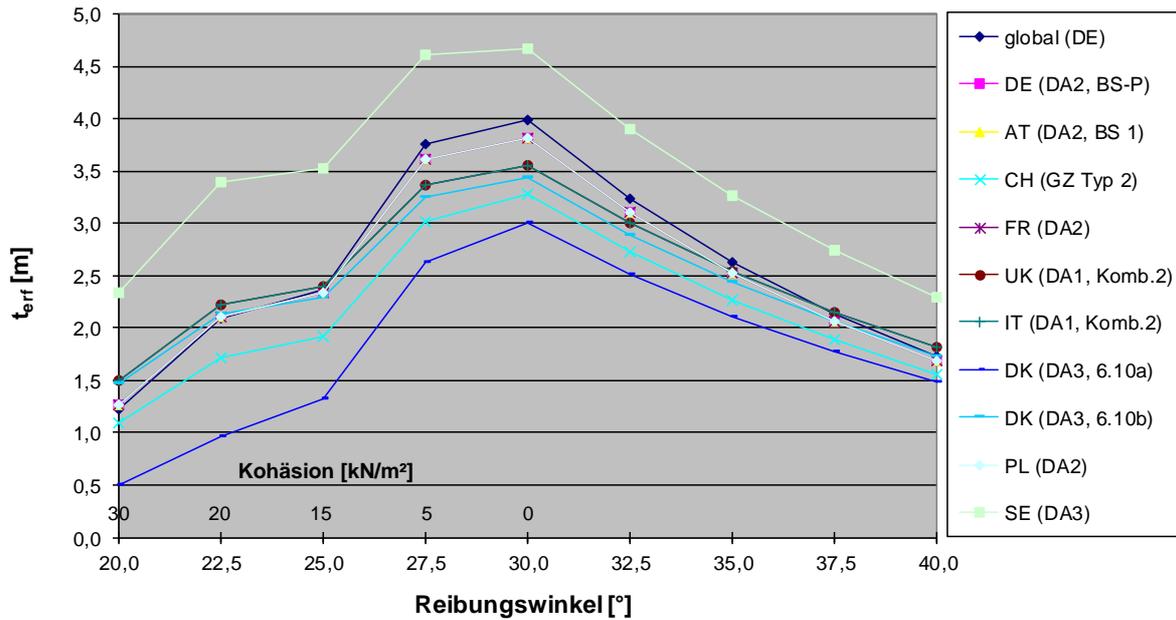


Abbildung 2.7: erforderliche Einbindetiefe nach verschiedenen Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers nach verschiedenen Nationalen Anhängen, mit Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

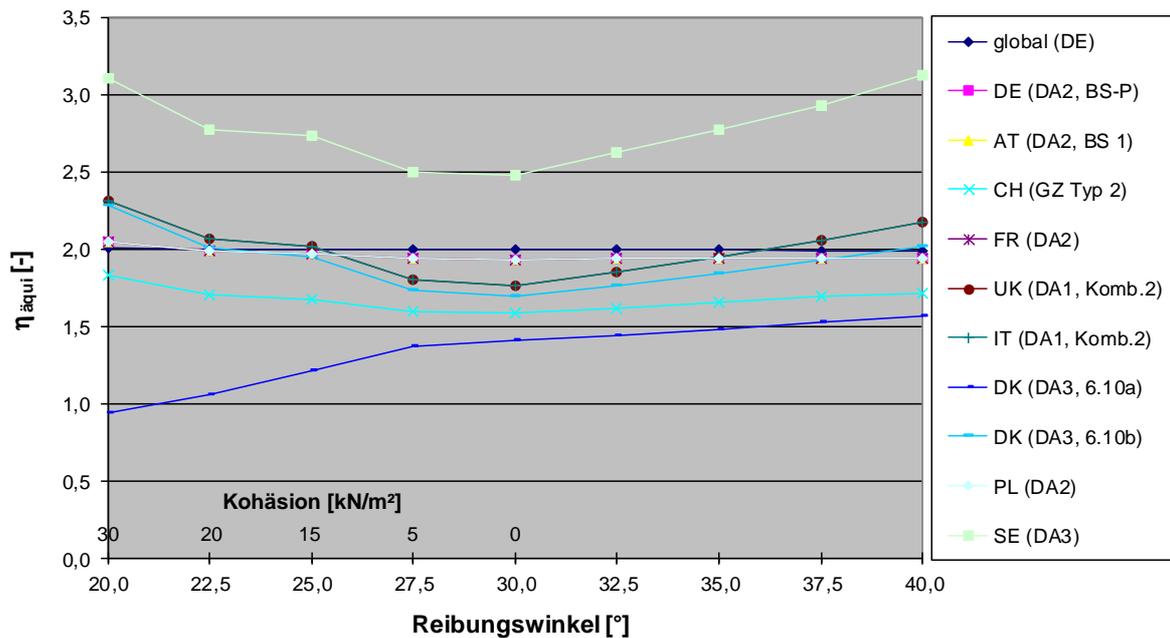


Abbildung 2.8: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach verschiedenen Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers nach verschiedenen Nationalen Anhängen, mit Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Tabelle 2.14: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, mit Kohäsion

φ [°]	c [kN/m ²]	global (DE)	DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	FR (DA2)	UK (DA1.2)	IT (DA1.2)	DK		PL (DA2*)	SE (DA3)
									(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)		
20,0	30,0	1,22	1,27	1,27	1,10	1,27	1,50	1,50	0,50	1,47	1,27	2,34
22,5	20,0	2,09	2,10	2,10	1,71	2,10	2,22	2,22	0,96	2,13	2,10	3,39
25,0	15,0	2,36	2,34	2,34	1,92	2,34	2,40	2,40	1,33	2,30	2,34	3,53
27,5	5,0	3,76	3,61	3,61	3,02	3,61	3,37	3,37	2,63	3,25	3,61	4,61

Tabelle 2.15: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, mit Kohäsion

φ [°]	c [kN/m ²]	global (DE)	DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	FR (DA2)	UK (DA1.2)	IT (DA1.2)	DK		PL (DA2*)	SE (DA3)
									(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)		
20,0	30,0	2,01	2,05	2,05	1,83	2,05	2,31	2,31	0,94	2,28	2,05	3,10
22,5	20,0	2,00	1,99	1,99	1,70	1,99	2,07	2,07	1,06	2,01	1,99	2,77
25,0	15,0	2,00	1,97	1,97	1,67	1,97	2,02	2,02	1,21	1,95	1,97	2,73
27,5	5,0	2,00	1,94	1,94	1,60	1,94	1,80	1,80	1,37	1,73	1,94	2,50

Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10 zeigen die Ergebnisse für die Berechnungen nach den Nationalen Anhängen **mit Kohäsion und Mindesterdruk** (siehe auch Tabelle 2.16 und Tabelle 2.17).

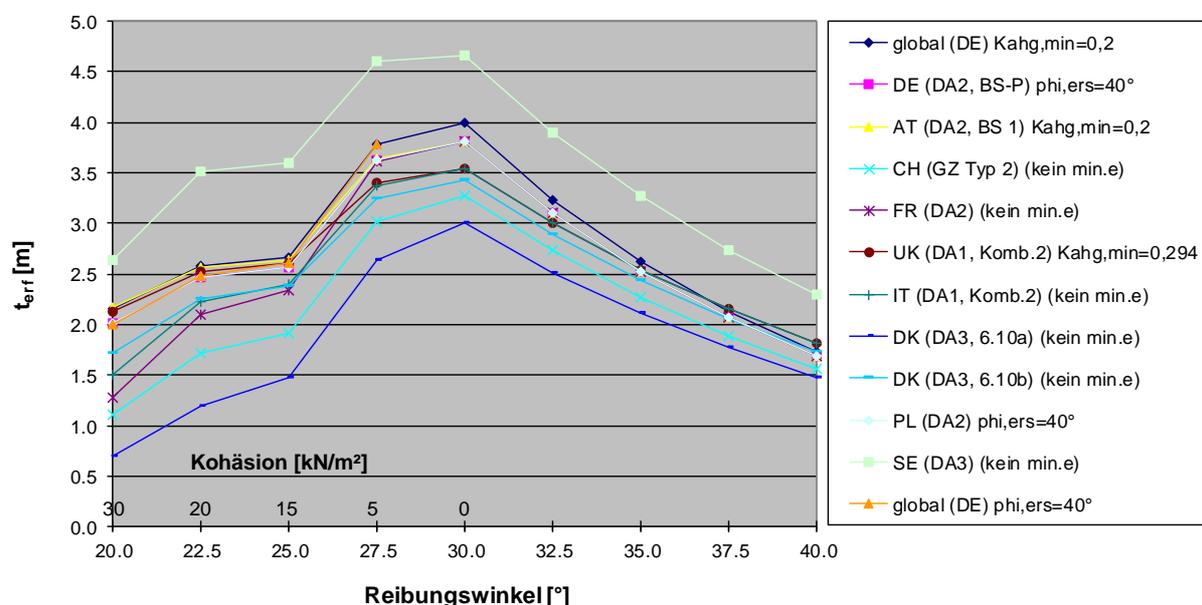


Abbildung 2.9: erforderliche Einbindetiefe nach verschiedenen Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und verschiedenen Nationalen Anhängen, mit Kohäsion und Mindesterdruk, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

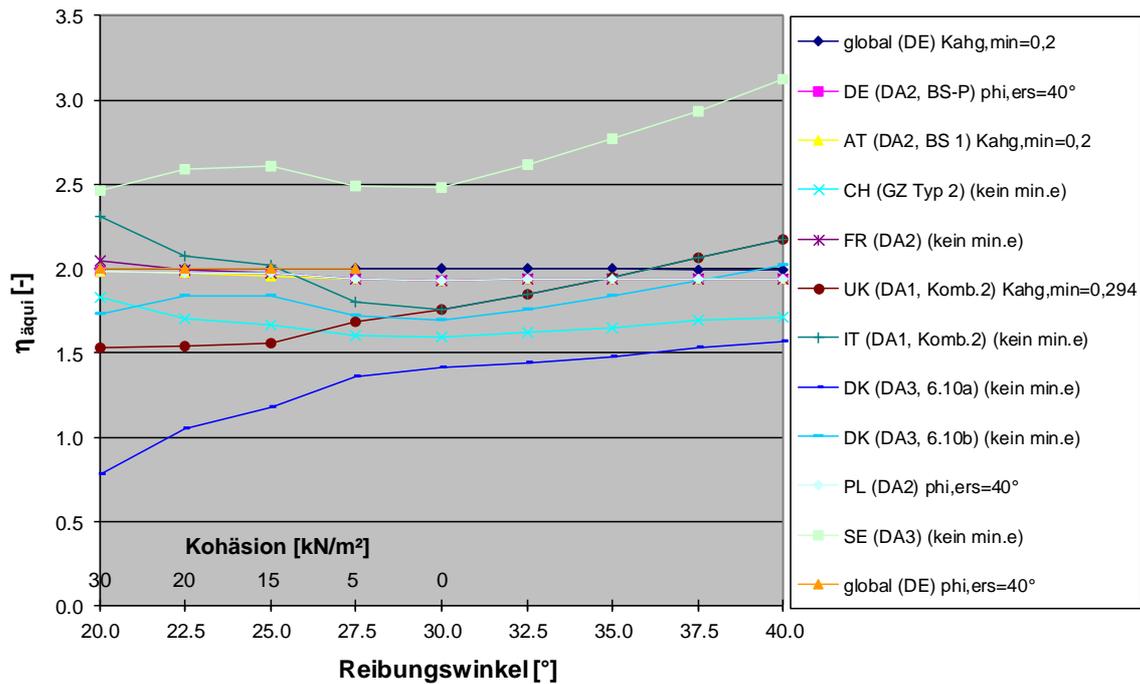


Abbildung 2.10: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach verschiedenen Nachweisverfahren für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und verschiedenen Nationalen Anhängen, mit Kohäsion und Mindesterdru ck, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Tabelle 2.16: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, mit Kohäsion und Mindesterdru ck, Teil 1

φ [°]	c [kN/m ²]	global (DE)		DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	FR (DA2)	UK (DA1.2)	IT (DA1.2)
		K _{ahg,min} =0,2	φ _{Ersatz} =40°	φ _{Ersatz} =40°	K _{ahg,min} =0,2	(kein min. e)	(kein min. e)	K _{ahg,min} =0,294	(kein min. e)
20,0	30,0	2,16	2,00	2,01	2,17	1,10	1,27	2,13	1,50
22,5	20,0	2,58	2,48	2,46	2,56	1,71	2,10	2,53	2,22
25,0	15,0	2,67	2,61	2,57	2,63	1,92	2,34	2,61	2,40
27,5	5,0	3,79	3,79	3,63	3,64	3,02	3,61	3,40	3,37

Tabelle 2.17: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, mit Kohäsion und Mindesterdru ck, Teil 2

φ [°]	c [kN/m ²]	DK		PL	SE
		(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)	(DA2*)	(DA3)
		(kein min. e)	(kein min. e)	φ _{Ersatz} =40°	(kein min. e)
20,0	30,0	0,50	1,47	2,01	2,34
22,5	20,0	0,96	2,13	2,46	3,39
25,0	15,0	1,33	2,30	2,57	3,53
27,5	5,00	2,63	3,25	3,63	4,61

Tabelle 2.18: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, mit Kohäsion und Mindesterdruddruck, Teil 1

φ [°]	c [kN/m ²]	global (DE)		DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	FR (DA2)	UK (DA1.2)	IT (DA1.2)
20,0	30,0	2,00	2,00	1,98	1,98	1,83	2,05	1,53	2,31
22,5	20,0	2,00	2,00	1,97	1,97	1,70	1,99	1,54	2,07
25,0	15,0	2,00	2,00	1,97	1,96	1,67	1,97	1,56	2,02
27,5	5,0	2,00	2,00	1,94	1,94	1,60	1,94	1,68	1,80

Tabelle 2.19: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen, mit Kohäsion und Mindesterdruddruck, Teil 2

φ [°]	c [kN/m ²]	DK		PL	SE
		(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)	(DA2*)	(DA3)
20,0	30,0	0,94	2,28	1,98	3,10
22,5	20,0	1,06	2,01	1,97	2,77
25,0	15,0	1,21	1,95	1,97	2,73
27,5	5,0	1,37	1,73	1,94	2,50

Hellblau markiert sind die Ergebnisse, bei denen uns keine Informationen zum Ansatz von Mindesterdruddruck vorlagen, kein Mindesterdruddruck angesetzt wird (DK) bzw. (für CH) die Regelung in der Berechnung so nicht umgesetzt werden konnte. Für die Länder FR, IT, DK und SE wurden deshalb die Ergebnisse ohne den Ansatz eines Mindesterdruddrucks angegeben, dadurch hat man auch indirekt eine Gegenüberstellung für DE für die Varianten mit und ohne Mindesterdruddruck, da die französischen Ergebnisse für die Variante ohne Mindesterdruddruck den deutschen Ergebnissen entsprechen. Ähnliches lässt sich von den Ergebnissen für UK und IT sagen.

Ohne Markierung sind die Berechnungen mit Mindesterdruddruckbeiwert oder Ersatzreibungswinkel, blau markiert sind die Regelung für einen Mindesterdruddruck von $5 \cdot z$, die durch einen Mindesterdruddruckbeiwert von $K_{agh,min} = 5 / (\text{Bodenwichte} = 17) = 0,294$ angesetzt wurde.

2.2.9 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III

Um Vergleichsberechnungen unter Berücksichtigung der länderspezifischen Erddruckermittlung und sonstigen nationalen Regelungen (ähnlich der EAB) durchführen zu können, müssen diese Dokumente erst beschafft und programmtechnisch umgesetzt werden, da die Handrechnung zu aufwändig für Parameterstudien ist.

Wie sich im Anhang C zeigt, ist der Erddruck stark davon abhängig, welches Verfahren zur Erddruckberechnung man verwendet. Die Variation der Ergebnisse wird dadurch potentiell größer.

Bislang wurden diese Untersuchungen für die Länder AT, CH, DE und DK durchgeführt. Für DK ergeben sich die gleichen Ergebnisse wie nach Stufe II, da die Formeln für den Erddruck im EC7-1 Anhang C.2 auf der dänischen Norm basieren. Die Ergebnisse für die Untersuchung ohne Kohäsion sind in Tabelle 2.20 und Tabelle 2.21 zusammengestellt und in Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12 dargestellt.

Tabelle 2.20: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen und länderspezifischen Erddrucknormen, ohne Kohäsion

φ [°]	DE (DA2, BS-P)	AT (DA2, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	DK	
				(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)
20,0	8,65	8,65	6,63	6,45	7,05
22,5	6,60	6,60	5,29	5,25	5,83
25,0	5,13	5,13	4,26	4,33	4,86
27,5	4,04	4,04	3,45	3,59	4,08
30,0	3,19	3,19	2,80	3,00	3,43
32,5	2,53	2,53	2,26	2,51	2,89
35,0	1,99	1,99	1,82	2,11	2,44
37,5	1,62	1,69	1,57	1,77	2,06
40,0	1,31	1,35	1,27	1,48	1,73

Tabelle 2.21: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen und länderspezifischen Erddrucknormen, ohne Kohäsion

φ [°]	DE (DA2, BS-P)	AT (DA2, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	DK	
				(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)
20,0	1,92	1,92	1,49	1,30	1,43
22,5	1,93	1,93	1,52	1,32	1,49
25,0	1,93	1,93	1,55	1,35	1,55
27,5	1,94	1,94	1,58	1,38	1,62
30,0	1,94	1,94	1,62	1,41	1,69
32,5	1,94	1,94	1,65	1,44	1,76
35,0	1,94	1,94	1,69	1,48	1,84
37,5	1,94	1,94	1,72	1,53	1,93
40,0	1,94	1,94	1,75	1,57	2,02

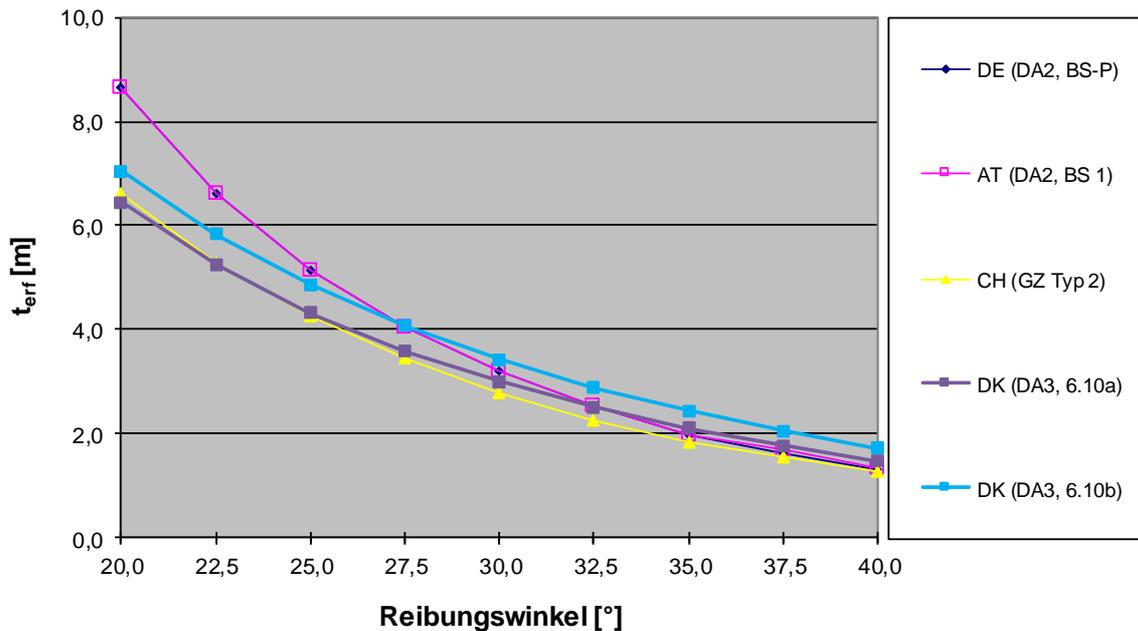


Abbildung 2.11: erforderliche Einbindetiefe nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und länderspezifischen Erddrucknormen, ohne Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

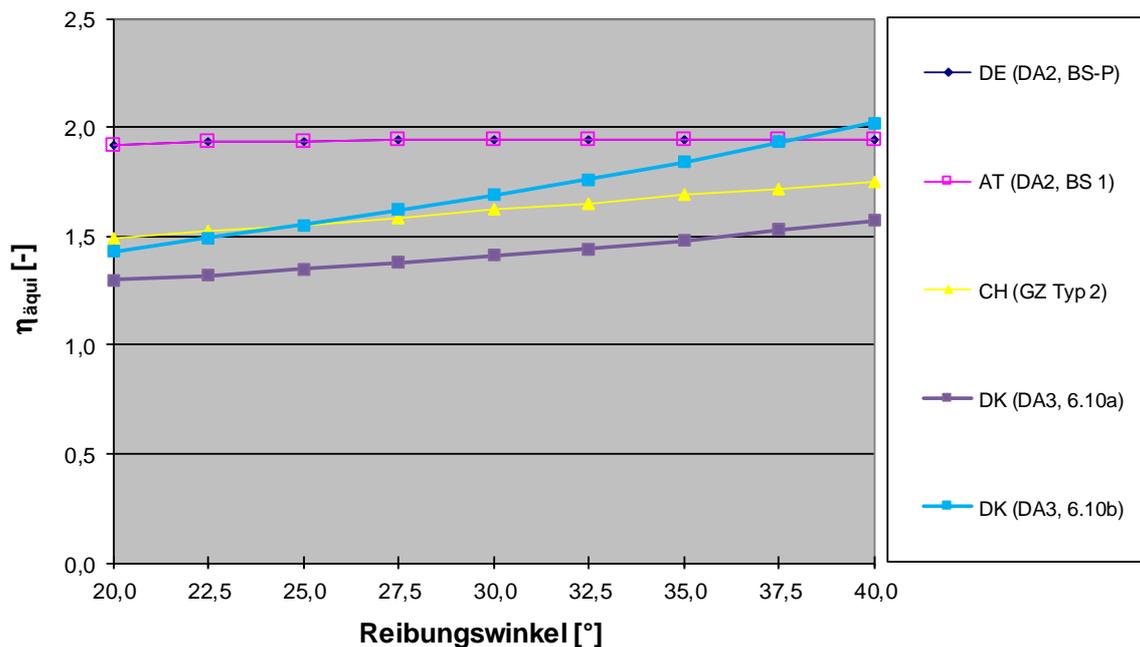


Abbildung 2.12: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und länderspezifischen Erddrucknormen, ohne Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Die Ergebnisse mit Berücksichtigung einer Kohäsion sind in Tabelle 2.22 und Tabelle 2.23 zusammengestellt und in Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14 dargestellt.

Tabelle 2.22: erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion

φ [°]	c [kN/m ²]	DE (DA2, BS-P)	AT (DA2, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	DK	
					(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)
20,0	30,0	1,72	1,72	1,54	0,50	1,47
22,5	20,0	2,40	2,40	2,11	0,96	2,13
25,0	15,0	2,40	2,40	2,16	1,33	2,30
27,5	5,0	3,20	3,20	2,81	2,63	3,25

Tabelle 2.23: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion

φ [°]	c [kN/m ²]	DE (DA2, BS-P)	AT (DA2, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	DK	
					(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)
20,0	30,0	2,00	2,00	1,74	0,94	2,28
22,5	20,0	1,97	1,97	1,66	1,06	2,01
25,0	15,0	1,96	1,96	1,65	1,21	1,95
27,5	5,0	1,95	1,95	1,61	1,37	1,73

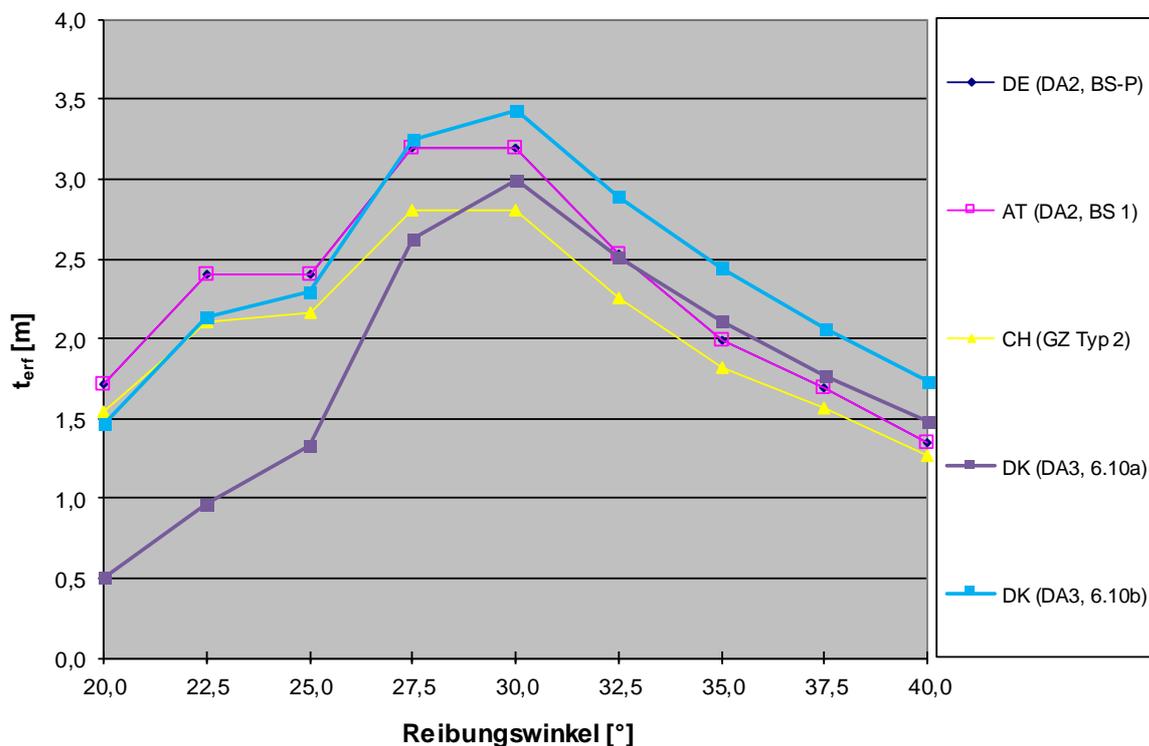


Abbildung 2.13: erforderliche Einbindetiefe nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

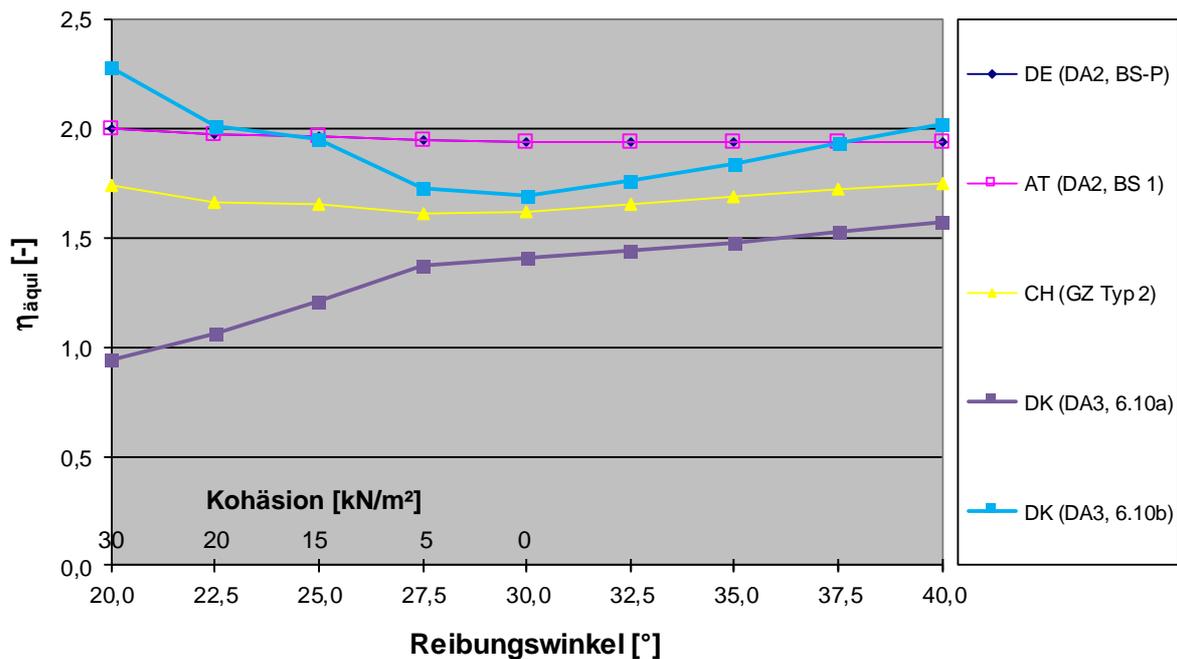


Abbildung 2.14: äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Die Ergebnisse mit Berücksichtigung einer Kohäsion und eines Mindesterdruks sind in Tabelle 2.24 und Tabelle 2.25 zusammengestellt und in Abbildung 2.15 und Abbildung 2.16 dargestellt.

Tabelle 2.24 erforderliche Einbindetiefen bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion und Mindesterdruks

φ [°]	c [kN/m ²]	DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	DK	
					(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)
20,0	30,0	2,14	2,24	2,04	0,69	1,71
22,5	20,0	2,60	2,65	2,36	1,19	2,26
25,0	15,0	2,52	2,56	2,32	1,47	2,38
27,5	5,0	3,21	3,21	2,83	2,64	3,25

Tabelle 2.25 äquivalente globale Sicherheit bei Nachweisverfahren nach Nationalen Anhängen und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion und Mindesterdruks

φ [°]	c [kN/m ²]	DE (DA2*, BS-P)	AT (DA2*, BS 1)	CH (GZ Typ 2)	DK	
					(DA3, 6.10a)	(DA3, 6.10b)
20,0	30,0	1,98	1,98	1,72	0,78	1,73
22,5	20,0	1,96	1,96	1,66	1,05	1,84
25,0	15,0	1,96	1,96	1,65	1,18	1,84
27,5	5,0	1,94	1,94	1,61	1,36	1,72

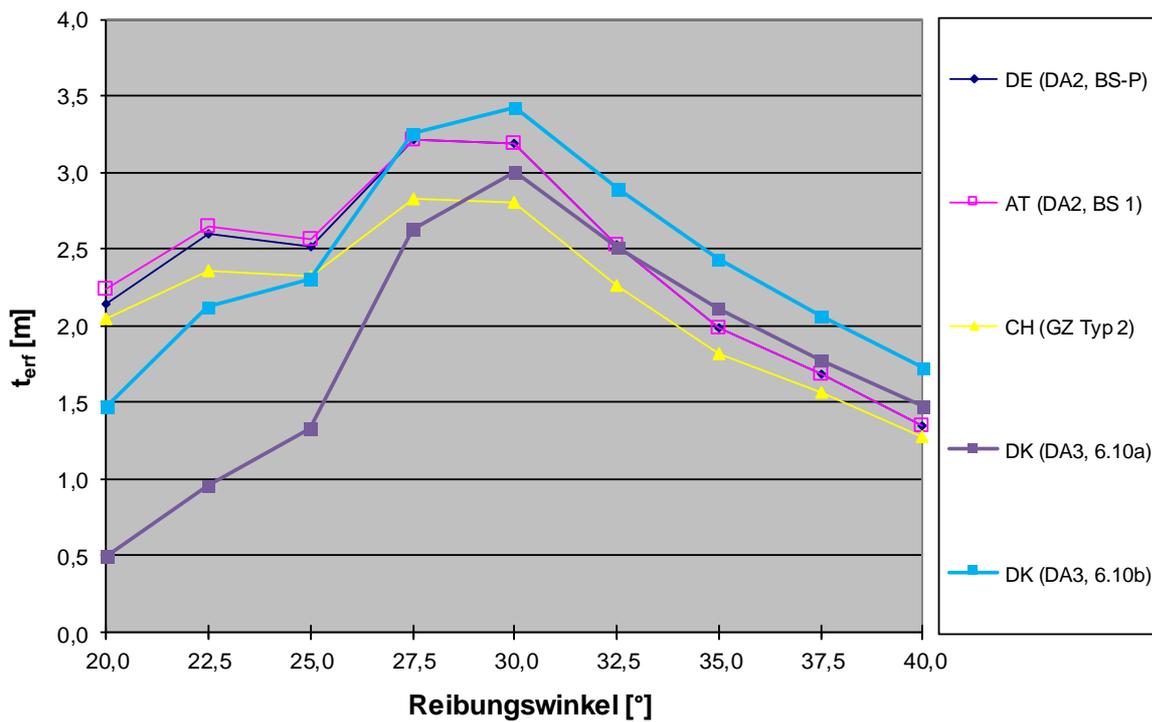


Abbildung 2.15: Einbindetiefe nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion und Mindesterdruk, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

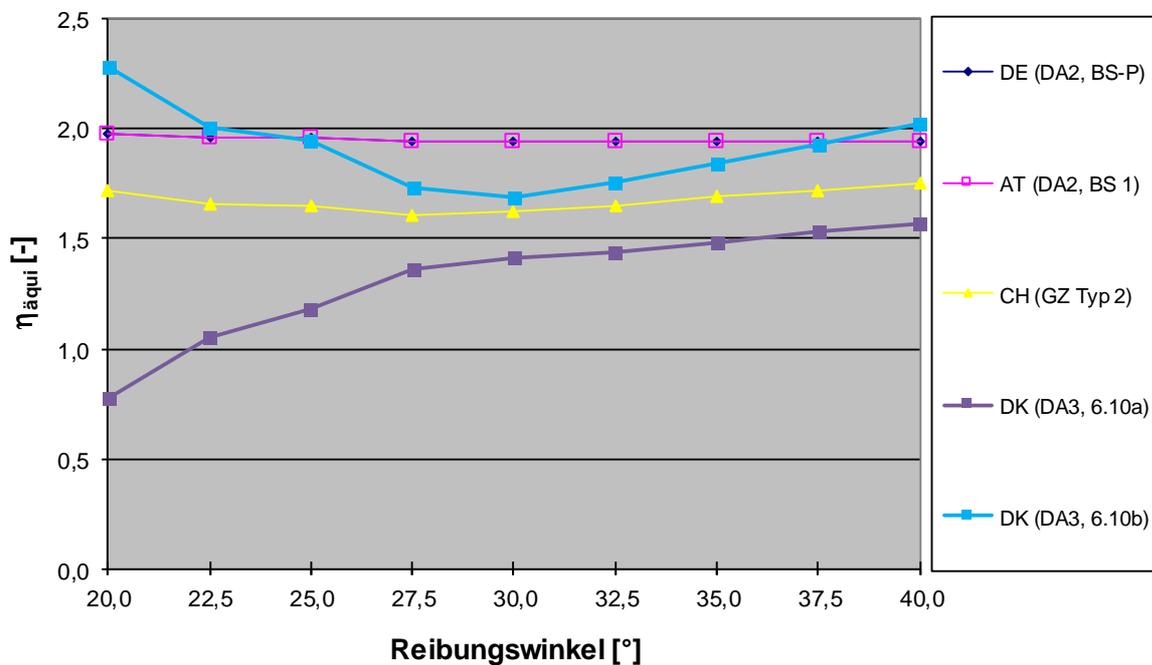


Abbildung 2.16 äquivalente globale Sicherheit nach verschiedenen Nationalen Anhängen für den Grenzzustand der Sicherheit des Erdaufagers und länderspezifischen Erddrucknormen, mit Kohäsion und Mindesterdruk, in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Die Ergebnisse für AT und DE sind praktisch deckungsgleich. Nur im Bereich kohäsiver Böden ergeben sich geringfügige Unterschiede durch die Abweichungen im Ansatz eines Mindesterdrukkes. Die Schweizer Ergebnisse nähern sich den Werten von AT und DE an.

2.2.10 Besonderheiten

Es wurden auch Berechnungen nach Schweizer Norm SIA 267 durchgeführt, obwohl hier bisher nicht der EC7-1 gilt, jedoch arbeitet SIA 267 ebenfalls auf der Basis von Teilsicherheitsbeiwerten. Zu beachten ist eine Sonderbehandlung gemäß SIA 267, Abs. 12.5.2.1 und Figur 10: die Erddruckbelastung ist nur bis zur Aushubsohle mit dem Sicherheitsbeiwert für Einwirkungen zu erhöhen, im Bereich der Einbindetiefe ist nur der charakteristische Erddruck anzusetzen.

Das führt dazu, dass insbesondere bei kleinen Reibungswinkeln, wo also eine große Einbindetiefe erforderlich ist, sich nach SIA 267 eine geringere Einbindung und damit ein geringerer äquivalenter Sicherheitsfaktor ergibt. Bei hohen Reibungswinkeln und damit kleiner Einbindetiefe ist der Einfluss geringer und die Einbindetiefe sowie die Sicherheit unterscheiden sich weniger von den Ergebnissen gemäß Nachweisverfahren 2.

2.3 Diagnose - Beispiel 2

2.3.1 Randbedingungen

Als komplexeres Beispiel wurde uns von der Bilfinger AG ein ausgeführter Bemessungsfall zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 2.17). Es handelt sich um eine Schlitzwand mit zwei Abstützungen und einer Verankerung sowie einer undurchlässigen DSV-Sohle im Einbindebereich. Die Sohle wurde eingebaut, bevor der Aushub vorgenommen wurde.

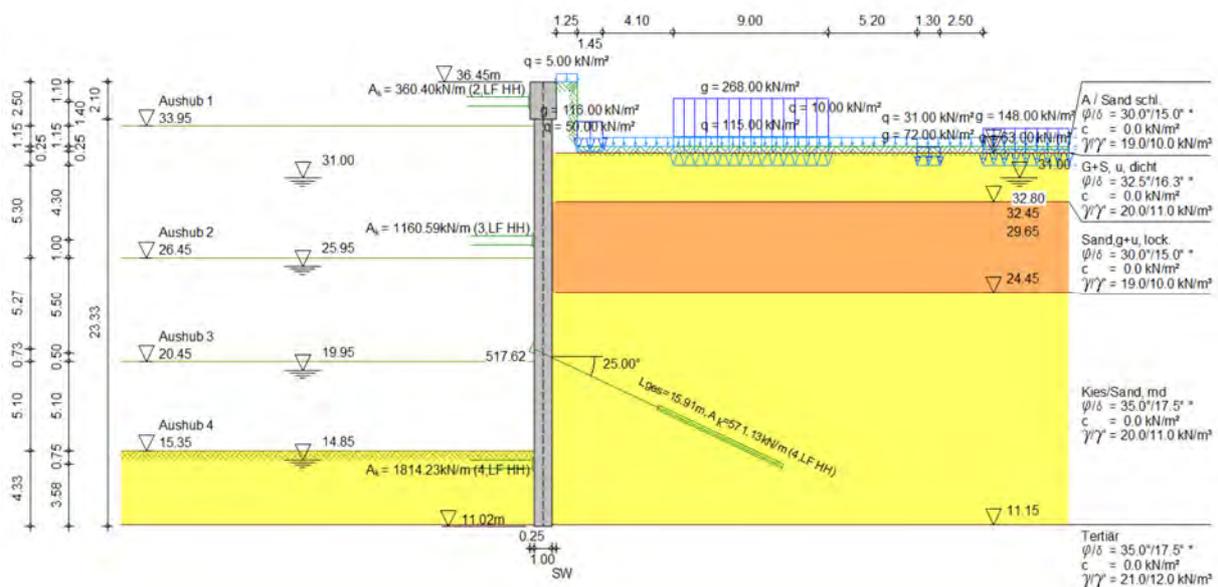


Abbildung 2.17: Mehrfach gestützte Schlitzwand

Als Bemessungssituation wurde wegen der Vergleichbarkeit wieder BS-P angesetzt im Unterschied zur tatsächlich verwendeten BS-T.

Die maximalen Stützkräfte treten immer in dem Aushub auf, in dem die Abstützung zum ersten Mal wirksam wird, d. h. für die erste Abstützung im zweiten Aushub, für die zweite Abstützung im dritten Aushub und für den Anker im Endaushub. Bei der Sohle tritt ebenfalls die maximale Kraft im Endaushub auf.

2.3.2 Festlegung der Vergleichsgröße

In diesem Fall macht der Bezug einer Sicherheit auf die Erdauflagerkraft keinen Sinn, da durch die Abstützung (Sohle) im Fußbereich so gut wie keine Belastung im Erdauflager mehr ankommt. Es werden alternativ die Stützkräfte je m Wand verglichen. Im Unterschied zur ursprünglichen Berechnung werden alle Vergleiche mit Erddruck nach EC7-1 berechnet.

2.3.3 Vergleich der Ergebnisse nach den Nachweisverfahren aus ausgewählten europäischen Ländern

Die Stützkräfte in den Stützenlagen 1 und 2, der Ankerlage 3 und der Sohle 4 werden in Tabelle 2.26 in kN/lfm Wand angegeben:

Tabelle 2.26: Stützkräfte in den Stützenlagen für ausgewählte europäische Länder

Abstützung Nr.	DE	AT	CH	FR	UK	IT
1	333	339	305	339	360	360
2	891	840	1143	840	1161	1161
3	942	994	551	994	518	518
4	1708	1701	1808	1701	1814	1814

Es sind ebenfalls die Ergebnisse für AT, DE und FR fast gleich (Nachweisverfahren 2). Die Unterschiede ergeben sich aus einem unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwert für Ruhedruck in Deutschland. Die Ergebnisse für UK und IT sind gleich (DA1). Für CH ergibt sich eine kurze Wandlänge durch Ansatz des Erddrucks ohne Sicherheitsbeiwert im Fußbereich, dafür höhere Stützkräfte.

2.4 Therapie

Aus den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Für alle Parametervariationen stellte sich beim Nachweisverfahren DA1 immer heraus, dass die Kombination 2 (DA1.2) maßgebend war.
2. Das globale Sicherheitsniveau ist bei den Nachweisverfahren DA2 und DA2* (im Folgenden als DA2(*) bezeichnet) konstant, bei DA1 und DA3 variiert es mit dem Reibungswinkel φ , weil dieser nicht linear in die Berechnung eingeht.
3. Am Beispiel von Dänemark und Schweden sieht man, dass selbst bei einem prinzipiell gleichen Nachweisverfahren im Detail sehr unterschiedliche Ergebnisse erhalten werden. Die unterschiedlichen nationalen Anhänge zum Eurocode mit ihrer individuellen Wahl der Teilsicherheitsfaktoren, der uneinheitlichen Verwendung von Kombinationsbeiwerten ψ sowie der unterschiedlichen Berücksichtigung von Schadensfolgeklassen bewirken deutlich höhere Streubreiten bei den Ergebnissen als die Wahl des Nachweisverfahrens selbst.
4. Bei unverankerten Spundwänden, geschichtetem Boden, hohen Blocklasten (Lastintensität, Lage) wirken sich das Nachweisverfahren und die unter 3 genannte Punkte unterschiedlich stark auf Einbindetiefe und äquivalentes Sicherheitsniveau aus. Eine

Harmonisierung durch einfache Skalierung der Nachweisverfahren gelingt für Spundwände bzw. Baugrubenwände nicht.

5. Entsprechend lassen sich die Ergebnisse der Nachweisverfahren hinsichtlich der äquivalenten globalen Sicherheit nicht durch Parallelverschiebung ineinander überführen. Die Verwendung von DA2(*) wird empfohlen, da hierbei das globale Sicherheitsniveau über verschiedene Werte von Reibungswinkel und Kohäsion konstant bleibt.

Die Nachweisverfahren DA1.2 und DA3 können bei der Bemessung von Baugrubenwänden als ein einziges Nachweisverfahren betrachtet werden, da beide eine Faktorisierung der Einwirkungen und der geotechnischen Kenngrößen berücksichtigen. Geringe Unterschiede können sich aus den unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten für die Einwirkungen ergeben. Durch Angleichung der Beiwerte werden beide Nachweisverfahren identisch. Somit ist für die Bemessung von Baugrubenwänden nur noch zwischen den Nachweisverfahren DA3 (bzw. DA1.2) und DA2(*) zu wählen.

Wie bei den Flächengründungen (siehe Kap. 1.3) schon erläutert wurde, berücksichtigt EC0 Teilsicherheitsbeiwerte zur Berücksichtigung der Parameterstreuung und der Unsicherheit des Modells. Allerdings können diese vereinfacht in nur einem Teilsicherheitsbeiwert zusammengefasst werden, der entweder auf die Materialparameter oder auf die Modelle angesetzt werden kann. Eine Faktorisierung der Materialparameter kann sich bei den in der Geotechnik üblicherweise vorhandenen nichtlinearen Modellen überproportional auf die Bemessung auswirken (siehe Kap. 1.3). Außerdem ist nach EC7-1 die Streuung der Parameter schon bei der Festlegung der charakteristischen Werte der geotechnischen Kenngrößen zu berücksichtigen. Daher ist es zweckmäßig die Teilsicherheitsbeiwerte lediglich auf die Modelle anzusetzen, d. h. der aktive Erddruck (Einwirkung) und der passive Erddruck (Erddruck) werden zunächst mit charakteristischen Größen ermittelt und erst danach werden diese mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten faktorisiert. Für die Bemessung von Baugrubenwänden wird folglich das Nachweisverfahren DA2(*) vorgeschlagen.

3 Pfahlgründungen – axial beanspruchte Pfähle

3.1 Anamnese

3.1.1 Grenzzustandsgleichung

Die Grenzzustandsgleichung für den Nachweis der Sicherheit axial beanspruchte Pfähle besteht in der Gegenüberstellung des Bemessungswertes der Einwirkungen F_{cd} und des Bemessungswertes der Widerstände R_{cd} :

$$F_{cd} \leq R_{cd} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Die Bemessungswerte der Einwirkungen ergeben sich durch Multiplikation der charakteristischen ständigen Einwirkungen mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_G und der charakteristischen veränderlichen Einwirkungen mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_Q . Im Falle axial belasteter (Druck-)Pfähle setzt sich der äußere Pfahlwiderstand aus der Mantelreibung R_s und dem Spitzendruck R_b zusammen. Aus den charakteristischen Widerständen $R_{s,k}$ und $R_{b,k}$ folgen die jeweiligen Bemessungswerte durch Division mit den Teilsicherheitsbeiwerten γ_s und γ_b . Die Gl. 3.1 lässt somit folgendermaßen ausformulieren:

$$E_G \cdot \gamma_G + E_Q \cdot \gamma_Q \leq \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} + \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Grundsätzlich können die Pfahlwiderstände auf Grundlage von

- a) statischen Probelastungen
- b) den Ergebnissen von Baugrundversuchen
- c) Stoßversuchen bzw. dynamischen Probelastungen
- d) der Anwendung von Rammformeln oder
- e) einer Analyse der Wellengleichung

bestimmt werden (s. Abschnitt 7.6.2 des EC7-1).

Bei Ableitung der charakteristischen Widerstände aus Bodenkennwerten dürfen im Nationalen Anhang Modellfaktoren $> 1,0$ zur Korrektur der im Anhang A des EC7-1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte festgelegt werden (s. Abschnitt 7.6.2.3 (8) des EC7-1). In den Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1054:2010-12 ist bei Anwendung von charakteristischen Pfahlwiderständen auf der Grundlage von Erfahrungswerten bereits ein Modellfaktor von $\eta_E = 1,3$ eingerechnet (s. Abschnitt 7.6.2.3 (8) der DIN EN 1997-1/NA).

Gl. 3.2 verdeutlicht, dass sowohl die ständigen und veränderlichen Einwirkungen als auch die Widerstände, Mantelreibung und Spitzendruck, linear in die Grenzzustandsgleichung und somit auch in die Bemessung des Pfahles eingehen. Somit lassen sich die resultierenden Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen γ_F bzw. Beanspruchungen γ_E und für die Widerstände γ_R über die Anteile der ständigen bzw. veränderlichen Einwirkungen an den Gesamteinwirkungen ($E_{G,k}/E_{ges,k}$ bzw. $E_{Q,k}/E_{ges,k}$) und die Anteile von Mantelreibung bzw. Spitzendruck am Gesamtwiderstand ($R_{s,k}/R_{ges,k}$ bzw. $R_{b,k}/R_{ges,k}$) gewichtet angeben:

$$\gamma_E = \frac{E_{G,k}}{E_{ges,k}} \cdot \gamma_G + \frac{E_{Q,k}}{E_{ges,k}} \cdot \gamma_Q = \left(1 - \frac{E_{Q,k}}{E_{ges,k}}\right) \cdot \gamma_G + \frac{E_{Q,k}}{E_{ges,k}} \cdot \gamma_Q \quad \text{Gl. 3.3a}$$

und

$$\gamma_R = \frac{R_{s,k}}{R_{ges,k}} \cdot \gamma_G + \frac{R_{b,k}}{R_{ges,k}} \cdot \gamma_Q = \frac{R_{s,k}}{R_{ges,k}} \cdot \gamma_s + \left(1 - \frac{R_{s,k}}{R_{ges,k}}\right) \cdot \gamma_b \quad \text{Gl. 3.3b}$$

Durch Multiplikation des gewichteten Teilsicherheitsbeiwertes für die Einwirkungen γ_E mit dem gewichteten Teilsicherheitsbeiwert für die Widerstände γ_R erhält man ein äquivalentes Sicherheitsniveau im Sinne einer globalen Sicherheit:

$$\eta = \gamma_E \cdot \gamma_R \quad \text{Gl. 3.4}$$

Mit den Gl. 3.3a und 3.3b folgt die äquivalente Sicherheit zu:

$$\eta = \left[\left(1 - \frac{E_{Q,k}}{E_{ges,k}}\right) \cdot \gamma_G + \frac{E_{Q,k}}{E_{ges,k}} \cdot \gamma_Q \right] \cdot \left[\frac{R_{s,k}}{R_{ges,k}} \cdot \gamma_s + \left(1 - \frac{R_{s,k}}{R_{ges,k}}\right) \cdot \gamma_b \right] \quad \text{Gl. 3.5}$$

Sofern entweder das Einwirkungsverhältnis oder das Widerstandsverhältnis festgelegt wird, kann der jeweils andere Parameter in einer zweidimensionalen Darstellung variiert werden.

Aufgrund der linearen Abhängigkeit zwischen den Einwirkungen bzw. den Pfahlwiderständen und den Pfahlabmessungen wurde die Untersuchung allgemeingültig ohne Berechnungsbeispiele durchgeführt.

3.1.2 Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte

Der EC7-1 lässt für die Bemessung von axial beanspruchten Pfählen die Anwendung von drei Nachweisverfahren zu, die sich im Hinblick auf die Faktorisierung der Eingangsgrößen Einwirkungen, Bodenkenngrößen und Widerständen unterscheiden. Eine ausführliche Erläuterung der Nachweisverfahren wurde bereits in Kapitel 1.1 oder 2.1 gegeben. Hier abweichend werden bei DA1.1 und DA1.2 auch die Bodenwiderstände (z. B. Spitzendruck, Mantelreibung, etc.) faktorisiert (für DA1.1 mit R1 und für DA1.2 mit R4). Bei DA1.2 erfolgt eine Faktorisierung der Bodenparameter nur zur Ermittlung ungünstiger Einwirkungen infolge z. B. Mantelreibung oder Querbelastung. Die in EC7-1 definierten Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung von axial beanspruchten Pfählen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst, die Teilsicherheitsbeiwerte für günstige Einwirkungen wurden in Tabelle 3.1 vernachlässigt.

Tabelle 3.1: Teilsicherheitsbeiwerte für Grenzzustände der Tragfähigkeit von Pfählen

	A1	A2	M1	M2	R1	R2	R3	R4
Einwirkungen (γ_E) oder Beanspruchungen (γ_E)								
ständig γ_G	1,35	1,0	-	-	-	-	-	-
veränderlich γ_Q	1,5	1,3	-	-	-	-	-	-
Bodenkenngrößen (γ_M)								
Scherwinkel γ_φ	-	-	1,0	1,25	-	-	-	-
Kohäsion γ_c	-	-	1,0	1,25	-	-	-	-
Scherfestigkeit γ_{cu}	-	-	1,0	1,4	-	-	-	-
Einaxiale Druckfestigkeit γ_{qu}	-	-	1,0	1,4	-	-	-	-
Widerstände von Bohrpfählen (γ_R)								
Spitzendruck γ_b	-	-	-	-	1,25	1,1	1,0	1,6
Mantelreibung γ_s	-	-	-	-	1,0	1,1	1,0	1,3



Abbildung 3.1: Geographische Verbreitung der Nachweisverfahren zur Bemessung axial beanspruchter Pfähle (nach [U 31])

Der EC7-1 räumt jedoch den CEN-Ländern die Möglichkeit ein, im nationalen Anhang, zusätzlich zur Festlegung des Nachweisverfahrens, von Anhang A des EC7-1 abweichende Teilsicherheitsbeiwerte zu definieren. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die anzuwendenden Nachweisverfahren und die Teilsicherheitsbeiwerte in einigen europäischen Ländern. In Abbildung 3.1 ist zudem die geographische Verbreitung der Nachweisverfahren zur Bemessung axial belasteter Pfähle skizziert.

Die Mehrheit der europäischen Länder hat das Nachweisverfahren DA2 (gleich DA2*) gewählt. Das Nachweisverfahren DA1 wird von Großbritannien, Portugal, Belgien, Rumänien und Litauen als einziges Verfahren zur Bemessung von Pfählen zugelassen.

Die Niederlande schreiben als einziges europäisches Land die Anwendung des Nachweisverfahrens DA3 vor. Irland, die Tschechische Republik, Italien und Schweden lassen mehrere Nachweisverfahren zu.

In einigen europäischen Ländern ist auch die Verwendung mehrerer Verfahren zulässig. Gegenübergestellt werden im Folgenden gemäß Tabelle 3.2 die Länder Tschechische Republik (CZ), Großbritannien (UK), Irland (IE), Italien (IT), Frankreich (FR), Spanien (ES), Dänemark (DK), Polen (PL), Österreich (AT), Deutschland (DE), Schweiz (CH), Schweden (SE) und Niederlande (NL).

Die Länder IE, FR, AT, CZ und PL haben die in EC7-1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte übernommen. In Deutschland hängen die Teilsicherheitsbeiwerte u. a. von den Bemessungssituationen ab, in Großbritannien wird ebenfalls darauf verwiesen, dass in den Bemessungssituationen BS-T und BS-A unter Umständen eine Abminderung der Teilsicherheitsbeiwerte erfolgen darf. Dänemark und die Niederlande unterscheiden die Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen in Abhängigkeit von den Folgen eines Versagens des Bauwerkes nach „consequence classes“ bzw. „reliability classes“. Schweden mindert die

Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen in Abhängigkeit von Sicherheitsklassen (SK) ab. In Tabelle 3.2 wurde SK 3 und somit keine Abminderung unterstellt.

Tabelle 3.2: Teilsicherheitsbeiwerte einiger europäischer Länder

Land	Nachweisverfahren	Teilsicherheitsbeiwerte				Modellfaktor ^{b)}
		γ_G	γ_Q	γ_b	γ_s	
Österreich AT	DA2/2*	1,35	1,50	1,10	1,10	1,30
Schweiz CH	DA2/2*	1,35	1,50	1,30	1,30	1,10
Tschechische Republik ^{a)} CZ	DA2/2*	1,35	1,50	1,10	1,10	-
Deutschland ^{d)} DE	DA2/2*	1,35	1,50	1,40	1,40	-
Dänemark DK	DA2/2*	1,32 ^{h)}	1,65 ^{h)}	1,30	1,30	1,25 ^{c)}
Spanien ES	DA2/2*	1,35	1,50	1,35	1,10	1,40
Frankreich ⁱ⁾ FR	DA2/2*	1,35	1,50	1,10	1,10	-
Irland ^{e)} IE	DA1.1	1,35	1,50	1,25	1,00	1,50
	DA1.2	1,00	1,30	1,60	1,30	
	DA2/2*	1,35	1,50	1,10	1,10	
	DA3	u ^{f)}	u ^{f)}	u ^{f)}	u ^{f)}	
Italien IT	DA1.1	1,35	1,50	1,00	1,00	-
	DA1.2	1,00	1,30	1,70	1,45	
Niederlande ^{g)} NL	DA3	1,35	1,50	1,80	1,80	-
Großbritannien UK	DA1.1	1,35	1,50	1,00	1,00	1,40
	DA1.2	1,00	1,00	1,70	1,40	
Polen PL	DA2/2*	1,35	1,50	1,10	1,10	-
Schweden SE	DA2/2*	1,35 ^{k)}	1,5 ^{k)}	1,3	1,3	1,6 ^{j)}

- a) Entgegen der Darstellung in Abbildung 3.1 ist der Nachweis von Gründungspfählen nur mit dem Nachweisverfahren DA2 zulässig; DA1.1 bzw. DA1.2 sind bei Pfählen zur Auftriebssicherung anzuwenden.
- b) Modellfaktor nach Abschn. 7.6.2.3.(8) der DIN EN 1997-1
- c) Modellfaktor in der Geotechnischen Kategorie 1
- d) Teilsicherheitsbeiwerte für die BS-P; in γ_b und γ_s ist ein Modellfaktor von 1,3 enthalten.
- e) Anwendung des Nachweisverfahrens DA3 unklar; der Nationale Anhang liegt nur als Entwurf vor.
- f) unbekannt
- g) in RC 2
- h) Teilsicherheitsbeiwerte für high consequence class CC1 ($K_{FI} = 1,1$)
- i) Verweis auf NF EN 1997-1/NA
- j) für Reibungspfähle
- k) für SK 3

Der EC7-1 gestattet den Ländern darüber hinaus in Abschnitt 7.6.2.3 (8) die Definition von Modellfaktoren zur Berücksichtigung der Art der angesetzten Pfahlwiderstände (Pfahlprobebelastung, Erfahrungswert, ...). Teilweise, u.a. auch in Deutschland, wurden die Modellfaktoren bereits in den Teilsicherheitsbeiwerten erfasst, indem diese in Abhängigkeit von der Art der Pfahlwiderstände angegeben sind. Die in Tabelle 3.2 in einer Bandbreite von 1,1 bis 1,6 wiedergegebenen Modellfaktoren gelten für Pfahlwiderstände, die auf Grundlage von Erfahrungswerten bzw. von den Ergebnissen von Baugrundversuchen festgelegt wurden. Dänemark setzt den genannten Modellfaktor von 1,25 nur für Bauwerke der geotechnischen Kategorie 1 an. Der höchste Wert für den Modellfaktor von 1,6 ist in SE anzusetzen. Allerdings gilt dieser Wert für Reibungspfähle. Für Bohrspfähle mit einem Lastabtrag über Mantelreibung und Spitzendruck sind keine Modellfaktoren definiert, da bei auf Spitzendruck und Mantelreibung bemessenen Pfählen in der Regel eine Ermittlung des Pfahlwiderstands mit Pfahlprobebelastungen vorausgesetzt wird. In den Vergleichsberechnungen wurde vereinfachend für das Land SE der Modellfaktor von 1,6 für den Pfahlwiderstand berücksichtigt.

Das Land SE berücksichtigt darüber hinaus bei den veränderlichen Lasten einen Kombinationsbeiwert $\psi_{0,1}$, welcher bei den Vergleichsberechnungen vereinfachend zu $\psi_{0,1} = 1,0$ angesetzt wurde.

Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen ist die Gegenüberstellung der äquivalenten Sicherheit der drei Nachweisverfahren auf Grundlage der in Anhang A des EC7-1 aufgeführten Teilsicherheitsbeiwerte und die Durchführung der Vergleichsberechnungen mit den jeweiligen Nachweisverfahren und spezifischen Teilsicherheitsbeiwerten einiger europäischer Länder.

3.2 Diagnose

3.2.1 Vergleich der Nachweisverfahren (Stufe I)

In Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 sind die äquivalenten Sicherheiten bei Anwendung der drei Nachweisverfahren mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach Anhang A des EC7-1 dargestellt. Das Einwirkungsverhältnis $E_{G,k}$ zu $E_{Q,k}$ (Abbildung 3.2) bzw. das Widerstandsverhältnis $R_{s,k}$ zu $R_{b,k}$ (Abbildung 3.3) wurde vereinfachend jeweils zu 0,5 / 0,5 angenommen.

Eine Auswertung des Nachweisverfahrens DA3 erfolgte nicht, da der EC7-1 keine eindeutigen Vorgaben für die Ermittlung der Widerstände aus Bodenkenngrößen macht.

Das Nachweisverfahren DA3 ist somit für die Bemessung von axial beanspruchten Pfählen grundsätzlich nur in Verbindung mit ergänzenden Angaben aus den nationalen Anhängen anwendbar.

Ergänzend ist in Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 die ehemals in Deutschland im Lastfall 1 geforderte globale Sicherheit von 2,0 eingetragen.

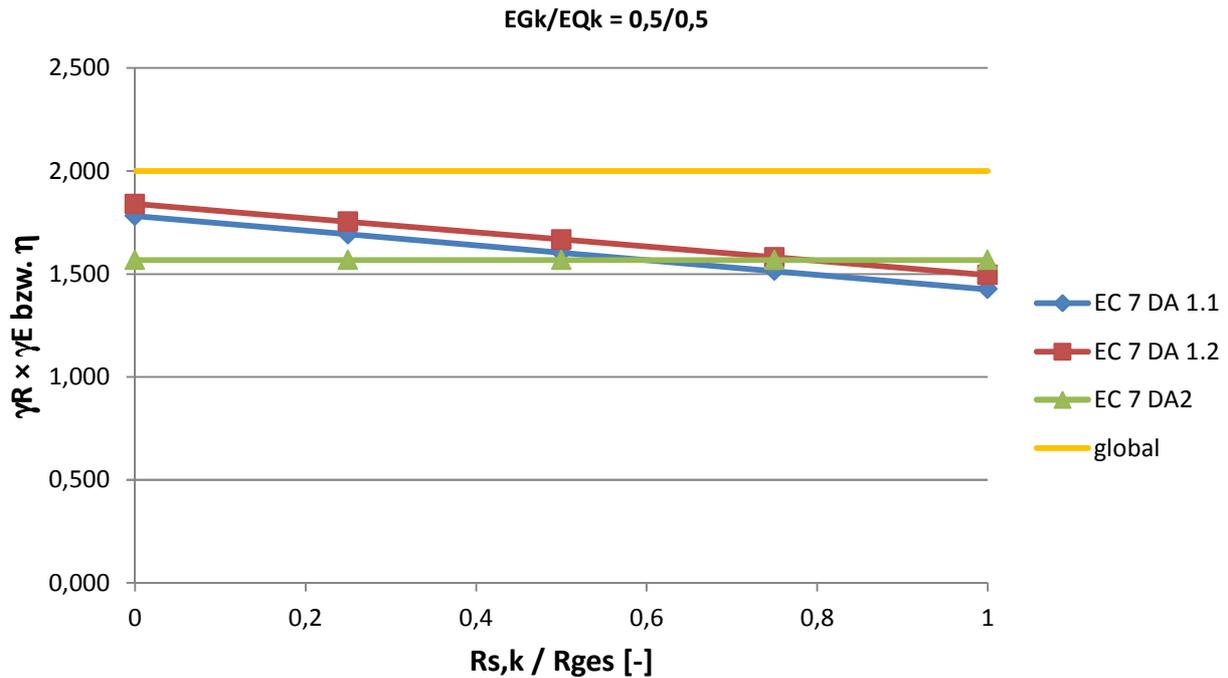


Abbildung 3.2: Variation des Widerstandsverhältnisses

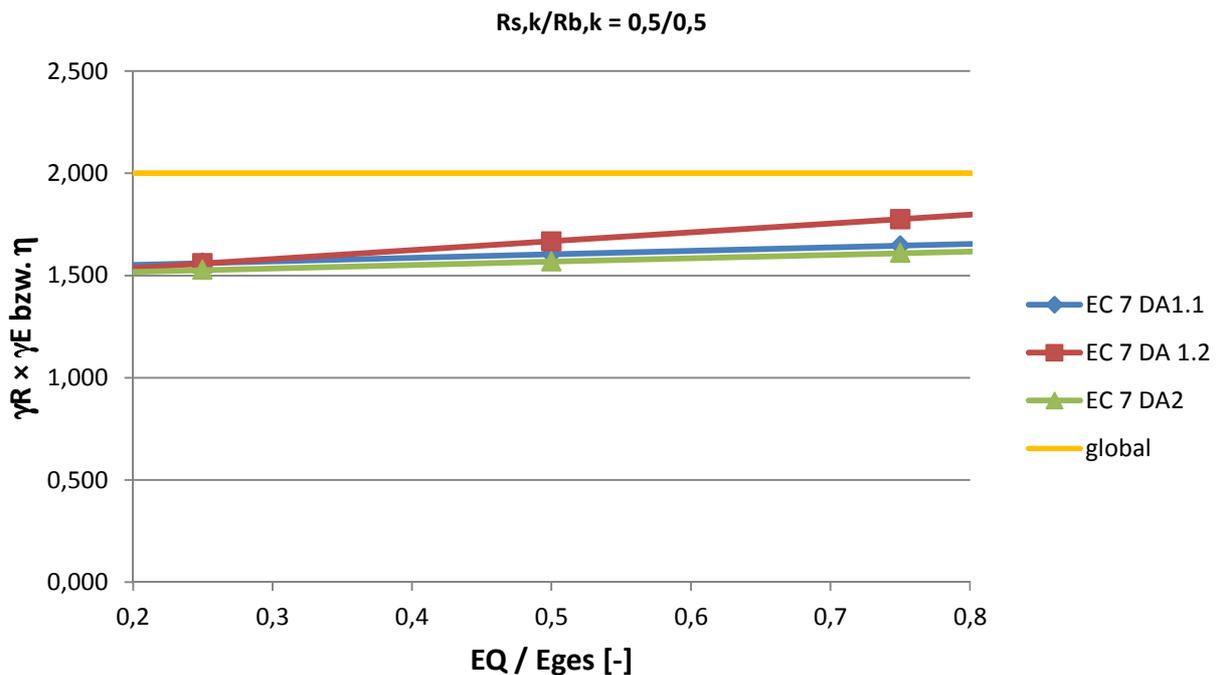


Abbildung 3.3: Variation des Einwirkungsverhältnisses

Bei Anwendung der in EC7-1 vorgeschlagenen Teilsicherheitsbeiwerte liegt das äquivalente Sicherheitsniveau in allen untersuchten Variationen unterhalb des Sicherheitsniveaus von 2,0, die geringste äquivalente Sicherheit beträgt 1,45 im Nachweisverfahren DA1.1 bei einem Anteil der veränderlichen Einwirkungen von Null, die maximale äquivalente Sicherheit 1,9 im Nachweisverfahren DA1.2 bei reiner Beanspruchung durch veränderliche Einwirkungen.

Darüber hinaus ist die äquivalente Sicherheit im Nachweisverfahren DA2 ebenso wie die globale Sicherheit unabhängig von der Zusammensetzung der Widerstände, da Mantelreibung und Spitzendruck mit dem gleichen Teilsicherheitsbeiwert abgemindert werden. Mit Ausnahme

der globalen Sicherheit nimmt die äquivalente Sicherheit mit dem Anteil veränderlicher Beanspruchungen zu. Die äquivalenten Sicherheiten der Nachweisverfahren DA1.1 und DA2 verlaufen bei konstantem Verhältnis der Widerstände parallel.

Ab einem Anteil von mehr als 25 % veränderlicher Beanspruchungen ergibt Nachweisverfahren DA1.2 höhere äquivalente Sicherheiten als Nachweisverfahren DA1.1 (s. Abbildung 3.3).

3.2.2 Vergleich der äquivalenten Sicherheiten (Stufe II)

In Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 ist das Ergebnis der Vergleichsrechnungen mit den Teilsicherheitsbeiwerten der europäischen Länder ohne Berücksichtigung der Modellfaktoren wiedergegeben.

Die Kurven mit einer Farbe aus dem blauen Farbkreis repräsentieren äquivalente Sicherheiten des Nachweisverfahrens DA1.1. Mit Farben aus dem roten Farbkreis sind äquivalente Sicherheiten des Nachweisverfahrens DA1.2 sowie in hellrot die äquivalenten Sicherheiten des deutschen Nachweisverfahrens DA2* aufgetragen. Grüne Farben stehen für das Nachweisverfahren DA2. Die graue Kurve beschreibt die äquivalente Sicherheit im Nachweisverfahren DA3.

Die Teilsicherheitsbeiwerte aus UK und IT ergeben im Nachweisverfahren DA1.2 immer höhere äquivalente Sicherheiten als im Nachweisverfahren DA1.1. Für IE gilt dieses oberhalb eines Anteils der veränderlichen Einwirkungen an den gesamten Einwirkungen von 25 %.

Die Steigungen der Geraden richten sich allein nach den Teilsicherheitsbeiwerten. Verwenden Länder für den Spitzendruck und die Mantelreibung die gleichen Teilsicherheitsbeiwerte, ergibt sich in der Darstellung gemäß Abbildung 3.4 eine horizontal verlaufende Gerade (s. DK, PL, IE, CH, DE, AT, SE). ES und IT haben für die Mantelreibung kleinere Teilsicherheitsbeiwerte als für den Spitzendruck definiert, entsprechend nimmt die äquivalente Sicherheit mit dem Anteil der Mantelreibung am Gesamtwiderstand ab (s. Abbildung 3.4).

Da veränderliche Einwirkungen im Nachweisverfahren DA2 immer mit höheren Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden als ständige Einwirkungen, nimmt die äquivalente Sicherheit in Abbildung 3.5 stets mit dem Anteil veränderlicher Einwirkungen zu.

Die Teilsicherheitsbeiwerte aus NL führen stets zu den größten äquivalenten Sicherheiten. Kern des Nachweisverfahrens DA3 ist allerdings sowohl eine Herabsetzung der Widerstände als auch der Bodenkenngrößen durch Teilsicherheitsbeiwerte. In NL dürfen die axialen Pfahlwiderstände anhand der Ergebnisse aus Drucksondierungen durch Korrelationen abgeleitet werden. Praktisch werden dabei Eindringwiderstände der Drucksonde vermutlich nicht abgemindert, so dass das angewendete Nachweisverfahren nur bedingt dem Verfahren DA3 im eigentlichen Sinn entspricht. In Abbildung 3.4 bis Abbildung 3.7 wurden daher für NL keine Teilsicherheitsbeiwerte der Gruppe M berücksichtigt.

Die äquivalenten Sicherheiten liegen in einer Bandbreite von 1,4 bis 2,1 vor. Überwiegend betragen die äquivalenten Sicherheiten $\leq 2,0$. Eine Ausnahme bilden DE und DK für $E_{Q,k}/E_{ges} \geq 0,55$ (DE) bzw. $\geq 0,7$ (DK) sowie die NL.

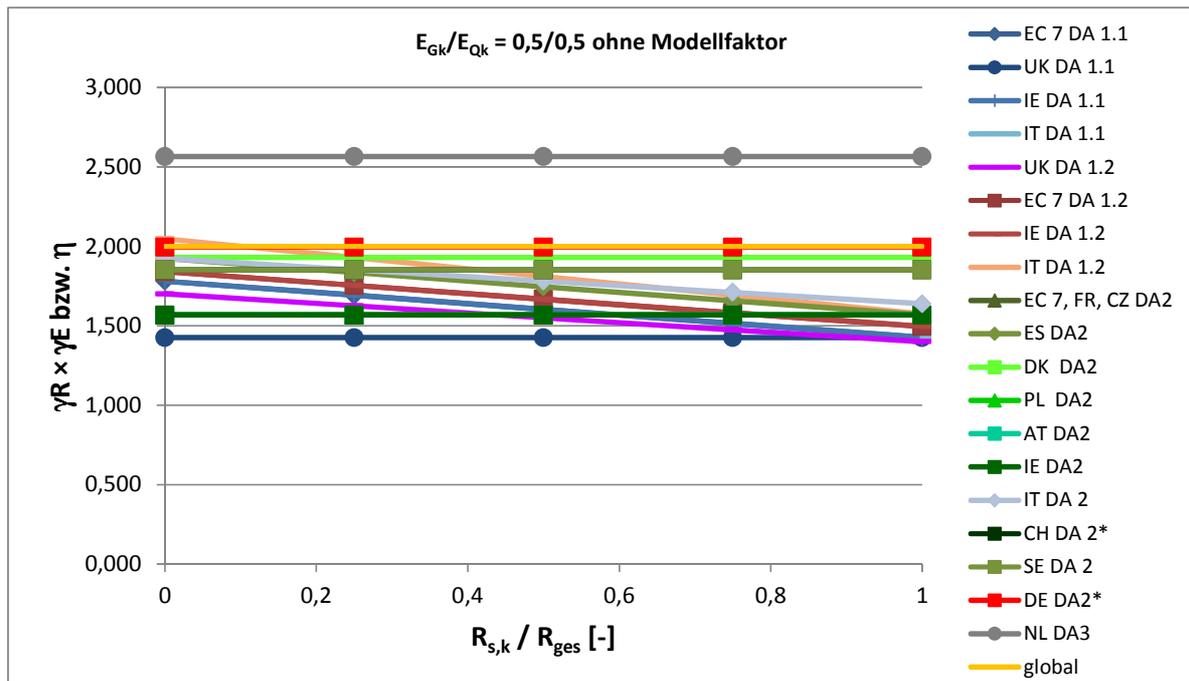


Abbildung 3.4: Variation der Widerstände ohne Berücksichtigung des Modellfaktors

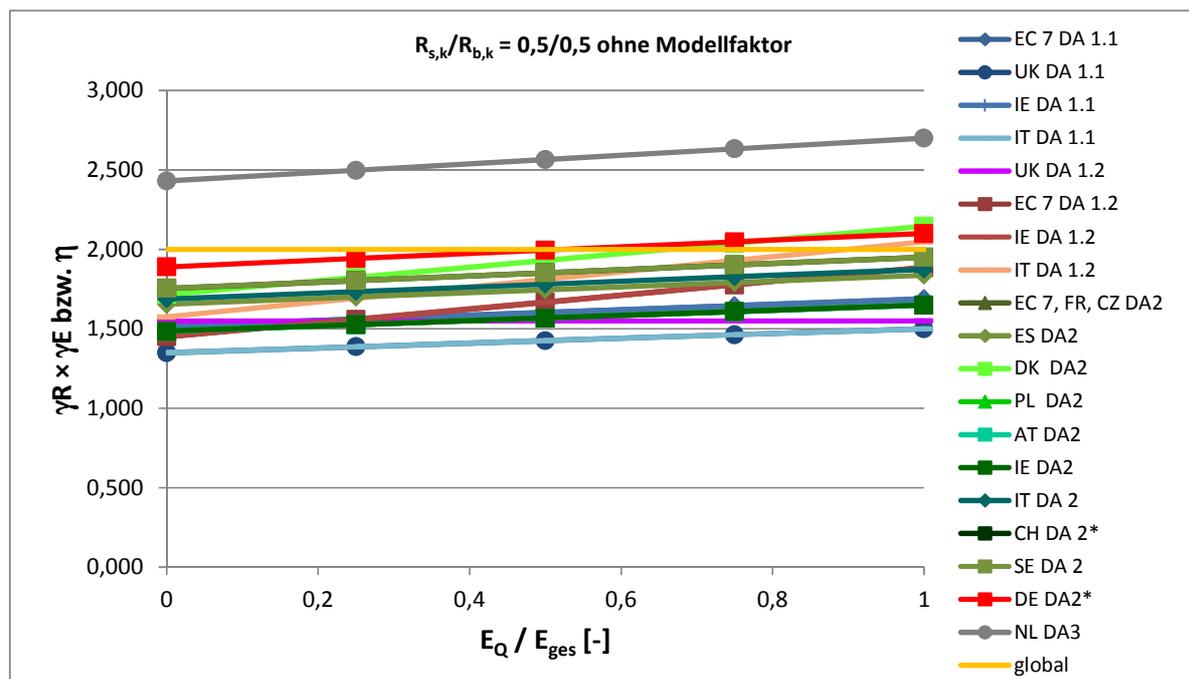


Abbildung 3.5: Variation der Einwirkungen ohne Berücksichtigung des Modellfaktors

3.2.3 Vergleich der äquivalenten Sicherheiten (Stufe III)

In Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 ist das Ergebnis der Variationsrechnungen mit den Teilsicherheitsbeiwerten der europäischen Länder unter Berücksichtigung der Modellfaktoren wiedergegeben. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Diagramme noch einmal im Anhang C unterteilt nach den angewendeten Nachweisverfahren aufgeführt.

Weil der Modellfaktor bei der Ableitung der Pfahlwiderstände aus Baugrundgrößen zur Abdeckung der im Vergleich zu Pfahlprobelastungen zusätzlichen Prognoserisiken dient, ist

er im vorliegenden Fall als Sicherheit zu verstehen und wurde folgerichtig bei der Berechnung der äquivalenten Sicherheit in den Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 angesetzt.

Sofern die Modellfaktoren bereits in den Teilsicherheitsbeiwerten enthalten sind, erfolgte gegenüber den Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 keine Anpassung.

Deutlich erkennbar ist in den Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7, dass die äquivalenten Sicherheiten mit Berücksichtigung der Modellfaktoren deutlich weiter auseinander liegen.

Bedingt durch den Modellfaktor ist die äquivalente Sicherheit höher als bei der Bemessung nach EC7-1 ohne Ansatz eines Modellfaktors.

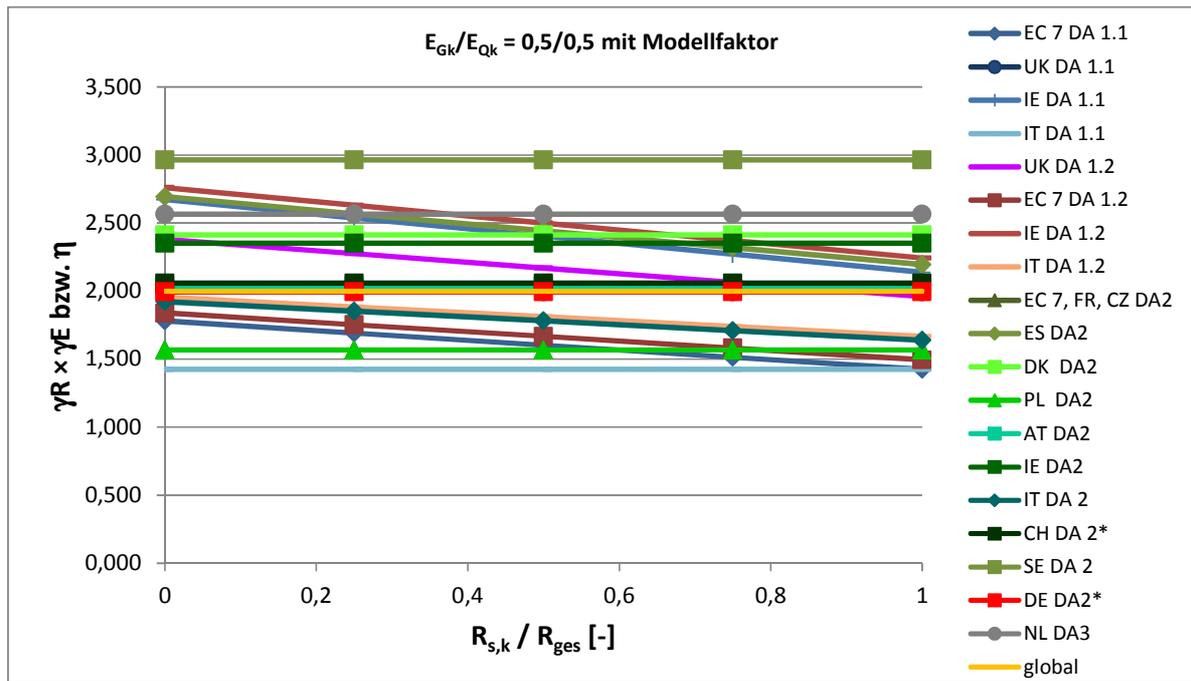


Abbildung 3.6: Variation der Widerstände unter Berücksichtigung des Modellfaktors

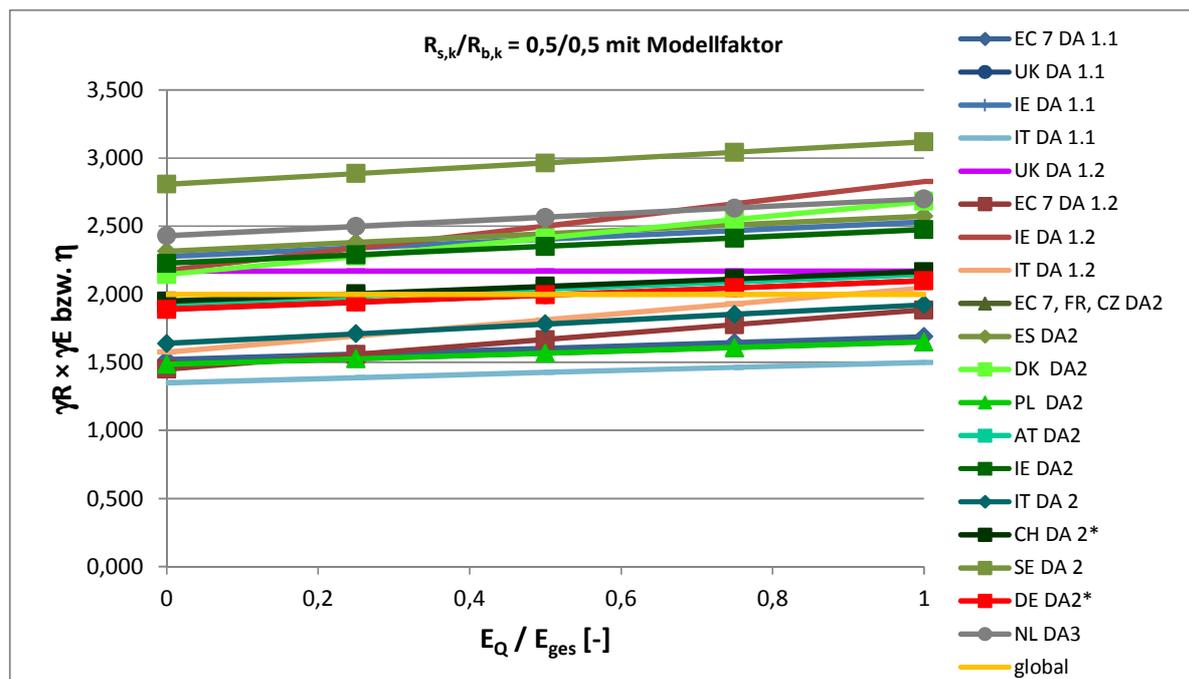


Abbildung 3.7: Variation der Einwirkungen unter Berücksichtigung des Modellfaktors

Die äquivalenten Sicherheiten der Länder AT, CH und DE weisen eine einheitliche Größenordnung auf. Insgesamt macht die Bandbreite der äquivalenten Sicherheiten 1,5 bis 3,1 aus. Die äquivalenten Sicherheiten anhand der Teilsicherheitsbeiwerte aus DK und IE ergeben im Vergleich zu den v. g. Ländern um rd. 20 % höhere äquivalente Sicherheiten, die Teilsicherheitsbeiwerte Polens um rd. 20 % geringere. Bedingt durch den hohen Modellfaktor bildet SE die Obergrenze, hierbei gilt es allerdings zu bedenken, dass dieser Modellfaktor eigentliche nur für Reibungspfähle gilt.

Mit Ausnahme der Bereiche mit einer geringen Mantelreibung ($R_{s,k}/R_{ges} \leq 0,35$) oder hoher veränderlicher Einwirkungen ($E_{Q,k}/E_{ges} \geq 0,65$) folgen mit den Teilsicherheitsbeiwerten der NL im Nachweisverfahren DA3 die höchsten äquivalenten Sicherheiten. Innerhalb der v. g. Bereiche weisen die Teilsicherheitsbeiwerte aus ES, IE, SE und UK teilweise ein höheres Sicherheitsniveau auf.

Bei Variation des Anteils veränderlicher Einwirkungen an den Gesamteinwirkungen nimmt die äquivalente Sicherheit bei allen Ländern mit dem Anteil veränderlicher Einwirkungen zu.

3.3 Therapie

Aus den Ergebnissen der Variationsstudien lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Auch wenn alle europäischen Länder Pfähle gemäß einem oder mehrerer der drei in EC7-1 vorgeschriebenen Nachweisverfahren bemessen, existieren wesentliche Unterschiede in den Sicherheitsphilosophien. Dieses gilt insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit Bemessungssituationen, Kombinationsbeiwerten, Sicherheitsklassen etc.
2. Bedingt durch die Linearität der Pfahlbemessung ist es letztlich – mit Ausnahme des Nachweisverfahrens DA3 – unerheblich, welches Nachweisverfahren verwendet wird. Entscheidend sind nur die den Nachweisverfahren „hinterlegten“ Teilsicherheitsbeiwerte. DA1.2 ist bei der Pfahlbemessung von DA3 verschieden, da nicht die Bodenparameter sondern direkt die Widerstände aus Spitzendruck und Mantelreibung abgemindert werden.
3. Bei Anwendung der im Anhang A des EC7-1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte ergibt das Nachweisverfahren DA1.2 ab einem Anteil veränderlicher Lasten von ≥ 25 % eine größere äquivalente Sicherheit als das Nachweisverfahren DA1.1. Bei einem Anteil veränderlicher Lasten < 25 % ergibt das Nachweisverfahren DA1.1 um maximal 6 % größere äquivalente Sicherheiten als das Nachweisverfahren DA1.2. Handelt es sich auf der Einwirkungsseite nahezu ausschließlich um veränderliche Lasten ergibt die Bemessung mit dem Nachweisverfahren DA1.2 zu rd. 11 % größere äquivalente Sicherheiten als bei Verwendung des Nachweisverfahrens DA1.1. In der Regel führt dementsprechend das Nachweisverfahren DA1.1 nicht zu signifikant größeren Pfahllängen als das Nachweisverfahren DA1.2. Mit dem Nachweisverfahren DA1 ergeben sich – mit Ausnahme überwiegend auf Mantelreibung bemessener Pfähle - im Allgemeinen größere äquivalente Sicherheiten als mit dem Nachweisverfahren DA2. Maximal ergeben sich mit dem Nachweisverfahren DA1 um rd. 20 % höhere äquivalente Sicherheiten als mit dem Nachweisverfahren DA2.
4. Die in Anhang A des EC7-1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte ergeben eine geringere äquivalente Sicherheit als die früher in Deutschland angesetzte globale Sicherheit von 2,0.

5. Aus dem Kreis der untersuchten Länder haben IE, CZ, PL und AT die von EC7-1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte übernommen. Allerdings verwenden einige dieser Länder zusätzlich Modellfaktoren $> 1,0$.
6. Der Modellfaktor ist als Sicherheit aufzufassen. Die Größenordnung des Modellfaktors bestimmt u. a. die äquivalente Sicherheit. Einige Länder haben die Modellfaktoren indirekt durch Variation der Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Widerstände berücksichtigt. Mit 1,6 weist der Nationale Anhang Schwedens den größten Modellfaktor auf. Mit dem Modellfaktor wird das Sicherheitsniveau deutlich angehoben. Unter Berücksichtigung der Modellfaktoren ergeben sich wesentlich größere Streuungen der äquivalenten Sicherheit als ohne Ansatz der Modellfaktoren. Ohne Ansatz des Modellfaktors liegt die äquivalente Sicherheit überwiegend unter 2,0, mit Ansatz der Modellfaktoren erreicht die äquivalente Sicherheit Werte zwischen 1,5 und 3,1. Diese Streuung ist nicht auf das Nachweisverfahren, sondern auf die in den jeweiligen Ländern anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte zurückzuführen.
7. Alle untersuchten Länder beaufschlagen veränderliche Einwirkungen mit höheren Sicherheiten als ständige Einwirkungen. Der Spitzendruck wird entweder mit den gleichen oder mit höheren Teilsicherheitsbeiwerten herabgesetzt als die Mantelreibung.
8. Das Nachweisverfahren DA3 findet praktisch nur in NL zur Bemessung axial beanspruchter Pfähle Verwendung. Mit den Teilsicherheitsbeiwerten aus NL resultieren daraus meistens die größten äquivalenten Sicherheiten. Weil der Nationale Anhang aus NL jedoch nicht die Teilsicherheitsbeiwerte für die eigentlichen Bodenkennwerte definiert, sondern die Widerstände aus Drucksondierungen korreliert, handelt es sich nicht um das Nachweisverfahren DA3 im eigentlichen Sinne.
9. Entscheidende Parameter sind grundsätzlich zunächst die Größen der Teilsicherheitsbeiwerte und der Modellfaktoren. Weil Verkehrslasten in der Regel mit größeren Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt werden als ständige Lasten und teilweise der charakteristische Spitzendruck mit einem höheren Teilsicherheitsbeiwert herabgesetzt wird als die charakteristische Mantelreibung, ist somit indirekt auch die Aufteilung der Einwirkungen bzw. Beanspruchungen in ständige und veränderliche Anteile sowie die Zusammensetzung der Widerstände ein wichtiger Parameter für das vorliegende Sicherheitsniveau.

Im Hinblick auf eine Harmonisierung der Nachweisverfahren bei der Bemessung von axial beanspruchten Pfählen auf Grundlage von Erfahrungswerten für die Widerstände besteht bei den meisten Ländern keine direkte Kopplung der Erfahrungswerte zu charakteristischen Bodenkenngrößen. Die Harmonisierung auf Nachweisverfahren DA3 (Beaufschlagung der Bodenkenngrößen mit Teilsicherheitsbeiwerten) ist daher nicht sinnvoll. Die Nachweisverfahren DA1.1, DA1.2 und DA2 ergeben aufgrund der Linearität der Pfahlbemessung bei Ansatz der gleichen Werte für die Teilsicherheitsbeiwerte und die Modellfaktoren das gleiche Sicherheitsniveau.

Wie schon erläutert wurde, werden bei der Bemessung von axial beanspruchten Pfählen mit den Nachweisverfahren DA1 und DA2 die Widerstände faktorisiert. Jedoch ist der Kern des Nachweisverfahrens DA1 die Untersuchung von zwei Kombinationen von Teilsicherheitsbeiwerten, wobei eine Kombination hauptsächlich ungünstige Abweichungen der Einwirkungen von ihren charakteristischen Werten abdecken soll und eine Kombination

hauptsächlich ungünstige Abweichungen der Widerstände von ihren charakteristischen Werten. Die ungünstigste Kombination ist maßgebend. Die gleichzeitige Abweichung der Einwirkungen und der Scherparameter von ihren charakteristischen Werten wird dabei nur sehr eingeschränkt erfasst. Somit schließen die Kombinationen des Nachweisverfahrens DA 1 eine in der Praxis und auch aus statistischen Gesichtspunkten durchaus mögliche Kombination aus. Wie die Vergleichsrechnungen (s. a. Punkt 3) gezeigt haben, führen die Kombinationen DA1.1 und DA1.2 bei den gängigen Anteilen der veränderlichen Einwirkungen zu den ständigen Einwirkungen nicht zu nennenswerten Unterschieden in den Abmessungen.

Der Vorteil des Nachweisverfahrens DA2 liegt demgegenüber neben der gleichzeitigen Berücksichtigung von Abweichungen der charakteristischen Einwirkungen und der Widerstände von ihren charakteristischen Werten im Wesentlichen darin, dass nur ein Berechnungslauf anstelle von zwei Berechnungsläufen vorzunehmen ist. Die Berechnungen werden dadurch transparenter und sind weniger umfangreich. Daher ist für die Bemessung von axial beanspruchten Pfählen auf Grundlage von Erfahrungswerten das Nachweisverfahren DA2 zu empfehlen. DA2* ist in diesem Fall identisch mit DA2, da die Widerstände völlig unabhängig von den Einwirkungen berechnet werden.

4 Pfahlgründungen – quer beanspruchte Pfähle

4.1 Anamnese

Für die Bemessung von quer beanspruchten Pfählen dürfen die drei in EC 7-1 definierten Nachweisverfahren verwendet werden. Wie bereits in anderen Kapiteln erläutert, unterscheiden sich die Nachweisverfahren dadurch, ob die Einwirkungen, die geotechnischen Kenngrößen oder die Baugrundwiderstände faktorisiert werden und wann diese Faktorisierung stattfindet. Eine ausführliche Erläuterung der Nachweisverfahren ist beispielsweise in Kapitel 1.1 zu finden.

Im Rahmen der Vergleichsrechnungen wurden die Nachweisverfahren der europäischen Länder Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Österreich, Schweiz, Dänemark, Polen und Schweden berücksichtigt. Tabelle 4.1 zeigt die in jedem Land zulässigen Nachweisverfahren für die Bemessung von quer beanspruchten Pfählen. In Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.6 sind die verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Zulässige Nachweisverfahren in ausgewählten europäischen Ländern für die Bemessung von quer beanspruchten Pfählen

Land	Zulässige Nachweisverfahren	Kombination der Teilsicherheitsbeiwerte nach EC7-1
Deutschland DE	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2
Frankreich FR	DA2	A1 „+“ M1 „+“ R2
Großbritannien UK	DA1 DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
Italien IT	DA1 DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
Schweiz CH	GZ Typ 2	entspricht A1 „+“ M1 „+“ R2
Österreich AT	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2
Dänemark DK	DA3	A1 oder A2 „+“ M2 „+“ R1, sowie Gl. 6.10a oder 6.10b nach EN 1990
Polen PL	DA2*	A1 „+“ M1 „+“ R2
Schweden SE	DA3	A1 oder A2 „+“ M2 „+“ R1, sowie Gl. 6.10a oder 6.10b nach EN 1990

Tabelle 4.2: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, Teil 1

Einwirkung / Beanspruchung		EC7-1		DE	FR	UK		IT		CH
		A1	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A2	A1
ständig	ungünstig	1,35	1,00	1,35	1,35	1,35	1,00	1,35	1,00	1,35
	günstig	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
veränderlich	ungünstig	1,50	1,30	1,50	1,50	1,50	1,30	1,50	1,30	1,50
	günstig	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 4.3: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, Teil 2

Einwirkung / Beanspruchung		AT	DK		PL	SE	
		A1	A1/A2 Gl. 6.10a	A1/A2 Gl. 6.10b	A1	Gl. 6.10a	Gl. 6.10b
ständig	ungünstig	1,35	1,20	1,00	1,35	1,35	0,89*1,35
	günstig	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00
veränderlich	ungünstig	1,50	0,00	1,50	1,50	1,5* $\psi_{0,1}$	1,50
	günstig	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 4.4: Verwendete Teilsicherheitseinwirkungen für die Bodenkenngröße, Teil 1

Bodenkenngröße	EC7-1		DE	FR	UK		IT		CH	AT
	M1	M2	M1	M1	M1	M2	M1	M2	M1	M1
Reibungswinkel	1,00	1,25	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,00
Kohäsion im drainierten Zustand	1,00	1,25	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,00
Kohäsion im undrainierten Zustand	1,00	1,40	1,00	1,00	1,00	1,40	1,00	1,40	1,00	1,00
Einaxiale Druckfestigkeit	1,00	1,40	1,00	1,00	1,00	1,40	1,00	1,40	1,00	1,00
Wichte	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 4.5: Verwendete Teilsicherheitseinwirkungen für die Bodenkenngröße, Teil 2

Bodenkenngröße	DK	PL	SE
	M2	M1	M2
Reibungswinkel	1,20*K _{FI}	1,00	1,30
Kohäsion im drainierten Zustand	1,20*K _{FI}	1,00	1,30
Kohäsion im undrainierten Zustand	1,80*K _{FI}	1,00	1,50
Einaxiale Druckfestigkeit	1,80*K _{FI}	1,00	1,50
Wichte	1,00*K _{FI}	1,00	1,00

Tabelle 4.6: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Baugrundwiderstände

Widerstand	EC7-1			DE	FR	UK	IT	CH	AT	DK	PL	SE
	R1	R2	R3	R2	R2	R1	R1	R2	R2	R3	R2	R3
Erdwiderstand	1,00	1,40	1,00	1,40	1,40	1,00	1,00	1,40	1,40	1,00	1,40	1,00

In Deutschland, Frankreich, Österreich, Schweiz und Polen wird nach DA2 vorgegangen. Die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen EC7-1, so dass zusammengefasst werden kann.

In Großbritannien und Italien wird nach DA1 vorgegangen. Die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen EC7-1, so dass zusammengefasst werden kann.

In Dänemark wird nach dem DA3 vorgegangen und die Teilsicherheitsbeiwerte auf ständige ODER auf ständige und veränderliche Einwirkungen angesetzt, d. h. es werden zwei Bemessungssituationen (nach Gleichung 6.10a und Gleichung 6.10b aus EN 1990) berechnet, die ungünstigere ist maßgebend. Für Dänemark wurde die Schadensfolgeklasse CC2 mit $K_{FI} = 1,0$ angesetzt. Somit sind die Teilsicherheitsbeiwerte A1 und A2 bei den ständigen Lasten gleich.

In Schweden wird ebenfalls nach dem DA3 vorgegangen, aber die Teilsicherheitsbeiwerte auf ständige UND auf veränderliche Einwirkungen angesetzt. Schweden berücksichtigt für Gleichung 6.10a (EC0) bei den veränderlichen Lasten einen Kombinationsbeiwert $\psi_{0,1}$. In dieser Vergleichsberechnung wurde vereinfachend $\psi_{0,1}=1,0$ angesetzt, somit ist im Beispiel immer Gleichung 6.10a (EC0) maßgebend.

4.2 Diagnose

4.2.1 System

Als Beispiel wurde ein Bohrpfehl mit einem Durchmesser von 0,70 m gewählt. Eine praxisnahe Pfohlbeanspruchung ergibt sich mit den Hinweisen aus dem neuen Merkblatt für Lärmschutzwände (FGSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2014). Abbildung 4.2 zeigt die Belastung aus Wind auf die Lärmschutzwand; Abbildung 4.4 die resultierende Belastung auf den Pfahl für eine Sockelhöhe $h_s = 1,70$ m.

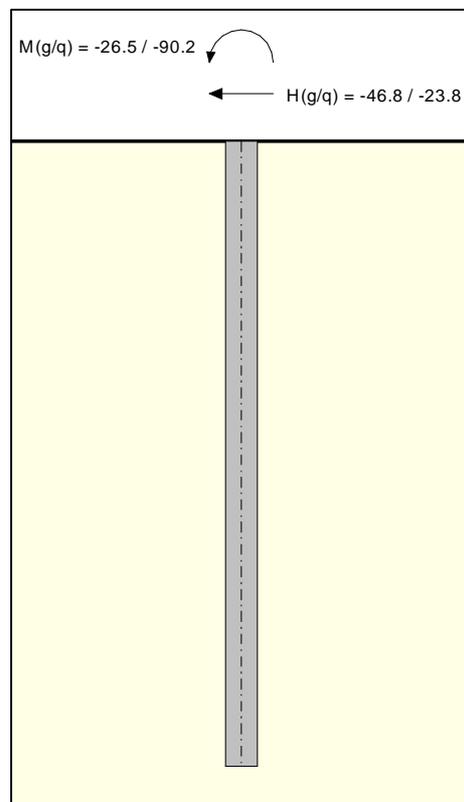


Abbildung 4.1: System

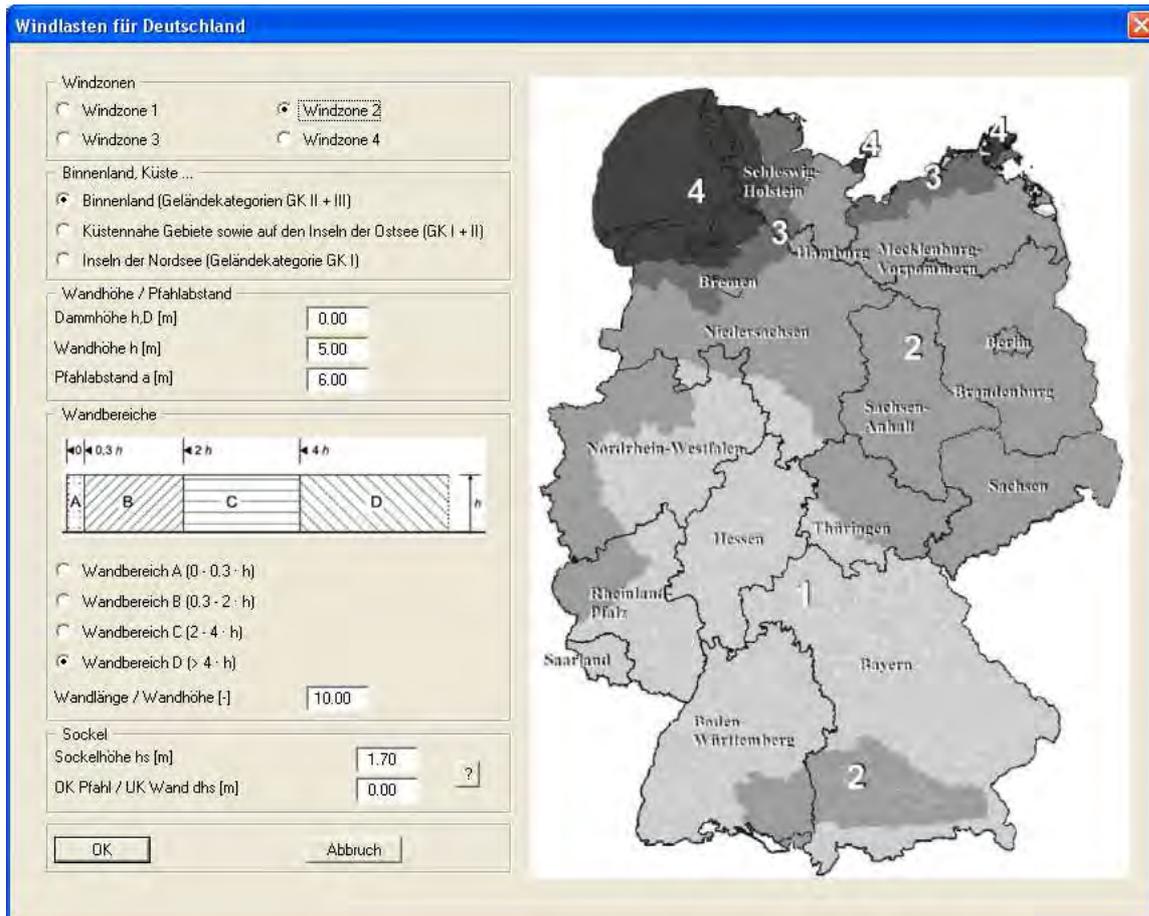


Abbildung 4.2: Belastung aus Wind, Windzone 2 / Binnenland / Wandhöhe = Pfahlabstand = 5,0 m

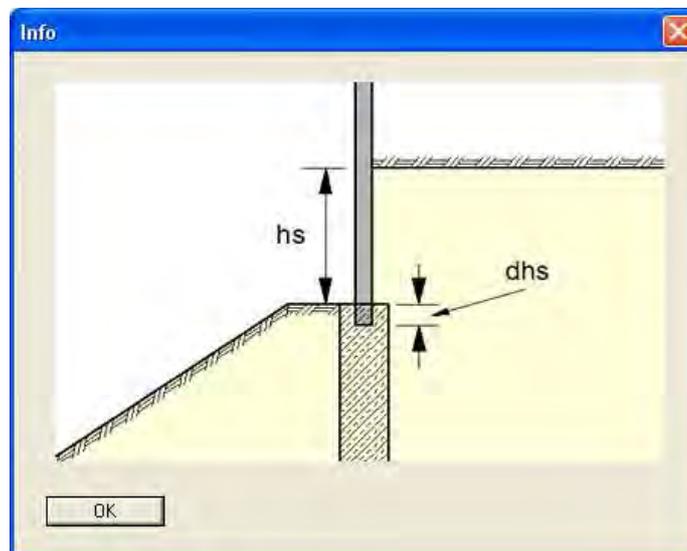


Abbildung 4.3: Sockelhöhe h_s

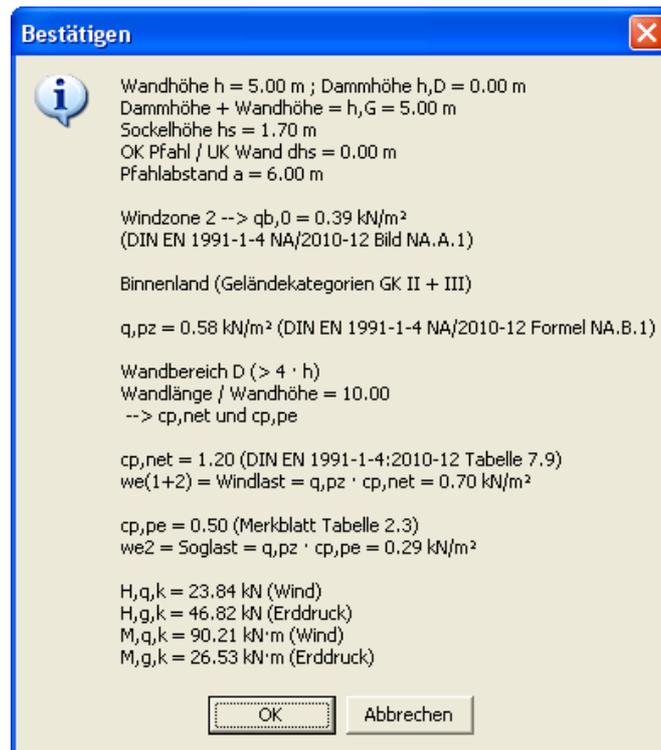


Abbildung 4.4: Belastung

Die Berechnung erfolgt als elastisch gebetteter Pfahl mit einem zunächst konstanten Bettungsmodul $k_s = 25 \text{ MN/m}^3$.

Folgende Bodenkennwerte werden angesetzt:

- Wichte $\gamma_k = 19,0 \text{ kN/m}^3$ (kein Grundwasser)
- Wandreibungswinkel $\delta_p = -0,667$
- Reibungswinkel φ_k wird zwischen 15 und 45° variiert.
- Kohäsion c_k wird zwischen 0 und 10 kN/m^2 variiert.

Der aktive Erddruck übt nur einen äußerst geringen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse aus und wird daher vernachlässigt.

Für die Berechnungen gelten folgende Grundlagen. An jeder Ordinate der Wand muss die Bedingung eingehalten werden.

$$\sigma_{h,k} = k_{s,k} \cdot w_k \leq e_{ph,k} \quad \text{Gl. 4.1}$$

mit

$\sigma_{h,k}$ = charakteristische Bettungsspannungen [kN/m^2]

$k_{s,k}$ = charakteristischer Wert des Bettungsmoduls [kN/m^3]

w_k = charakteristische Pfahlverschiebung [m]

$e_{ph,k}$ = charakteristischer Wert des horizontalen Erdwiderstands [kN/m^2]

Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, wird der Bettungsmodul iterativ abgemindert. Vor allen Dingen ist eine Abminderung am Pfahlkopf erforderlich (s. Abbildung 4.5).

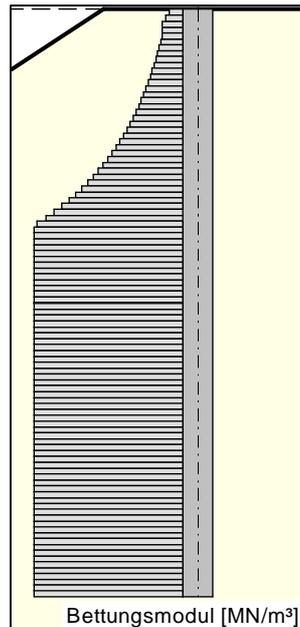


Abbildung 4.5: Abgeminderter Bettungsmodulverlauf

Für das Gesamtsystem muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$B_{h,d} \leq E_{ph,d} \quad \text{Gl. 4.2}$$

mit

$B_{h,d}$ = Bemessungswert der Bettungsreaktionen [kN]

$E_{ph,d}$ = Bemessungswert des Erdwiderstands [kN]

Der Nachweis erfolgt nicht über die gesamte Pfahlänge, sondern nur vom Pfahlkopf bis zum Drehpunkt des Pfahls. Auf Grund dieser Definition sind die Nachweisverfahren DA2 und DA2* identisch.

Als Bemessungssituation wurde BS-P angesetzt, da in anderen Ländern mit Ausnahme von AT keine unterschiedlichen Bemessungssituationen verwendet werden und mit BS-P die Teilsicherheitsbeiwerte denen des EC7-1 und der meisten Nationalen Anhänge entsprechen. Das Gelände ist waagrecht.

4.2.2 Durchgeführte Berechnungen und Nachweise

Es wurden die erforderlichen Pfahlängen für die verschiedenen Nachweisverfahren verglichen: zunächst für die drei Nachweisverfahren DA1, DA2 und DA3 mit den Teilsicherheitsbeiwerte nach EC7-1.

In DE, FR, AT, CH und PL wird nach DA2 (DA2 entspricht DA2*) vorgegangen. Die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen EC7-1, so dass zusammengefasst werden kann. In UK und IT wird nach DA1 vorgegangen. Die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen EC7-1, so dass zusammengefasst werden kann. Gesonderte Berechnungen sind nur für DK und SE erforderlich.

4.2.3 Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte

Die für die Berechnungen erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte sind in Tabelle 4.2 bis Tabelle 4.6 für die untersuchten europäischen Länder zusammengefasst.

4.2.4 Bestimmung der Widerstände

Der passive Erddruck wurde ebenfalls nach EC7-1, Anhang C. 2, angesetzt.

4.2.5 Festlegung der Vergleichsgröße

Als Vergleichsgröße dient die erforderliche Pfahllänge.

4.2.6 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I

Abbildung 4.6 zeigt die erforderlichen Pfahllängen nach den Berechnungen ohne Kohäsion. Die Unterschiede sind gering und liegen in der Größenordnung von etwa 10%. Weiterhin wurde das maximale charakteristische Moment $\max M_k$ verglichen (s. Abbildung 4.7). Die maximalen Momente sind bei allen Nachweisverfahren gleich.

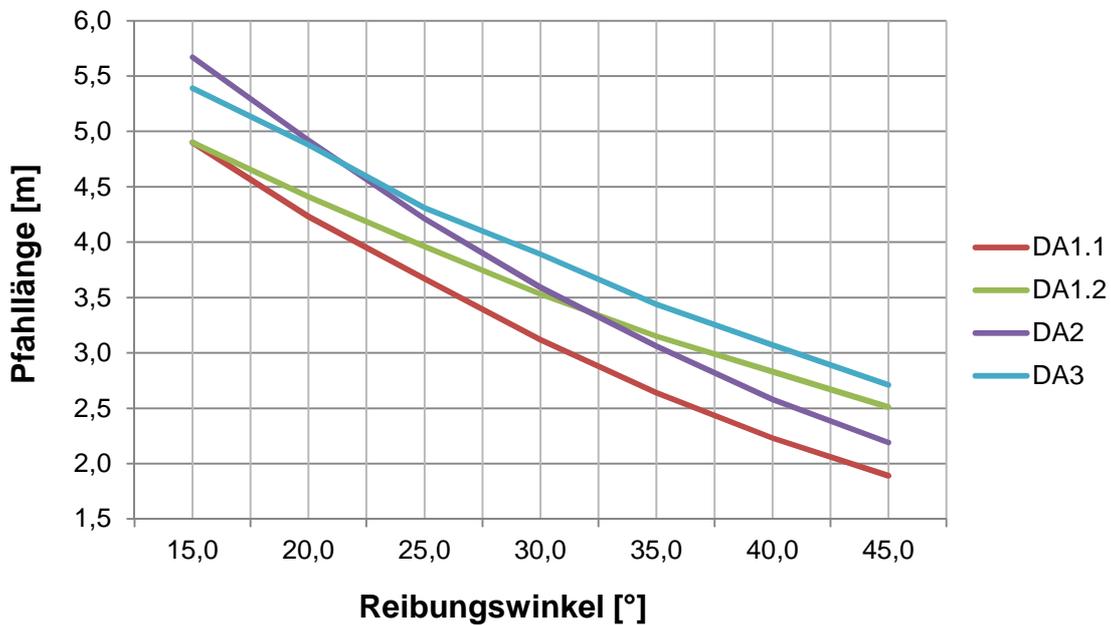


Abbildung 4.6: Erforderliche Pfahllängen ohne Kohäsion

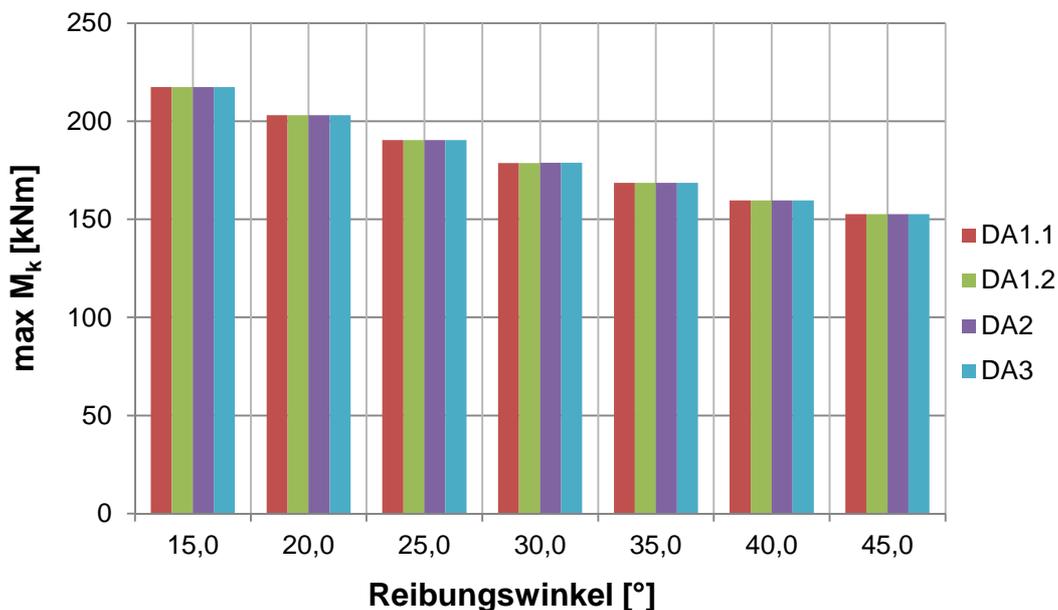


Abbildung 4.7: Maximales Moment M_k ohne Kohäsion

Analog zu den bisherigen Berechnungen wurde zusätzlich der Einfluss einer Kohäsion von 10 kN/m² untersucht. Die angreifenden Momente und Horizontalkräfte wurden in etwa verdoppelt, um sinnvollere Pfahllängen zu erhalten (s. Abbildung 4.8).

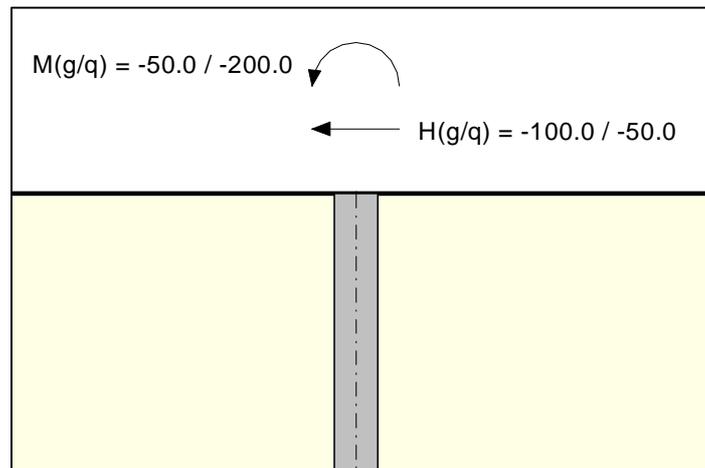


Abbildung 4.8: Einwirkungen beim System mit Kohäsion

Abbildung 4.9 zeigt die erforderlichen Pfahllängen mit Kohäsion. Die Unterschiede sind gering und liegen in der Größenordnung von etwa 10%. Weiterhin wurde das maximale charakteristische Moment $\max M_k$ verglichen. Die maximalen Momente sind bei allen Nachweisverfahren gleich.

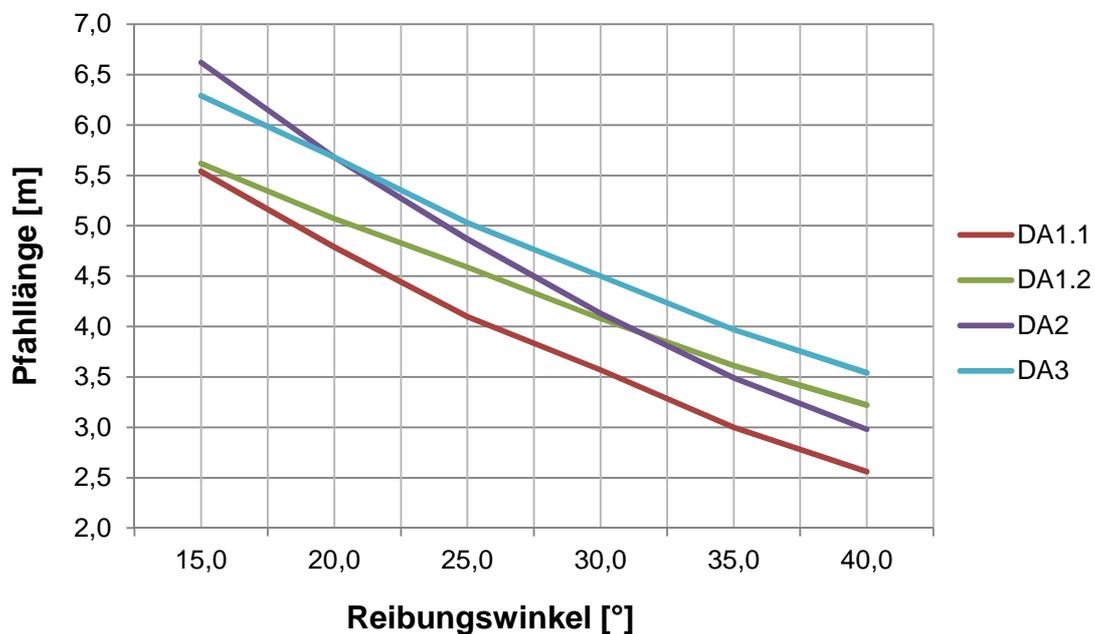


Abbildung 4.9: Erforderliche Pfahllängen mit Kohäsion

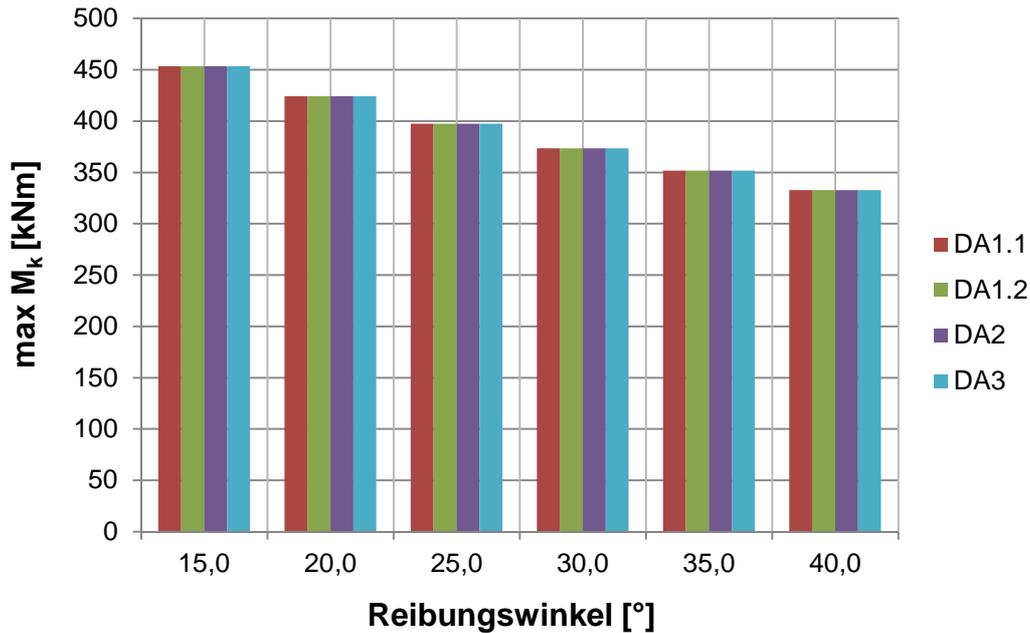


Abbildung 4.10: Maximales Moment M_k mit Kohäsion

4.2.7 Einfluss des Bettungsmoduls

Der Einfluss des Bettungsmoduls auf die Pfahlänge und auf den Momenten- und Querkraftverlauf wird nachfolgend an einem System mit einem Reibungswinkel von 35° und dem Nachweisverfahren DA2 untersucht. Dabei wird der Bettungsmodul um den Faktor 100 reduziert (Bettungsmodul = $0,25 \text{ MN/m}^2$) (s. Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12).

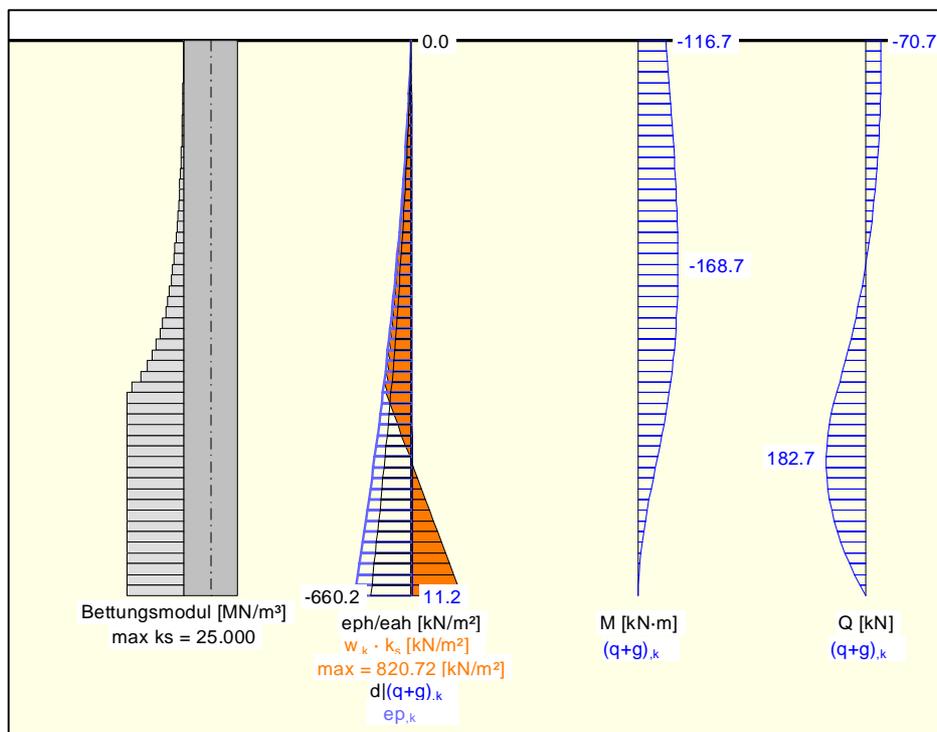


Abbildung 4.11: $k_s = 25 \text{ MN/m}^3$ (DA2)

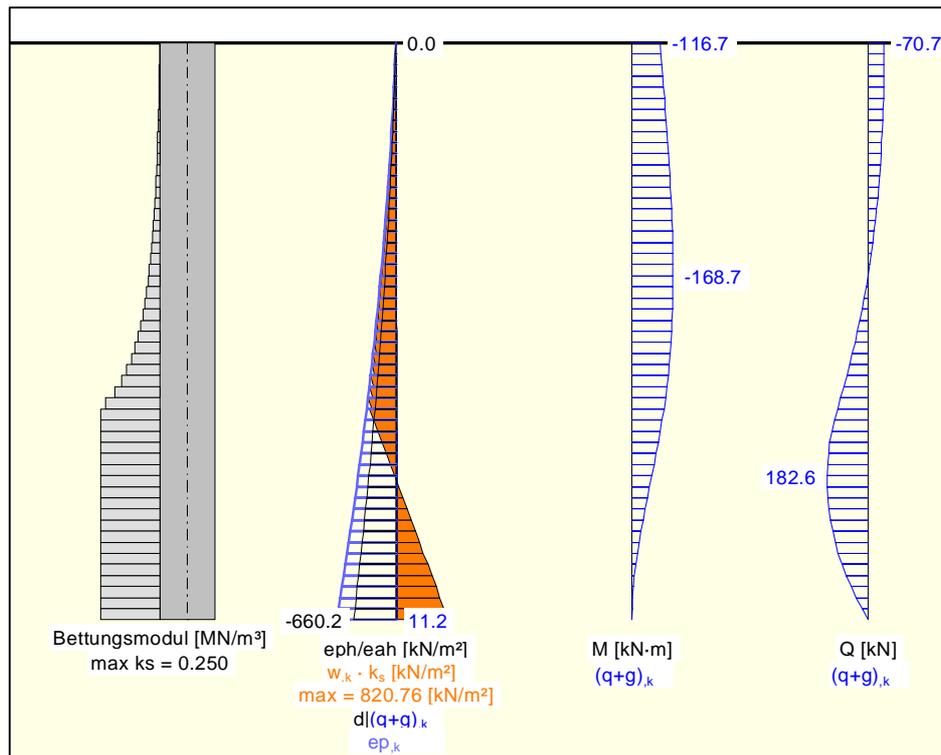


Abbildung 4.12: $k_s = 0,25 \text{ MN/m}^3$ (DA2)

Ein nennenswerter Unterschied ist zwischen den Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 nicht zu erkennen. Die Größe des Bettungsmoduls hat daher keinen Einfluss auf die Pfahllänge und auf den Momenten- und Querkraftverlauf. Die charakteristischen Verschiebungen ändern sich allerdings linear mit der Größe des Bettungsmoduls. Diese Aussagen gelten neben dem dargestellten Nachweisverfahren DA2 auch für die anderen Nachweisverfahren und auch für andere Reibungswinkel.

4.2.8 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II

In AT, CH, DE, FR und PL wird nach DA2 (bzw. DA2*) vorgegangen. Die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen EC7-1. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.9 enthalten. In UK und IT wird nach DA1 vorgegangen. Die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechen EC7-1. Die Berechnungsergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.9 enthalten.

Nur für DK und SE sind neue Vergleichsberechnungen erforderlich. Die Ergebnisse aller untersuchten Länder sind in Abbildung 4.13 (ohne Kohäsion) und in Abbildung 4.14 (mit Kohäsion) dargestellt.

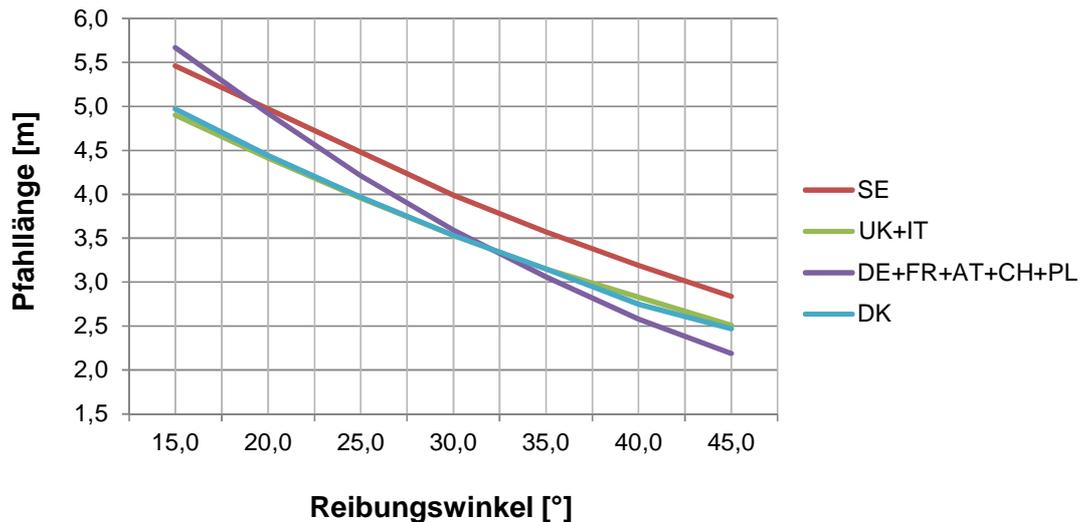


Abbildung 4.13: Erforderliche Pfahllängen ohne Kohäsion alle Länder

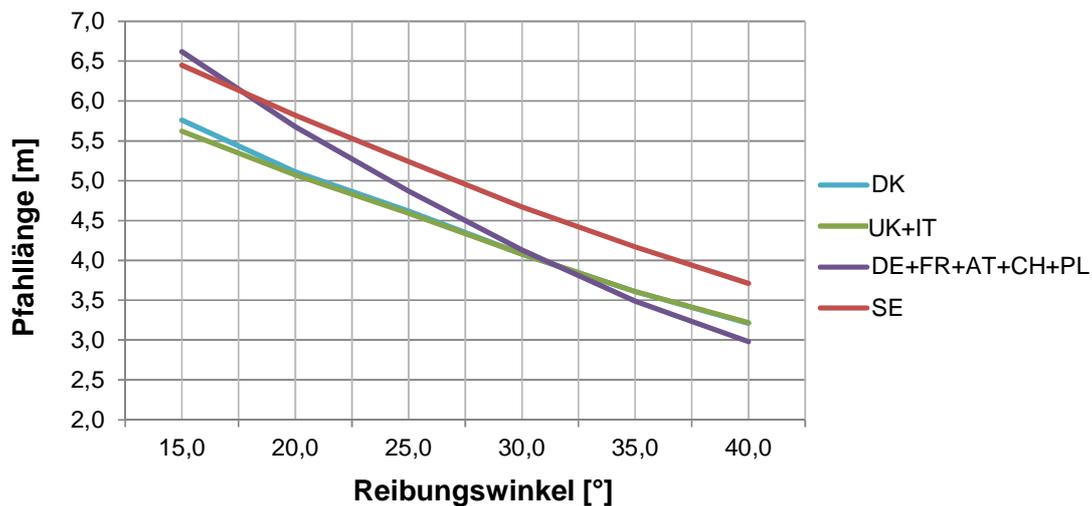


Abbildung 4.14: Erforderliche Pfahllängen mit Kohäsion alle Länder

Die Unterschiede bleiben gering. SE liegt hinsichtlich der Pfahllängen bei allen untersuchten Reibungswinkeln über den Pfahllängen in den restlichen untersuchten Ländern. Wohingegen DK im unteren Bereich liegt.

4.2.9 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III

Regelungen für die Bemessung von horizontal beanspruchten Pfählen mit dem Bettungsmodulverfahren existieren nur in AT (RVS, Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen). Die hier aufgeführten Ansätze entsprechen den Angaben in Kap 4.2.1. Weitere Untersuchungen hinsichtlich nationaler Regelungen sind nicht erforderlich.

4.3 Therapie

Aus den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die Unterschiede der einzelnen Nachweisverfahren hinsichtlich der erforderlichen Pfahllängen sind gering und liegen in einer Größenordnung von etwa 10 %.

2. Die charakteristischen Momente sind für alle Nachweisverfahren gleich, da die Bettungsspannungen linear von den Einwirkungen abhängen.
3. Die in einigen Ländern (AT und DK) eingeführten Schadensfolgeklassen täuschen eine Genauigkeit der Berechnungen vor, die auf Grund der restlichen möglichen Ungenauigkeiten (Wahl des Reibungswinkels und der Kohäsion) nicht gerechtfertigt erscheint.
4. Der in Dänemark gewählte Ansatz, die Teilsicherheitsbeiwerte auf ständige ODER auf ständige und veränderliche Einwirkungen anzusetzen, verkompliziert die Berechnungen unnötig und ist nicht praxisgerecht.
5. Der in Schweden eingeführte Kombinationsbeiwert $\psi_{0,1}$ für veränderliche Lasten täuscht eine Genauigkeit der Berechnungen vor, die nicht vorhanden ist.
6. Das in Großbritannien und Italien bevorzugte Nachweisverfahren DA1 hat den großen Nachteil, dass zweimal gerechnet werden muss (DA1.1 und DA1.2).

Eine europaweite Einigung auf das Nachweisverfahren DA2 oder DA3 (mit den Teilsicherheitsbeiwerten von EC7-1) ist für die Bemessung horizontal beanspruchter Pfähle sinnvoll. Ein Nachteil von DA3 ist jedoch der höhere Berechnungsaufwand, da sowohl eine Berechnung mit charakteristischen Bodenkenngrößen für den Nachweis der Begrenzung der Bettungsspannungen (siehe Gl. 4.1) als auch eine Berechnung mit Bemessungswerten der Bodenkenngrößen für die Ermittlung der Pfahllänge (siehe Gl. 4.2) durchzuführen sind. Im Gegensatz dazu ist bei DA2 nur eine Berechnung für beide Nachweise erforderlich. In diesem Sinne ist es zweckmäßiger das Nachweisverfahren DA2 für die Bemessung von quer beanspruchten Pfählen zu empfehlen. DA2* ist in diesem Fall wegen der Linearität des Systems gleich DA2.

Da für die Bemessung von axial beanspruchten Pfählen ebenfalls das Nachweisverfahren DA2 bzw. DA2* empfohlen wird (siehe Kap. 3.3), wird für die Bemessung von Pfahlgründungen einheitlich das Nachweisverfahren DA2 bzw. DA2* vorgeschlagen.

5 Böschungen

5.1 Anamnese

Für die Bemessung der Gesamtstandsicherheit von Geländesituationen nach EC7-1, hier die Standsicherheit von Böschungen¹ einschließlich vorhandener, betroffener oder geplanter Tragwerke, sind drei Nachweisverfahren (DA1, DA2 und DA3) vorgesehen, die sich durch verschiedene Kombinationen von Teilsicherheitsbeiwerten auf die Einwirkungen, auf die Bodenkenngrößen und auf den Erd- und Bauteilwiderstand² unterscheiden. Im Anhang A.3.1 (1)P, A.3.2 (1)P und A.3.3.6 1(P) zum EC7-1 werden Teilsicherheitsbeiwerte vorgeschlagen, ihre Festlegung ist aber wie auch die Wahl des Nachweisverfahrens nationale Entscheidung.

5.1.1 Verfahren zur Ermittlung von Einwirkungen und Widerständen

Für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Geländesprüngen ist nachzuweisen, dass die aus den Einwirkungen resultierenden Bemessungswerte der Beanspruchungen $E_{m,d}$ kleiner oder gleich den Bemessungswerten der vorhandenen Widerstände $R_{m,d}$ sind:

$$E_{m,d} \leq R_{m,d} \quad \text{Gl. 5.1}$$

Die Einwirkungen E sind:

- ständige Einwirkungen aus Bodeneigengewicht
- veränderliche oder ständige Einwirkungen aus Auflasten, z. B. auf der Böschungsschulter
- Wasserdrücke und Strömungskräfte.

Bei unkonsolidierten Verhältnissen wird der Nachweis mit Scherparametern des undrainierten Bodens ($\varphi_{u,k}$ und $c_{u,k}$), bei konsolidierten Verhältnissen mit den charakteristischen Scherparametern des drainierten Bodens (φ'_k und c'_k) ermittelt.

Befindet sich der nachzuweisende Geländesprung ganz oder teilweise im Wasser, so reduziert sich die ständige Einwirkung aus Bodeneigengewicht um die Auftriebskräfte. Oberhalb des Wasserspiegels wird immer mit der Feuchtwichte gerechnet. Durch den Auftrieb werden auch die Normalkräfte und somit auch die Reibungskräfte in der Scherfuge verringert.

Bei unterschiedlichen Wasserständen links- und rechtsseitig des Geländesprunges findet eine Durchströmung des Erdkörpers statt. Der sich dadurch einstellende gleitfugenparallele Anteil des Strömungsdruckes stellt immer eine zusätzliche Einwirkung dar. Der gleitfugennormale Anteil des Strömungsdruckes erhöht und vermindert die Reibungskräfte und somit den Widerstand in der Gleitfuge je nach Lage des betrachteten Punktes innerhalb der Gleitfuge. Generell gilt, dass der ungünstigste Wasserstand durch Variation der möglichen Wasserstände zu bestimmen ist. Unterhalb des Wasserspiegels in der Böschung ist je nach Berechnungsmethode zur Strömungseinwirkung (mit oder ohne Membranwirkung) das Bodeneigengewicht mit der gesättigten Wichte oder mit der Wichte unter Auftrieb zu rechnen (vgl. [U 30]).

Für den Fall, dass die Scherwiderstände des Bodens nicht ausreichen, um die Standsicherheit eines Geländesprunges zu gewährleisten, können zusätzliche Widerstände durch die

¹ siehe EC7-1, 11.4 (4)

² z. B. Hangverdübelungen, Felsverankerungen, Bodenvernagelungen, Elementwand, Geotextilbewehrungen

Anordnung von Bauteilen wie Pfählen, Dübeln, Zuggliedern (z. B. nicht vorgespannte oder vorgespannte Anker, Zugpfähle, Mikropfähle, verpresste Verdrängungspfähle, Bodennägel, Stahlbänder oder Geokunststoffe) erzeugt werden. Diese Bauteilelemente erzeugen zusätzliche Kräfte als Widerstände. In den nachfolgenden Vergleichsberechnungen zur Gesamtstandsicherheit wurde kein Wasserdruck verwendet, um die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen den Ländern und dem EC7-1 selbst besser erkennen zu können. Zunächst wurde eine einfache Böschungsgeometrie (Einschnitt) mit einer Variation der Böschungsneigung und drei unterschiedlichen homogenen Baugrundverhältnissen untersucht. Darauf aufbauend wurde zusätzlich eine komplexe Böschungsgeometrie mit Bauteilelementen zur Rückverankerung der Böschung in geschichteten, geneigten inhomogenen Baugrund untersucht.

5.1.2 Nachweisverfahren und Teilsicherheitsbeiwerte

Für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Geländesprüngen kennt der EC7-1 drei Nachweisverfahren, deren Anwendung für jeden geotechnischen Bemessungsfall länderspezifisch festgelegt werden darf. Generell unterscheiden sich die drei Nachweisverfahren durch die Art der Faktorisierung, d. h. an welcher Stelle die Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt werden. Eine ausführliche Erläuterung ist beispielsweise in Kapitel 0.1.

Im Rahmen der Stufe II wurden die europäischen Länder Dänemark (DK), Deutschland (DE), Frankreich (FR), Großbritannien (UK), Italien (IT), Österreich (AT), Polen (PL), Schweiz (CH) und Schweden (SE) berücksichtigt. Tabelle 5.1 zeigt die in jedem Land zulässigen Nachweisverfahren mit der gewählten Kombination von Gruppen von Teilsicherheitsbeiwerten für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Geländesprüngen.

Tabelle 5.1: Nachweisverfahren in ausgewählten europäischen Ländern für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Geländesprüngen im Vergleich mit den empfohlenen Vorgaben des EC7-1

Land	Zulässige Nachweisverfahren	Kombination der Teilsicherheitsbeiwerte nach EC7-1
EC7-1	DA1 DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
	DA2	A1 „+“ M1 „+“ R2
	DA3	A2 „+“ M2 „+“ R3
Länderspezifische Anpassungen für eine Auswahl von Ländern		
Dänemark DK	DA3	A2 „+“ M2 „+“ R3
Deutschland DE	DA3	A2 „+“ M2 „+“ R3
Frankreich FR	DA2 DA3	A1 „+“ M1 „+“ R2 A2 „+“ M2 „+“ R3
Großbritannien UK	DA1 DA1.1 DA1.2	A1 „+“ M1 „+“ R1 A2 „+“ M2 „+“ R1
Italien IT	DA1 DA1.2	A2 „+“ M2 „+“ R1
Österreich AT	DA3	A2 „+“ M2 „+“ R3
Polen PL	DA3	A2 „+“ M2 „+“ R3
Schweiz (SIA 267) CH	GZ Typ 3	entspricht A2 „+“ M2 „+“ R3
Schweden SE	DA3	A2 „+“ M2 „+“ R3

In Tabelle 5.2 bis Tabelle 5.4 sind die in den untersuchten europäischen Ländern verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen (A), für die geotechnische Kenngrößen (M) und für die Widerstände (R) für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Geländesprünge im Vergleich zu den empfohlenen Vorgaben des EC7-1 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen (A)

Einwirkung / Beanspruchung		ständig		veränderlich	
		ungünstig	günstig	ungünstig	günstig
EC7-1	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
DK ¹⁾	A2 (CC2)	1,00	1,00	1,40	0,00
	A2 (CC3)	1,00	1,00	1,30	0,00
DE	A2 (BS-P)	1,00	1,00	1,30	0,00
	A2 (BS-T)	1,00	1,00	1,20	0,00
	A2 (BS-A)	1,00	1,00	1,10	0,00
FR	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
UK	A1	1,35	1,00	1,50	0,00
	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
IT	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
AT	A2 (CC1)	1,00	1,00	1,10	0,00
	BS-P				
	BS-T				
	BS-A	1,00	1,00	1,10	
	A2 (CC2)	1,00	1,00	1,10	0,00
	BS-P				
	BS-T				
	BS-A	1,00	1,00	1,10	
	A2 (CC3)	1,00	1,00	1,10	0,00
BS-P					
BS-T					
BS-A	1,00	1,00	1,10		
PL	A2	1,00	1,00	1,30	0,00
CH SIA 267 und SIA 260	GZ Typ 3 entspricht A2	1,00	1,00	1,30	0,00
SE ²⁾	A2 (SK1)	0,91	0,83	1,16	0,00
	A2 (SK2)	1,00	0,91	1,27	0,00
	A2 (SK3)	1,10	1,00	1,40	0,00

1) Berücksichtigung von Schadensfolgekassen CC, Gl. 6.10a) und 6.10b) nach DIN EN 1990, siehe Anhang A

2) Berücksichtigung von Sicherheitsklassen mit dem Beiwert γ_d .

Tabelle 5.3: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die geotechnischen Kenngrößen (M)

Bodenkenngröße		Reibungswinkel	Kohäsion im drainierten Zustand	Kohäsion im undrainierten Zustand	Einaxiale Druckfestigkeit	Wichte
EC7-1	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
DK	M2 (CC2)	1,20	1,20	1,80	1,80	1,00
	M2 (CC3)	1,32	1,32	1,98	1,98	1,00
DE	M2 (BS-P)	1,25	1,25	1,25	1,25	1,00
	M2 (BS-T)	1,15	1,15	1,15	1,15	1,00
	M2 (BS-A)	1,10	1,10	1,10	1,10	1,00
FR	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
UK	M1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
IT	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
AT	M2 (CC1)					
	BS-P	1,10	1,10	1,20	1,20	1,00
	BS-T	1,05	1,05	1,15	1,15	1,00
	BS-A	1,00	1,00	1,10	1,10	1,00
	M2 (CC2)					
	BS-P	1,15	1,15	1,25	1,25	1,00
	BS-T	1,10	1,10	1,20	1,20	1,00
	BS-A	1,05	1,05	1,15	1,15	1,00
	M2 (CC3)					
	BS-P	1,30	1,30	1,40	1,40	1,00
BS-T	1,20	1,20	1,30	1,30	1,00	
BS-A	1,10	1,10	1,20	1,20	1,00	
PL	M2	1,25	1,25	1,40	1,40	1,00
CH SIA 267	entspricht M2	1,20	1,50	1,50	1,50	1,00
SE	M2 (SK1)	1,30	1,30	1,50	1,50	1,00
	M2 (SK2)	1,30	1,30	1,50	1,50	1,00
	M2 (SK3)	1,30	1,30	1,50	1,50	1,00

Tabelle 5.4: Verwendete Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände (R)

Bodenkenngröße		Gesamtstandsicherheit	Anker	Bauteil*
EC7-1	R1	1,00	1,10	1,25
	R2	1,10	1,10	1,15
	R3	1,00	1,00	1,00
DK	R3 (CC2)	1,00	1,00	1,00
	R3 (CC3)	1,00	1,00	1,00
DE	R3 (BS-P)	1,00	1,10	1,40
	R3 (BS-T)	1,00	1,10	1,30
	R3 (BS-A)	1,00	1,10	1,20
FR	R2	1,10	1,10	1,15
	R3	1,00	1,00	1,10
UK	R1	1,00	1,10	1,00
IT	R1	1,10	1,20	1,60
AT	R3 (CC1)			
	BS-P	1,00	1,05	1,15
	BS-T	1,00	1,05	1,15
	BS-A	1,00	1,05	1,15
	R3 (CC2)			
	BS-P	1,00	1,25	1,15
	BS-T	1,00	1,25	1,15
	BS-A	1,00	1,25	1,15
	R3 (CC3)			
	BS-P	1,00	1,40	1,15
	BS-T	1,00	1,40	1,15
	BS-A	1,00	1,40	1,15
PL	R3	1,00	1,10	1,10
CH SIA 267	entspricht R3	1,20	1,35	1,05
SE	R3 (SK1)	1,00	1,00	1,00
	R3 (SK2)	1,00	1,00	1,00
	R3 (SK3)	1,00	1,00	1,00

* vgl. Erläuterungen zum Bauteil in Abschnitt 5.1

DK ist das einzige Land von den untersuchten Ländern, das für die Bemessung Schadensfolgeklassen und die Gleichungen 6.10a) und 6.10b) von EC0 für die Bildung des Bemessungswerts der Einwirkungen berücksichtigt. Schweden berücksichtigt analog zu Dänemark Sicherheitsklassen und macht ebenfalls Gebrauch von den Gleichungen 6.10a) und 6.10b) von EC0 bei der Bildung des Bemessungswerts der Einwirkungen. Es ist aber anzumerken, dass in Dänemark bei der Anwendung von Gleichung 6.10a) nur eine ständige

Bemessung durchgeführt wird, während in Schweden das nicht erlaubt ist. Genaueres über die Teilsicherheitsbeiwerte in Dänemark sowie über die Gleichungen 6.10a) und 6.10b) von EC0 ist im Anhang A dieses Berichts zu finden.

In der Schweiz dürfen gemäß SIA 267 Teilsicherheitsbeiwerte für die Baugrundwiderstände zwischen 1,0 und 1,2 zur Abdeckung der Modellunsicherheiten ausgewählt werden (SIA 267, Abschnitt 5.3.5). Ein Wert von 1,0 darf angenommen werden, wenn für die Ermittlung des Baugrundwiderstandes ein zuverlässiges, erprobtes Berechnungsverfahren verwendet wird. Bei einer Geländebruchberechnung wird im Grunde der Wert 1,20 empfohlen, da die Berechnungsverfahren weniger präzise sind, d. h. der Scherwiderstand längs der Gleitfläche wird durch 1,20 dividiert.

5.2 Diagnose

Im Rahmen der Diagnose wurden umfangreiche Vergleichsrechnungen durchgeführt, um die länderspezifisch gewählten Nachweisverfahren hinsichtlich des Sicherheitsniveaus und der Wirtschaftlichkeit bei der Bemessung von Geländesprüngen bewerten zu können. Hierfür wurden für die Berechnungen die im Kapitel 0 definierten Stufen wie folgt festgelegt:

Stufe I: Berechnung mit den drei Nachweisverfahren (DA1, DA2 und DA3) nach EC7-1. Für die Ermittlung der Einwirkungen und Widerstände wird jeweils nur ein Verfahren mit den im EC7-1 empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerten verwendet.

Stufe II: Berechnung mit den national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerten und Nachweisverfahren (DAs) für ausgewählte Länder AT, DE, DK, FR, UK, IT, PL, SE und CH, siehe Abbildung 5.1.

Stufe III: Wie Stufe II, aber unter Berücksichtigung zusätzlicher länderspezifischer Besonderheiten in den Nachweisverfahren.



Abbildung 5.1: Ausgewählte Länder für Stufe II

5.2.1 Randbedingungen „Einfache Böschung / homogener Baugrund“

Es wurde ein Geländesprung (hier Geländeeinschnitt) mit 15 m Geländesprunghöhe und einer veränderlichen Flächenlast von 50 kN/m² in drei verschiedenen homogenen Baugrundsituationen untersucht. Es wurde in allen untersuchten Fällen von einer ständigen (permanent)

Bemessungssituation ausgegangen (vergleichbar mit BS-P in Deutschland). Die untersuchte Böschung liegt nicht im Wasser. Somit ist keine Wasserdruckdifferenz oder Strömungskraft zu berücksichtigen. Die Neigung der Geometrie des Geländesprungs wurde für 5 unterschiedlichen Böschungsneigungen (1: n) mit n = 1, 1.5, 2, 3 und 4 variiert (vgl. Abbildung 5.2).

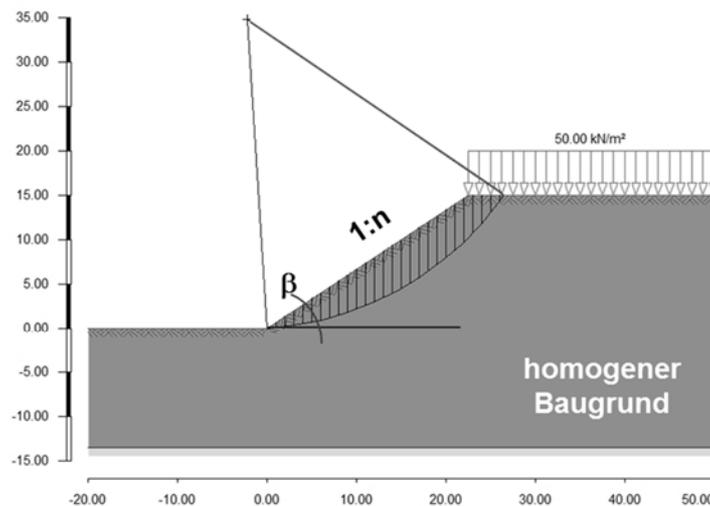
Zusätzlich wurden die Berechnungen in der Form variiert, dass drei verschiedene homogene Baugrundsituationen (Sand, Schluff und Ton) berücksichtigt wurden, vgl. Tabelle 5.5

Tabelle 5.5: Verwendete geotechnische Kenngrößen des Endzustands für die drei verschiedenen Baugrundsituationen

Homogener Baugrund (Bodentyp nach DIN 18196)	φ [°]	c [kN/m ²]	γ [kN/m ³]
Sand-Kies (GE)	37,5°	2*	19,0
Schluff (UL)	27,5°	2	20,5
Ton (TM)	22,5°	10	20,5

* scheinbare Kohäsion im Sand-Kies Boden, um vergleichbare reale Böschungsbrüche zu erzeugen und extrem oberflächennahe Schollenbrüche zu vermeiden

Abbildung 5.2 zeigt die Geometrie und die Einwirkungen für den untersuchten Geländesprung mit homogenen Baugrundverhältnissen.



1:n	1:4	1:3	1:2	1:1,5	1:1
β	14.0°	18.4°	26.6°	33.7°	45.0°

Abbildung 5.2: Prinzipskizze zur Geometrie des Geländesprungs und zur Variation der Neigung

5.2.2 Durchgeführte Berechnungen und Nachweise

Die nachfolgenden Erläuterungen zum Nachweis der Gesamtstandsicherheit beziehen sich nur auf Gleitkreismechanismen im Grenzzustand GEO. Bei der Gleitkreisberechnung wird das auch nach DIN 4084 vorgesehene Lamellenverfahren nach Bishop für kreisförmige Gleitlinien verwendet. Der EC7-1 Abschnitt 11.5.1 (4) empfiehlt diesen Mechanismus konkret für isotrope und homogene Böden als Standardmechanismus.

Üblicherweise wird bei unkonsolidierten Verhältnissen (z. B. in Ton oder Schluff) der Nachweis der Gesamtstandsicherheit mit charakteristischen Scherparametern des undrainierten Bodens ($\varphi_{u,k}$ und $c_{u,k}$) geführt, bei konsolidierten Verhältnissen³ mit den charakteristischen Scherparametern des drainierten Bodens (φ'_k und c'_k) ermittelt. In den folgenden Ausführungen ist diese Wahl bewusst nicht getroffen, sondern es wird die allgemeine Bezeichnung φ und c für die Scherparameter verwendet (vgl. Tabelle 5.5), um die Ergebnisse der Berechnungen besser vergleichbar zu machen.

5.2.3 Auswahl der Teilsicherheitsbeiwerte

Die für die Berechnungen erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte sind in den Tabelle 5.2 bis Tabelle 5.4 für die untersuchten europäischen Ländern im Vergleich zum EC7-1 zusammengefasst.

5.2.4 Bestimmung der Einwirkungen und Beanspruchungen

Der Geländesprung wird durch eine großflächige veränderliche Einwirkung von 50 kN/m² auf der Böschungsschulter beansprucht. Somit ist im Gleitkreismechanismus bzw. in jeder Lamelle zu überprüfen, ob diese günstig oder ungünstig wirkt. Eine veränderliche Einwirkung wirkt dann günstig, wenn die resultierenden haltenden Momente größer sind als die treibenden Momente. Günstig wirkende veränderliche Einwirkungen dürfen nicht angesetzt werden und werden deshalb mit dem Teilsicherheitsbeiwert 0,0 faktorisiert (vgl. Tabelle 5.2).

5.2.5 Bestimmung der Widerstände

Wie bereits Eingangs in Kapitel 5.1 erwähnt, ist für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit von Geländesprüngen nachzuweisen, dass die aus den Einwirkungen resultierenden Bemessungswerte der Beanspruchungen $E_{m,d}$ kleiner oder gleich den Bemessungswerten der vorhandenen Widerstände $R_{m,d}$ sind.

Die in der betrachteten Lamelle auftretenden ständigen und veränderlichen Einwirkungen lassen sich in jeweils eine Kraftkomponente parallel und senkrecht zur Gleitfuge zerlegen. Die gleitfugenparallele Kraftkomponente erzeugt ein bezüglich des Gleitkreismittelpunktes hangabwärts gerichtetes Moment und stellt somit eine Beanspruchung dar. Die normal zur Gleitfuge wirkende Komponente bewirkt hingegen eine der Bewegung entgegengesetzte Reibungskraft und damit bezüglich des Gleitkreismittelpunktes ein haltendes Moment. Dieses wird den Widerständen zugeordnet.

Die Erddruckkräfte wirken bei der Bildung des Momentengleichgewichts als innere Kräfte und werden daher nicht in die Gleitkreisberechnung berücksichtigt. Ihre Neigung (gemäß DIN 4084 $\delta=0^\circ$) beeinflusst jedoch die sich für jede Lamelle ergebende Normalkraft N in der Scherfuge (vgl. [U 30]).

5.2.6 Festlegung der Vergleichsgröße

In den Berechnungen wird der Ausnutzungsgrad $\mu = \frac{E_d}{R_d}$ [-] der Widerstände ermittelt. Ein standsicheres Geländebruchsystem ergibt einen Ausnutzungsgrad kleiner 1,0 (=100%).

In der Stufe II wird zudem die Abweichung des Ausnutzungsgrades $\Delta\mu$ [%]⁴ zum Ausnutzungsgrad der Gesamtstandsicherheit gemäß den Vorgaben aus EC 7-1 dargestellt.

³ Endzustand

⁴ $\Delta\mu = \mu_{(Stufe II)} * 100 / \mu_{(Stufe I)} - 100$

5.2.7 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I

Abbildung 5.3 zeigt die berechneten Ausnutzungsgrade μ der Gesamtstandsicherheit (GEO) des untersuchten Geländesprungs nach Abbildung 5.2 in Abhängigkeit der geotechnischen Kenngrößen (vgl. Tabelle 5.5) und der Böschungsneigung sowie des Nachweisverfahrens DA1 bis DA3.

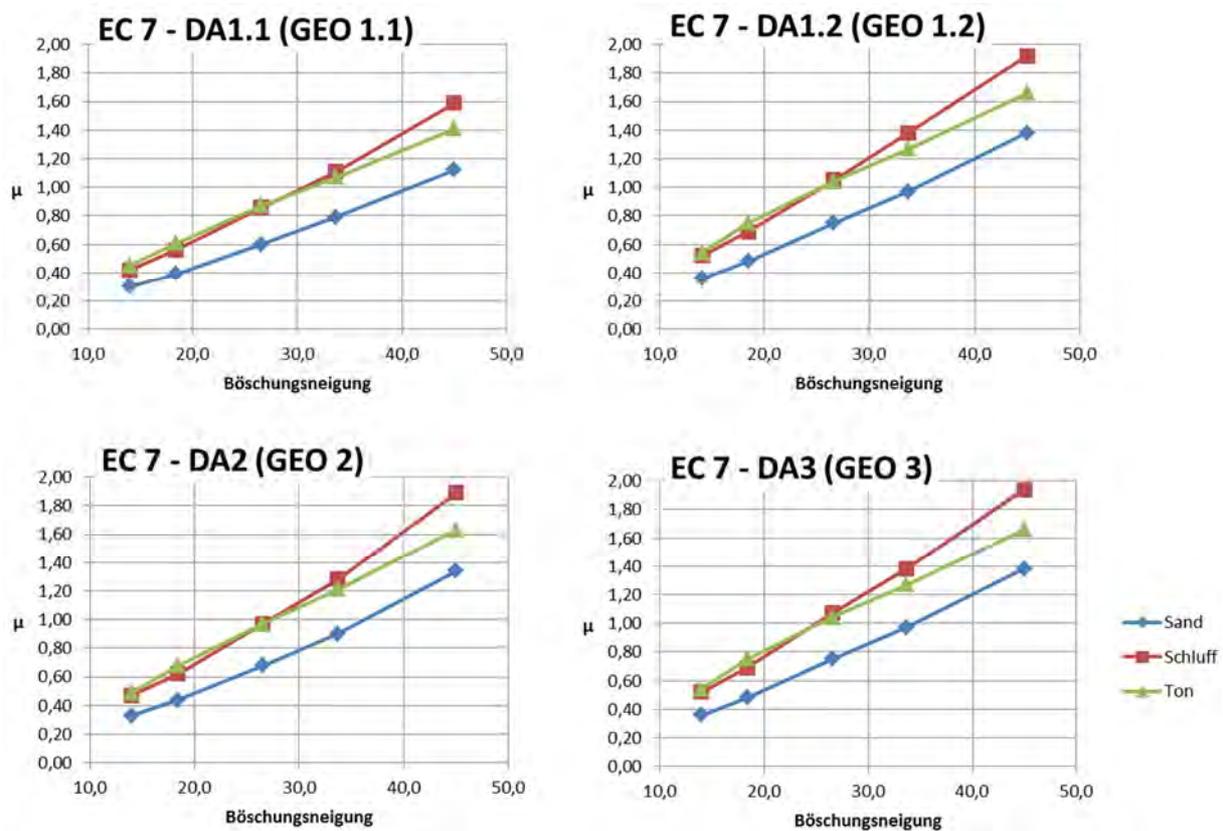


Abbildung 5.3: Ergebnisse der Vergleichsberechnungen in Form des Ausnutzungsgrades μ zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß EC7-1 Nachweisverfahren DA1, DA2 und DA3 des untersuchten Geländesprunges in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der geotechnischen Kenngröße

Abbildung 5.4 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Ausnutzungsgrade μ der Gesamtstandsicherheit (GEO) je Bodentyp (vgl. Tabelle 5.5) des untersuchten Geländesprungs nach Abbildung 5.2 und in Abhängigkeit der Böschungsneigung.

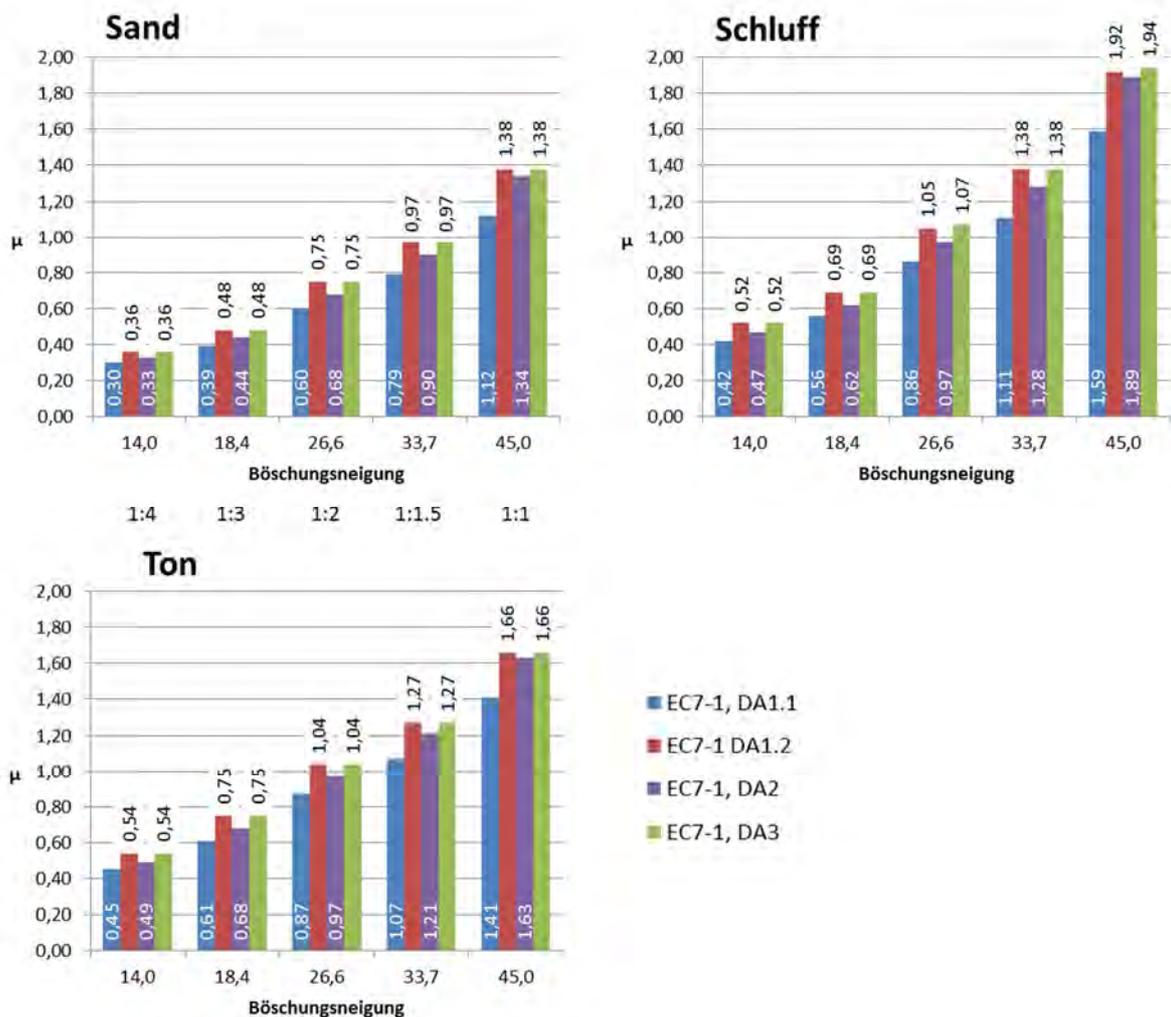


Abbildung 5.4: Gegenüberstellung der berechneten zur Gesamtstandsicherheit (GEO) in Form des Ausnutzungsgrades gemäß DA1, DA2 und DA3 des untersuchten Geländesprunges in Abhängigkeit von der Böschungswinkel je Bodenart

Folgende Schlussfolgerungen können für Stufe I getroffen werden:

- Die geringeren Ausnutzungsgrade sind erwartungsgemäß im Baugrund Sand zu verzeichnen.
- Die Ausnutzungsgrade nehmen in allen drei Baugrundsituationen mit zunehmender Steilheit der Böschung zu. Die Ergebnisse sind demnach als plausibel einzustufen.
- Die Nachweisverfahren DA1.2 und DA3 gemäß EC 7-1 Vorgaben führen zum gleichen Sicherheitsniveau. Vereinzelt marginale Abweichungen in der zweiten Nachkommastelle in der Bodenart Schluff sind auf leichte Abweichungen des bestimmten Gleitkreismittelpunktes zurückzuführen.
- Die geringsten Ausnutzungsgrade ergeben sich durch die Anwendung des Nachweisverfahrens DA1.1.
- Die höchsten Ausnutzungsgrade ergeben sich durch die Anwendung des Nachweisverfahrens DA3 bzw. DA1.2.

5.2.8 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe II

Abbildung 5.5, Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 zeigen die berechneten Ausnutzungsgrade μ der Gesamtstandsicherheit (GEO) des untersuchten Geländesprungs nach Abbildung 5.2 in Abhängigkeit der geotechnischen Kenngrößen (vgl. Tabelle 5.5) und der Böschungsneigung sowie des gewählten Nachweisverfahrens DA1 bis DA3 gemäß den Vorgaben aus dem EC7-1 im Vergleich der jeweiligen gültigen länderspezifischen Anpassungen.

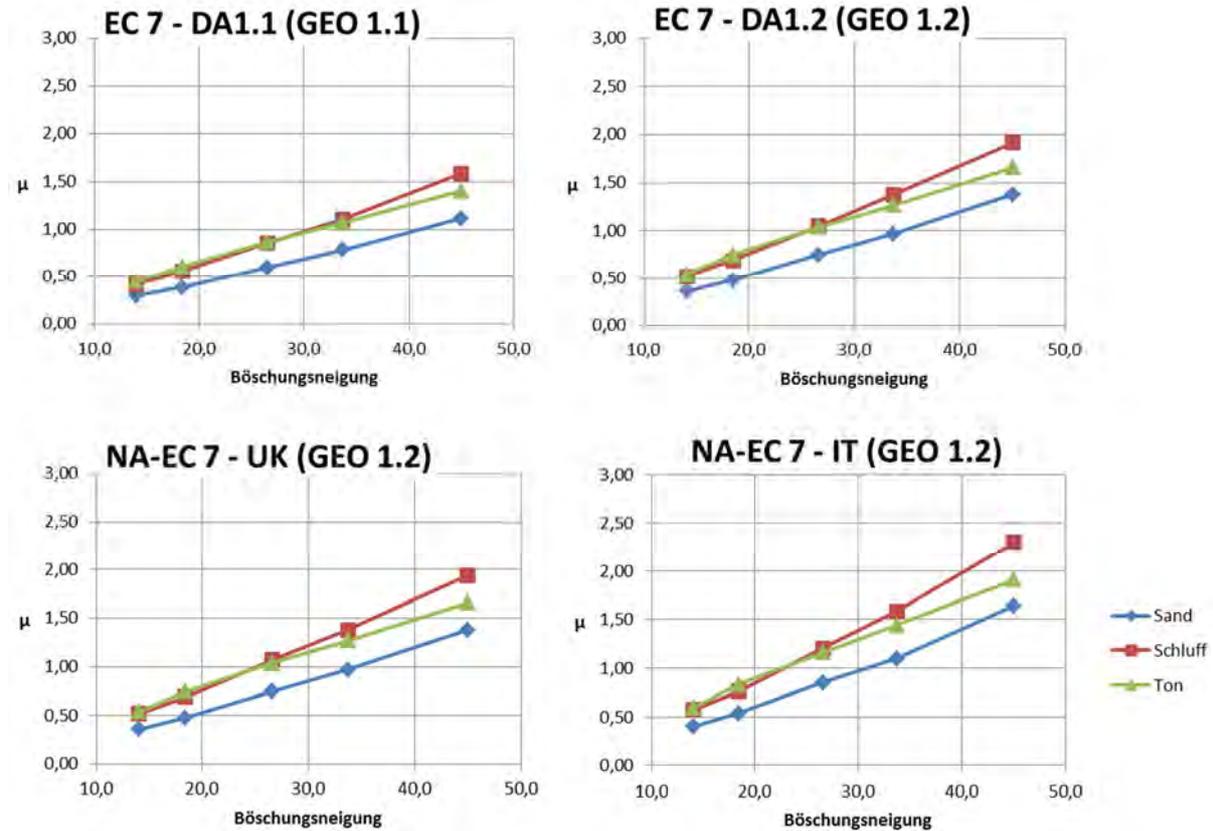


Abbildung 5.5: Ergebnisse der Nachweise zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß den Vorgaben aus dem EC7-1 im Nachweisverfahren DA1 im Vergleich zu länderspezifischen Ergebnissen im DA1 für Großbritannien (UK) und Italien (IT) in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der geotechnischen Kenngrößen

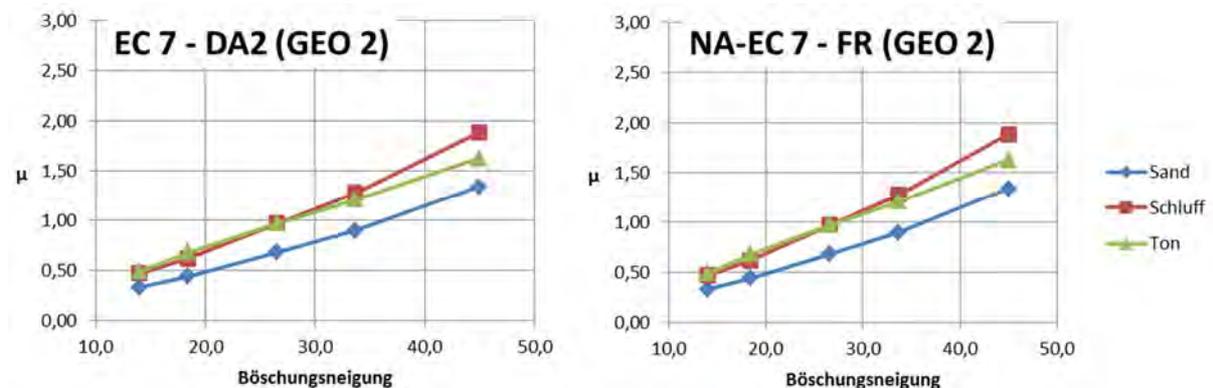


Abbildung 5.6: Ergebnisse der Nachweise zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß den Vorgaben aus dem EC7-1 im Nachweisverfahren DA2 im Vergleich zu länderspezifischen Ergebnissen im DA2 für Frankreich (FR) in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der geotechnischen Kenngrößen

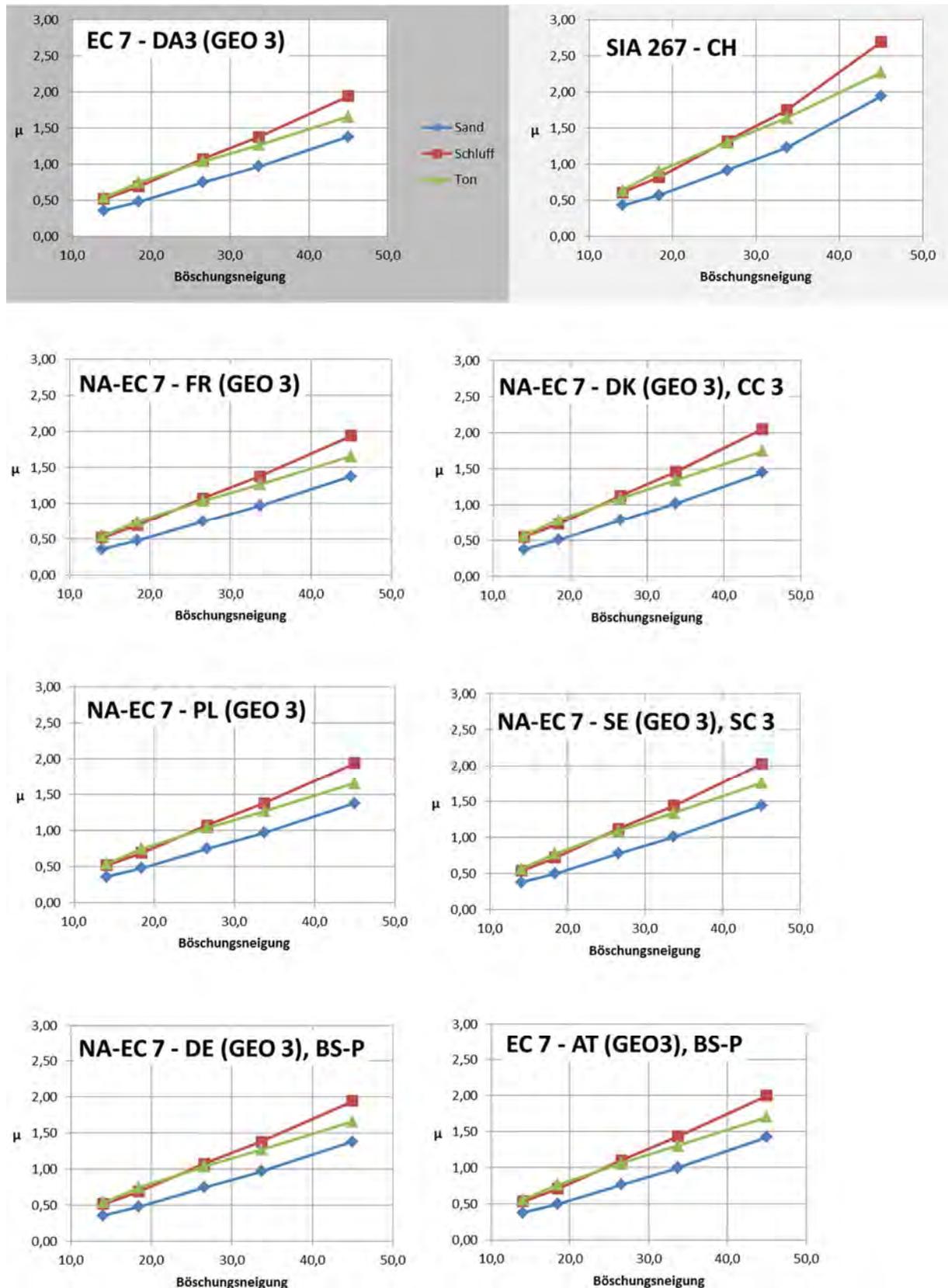


Abbildung 5.7: Ergebnisse der Nachweise zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß den Vorgaben aus dem EC7-1 im Nachweisverfahren DA3 im Vergleich zu länderspezifischen Ergebnissen im DA3 für Deutschland (DE), Österreich (AT), Frankreich (FR), Polen (PL), Dänemark (DK) und Schweden (SE) in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der geotechnischen Kenngrößen

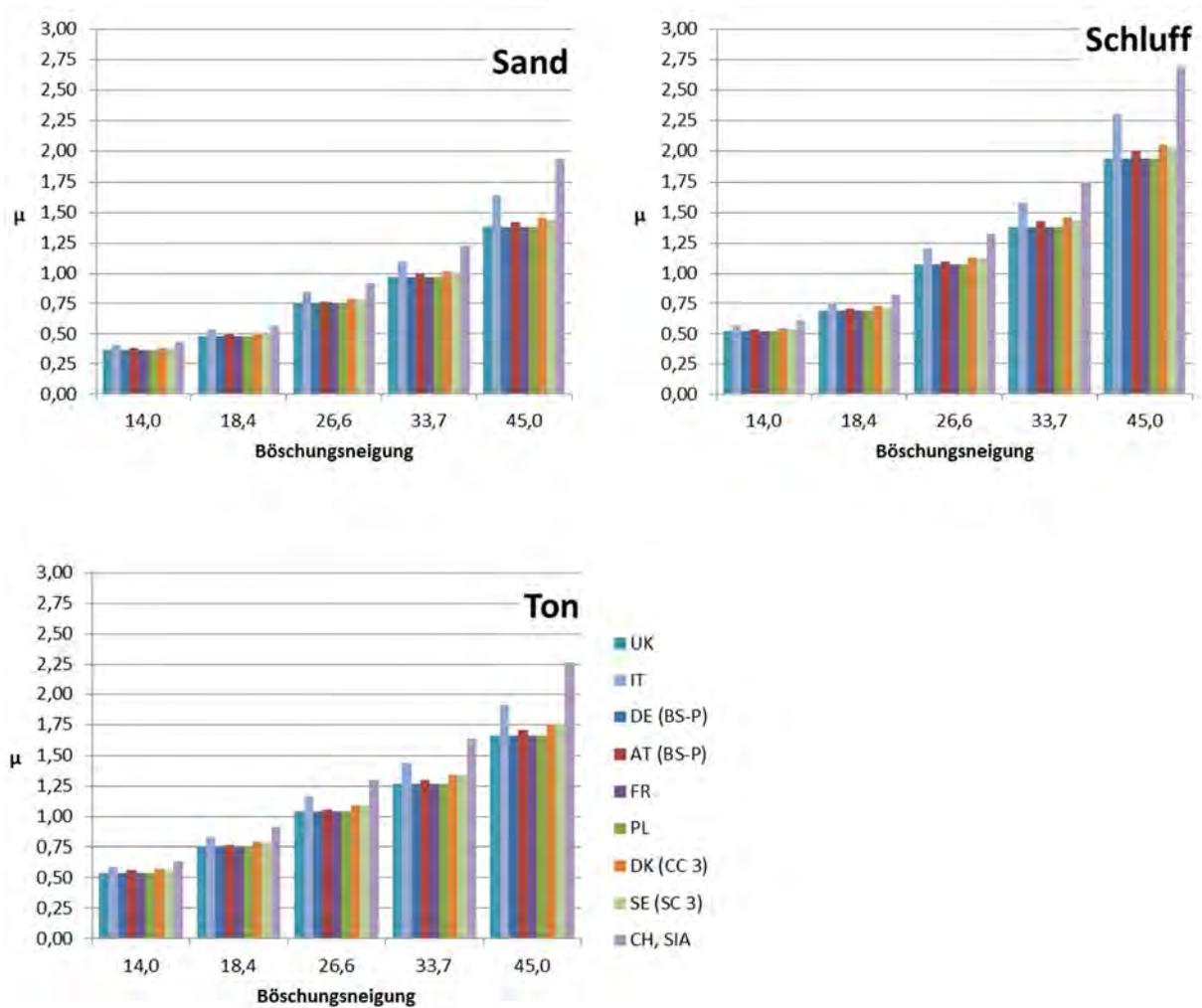


Abbildung 5.8: Ergebnisse der Vergleichsberechnungen zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß gewähltem nationalen Nachweisverfahren des untersuchten Geländesprunges in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der geotechnischen Kenngrößen

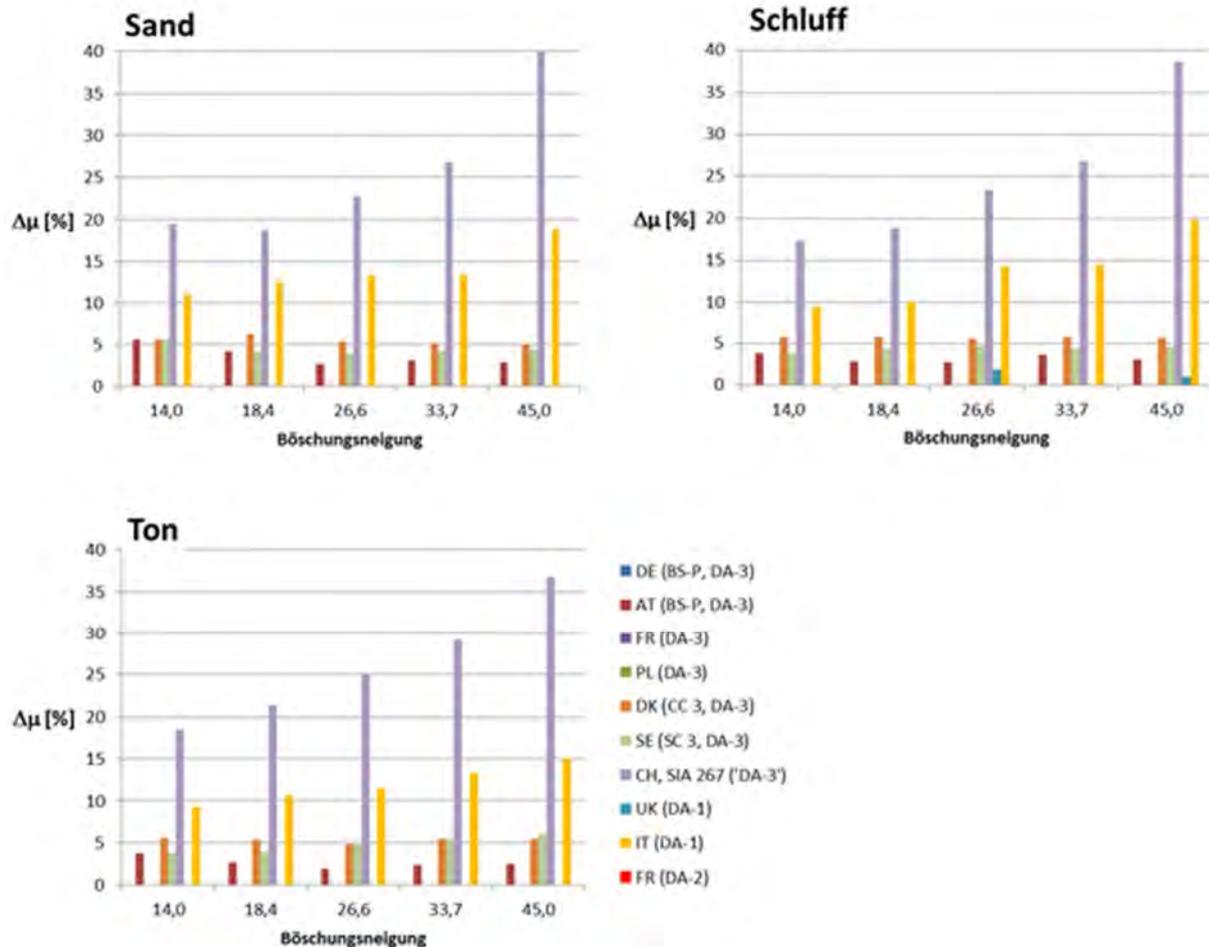


Abbildung 5.9: Abweichung $\Delta\mu$ [%] zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß gewähltem nationalen Nachweisverfahren im Vergleich zu den Vorgaben aus EC7-1 des untersuchten Geländesprunges in Abhängigkeit von der Böschungsneigung und der geotechnischen Kenngrößen

Auf Grundlage der Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 können folgende Schlussfolgerungen für die Stufe II getroffen werden:

- Die länderspezifische Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten in Nachweisverfahren DA3 ergibt für Deutschland (DE), Frankreich (FR), Polen (PL) und Großbritannien (UK) das gleiche Sicherheitsniveau im Vergleich zu den Vorgaben des EC7-1.
- Die Schweiz (CH), welche die nationalen SIA Normen in Anlehnung an den Eurocode im DA3 verwendet, hat im vorgenommenen europäischen Vergleich das höchste Sicherheitsniveau, welches höherproportional mit der Neigung der Böschung zunimmt. Dies ist zum einen durch die gewählten höheren Teilsicherheitsbeiwerte auf die geotechnische Kenngröße (M), Kohäsion (1,50 anstatt 1,25), und vor allem auf die Verwendung eines hohen Teilsicherheitsbeiwertes auf die Gesamtstandsicherheit von 1,20 auf der Widerstandsseite (R) zurückzuführen. Die Abweichung $\Delta\mu$ zur Sicherheit gemäß Vorgaben aus EC7-1 liegt zwischen 17 und 40%.
- Die Länder Österreich (AT), Dänemark (DK) und Schweden (SE) weichen hingegen nur geringfügig zwischen 2 bis 6 % zu den Vorgaben im EC7-1 DA3 ab.
- Italien (IT) hat durch die abweichend höhere Festlegung des Teilsicherheitsbeiwertes für die Bodenwiderstände (R1), die Gesamtstandsicherheit (1,10 anstatt von 1,00), das

höchste Sicherheitsniveau im vorgenommenen europäischen Vergleich gemäß den Vorgaben des EC7-1, vgl. Tabelle 5.4. Die Abweichung $\Delta\mu$ zur Sicherheit gemäß Vorgaben aus EC7-1 liegt je nach Böschungsneigung und Bodenart zwischen 10 und 20%, vgl. Abbildung 5.9.

5.2.9 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe III

Bislang liegen keine Zwischenergebnisse der Stufe III vor, da bislang als Zwischenergebnis einer Literaturrecherche festzuhalten ist, dass es scheinbar europaweit keine zusätzlichen Besonderheiten bei der Anwendung nationaler Regelungen für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit gibt.

5.3 Schlussfolgerungen einfache Böschungen

Aus den Ergebnissen der Vergleichsrechnungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Für alle Parametervariationen zeigt sich, dass das Nachweisverfahren DA3 gemäß den Vorgaben des EC7-1 maßgebend ist.
2. Das Nachweisverfahren DA1, in der Kombination 2, ergibt für alle Parametervariationen die gleiche Sicherheit wie im Verfahren DA3 gemäß den Vorgaben des EC7-1.
3. Die länderspezifische Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten in Nachweisverfahren DA3 ergibt für Deutschland (DE), Frankreich (FR), Polen (PL) und Großbritannien (UK) das gleiche Sicherheitsniveau im Vergleich zu den Vorgaben des EC7-1. Die Länder Österreich (AT), Dänemark (DK) und Schweden (SE) weichen hingegen nur geringfügig zwischen 2 bis 6 % zu den Vorgaben im EC7-1 (DA3) ab.
4. In Italien (IT) und in der Schweiz (CH) ist abweichend zu den übrigen untersuchten Nationen insgesamt ein höheres Sicherheitsniveau (mindestens 10% höheres Niveau in Italien und mindestens 17% in der Schweiz) festzustellen, welches vor allem auf die Verwendung eines hohen Teilsicherheitsbeiwertes auf die Gesamtstandsicherheit (1,10 bzw. 1,20 anstatt 1,0) auf der Widerstandsseite (R) zurückzuführen ist.
5. Auf Grundlage der Ergebnisse der Vergleichsberechnungen bleibt zu empfehlen, einheitlich den Vorgaben des EC7-1 für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit im Nachweisverfahren DA3 oder DA1.2 zu folgen.
6. Weitergehend wird im folgenden Abschnitt 5.4 überprüft, inwieweit diese relativ einheitlichen Ergebnisse für die einfache Böschungsgeometrie mit homogenen Baugrundverhältnissen auch für komplexere Böschungssicherungen mit konstruktiven Sicherungselementen Gültigkeit besitzen.

5.4 Erweiterte Untersuchungen (komplexe Böschungen)

5.4.1 Randbedingungen Komplexe Baugrundsituation

Basierend auf den zuvor beschriebenen Ergebnissen (vgl. Pkt. 6. in Kapitel 5.3) wird nachfolgend zusätzlich zu dem zuvor untersuchten einfachen Geländesprung ein komplexer, getreppter Geländesprung mit konstruktivem Böschungssicherungselement (Verankerung

durch Verpressanker) mit 6 m Geländesprunghöhe und einer veränderlichen Flächenlast $q = 20 \text{ kN/m}^2$ in inhomogenen Baugrundverhältnissen mit geneigter Baugrundsichtung untersucht. Es wurde von einer ständigen (permanent) Bemessungssituation ausgegangen (vergleichbar mit BS-P in Deutschland). Die untersuchte Böschung liegt nicht im Wasser. Somit ist auch in diesem Beispiel keine Wasserdruckdifferenz oder Strömungskraft zu berücksichtigen. Abbildung 5.10 zeigt die Geometrie und Einwirkungen für den zusätzlich untersuchten „komplexen Geländesprung“ mit inhomogenen Baugrundverhältnissen und geneigten Bodenschichten.

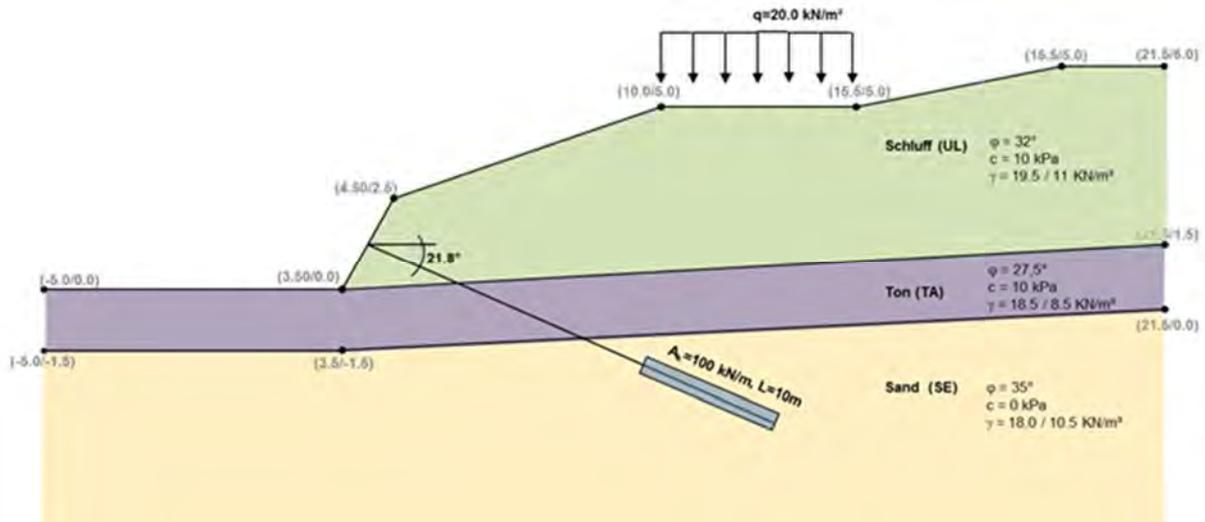


Abbildung 5.10: Prinzipskizze zur Geometrie des Geländesprungs mit Böschungssicherung und inhomogenen Baugrundverhältnissen und geneigter Bodenschichtung

Tabelle 5.6: Verwendete geotechnische Kenngrößen für die komplexen Böschungs- und Baugrundsituation

Homogener Baugrund (Bodentyp nach DIN 18196)	φ [°]	c [kN/m²]	γ [kN/m³]
Schluff (UL)	32,0°	10	19,5
Ton (TA)	27,5°	10	18,5
Sand (SE)	35,0°	0	18,0

5.4.2 Vergleich der Ergebnisse nach Stufe I und II

Abbildung 5.11 zeigt die berechneten Ausnutzungsgrade μ der Gesamtstandsicherheit (GEO) des untersuchten komplexen Geländesprungs in Abhängigkeit der Nachweisverfahrens DA1 bis DA3 gemäß den Vorgaben des EC7-1 (Stufe I) und der gewählten länderspezifischen Anpassungen der Teilsicherheitsbeiwerte und Nachweisverfahren (Stufe II).

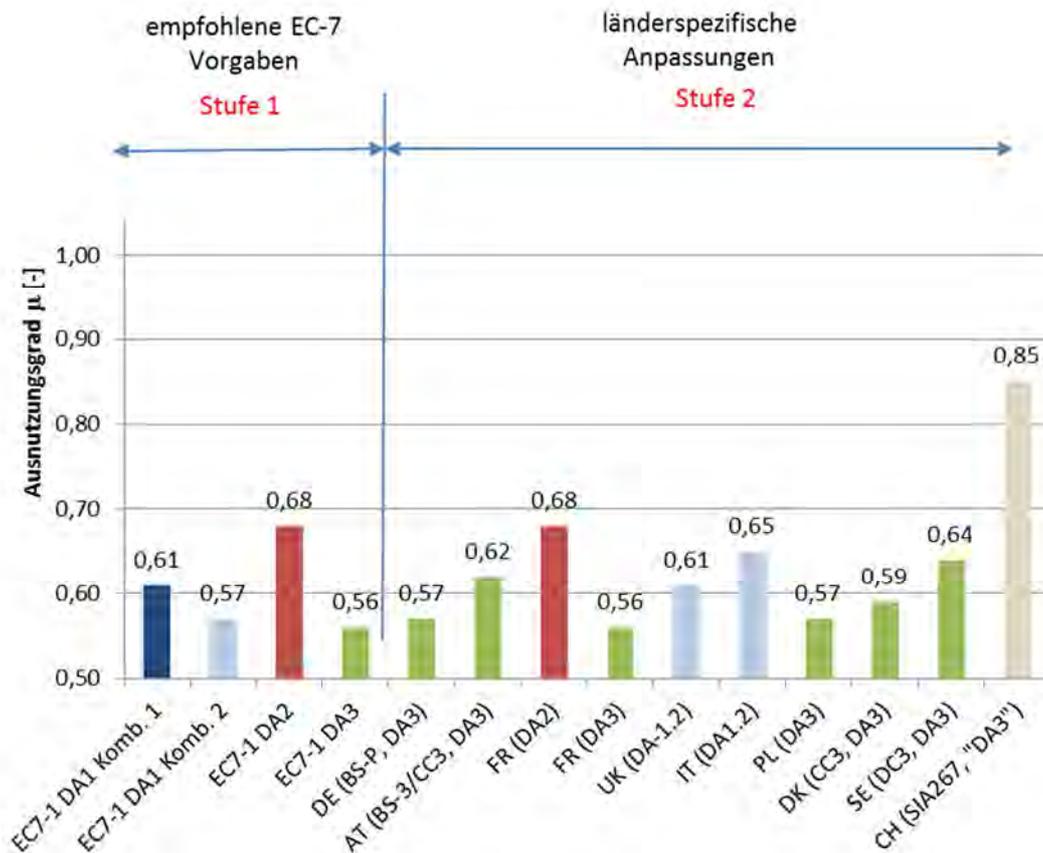


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Vergleichsberechnungen in Form des Ausnutzungsgrades μ zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß den empfohlenen Vorgaben der Teilsicherheitsbeiwerte nach EC7-1 im Nachweisverfahren DA1, DA2 und DA3 des untersuchten Geländesprunges (Stufe I) und die Ergebnisse unter Berücksichtigung der länderspezifischen Anpassungen (Stufe II)

Folgende Schlussfolgerungen können für Stufe I (vgl. Kapitel 5.1.2) getroffen werden:

- Die Nachweisverfahren DA1.2 und DA3 gemäß EC7-1 Vorgaben führen zum annähernd gleichen Sicherheitsniveau.
- Der geringste Ausnutzungsgrad ergibt sich durch die Anwendung des Nachweisverfahrens DA3.
- Die höchsten Ausnutzungsgrade ergeben sich durch die Anwendung des Nachweisverfahrens DA2.

Auf Grundlage der Abbildung 5.11, Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 können folgende Schlussfolgerungen für die Stufe II für komplexe Böschungssituationen getroffen werden:

- Die länderspezifischen Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten in Nachweisverfahren DA3 ergibt nur für Frankreich (FR) das gleiche Sicherheitsniveau im Vergleich zu den Vorgaben des Eurocodes EC7-1. Geringfügige Abweichungen (<2%) sind in Deutschland (DE) und Polen (PL).
- Die Schweiz (CH), welche die nationalen SIA Normen in Anlehnung an den Eurocode im DA3 verwendet, hat auch in diesem Beispiel im vorgenommenen europäischen Vergleich das höchste Sicherheitsniveau. Dies ist zum einen durch den abweichend relativ hohen Teilsicherheitsbeiwert auf der Kohäsion und vor allem auf die Verwendung eines hohen Teilsicherheitsbeiwertes auf der Widerstandsseite (R),

(Gesamtstandsicherheit 1,20 und Bauteilwiderstand 1,05 anstelle von 1,00) zurückzuführen. Die Abweichung $\Delta\mu$ der Stufe II zur Sicherheit gemäß Vorgaben aus EC7-1 (Stufe I) liegt um 50%.

- Die Länder Österreich (AT), Dänemark (DK) und Großbritannien (UK) weichen hingegen nur geringfügig zwischen 5 bis 10 % zu den Vorgaben im EC7-1 DA3 ab.
- Italien (IT) und Schweden (SE) haben durch die vergleichsweise hohe Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte (höhere Teilsicherheitsbeiwerte für die geotechnischen Kenngrößen (M) in Schweden und höhere Teilsicherheitsbeiwerte für die Bodenwiderstände (R) in Italien) das höchste Sicherheitsniveau im vorgenommenen europäischen Vergleich. Die Abweichung des Ausnutzungsgrades $\Delta\mu$ zum Ausnutzungsgrad gemäß Vorgaben aus EC7-1 liegen bei 15%.

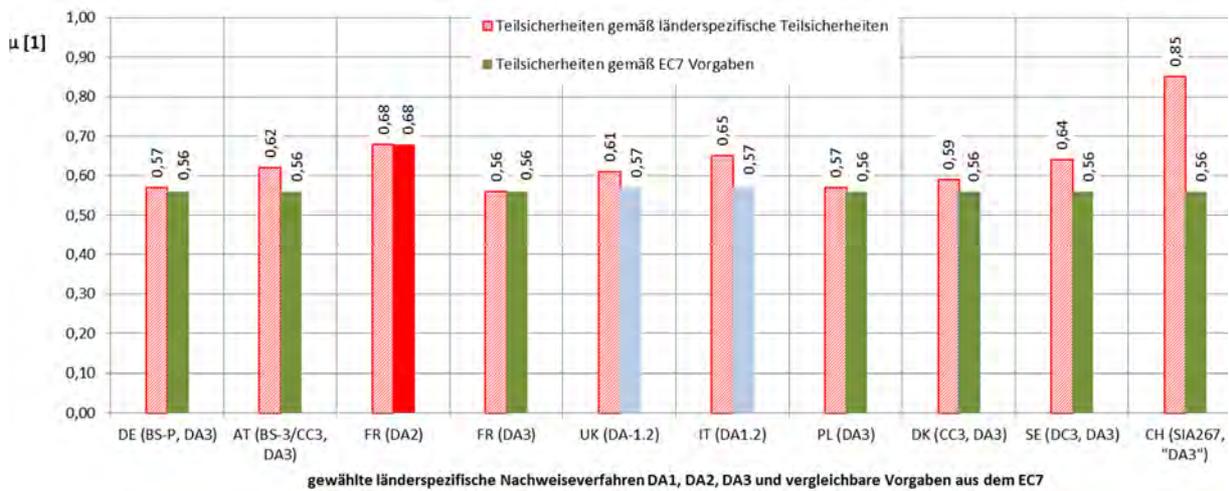


Abbildung 5.12: Ausnutzungsgrad μ [1] der Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß gewähltem nationalen Nachweisverfahren (rot schraffierte Säulen, Stufe II) im Vergleich mit den Ergebnissen gemäß den empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerten des EC7-1 (vollfarbige Säulen, Stufe I)

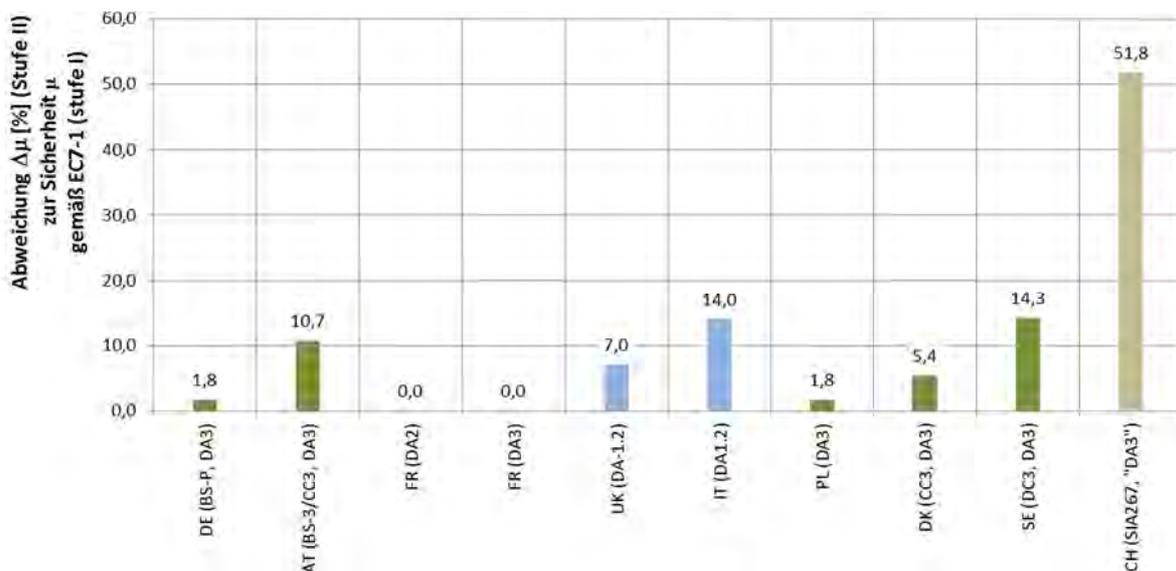


Abbildung 5.13: Abweichung $\Delta\mu$ [%] zur Gesamtstandsicherheit (GEO) gemäß gewähltem nationalen Nachweisverfahren (Stufe II) im Vergleich zu den Vorgaben aus EC7-1 des untersuchten Geländesprungs

5.5 Therapie

Aus den Ergebnissen der Vergleichsberechnungen zur einfachen und komplexen Böschungssituation lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die länderspezifischen Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten ergibt für Deutschland (DE), Frankreich (FR), Polen (PL), Dänemark (DK), Österreich (AT) und Großbritannien (UK) ein ähnliches Sicherheitsniveau im Vergleich zu den Vorgaben des Eurocodes EC7-1. Die Abweichungen liegen zwischen 2 und 10%.
2. Die Länder Italien (IT) und Schweden (SE) weichen hingegen etwas stärker von den Vorgaben im EC7-1 ab, d. h. dort ist ein rund 15%-iges höheres Sicherheitsniveau im europäischen Vergleich festzustellen.
3. In der Schweiz (CH) ist abweichend zu den übrigen untersuchten Nationen insgesamt das höchste Sicherheitsniveau festzustellen, welches vor allem auf die Verwendung eines hohen Teilsicherheitsbeiwertes auf der Widerstandsseite (R3) zurückzuführen ist.
4. Auf Grundlage der Punkte 1 bis 4 ist zu empfehlen, einheitlich den Vorgaben des EC7-1 für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit im Nachweisverfahren DA3 zu folgen. Demnach sollte europaweit auf eine länderspezifische Anpassung der Teilsicherheiten verzichtet werden.
5. In den Ländern mit den höchsten Abweichungen zu den EC7-1 Vorgeben (Schweiz, Schweden und in Italien) müsste über eine Anpassung oder Annäherung des Sicherheitsniveaus gemäß den Vorgaben des EC7-1 fachlich angestoßen werden.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass für die Gesamtstandsicherheitsberechnung in allen europäischen Ländern das Nachweisverfahren DA1 oder DA3 verwendet wird. DA1.2 und DA3 faktorisieren die Einwirkungen und die geotechnischen Kenngrößen (Tangens des Reibungswinkels und Kohäsion). Diese Vorgehensweise war schon vor der Einführung des EC7-1 auch in Europa üblich und ist erdstatisch auch sinnvoll, weil die Reibung und Kohäsion dem Bodenwiderstand in der Gleitfuge entspricht. Der eigentliche Nachteil bei der Verwendung des Nachweisverfahrens DA1.2 ist, dass daneben immer noch eine Berechnung mit DA1.1 durchgeführt werden muss, wodurch sich der Berechnungsaufwand zwangsläufig erhöht. Daher bleibt der Einfachheit halber zu empfehlen, nur das Nachweisverfahren DA3 zu verwenden.

Hinsichtlich einer Harmonisierung der Nachweisverfahren wird daher für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit einheitlich nur das Nachweisverfahren DA3 empfohlen.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein Beitrag zur pränormativen Forschung im Vorfeld der praxisgerechten Überarbeitung und Weiterentwicklung des Eurocode 7-1 (EC7-1) geleistet. Hierfür wurden nach der Erfassung des Status Quo des jetzigen EC7-1 Vergleichsrechnungen für die Bemessung einer Flächengründung (Stützenfundament), eines Stützbauwerks (Baugrubenwand), einer Pfahlgründung (axial bzw. quer beanspruchte Pfähle) und für die Standsicherheit einer Böschung (Gesamtstandsicherheitsberechnung einer einfachen und einer komplexen Böschung) durchgeführt. Der Zweck der Vergleichsrechnungen war, die Unterschiede aus den im EC7-1 definierten Nachweisverfahren und den darüber noch hinausgehenden national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerten aufzuzeigen, um daraus ein harmonisiertes Nachweisverfahren vorzuschlagen. Außerdem wurde der zusätzliche Einfluss nationaler Regelungen durch die Anwendung eigener Grundbruchformeln oder unterschiedlicher Berechnungsansätze für den Erddruck, untersucht.

Die Mehrheit der europäischen Länder verwenden für die Gesamtstandsicherheitsberechnung ein Nachweisverfahren mit Faktorisierung der Einwirkungen und der Bodenkenngößen wie das Nachweisverfahren 3 (DA3) oder das nahezu identische Nachweisverfahren 1 Kombination 2 (DA1.2). Dabei werden die Reibung ($\tan \varphi$) und die Kohäsion in der Gleitfuge (also die direkte Bodenwiderstände) abgemindert. Bei DA1 ist noch zu erwähnen, dass neben der Kombination 2 auch die Kombination 1 (DA1.1) zu untersuchen ist, bei der aber nur die Einwirkungen erhöht werden und die selten maßgebend wird.

Bei der Bemessung von axial beanspruchten Pfählen kommt meistens das Nachweisverfahren DA2 bzw. DA2* zum Einsatz, das eine Faktorisierung der Baugrundwiderstände und der Einwirkungen (bei DA2) bzw. der Beanspruchungen (bei DA2*) vornimmt. Hierbei werden der Spitzendruck und die Mantelreibung mit Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert. Auch die Nachweisverfahren DA1.1 und DA1.2 berücksichtigen allerdings nur für die Bemessung von Pfählen und Ankern eine Faktorisierung der Baugrundwiderstände wie in DA2/DA2*.

Bei den anderen untersuchten geotechnischen Bauwerken werden in den europäischen Ländern alle drei möglichen Nachweisverfahren verwendet. Die Vergleichsrechnungen haben bei den quer beanspruchten Pfählen jedoch gezeigt, dass die Unterschiede der erforderlichen Pfahllängen gering sind. Bei dem Stützenfundament und der Baugrubenwand können die Unterschiede zwischen den Nachweisverfahren signifikanter sein. Bei dem Stützenfundament ist eine Bemessung mit DA3 generell konservativer als mit DA2/DA2*, während bei der Baugrubenwand nicht eindeutig ist, welches Nachweisverfahren wirklich die höchste Sicherheit aufweist.

Im Hinblick auf eine Harmonisierung der Nachweisverfahren wurden daher am Beispiel des Stützenfundaments Berechnungen mit einem neuen Nachweisverfahren durchgeführt, das sowohl eine Faktorisierung der Bodenkenngößen als auch der Baugrundwiderstände zulässt. Hierbei soll die Faktorisierung der Bodenkenngößen lediglich die Streuung dieser Parameter berücksichtigen. Die Faktorisierung der Baugrundwiderstände erfasst hingegen die Modellunsicherheit. Eine Faktorisierung der Bodenkenngößen kann sich jedoch erübrigen, wenn gemäß EC7-1 die Streuung der Bodenparameter schon bei der Ermittlung der charakteristischen Werte berücksichtigt wurde. Hierbei wurde am Beispiel des Stützenfundaments gezeigt, dass sich durch die Berücksichtigung der Streuung der Bodenparameter schon bei der Ermittlung der charakteristischen Werte nahezu identische Fundamentbreiten wie mit dem neuen Nachweisverfahren ergeben, bei dem beide Einflüsse getrennt betrachtet

wurden. Somit ist es tatsächlich nur erforderlich die Baugrundwiderstände, wie in DA2 bzw. DA2*, zu faktorisieren.

Des Weiteren haben die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen gezeigt, dass die national ausgewählten Teilsicherheitsbeiwerte und vor allem die nationalen Regelungen für die Berechnungsmodelle einen größeren Einfluss auf die Bemessung bzw. auf das Sicherheitsniveau haben als die Wahl des Nachweisverfahrens selbst.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen des Forschungsvorhabens für die Gesamtstandsicherheitsberechnung das Nachweisverfahren DA3 und für die Bemessung von geotechnischen Bauwerken das Nachweisverfahren DA2 bzw. DA2* vorgeschlagen werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Streuung der Eingangsparameter realitätsnah abgeschätzt wird und auch entsprechend in die Berechnung einfließt.

Hinsichtlich eines einheitlichen europäischen Sicherheitsniveaus besteht zunächst Bedarf, die national festgelegten Teilsicherheitsbeiwerte anzugleichen. Weiterer Forschungsbedarf und zusätzliche Vergleichsrechnungen sind insbesondere für die Aufstellung einheitlicher Regelungen bei den Berechnungsmodellen notwendig. Darüber müssen die Vorgehensweisen bei der Festlegung der charakteristischen geotechnischen Kenngrößen der europäischen Länder untersucht und vereinheitlicht werden.

7 Unterlagen

- [U 1] DIN EN 1997-1: Eurocode 7- Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, Deutschland 2009
- [U 2] DIN EN 1997-1/NA: Nationaler Anhang zu DIN EN 1997-1, Deutschland 2010
- [U 3] DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Deutschland 2010
- [U 4] DIN EN 1990: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutschland 2010
- [U 5] DIN 4017: Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flächengründungen, Deutschland 2006
- [U 6] DIN 4085: Baugrund – Berechnung des Erddrucks, Deutschland 2011
- [U 7] NA to BS EN 1997-1: UK National Annex to Eurocode 7, Großbritannien 2007
- [U 8] ÖNORM B 1997-1-1: Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen, Österreich 2007
- [U 9] EN 1997-1 DK NA: National Annex to Eurocode 7, Dänemark 2010
- [U 10] DS 415 E, Code of Practice for foundation engineering, Danish Standards Association, 1998.
- [U 11] Draft INA IS EN 1997-1: Irish National Annex, Draft, Irland 2006
- [U 12] NA CSN EN 1997-1; Tschechische Republik; Erscheinungsjahr unbekannt
- [U 13] NA NEN 9997-1+C1; Niederlande 2012
- [U 14] SIA 267:2003 Bauwesen Geotechnik, Schweizer Norm SN 505 267, SIA Zürich 2003
- [U 15] SIA 267:2013 Bauwesen Geotechnik, Schweizer Norm SN 505 267, SIA Zürich 2013
- [U 16] NF EN 1997-1/NA: Annexe Nationale à la NF EN 1997-1 :2005, AFNOR 2006
- [U 17] PN-EN 1997-1/NA: Concerning PN-EN 1997-1:2008, Polen 2008
- [U 18] NTC 2008, Norme tecniche per le costruzioni, Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008, mit Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 (gilt als Nationaler Anhang Italien zu UNI EN 1997-1:2005)
- [U 19] UNI EN 1997-1/NA: Appendice nazionale, Italien 2010
- [U 20] VVFS 2009 : Swedish Road Administration regulations concerning amendments to regulations on the application on European calculation standards, Schweden 2009
- [U 21] BFS 2011: Boverket mandatory provisions and general recommendations on the application of European design standards (Eurocodes), Schweden 2011
- [U 22] BFS 2011:10, Tillämpning av EN 1997-1, Schweden 2011
- [U 23] Tillämpningsdokument, Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik, Rapport 2:2008, Rev 2

- [U 24] Tillämpningsdokument, EN 1997-1 Kapitel 7 - Pålgrundläggning, Implementeringskommission för Europastandarder inom Geoteknik, Rapport 8:2008, Rev 2
- [U 25] VSS-Stützmauern (1966): Stützmauern – Grundlagen zur Berechnung und Konstruktion, Bemessungstabellen, 1. Auflage, Verlag-Editeur.
- [U 26] Bent Hansen: Advanced theoretical soil mechanics, dgf-Bulletin 20, Danish Geotechnical Society, January 2001
- [U 27] Lang, H.-J., Huder, J., Amann, P., Puzrin, A. (2011): Bodenmechanik und Grundbau – Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, 9. Auflage, Springer-Verlag
- [U 28] Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B. (2004): Designers' Guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical Design – General Rules
- [U 29] Aktuelle Entwicklungen bei der Berechnung von Baugruben, DGGT Arbeitskreis "Baugruben", Universität Dortmund 2003.
- [U 30] Ziegler, M.: Geotechnische Nachweise nach EC 7 und DIN 1054. Einführung mit Beispielen. 3. Auflage. Bauingenieur Praxis. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. 2012
- [U 31] Bond, A. 2012: EG8 Harmonization. 1st Experts Meeting of CEN/TC 250/SC 7, Brüssel, 2012 (unveröffentlicht)

Anhang

Anhang A: Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen in Dänemark und Schweden sowie Gleichungen aus DIN EN 1990

Tabelle A.1: Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen γ_F oder Beanspruchungen γ_E nach EN 1997-1 DK NA

Action			Symbol	Set			
				A1		A2	
				Equation 6.10a	Equation 6.10b	Equation 6.10a	Equation 6.10b
Permanent actions	Weight of structural member	Unfavourable	$\gamma_{G;sup}$	$1,2 \cdot K_{FI}$	$1,0 \cdot K_{FI}$	1,2	1,0
		Favourable	$\gamma_{G;inf}$	1,0	0,9	1,0	0,9
	Self weight of ground and ground water	Unfavourable	$\gamma_{G;sup}$	$1,0 \cdot K_{FI}$	$1,0 \cdot K_{FI}$	1,0	1,0
		Favourable	$\gamma_{G;inf}$	1,0	1,0	1,0	0,0
Variable actions Buildings	Leading	Unfavourable	$\gamma_{Q,1}$	0	$1,5 \cdot K_{FI}$	0	1,5
	Other	Unfavourable	$\gamma_{Q,i}$	0	$1,5 \cdot \psi_0 \cdot K_{FI}$	0	$1,5 \cdot \psi_0$
Variable actions Bridges	Leading	Unfavourable	$\gamma_{Q,1}$	0	$1,4 \cdot K_{FI}$	0	1,4
	Other	Unfavourable	$\gamma_{Q,i}$	0	$1,5 \cdot \psi_0 \cdot K_{FI}$	0	$1,5 \cdot \psi_0$

High consequence class CC3: $K_{FI}=1,1$

Medium consequence class CC2: $K_{FI}=1,0$

The low consequence class CC1 is not applied for geotechnical structures

Tabelle A.2: Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen γ_F aus dem Bauwerk in Anlehnung an VVFS 2009

Action		Symbol	Set		
			Equation 6.10a	Equation 6.10b	
Permanent actions	Unfavourable	$\gamma_{G;sup}$	$1,35 \cdot \gamma_d$	$0,89 \cdot 1,35 \cdot \gamma_d$	
	Favourable	$\gamma_{G;inf}$	1,0	1,0	
Variable main actions	Unfavourable	$\gamma_{Q;sup}$	-	$1,5 \cdot \gamma_d$	
	Favourable	$\gamma_{Q;inf}$	-	0	
Interacting variable actions	Leading	Unfavourable	$\gamma_{Q,1}$	$1,5 \cdot \psi_{0,1} \cdot \gamma_d$	
		Favourable	$\gamma_{Q,1}$	0	
	Other	Unfavourable	$\gamma_{Q,i}$	$1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot \gamma_d$	$1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot \gamma_d$
		Favourable	$\gamma_{Q,i}$	0	0

Tabelle A.3: Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Einwirkungen γ_F in Anlehnung an VVFS 2009

Action		Symbol	Set	
			Equation 6.10	
Permanent actions	Unfavourable	$\gamma_{G;sup}$	$1,1 \cdot \gamma_d$	
	Favourable	$\gamma_{G;inf}$	1,0	
Variable main actions	Unfavourable	$\gamma_{Q;sup}$	$1,4 \cdot \gamma_d$	
	Favourable	$\gamma_{Q;inf}$	0	
Interacting variable actions	Leading	Unfavourable	-	
		Favourable	-	
	Other	Unfavourable	$\gamma_{Q,i}$	$1,5 \cdot \psi_{0,i} \cdot \gamma_d$
		Favourable	$\gamma_{Q,i}$	0

Security Class 1: $\gamma_d=0,83$

Security Class 2: $\gamma_d=0,91$

Security Class 3: $\gamma_d=1,0$

Kombinationen von Einwirkungen bei ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituationen nach DIN EN 1990

Die Kombination der Einwirkungen darf entweder durch

Gleichung 6.10

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Ausgedrückt werden oder für Nachweise STR und GEO durch die ungünstigere der beiden Kombinationen

Gleichung 6.10a)

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Gleichung 6.10b)

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Dabei bedeuten:

„+“ „ist zu kombinieren“

Σ „gemeinsame Auswirkung von“

ξ der Reduktionsbeiwert für ungünstig wirkende ständige Einwirkungen G.

In Dänemark ist $\xi = 1,0$ in Gleichung 6.10b) eingesetzt (DS/EN 1990 DK NA).

In Schweden ist $\xi = 0,89$ in Gleichung 6.10b) schon berücksichtigt (VVFS 2009)

Anhang B: Weitere Diagramme - Stützenfundament

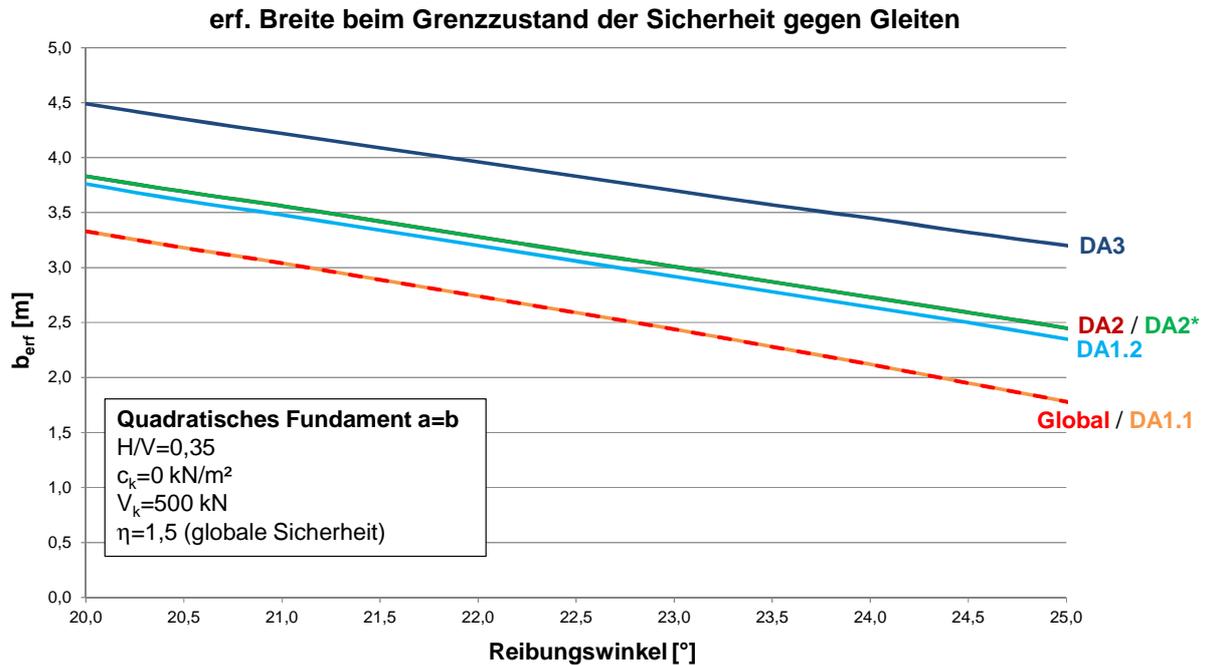


Abbildung A.1: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

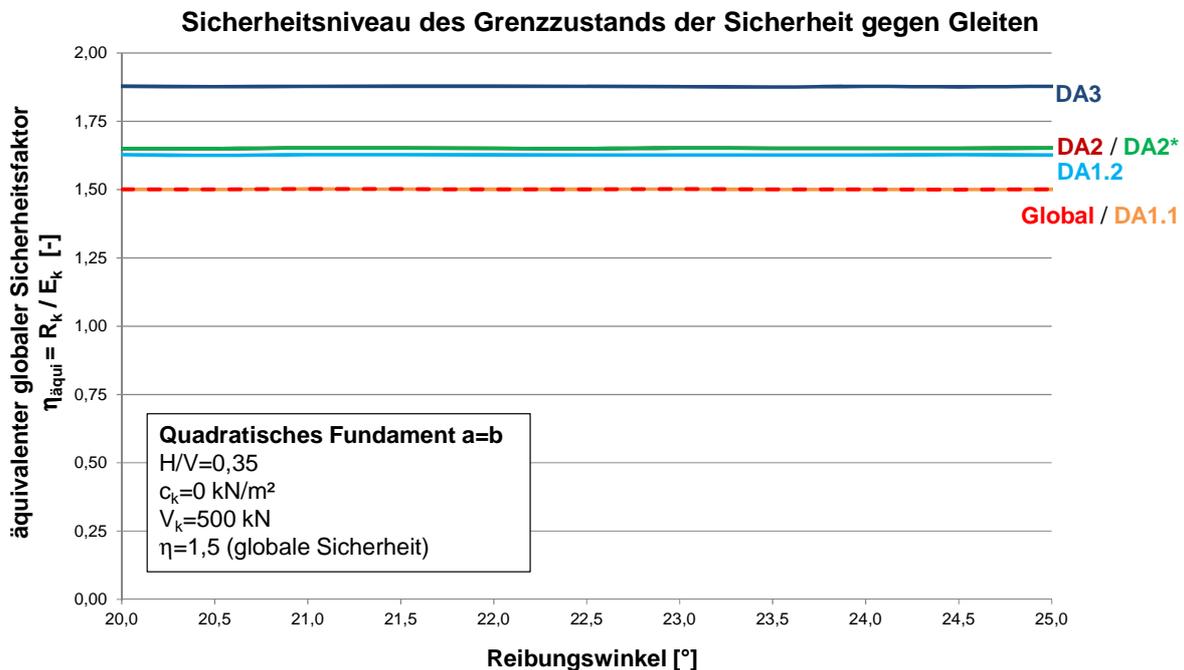


Abbildung A.2: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Reibungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren

erf. Breite beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten

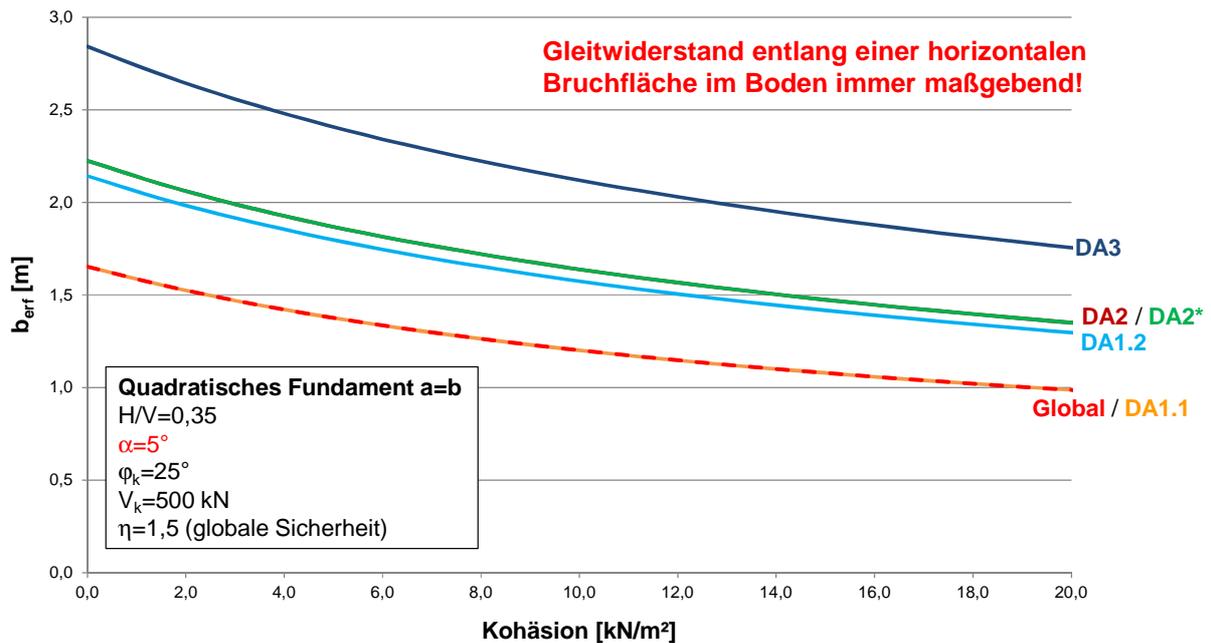


Abbildung A.3: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite bei einer Sohlneigung $\alpha=5^\circ$ in Abhängigkeit der Kohäsion für die verschiedenen Nachweisverfahren

Sicherheitsniveau des Grenzzustands der Sicherheit gegen Gleiten

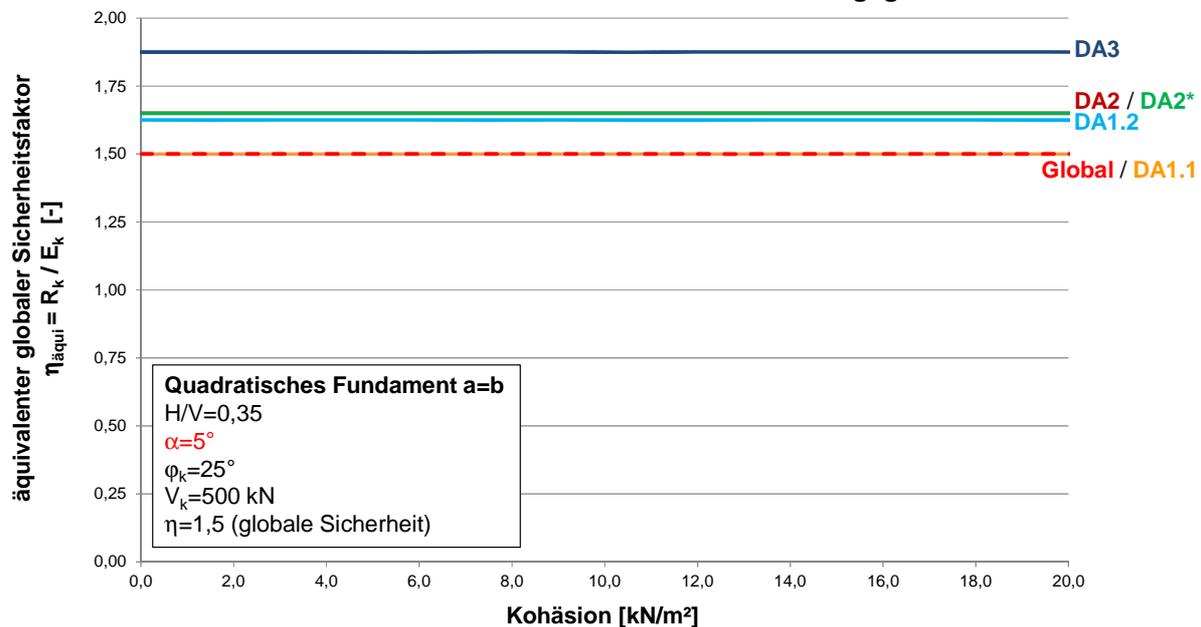


Abbildung A.4: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei einer Sohlneigung $\alpha=5^\circ$ in Abhängigkeit der Kohäsion für die verschiedenen Nachweisverfahren

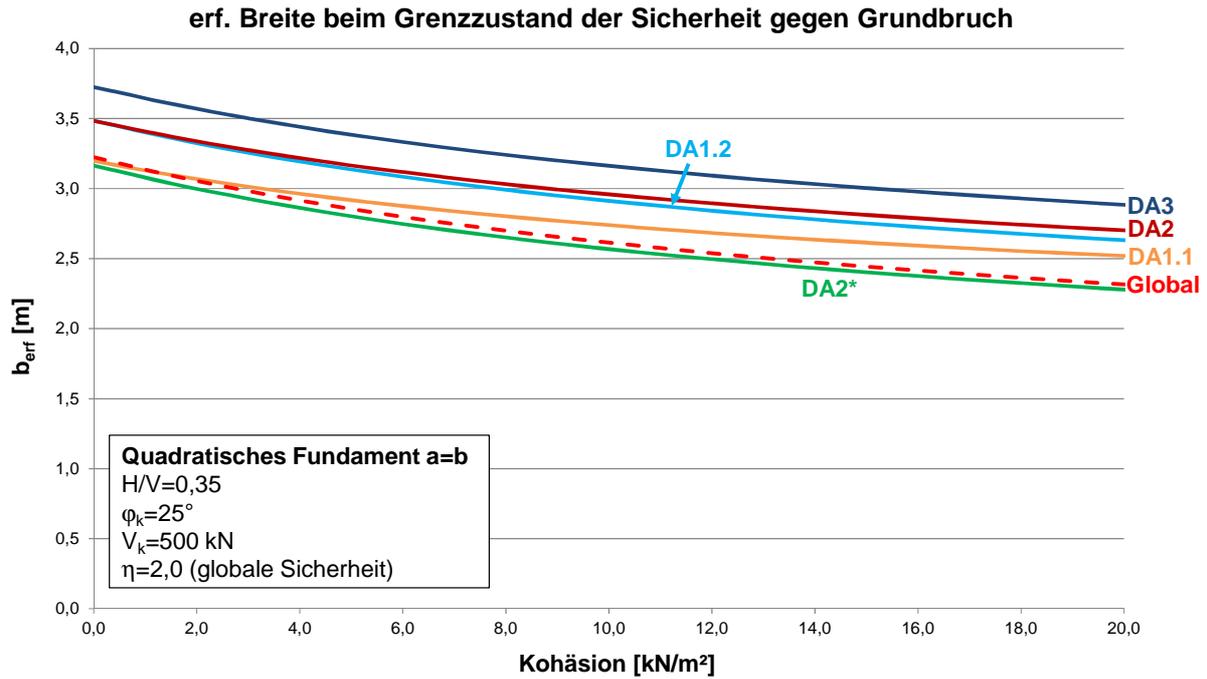


Abbildung A.5: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Kohäsion für die verschiedenen Nachweisverfahren

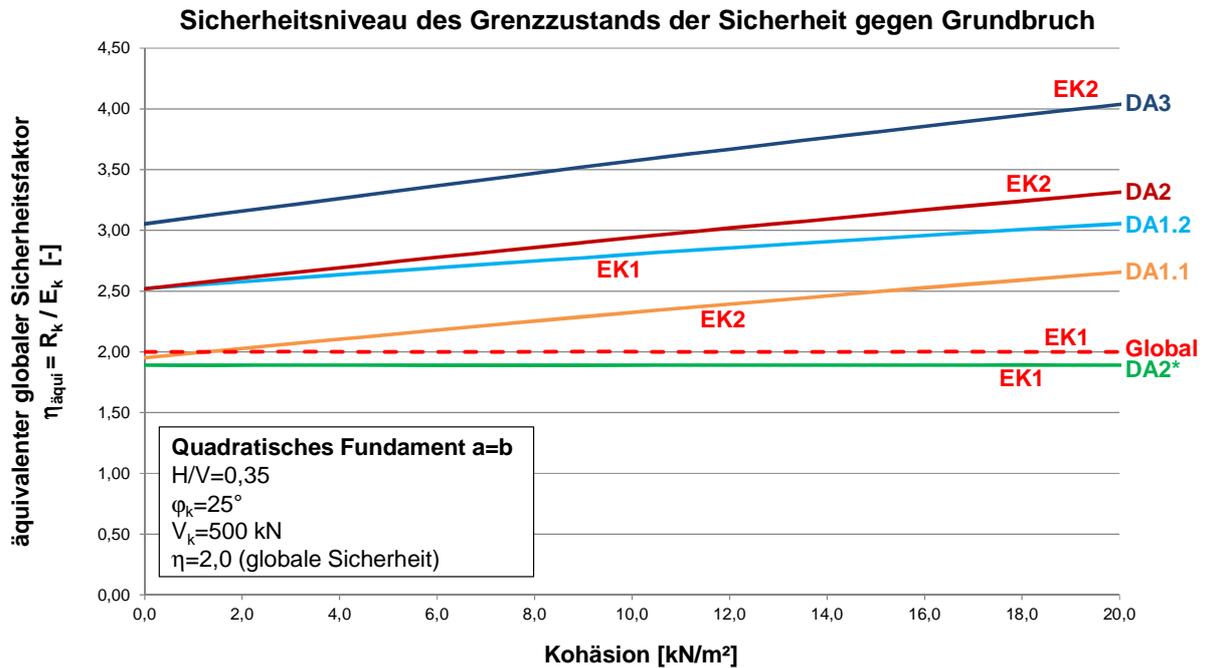


Abbildung A.6: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion für die verschiedenen Nachweisverfahren

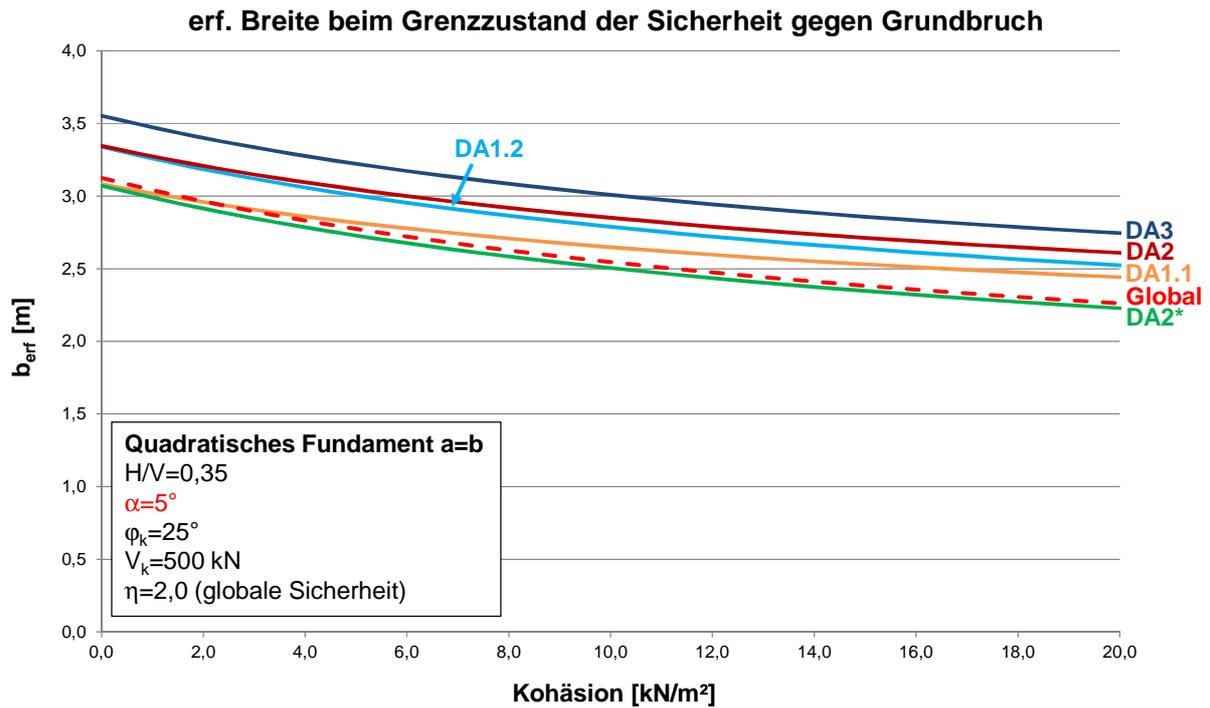


Abbildung A.7: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite bei einer Sohlneigung $\alpha=5^\circ$ in Abhängigkeit der Kohäsion für die verschiedenen Nachweisverfahren

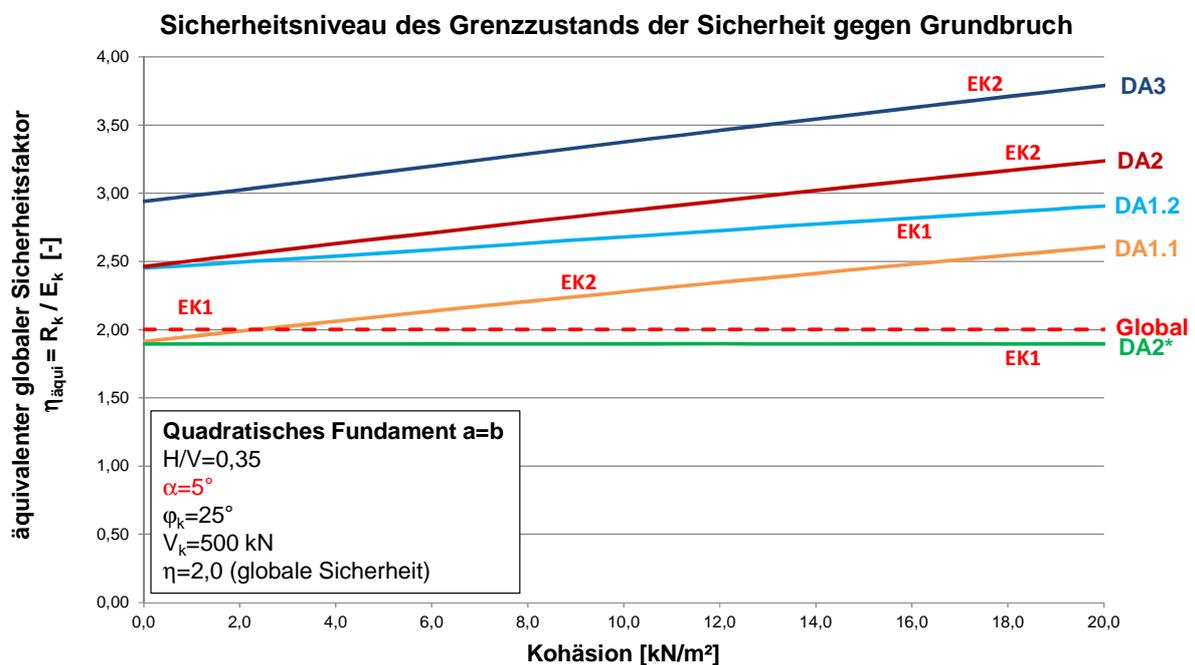


Abbildung A.8: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor bei einer Sohlneigung $\alpha \neq 0$ in Abhängigkeit der Kohäsion für die verschiedenen Nachweisverfahren

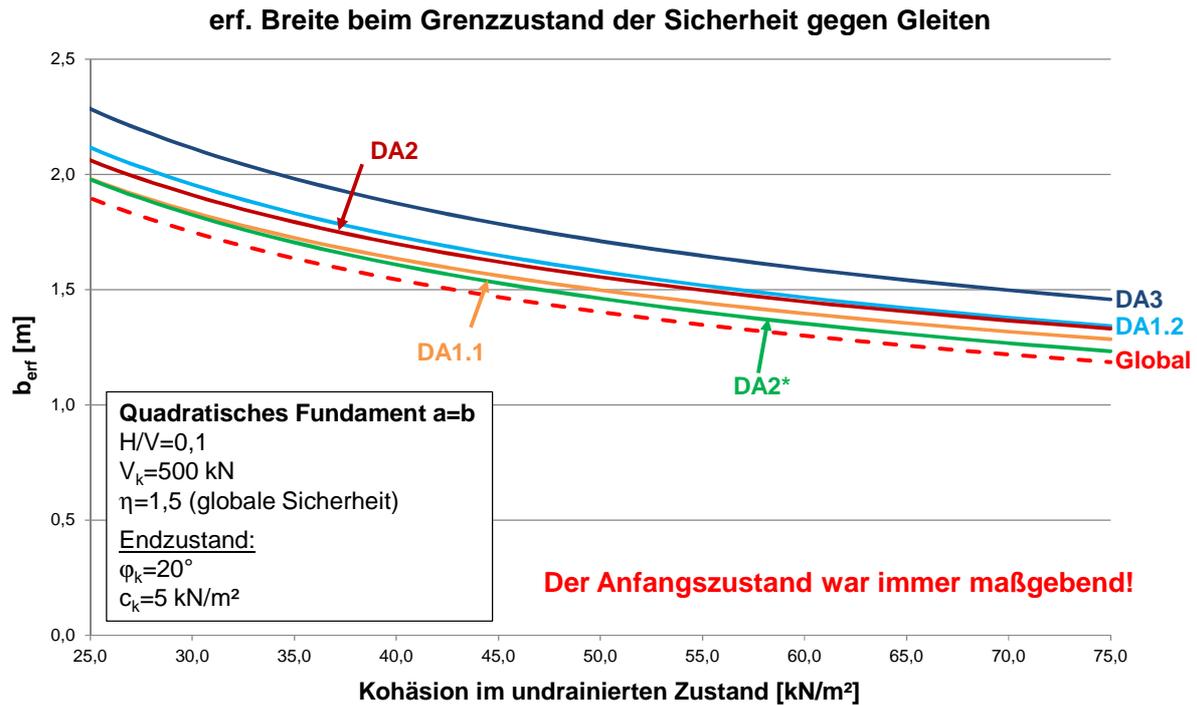


Abbildung A.9: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die verschiedenen Nachweisverfahren

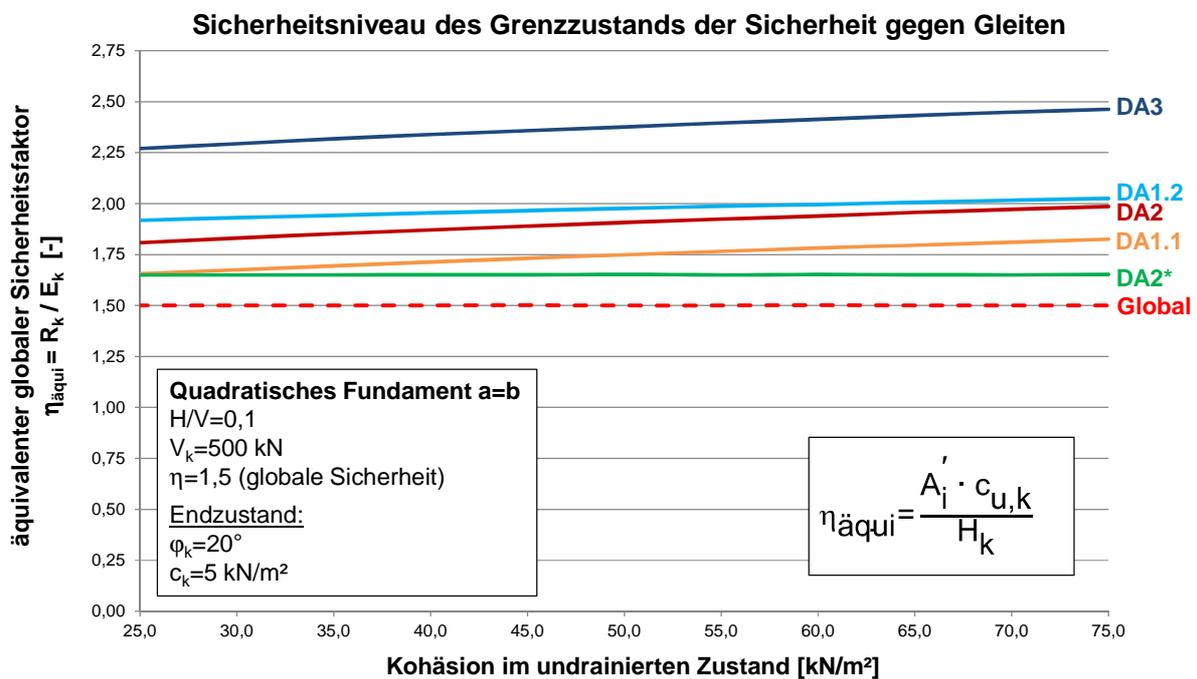


Abbildung A.10: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Kohäsion im undrainierten Zustand für die verschiedenen Nachweisverfahren

erf. Breite beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten

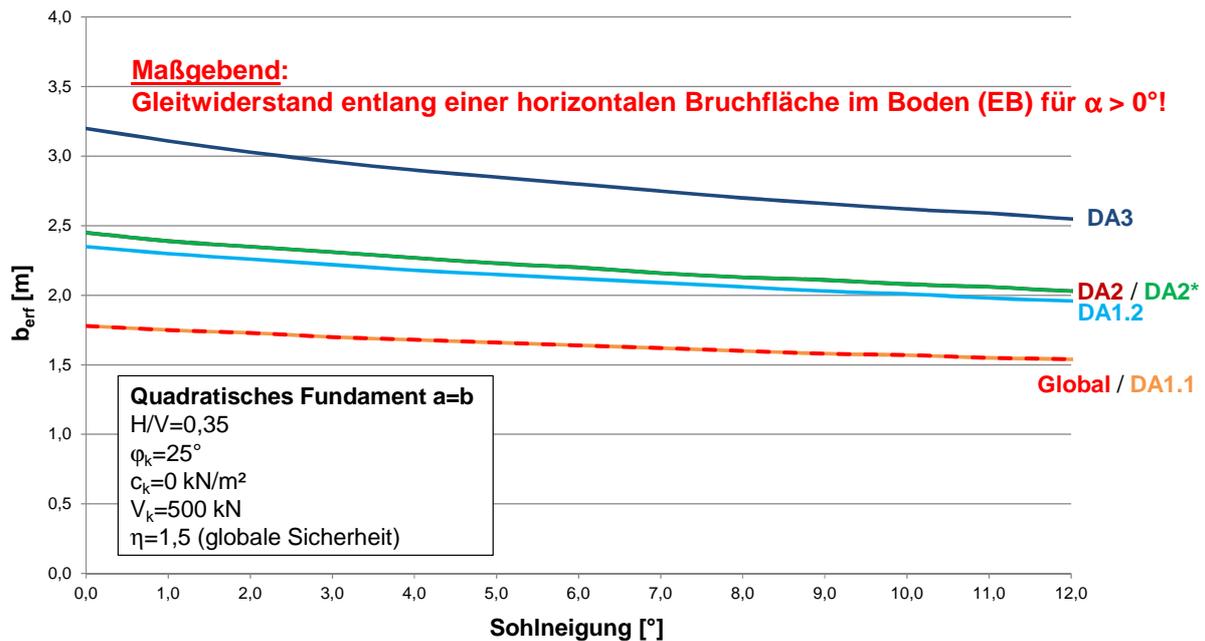


Abbildung A.11: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

Sicherheitsniveau des Grenzzustands der Sicherheit gegen Gleiten

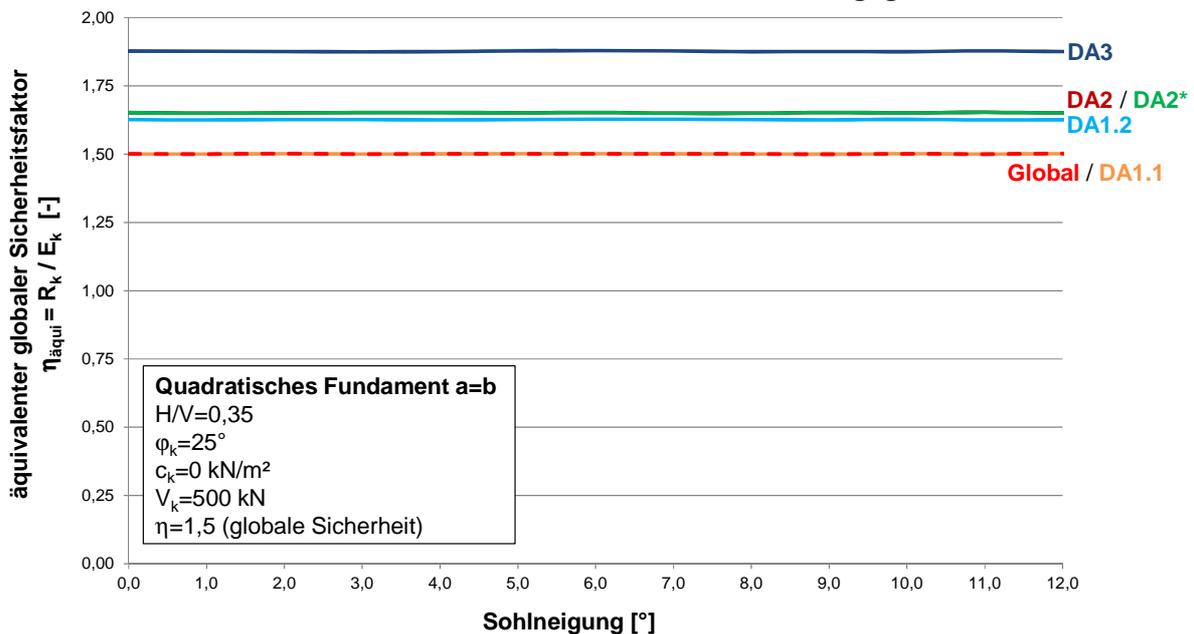


Abbildung A.12: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

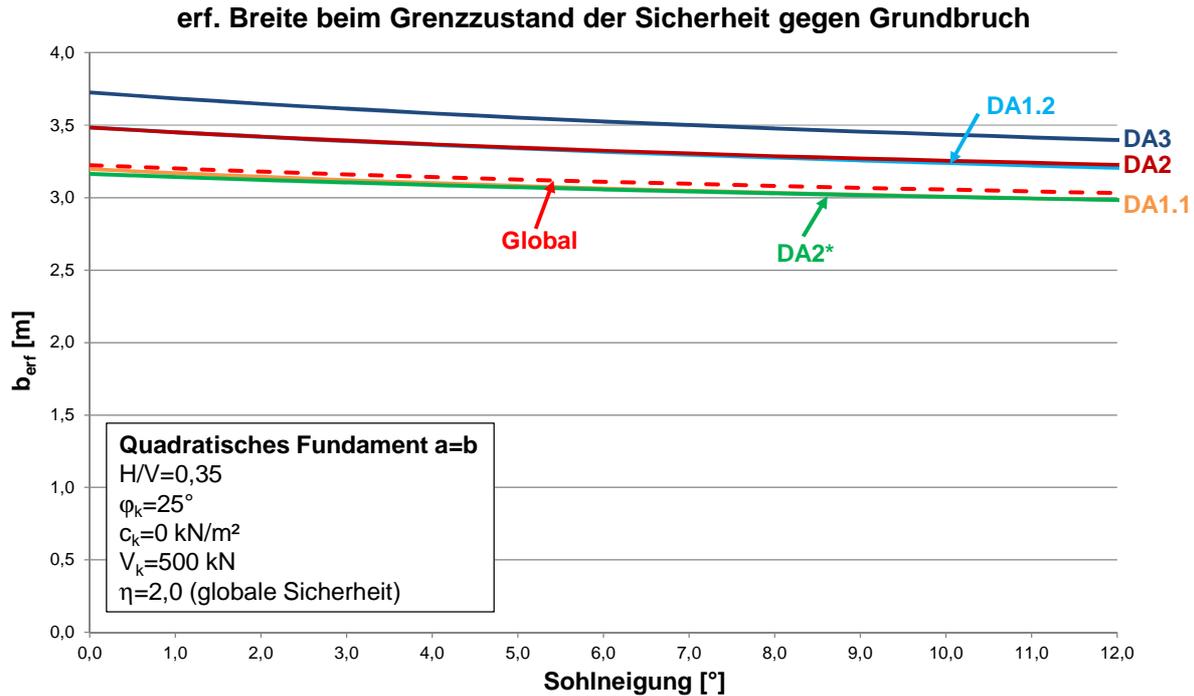


Abbildung A.13: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

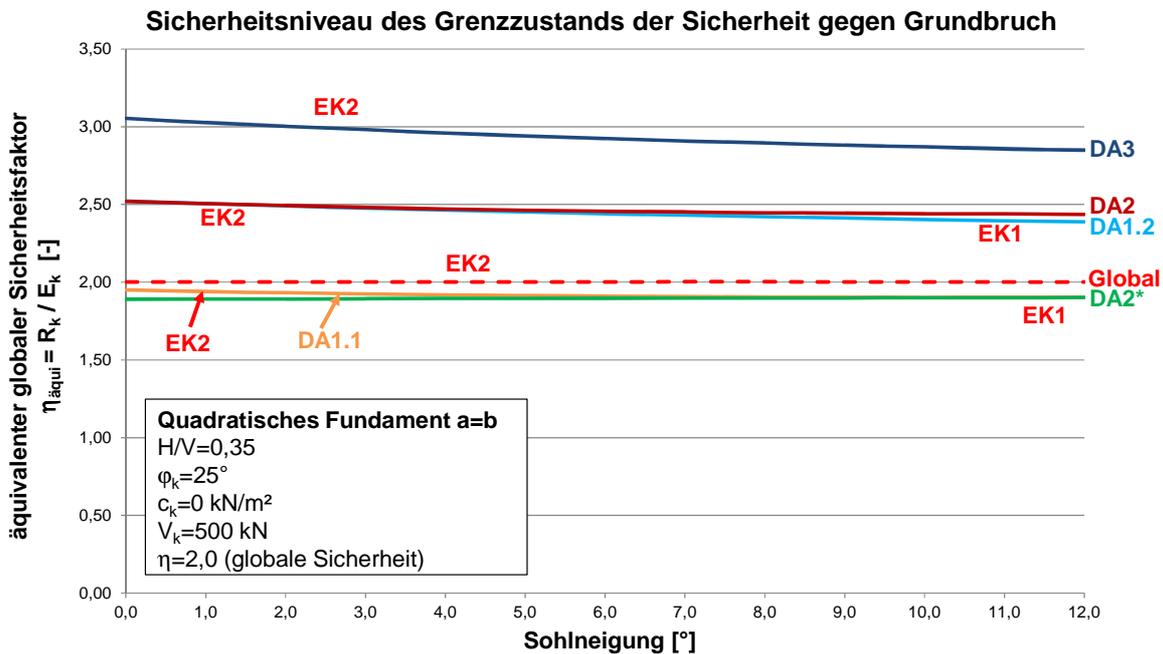


Abbildung A.14: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Sohlneigung für die verschiedenen Nachweisverfahren

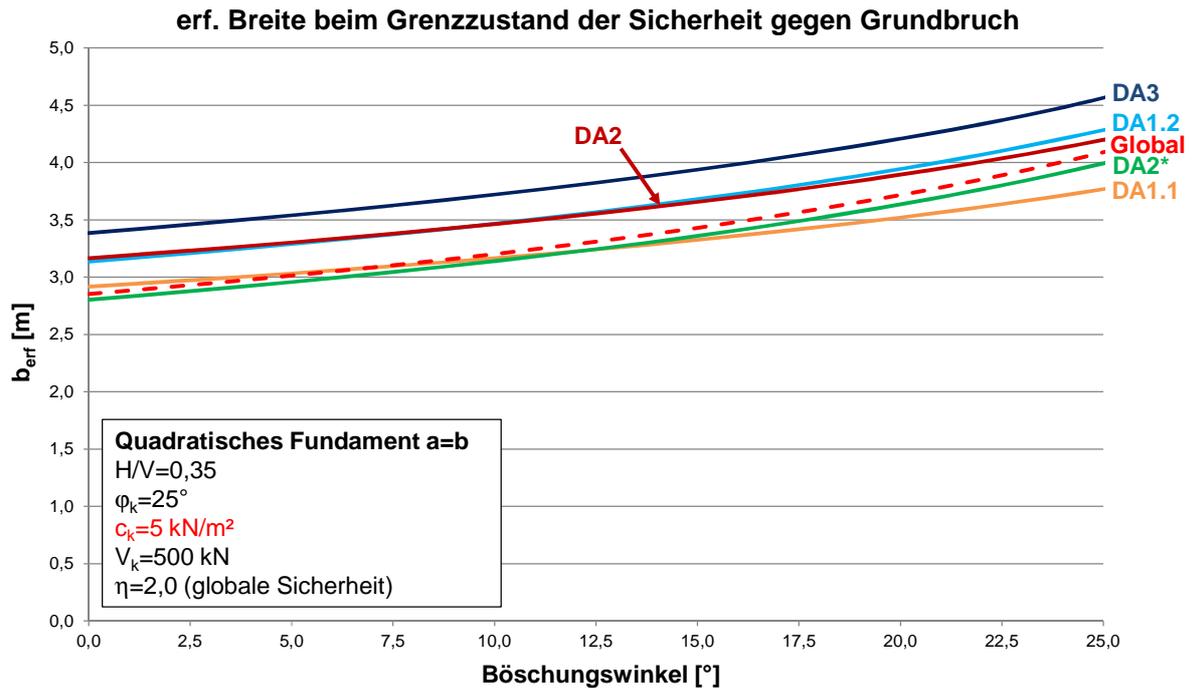


Abbildung A.15: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

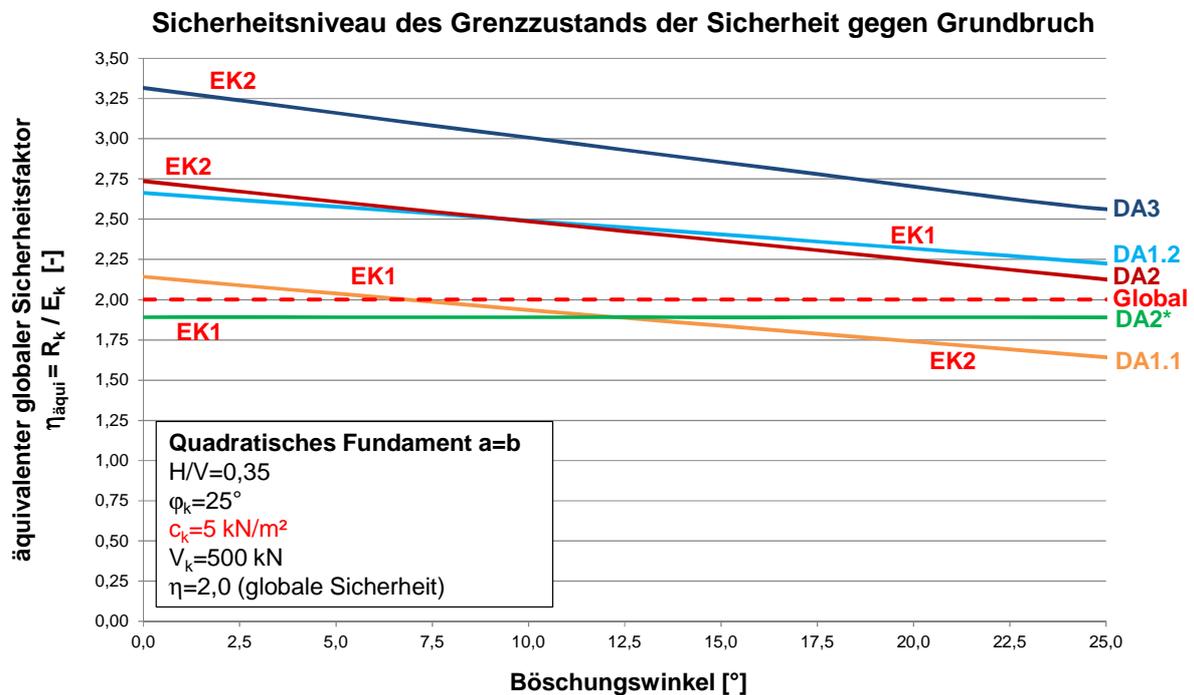


Abbildung A.16: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Böschungswinkels für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

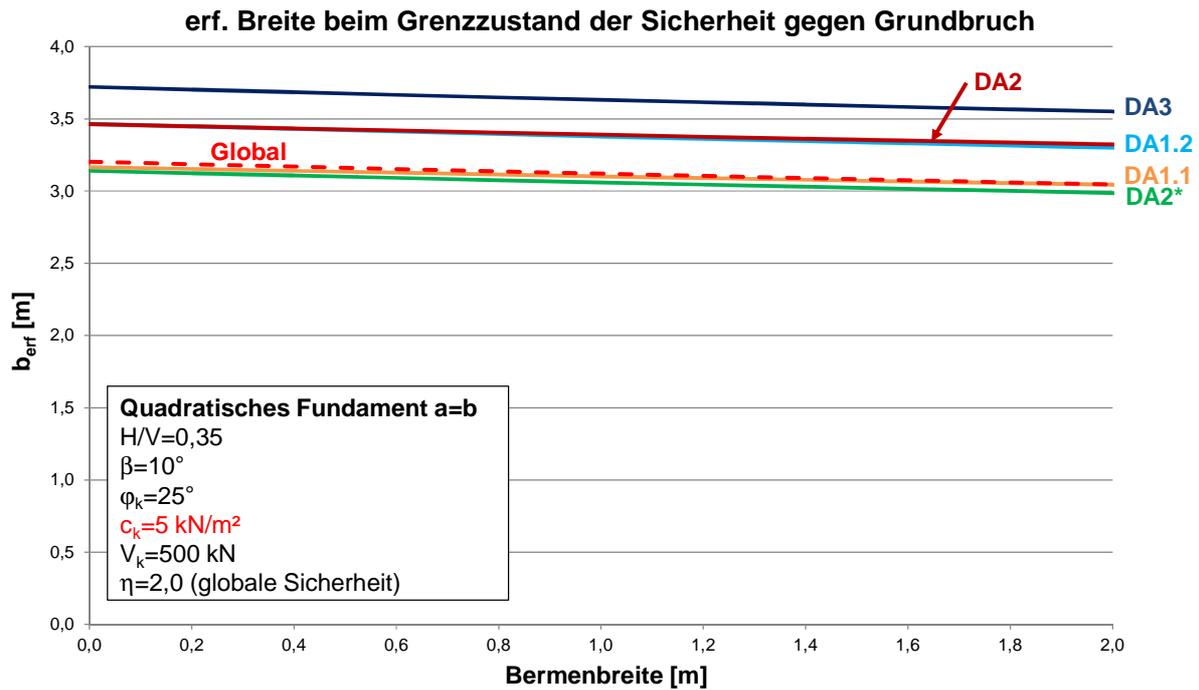


Abbildung A.17: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit der Bermenbreite für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

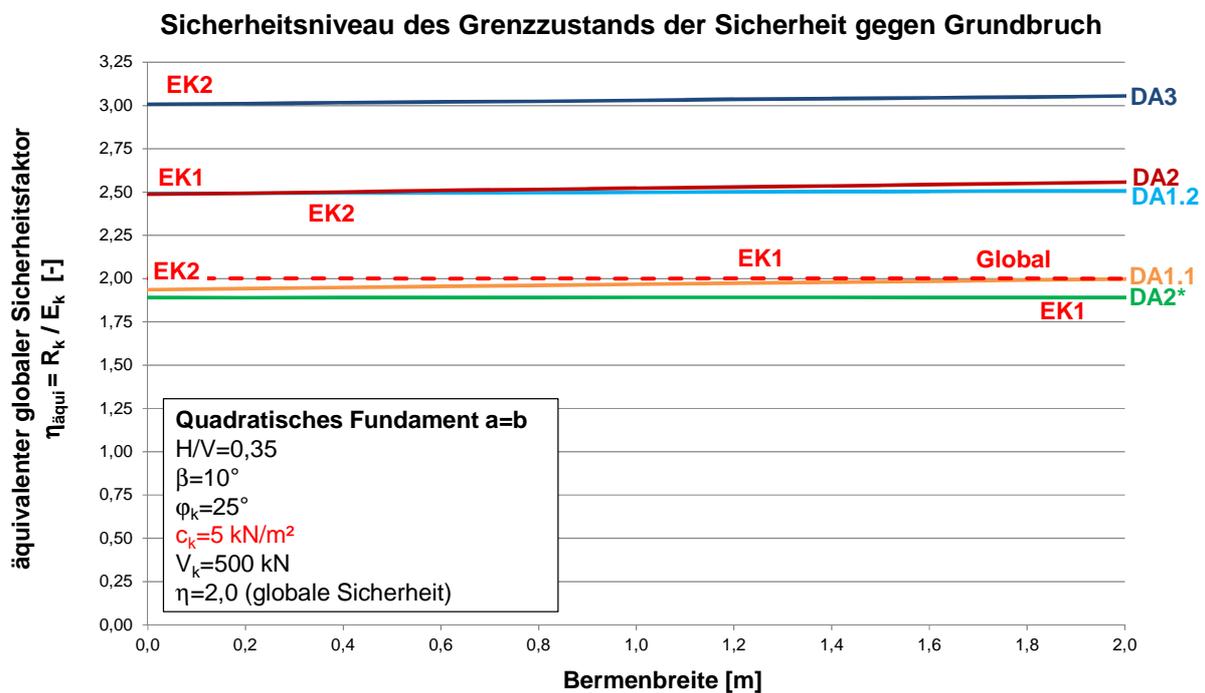


Abbildung A.18: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit der Bermenbreite für die verschiedenen Nachweisverfahren, $c_k=5 \text{ kN/m}^2$

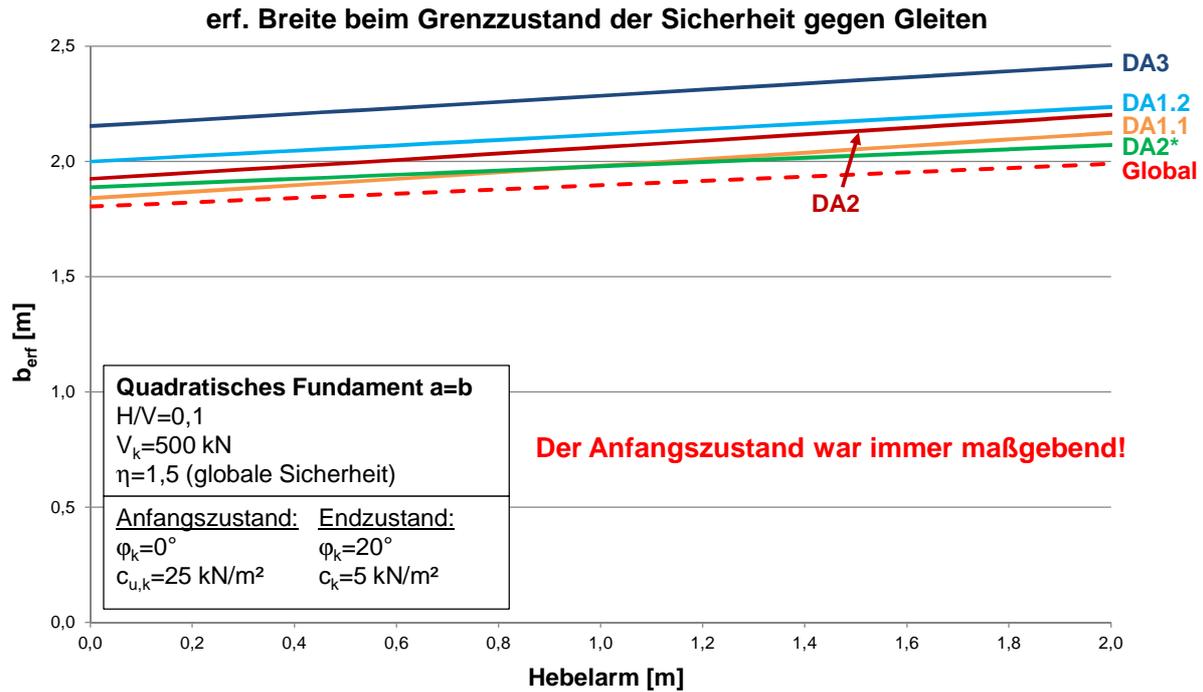


Abbildung A.19: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Hebelarms für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

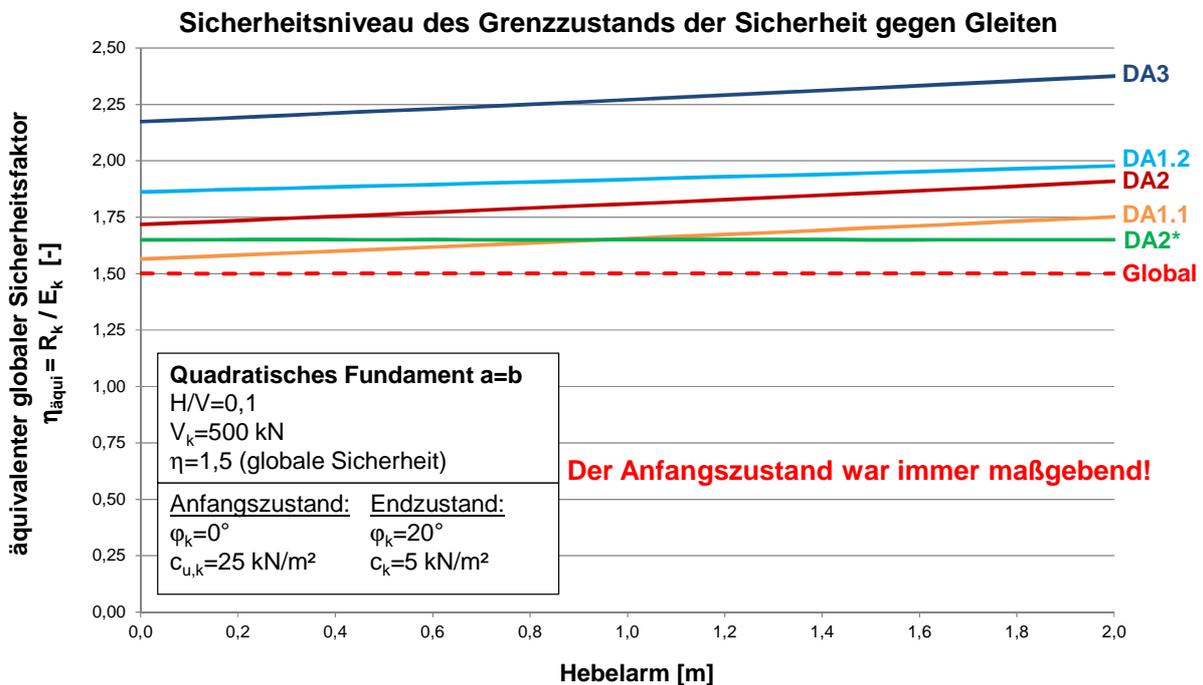


Abbildung A.20: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Hebelarms für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

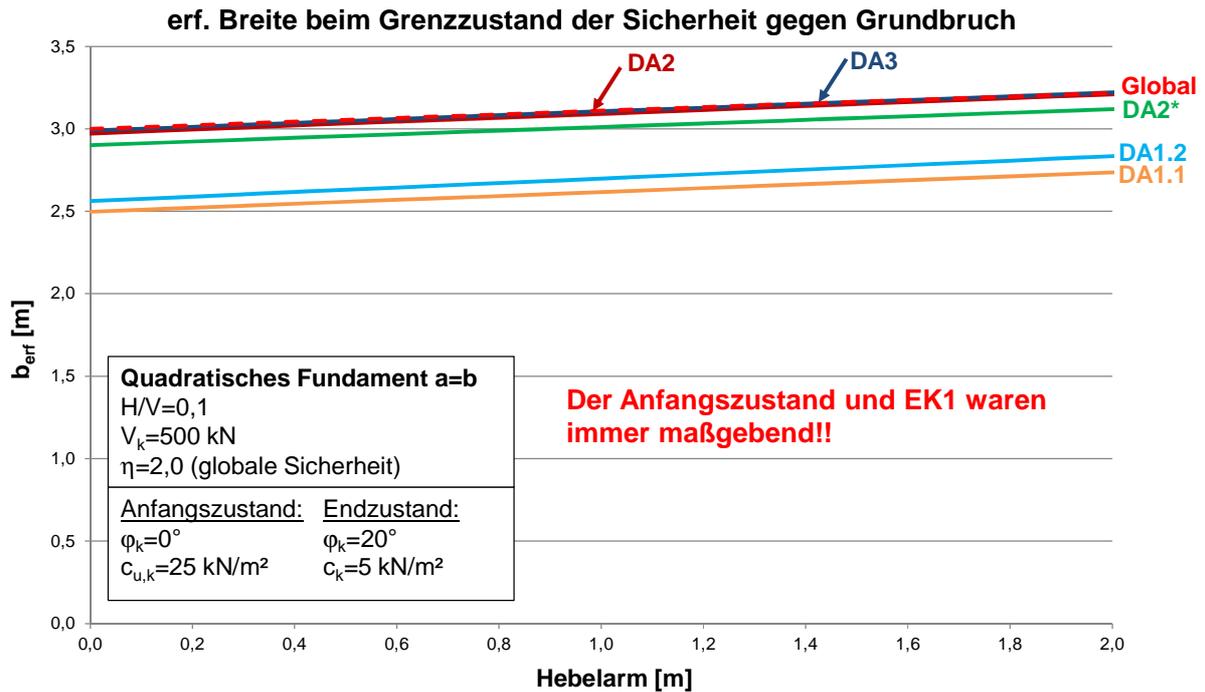


Abbildung A.21: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Hebelarms für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

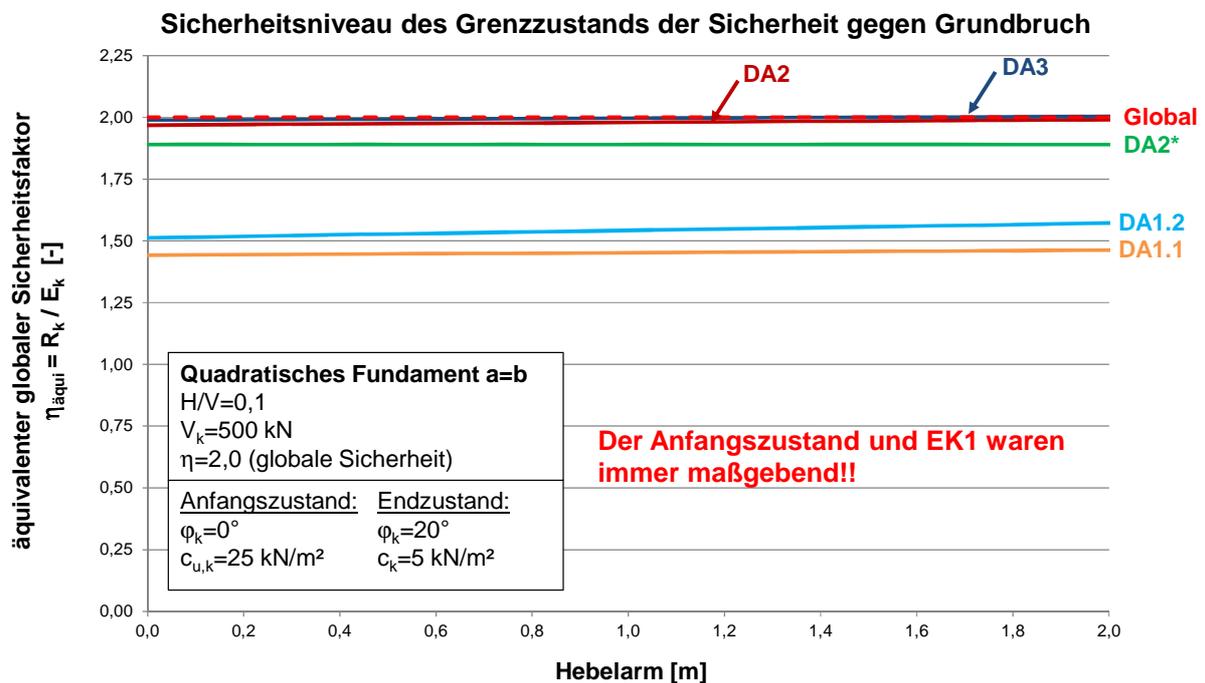


Abbildung A.22: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Hebelarms für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

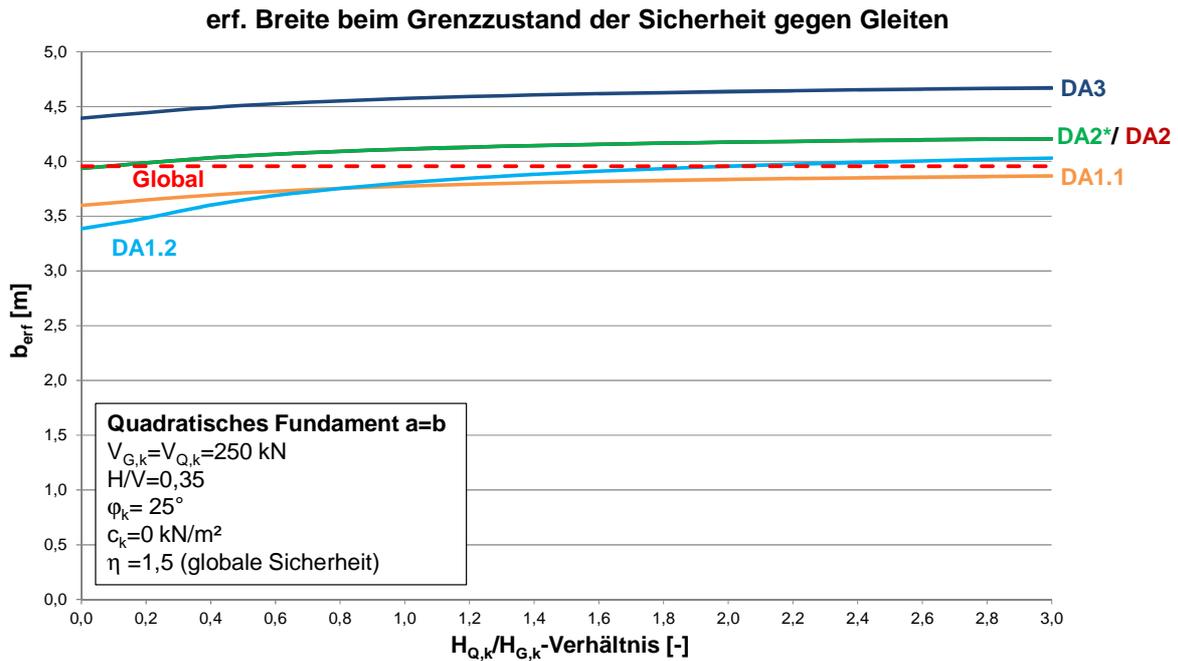


Abbildung A.23: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

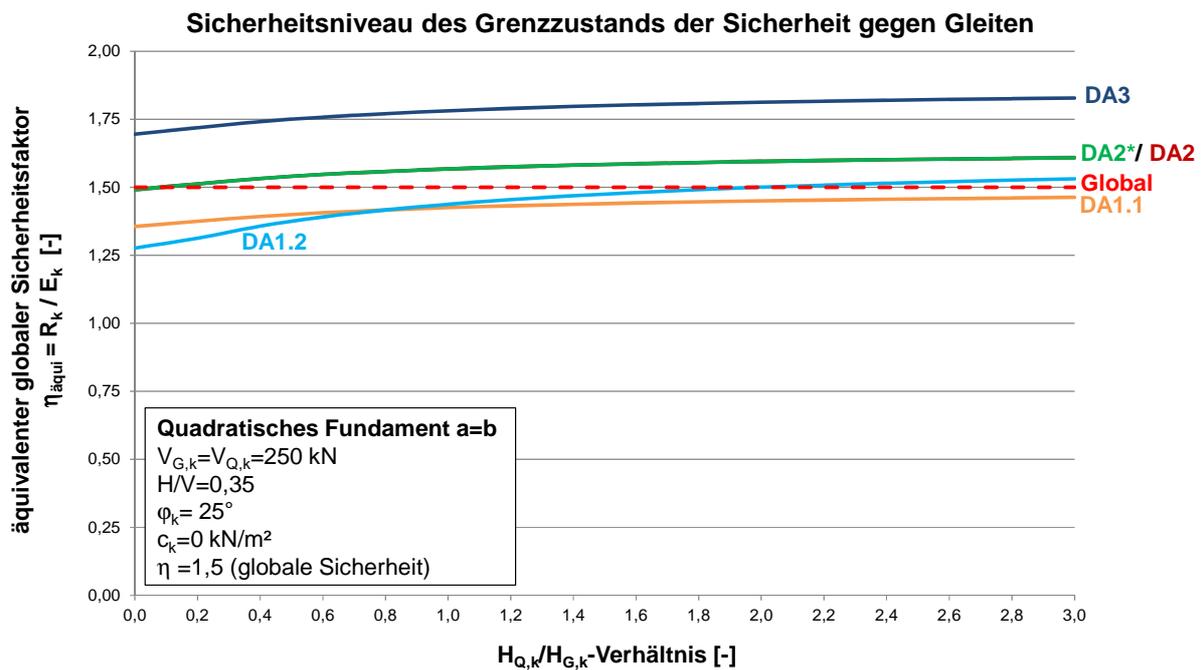


Abbildung A.24: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

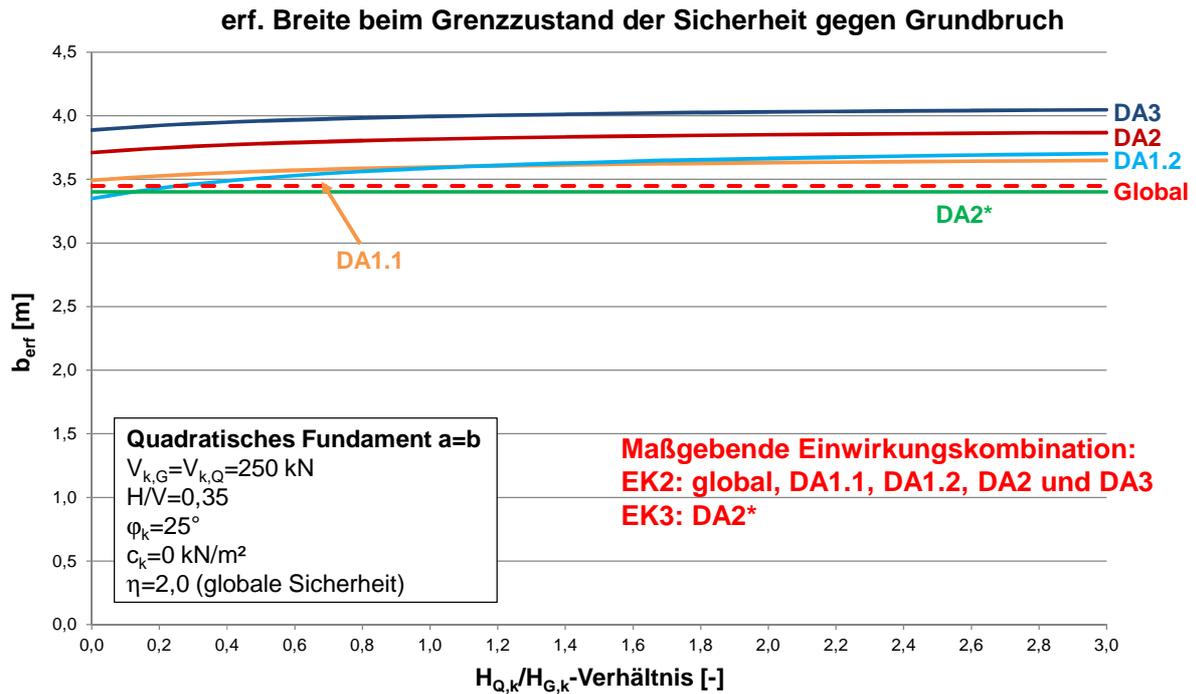


Abbildung A.25: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

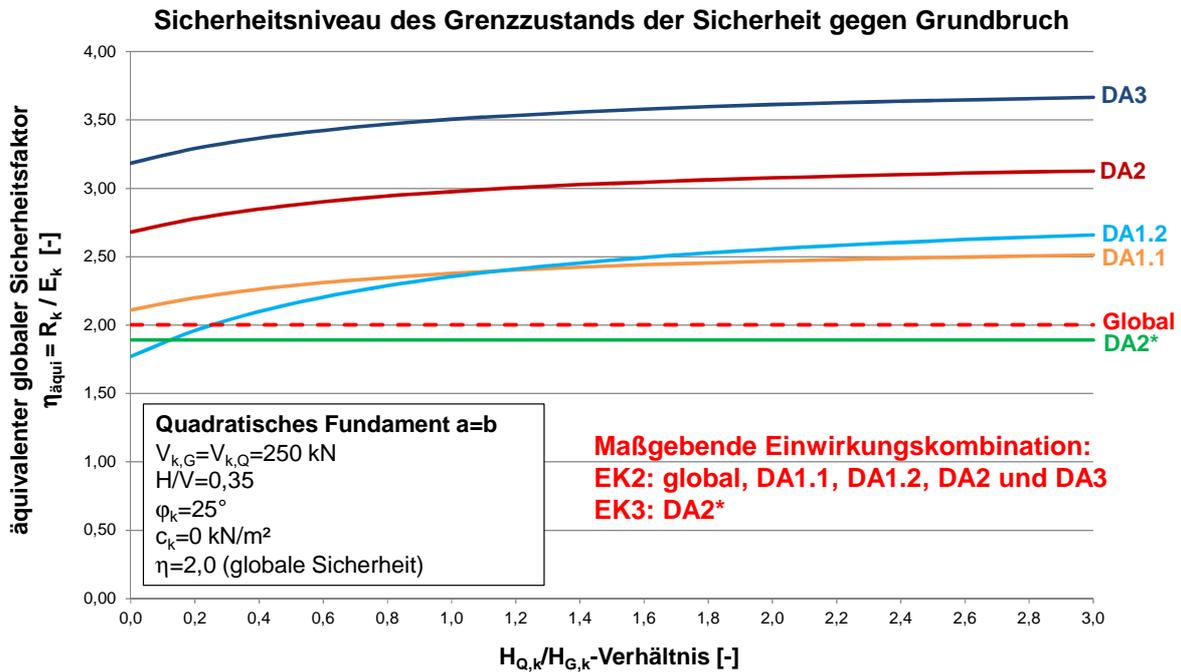


Abbildung A.26: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

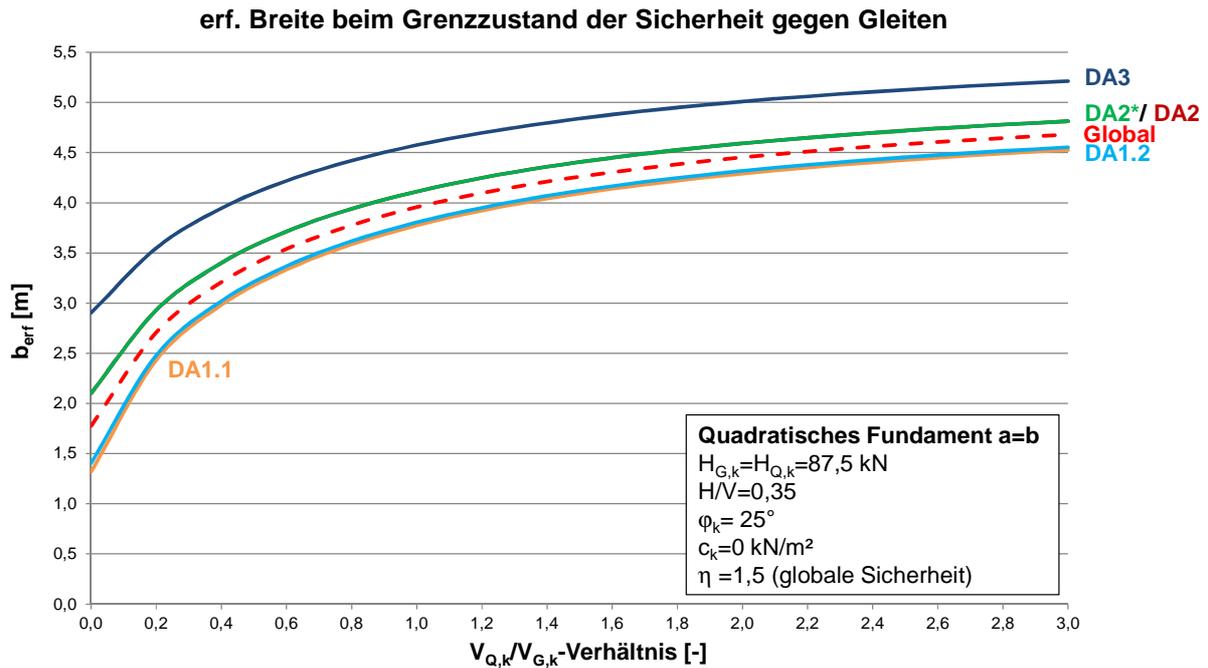


Abbildung A.27: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

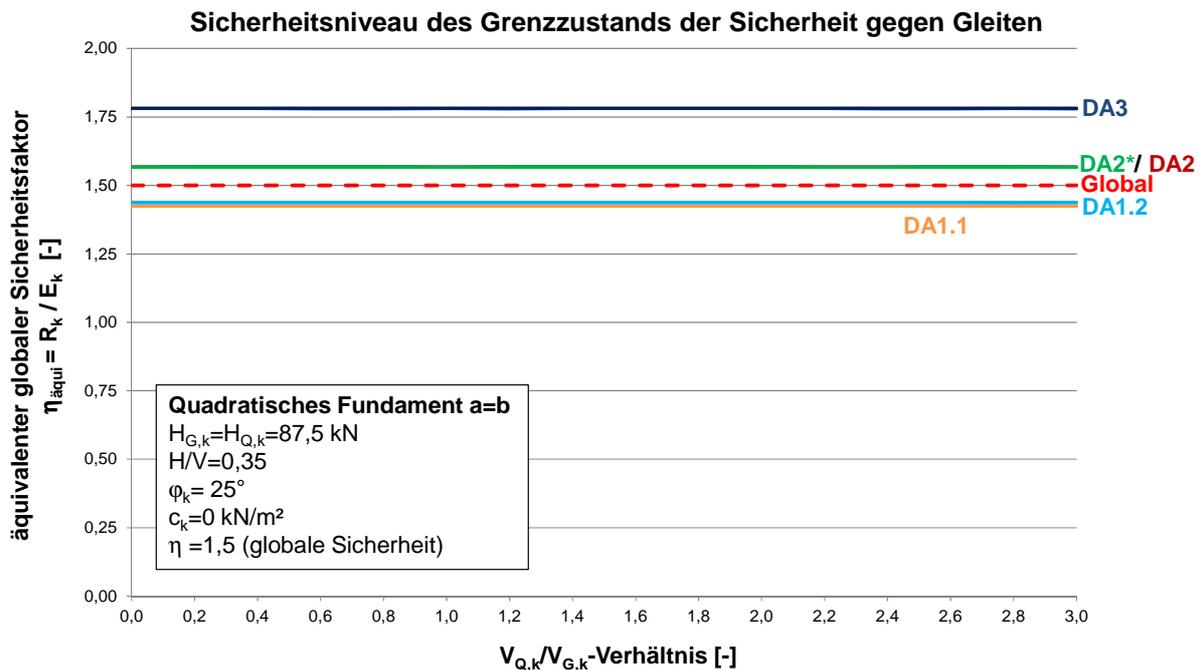


Abbildung A.28: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

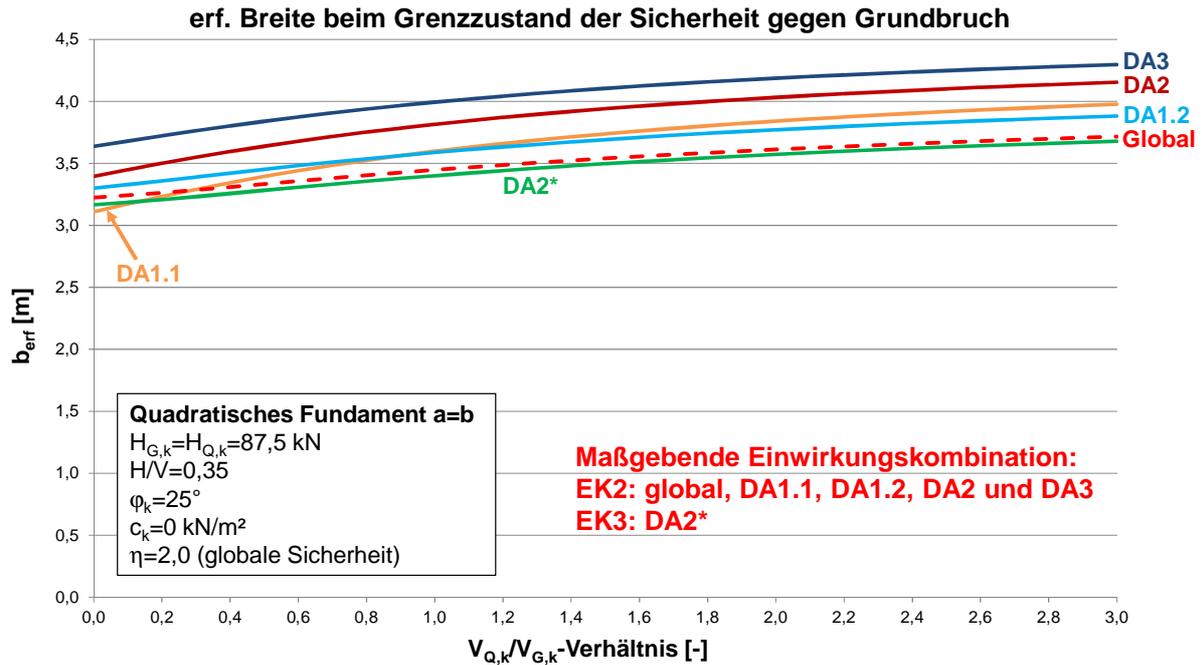


Abbildung A.29: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

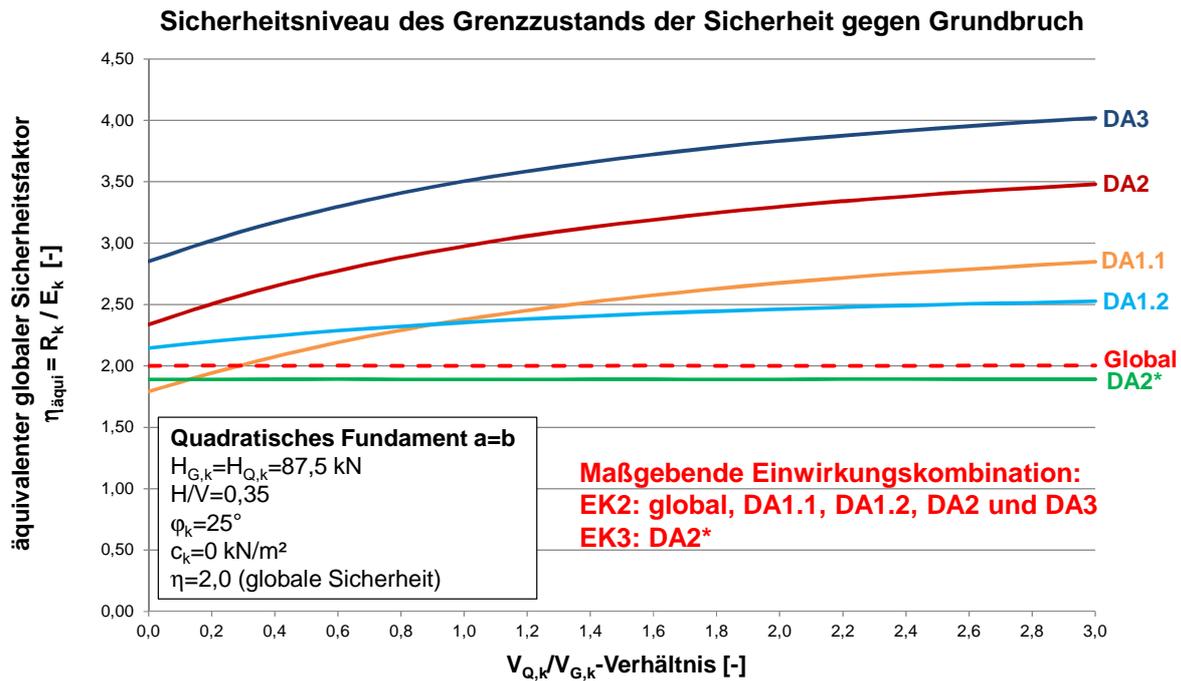


Abbildung A.30: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren

erf. Breite beim Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten

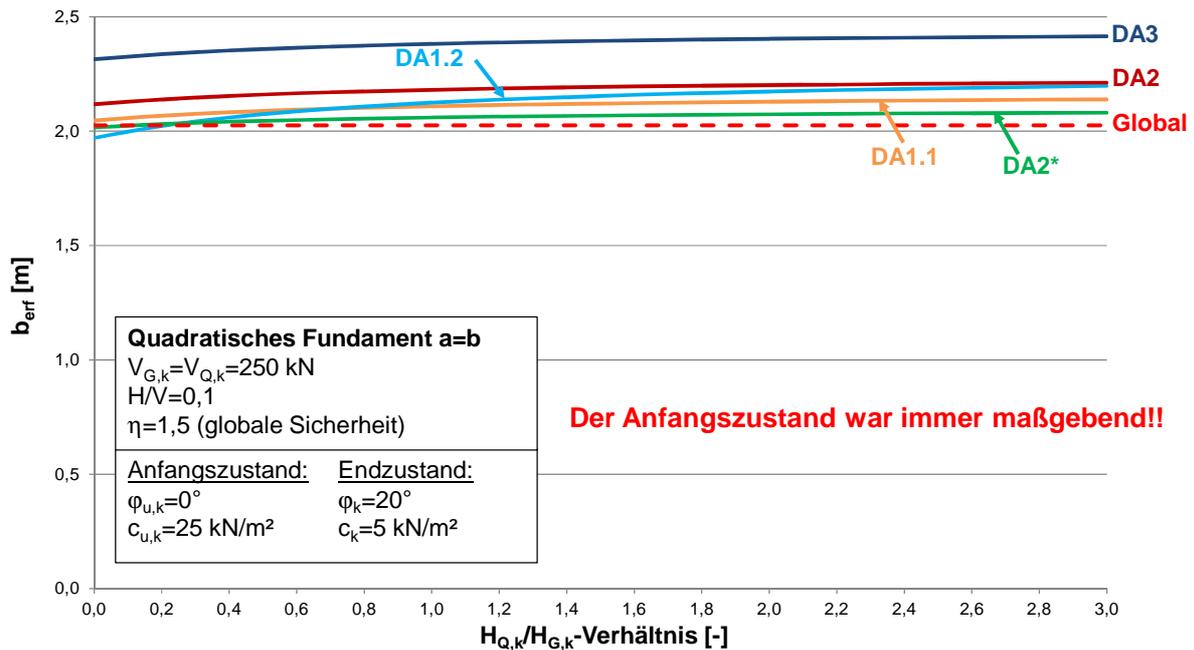


Abbildung A.31: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

Sicherheitsniveau des Grenzzustands der Sicherheit gegen Gleiten

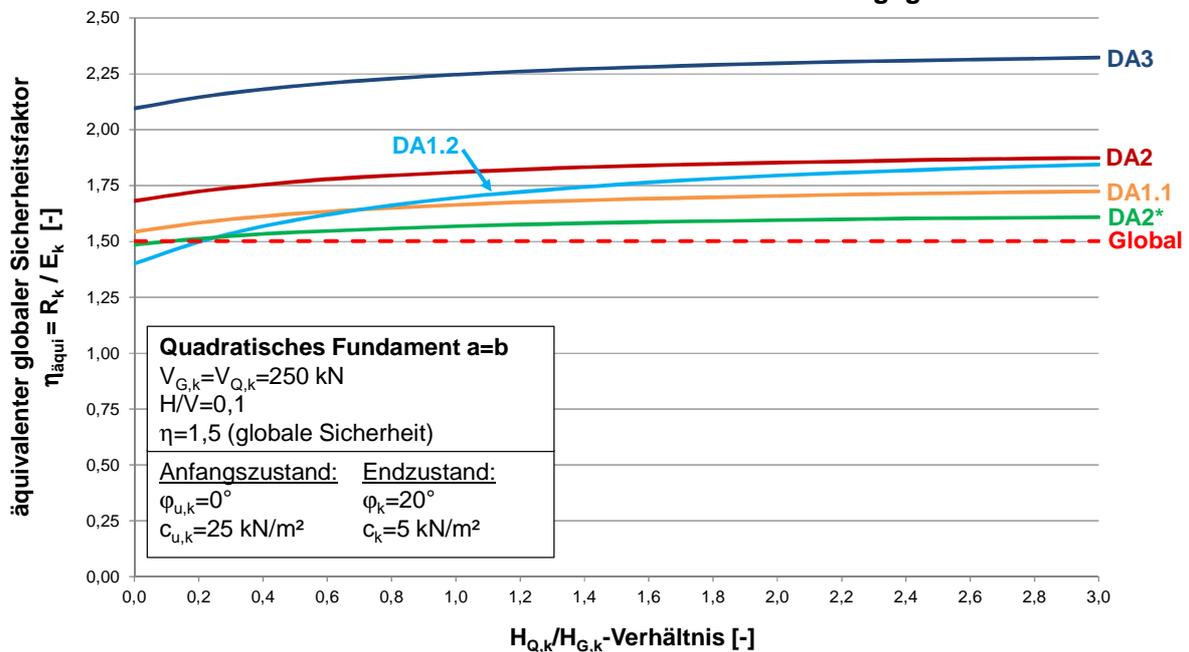


Abbildung A.32: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

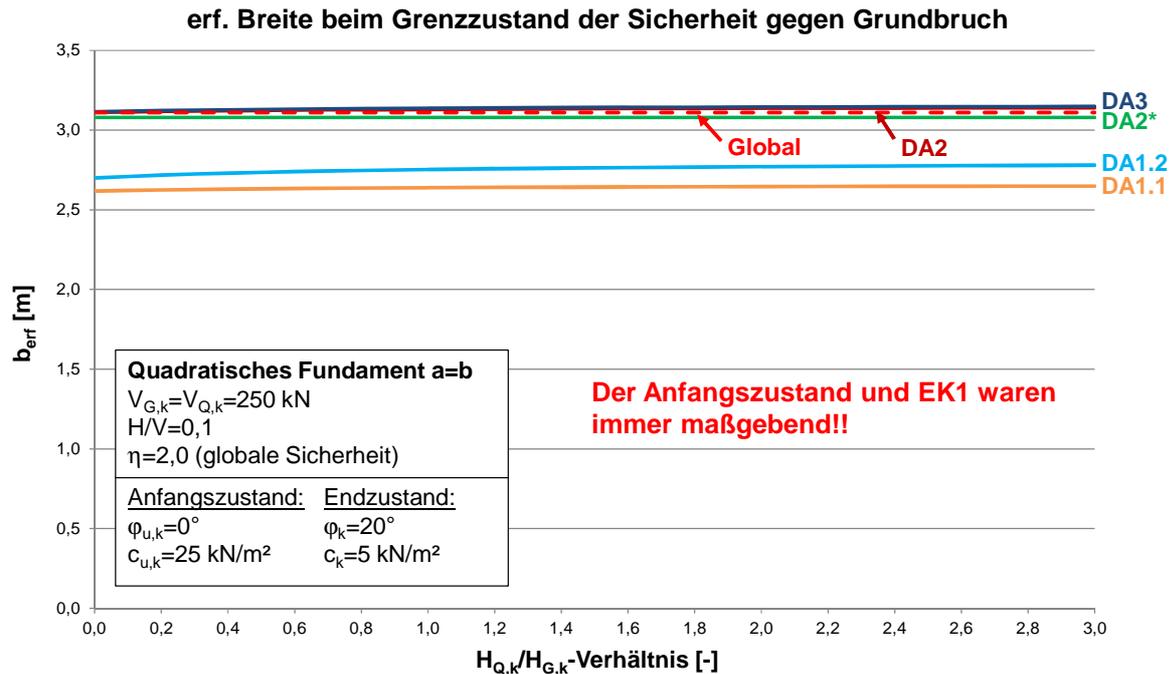


Abbildung A.33: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

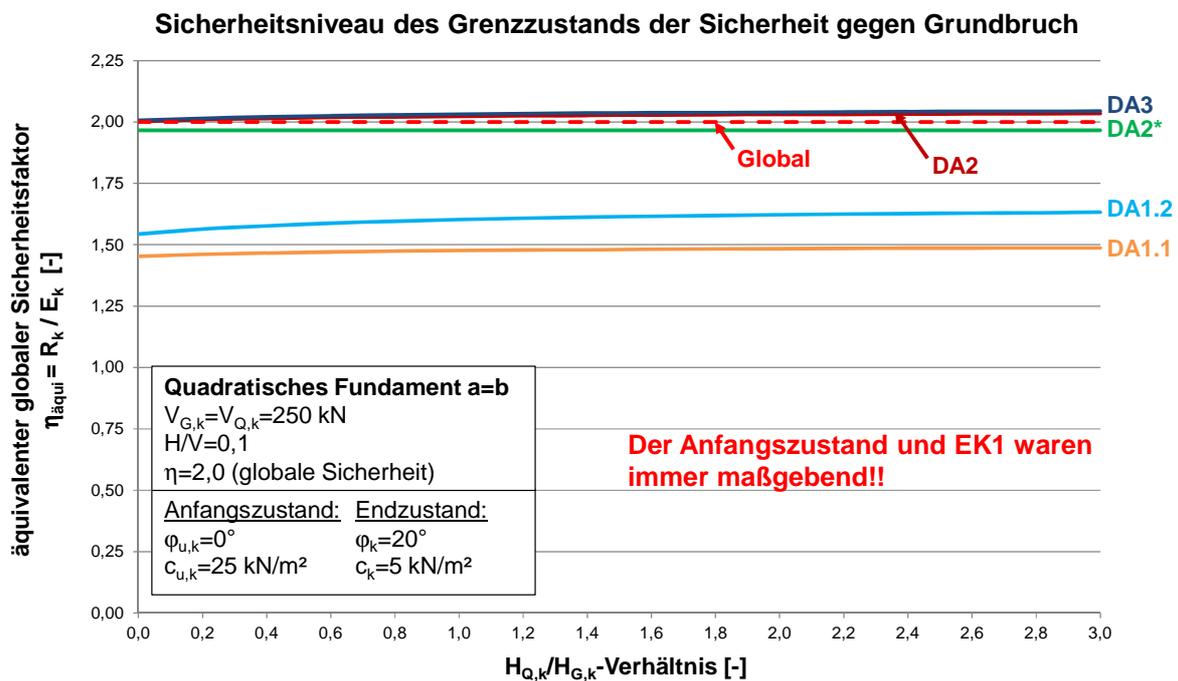


Abbildung A.34: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $H_{Q,k}/H_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

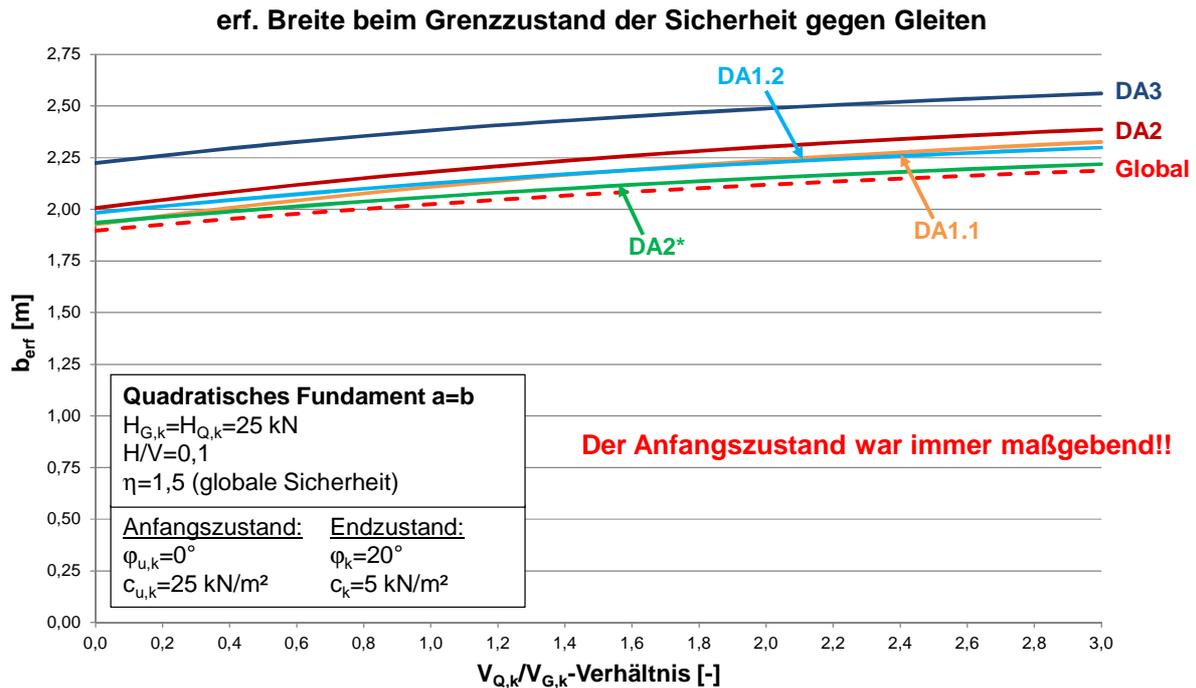


Abbildung A.35: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

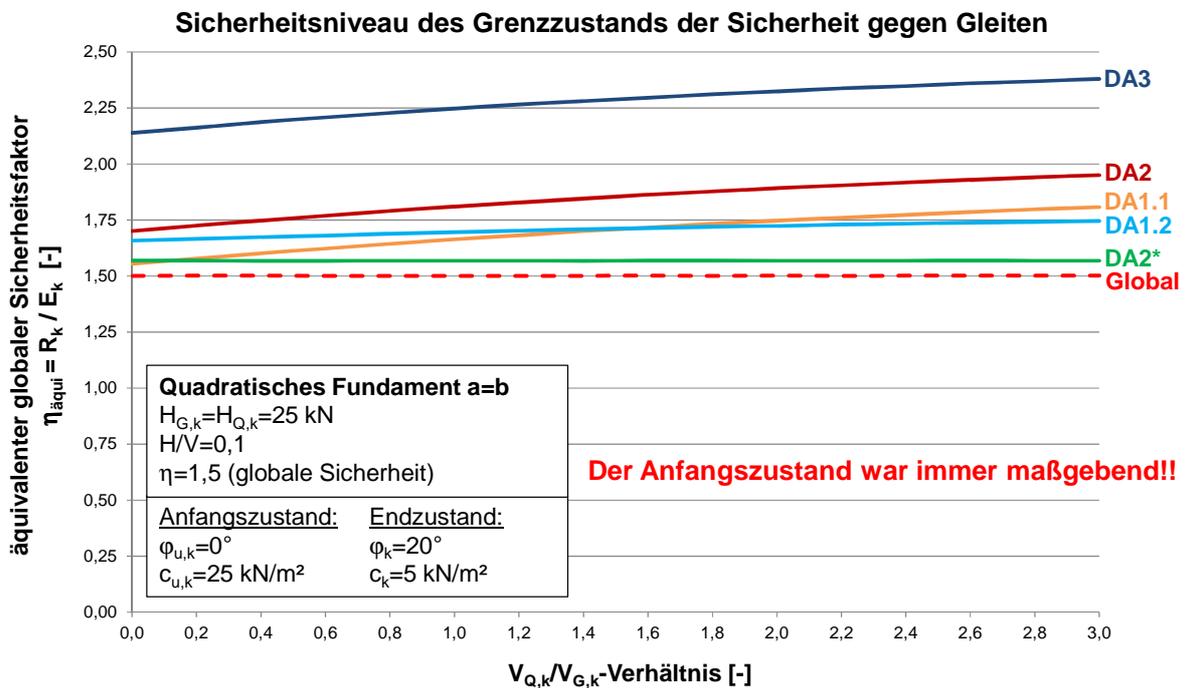


Abbildung A.36: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

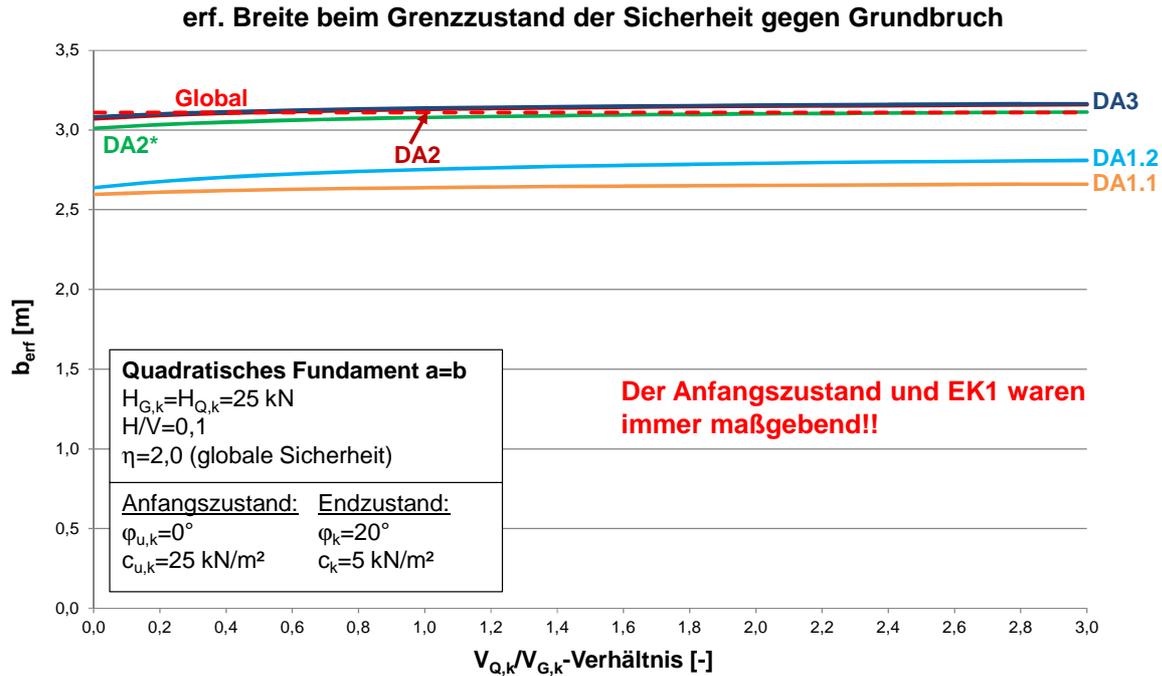


Abbildung A.37: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, erforderliche Fundamentbreite in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

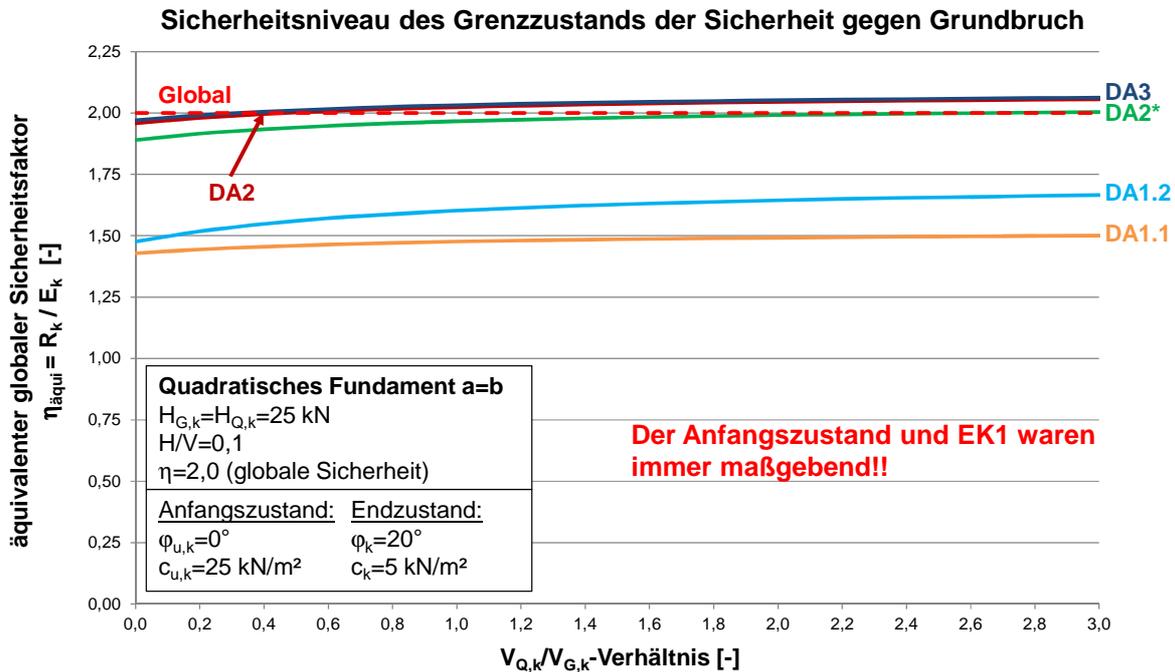


Abbildung A.38: Grenzzustand der Sicherheit gegen Grundbruch, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Untersuchung der drainierten und undrainierten Verhältnisse

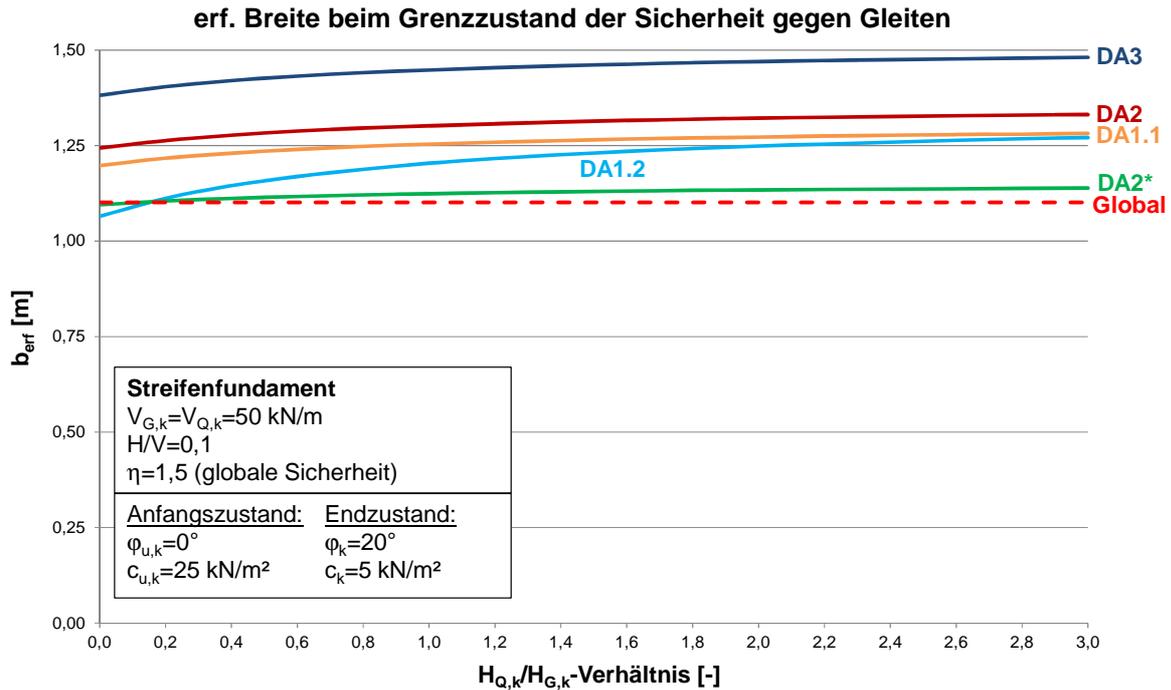


Abbildung A.39: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite für drainierte und undrainierte Verhältnisse für das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ zwischen 0 und 3,0 für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

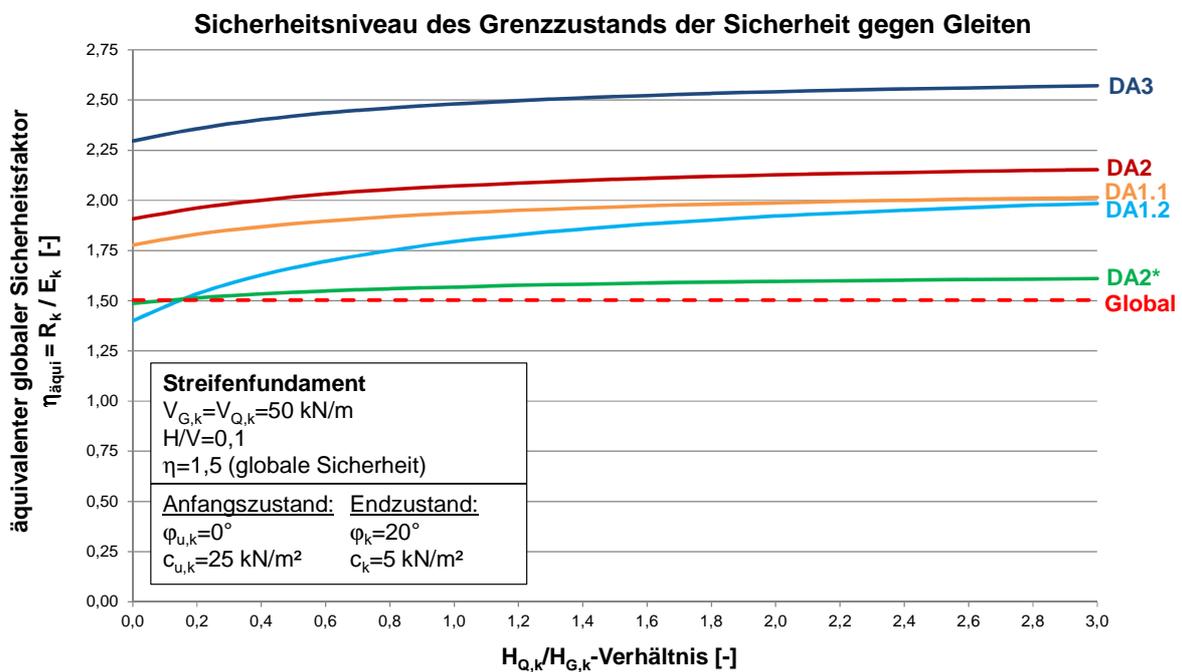


Abbildung A.40: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse für das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ zwischen 0 und 3,0 für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

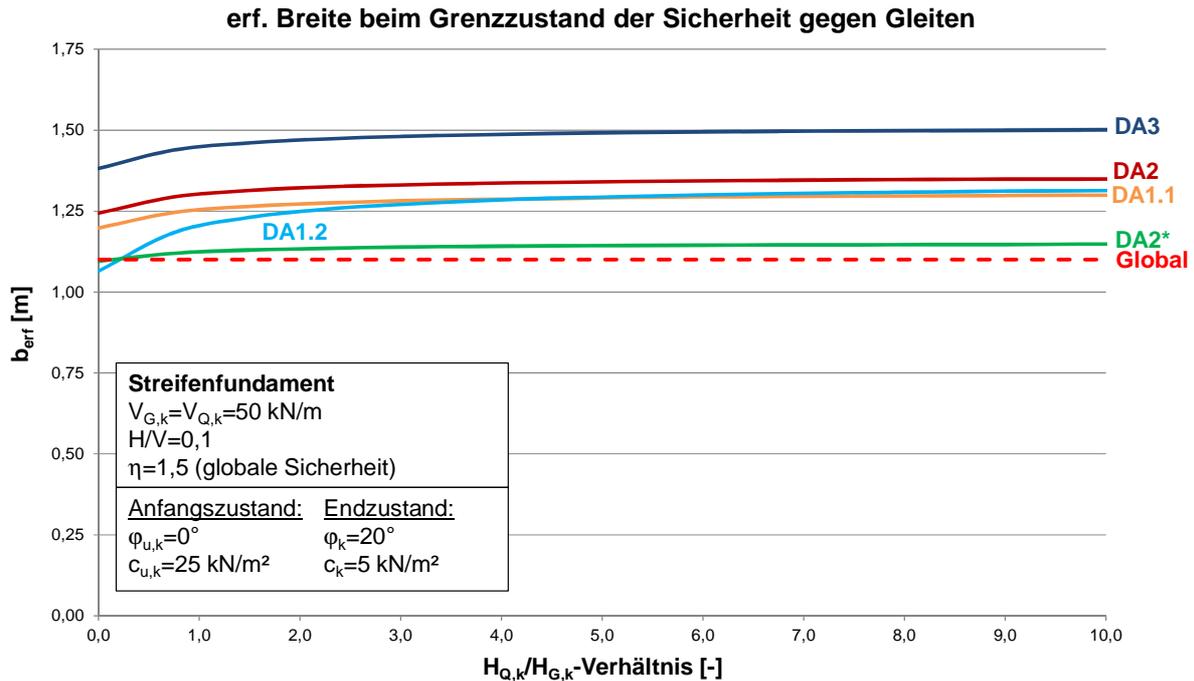


Abbildung A.41: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite für drainierte und undrainierte Verhältnisse für das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ zwischen 0 und 10,0 für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

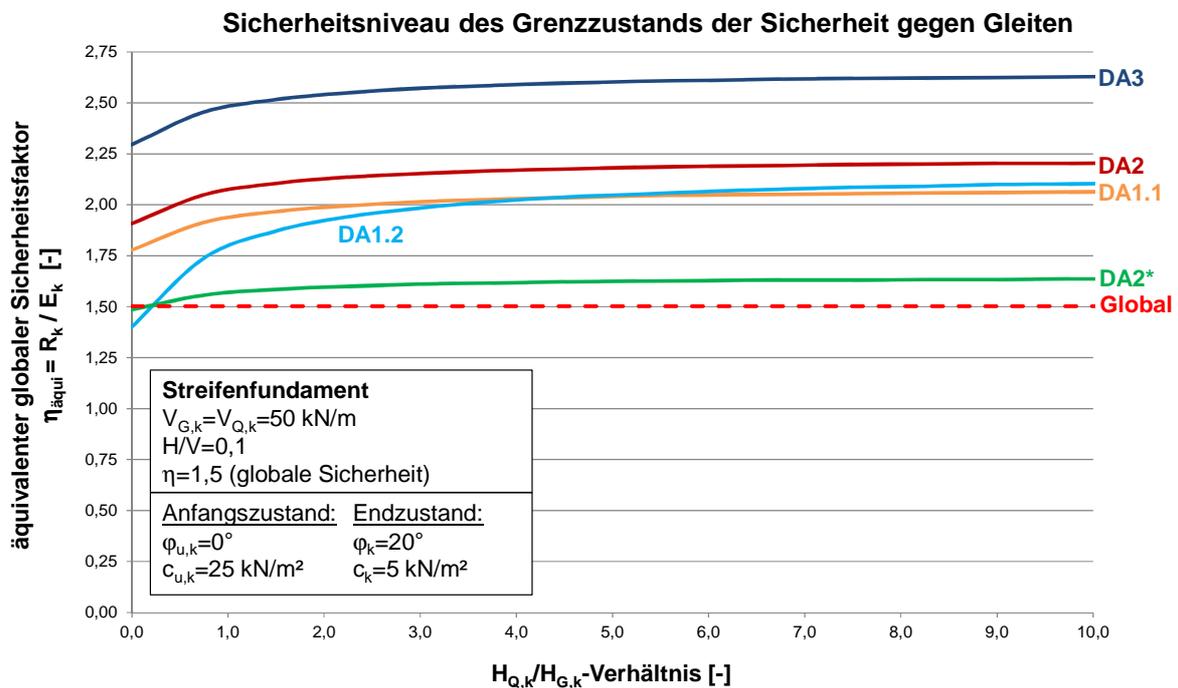


Abbildung A.42: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse für das Verhältnis $H_{Q,k}/H_{G,k}$ zwischen 0 und 10,0 für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

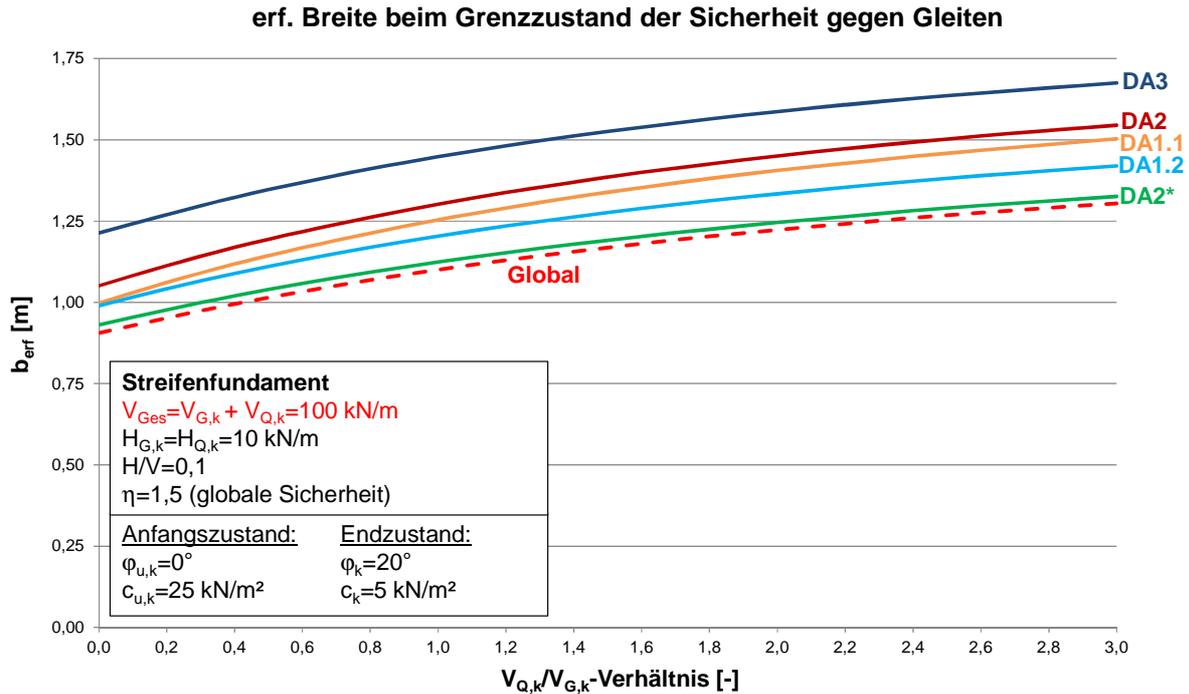


Abbildung A.43: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite für drainierte und undrainierte Verhältnisse mit $V_{Ges} = 100 \text{ kN/m}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

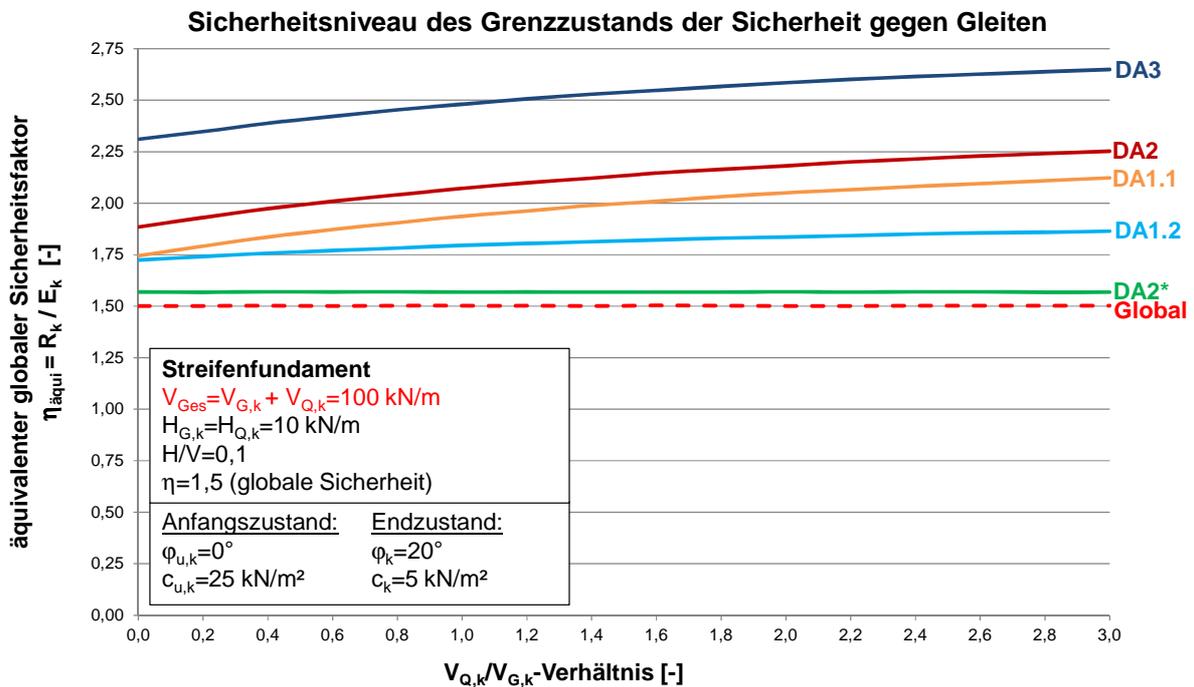


Abbildung A.44: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse mit $V_{Ges} = 100 \text{ kN/m}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

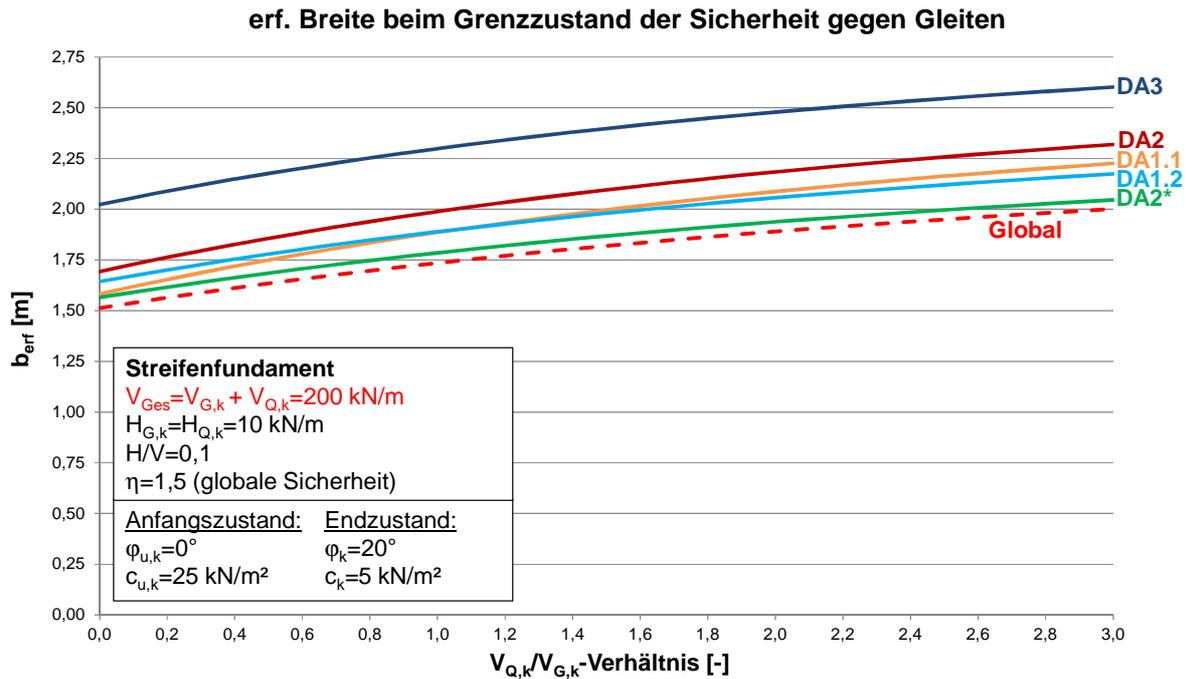


Abbildung A.45: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, erforderliche Fundamentbreite für drainierte und undrainierte Verhältnisse mit $V_{Ges} = 200 \text{ kN/m}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

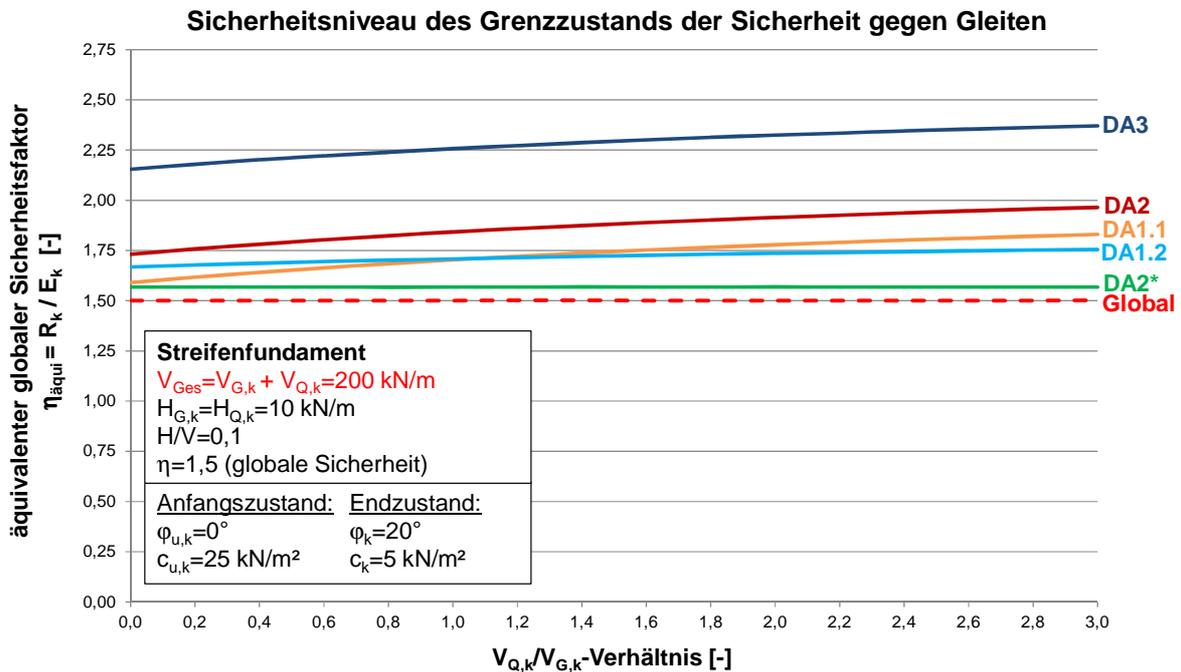


Abbildung A.46: Grenzzustand der Sicherheit gegen Gleiten, äquivalenter globaler Sicherheitsfaktor für drainierte und undrainierte Verhältnisse mit $V_{Ges} = 200 \text{ kN/m}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses $V_{Q,k}/V_{G,k}$ für die verschiedenen Nachweisverfahren, Streifenfundament

Anhang C: Weitere Diagramme – axial beanspruchter Pfahl

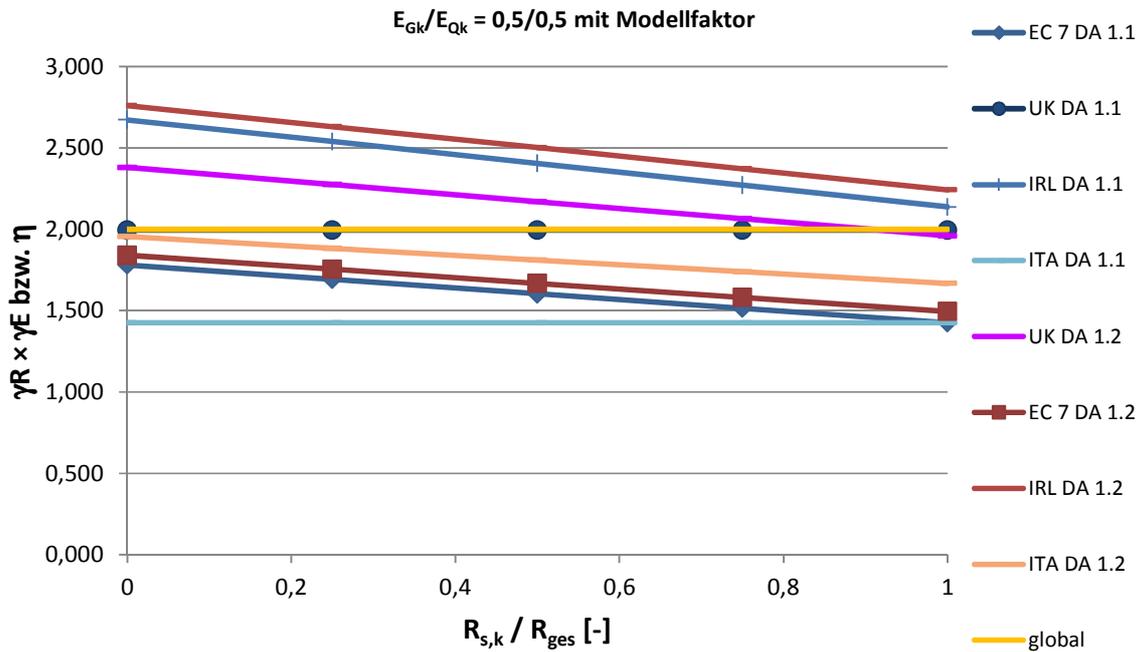


Abbildung A.47: Nachweisverfahren DA 1.1 und 1.2, Variation der Widerstände mit Berücksichtigung des Modellfaktors

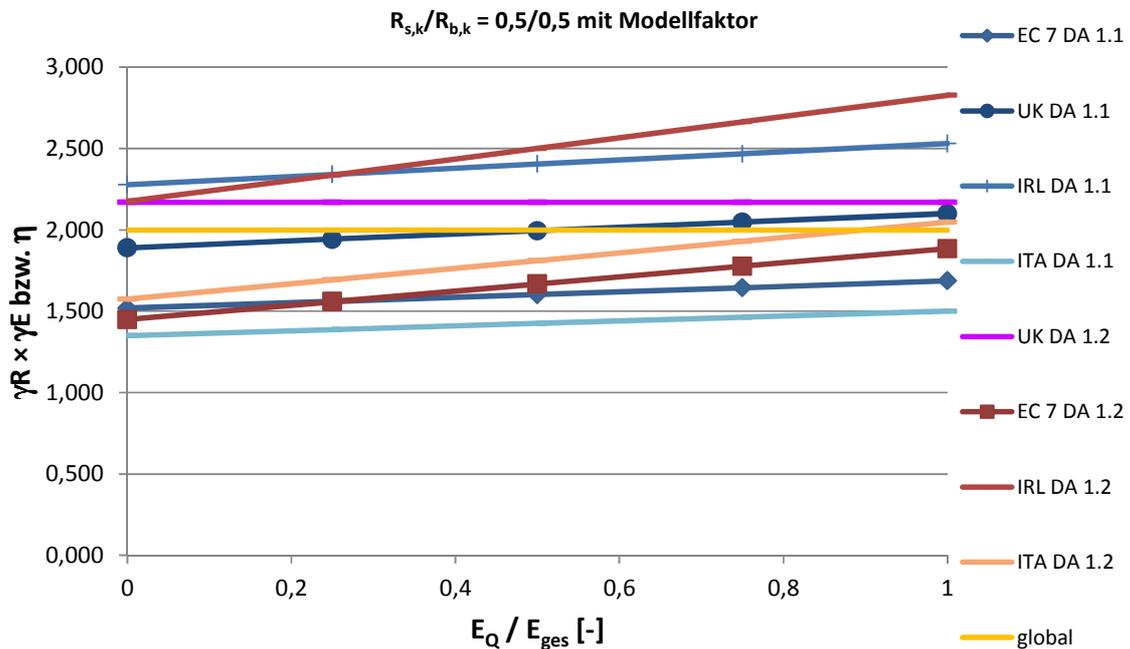


Abbildung A.48: Nachweisverfahren DA 1.1 und 1.2, Variation der Einwirkungen mit Berücksichtigung des Modellfaktors

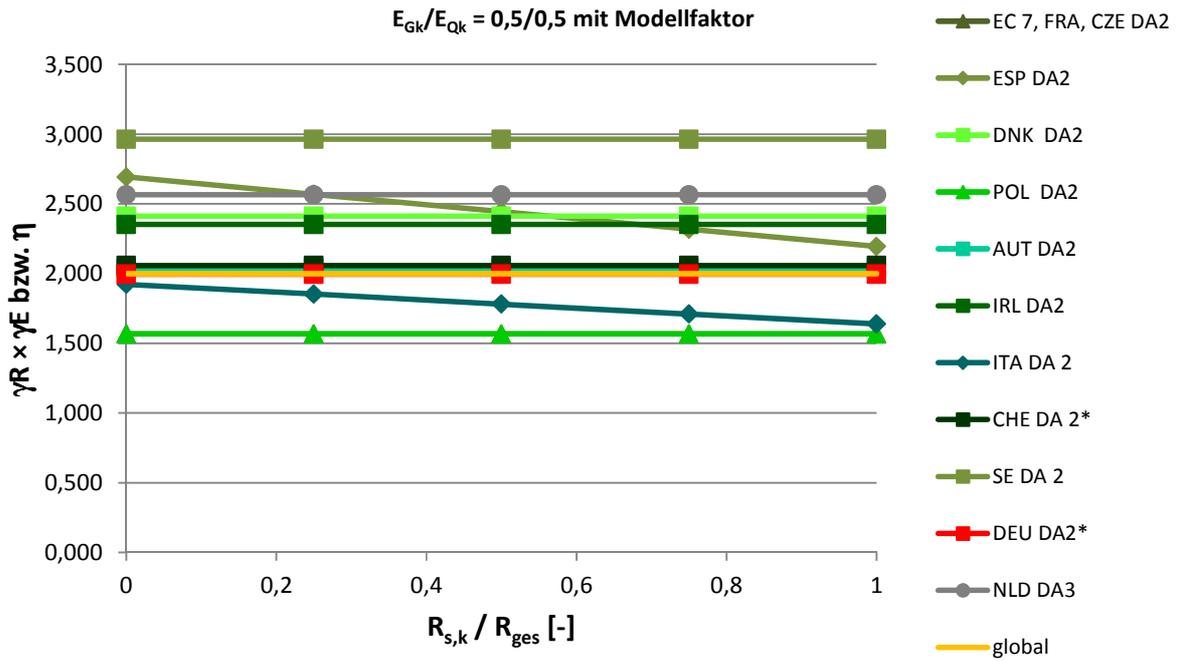


Abbildung A.49: Nachweisverfahren DA 2 und 3, Variation der Widerstände mit Berücksichtigung des Modellfaktors

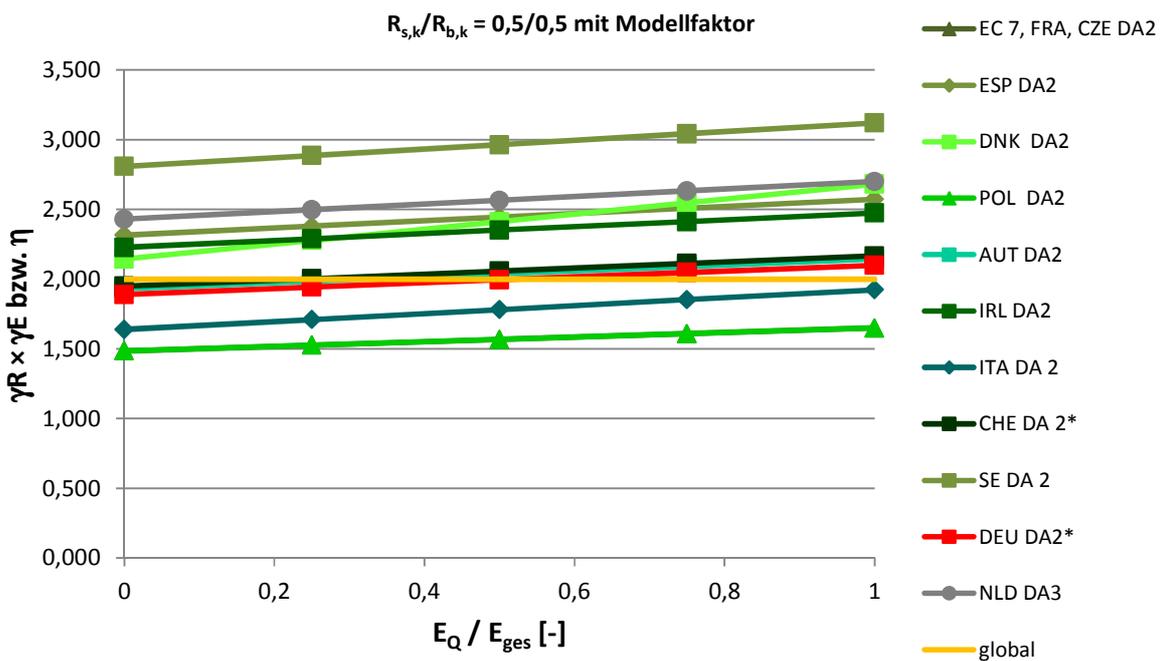


Abbildung A.50: Nachweisverfahren DA 2 und 3, Variation der Einwirkungen mit Berücksichtigung des Modellfaktors

Anhang D: Vergleich von Erddruckbeiwerten nach verschiedenen Verfahren

Für den aktiven Erddruck ist in Deutschland das Verfahren nach Coulomb üblich, für den passiven Erddruck bisher das Verfahren nach Coulomb oder mit gekrümmten Gleitflächen nach Caquot-Kérisel, nach DIN 4085:2011 das Verfahren nach Pregl. Im Anhang C.2 des EC 7-1 wird für aktiven und passiven Erddruck das Verfahren nach Bent Hansen angegeben (siehe [U 28]). Die Erddruckbeiwerte der verschiedenen Verfahren unterscheiden sich relativ stark, so dass die Wahl des Verfahrens für die Erddruckberechnung nach nationaler Norm einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat:

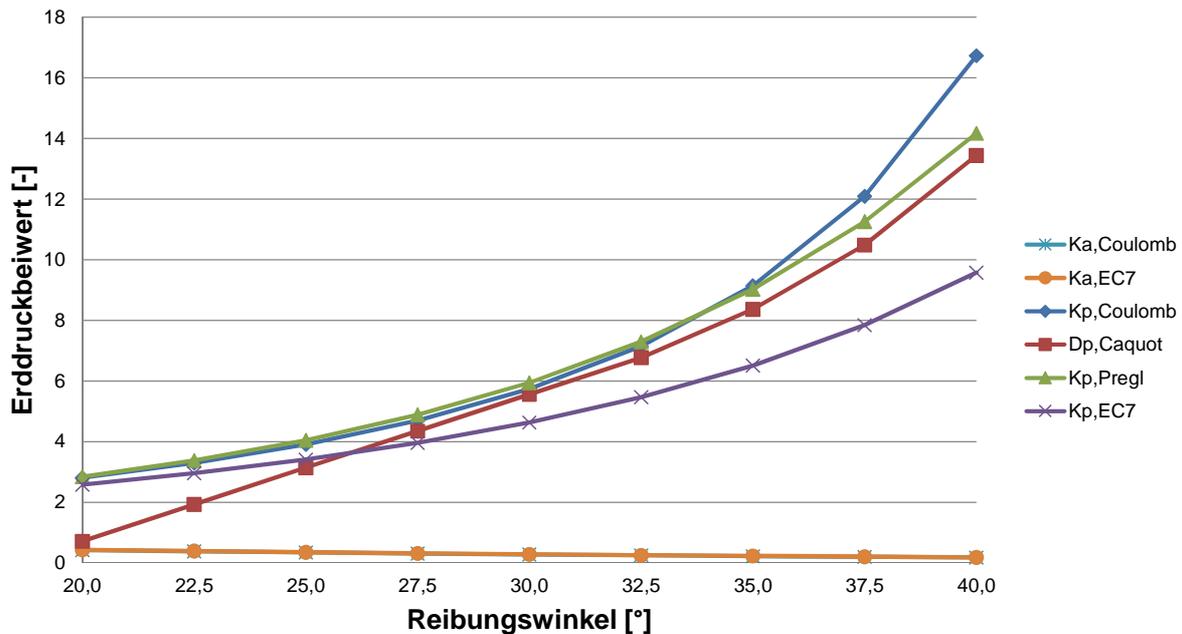


Abbildung A.1: Erddruckbeiwerte für passiven Erddruck (oben) und aktiven Erddruck (unten), in Abhängigkeit vom Reibungswinkel

Tabelle A.1: Erddruckbeiwerte nach verschiedenen Verfahren

φ [°]	Kagh Coulomb	Kagh EC7-1	Kpgh ($\delta\rho=-2/3\varphi$) Coulomb	Kpgh ($\delta\rho=-\varphi$) Caquot-Kérisel	Kpgh ($\delta\rho=-\varphi$) Pregl	Kpgh ($\delta\rho=-\varphi$) Eurocode 7
20,00	0,426	0,434	2,811	0,720	2,851	2,582
22,50	0,384	0,392	3,296	1,930	3,383	2,960
25,00	0,346	0,353	3,908	3,140	4,049	3,413
27,50	0,311	0,317	4,697	4,350	4,886	3,961
30,00	0,279	0,285	5,737	5,560	5,946	4,633
32,50	0,251	0,256	7,152	6,770	7,296	5,465
35,00	0,224	0,229	9,147	8,360	9,027	6,510
37,50	0,200	0,205	12,095	10,490	11,263	7,843
40,00	0,179	0,182	16,726	13,440	14,169	9,573

Anhang E: Vergleich der Ansätze für die Erddruckberechnung in verschiedenen Ländern

D.1 Ansätze zur Erddruckberechnung

Folgende Verfahren zur Erddruckberechnung werden in unterschiedlichen Ländern verwendet:

	aktiv	passiv, ebene Gleitflächen	passiv, gekr. Gleitflächen
DE: DIN 4085:1987	Coulomb	Coulomb	Caquot-Kérisel
DE: DIN 4085:2011	Coulomb	Coulomb	Pregl
AT: ÖNORM B 4434	Coulomb		Pregl
CH: SIA 261	Coulomb		Caquot-Kérisel
EU: Eurocode 7, C.2	Bent Hansen		Bent Hansen

D.2 Ansätze für den Mindesterdruk

Folgende Ansätze werden in verschiedenen Ländern für den Mindesterdruk verwendet:

DE: $K_{agh,min} = 0.20$ (EAB bis 3. Auflage)

DE: $\varphi_{Ers} = 40^\circ$ (EAB ab 4. Auflage)

AT: $K_{agh,min} = 0.20$ (ÖNORM B 4434)

CH: $e_{min} = 5 \text{ kN/m}^2$ oder berechnet mit $c = 0$ über die Tiefe mit neg. Erddruk (SIA 261, 4.3.2.2)

UK: $e_{min} = 5 \cdot z$, entspricht $K_{agh,min} = 0.25$ bei $\gamma = 20$ (CIRIA Report C580)

IT: keine Regelung

D.3 Ansätze für den räumlichen Erddruk (schmale Druckflächen)

Folgende Ansätze werden in verschiedenen Ländern für den räumlichen Erddruk verwendet:

DE: DIN 4085:1987 Weißenbach: Der Erdwiderstand von schmalen Druckflächen, Bautechnik 6/1962

DE: DIN 4085:2007/2011 Räumlicher Erddruk, zitiert in DIN 4085: Sokolowski bzw. Petersen, Schmidt

AT: ÖNORM B 4434 Räumlicher Erddruk

CH: Ansatz nach Weißenbach üblich

D.4 Verfahren zum Ansatz der Kohäsion abhängig vom Reibungswinkel

$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$

H = Baugrubensohle: 8 m

Spannungsniveau: 136

$\varphi^* = 30$

$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$

H/2 = 4 m

halbe Tiefe der Baugrube

Spannungsniveau: 68

$\varphi^* = 30$

φ	c	c_gerundet auf 5 kN/m ²	c_gewählt	c_gerundet auf 2,5 kN/m ²	c	c_gerundet auf 5 kN/m ²	c_gerundet auf 2,5 kN/m ²
20,0	29,0196847	30,0	30	30,0	14,5098424	15,0	15,0
22,5	22,1865921	20,0	20	22,5	11,0932961	10,0	10,0
25,0	15,1017951	15,0	15	15,0	7,55089755	10,0	7,5
27,5	7,72251773	10,0	5	7,5	3,86125887	5,0	5,0
30,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0,0