Standsicherheitsnachweise für Böschungen mittels FE-Methode durch Abminderung der Scherfestigkeit

AK 1.6 der DGGT – Numerik in der Geotechnik

Helmut F. Schweiger

Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Arbeitsgruppe Numerische Geotechnik
Technische Universität Graz, Österreich

unter Mitarbeit von: Dr. P.-M. Mayer, Dr. H. Walter, Dr. D. Winselmann

COMPUTATIONAL geotechnics GROUP

TUG

VORTRAGSGLIEDERUNG

- Einleitung
- Bestimmung des Sicherheitsfaktors von Böschungen mit der FE-Methode durch Abminderung der Scherfestigkeitsparameter an Hand von 3 Beispielen

  Beispiele aus: Griffiths und Lane: „Slope stability analysis by finite elements“, Geotechnique 49, 387-403, 1999
- Beispiel "Vernagelte Böschung"
- Zusammenfassung

EINLEITUNG

Ziel der Untersuchungen

- **Vergleich FE-Methode - Lamellenverfahren**
- **Erkennen der wichtigsten Einflussfaktoren in der Numerik**

  (Element-Typ, Netzfeinheit, … > wesentlich größerer Einfluss als bei Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit)
- **Berechnungen mit Teilsicherheitsbeiwerten**
- **Überprüfung der Ergebnisse durch unabhängige Berechnungen mit unterschiedlichen Programmsystemen**

Ergebnisse dieser Berechnungen sollen in die Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 der DGGT (Abschnitt 4) einfließen

EINLEITUNG

Definition des Sicherheitsfaktors mit der FE-Methode

$$\text{Sicherheit } \eta_{fe} = \frac{\tan\varphi_{vorhanden}}{\tan\varphi_{Bruch}} = \frac{c_{vorhanden}}{c_{Bruch}}$$

Mögliche Vorgangsweisen:

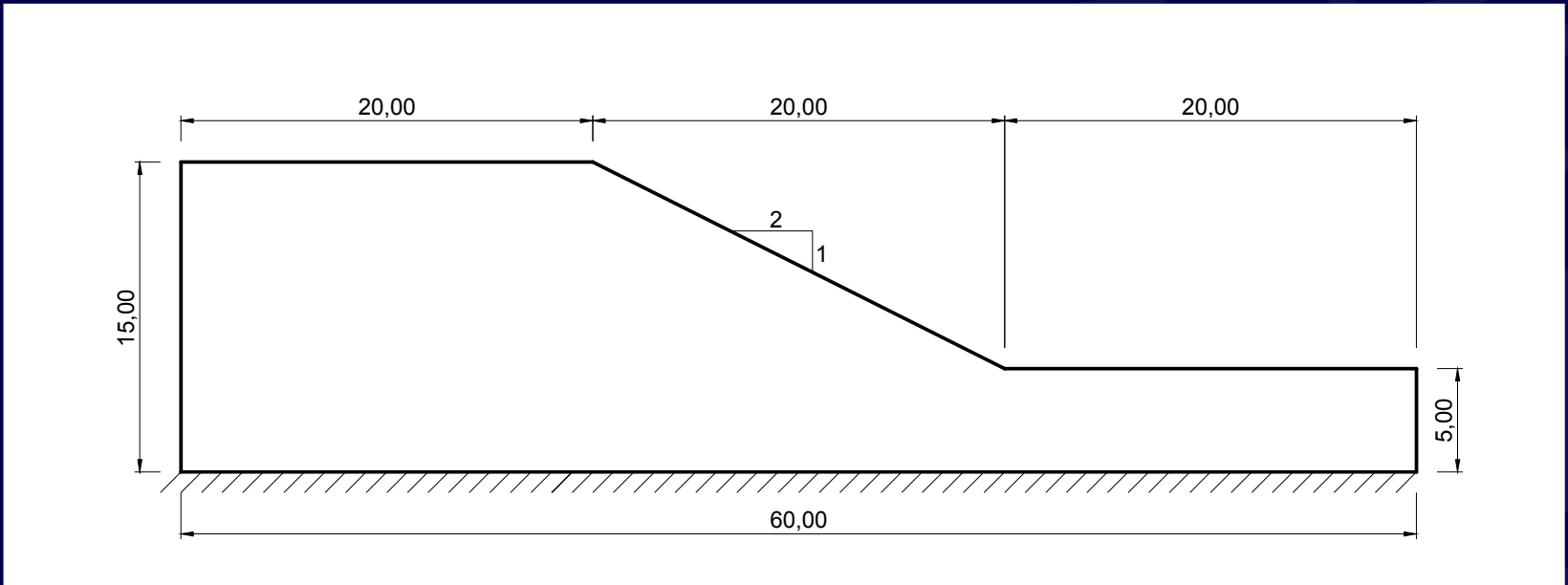
A) Berechnung des Gebrauchszustandes mit charakteristischen bzw. "design" Kennwerten > davon ausgehend automatische Abminderung der Scherfestigkeitsparameter bis rechnerisch der Grenzzustand erreicht wird

B) Abminderung der Scherfestigkeitsparameter mit Teilsicherheitsbeiwerten > jeweils neue Berechnung des Gebrauchszustandes mit geänderten Kennwerten bis rechnerisches Versagen eintritt

BÖSCHUNG 1

Homogener, drainierter Boden

Neigungsverhältnis: 2:1



Bodenkennwerte:

φ = 20,0 [°] , c = 10,0 [kN/m²]

E = 10^5 [kN/m²] , ν = 0,3 [-] , γ = 20,0 [kN/m³]

"Methode A"

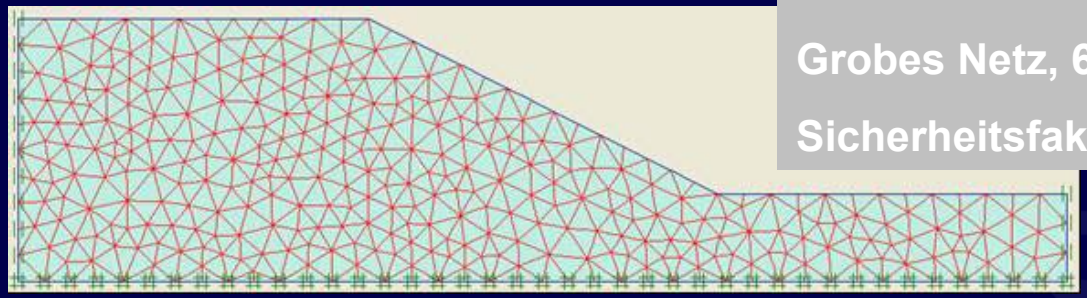
BÖSCHUNG 1

Grobes Netz, 642 Elemente (6-knotig)

Sicherheitsfaktor: 1.37

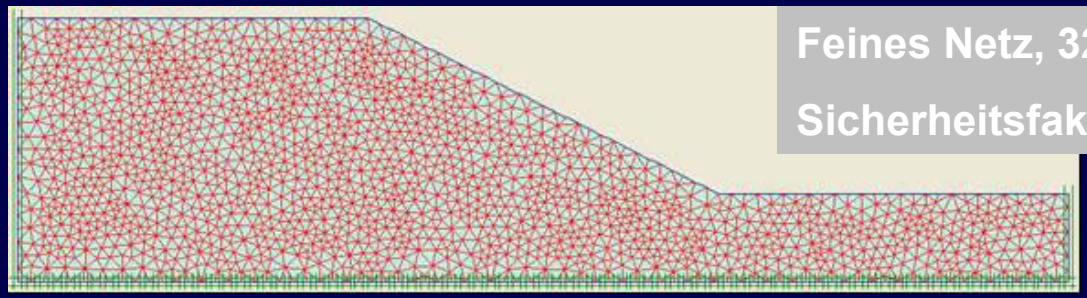
Grobes Netz, 642 Elemente (15-knotig)

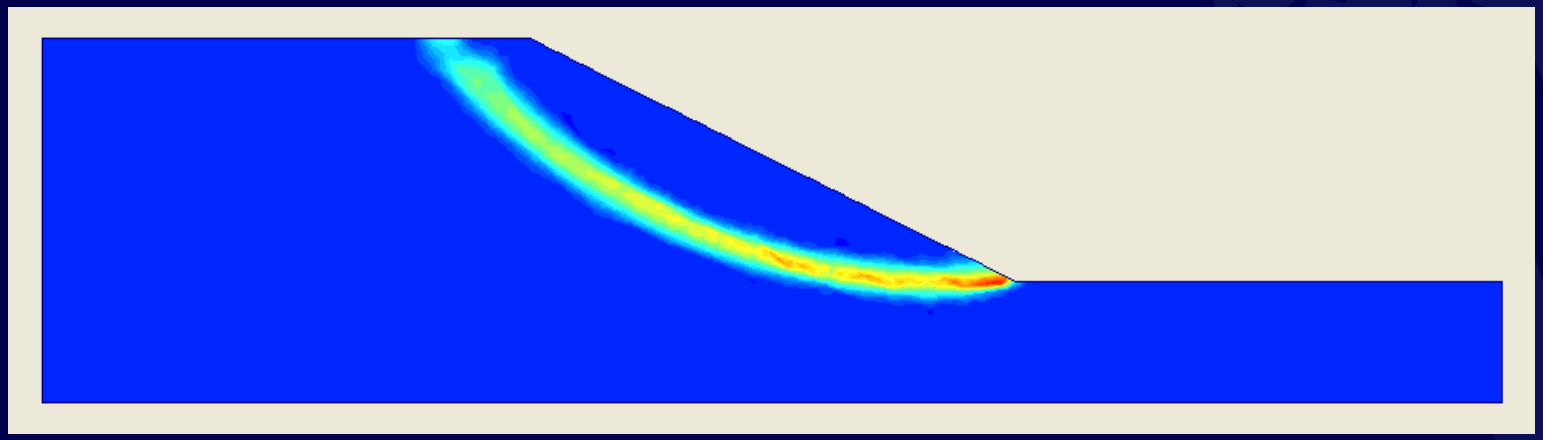
Sicherheitsfaktor: 1.33



Feines Netz, 3211 Elemente (6-knotig)

Sicherheitsfaktor: 1.34

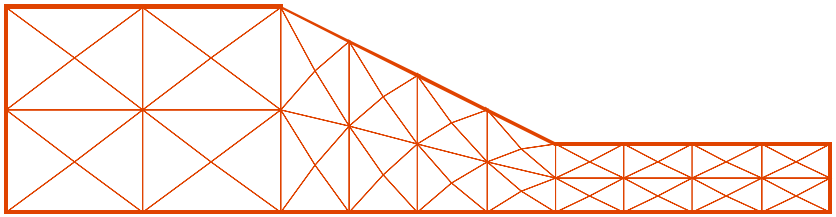




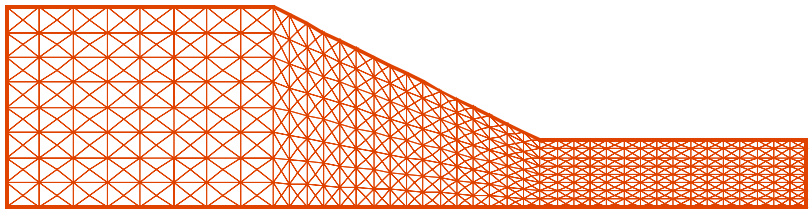
Inkremente der Schubverzerrungen nach der φ/c-Reduktion

BÖSCHUNG 1

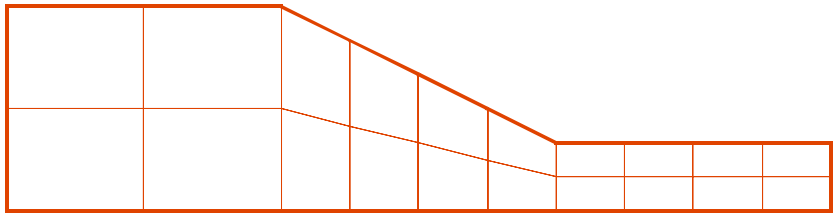
grobes Netz, 3-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.59
grobes Netz, 6-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.43



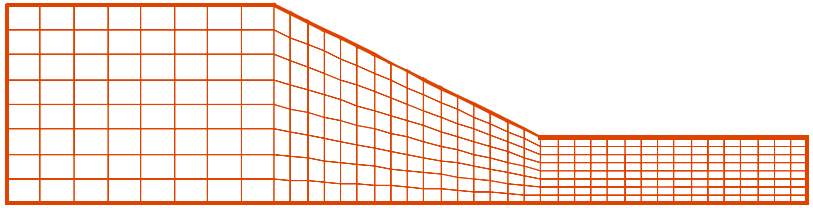
feines Netz, 3-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.39
feines Netz, 6-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.36

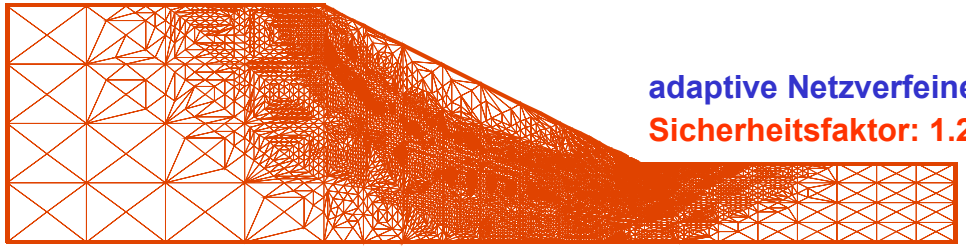


grobes Netz, 4-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: kein Bruch
grobes Netz, 8-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.55



feines Netz, 4-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.90
feines Netz, 8-knotige Elemente
Sicherheitsfaktor: 1.38





adaptive Netzverfeinerung
Sicherheitsfaktor: 1.29

BÖSCHUNG 1

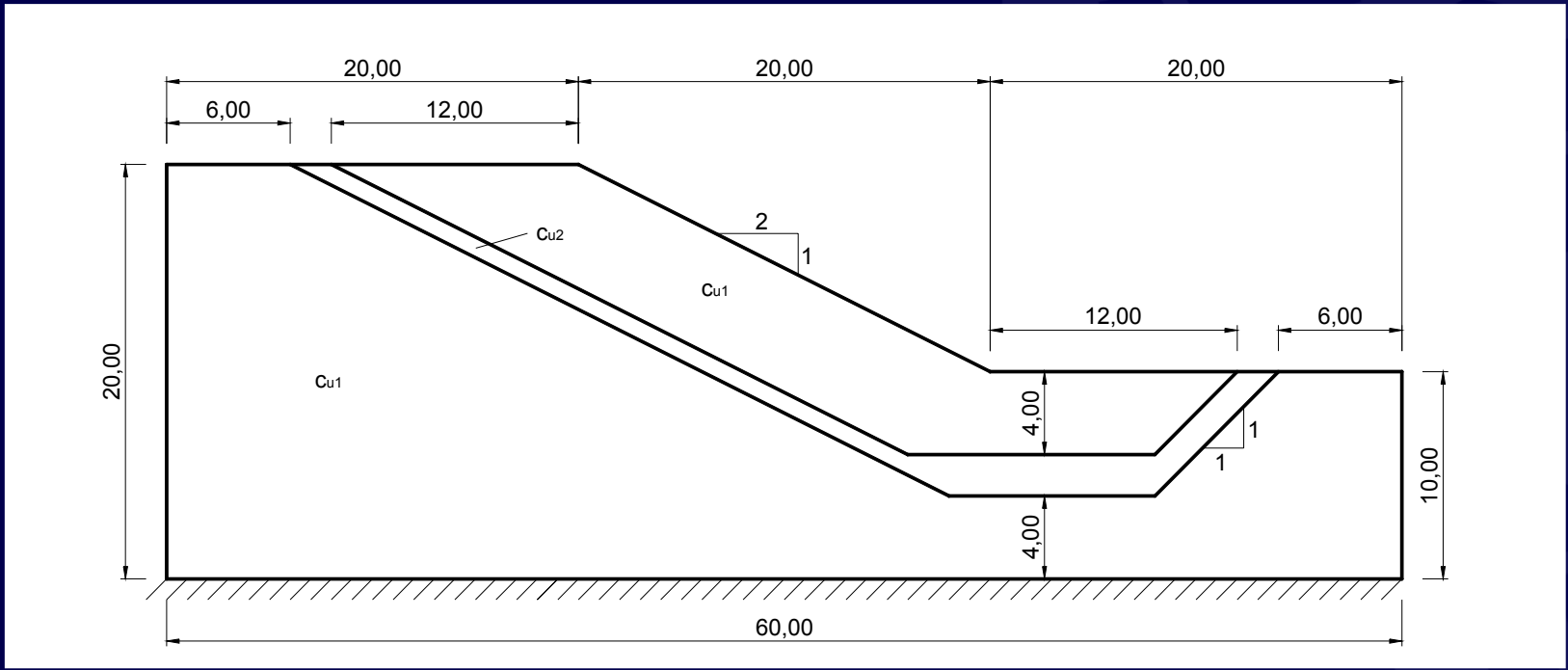
Berechnungs-methode	Bishop	Janbu (korrigiert)	Spencer	FE-code A	FE-code B*
Sicherheits-faktor	**1.38**	**1.37**	**1.37**	**1.33-1.37**	**1.29-1.38**

*) feine Netze, mit quadratischem Elementansatz

BÖSCHUNG 2

Nicht homogener, undrainierter Boden

Neigungsverhältnis: 2:1

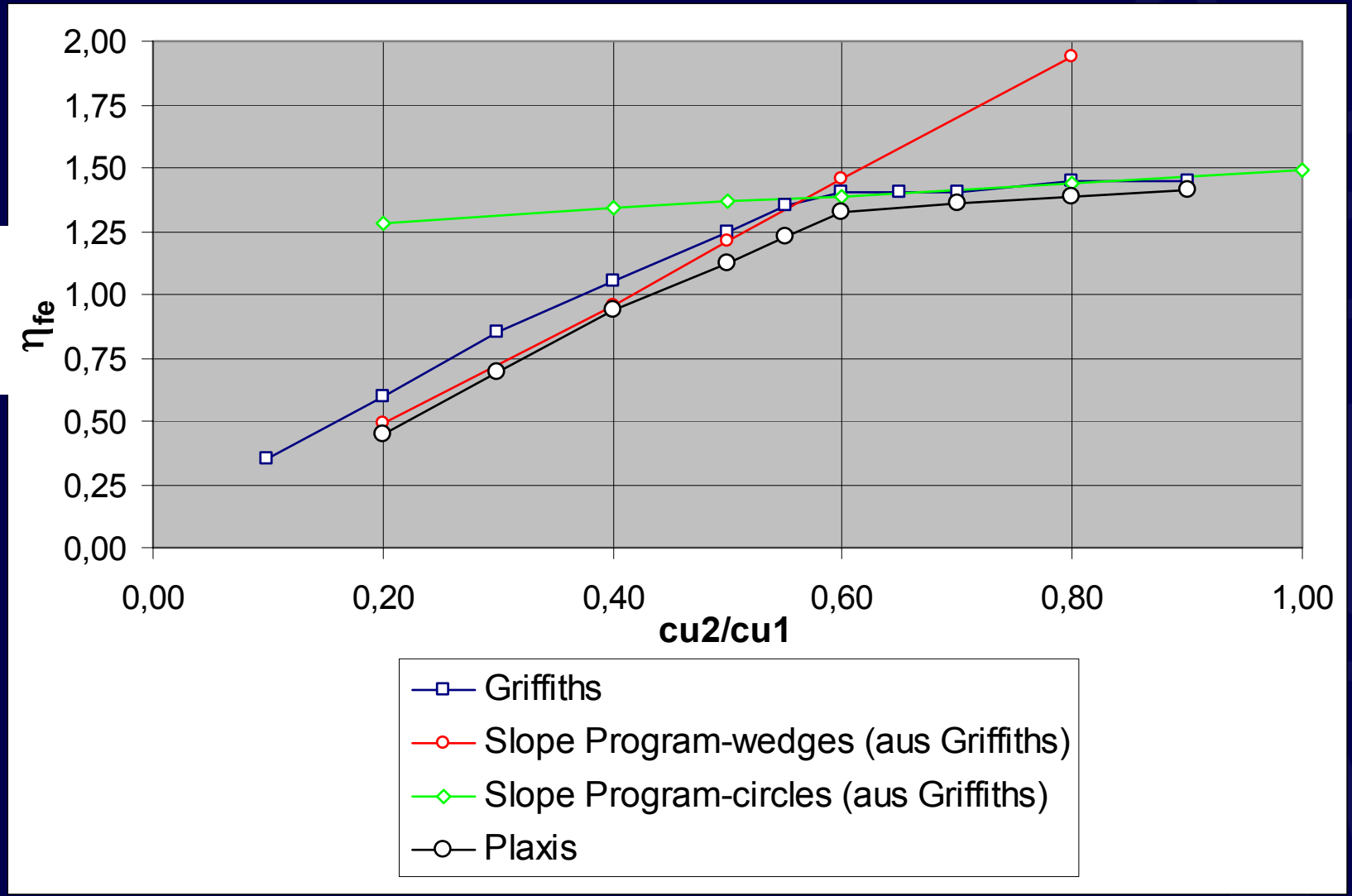


Bodenkennwerte:

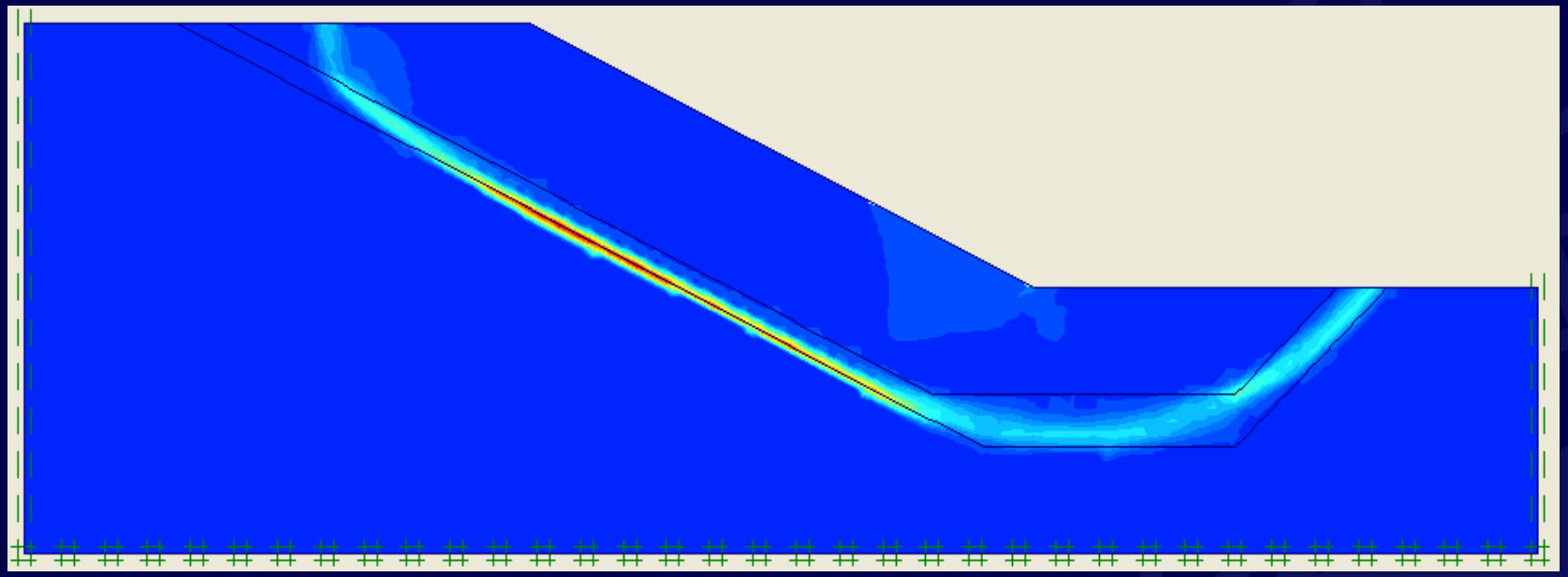
φ_u = 0,0 [°] , c_{u1} = 50,0 [kN/m²]

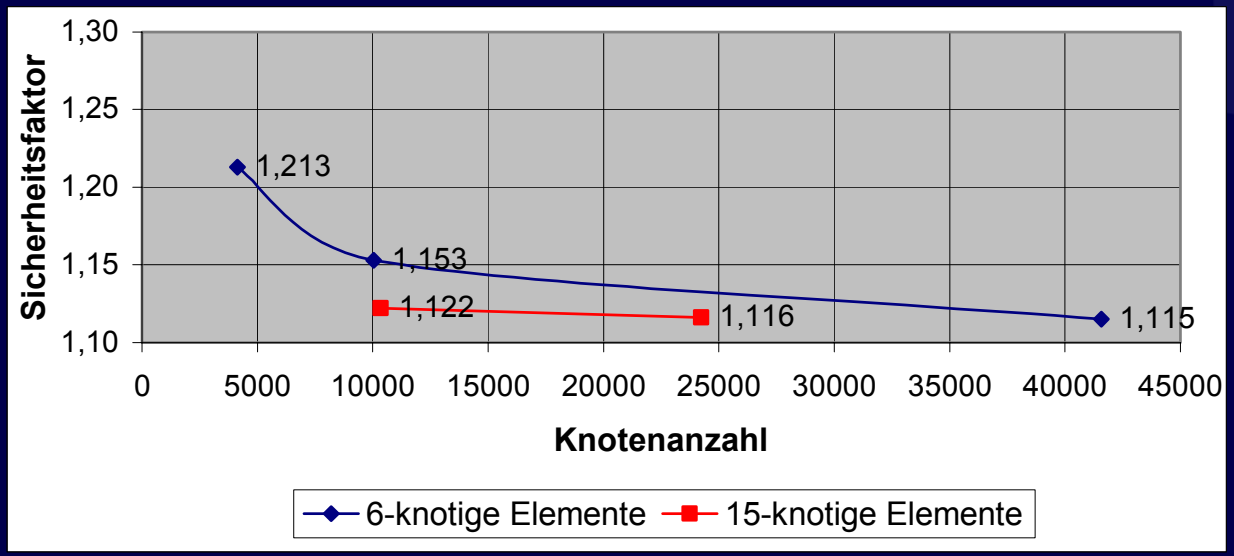
Variation des Verhältnisses c_{u2}/c_{u1}

BÖSCHUNG 2


2,00
1,75
1,50
1,25
1,00
0,75
0,50
0,25
0,00
η_{fe}
0,00
0,20
0,40
0,60
0,80
1,00
cu2/cu1
Griffiths
Slope Program-wedges (aus Griffiths)
Slope Program-circles (aus Griffiths)
Plaxis

BÖSCHUNG 2




Sicherheitsfaktor
1,30
1,25
1,20
1,15
1,10
1,213
1,153
1,122
1,116
1,115
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
35000
40000
45000
Knotenanzahl
6-knotige Elemente
15-knotige Elemente

BÖSCHUNG 2

Teilsicher-heitsfaktor	c_{u1} [kN/cm^2]	c_{u2} [kN/cm^2]	Tolerated Error [%]	MSF	η_{fe}
0,80	65,50	21,25	1,0	1,40	1,12
1,00	50,00	25,00	1,0	1,12	1,12
1,05	47,62	23,81	1,0	1,07	1,12
1,10	45,45	22,73	1,0	1,02	1,12
1,11	45,05	22,52	1,0	1,01	1,12
1,12	44,64	22,32	1,0	1,00	1,12
1,13	44,25	22,12	1,0	0,99	1,12

BÖSCHUNG 2

Berechnungs-methode	Bishop	Janbu (korrigiert)	Spencer	FE-code A	FE-code B
Sicherheitsfaktor Gleitkeil	-	1.22	-	1.12-1.21*	1.17
Sicherheitsfaktor Gleitkreis	1.36	1.46	1.36		

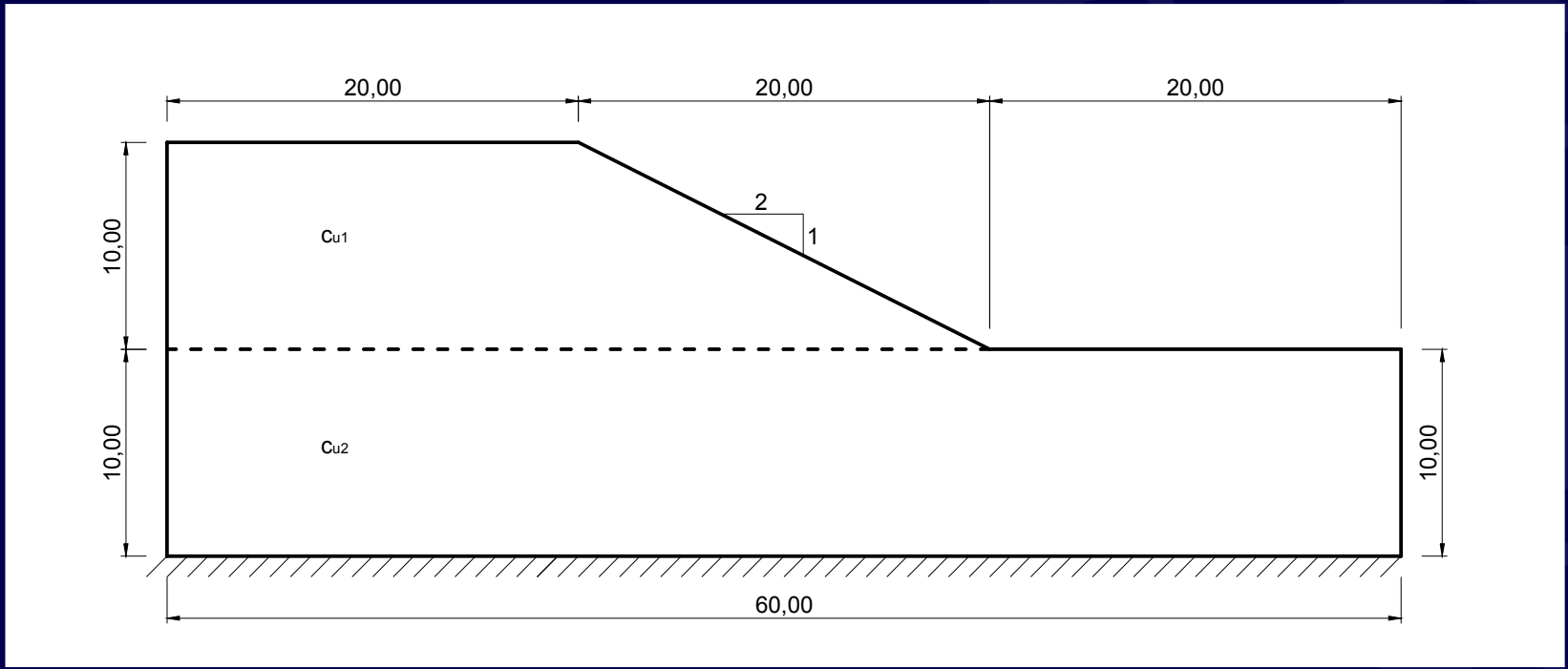
Starrkörperbruchmechanismus: 1.25

*) abhängig von Elementanzahl und Elementtyp

BÖSCHUNG 3

Nicht homogener, undrainierter Boden

Neigungsverhältnis: 2:1

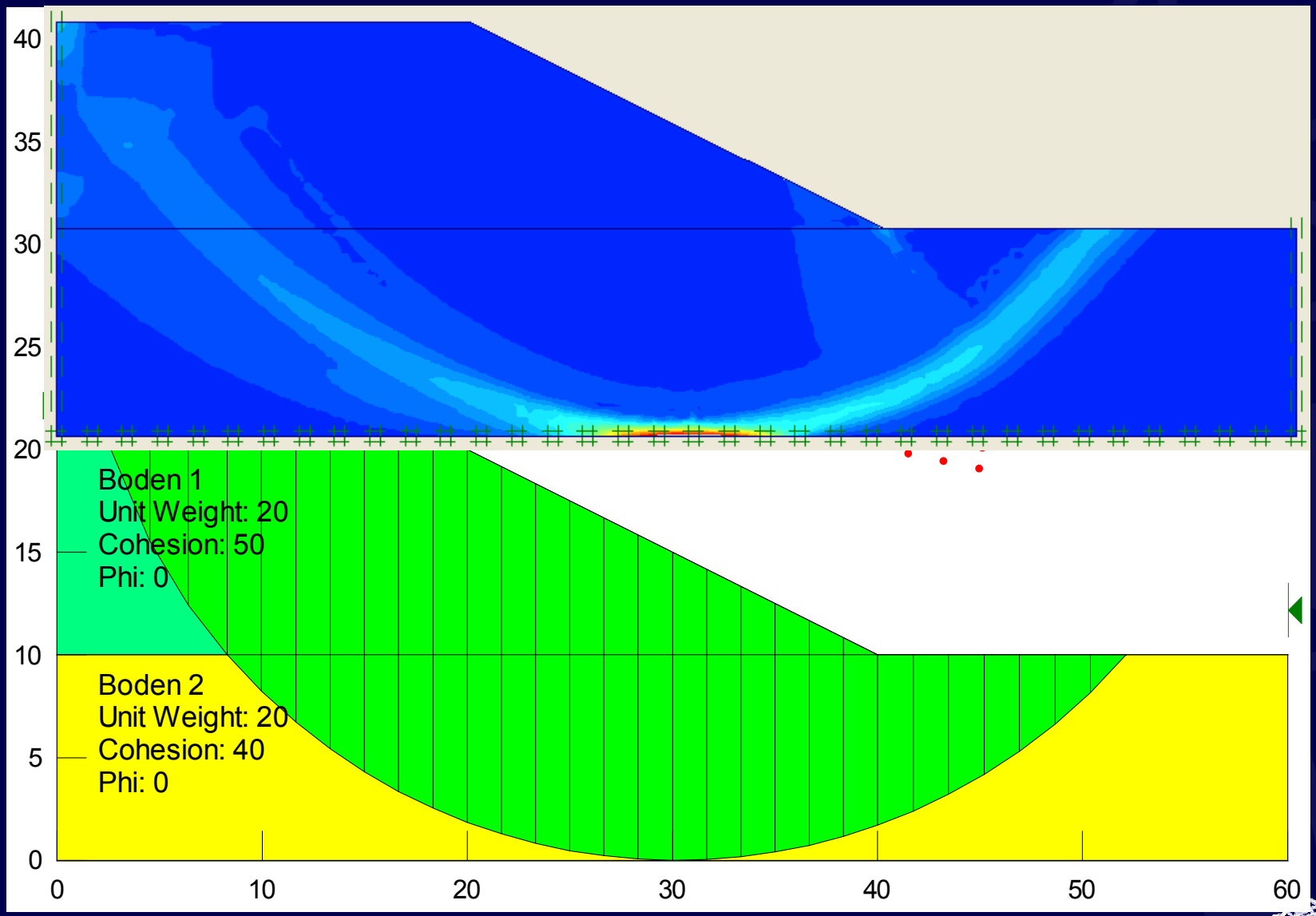


Bodenkennwerte:

φ_u = 0,0 [°] , c_{u1} = 50,0 [kN/m²]

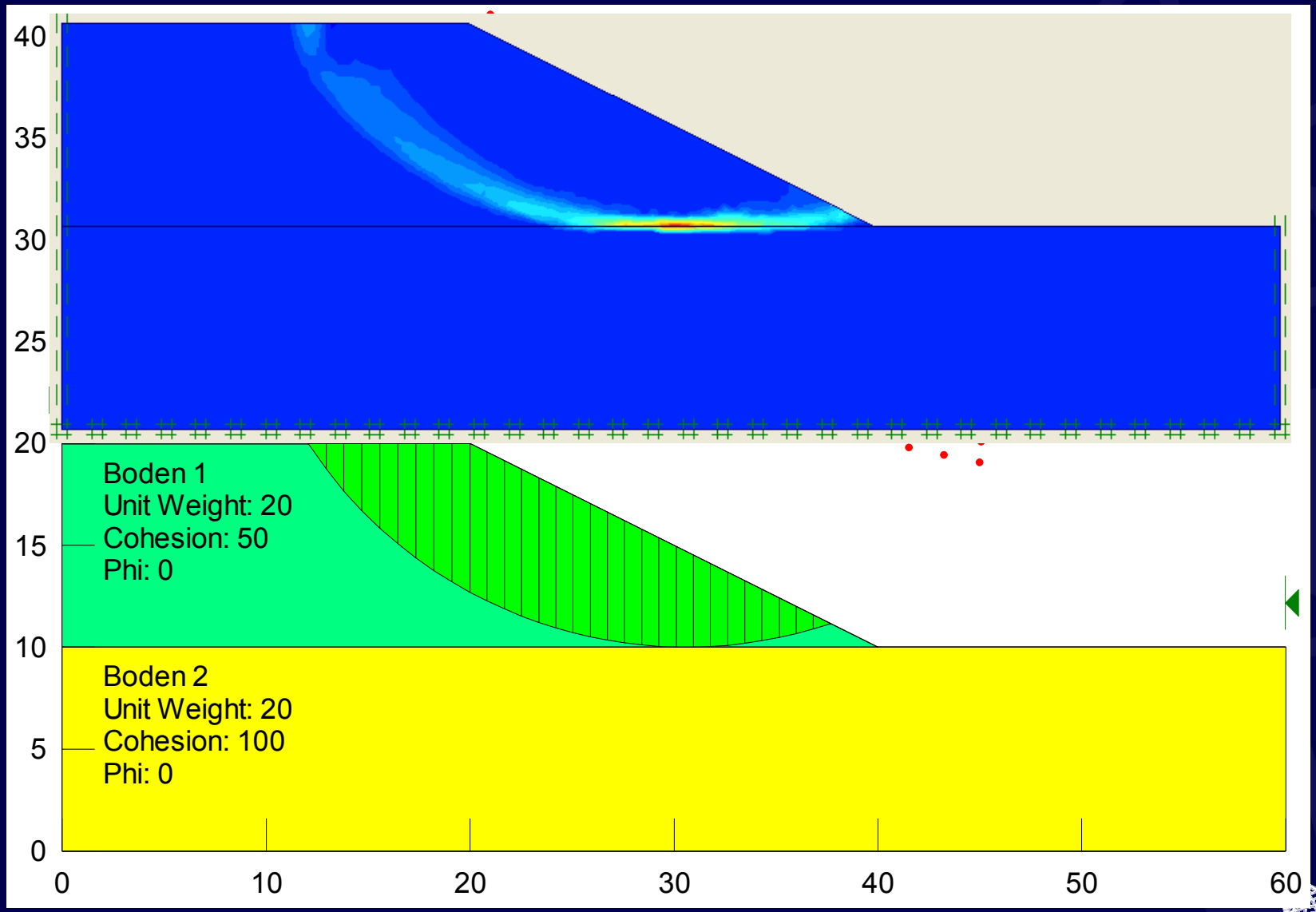
Variation des Verhältnisses c_{u2}/c_{u1}

BÖSCHUNG 3



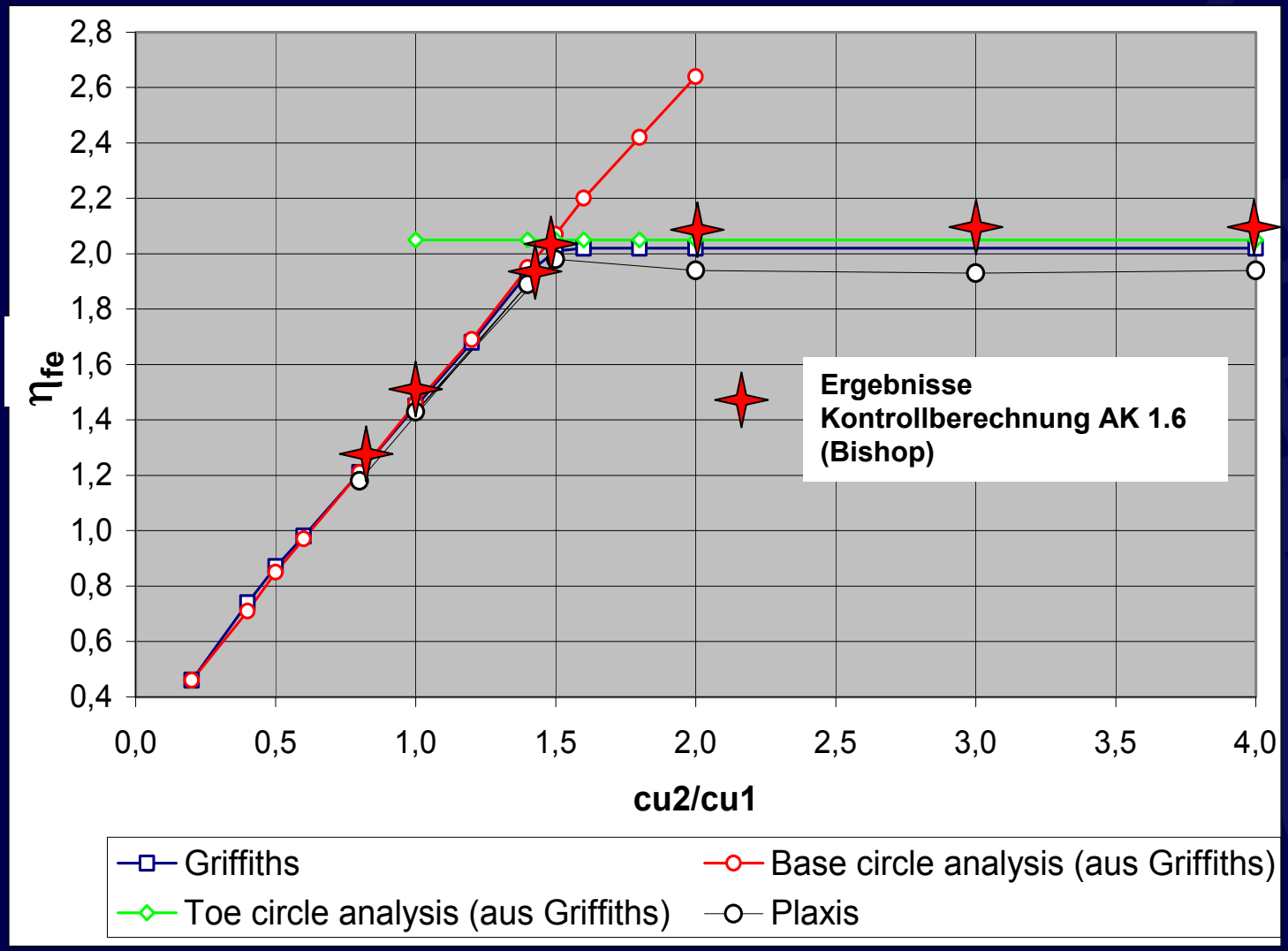
Ergebnis nach Bishop (c_{u2}/c_{u1}=0,8)

BÖSCHUNG 3



Ergebnis nach Bishop (c_{u2}/c_{u1}=2,0)

BÖSCHUNG 3


2,8
2,6
2,4
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
ηfe
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
4,0
cu2/cu1
Ergebnisse Kontrollberechnung AK 1.6 (Bishop)
Griffiths
Base circle analysis (aus Griffiths)
Toe circle analysis (aus Griffiths)
Plaxis

BÖSCHUNG 3

Teilsicher-heitsfaktor	c_{u1}	c_{u2}	Tolerated Error	MSF	η_{fe}
	[kN/cm^2]	[kN/cm^2]	[%]		
0,80	62,50	50,00	1,0	1,47	1,18
1,00	50,00	40,00	1,0	1,18	1,18
1,10	45,45	36,36	1,0	1,07	1,18
1,15	43,48	34,78	1,0	1,02	1,17
1,17	42,74	34,19	1,0	1,00	1,17
1,18	42,37	33,90	1,0	1,00	1,17
1,19	42,02	33,61	1,5	0,99	1,18

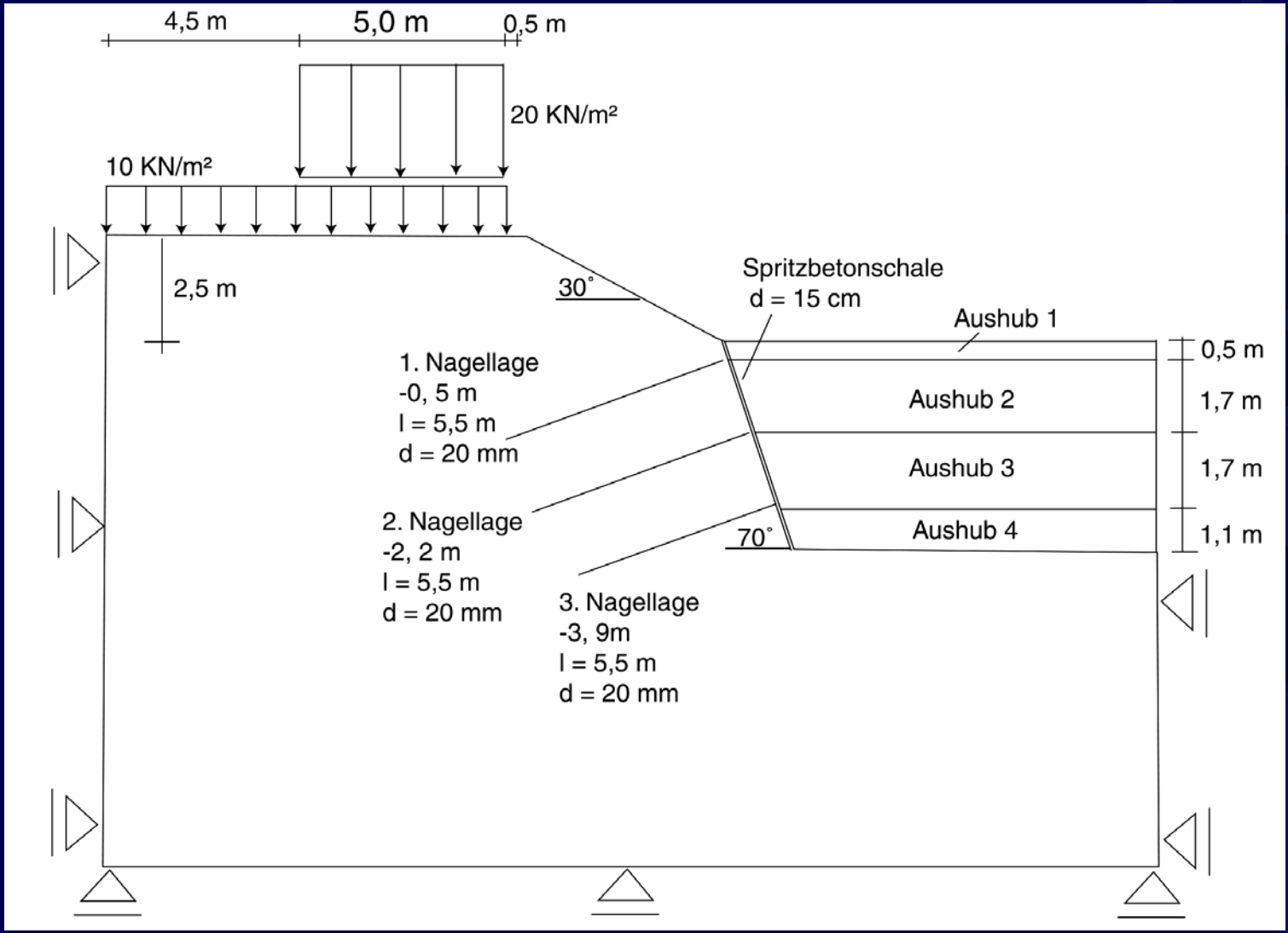
BÖSCHUNG 3

Berechnungs-methode	c_{u2}/c_{u1}	Bishop	Janbu (korrigiert)	Spencer	FE-code A	FE-code B
Sicherheits-faktor	0.8	1.23	1.34	1.23	1.18	-
Sicherheits-faktor	1.5	2.02	2.12 [1)] 2.14 [2)]	2.02	1.98	-
Sicherheits-faktor	2.0	2.02	2.14	2.02	1.94	2.03

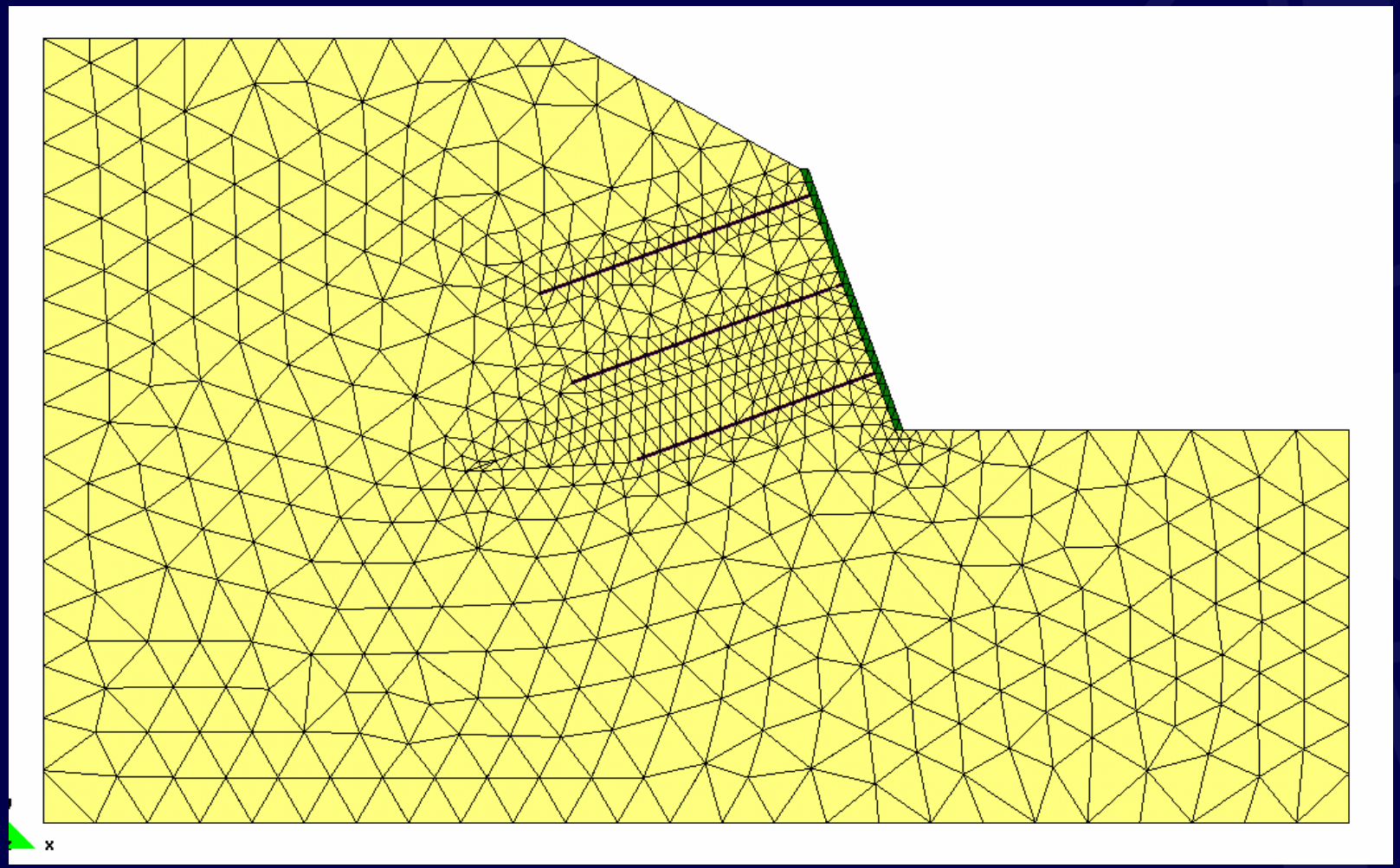
[1)] Versagen durch die Basis

[2)] Versagen durch den Fußpunkt

VERNAGELTE BÖSCHUNG



VERNAGELTE BÖSCHUNG



VERNAGELTE BÖSCHUNG

Bodenkennwerte:

φ = 25°, c = 5 kN/m²

γ = 19 kN/m³

E = 8 MN/m², ν= 0.37

Spritzbeton:

γ = 25 kN/m³

E = 15.000 MN/m², ν = 0.18

Nägel:

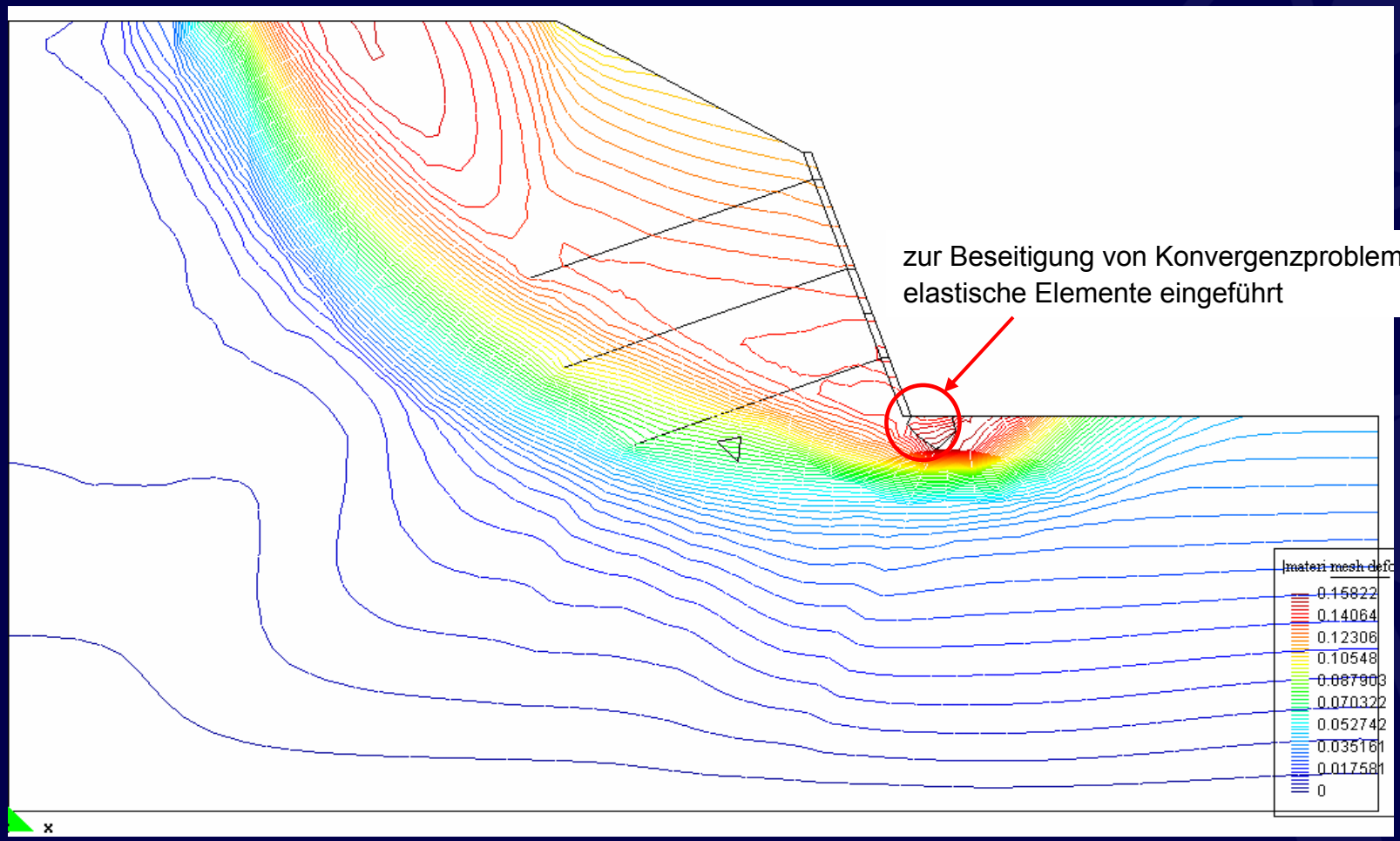
E = 30.000 MN/m², d = 20 mm

Die maximal zulässige Last der Nägel wird wie folgt festgelegt:

von Nagelanfang bis 2,5 m F_{zul} = 75 kN

von 2,5 m bis Nagelende F_{zul} = 40 kN

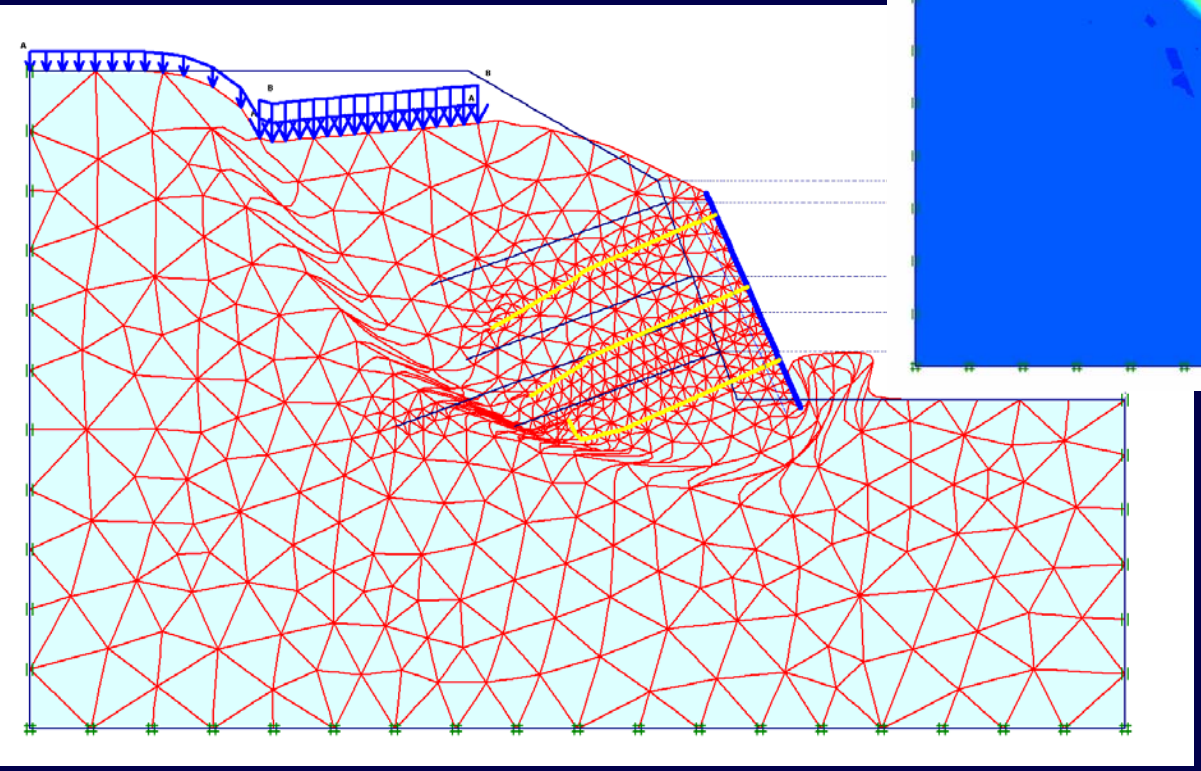
VERNAGELTE BÖSCHUNG

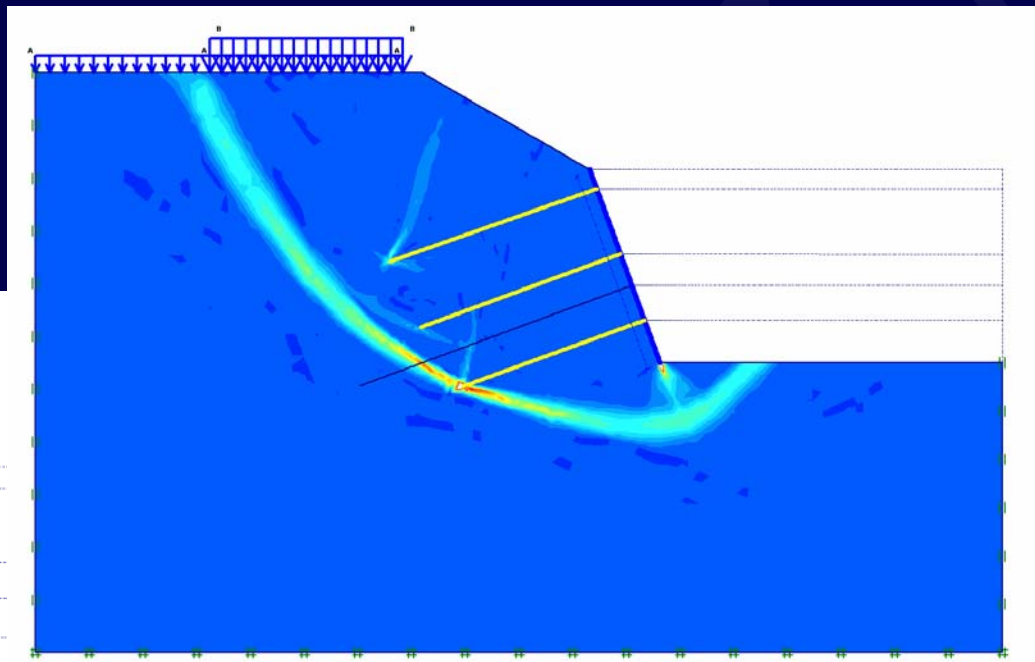


Isolinien der resultierenden Verschiebungen nach φ / c - Reduktion

Sicherheitsfaktor aus φ / c - Reduktion: 1.28

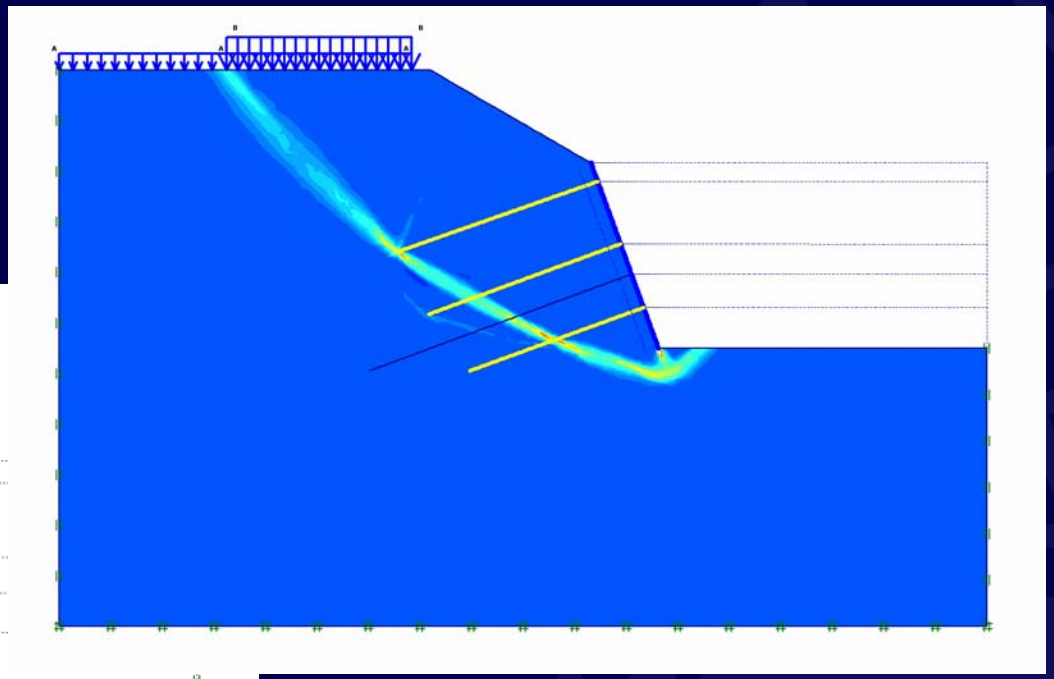
VERNAGELTE BÖSCHUNG

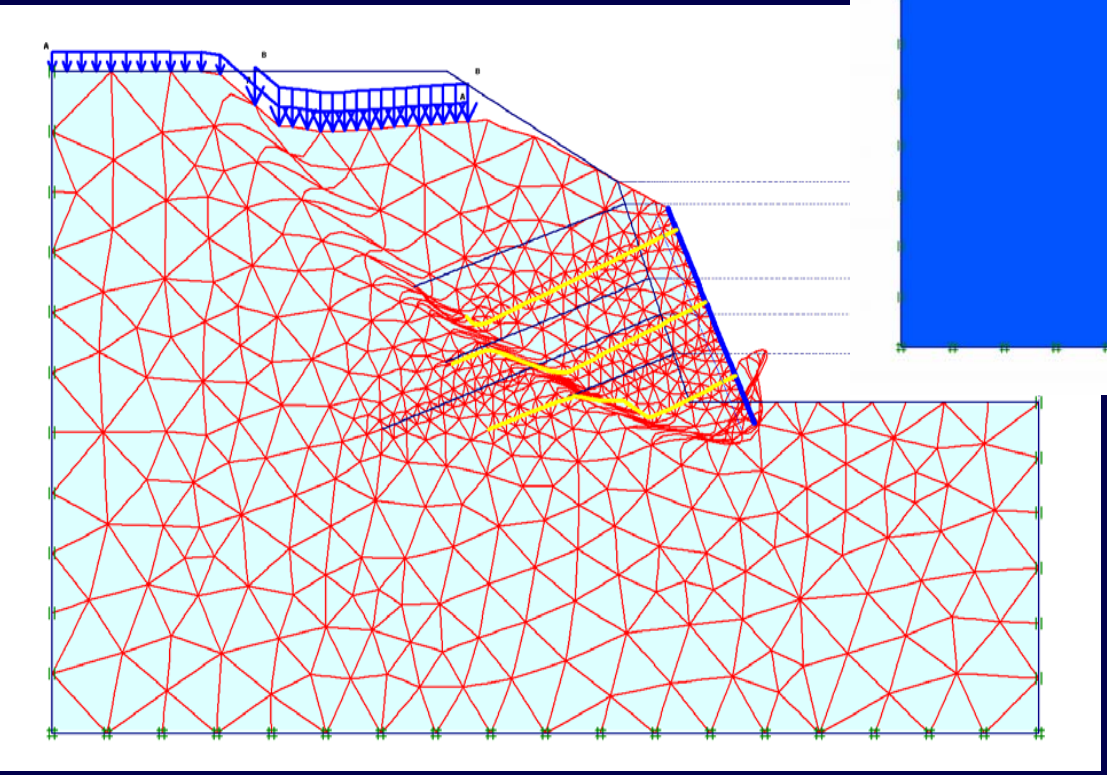




Nägel elastisch: Sicherheitsfaktor aus φ / c - Reduktion: 1.18

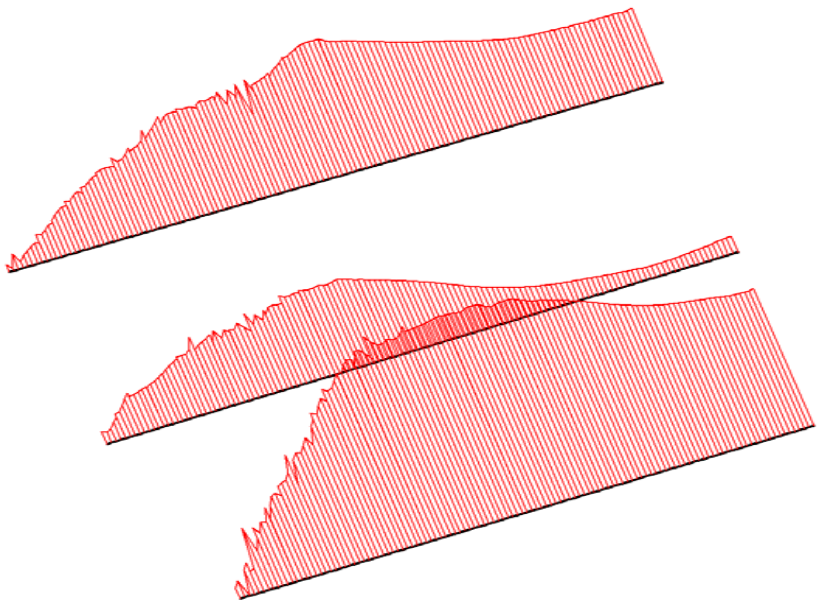
VERNAGELTE BÖSCHUNG



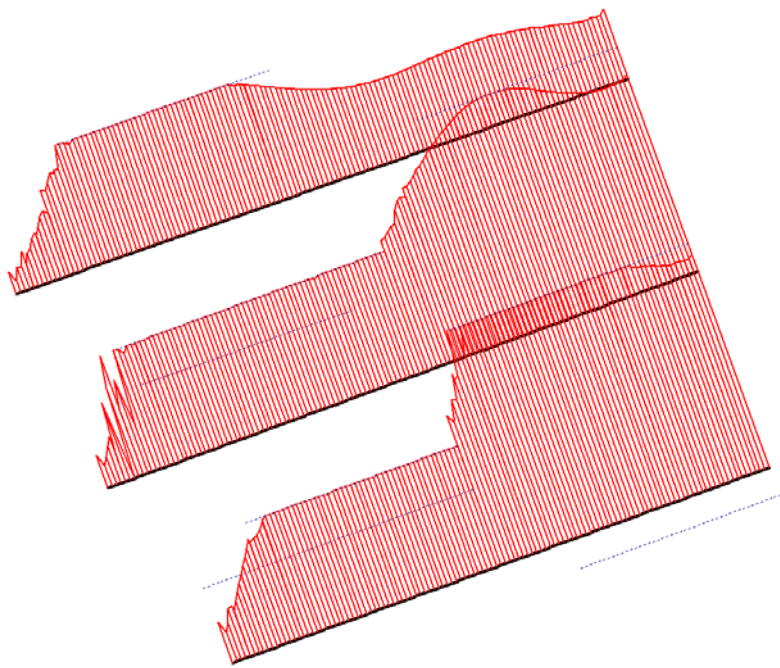


Nägel plastisch: Sicherheitsfaktor aus φ / c - Reduktion: 1.07

VERNAGELTE BÖSCHUNG

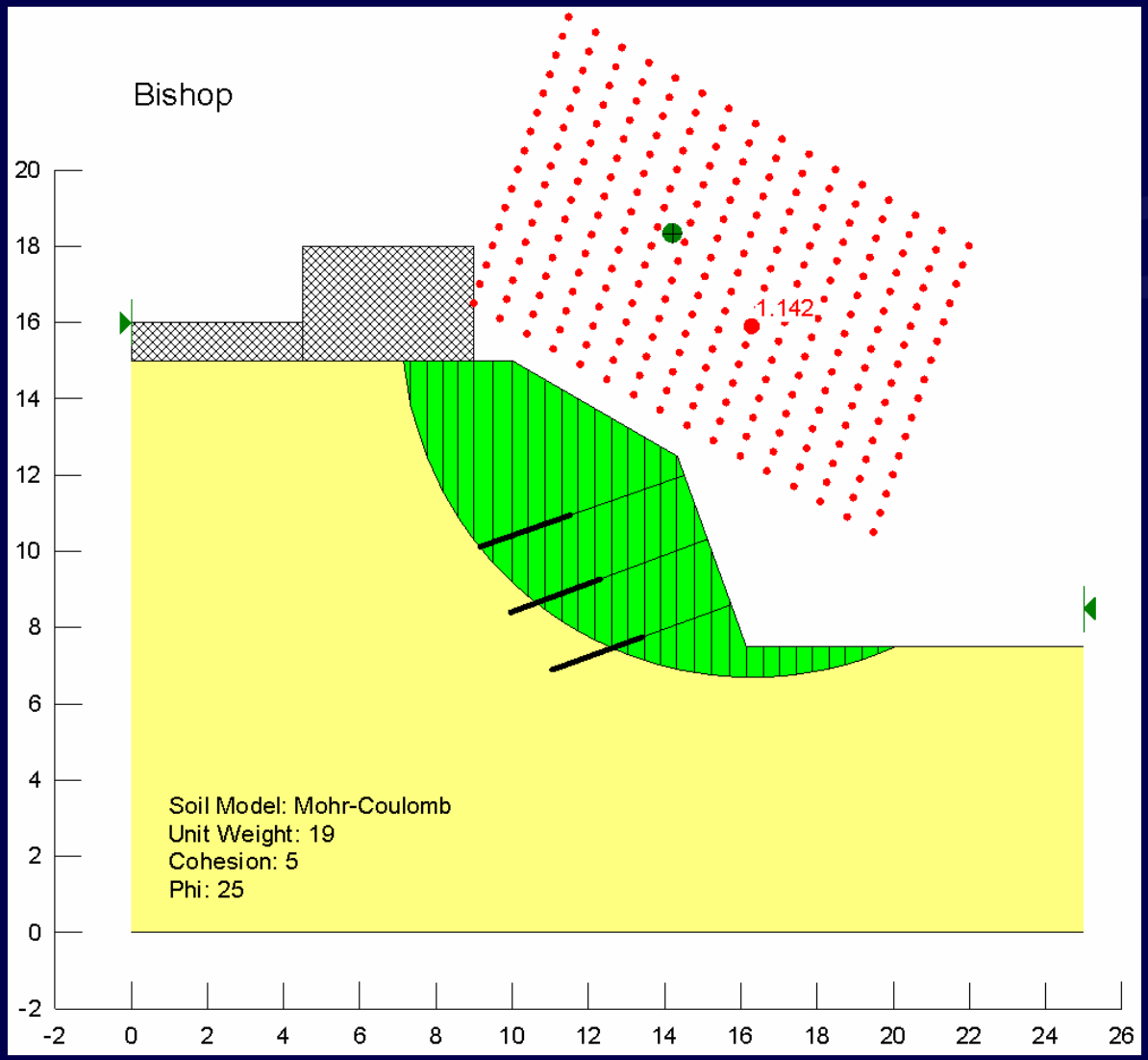


Nägel elastisch: max. Kraft 181 kN/m



Nägel plastisch: max. Kraft 75 bzw. 40 kN/m

VERNAGELTE BÖSCHUNG



Ergebnisse aus unterschiedlichen Lamellenverfahren: 1.10 bis 1.20

ZUSAMMENFASSUNG

- Sicherheitsfaktoren berechnet mit FE-Methode (durch Abminderung der Scherfestigkeit) und Lamellenverfahren liefern vergleichbare Werte für Böschungen ohne Strukturelemente

- Einfluss von Element-Typ und/oder Netzfeinheit ist größer als bei Gebrauchstauglichkeitsnachweisen
  (Vorsicht bei undrainierten und/oder axisymmetrischen Bedingungen !)

- Programmspezifische Abbruchkriterien sollten durch Vergleichsberechnungen mit unterschiedlichen Genauigkeitstoleranzen überprüft werden

- Anwendung von Teilsicherheitsfaktoren in der FE-Berechnung (Abminderung der Scherfestigkeitsparameter) ist möglich

- Äußere Standsicherheit für vernagelte Böschungen kann (bedingt) ebenfalls mit FE-Methode ermittelt werden
  (Einfluss der Tragfähigkeit der Nägel muss beachtet werden)