

**Steinbruch Plettenberg  
HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GMBH**

**Stellungnahme zu Fragen der  
Standstabilität des Felsriegels am  
Ostrand des Absetz- und  
Versickerungsbeckens für die  
Zwischenspeicherung von  
Niederschlagswässern im zentralen und  
östlichen Bereich des Steinbruchs auf  
dem Plettenberg für das  
Niederschlagsereignis am 07.05.2023**

Juli 2023

Bearbeiter:

Prof. Dr. Tomás M. Fernandez-Steeger  
Marin Siebert, M.Sc.

Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Ingenieurgeologie  
Ernst-Reuter Platz 1  
10587 Berlin

**Auftraggeber:**

HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GMBH  
Dormettinger Straße 23  
72359 Dotternhausen

## **Inhaltsverzeichnis**

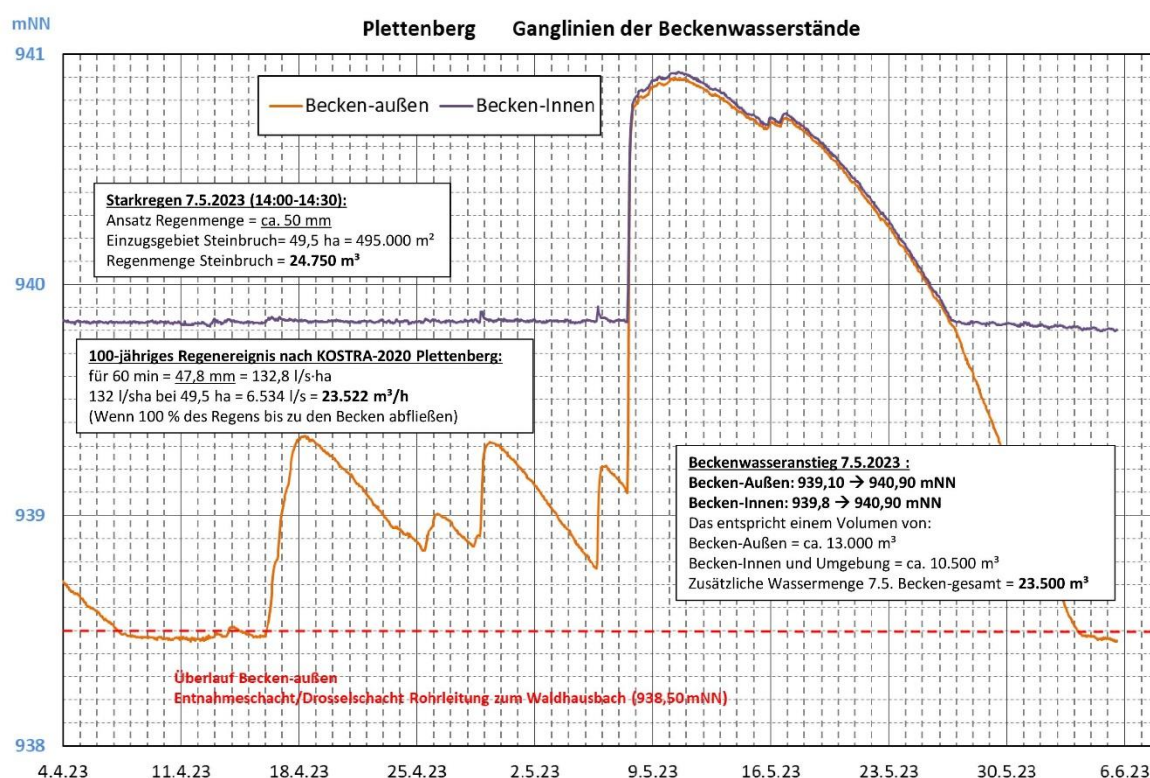
1. Veranlassung .....	1
2. Einwirkungen des Einsturfs .....	3
2.1. Ergebnisse der Berechnungen .....	4
3. Erdbeben .....	5
3.1. Ergebnisse der Berechnungen .....	6
4. Zusammenfassung .....	7
Literatur .....	9
Anhang A – Darstellung der Ergebnisse der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen .....	11
Anhang B – Ergebnisse der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen unter seismischen Einwirkungen nach DIN EN 1998-5:2010-12 .....	24
Anhang C – Felsriegelgeometrien der untersuchten Modellsituationen .....	37

## 1. Veranlassung

Im Rahmen des wasserrechtlichen Genehmigungsverfahrens für die Entwässerung der Sohle des Steinbruchs auf dem Plettenberg der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH soll die Sicherheit der zwei künstlichen Vertiefungen im zentralen bzw. östlichen Bereich des Steinbruchs, die als Rückhalteraum und Absetzbecken genutzt werden, hinsichtlich eines unkontrollierten Wasserausbruchs durch ein Versagen der Beckeneinfassung bewertet werden. Im Gutachten von Fernandez-Steeger & Siebert (2022) wird die Standsicherheit während eines 100-jährigen Niederschlagsereignisses untersucht. Gegenstand der Untersuchungen ist die Standsicherheit des Felsriegels am Beckenrand zwischen dem Versickerungsbecken und dem verfüllten ehemaligen Becken hinsichtlich der außergewöhnlichen Belastung durch ein einen Wasserstand im Becken bei 940,90 m NN, der sich während eines Starkregenereignisses im Mai 2023 eingestellt hat. Hierbei fielen nach Angaben von Dr. J. Pommerening vom Büro Dr. Köhler und Dr. Pommerening ca. 50 mm Regen in einem Zeitraum von weniger als 45 Minuten (Abbildung 1).



Steinbruch Plettenberg – Süderweiterung  
Wasserrechtsantrag

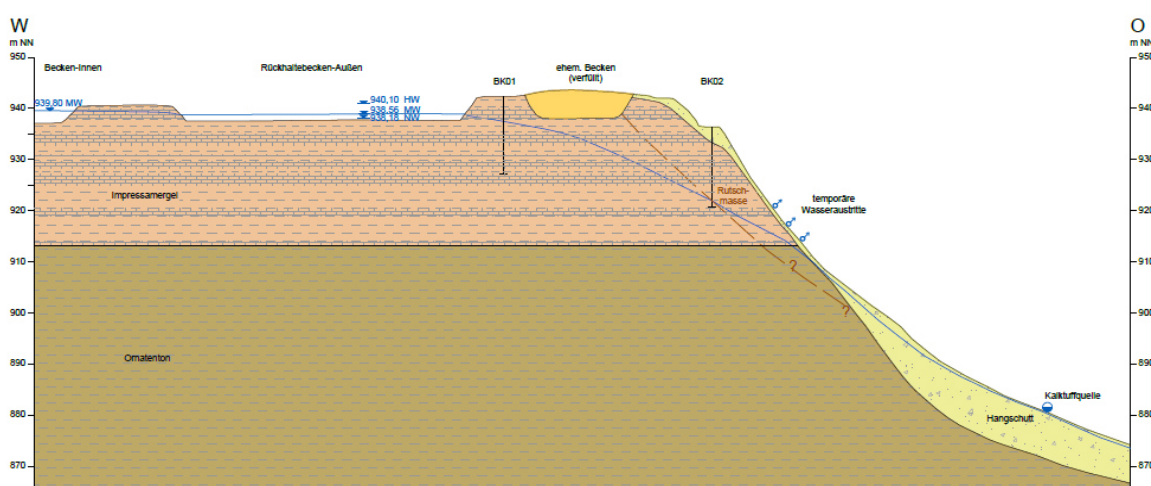
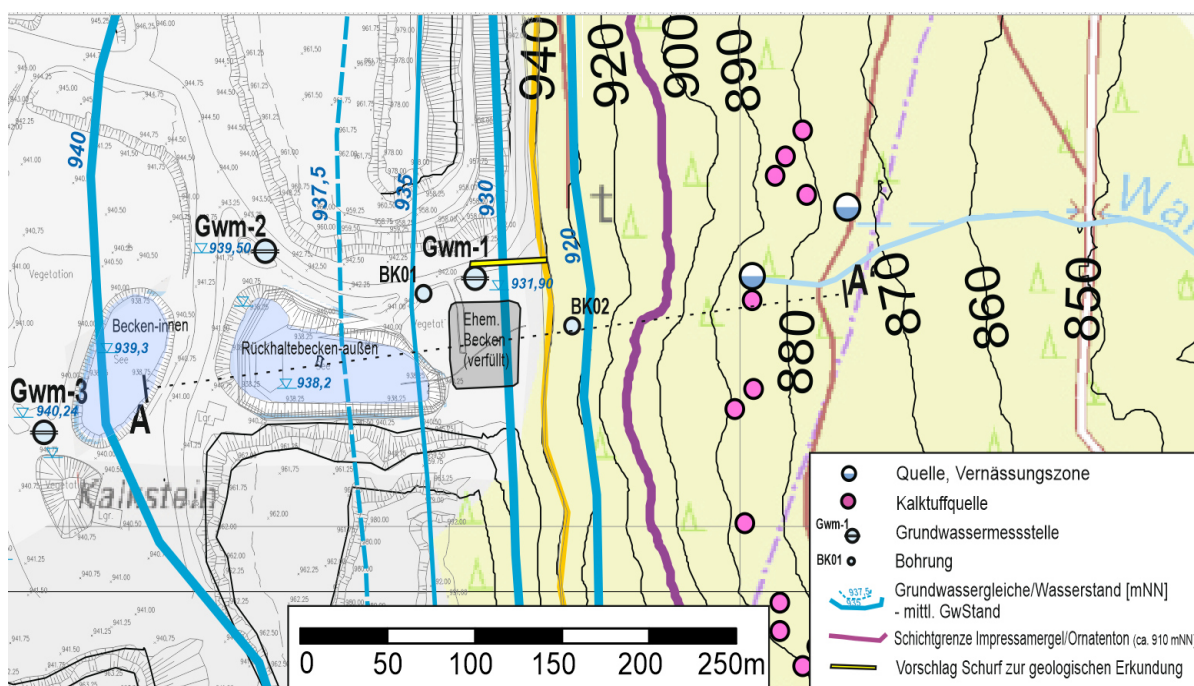


**Abbildung 1: Ganglinien der Beckenwasserstände am Plettenberg während des Niederschlagsereignisses am 07.05.2023 (Dr. Pommerening, persönliche Korrespondenz, E-Mail vom 19.07.2023)**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

Mit Bezug zur „koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes“ (KOSTRA-DWD) wird die Wiederkehrwahrscheinlich auf ein mindestens 100-jähriges Ereignis geschätzt (persönliche Korrespondenz Dr. J. Pommerening, E-Mail vom 19.07.2023).

Diese Schätzung stimmt gut mit den Annahmen im Gutachten von Fernandez-Steeger und Siebert (2022) überein, in dem ein 100-jähriges Niederschlagsereignis mit 940,85 m NN angenommen und modelliert wurde (s. näheres zur Annahme dort).



**Abbildung 2:** oben - Übersichtskarte des Osthangs am Plettenberg mit Grundwassermessstellen und Grundwassergleichen (Pommerening & Thiemann, 11/2022), unten - Hydrogeologisches West-Ost-Profil der Süderweiterung am Steinbruch Plettenberg, zweifach überhöht (Pommerening & Thiemann, 11/2022)

## 2. Einwirkungen des Niederschlagsereignisses

Alle Untersuchungen basieren auf dem geologischen Profil (Abbildung 2) von Köhler & Pommerening (11/2022) für den entsprechenden Hangbereich. Das charakteristische Untersuchungsprofil ist so gewählt, dass die Profillinie in EW-Richtung beginnend am inneren Rückhaltebecken der Hangneigung folgt. Geometrie und geologischer Aufbau für die hydraulischen und geotechnischen Analysen sind dem geologischen Profil (Abbildung 2) entnommen. Die felsmechanischen Parameter wurden aus dem Gutachten von Fernandez-Steeger et al. (2018) übernommen und aus Pommerening & Thiemann (11/2022) die hydraulischen Parameter (s. hierzu auch Fernandez-Steeger & Siebert 2022).

**Tabelle 1: Wasserstand des Niederschlagsereignisses**

<b>Modellsituation</b>	<b>Wasserstand (m NN)</b>
Maximaler Einstaufall	940,90

Die im Profil eingezeichnete Rutschmasse wurde als stark gestörter und zerrütteter Gebirgsbereich mit einem Zerrüttungsfaktor von 1 ( $D = 1$ ) modelliert.

Zur Untersuchung des Extremereignisses wurde eine neue Sickerlinie mit FEM-Simulationen für den Wasserstand (Tabelle 1) als Dauerbelastung mit der Software Slide 2 von Rocscience ermittelt. Hier wird anhand der Wasserstände im Becken, Geometrie und Gebirgspermeabilität eine Sickerlinie berechnet. Zusätzlich wurde eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Einflusses der Geometrie bzw. Dimensionen des Felsriegels auf die Standsicherheit der Beckeneinfassung durchgeführt. Die Fokussierung auf den Felsriegel ergibt sich daraus, dass hier das Gebirge die geringste ungestörte laterale Erstreckung aufweist. Hierfür wurden drei Fälle modelliert. Die unveränderte Geometrie des Felsriegels ist in Abbildung C - 1 dargestellt.

Für den ersten Fall wurde der Sohlen- und Kronenabstand des Felsriegels verkürzt ohne dabei den Verlauf der Böschung zu verändern, was einer Verschiebung der westlichen Beckenböschung aus Abbildung 2 in östlicher Richtung entspricht. (Abbildung C - 2). Im zweiten Fall wurde die Krone als vollständig erodiert

angenommen und die Böschung entsprechend spitz zulaufend modelliert. Der weitere Böschungsverlauf im Sohlenbereich bleibt davon unbeeinflusst (Abbildung C - 3). Für den dritten Fall wurde die Böschung am Felsriegel analog zum ersten Fall verschoben mit dem Ziel einer Verlängerung des Felsriegels zu erreichen. Solche Situationen treten z.B. nördlich des Profils aus Abbildung 2 auf und entsprechen der Verschiebung der östlichen Böschung nach Osten (Abbildung C - 4). Die Kronen- bzw. Sohlenabstände der untersuchten Modelle sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Für die Berechnung der Standsicherheiten der Beckeneinfassung (Felsriegel) wird in dieser Untersuchung der Bereich des Felsriegels bis zur ersten Berme auf der Talseite des Osthang berücksichtigt. Die Berechnungsgrenzen wurden dementsprechend jeweils an der Sohle des Versickerungsbeckens bzw. der Berme angesetzt.

**Tabelle 2: Kronen- und Sohlenabstände am Felsriegel für die berücksichtigten Modellsituationen**

Modellsituation	Kronenabstand (m)	Sohlenabstand (m)
Profil nach Abbildung 2	18,71	31,28
Schmalerer Felsriegel	6,72	19,97
Vollständig erodierte Krone	0	12,43
Breiterer Felsriegel	28,60	41,05

## 2.1. Ergebnisse der Berechnungen

Die Standsicherheitsberechnungen wurden mit dem Programm *Slide2 v9.024* der Firma Rocscience äquivalent zu dem in Fernandez-Steeger & Siebert (2022) dargestellten Vorgehen und Annahmen unter Berücksichtigung des in Tabelle 1 angegebenen Beckenwasserstandes durchgeführt. Als Rechenmethoden wurden die Auswertungen nach Janbu, Bishop und Spencer angewendet. Die Berechnungen der Standsicherheit wurden gemäß Eurocode 7 Nachweisverfahren 1 Kombination 2 durchgeführt und die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend gewählt.

In Tabelle 3 sind die jeweils niedrigsten ermittelten Standsicherheitsbeiwerte tabellarisch aufgelistet. Diese sind Ergebnisse der Berechnungen mit der Methode von Spencer und Janbu. Die graphischen Darstellungen der Modelle sind getrennt nach Auswertungsmethode in Anhang A1 – A12 abgebildet. Die Standsicherheit für den

gemessenen Wasserstand in Folge des Niederschlagsereignisses aus dem Mai 2023 ist mit einem Wert von 2,959 deutlich auf der sicheren Seite (Abbildung A-1 bis A-3).

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Tabelle 3) zeigen bei einer Verkürzung der Geometrie des Felsriegels für einen Beckenwasserstand von 940,90 m NN keine Änderung der Gesamtsicherheit (Abbildung A-4 bis A-6).

Am zu prüfenden Felsriegel selbst werden keine kritischen Gleitkreise ermittelt. Alle relevanten bzw. die Gleitkreise mit der niedrigsten Sicherheit liegen außerhalb des Prüfbereiches im Hangschuttbereich der talseitigen Berme, was mit den Befunden in Fernandez-Steeger und Siebert 2022 übereinstimmt. Für die Sensitivitätsanalyse mit vollständiger bzw. weitgehender Erosion der Krone des Felsriegels gilt dies ebenfalls (Abbildung A-7 bis A-9). Der Felsriegel ist auch bei der angenommenen geringeren Breite nach den in Tabelle 3 aufgelisteten Ergebnissen noch immer standsicher.

Eine Zunahme der Breite des Felsriegels ändert allerdings auch nicht die Gesamtsicherheit, da die Gleitkreise mit der niedrigsten Sicherheit dadurch nicht positiv beeinflusst werden (Abbildung A-10 bis A-12).

**Tabelle 3: Niedrigste ermittelte Standsicherheitsfaktoren bei unterschiedlichen Geometrien des Felsriegels**

Szenario	Sickerlinie	Standsicherheit
940,90 m NN – Felsriegel nach Abbildung 2	FEM	2,959
940,90 m NN – schmalerer Felsriegel	FEM	2,959
940,90 m NN – vollständig erodierte Krone	FEM	2,959
940,90 m NN – breiterer Felsriegel	FEM	2,959

### 3. Erdbeben

Aufgrund der Lage des Plettenbergs in einer Erdbebenzone ist auch die Einwirkung seismischer Lasten untersucht worden. Die Bemessung der Einwirkungen eines Erdbebens wurden gemäß der Norm für die Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben DIN EN 1998 in Fernandez-Steeger & Siebert (2022) untersucht und hier übernommen. Die entsprechenden Beschleunigungsbeiwerte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Die Berechnungen der Standsicherheit wurden gemäß Eurocode 7

Nachweisverfahren 1 Kombination 2 durchgeführt und die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend gewählt.

**Tabelle 4: Beschleunigungsbeiwerte in horizontaler und vertikaler Richtung**

Richtung	Wert nach DIN EN 1998-5:2010-12
Horizontalbeschleunigungswert $k_h$ in m/s	0,0881
Vertikalbeschleunigungswert $v_h$ in m/s	0,0291

### 3.1. Ergebnisse der Berechnungen

Die Ergebnisse der Analysen im Falle eines Erdbebens befinden sich als graphische Darstellungen in Anhang B1 – B12. Die jeweils niedrigsten Standsicherheitsbeiwerte sind in Tabelle 5 aufgelistet. Diese sind analog zu 2.1. für die Auswertung nach der Methode von Spencer und Janbu dargestellt. Der niedrigste Standsicherheitsbeiwert von 2,362 ist erwartungsgemäß niedriger als ohne seismische Lasten, allerdings liegt er noch immer deutlich auf der sicheren Seite (Abbildung B-1 bis B-3).

Die Aussagen für die Sensitivitätsanalyse aus 2.1. bestätigen sich auch hier. Änderungen der Breite des Felsriegels haben bei den anliegenden Böschungen und Gesteinsfestigkeiten nur eine untergeordnete Bedeutung für die Gesamtsicherheit des Systems (Abbildung A-4 bis A-12). Die Gleitkreise mit der geringsten Sicherheit werden hierdurch nicht beeinflusst.

**Tabelle 5: Niedrigste ermittelte Standsicherheitsfaktoren bei unterschiedlichen Modellsituationen bzw. hydraulischen Zuständen**

Szenario	Sickerlinie	Standsicherheit
940,90 m NN – Felsriegel nach Abbildung 2	FEM	2,362
940,90 m NN – schmalerer Felsriegel	FEM	2,362
940,90 m NN – vollständig erodierte Krone	FEM	2,362
940,90 m NN – breiterer Felsriegel	FEM	2,362

Die beobachtete Reduzierung der Sicherheiten ist bedingt durch die zusätzlichen seismischen Lasten, da der Verlauf der Sickerlinien zu den unter 2.1. besprochenen



Fällen und somit auch der hydraulische Einfluss unverändert bleibt. Diese seismischen Lasten wirken in der Simulation pseudostatisch „dauerhaft“ auf das Hanggleichgewicht ein und führen zu der Reduktion der Standicherheit, sowohl global als auch bei der alleinigen Betrachtung der Felsbereiche. Zu beachten ist, dass die seismischen Lasten in diesem Fall gleichzeitig zu dem außergewöhnlichen Aufstau wirken.

#### **4. Zusammenfassung**

Der Wasserstand von 940,90 m NN wirkt sich nach den vorliegenden Berechnungen nicht kritisch auf die Standicherheit am Felsriegel aus. Dies ist aufgrund der in Fernandez-Steeger & Siebert (2022) gemachten Beobachtungen und des nur geringfügige höheren Einstaus auch zu erwarten. Es gibt weiterhin keine Indizien die darauf hinweisen, dass kritische Gleitkreise am Felsriegel oder auch am Gebirgskörper über die beschriebene Rutschmasse hinaus auftreten, die in das verfüllte ehemalige Becken oder sogar bis in den Felsriegel hineinreichen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen aus Fernandez-Steeger & Siebert (2022). Die Ergebnisse der vorliegenden Berechnungen schätzen den Felsriegel nach aktueller Datenlage folglich auch unter der beobachteten erhöhten Last während des Niederschlagsereignisses im Mai 2023 als standsicher ein.

Wie bereits unter 2.1. und 2.2. beschrieben wirkt sich eine geringere Breite des Felsriegels bei der angenommenen Geometrie und Gesteinsbeschaffenheit nicht nachteilig auf die Gesamtsicherheit aus, eine Verbreiterung allerdings auch nicht positiv. Das liegt daran, dass der Felsriegel eine höhere Sicherheit aufweist als das Gehaltssystem, das allerdings auch auf der sicheren Seite ist. Diese Aussage betrifft nicht die Hangschuttbereiche bzw. Paläorutschungen an den Außenhängen des Plettenbergs. Diese sind nicht Gegenstand dieser Prüfung und wurde bereits in Fernandez-Steeger & Siebert (2022) besprochen.

Bei den berechneten Standicherheiten aus der Sensitivitätsanalyse ist zu beachten, dass es sich um hypothetische Annahmen handelt, die erlauben sollen zu bewerten wie sensibel die Modelle auf eine Änderung der Breite des Riegels reagieren. Diese basieren auf Annahmen und stellen daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Zusammenfassend zeigen diese aber, dass Abweichungen in der Breite bei einer entsprechenden Böschungsneigung und der Festigkeit des Gesteins von untergeordneter Bedeutung für die Gesamtsicherheit der Beckeneinfassung sind. Da die Sicherheiten der kritischen Gleitkreise auf der sicheren Seite liegen müssen die

am Felsriegel noch höhere Sicherheitswerte aufweisen. Weiterhin ist zu beachten, dass eine Änderung der Felsriegelgeometrie auch zwangsläufig eine Änderung im Speichervolumen des Beckens verursacht. So würde eine erosive Reduktion der Breite des Felsriegels über den kompletten Beckenrand eine Vergrößerung des Speichervolumens bewirken und somit bei gleicher Niederschlagsmenge in einem geringeren Wasserstand resultieren.

Obwohl bei seismischer Beeinflussung die Sicherheiten erwartungsgemäß abnehmen, bleiben sie auch unter Berücksichtigung der Teilsicherheitswerte (Abminderungsfaktoren) deutlich auf der sicheren Seite. Auch hier gelten die oben gemachten Aussagen hinsichtlich der Geometrie und Breite des Felsriegels. Bei einer aktiven Einflussnahme im Zuge des fortschreitenden Abbaus sollten anhand der dann vorliegenden Daten weitere Berechnungen durchgeführt werden. Das gleich gilt wenn abweichende Informationen zur Felsqualität und hydraulischen Situation bekannt werden.

Berlin, den 21.07.2023



Prof. Dr. Tomás M. Fernandez-Steeger

## Literatur

Bahrig, B (2013): Geotechnischer Bericht zur Versickerung von Oberflächenwasser – Dotternhausen, Steinbruch Plettenberg. – November 2013, im Auftrag der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH.

Bishop, A.W. (1955): The use of Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Géotechnique, Vol. 5 (1), pp. 7-17.

DIN EN 1997-1, Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1 Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A12013

DIN EN 1998-1/NA:2021-07, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten mit CD-ROM

DIN EN 1998-5:2010-12, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte; Deutsche Fassung EN 1998-5:2004

Fernandez-Steeger, T.M., Siebert, M. (2022): Gutachten zu Fragen der Böschungssicherheit der Absetz- und Versickerungsbecken für die Zwischenspeicherung von Niederschlagswässern im zentralen und östlichen Bereich des Steinbruchs auf dem Plettenberg -Dezember 2022, im Auftrag der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH. Technische Universität Berlin

Fernandez-Steeger, T.M., Braun, A., Marsch, K., Thieme, R., Wernecke, C. (2018): Gutachten zu Fragen der Hangstabilität am Plettenberg – November 2018, im Auftrag der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH. Technische Universität Berlin.

Geyer, O. F., Gwinner, M. P., Geyer, M., Nitsch, E., Simon, T. (2011): Geologie von Baden-Württemberg, Schweizerbart, 5. Auflage 2011.

Janbu, N. (1954): Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. Harvard Soil Mechanics, Vol. 46., 81 p.

Pommerening, J., Thiemann, P. (11/2022): Hydrogeologie und Hochwasserabfluss im Bereich des Steinbruchs und des Rückhaltebeckens sowie der Ost-Böschung des Plettenbergs – Stellungnahme – November 2022, im Auftrag der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH.

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

Pommerening, J., Thiemann, P. (04/2022): Niederschlagsentwässerung des Steinbruchs Plettenberg – Wasserrechtliche Erlaubnis. Stellungnahme zum Schreiben des LRA Zollernalbkreis vom 11.03.2022 – April 2022, im Auftrag der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GMBH.

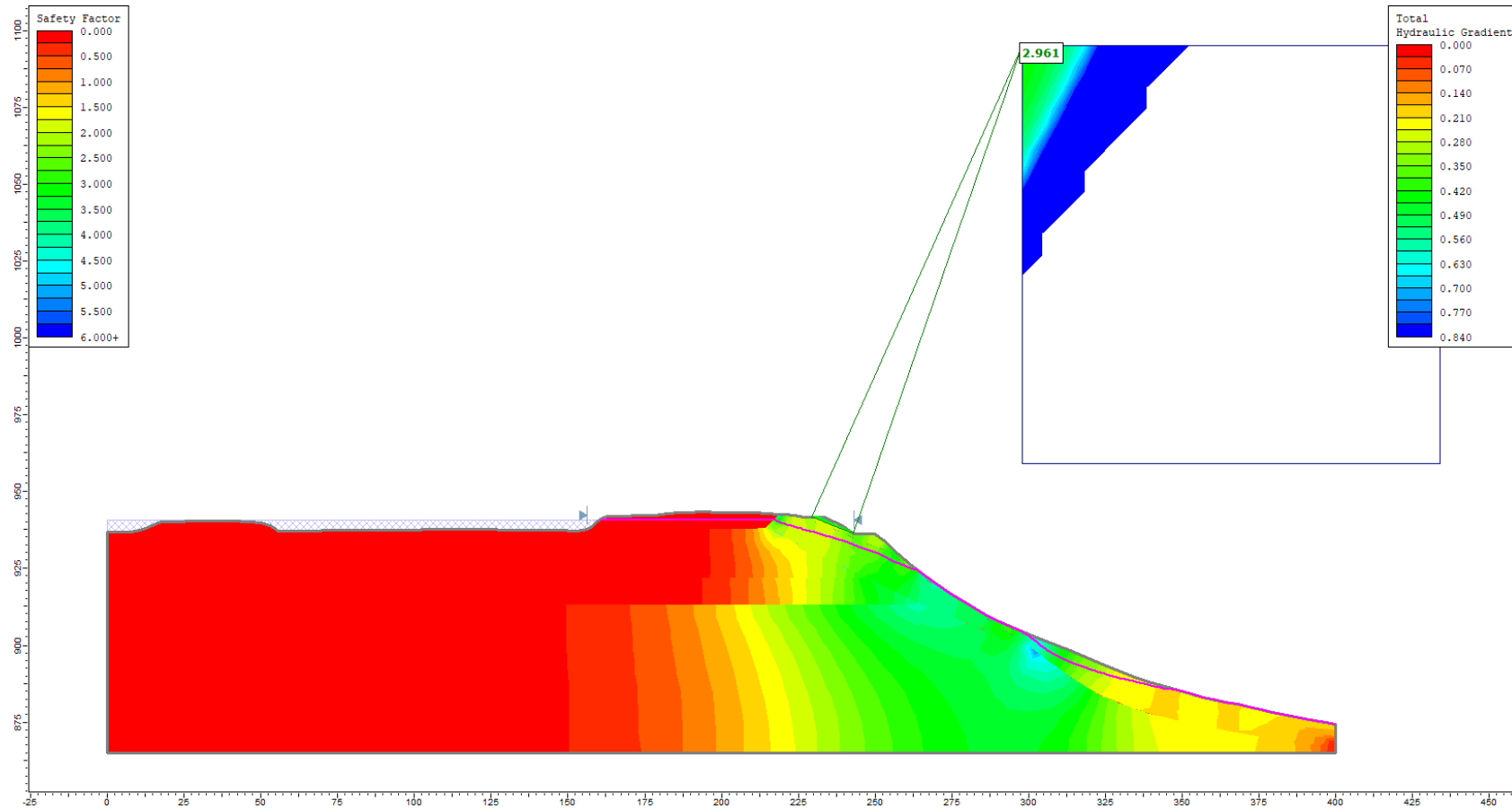
Pommerening, J. (2023): Persönliche Korrespondenz, E-Mail (19.07.2023).

Spencer, E. (1967): A method of analysis of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, Vol. 17 (1), pp. 11-26.

### Anhang A – Darstellung der Ergebnisse der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen

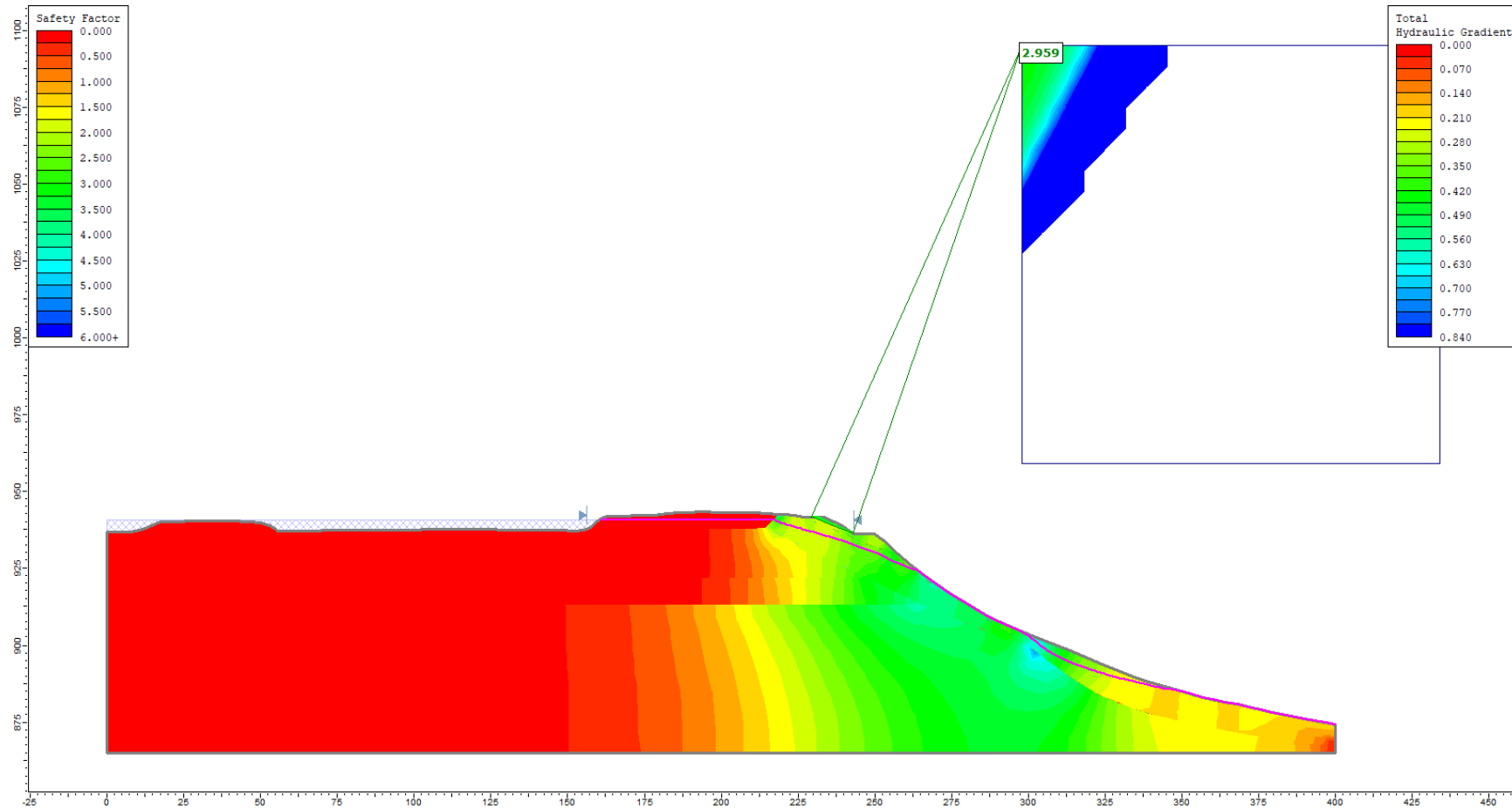
	Ermittlung Sickerwasserlinie	Wasserstand Becken (m NN)	Breite des Felsriegels	seismische Belastung	Bishop	Janbu	Spencer
A-1	FEM	940,90	Original nach Abbildung 2	-	2,961		
A-2	FEM	940,90	Original nach Abbildung 2	-		2,959	
A-3	FEM	940,90	Original nach Abbildung 2	-			2,959
A-4	FEM	940,90	verkürzt	-	2,961		
A-5	FEM	940,90	verkürzt	-		2,959	
A-6	FEM	940,90	verkürzt	-			2,959
A-7	FEM	940,90	vollständig erodierte Krone	-	2,961		
A-8	FEM	940,90	vollständig erodierte Krone	-		2,959	
A-9	FEM	940,90	vollständig erodierte Krone	-			2,959
A-10	FEM	940,90	verlängert	-	2,961		
A-11	FEM	940,90	verlängert	-		2,959	
A-12	FEM	940,90	verlängert	-			2,959

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



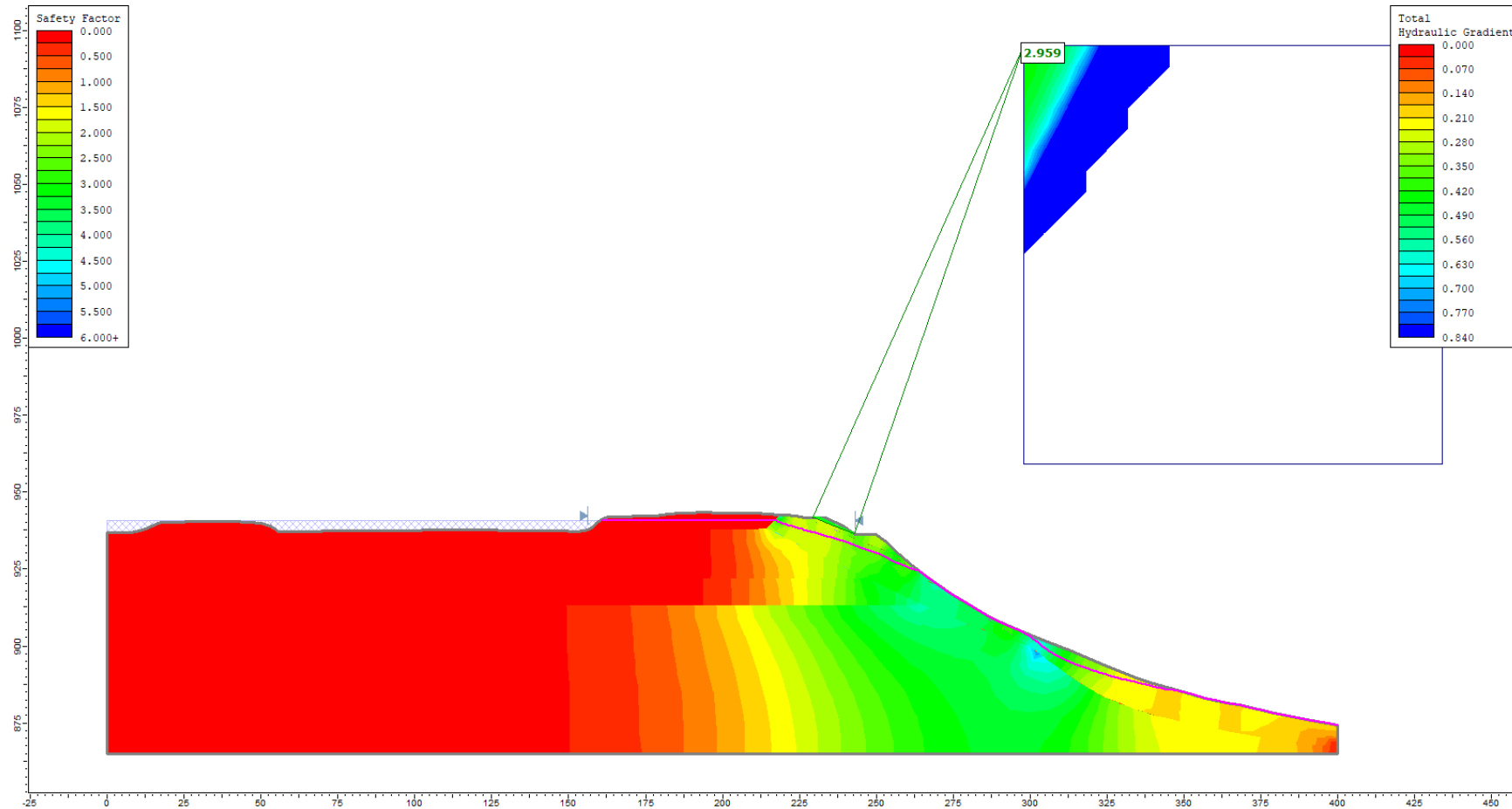
**Abbildung A - 1: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit bei originaler Felsriegelgeometrie nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung A - 2: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit bei originaler Felsriegelgeometrie nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

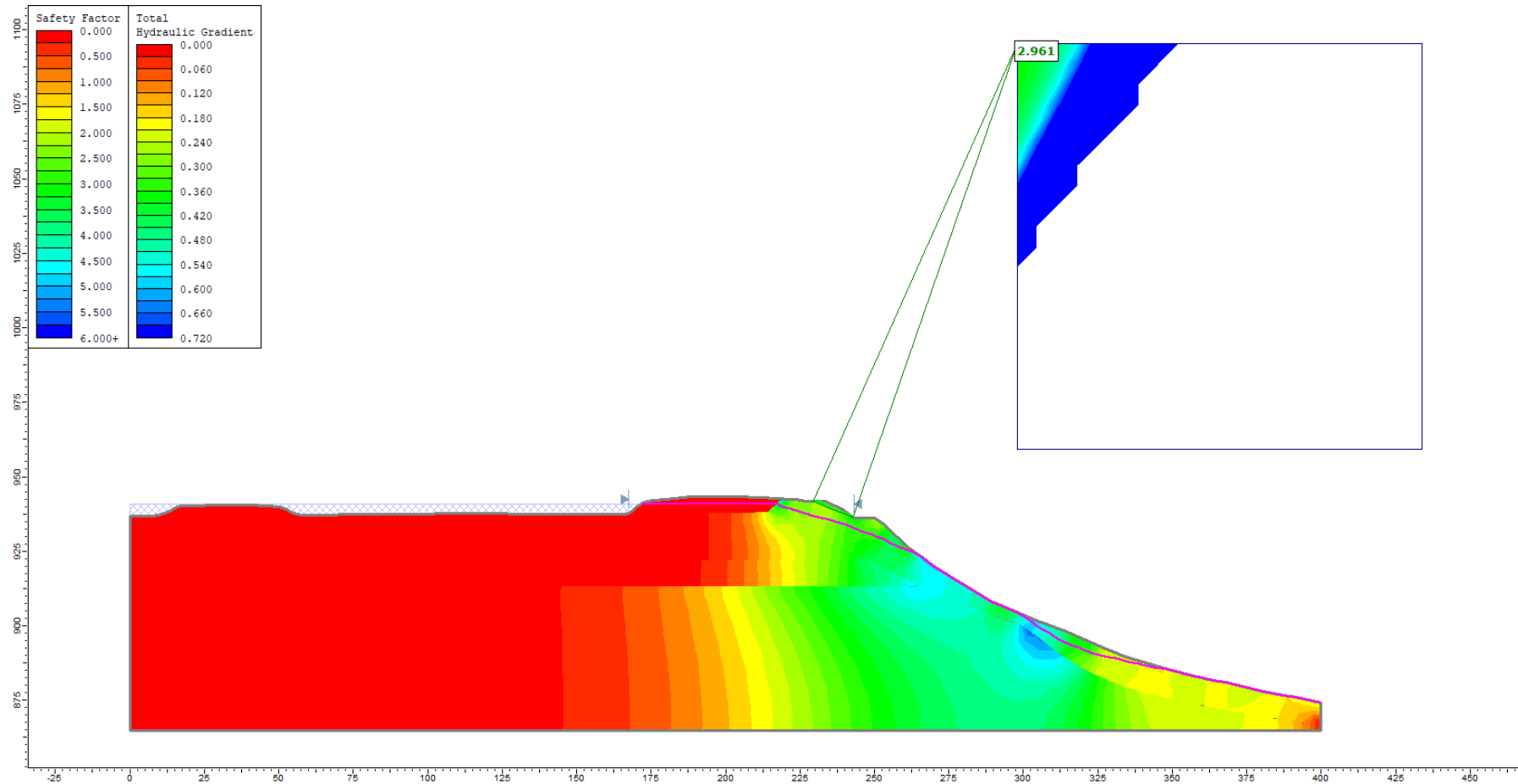
Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung A - 3: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit bei originaler Felsriegelgeometrie nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

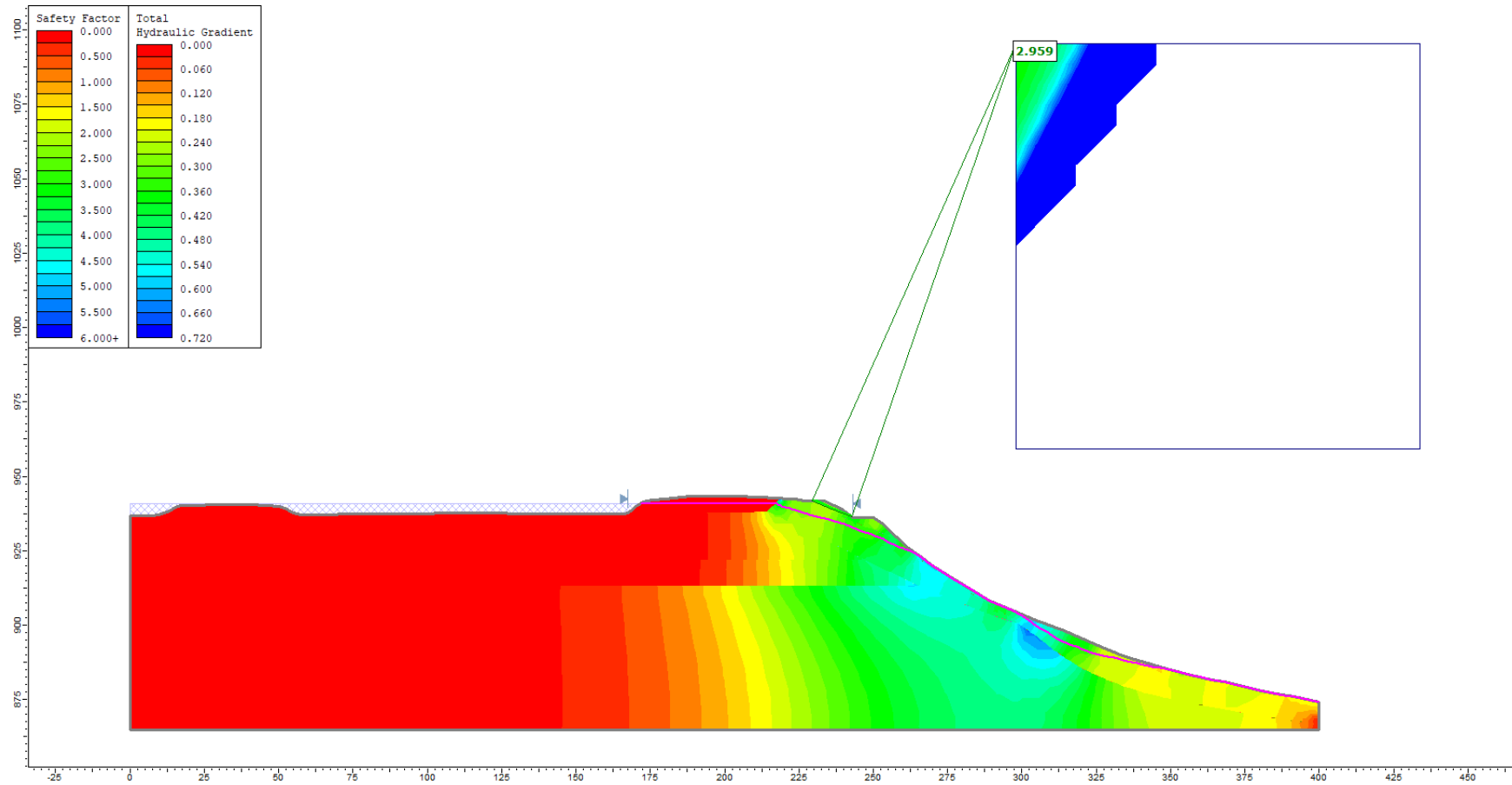


Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



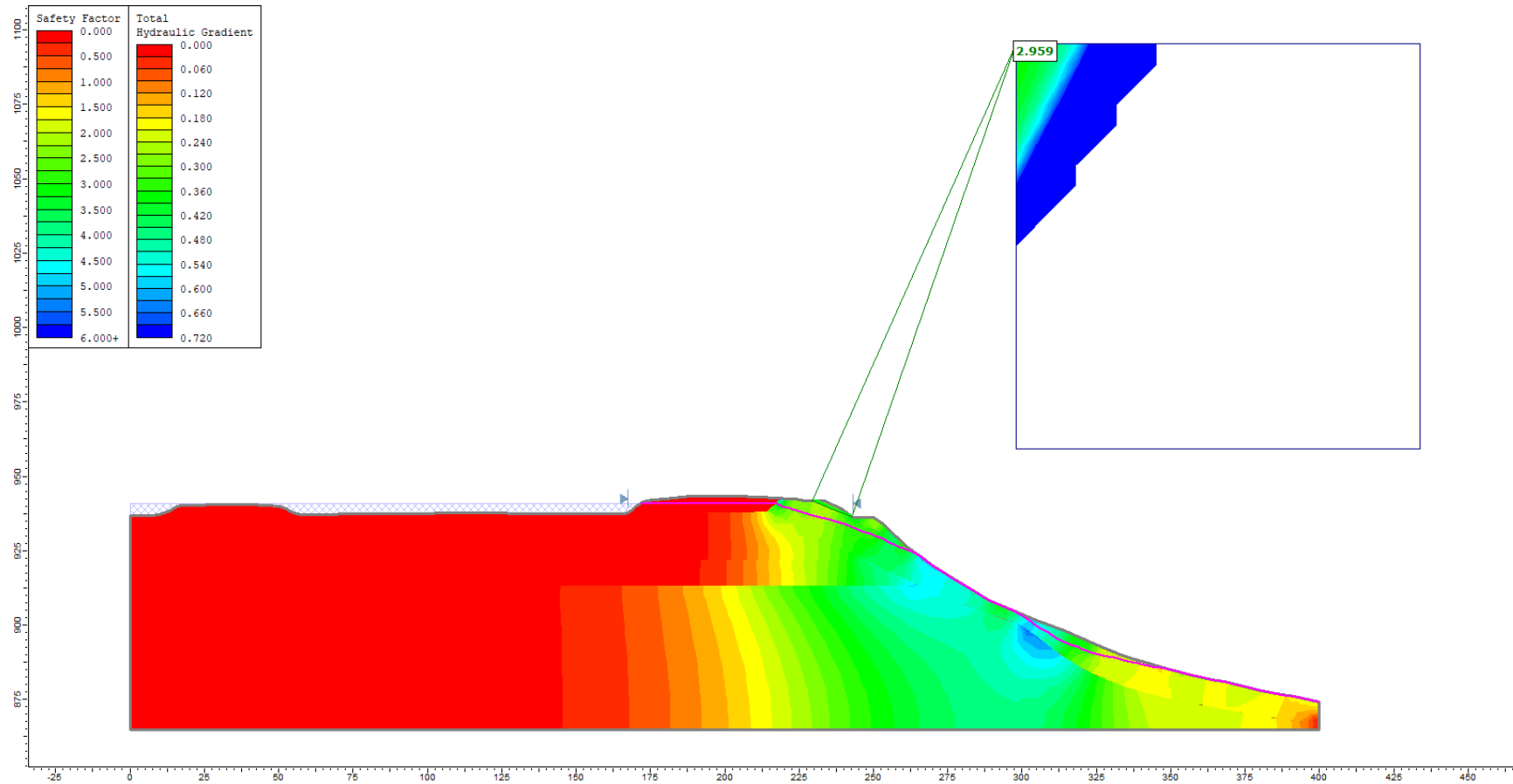
**Abbildung A - 4: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit des verkürzten Felsriegels nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



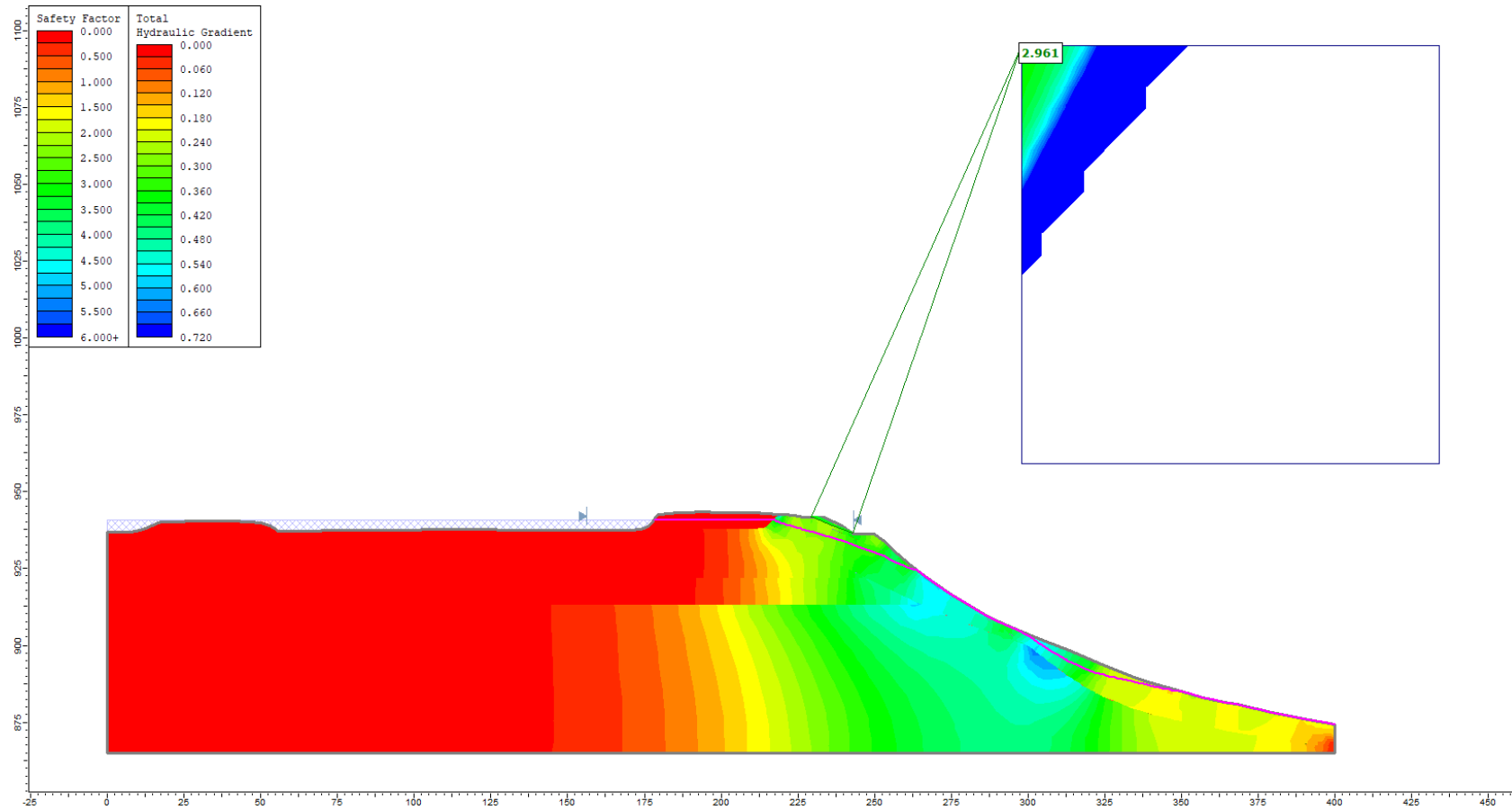
**Abbildung A - 5: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit des verkürzten Felsriegels nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



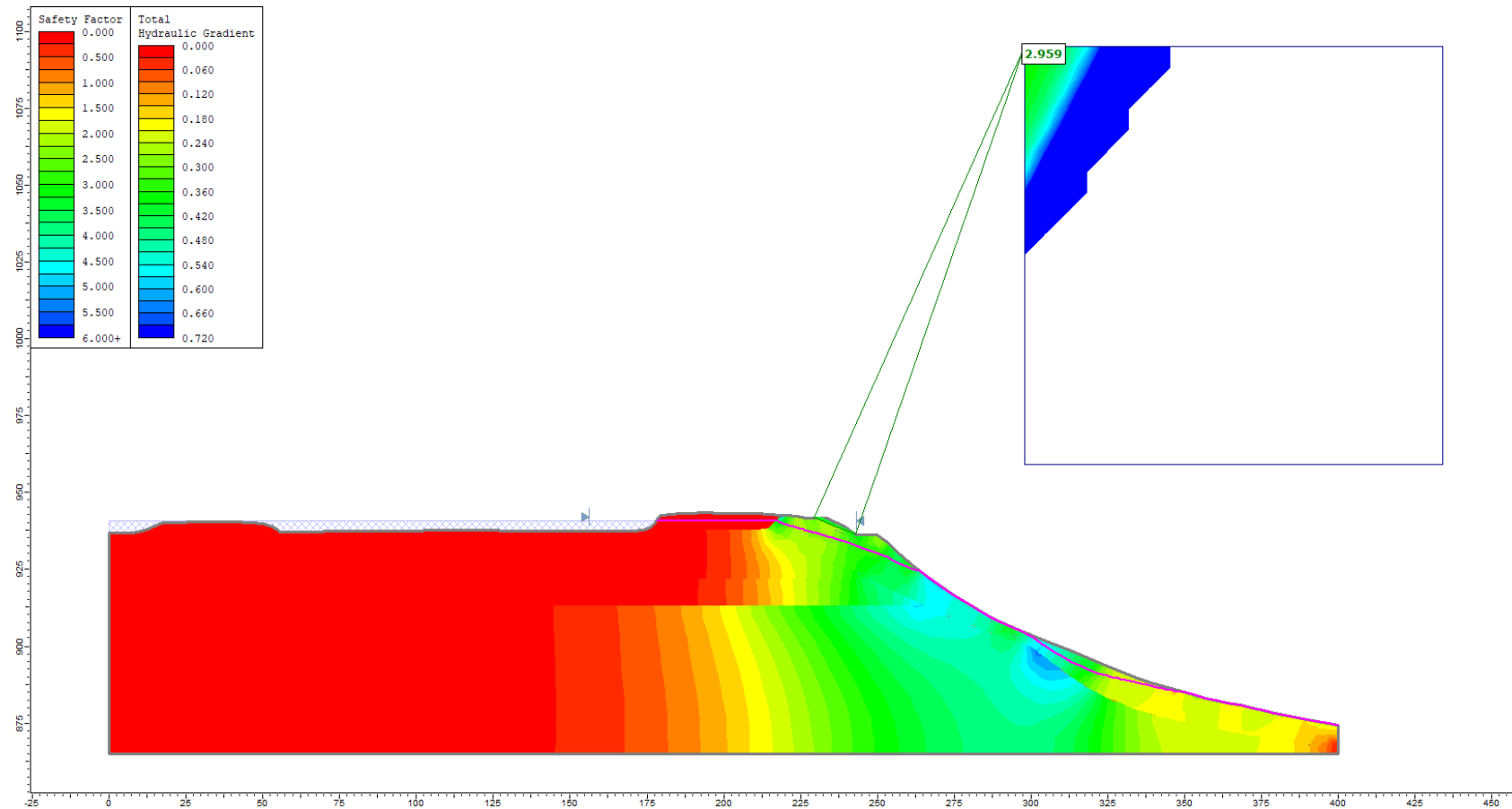
**Abbildung A - 6: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit des verkürzten Felsriegels nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



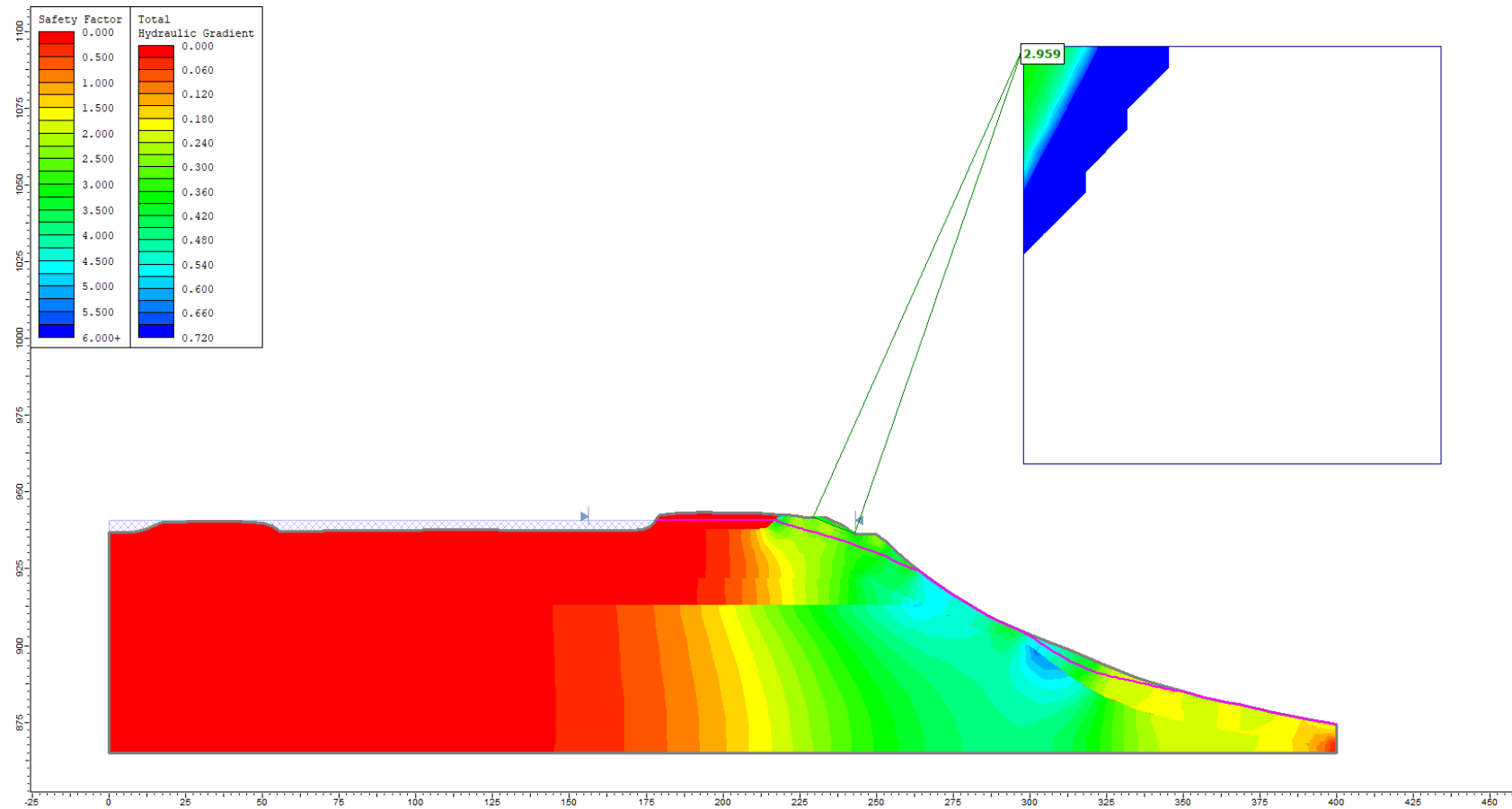
**Abbildung A - 7: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit bei vollständiger erodierter Felsriegelkrone nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



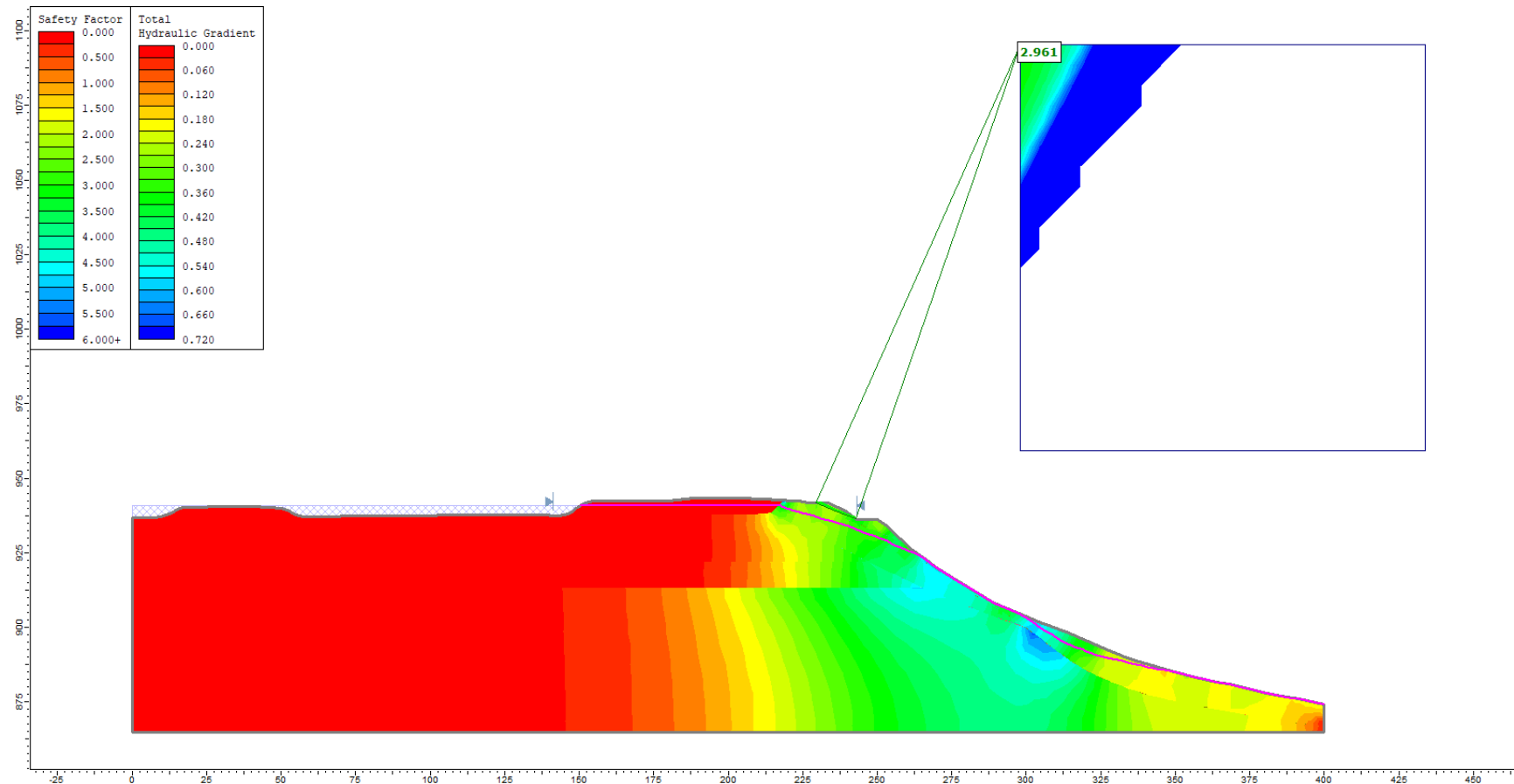
**Abbildung A - 8: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit bei vollständiger erodierter Felsriegelkrone nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung A - 9: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit bei vollständiger erodierter Felsriegelkrone nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung A - 10: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit des verlängerten Felsriegels nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

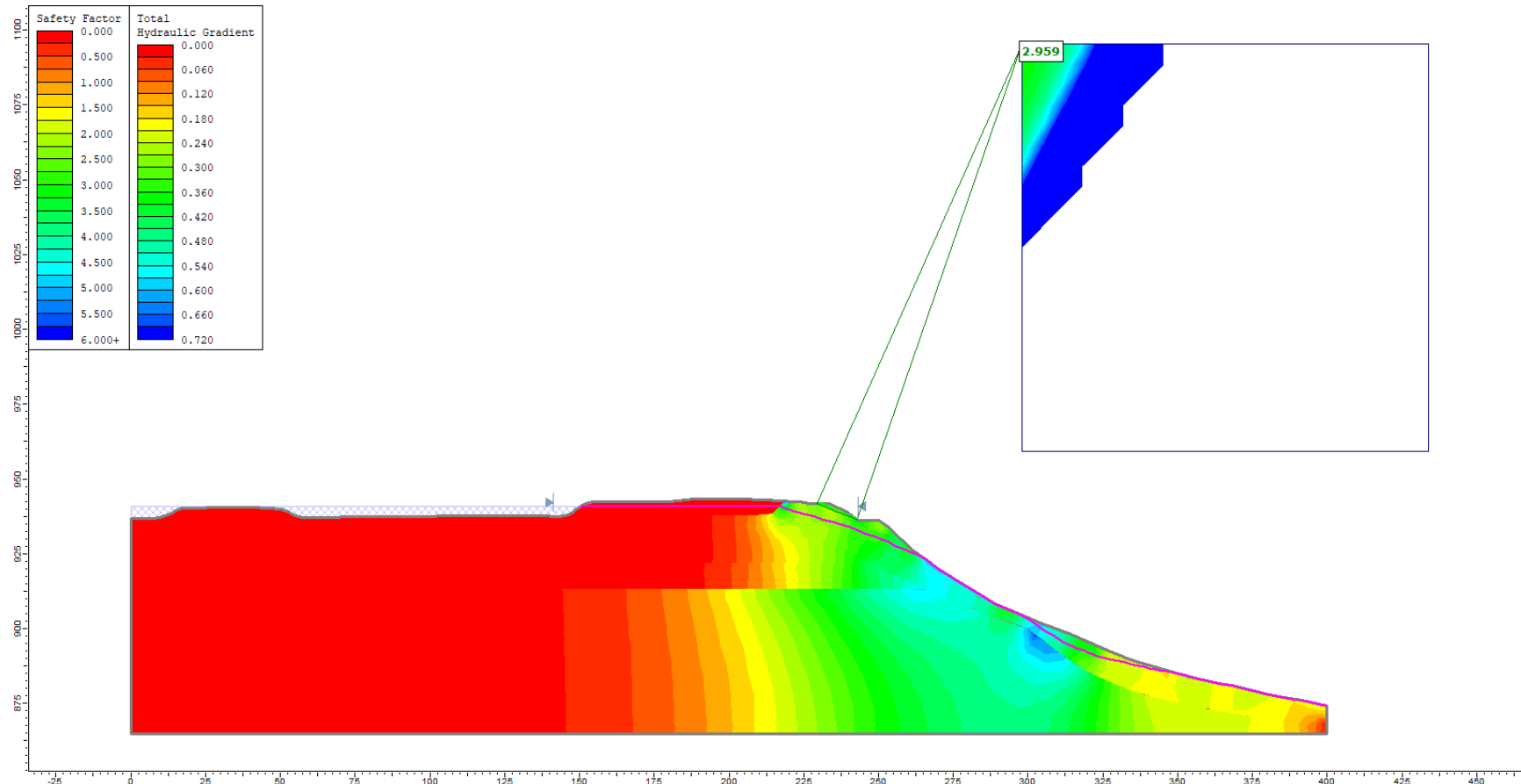


Abbildung A - 11: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit des verlängerten Felsriegels nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie



Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

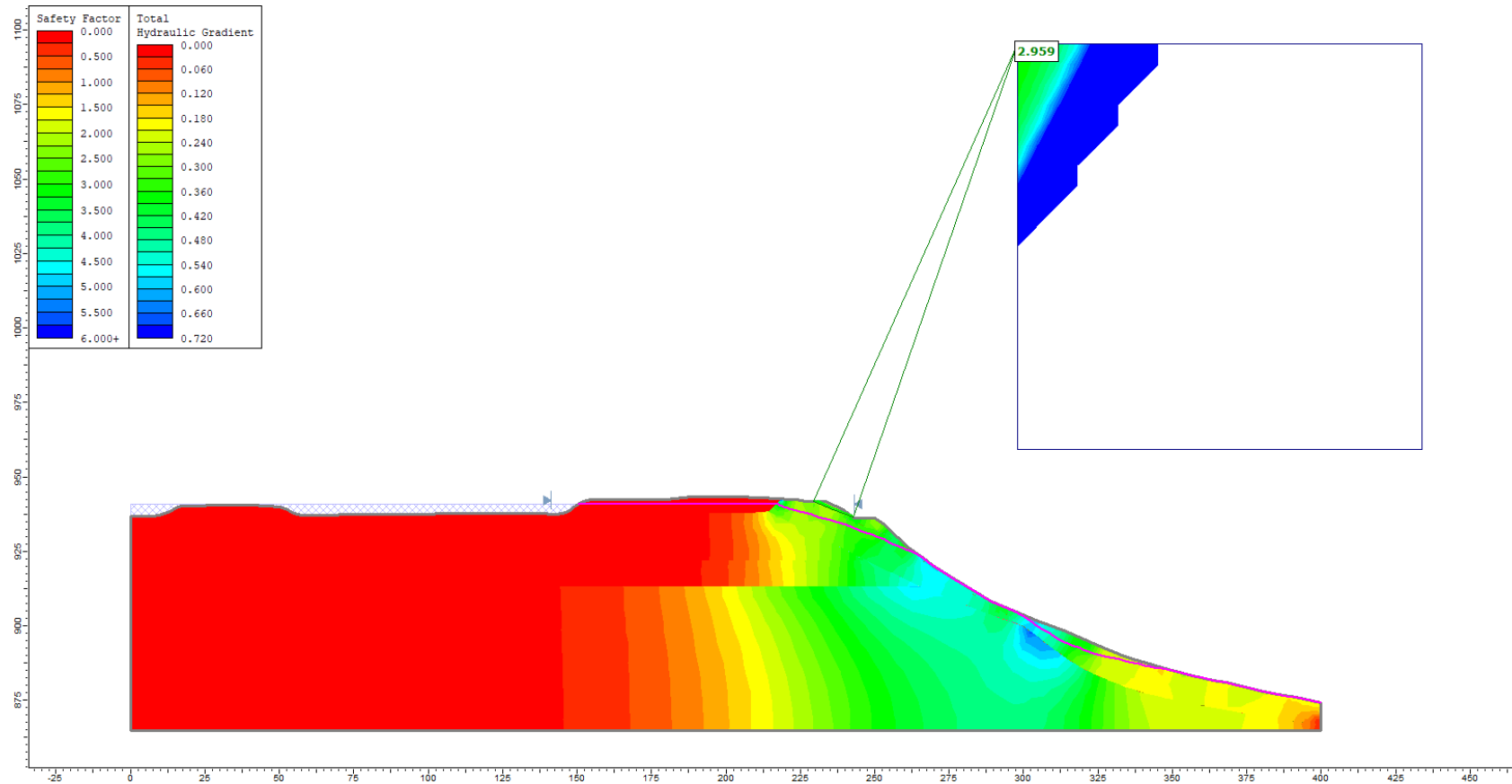
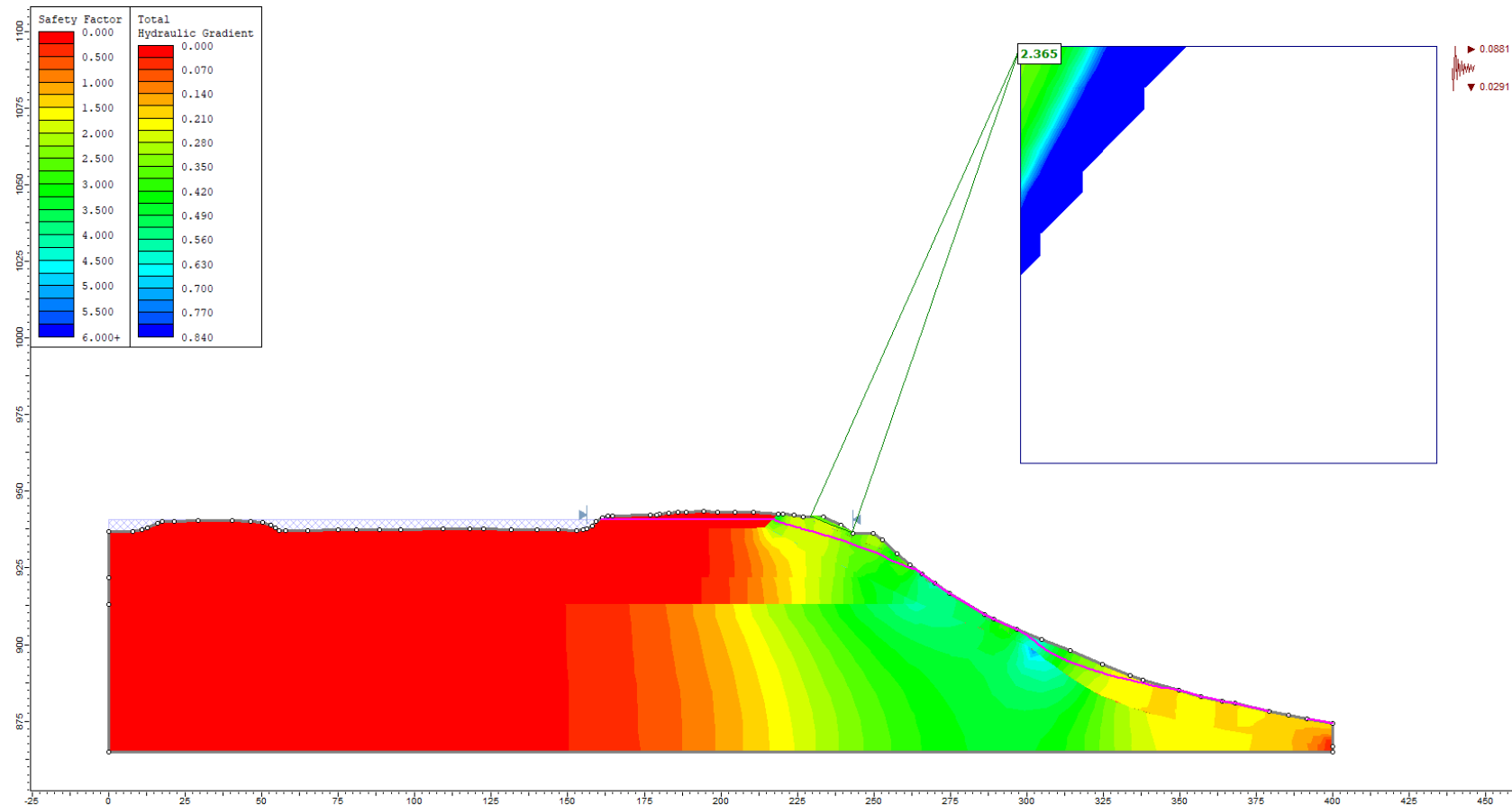


Abbildung A - 12: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit des verlängerten Felsriegels nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

**Anhang B – Ergebnisse der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen  
 unter seismischen Einwirkungen nach DIN EN 1998-5:2010-12**

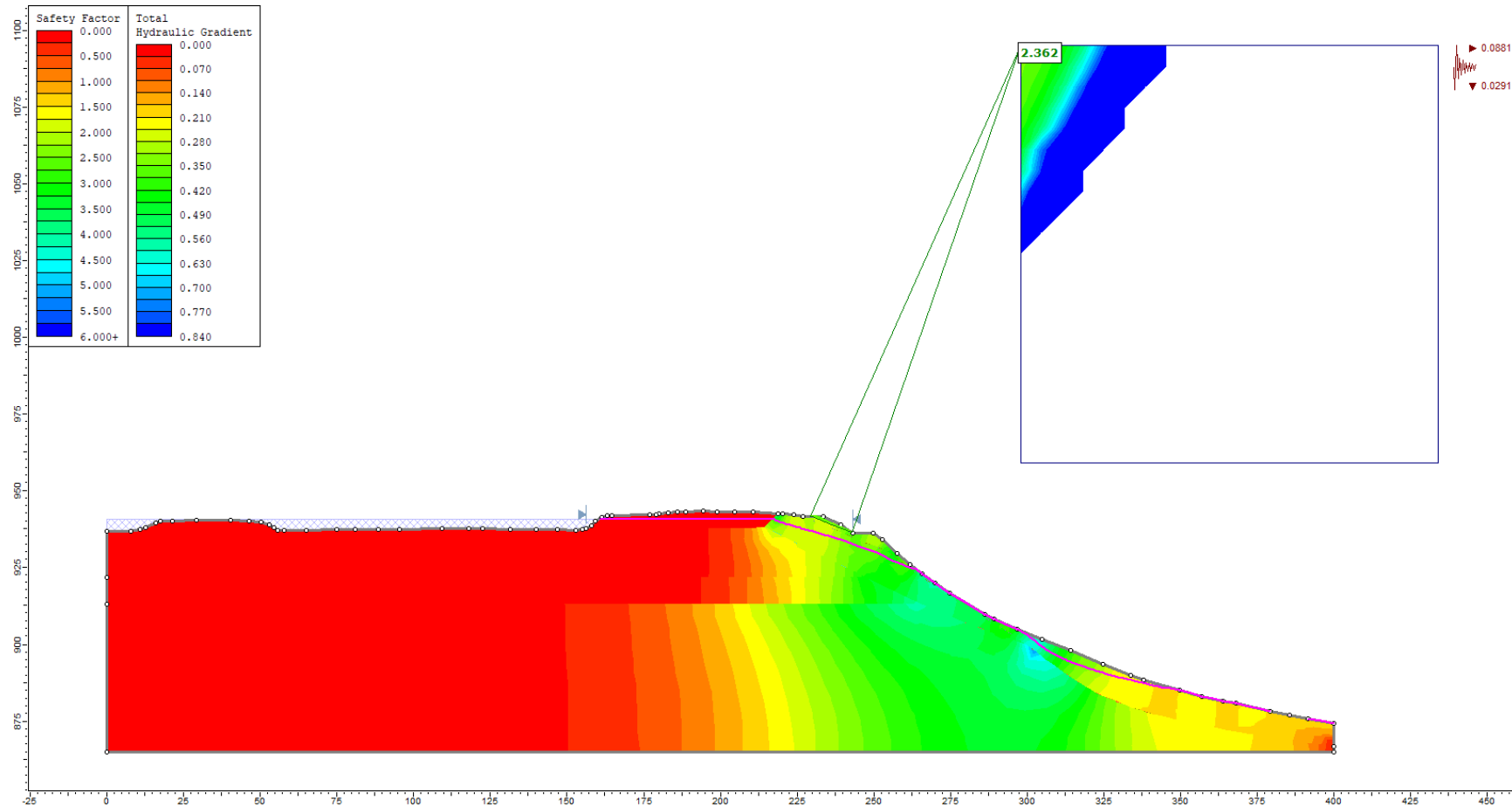
	Ermittlung Sickerwasserlinie	Wasserstand Becken (m NN)	Geometrie des Felsriegels	seismische Belastung	Bishop	Janbu	Spencer
B-1	FEM	940,90	Original nach Abbildung 2	0,0881 / 0,0291	2,365		
B-2	FEM	940,90	Original nach Abbildung 2	0,0881 / 0,0291		2,362	
B-3	FEM	940,90	Original nach Abbildung 2	0,0881 / 0,0291			2,362
B-4	FEM	940,90	verkürzt	0,0881 / 0,0291	2,365		
B-5	FEM	940,90	verkürzt	0,0881 / 0,0291		2,362	
B-6	FEM	940,90	verkürzt	0,0881 / 0,0291			2,362
B-7	FEM	940,90	vollständig erodierte Krone	0,0881 / 0,0291	2,365		
B-8	FEM	940,90	vollständig erodierte Krone	0,0881 / 0,0291		2,362	
B-9	FEM	940,90	vollständig erodierte Krone	0,0881 / 0,0291			2,362
B-10	FEM	940,90	verlängert	0,0881 / 0,0291	2,365		
B-11	FEM	940,90	verlängert	0,0881 / 0,0291		2,362	
B-12	FEM	940,90	verlängert	0,0881 / 0,0291			2,362

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



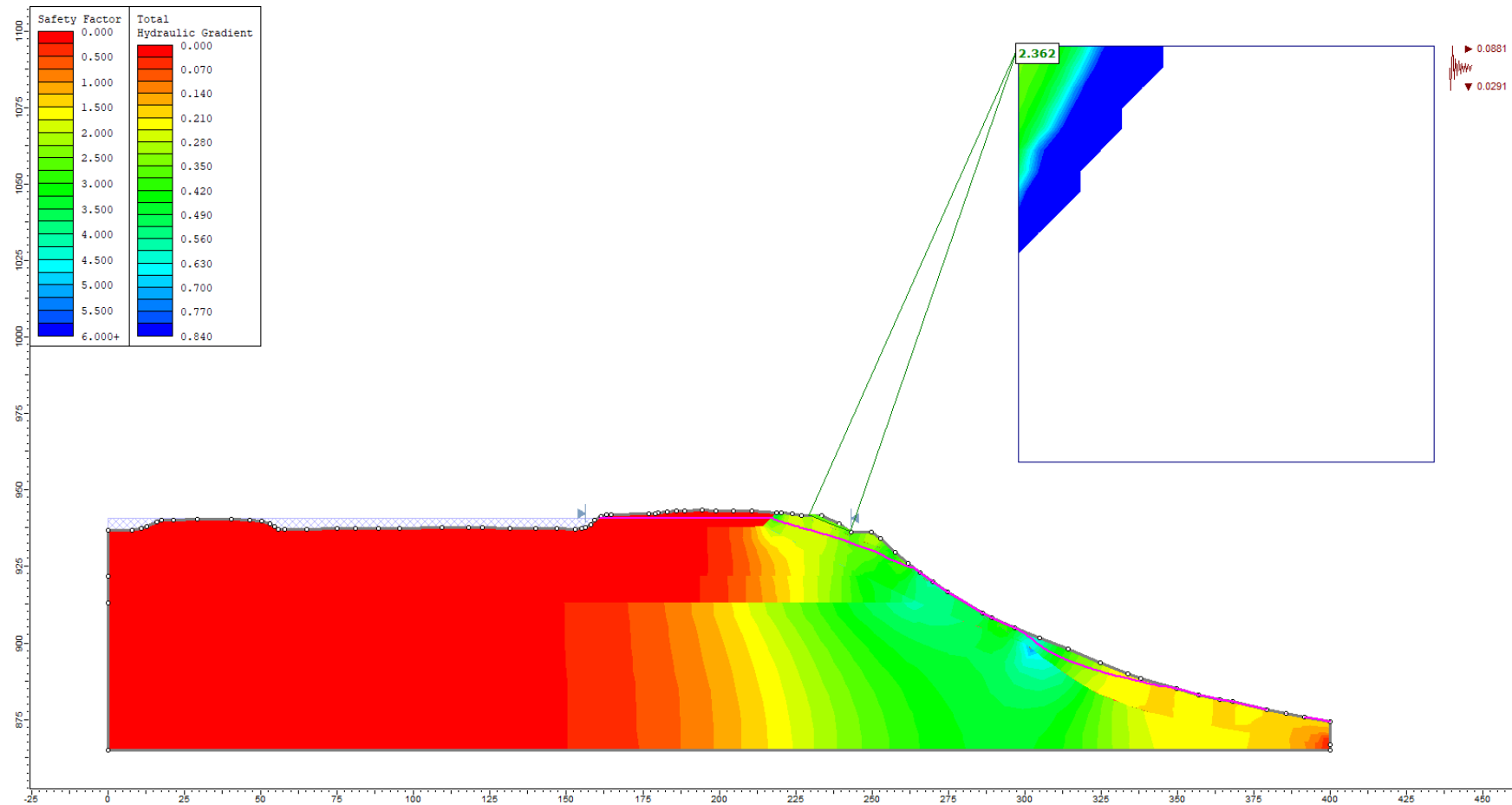
**Abbildung B - 1: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit bei originaler Felsriegelgeometrie nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



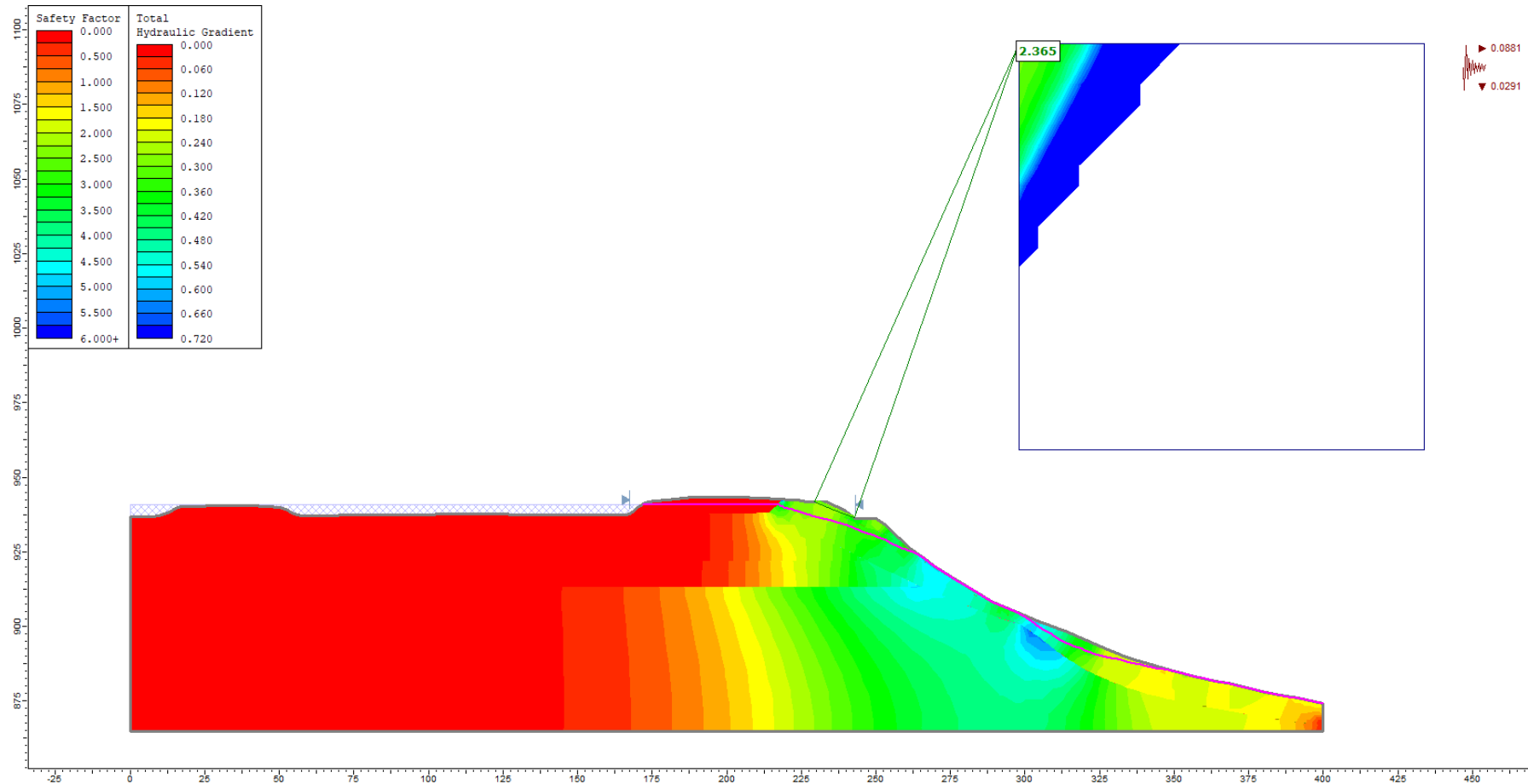
**Abbildung B - 2: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit bei originaler Felsriegelgeometrie nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



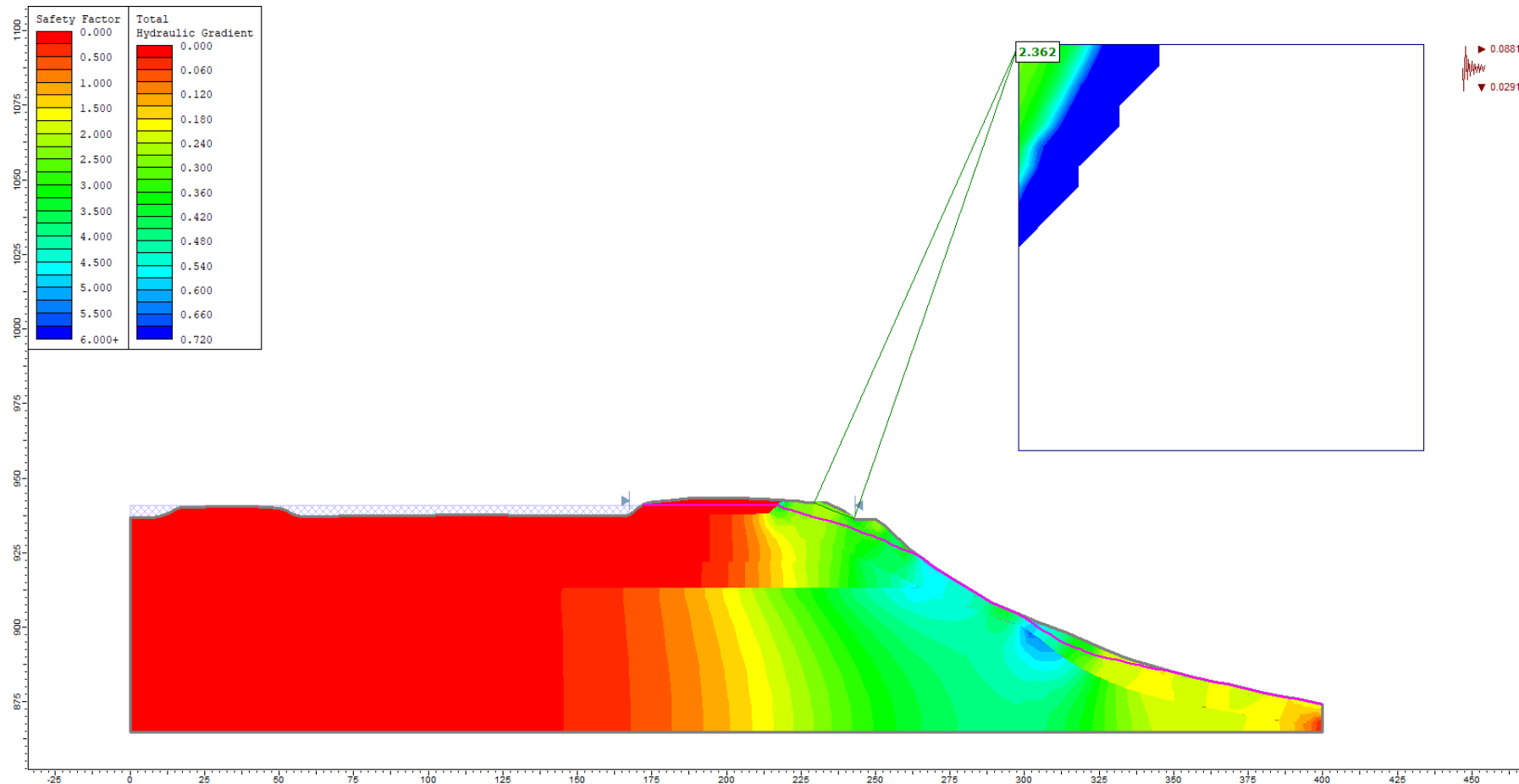
**Abbildung B - 3: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit bei originaler Felsriegelgeometrie nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



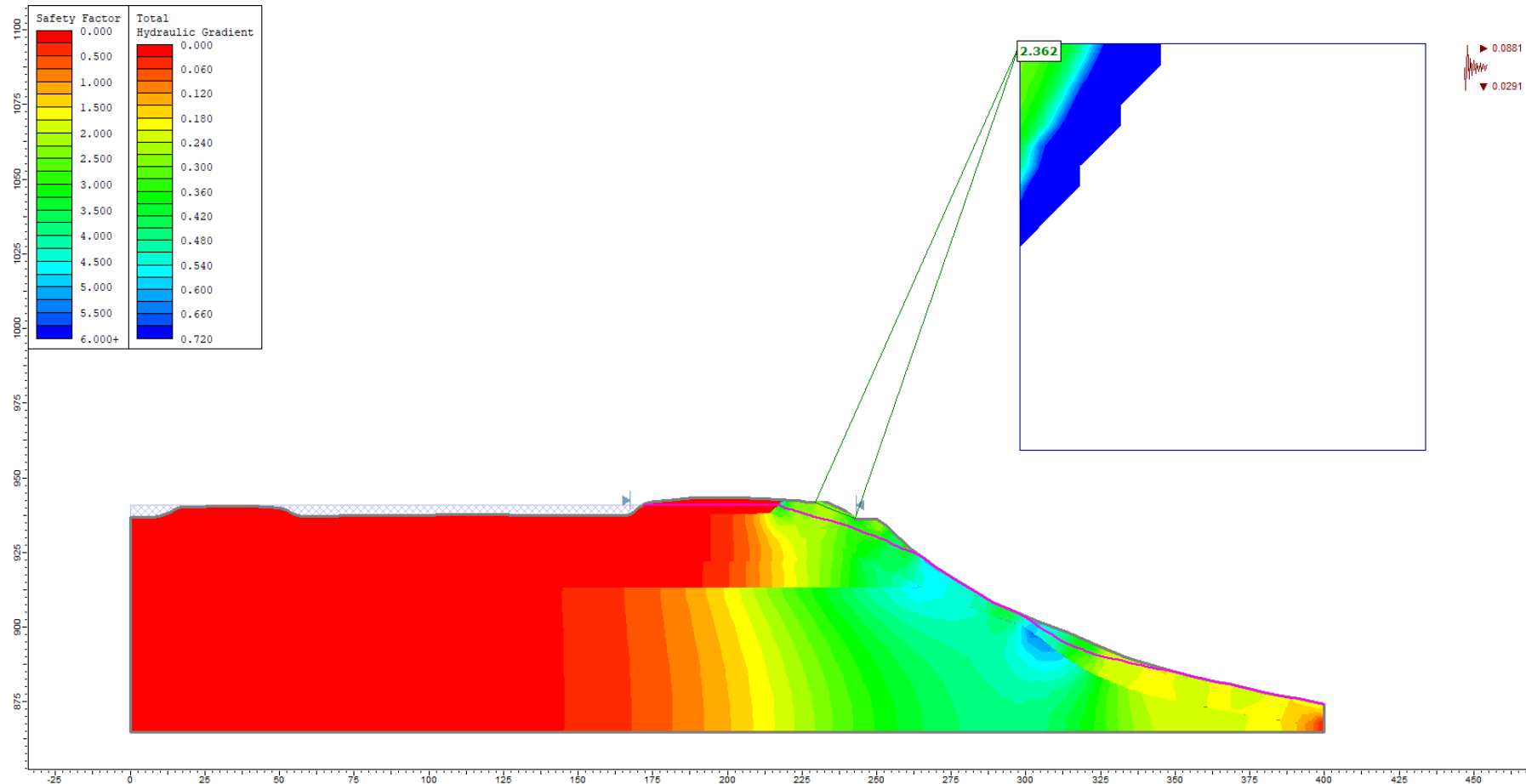
**Abbildung B - 4: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit des verkürzten Felsriegels nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung B - 5: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit des verkürzten Felsriegels nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

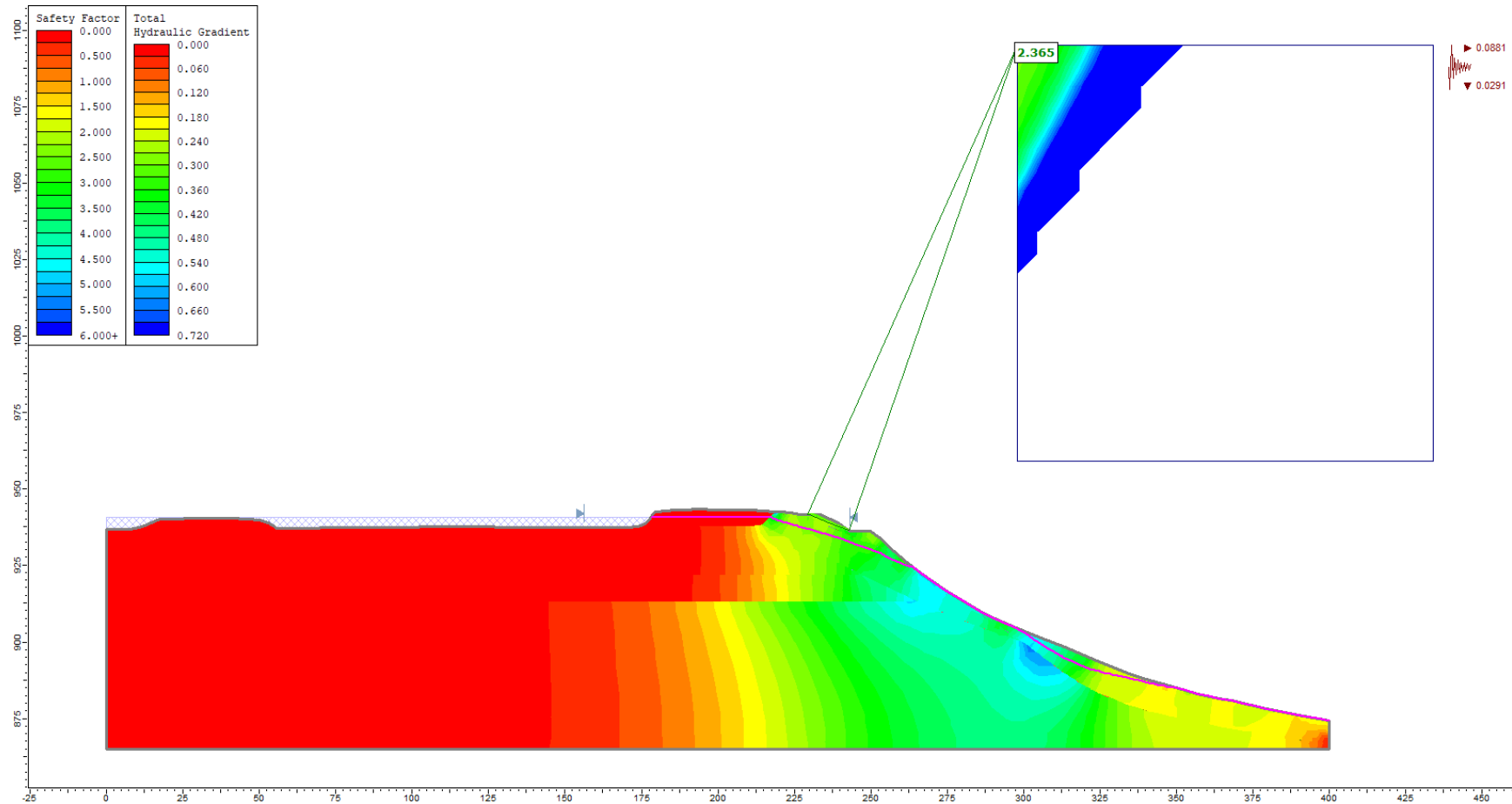
Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung B - 6: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit des verkürzten Felsriegels nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

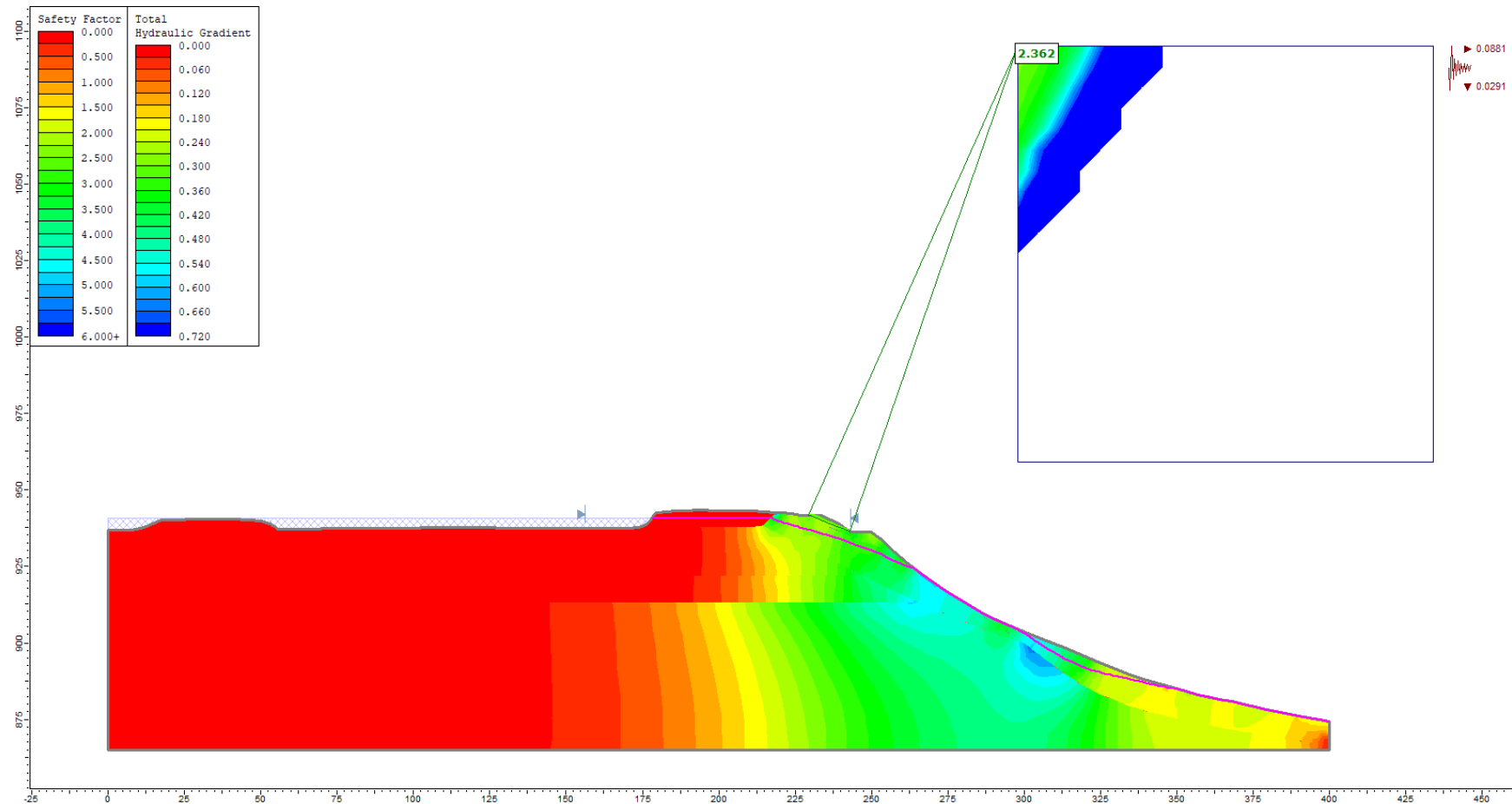


Steinbruch Plettenberg  
 Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



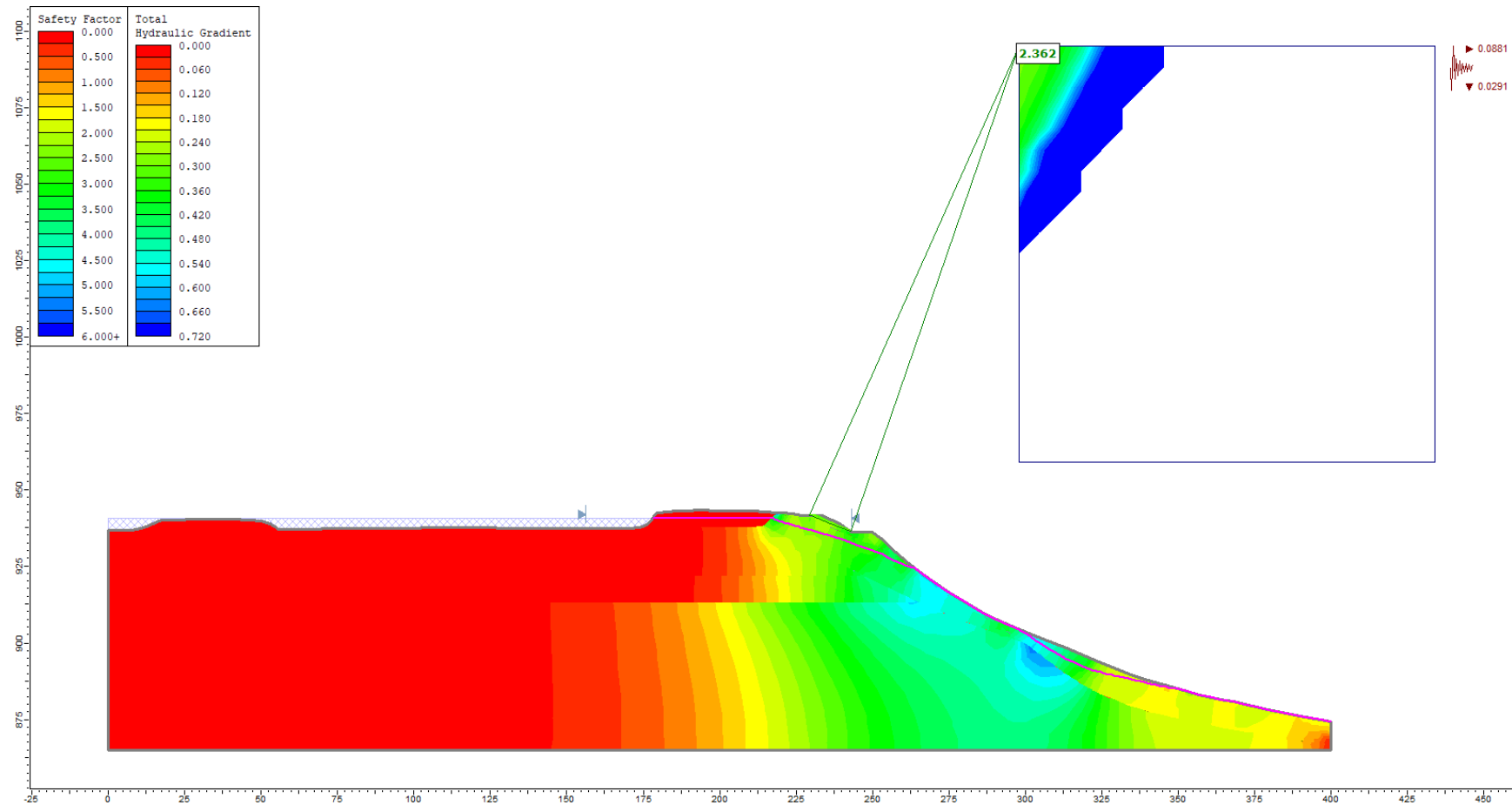
**Abbildung B - 7: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit bei vollständiger erodierter Felsriegelkrone nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



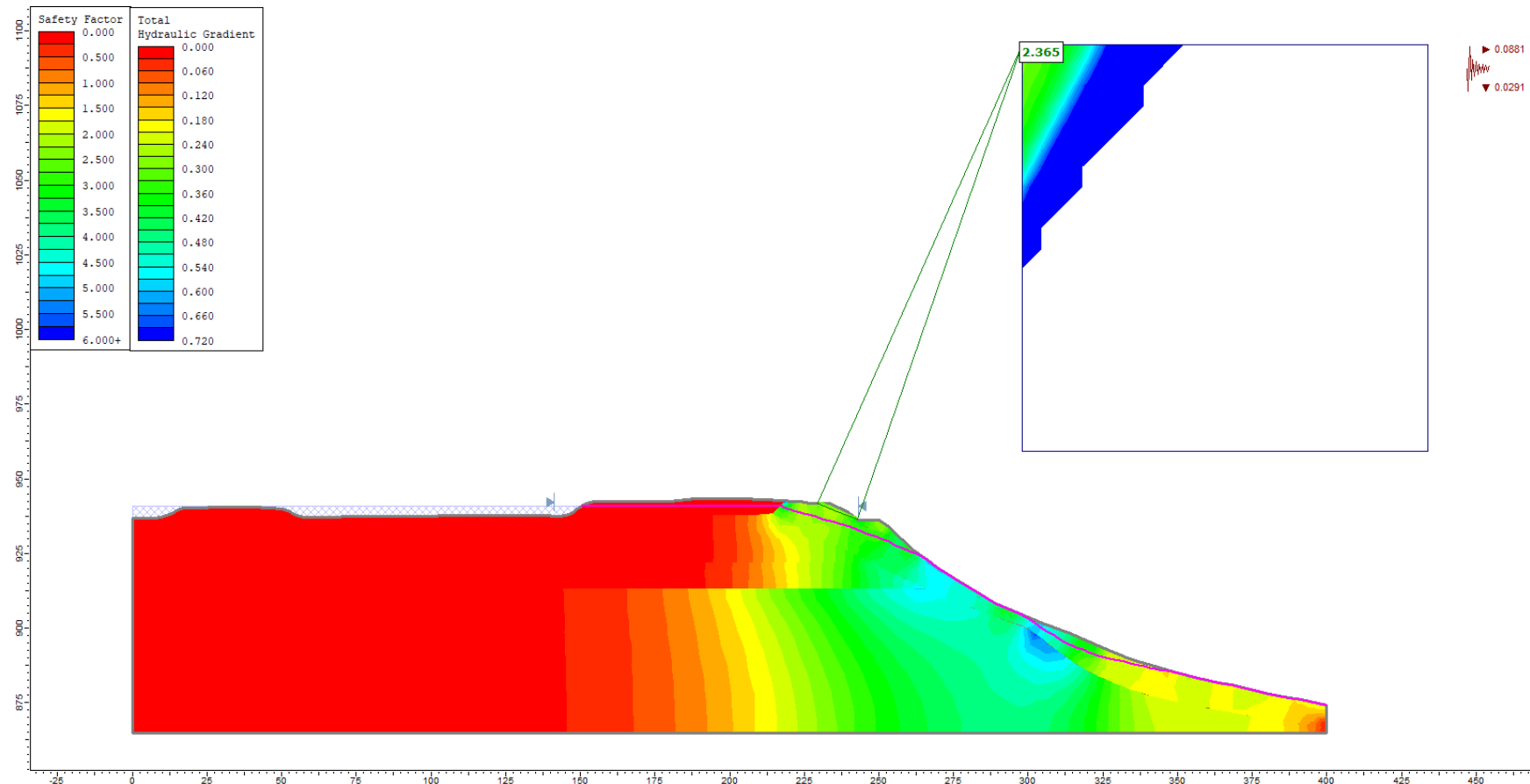
**Abbildung B - 8: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit bei vollständiger erodierter Felsriegelkrone nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung B - 9: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit bei vollständiger erodierter Felsriegelkrone nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung B - 10: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit des verlängerten Felsriegels nach Bishop und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

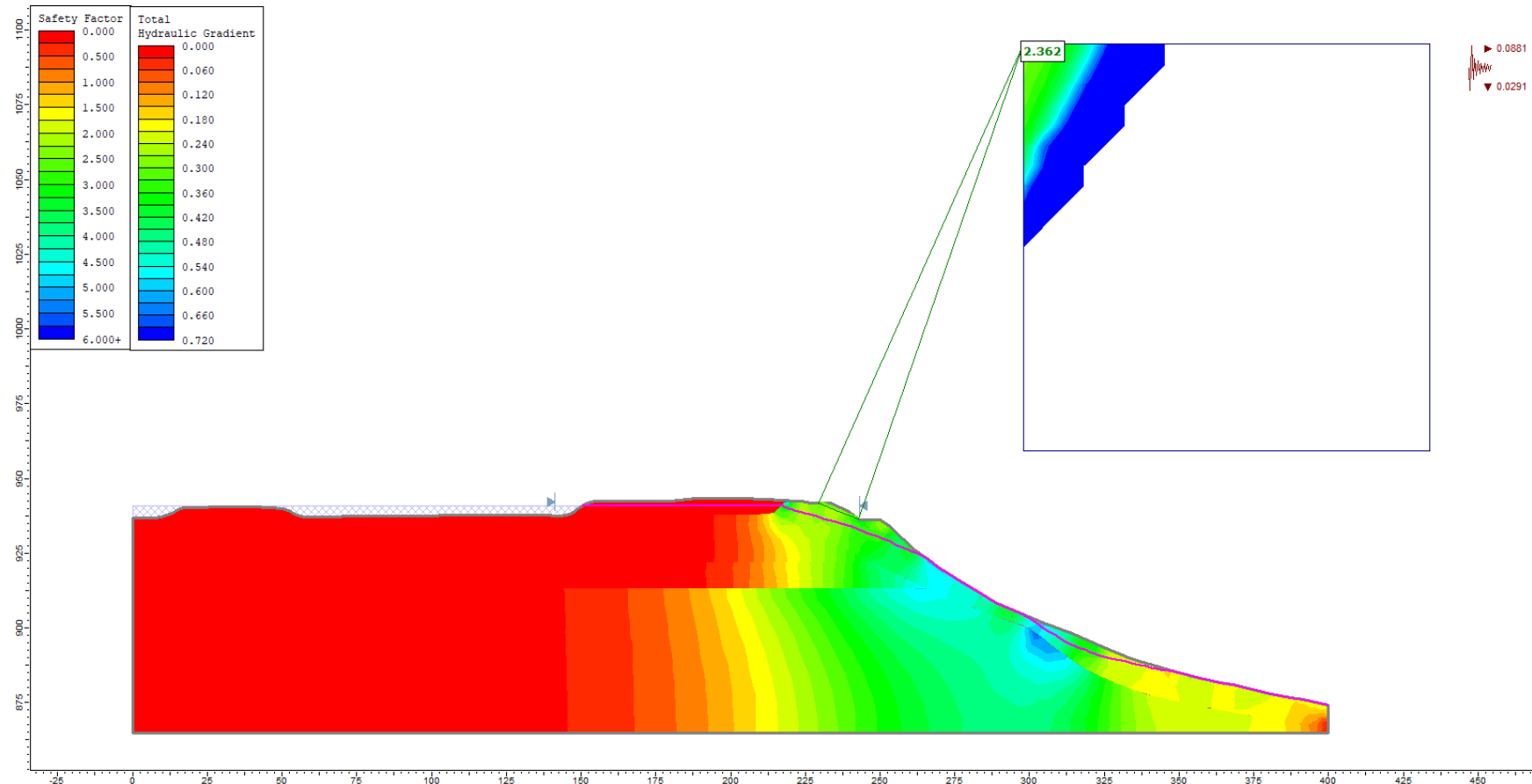
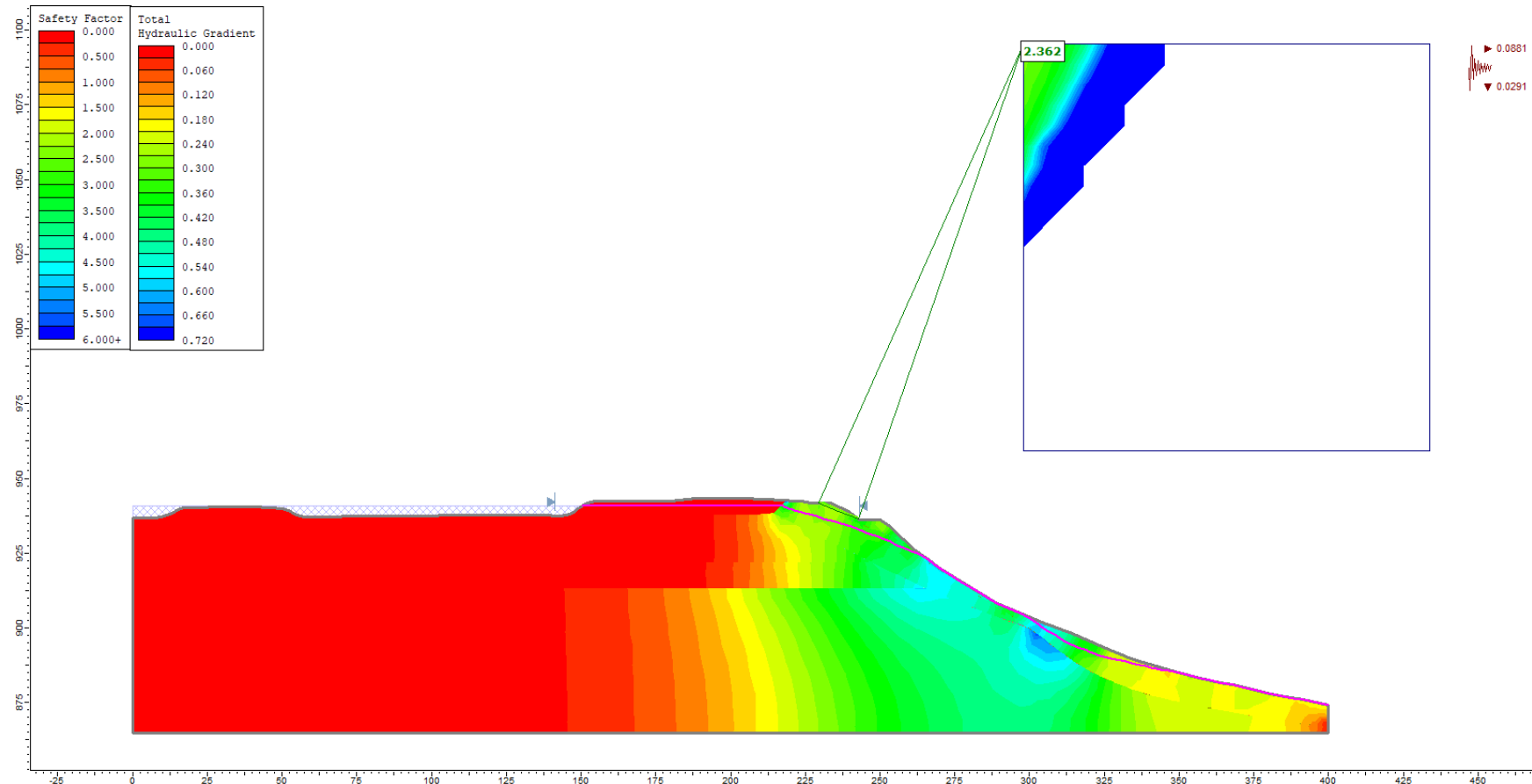


Abbildung B - 11: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit des verlängerten Felsriegels nach Janbu und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs



**Abbildung B - 12: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie im Wasserstand 940,90 m NN im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit des verlängerten Felsriegels nach Spencer und Darstellung der hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie**

### Anhang C – Felsriegelgeometrien (Breite) der untersuchten Modellsituationen

	Modellsituation	Kronenabstand (m)	Sohlenabstand (m)
C-1	Felsriegel nach Abbildung 2	18,71	31,28
C-2	Schmalerer Felsriegel	6,72	19,97
C-3	Vollständig erodierte Krone	0,00	12,43
C-4	Breiterer Felsriegel	28,59	41,05

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

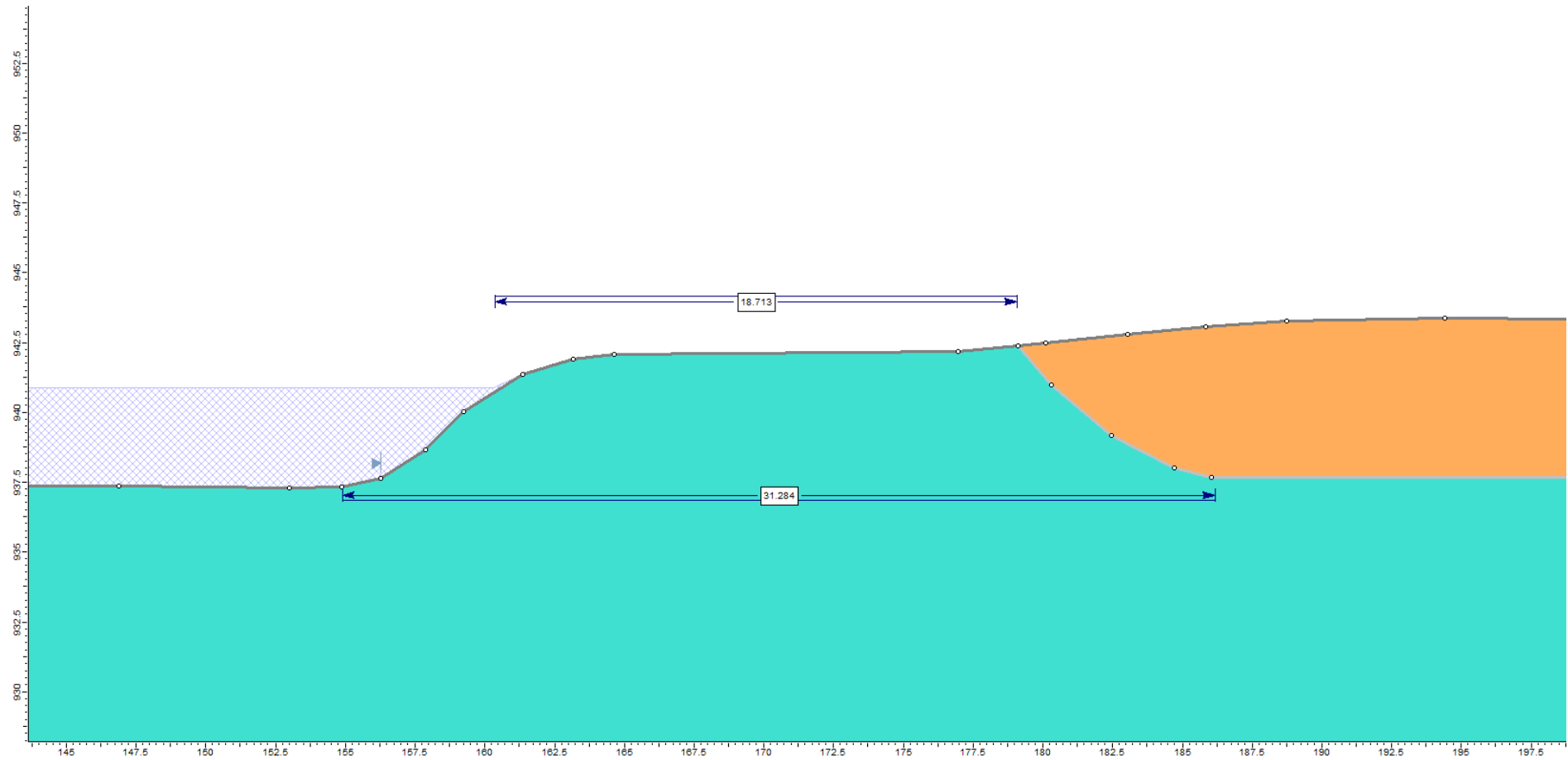


Abbildung C - 1: originale Felsriegelgeometrie nach geologischem Profil (Abbildung 2)



Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

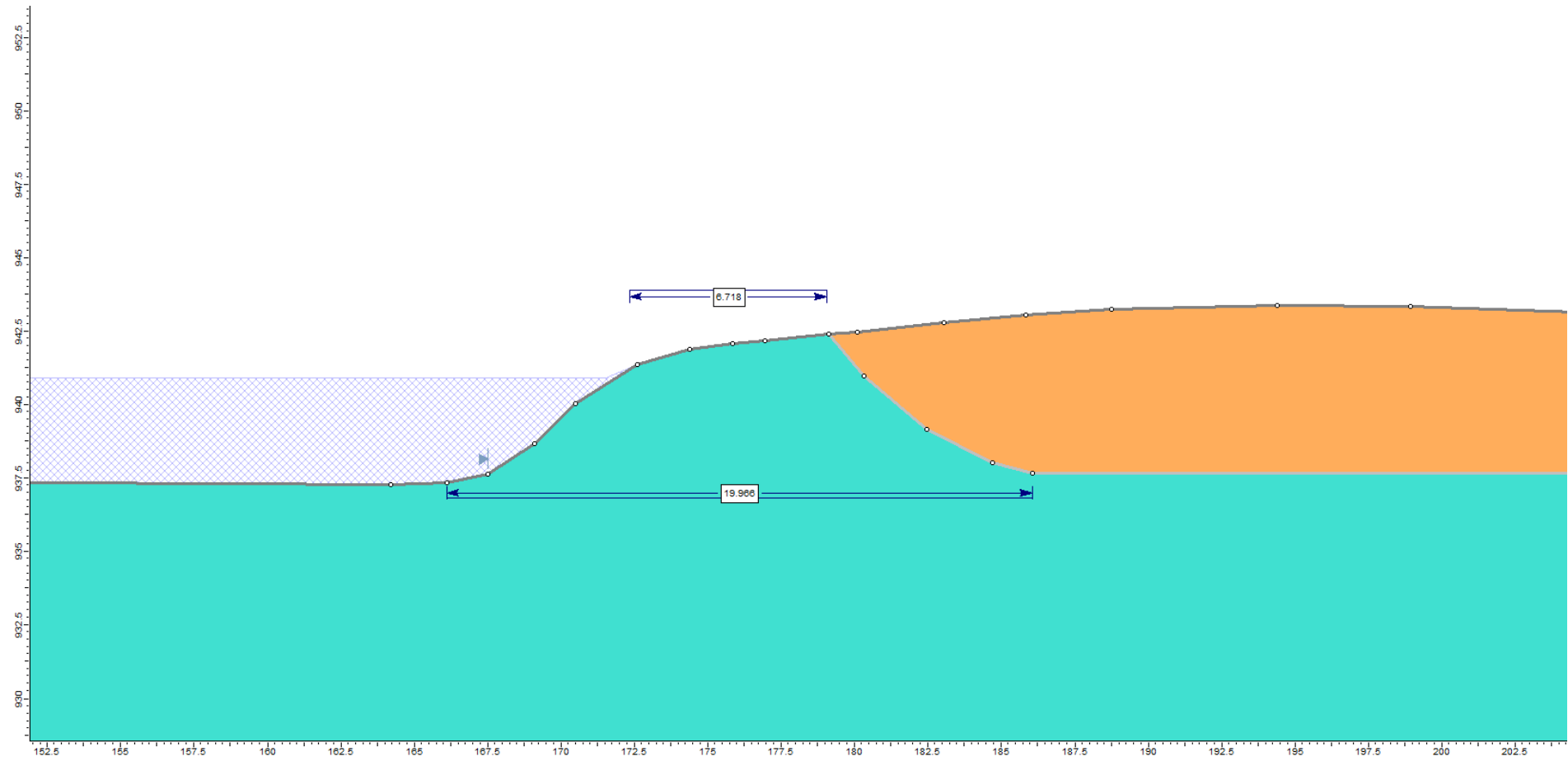


Abbildung C - 2: Felsriegel für Sensitivitätsanalyse mit schmalerer Geometrie

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

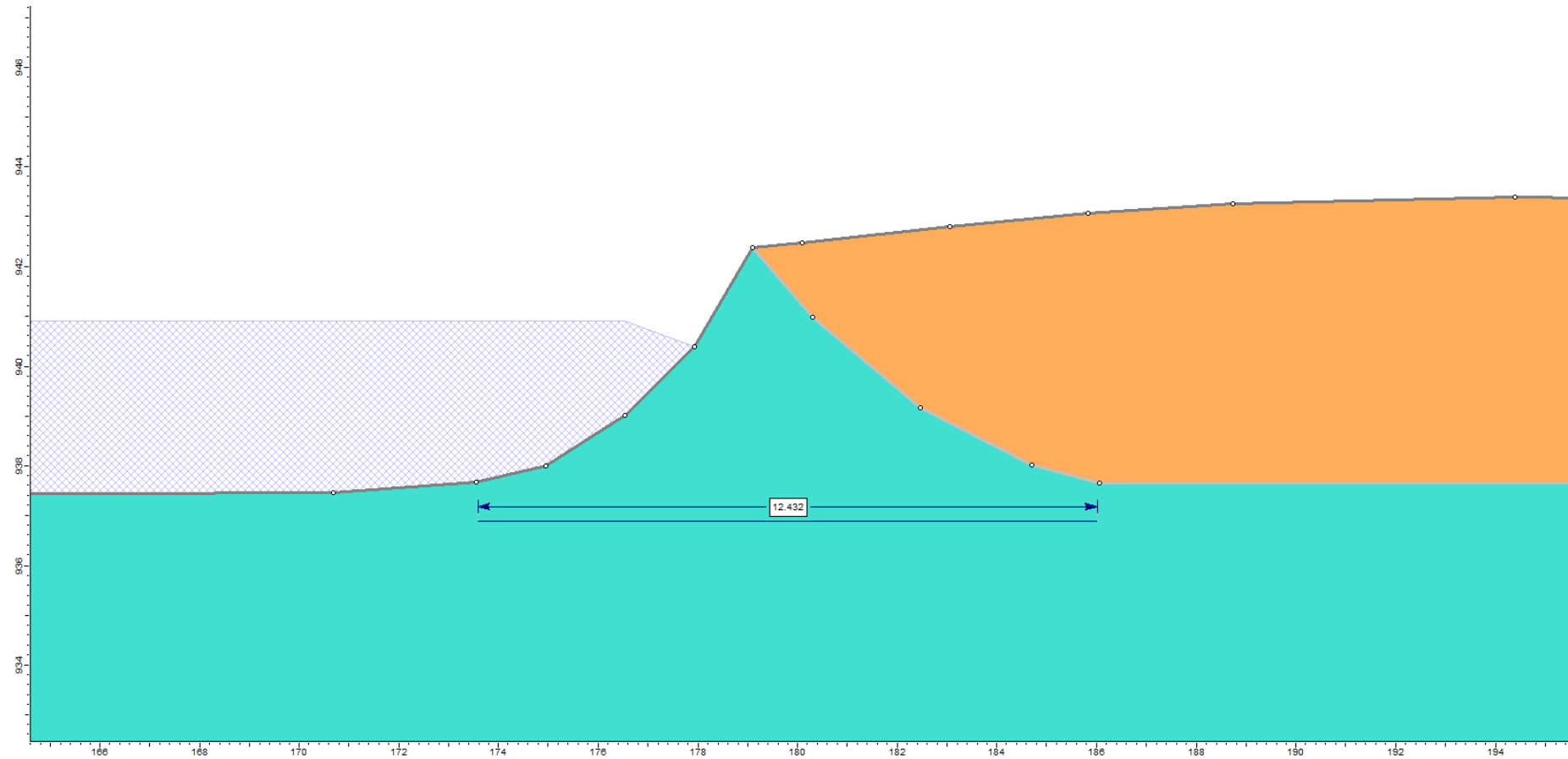


Abbildung C - 3: Felsriegel für Sensitivitätsanalyse mit vollständig erodierter Krone

Steinbruch Plettenberg  
Standsicherheit am Felsriegel des Osthangs

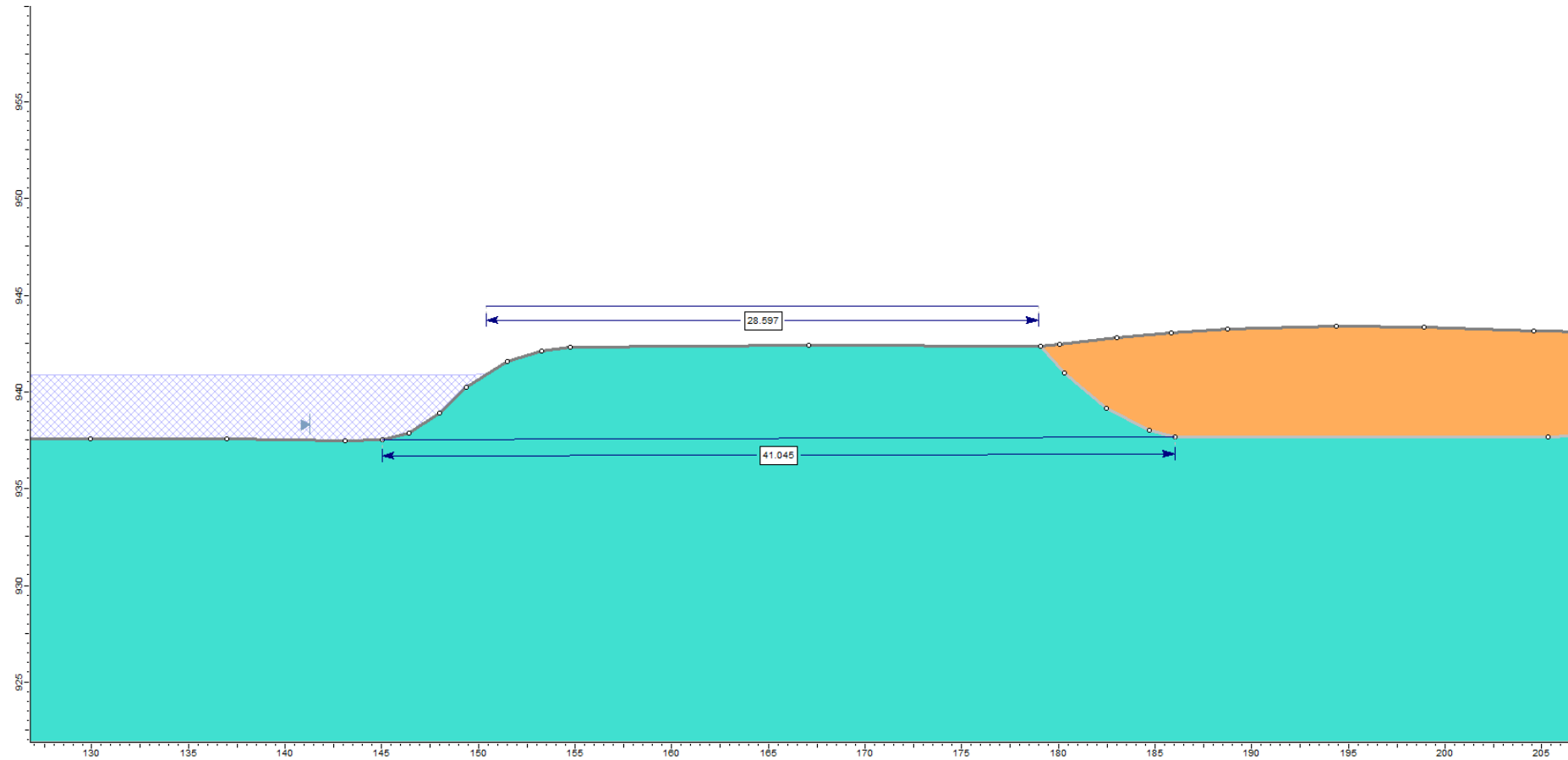


Abbildung C - 4: Felsriegel für Sensitivitätsanalyse mit breiterer Geometrie