

**Steinbruch Plettenberg
HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GMBH**

**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

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. Geologie am Osthang auf dem Plettenberg | 1 |
| 3. Ingenieurgeologie am Osthang des Plettenbergs | 3 |
| 4. Auswirkungen eines 100-jährigen Niederschlagsereignisses auf die Standsicherheit des Osthangs..... | 4 |
| | 4 |
| 4.1. Datengrundlage..... | 4 |
| 4.2. Modellierung..... | 7 |
| 4.3. Ergebnisse der Berechnungen | 9 |
| 4.4. Bewertung..... | 12 |
| 5. Erdbeben | 13 |
| 5.1. Methode und Eingangsparameter | 13 |
| 5.2. Ergebnisse der Berechnungen | 15 |
| 5.3. Einfluss der Dimensionen des sperrenden Felskörpers..... | 16 |
| 6. Empfehlungen | 17 |
| 7. Zusammenfassung..... | 17 |
| Literatur..... | 19 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 21 |
| Anhang A – Darstellung der Ergebnis der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen.... | 22 |
| Anhang B – Ergebnisse der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen unter seismischen Einwirkungen nach DIN EN 1998-5:2010-12..... | 39 |

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. Bei den Becken handelt es sich um eingeschnittene Becken, die durch Abgrabung in den anstehenden Gebirgskörper ohne weitere technische Maßnahmen zur Abdichtung hergestellt wurden. Das eigentliche Ziel ist die Klärung der Trübe durch Sedimentation von Partikeln in der Schwebe und Reinfiltration von Niederschlagswässern. Sedimentation von Feinpartikeln an der Basis führt langfristig zu einer Herabsetzung der Durchlässigkeit. Als technische Überleitung wurde eine Schrägbohrung zur Ableitung bei Wasserständen von 938,5 m ü NN angelegt. Die Situation wird auch in der Stellungnahme von Köhler & Pommerening vom November 2022 ausführlich beschrieben.

2. Geologie am Osthang auf dem Plettenberg

Der Plettenberg ist ein nordwestlich dem Albrauf vorgelagerter Zeugenberg. Dieser besteht aus hellen, geschichteten Kalksteinen im oberen Bereich und Mergeln an der Basis, die im Steinbruch aufgeschlossen sind und zur Basis des Weißen Jura gehören. Der Weiße Jura des Plettenbergs gliedert sich stratigraphisch in das Oxfordium 2 mit der Wohlgeschichtete-Kalke-Formation am Top und dem darunterliegenden Oxfordium 1 mit den sogenannten Impressamergeln. Unterhalb der Impressamergel-Formation folgen die leicht schluffigen, grauen Mergelsteine der Ornatenton-Formation aus dem Callovium bis Barthonium (Geyer 2011, Thiemann 2014).

Der Osthang besteht im oberen Bereich vor allem aus den sogenannten Impressamergeln mit Mächtigkeiten zwischen 40 – 50 m bis auf eine Teufe von ca. 920 – 905 m NN (Pommerening et al. 2018). Die darüberliegende Wohlgeschichtete-Kalke-Formation aus hellgrauen bis fast weißen Kalksteinen ist in diesem Bereich bereits weitgehend abgebaut. Unterhalb der Impressamergel-Formation folgen die leicht schluffigen, grauen Mergelsteine der Ornatenton-Formation deren Basis nicht

erbohrt wurde, die aber anhand der in der Literatur angegebenen mittleren Mächtigkeit von 30 m auf ca. 875 m NN geschätzt werden kann (Abbildung 2.1).

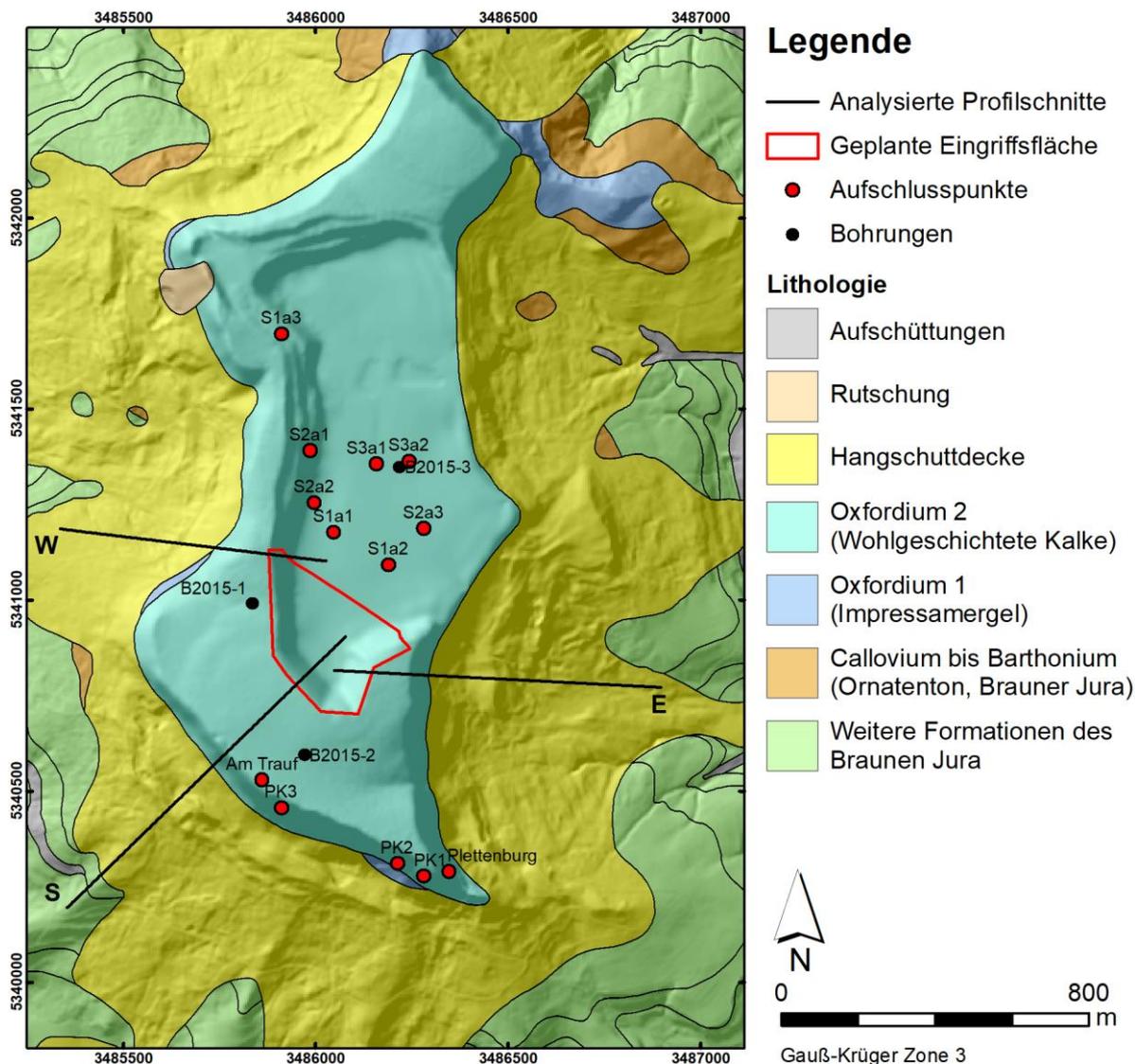


Abbildung 2.1: Übersichtskarte des Plettenberges mit Standorten der berücksichtigten Bohrungen, kartierten Aufschlüsse und Fotoaufnahmen, auf Standsicherheit analysierte Böschungprofile und Grenzen des bestehenden und beantragten Abbauvolumens (Fernandez-Steeger et. al. 2018).

Die Impressamergel-Formation besteht im oberen Bereich der Formation wie die darüber liegende Wohlgeschichtete-Kalke-Formation aus vertikal sowie lateral vielfältigen und schnell wechselnden geringdurchlässigen Kalken unterschiedlicher Ausprägungen, von wohlgebanktem Kalkstein mit flach einfallenden Schichtflächen und zum Teil mergeligen Zwischenlagen bis zu Massenkalk mit nicht mehr erkennbaren Schichtflächen. Diese stehen an der Basis des Steinbruchs an. Mit zunehmender Tiefe nimmt der Mergelanteil der Formation zu und geht in eine

mergeldominierte Zone über, mit mächtigen grauen Mergelsteinlagen und dünnen mergeligen Kalksteinbänken an der Basis. Unterhalb einer Höhe von weniger als 935 bis 930 m NN ist der Impressamergel mit Grundwasser gefüllt (Pommerening et al. 2018).

Die folgende Ornatenton-Formation ist am Plettenberg nicht aufgeschlossen. Sie besteht aus grauen Mergelsteinen, sowie in den tieferen Lagen auch aus mächtigeren Tonsteinlagen (Fernandez-Steeger et al, 2018).

Unterhalb des Traufs ist der Plettenberg großräumig durch Ablagerungen von Massenbewegungen bedeckt. Die Schichten am Plettenberg fallen im Allgemeinen sehr flach (1-2°) nach Südosten ein, mit lokalen Versteilungen durch großwellige Ondulationen und diagenetische Kompaktionsunterschiede (Pommerening et al., 2018). Im ganzen Steinbruchbereich können Karsterscheinungen auftreten, bisweilen auch Störungen mit geringem Versatz und Vernässungszonen, die auf einen erhöhten Wasserandrang hindeuten. Eine ausführlichere Beschreibung der Geologie findet sich im Gutachten zur Hangstabilität der Süderweiterung (Fernandez-Steeger et al, 2018).

3. Ingenieurgeologie am Osthang des Plettenbergs

Die im östlichen Hangbereich des Plettenberg anstehenden Schichten der Ornatenton-Formation (vorwiegend Callovium) und auch Teile der Impressamergel-Formation (Oxfordium 1) sind für Ihre Rutschungsanfälligkeit bekannt und aufgrund Ihres Erweichungsverhaltens beim Freilegen bzw. Durchnässen typische Beispiele für veränderlichste Gesteine.

Die darüber liegenden gebankten Kalke und z.T. Massenkalk des Oxfordium 2 sind zwar insgesamt als gutes Gebirge anzusprechen, allerdings kommt es durch die Verwitterung zur Auflockerung der steilen Felsböschungen und dadurch zu zahlreichen Steinschlägen und Felsstürzen. Die blockigen bis grobkörnigen Schuttmassen mischen sich im weiteren Hangverlauf zunehmend mit den unterliegenden Verwitterungsprodukten der Impressamergel-Formation und der Ornatenton-Formation und bilden eine stellenweise mobile Lockergesteinsauflage auf den Festgesteinen, welche mit zunehmender Distanz vom Trauf Teil der Paläorutschmassen werden. Diese bedecken die oberen Hänge des Plettenbergs weiträumig und werden auch entsprechend in der Ingenieurgeologischen Karte von

Baden-Württemberg ausgewiesen. In den unteren und flacheren Hangbereichen laufen diese zunehmend aus.

Ursachen rezenter Massenbewegungen am Plettenberg sind nicht zuletzt morphologischer Natur, bedingt durch die Exposition als Zeugenberg und die tiefliegende Vorflut. Auflockerung und Entfestigung oberflächiger Gesteinsschichten begünstigt durch Frost- und stellenweise auch Wurzeldruck resultieren in Steinschlägen und Felsstürzen. Massenbewegungen entstehen vor allem im Zusammenspiel mit erhöhtem Kluftwasserschub nach Niederschlagsereignissen. Weiterhin kann abfließendes Wasser durch Auswaschen der unterlagernden Mergelschichten zu einer weiteren Hangdestabilisierung führen. Beschreibungen von Massenbewegungen und detaillierte Erläuterungen zu den Prozessen bzw. Ursachen finden sich im Gutachten zur Hangstabilität der Süderweiterung (Fernandez-Steeger et al., 2018).

4. Auswirkungen eines 100-jährigen Niederschlagsereignisses auf die Standsicherheit des Osthangs

4.1. Datengrundlage

Gegenstand der Untersuchungen ist die Standsicherheit der Becken bzw. Beckeneinfassungen in Richtung der Öffnung der Gebirgskulisse an der Ostböschung hinsichtlich einer außergewöhnlichen Belastung durch ein Starkniederschlagsereignis, in diesem Fall nach einem 100-jährigen Niederschlagsereignis. Bei dem eingeschnittenen Becken handelt es sich um eine Versickerungsanlage, die offen zum Grundwasser geplant ist. Als Gefährdungsszenarien ergeben sich zum einen das Versagen des Felsriegels der die östliche Einfassung bildet, sodass Wasser von dort unkontrolliert in die Struktur des ehemaligen verfüllten Versickerungsbeckens gelangt. Zum anderen kann es zu einem Hangversagen an der Außenböschung kommen, also zur Zerstörung des dämmenden Felsriegels, was wiederum die Integrität des Beckens gefährdet und unkontrollierten Wasseraustritt verursacht. Zum letzten Fall wurde auch schon in dem Gutachten des Sachverständigenbüro für Boden- und Grundwasserschutz Dr. Björn Bahrig vom November 2013 Stellung genommen.

In der Modellierung werden die mit Fachbehörden und im Anhörungsverfahren diskutierten geotechnischen Parameter für das Gebirge aus dem Gutachten Fernandez-Steeger et al. (2018) angesetzt (Abbildung 4.1).

Die Daten zum mittleren Grundwasserstand wurden aus Pommerening et al. (04/2022) und Pommerening et al. (11/2022) entnommen. Die mittlere Grundwasseroberfläche ist im Profil auf Abbildung 4.3 dargestellt. Aus dieser Angabe wird mithilfe von FEM-Simulationen die entsprechende Sickerlinie berechnet.

| Material Name | Color | Unit Weight (kN/m ³) | Strength Type | Cohesion (kPa) | Phi (deg) | UCS (kPa) | GSI | mi | D |
|-----------------------|---|----------------------------------|------------------------|----------------|-----------|-----------|-----|----|---|
| Impressamergel locker |  | 25 | Generalized Hoek-Brown | | | 40000 | 45 | 4 | 0 |
| Impressamergel dicht |  | 25 | Generalized Hoek-Brown | | | 40000 | 45 | 4 | 0 |
| Ornatenton |  | 25 | Generalized Hoek-Brown | | | 40000 | 45 | 4 | 0 |
| Rutschmasse |  | 25 | Generalized Hoek-Brown | | | 40000 | 45 | 4 | 1 |
| Hangschutt |  | 20 | Mohr-Coulomb | 21 | 15.9 | | | | |
| Auffüllung |  | 20 | Mohr-Coulomb | 1 | 31 | | | | |

Abbildung 4.1: Felsmechanische Materialparameter der relevanten Schichten für die Standsicherheitsberechnungen nach dem Hoek-Brown bzw. Mohr-Coulomb Kriterium (aus Fernandez-Steeger et al., 2018)

Basis der Untersuchung ist das hydrogeologische Profil von Köhler & Pommerening (11/2022) (Abbildung 4.3) für den entsprechenden Hangbereich. Das charakteristische Untersuchungsprofil ist so gewählt, dass die Profillinie in EW-Richtung beginnend am inneren Rückhaltebecken (Abbildung 4.2) der Hangneigung folgt. In dessen Verlauf kreuzt die Profillinie das äußere Rückhaltebecken, sowie die Bohrung BK02 am verfüllten ehemaligen Rückhaltebecken.

Bereits 2013 wurde vom Sachverständigenbüro für Boden- und Grundwasserschutz Dr. Björn Bahrig ein geotechnischer Bericht zur Versickerung von Oberflächenwasser erstellt. In diesem wurde die Situation an den Becken anhand von zwei Bohrungen untersucht und bewertet. Die Bohrung BK01 liegt im Bereich der Außenböschung des Absetz- und Versickerungsbeckens und besteht aus einer Abfolge feingeschichteter, teilweise blättriger, dunkelgrauer Mergelsteine und hellerer Kalkmergelsteinbänke die dem obersten Impressamergel zugeordnet wurden. Dies führt zu der Aussage, dass

das Becken derzeit auf einem stabilen Untergrund liegt. Die Interpretation von Ablagerungen als Rutsch- bzw. Bergsturzmassen in Bohrung BK02 wird gestützt durch beobachtete Wasserverluste aus dem alten Versickerungsbecken. Im Profil wird dies als zusammenhängende Rutschmasse dargestellt, die bis an die Außenböschung (Ostböschung) des ehemaligen Versickerungsbeckens reicht (Abbildung 4.2). Der durch das Profil zu vermutende Ausbiss im Becken wird im Gutachten allerdings nicht beschrieben. Unabhängig davon ist das Bild gut nachvollziehbar und deckt sich mit der an anderen Stellen des Plettenbergs bekannten Situation.

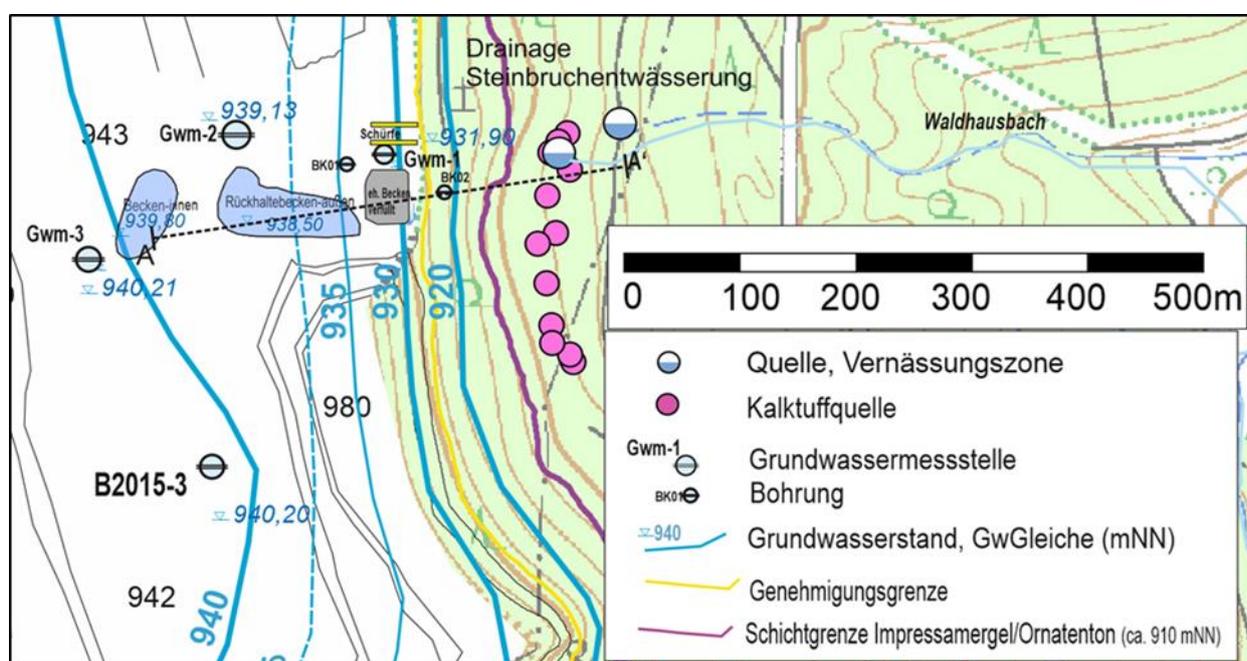


Abbildung 4.2: Übersichtskarte der Grundwassergleichen entlang des zu untersuchenden Profils am Osthang am Plettenberg mit Standorten nahegelegener Bohrungen und Vernässungszonen bzw. Quellen sowie der relevanten Schichtgrenze (Pommerening et al., 11/2022)

Zur Klärung der Situation wurden im März 2022 insgesamt 4 ungefähr ost-west streichende Schürfe senkrecht zur Ostböschung angelegt und ingenieurgeologisch aufgenommen. Zusammen decken die nördlich des ehemaligen Beckens angelegten Schürfe die Situation von der Hangkante bis zum westlichen Beckenende ab. Die Untersuchungen sind in Pommerening et al. (11/2022) beschrieben und dokumentiert. Hier sind die aufgeschlossenen Schichten als Impressamergel beschrieben, die von Abbaumaterial geringmächtig überschüttet sind. Der Befund beschreibt 2 Vernässungszonen entlang von Kluftscharen, die mit früheren Befunden an dem nördlich der Becken liegenden Felsriegel der Kulisse in Bezug gebracht werden können. Dort gibt es in größeren Abständen Großklüfte, die durch eine dunkle

Einfärbung des Gesteins auf eine höhere Durchfeuchtung hinweisen. Es wurden aber keine großflächig gestörten Bereiche erkannt bzw. außergewöhnlichen Versätze oder Risse beschrieben, die Hinweise auf die Lage bzw. den Ausbiss einer Gleitbahn der bei Bahrig (2013) vermuteten Rutschung geben.

Dies deutet zumindest darauf hin, dass die im oben erwähnten Gutachten beschriebenen Rutschmassen in ihrer Ausdehnung begrenzt sind. Weiterhin wurden keine Hinweise gefunden, dass diese über den im Gutachten dargestellten Bereich hinausragen. Trotz des Befundes in den Schürfen wurde der als Rutschmasse in den Profilen von Bahrig (2013) und Pommerening et al (11/2022) ausgewiesene Bereich als stark gestörter und zerrütteter Gebirgsbereich mit einem Zerüttungsfaktor von 1 modelliert. Die Geometrie orientiert sich an der Darstellung der Rutschmasse in Abbildung 4.3, im Profil von Pommerening et al. (11/2022).

4.2. Modellierung

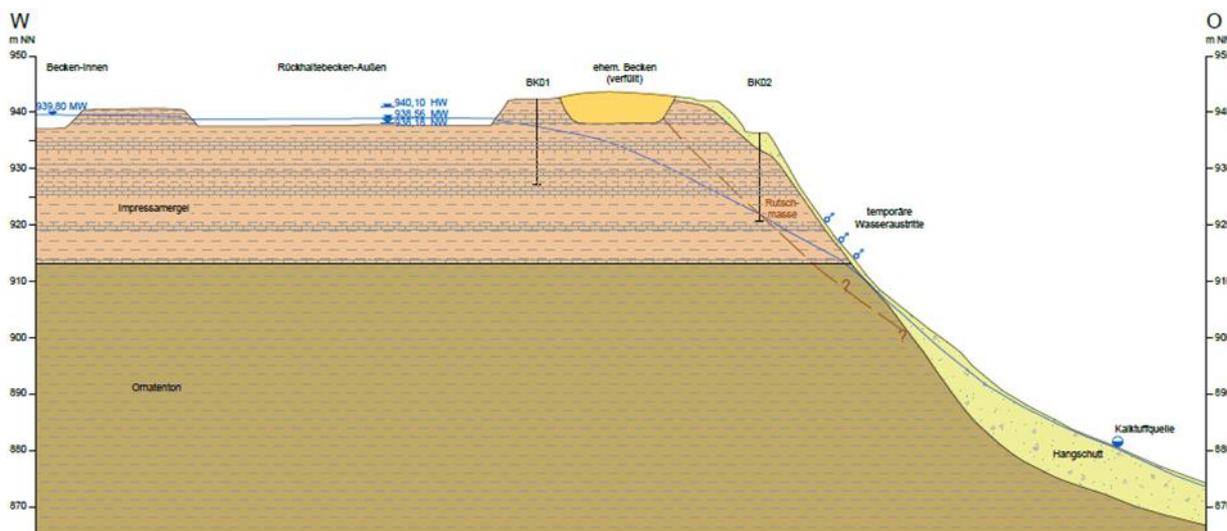


Abbildung 4.3: Hydrogeologisches West-Ost-Profil der Süderweiterung am Steinbruch Plettenberg, zweifach überhöht (Pommerening et al., 11/2022)

Die Geometrie des Modells wurde anhand des zur Verfügung gestellten hydrogeologischen Profils aus der Stellungnahme von Pommerening et al. (11/2022) aufgebaut (Abbildung 4.3). Das geometrische Modell ist in Abbildung A – 1 (im Anhang) unter Angabe der Böschungswinkel dargestellt, wobei die Böschungswinkel oberhalb des Weges am Rand des Steinbruchs 38° bzw. unterhalb 40° betragen. Der mittlere Böschungswinkel im weiteren Hangverlauf beträgt rund 34° .

Zur Untersuchung des Extremereignisses wurde eine neue Sickerlinie mit FEM-Simulationen für den maximalen Einstau eines 100-jährigen Niederschlagsereignisses (Tabelle 4.1) als Dauerbelastung mit der Software Slide 2 von Rocscience ermittelt. Hier wird anhand der Wasserstände im Becken, Geometrie und Gebirgspermeabilität eine Sickerlinie berechnet.

Tabelle 4.1: Wasserstände im Becken

| Modellsituation | Wasserstand (m NN) |
|--|--------------------|
| Mittlerer Wasserstand | 938,56 |
| Wasserstand 100-jähriges Niederschlagsereignis | 940,85 |

Die Modelle wurden jeweils mit 7500 Elementen diskretisiert. Die relevanten hydraulischen Parameter stammen aus den Untersuchungen, die in den hydrogeologischen Gutachten von Pommerening (2018 und 11/2022) dargestellt sind. Die hydraulischen Parameter (Abbildung 4.4) wurden so gewählt, dass die Modellierung ein konservatives Bild der Situation zeichnet. Die resultierenden Verläufe wurden abschließend auch noch einmal mit den Hydrogeologen von Köhler & Pommerening besprochen und qualitativ geprüft.

| Material Name | Color | Model | KS (m/s) |
|-----------------------|---|--------|----------|
| Impressamergel locker |  | Simple | 1e-06 |
| Impressamergel dicht |  | Simple | 2e-07 |
| Ornatenton |  | Simple | 1e-10 |
| Rutschmasse |  | Simple | 1e-06 |
| Hangschutt |  | Simple | 1e-06 |
| Auffüllung |  | Simple | 2e-05 |

Abbildung 4.4: gewählte hydraulische Parameter der geologischen Schichten für die FEM-Simulation der Sickerlinie

4.3. Ergebnisse der Berechnungen

Die berechnete Sickerlinie der FEM-Simulationen für den mittleren Wasserstand im Rückhaltebecken (938,56 m NN, Abbildung 4.5) zeigt eine gute Übereinstimmung mit der auf hydrogeologischen Messungen beruhenden Sickerlinie (Grundwasseroberfläche) aus Abbildung 4.3, weshalb die verwendeten hydraulischen Parameter als hinreichend für weitere Simulationen angenommen wurden.

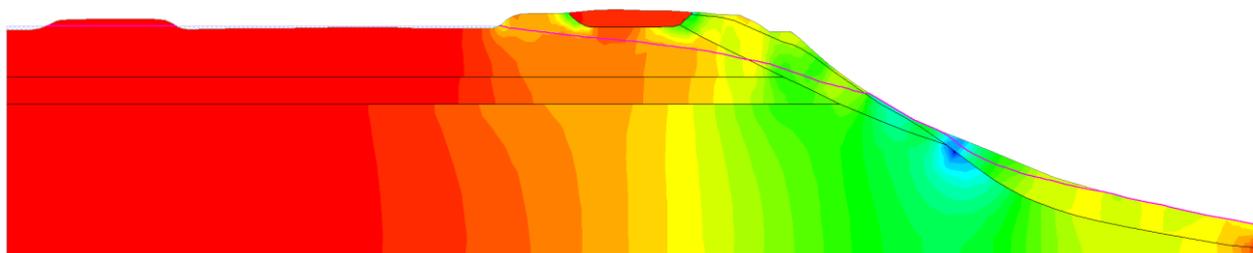


Abbildung 4.5: Berechnete Sickerlinie (pink) mit den unter Abbildung 4.5 angegebenen Parametern bei einem Mittelwasserstand im Rückhaltebecken von 938,56 m NN

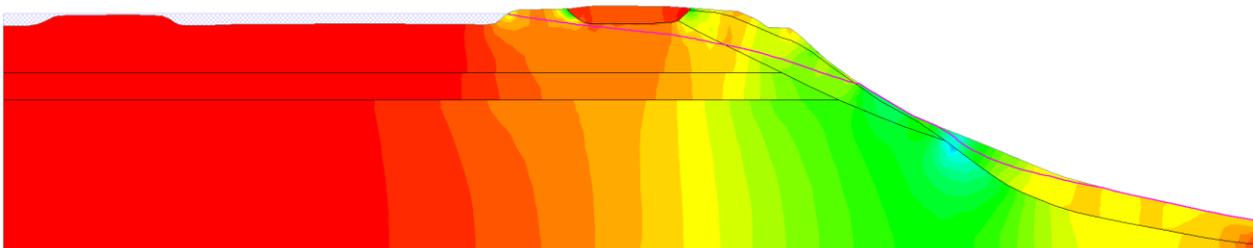


Abbildung 4.6: Berechnete Sickerlinie (pink) mit den unter Abbildung 4.5 angegebenen Parametern bei einem 100-jährigem Niederschlagsereignis mit einem Wasserstand im Rückhaltebecken von 940,85 m NN

Die Sickerlinie für das berechnete 100-jährige Niederschlagsereignis zeigt einen ähnlichen Verlauf (Abbildung 4.6). Es ist zu erkennen, dass auch hier das ehemalige verfüllte Rückhaltebecken unterströmt wird. Nach Rücksprache mit Köhler & Pommerening und deren fachlicher Prüfung ist der Verlauf der Sickerlinien aus den FEM-Berechnungen plausibel und kann somit für die Berechnungen der Standsicherheit der Beckeneinfassung verwendet werden. Hinsichtlich der Wasserstände ergeben sich als zu untersuchende Fälle somit die Standsicherheiten der Ostböschung bei Mittelwasser für die gegebene (s. Anhang A-5 bis A-7) und die berechnete Sickerlinie (s. Anhang A-8 bis A-10) sowie bei einem 100-jährigen Niederschlagsereignis (s. Anhang A-11 bis A-13). Zur Bewertung des Einflusses des Wasserdrucks aus den Becken insbesondere auf die Standsicherheit der Lockergesteinsauflagen und den Gebirgskörper wird zusätzlich die Standsicherheit

der Böschung ohne Versickerungsbecken als Referenzmodell untersucht (s. Anhang A-14 bis A-16).

Die Standsicherheitsberechnungen wurden mit dem Programm *Slide2 v9.024* der Firma Rocscience durchgeführt. Als Rechenmethoden wurden die Auswertungen nach Janbu, Bishop und Spencer angewendet. Diese unterscheiden sich vor allem in der Berücksichtigung der Einwirkungen von Kräften und Momenten. Die Methode von Janbu (1954) basiert auf dem Gleichgewicht der einwirkenden Momente, Bishop (1955) betrachtet zusätzlich das Kräftegleichgewicht in x-Richtung. Als Vergleichsmethode wurde die vor allem in den USA verbreitete Auswertung nach Spencer (1967) angewendet, die im Gegensatz zur Methode von Bishop auch das Kräftegleichgewicht in y-Richtung berücksichtigt. Die Berechnungen der Standsicherheit wurden gemäß Eurocode 7 Nachweisverfahren 1 Kombination 2 durchgeführt und die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend gewählt.

In Tabelle 4.2 sind die jeweils niedrigsten ermittelten Sicherheiten (Standsicherheitsbeiwerte) tabellarisch aufgelistet. Diese sind ausschließlich Ergebnisse der Ermittlung der Sicherheiten nach Janbu. Außerdem sind die Standsicherheitsbeiwerte angegeben, bei denen das Festgestein versagen würde. Diese liegen deutlich oberhalb des kritischen Wertes von 1, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird. Die graphischen Darstellung der Modelle sind getrennt nach Auswertungsmethode in Anhang A abgebildet.

Tabelle 4.2: Niedrigste ermittelte Standsicherheitsfaktoren bei unterschiedlichen Modellsituationen bzw. hydraulischen Zuständen

| Szenario | Sickerlinie | Standsicherheit | Standsicherheit im Fels |
|------------------|-------------|-----------------|-------------------------|
| Kein Grundwasser | Analytisch | 1,496 | 2,73 |
| 938,56 m NN | Analytisch | 0,844 | 2,27 |
| | FEM | 0,898 | 2,31 |
| 940,85 m NN | FEM | 0,898 | 2,21 |
| Referenzmodell | FEM | 0,897 | 2,18 |
| 940,85 m NN | | | |

Hinsichtlich der berechneten Standsicherheitsfaktoren bei einem 100-jährigen Niederschlagsereignis (s. Anhang A-11 bis A-13) ist festzustellen, dass eine Änderung des Wasserstands im Sedimentations- und Versickerungsbecken keine relevanten Auswirkungen auf die Standsicherheit der Beckeneinfassung hat. Ein Versagen dieser Böschungseinfassung aus Festgestein ist allerdings die Voraussetzung für eine Breschenbildung und damit für das Überströmen der Hangkante bei den betrachteten Wasserständen.

Die Untersuchungen zeigen aber auch, dass nur bei einem grundwasserfreien bzw. trockenen Gebirge die Lockergesteinsauflage bzw. dem Festgestein aufliegenden Rutschmassen standsicher sind (s. Anhang A-2 bis A-4). Das Ansetzen der Sickerlinie bei einem Mittelwasser von 938,56 m NN im Versickerungsbecken führt bereits sowohl für die analytische Sickerlinie (s. Anhang A-5 bis A-7) als auch für die mit einer FEM-Simulation berechneten Sickerlinie (s. Anhang A-8 bis A-10) zu einer Instabilität im unteren Drittel der Ostböschung. Letztere liefert im Vergleich unwesentlich höhere, aber ebenso als instabil zu wertende Standsicherheitsbeiwerte. Dies lässt sich damit erklären, dass die analytische und die berechneten Sickerwasserlinien nicht überall identisch verlaufen. Auch wenn diese eine möglichst exakte Annäherung an die Realität darstellen können lokale Heterogenitäten im Detail Abweichungen erzeugen. Aufgrund der guten Übereinstimmung der resultierenden Sickerlinie wird das simulierte Modell dennoch als hinreichend genau eingeschätzt, zumal das Austreten an den zwei dokumentierten Austrittsstellen ebenfalls nachvollziehbar ist (vgl. Abbildung 4.3 & Abbildung 4.5).

Daraus folgt für die natürliche Lockergesteinsauflage der Außenhänge des Plettenbergs, dass die bloße Anwesenheit von Grundwasser eine Instabilität im mächtigeren Hangschutt des unteren Böschungsabschnitts der Ostböschung verursachen kann. Das liegt daran, dass die Lockergesteinsablagerungen sich dort in einem eher labilen Gleichgewicht befinden, wie die Rutschung 2013 (LGRB, 2019) und auch die Untersuchungen in Fernandez-Steeger et al. (2018) zeigen. Dies stimmt mit den Beobachtungen im Gelände überein. Auch die fast ausschließlich im Hangschutt liegenden Gleitkreise passen zu diesem bereits im Gutachten von Fernandez-Steeger et al. (2018) beschriebenen Bild. Am Übergang zwischen der vermuteten Rutschmasse und der Lockergesteinsauflage wird der verbleibende Zwickel im Mergel

von manchen Gleitkreisen durchschnitten. Dies lässt sich schlüssig durch die geometrische Begrenzungen des Gleitkreisverfahrens erklären.

Vereinzelt können Gleitkreise mit geringer Mächtigkeit (flache Körper) beobachtet werden, die in der grundwasserfreien Berme der oberen Böschung austreten. Diese können aber nicht in Zusammenhang mit dem Versickerungsbecken gebracht werden, da sie auch im Referenzmodell ohne Becken zu beobachten sind (s. Anhang A-14 bis A-16). Aufgrund der Lage sind sie der natürlichen Situation des Hanges zuzuordnen, wie auch die im Modell beobachteten Instabilitäten der Lockergesteinsauflage. Keines der berechneten Modelle zeigt jedoch eine Gefährdung der Standicherheit im Festgesteinskörper des Plettenbergs bzw. eine rückgreifende Gleitbahn, die die Böschungsbereiche des Beckens betrifft und damit dessen Integrität.

4.4. Bewertung

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass hier ein abgebauter Bereich betrachtet wird, der vor dem Abbau durch eine mehrere Zehnermeter mächtige Kalkstein- und Mergelaufgabe belastet war. Diese Auflast wurde im Zuge des Abbaus entfernt, was in erster Linie zu einer Entlastung des Hanges führt. Die Absetz- und Infiltrationsbecken sind zudem als eingeschnittene Becken errichtet worden. Auch dieses Leervolumen, das mit Wasser gefüllt werden kann war zuvor mit Festgestein mit erheblicher Dichte gefüllt. In den Berechnungen wurde in der Vergangenheit eine konservative Dichte von 25 kN/m^3 angenommen, für Süßwasser gilt üblicherweise ein Wert von 10 kN/m^3 . Bei vollständig wassergefüllten Becken ist die Last im Abbaubereich somit um einen Faktor von 2,5 reduziert worden.

Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass nur bei einem grundwasserfreien bzw. drainierten Gebirgskörper keine Massenbewegungen in den Lockergesteinsmassen des Osthangs auftreten. Dies ist konsistent mit den Beobachtungen im Gelände und stimmt auch mit den Untersuchungen und Erklärungen von Fernandez-Steeger et al. (2018) überein. Die Rutschmassen und Lockergesteinsmassen an den Hängen befinden sich in einem labilen Gleichgewicht. Am Osthang sind auch oberflächliche Deformationen des Hanges im Lockergestein zu beobachten.

Steigende Wasserstände führen konsistent mit dieser Beobachtung zu einer weiteren Herabsetzung der Sicherheit in diesem Bereich. Dies ist aber unabhängig von der

Anlage der Versickerungsbecken und hängt alleine vom Hangwasserspiegel bzw. der Sickerwasserlinie ab.

Alle Untersuchungen, sowohl die vorangegangenen von B. Bahrig (2013) als auch diese deuten darauf hin, dass die neuen Sedimentations- und Infiltrationsbecken auf stabilem Gebirge stehen. Auch eine Erhöhung des Bergwasserspiegels und damit zusätzlicher Lasten führt zu keinen Gleitkreisen, die die innere und äußere Sicherheit der Beckeneinfassung bzw. den Gebirgsbereich der Becken und deren Einfassung betreffen.

5. Erdbeben

5.1. Methode und Eingangsparameter

Zusätzlich wurde aufgrund der Lage auch die Einwirkung seismischer Lasten durch Erdbeben untersucht. Die Einwirkungen eines Erdbebens werden gemäß der Norm für die Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben DIN EN 1998 untersucht. Der hierfür maßgebliche Parameter ist der Horizontalbeschleunigungswert k_h , der sich gemäß Gleichung 5-1 der DIN EN 1998-5:2010-12 für geotechnische Aspekte und Stützbauwerke berechnen lässt.

$$k_h = \frac{S_{aP,R} * \gamma_I * S * \eta}{2,5 * g * r} \quad (5-1)$$

Die Spektrale Antwortbeschleunigung $S_{aP,r}$ wurde mit dem genaueren Ansatz aus der koordinatenbasierten Tabellen aus dem Anhang der DIN EN 1998-1/NA:2021-07 für die Koordinaten Long. 8,8 Lat. 48,2 ermittelt. Alternativ kann der Wert aus der Karte zur Spektralbeschleunigung abgelesen werden, jedoch mit wesentlich geringerer Genauigkeit.

Tabelle 5.1: Tabelle zur Ermittlung Spektralbeschleunigung aus der DIN EN 1998-1/NA:2021-07

| Spektralbeschleunigung $S_{aP,R}$ m/s ² | Bodenparameter S ^a Untergrundverhältnis | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|------|
| | A-R | B-R | C-R | B-T | C-T | C-S |
| $S_{aP,R} \leq 1,0$ | 1,00 | 1,25 | 1,50 | 1,05 | 1,45 | 1,30 |
| $1,0 < S_{aP,R} \leq 2,0$ | 1,00 | 1,20 | 1,30 | 1,00 | 1,25 | 1,15 |
| $S_{aP,R} > 2,0$ | 1,00 | 1,20 | 1,15 | 1,00 | 1,10 | 0,95 |

^a Für das Untergrundverhältnis B-S darf der Bodenparameter S wie bei C-S angenommen werden.

Für den Plettenberg ergibt sich hieraus $SaP,R = 2,7003$. Der Bodenparameter S wird aus Tabelle 5.1 abgelesen. Der Untergrund am Plettenberg besteht vorwiegend aus unverwittertem Gestein mit hoher Festigkeit und höchstens geringmächtig (<100 m) auflagernden Lockersedimenten. Er ist somit dem Untergrundverhältnis A-R zuzuordnen, woraus sich $S = 1,00$ ergibt. Der Bedeutungsbeiwert γ_1 wird aus der Tabelle 5.2 abgelesen. Für das Szenario einer Überströmung der Hangkante bei Böschungsbruch kann unterhalb dieser keine unmittelbar gefährdete Bebauung ermittelt werden, so dass die Schutzbedeutung für die Allgemeinheit eher gering eingestuft wird. Folglich wird nach DIN EN 1998-1/NA:2021-07 ein Bedeutungsbeiwert von $\gamma_1 = 0,8$ angesetzt. Der Dämpfungsbeiwert η kann im Allgemeinen mit 1 angesetzt werden.

Tabelle 5.2: Tabelle zur Ermittlung Bedeutungsbeiwerte aus der DIN EN 1998-1/NA:2021-07

| Bedeutungs-kategorie | Bauwerk | Bedeutungs-beiwert γ_1 |
|----------------------|--|----------------------------------|
| I | Bauwerke mit geringer Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit, mit geringem Personenverkehr (z. B. Scheunen, Kulturgewächshäuser, usw.) | 0,8 |
| II | Bauwerke, die nicht zu den anderen Kategorien gehören | 1,0 |
| III | Bauwerke, von deren Versagen bei Erdbeben eine große Zahl von Personen betroffen ist (z. B. große Wohnanlagen, Schulen, Versammlungsräume, Kaufhäuser, usw.) | 1,2 |
| IV | Bauwerke, deren Funktionsfähigkeit nach einem Erdbeben von hoher Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit ist (z. B. Krankenhäuser, wichtige Einrichtungen des Katastrophenschutzes, der Feuerwehr und der Sicherheitskräfte, Kraftwerke usw.) | 1,4 |

Tabelle 5.3: Beschleunigungsbeiwerte in horizontale und vertikaler Richtung für zwei Normen

| 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 |

Der Koeffizient r liegt abhängig von der Art des Stützbauwerks zwischen 1 und 2. Für eine möglichst konservative Betrachtung des Falls wird dieser für sämtliche Berechnungen mit 1 angesetzt. Der Vertikalbeschleunigungsbeiwert errechnet sich mit $v_h = 0,333 k_h$. Die resultierenden Beschleunigungsbeiwerte sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Die Berechnungen der Standsicherheit wurden gemäß Eurocode 7 Nachweisverfahren 1 Kombination 2 durchgeführt und die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend gewählt.

5.2. Ergebnisse der Berechnungen

Die Ergebnisse der Berechnungen im Falle eines Erdbebens befinden sich als graphische Darstellungen in Anhang B. Die jeweils geringsten ermittelten Sicherheiten sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Außerdem sind auch die Standsicherheitsbeiwerte gegeben, bei dem das Festgestein versagen würde. Diese liegen weit außerhalb des kritischen Bereichs, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

Tabelle 5.4: Niedrigste ermittelte niedrigste Standsicherheitsfaktoren ausgewählter Modellsituationen unter seismischem Einfluss bei einem Bedeutungsbeiwert $\gamma_1 = 0,8$ nach DIN EN 1998-1/NA:2021-07

| Szenario | Sickerlinie | Standsicherheit | Standsicherheit im Fels |
|-----------------------------|-------------|-----------------|-------------------------|
| Kein Grundwasser | Analytisch | 0,922 | 2,3 |
| 938,56 | Analytisch | 0,651 | 2,22 |
| 938,56 | FEM | 0,692 | 2,27 |
| 940,85 | FEM | 0,692 | 2,27 |
| Referenzmodell | FEM | 0,691 | 1,97 |
| 940,85 m NN | | | |
| Verkürzte Geometrie (-10 m) | FEM | 0,692 | 1,98 |
| 940,85 m NN | | | |

Wie zu erwarten werden durch die zusätzliche Last (seismische Einwirkung) die Sicherheitsbeiwerte im Vergleich zur Situation ohne Erdbeben reduziert (s. Anhang B-4 bis B-9). Zusätzlich zu den Gleitkreisen in den Lockergesteinsmassen am Außenhang können jetzt auch einzelne Gleitkreise in der vermuteten Rutschmasse am Kopf des Außenhangs auftreten. Dies ist aufgrund der im Modell deutlich

herabgesetzten Festigkeit in der Paläorutschmasse zu erwarten. Aufgrund der Untersuchungen und Beschreibungen ist die Rutschmasse aber auf den Außenhang beschränkt und es gibt keine Indizien die darauf hinweisen, dass diese über das alte Absetzbecken hinaus reicht. Auch geometrisch ist dies nicht nachzuweisen. Insofern ist keine Gefährdung des für die Sicherheit des Beckens relevanten ungestörten Felsbereichs erkennbar.

Eine Änderung des Wasserspiegels durch ein 100-jähriges Niederschlagsereignis führt auch bei einer gleichzeitigen seismischen Einwirkung zu keiner relevanten Änderung der Situation hinsichtlich der Sicherheit für die Becken (s. Anhang B-10 bis B-12). Die berechneten Standsicherheitsfaktoren sind durch die erhebliche zusätzliche statische Belastung bei der pseudostatischen Analyse insgesamt niedriger, sodass nun bereits im grundwasserfreien Zustand Böschungsversagen eintritt (s. Anhang B-1 bis B-3). Auch hier betreffen die Gleitkreise weder die Beckeneinfassung bzw. den Gebirgsbereich der Becken, noch deren Einfassung.

Die oben getroffenen Aussagen sind auch für die Situation ohne Becken gültig, die zur Vergleichbarkeit und Vollständigkeit ebenfalls untersucht wurde (s. Anhang B-13 bis B-15).

5.3. Einfluss der Dimensionen des sperrenden Felskörpers

Um auch geometrische Effekte zu erfassen, bei denen eine Belastung des einfassenden ungestörten „Felsdamms“ des äußeren Beckens an der geringmächtigsten Stelle auftritt, wurde hierzu auch eine Extrembetrachtung untersucht (s. Anhang B-16).

Hierfür wurde das Extremszenario untersucht, in dem die Beckenwasserstände eines 100-jährigen Niederschlagsereignis und die seismischen Belastungen eines 425-jährigen Erdbebens aufeinandertreffen. Zudem wurde der dämmende Felskörper um 10 m verjüngt (Abbildung B – 16). Dies wurde technisch im Model umgesetzt, indem das Becken zwischen heutigem und ehemaligem verfüllten Rückhaltebecken um 10 m verlängert wurde, was durch eine Verschiebung der Sickerwasserlinie auch hydraulisch zu einer weiteren Verschlechterung der Situation führt. Die Ergebnisse zeigen auch hier keine kritischen Gleitkreise im Festgesteinsdamm bzw. den Gebirgsbereich des Beckens und dessen Einfassung, sowie weiterhin keine Durchströmung des ehemaligen heute verfüllten Rückhaltebeckens.

Der erste das Festgestein betreffende Gleitkreis besitzt einen Standsicherheitsfaktor von 1,98. Zudem hat der äußere Rand dieses Gleitkreises eine Entfernung von 62 m im Festgestein zum Rand des Beckens. Auch wenn die hypothetische Situation eines geringmächtigeren sperrenden Felsriegels auftritt bzw. die Situation mit der geringsten Breite betrachtet wird, würde der Abstand noch 52 m betragen.

6. Empfehlungen

Der Felsriegel zwischen dem Steinbruchbereich und der Außenböschung, insbesondere die ungestörten Bereiche müssen erhalten und geschont werden. Hier sollen keine weiteren Eingriffe stattfinden, insbesondere solche, die die Festigkeit erniedrigen oder Durchlässigkeit erhöhen.

Grundsätzlich macht es aus ingenieurgeologischer Sicht Sinn, die Wasserstände in den Becken wie im Gutachten von B. Bahrig (2013) vermerkt niedrig zu halten. Dies hält die Lasten auf die äußeren Hang- und Lockergesteinsauflage niedriger und schafft damit zusätzliche Sicherheitsreserven.

Falls an der Außenböschung des Osthangs relevante Massenverlagerungen bzw. eine Intensivierung der Bewegungen in den Lockergesteinsmassen oder der vermuteten Rutschmasse auftreten wird eine erneute fachliche Begutachtung empfohlen um zu prüfen, ob diese eine Neubewertung erforderlich machen. Zudem wird in diesem Fall als Vorsichtsmaßnahme empfohlen die Wasserstände bis zur Klärung in den Becken niedrig zu halten bzw. Maßnahmen zur Senkung zu ergreifen.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Gutachtens 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. Die Kulisse des Plettenbergs ist im Bereich der Becken nach Osten zum Osthang hin geöffnet. Dort befindet sich im Bereich der morphologischen Depression auch das äußere der beiden Becken.

Grundsätzlich wurde bereits in einem vorangegangenen Gutachten (Bahrig 2013) die Situation bewertet und als günstig dargestellt. Da es sich um eingeschnittene Becken

handelt treten auch bei einer vollständigen Füllung der Becken nur solche Belastungen auf, die geringer als die vorangegangenen Zustände sind.

Um Einflüsse durch eine veränderte Sickerwasserlinie bzw. Gebirgswasserstände zu untersuchen wurden analytische Untersuchungen der Standsicherheit für den Bereich der Ostböschung mit den Becken durchgeführt. Diese sollten insbesondere klären, ob es zu Versagensbildern kommen kann, durch die die Integrität der Becken betroffen ist und es zu einem plötzlichen unkontrollierten Wasseraustritt aus den Becken kommen kann.

Dies wurde in keiner der Simulationen beobachtet. Auch bei extremen Lasten durch Erdbeben sind die Versagensbereiche mehrere Zehnermeter von der äußeren Beckeneinfassung entfernt. Der ungestörte Festgesteinskörper zwischen dem Absetzbecken und dem ersten geschwächten Felsbereich – dem verfüllten ehemaligen Absetzbecken – wird in diesen Zuständen nicht betroffen, auch nicht durch ein Versagen in das Becken hinein.

Was aber aus allen Untersuchungen ersichtlich bleibt ist die Instabilität der Lockergesteinsauflage und Rutschmassen, die dem Festgesteinskörper des Plettenbergs aufliegen. Dieser Aspekt wurde bereits in dem Gutachten von Fernandez-Steeger et al. (2018) ausführlich behandelt und auch in der öffentlichen Anhörung 2019 erörtert. Durch die Verlagerung der Becken weg von der Hangkante mehr in das Zentrum des Steinbruchs ist hier keine Beeinflussung der Sicherheit der Becken zu erkennen und auch eine zusätzliche Sicherheit geschaffen worden.

Berlin, den 13.12.2022



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., 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.

LGRB (2019): Felssturz am Plettenberg bei Ratshausen.- LGRBwissen. URL: <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/ingenieurgeologie/massenbewegungen/steinschlag-bis-felssturzereignisse-stuerzen/felssturz-am-plettenberg-bei-ratshausen>, zuletzt abgerufen am 18.11.2022

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

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., Thiemann, P., Nguyen, H. T. (2018): Hydrogeologisches und Ingenieurgeologisches Fachgutachten zur Süderweiterung des Steinbruchs Plettenberg der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH – November 2018, im Auftrag der HOLCIM (SÜDDEUTSCHLAND) GmbH.

Thiemann, P., Rausch, T., Köhler, A. (2014) Geologisch-hydrogeologische Bestandsaufnahme Steinbruch Plettenberg der Holcim (Süddeutschland) GmbH, Harsum: Dr. Köhler & Dr. Pommerening GmbH.

Scheerer, F. (1966): Unser Albtrauf im Wechsel der Zeiten. Heimatkundliche Blätter für den Kreis Balingen, Nummern 2, 3, und 4, 1966.

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

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|---|
| Abbildung 2.1: Übersichtskarte des Plettenberges mit Standorten der berücksichtigten Bohrungen, kartierten Aufschlüsse und Fotoaufnahmen, auf Standsicherheit analysierte Böschungsprofile und Grenzen des bestehenden und beantragten Abbauvolumens (Fernandez-Steeger et. al. 2018). | 2 |
| Abbildung 4.1: Felsmechanische Materialparameter der relevanten Schichten für die Standsicherheitsberechnungen nach dem Hoek-Brown bzw. Mohr-Coulomb Kriterium (aus Fernandez-Steeger et al., 2018) | 5 |
| Abbildung 4.2: Übersichtskarte der Grundwassergleichen entlang des zu untersuchenden Profils am Osthang am Plettenberg mit Standorten nahgelegener Bohrungen und Vernässungszonen bzw. Quellen sowie der relevanten Schichtgrenze (Pommerening et al., 11/2022) | 6 |
| Abbildung 4.3: Hydrogeologisches West-Ost-Profil der Süderweiterung am Steinbruch Plettenberg, zweifach überhöht (Pommerening et al., 11/2022)..... | 7 |
| Abbildung 4.4: gewählte hydraulische Parameter der geologischen Schichten für die FEM-Simulation der Sickerlinie | 8 |
| Abbildung 4.5: Berechnete Sickerlinie (pink) mit den unter Abbildung 4.5 angegebenen Parametern bei einem Mittelwasserstand im Rückhaltebecken von 938,56 m NN | 9 |
| Abbildung 4.6: Berechnete Sickerlinie (pink) mit den unter Abbildung 4.5 angegebenen Parametern bei einem 100-jährigem Niederschlagsereignis mit einem Wasserstand im Rückhaltebecken von 940,85 m NN | 9 |

Anhang A – Darstellung der Ergebnis der analytischen Standsicherheitsuntersuchungen

| | Becken | Ermittlung Sickerwas- serlinie | Wasserstand Becken | seismische Belastung | Bishop | Janbu | Spencer |
|------|--------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|-------|---------|
| A-2 | mit | | - | - | 1,258 | | |
| A-3 | mit | | - | - | | 1,197 | |
| A-4 | mit | | - | - | | | 1,257 |
| A-5 | mit | analytisch | 938,56 | - | 0,884 | | |
| A-6 | mit | analytisch | 938,56 | - | | 0,844 | |
| A-7 | mit | analytisch | 938,56 | - | | | 0,885 |
| A-8 | mit | FEM | 938,56 | - | 0,939 | | |
| A-9 | mit | FEM | 938,56 | - | | 0,898 | |
| A-10 | mit | FEM | 938,56 | - | | | 0,939 |
| A-11 | mit | FEM | 940,85 | - | 0,939 | | |
| A-12 | mit | FEM | 940,85 | - | | 0,898 | |
| A-13 | mit | FEM | 940,85 | - | | | 0,939 |
| A-14 | ohne | FEM | 940,85 | - | 0,938 | | |
| A-15 | ohne | FEM | 940,85 | - | | 0,897 | |
| A-16 | ohne | FEM | 940,85 | - | | | 0,939 |

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

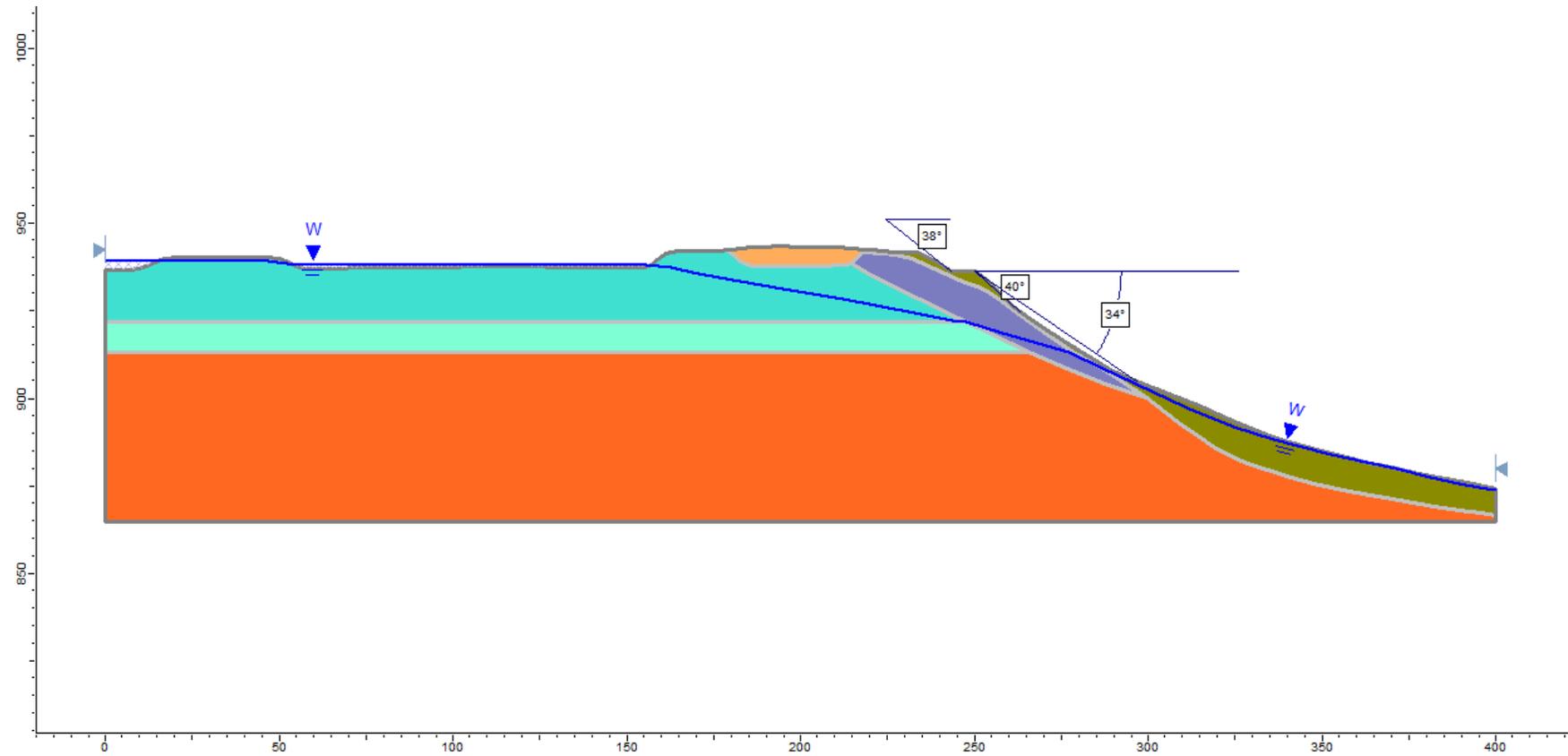


Abbildung A - 1: Geometrie und diskretisierte Schichten des Osthangs mit eingezeichneten Böschungswinkeln

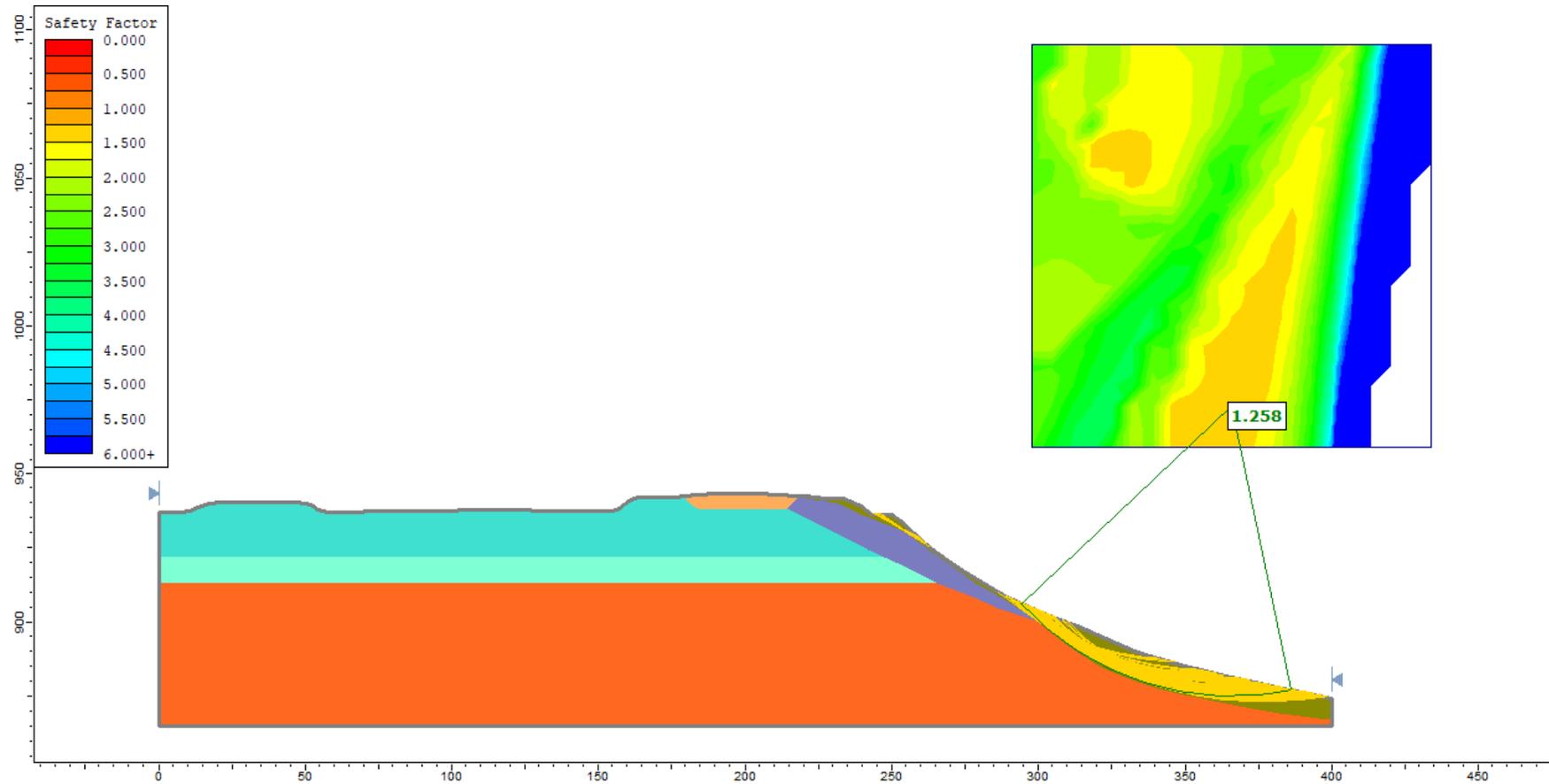


Abbildung A - 2: Profil des Osthangs im grundwasserfreien Zustand – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

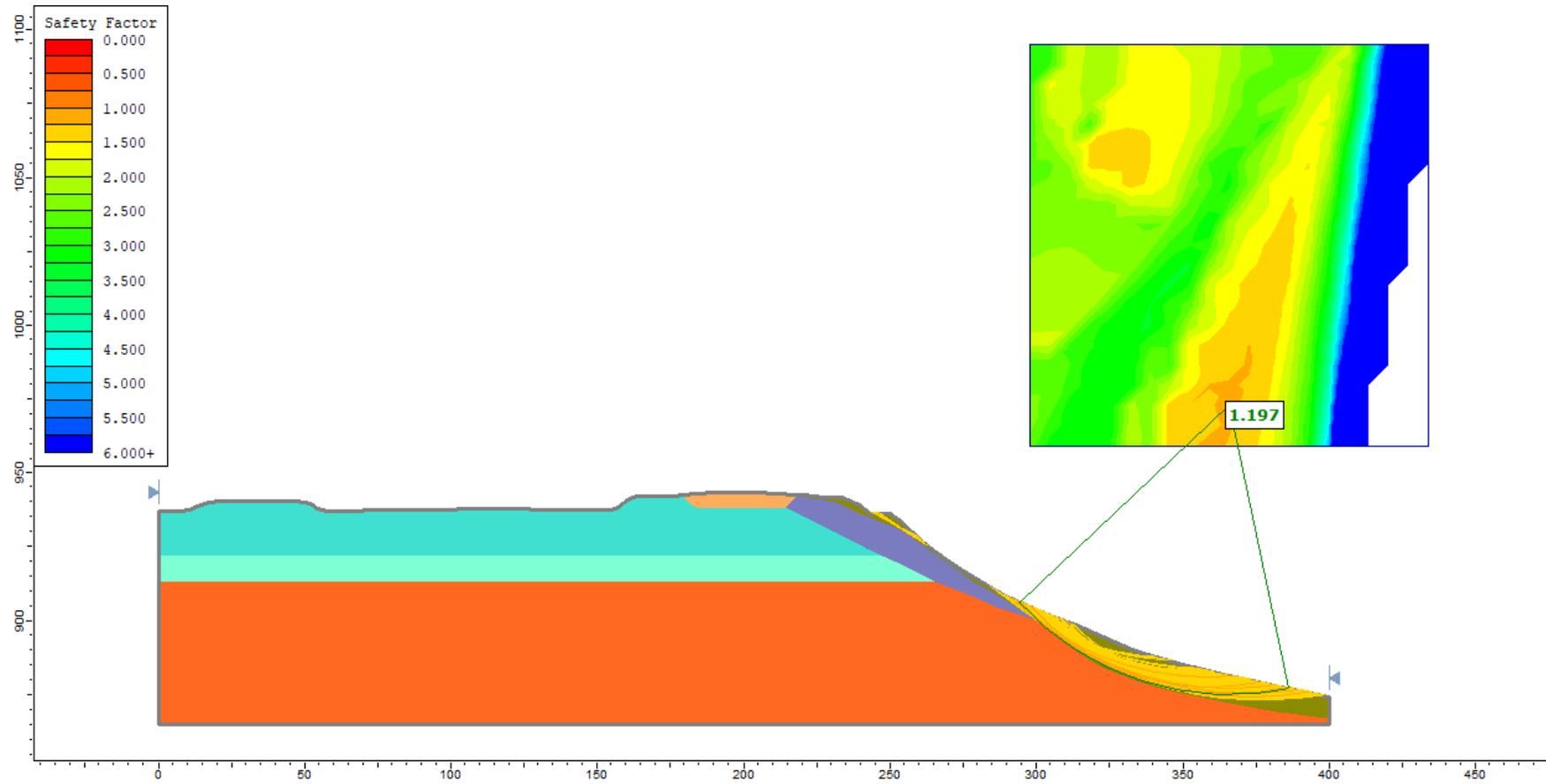


Abbildung A - 3: Profil des Osthangs im grundwasserfreien Zustand – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

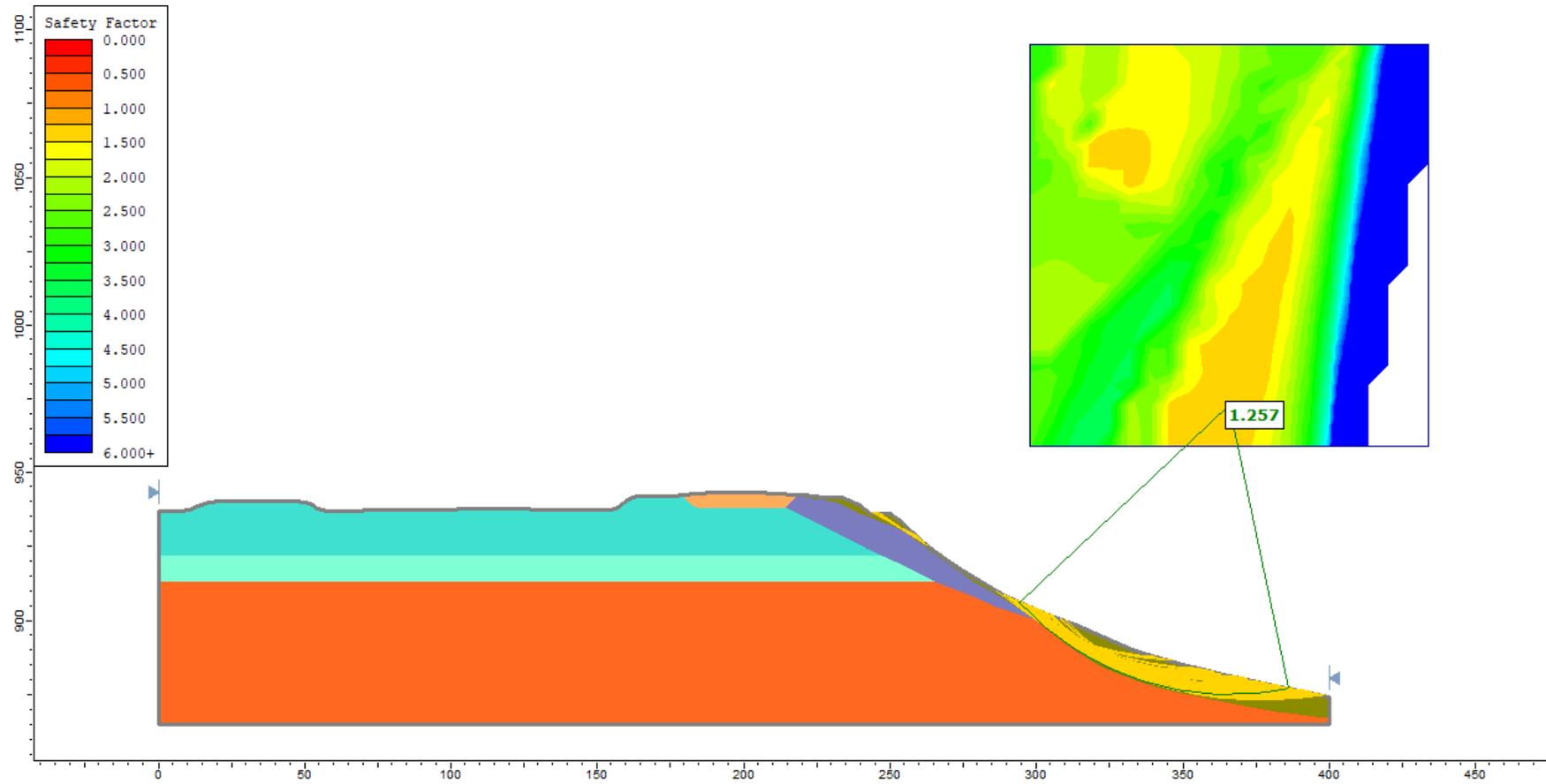


Abbildung A - 4: Profil des Osthangs im grundwasserfreien Zustand – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

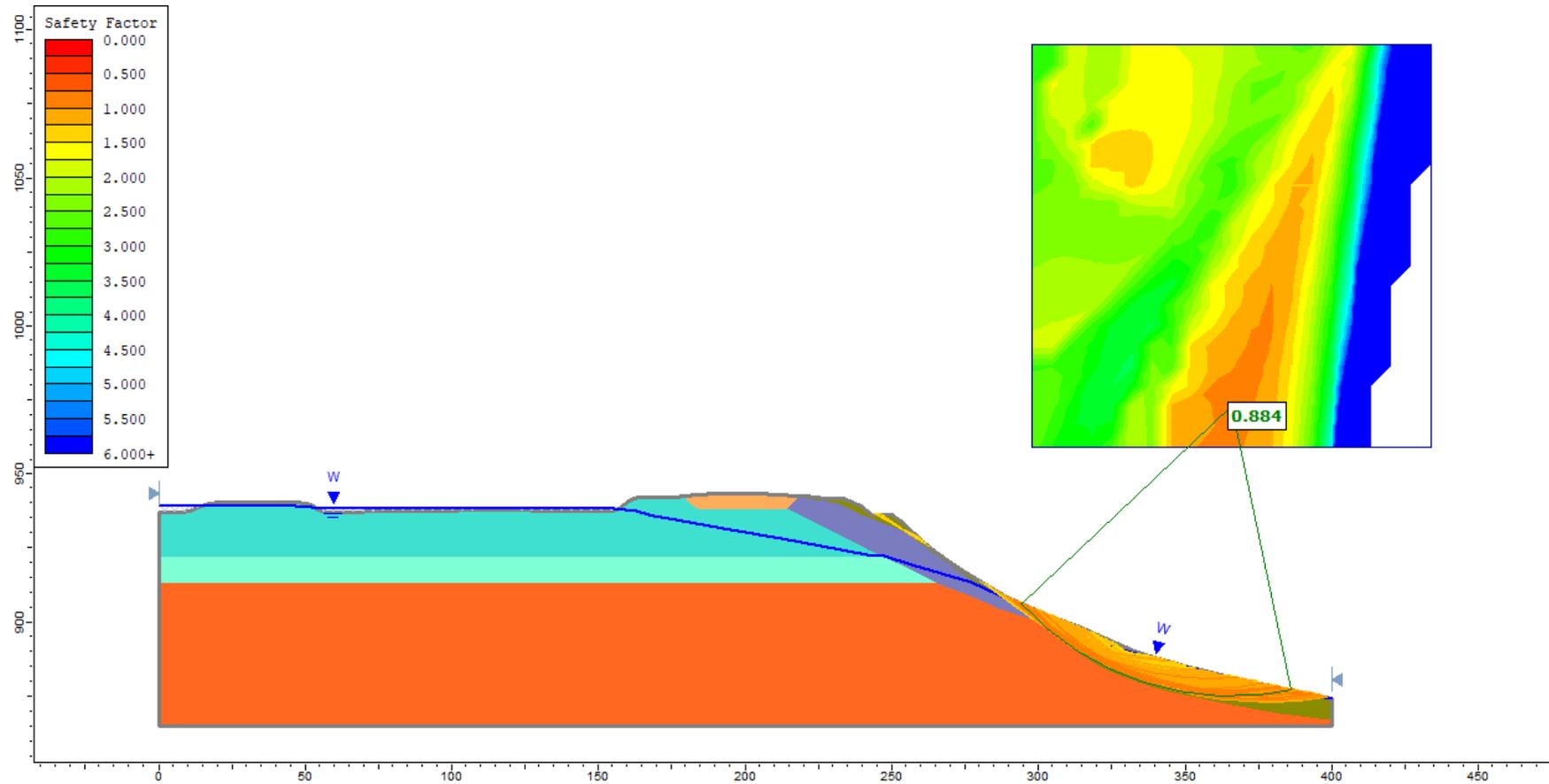


Abbildung A - 5: Profil des Osthangs der analytischen Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

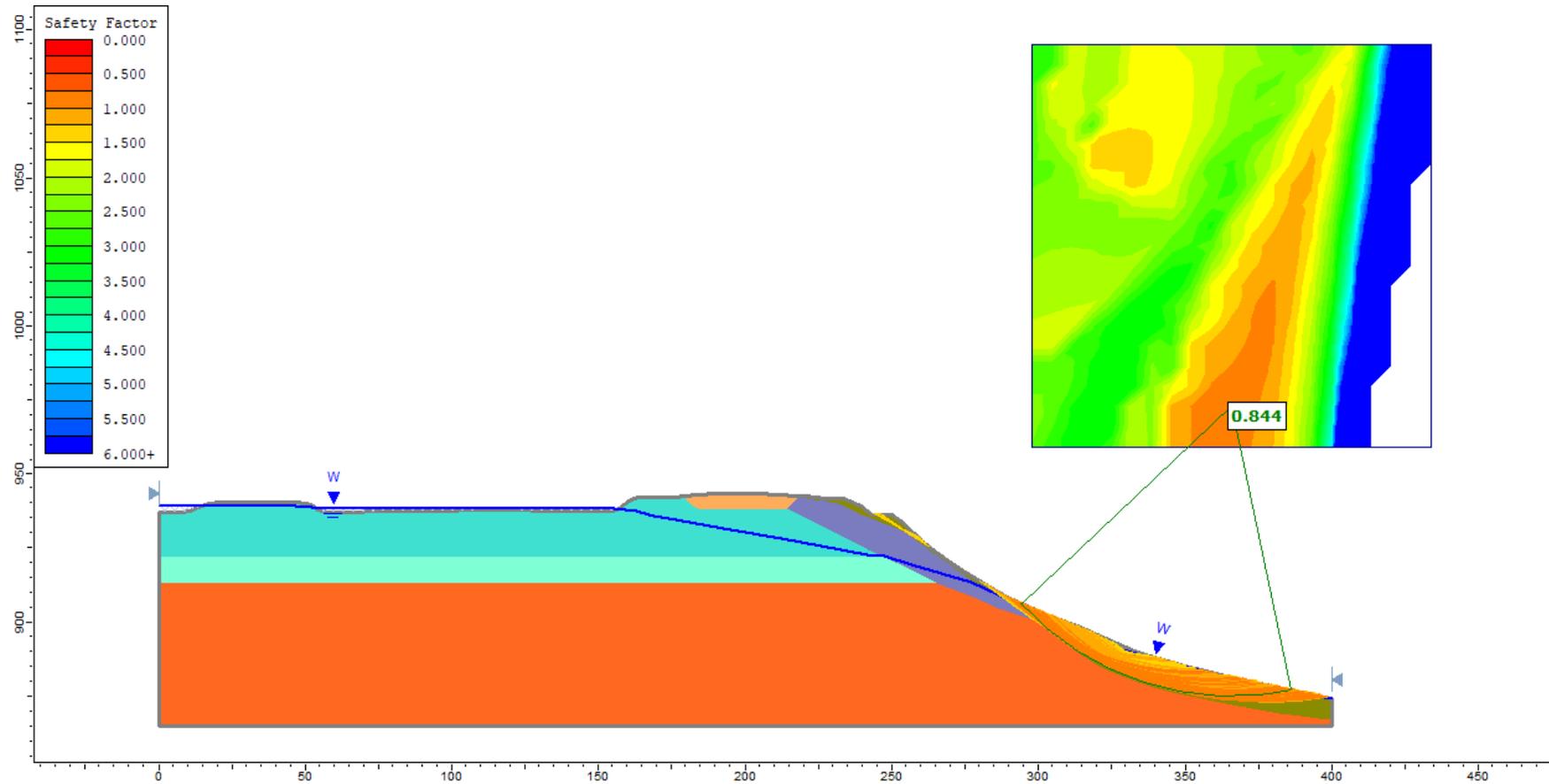


Abbildung A - 6: Profil des Osthangs der analytischen Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

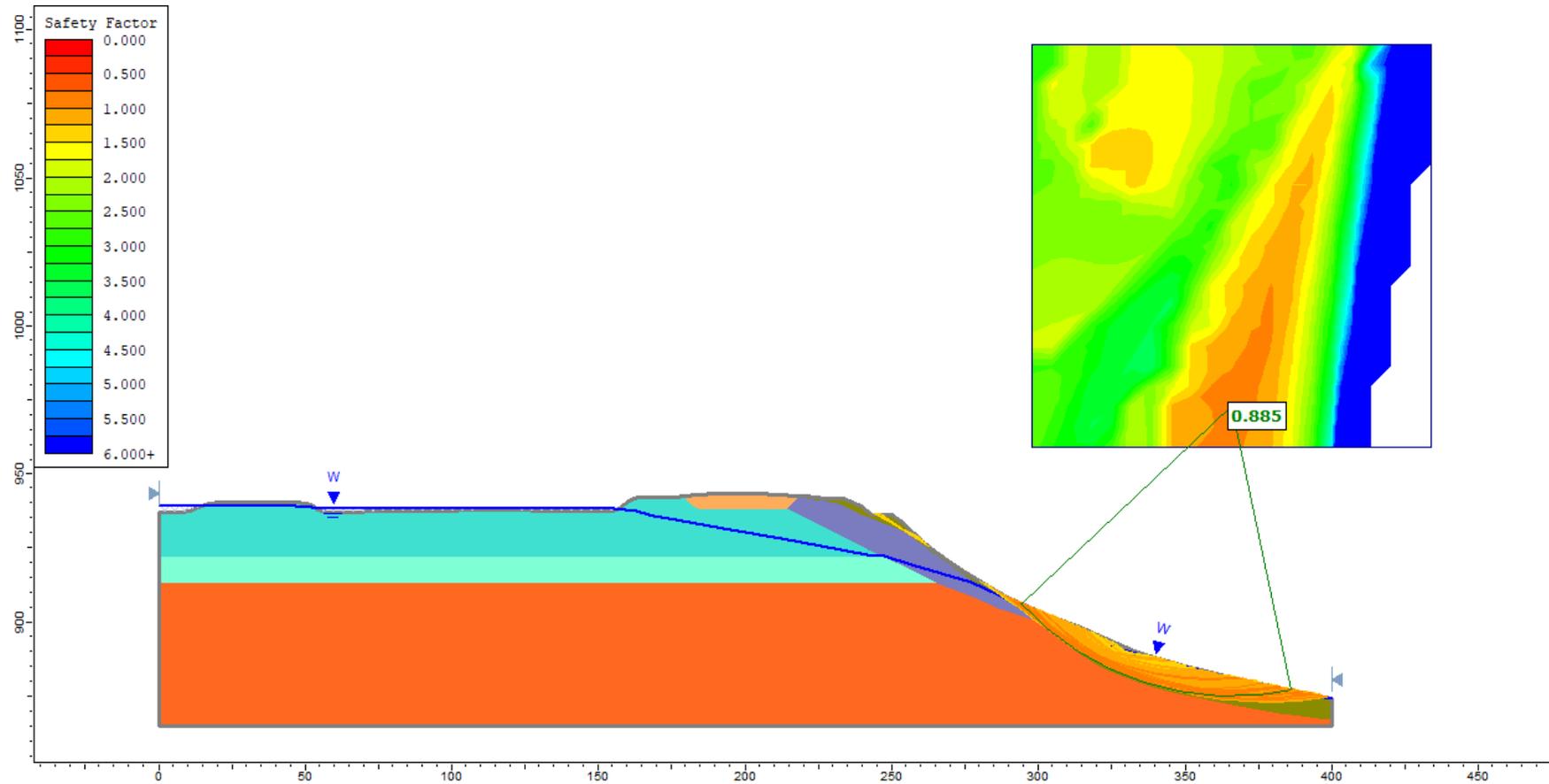


Abbildung A - 7: Profil des Osthangs der analytischen Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

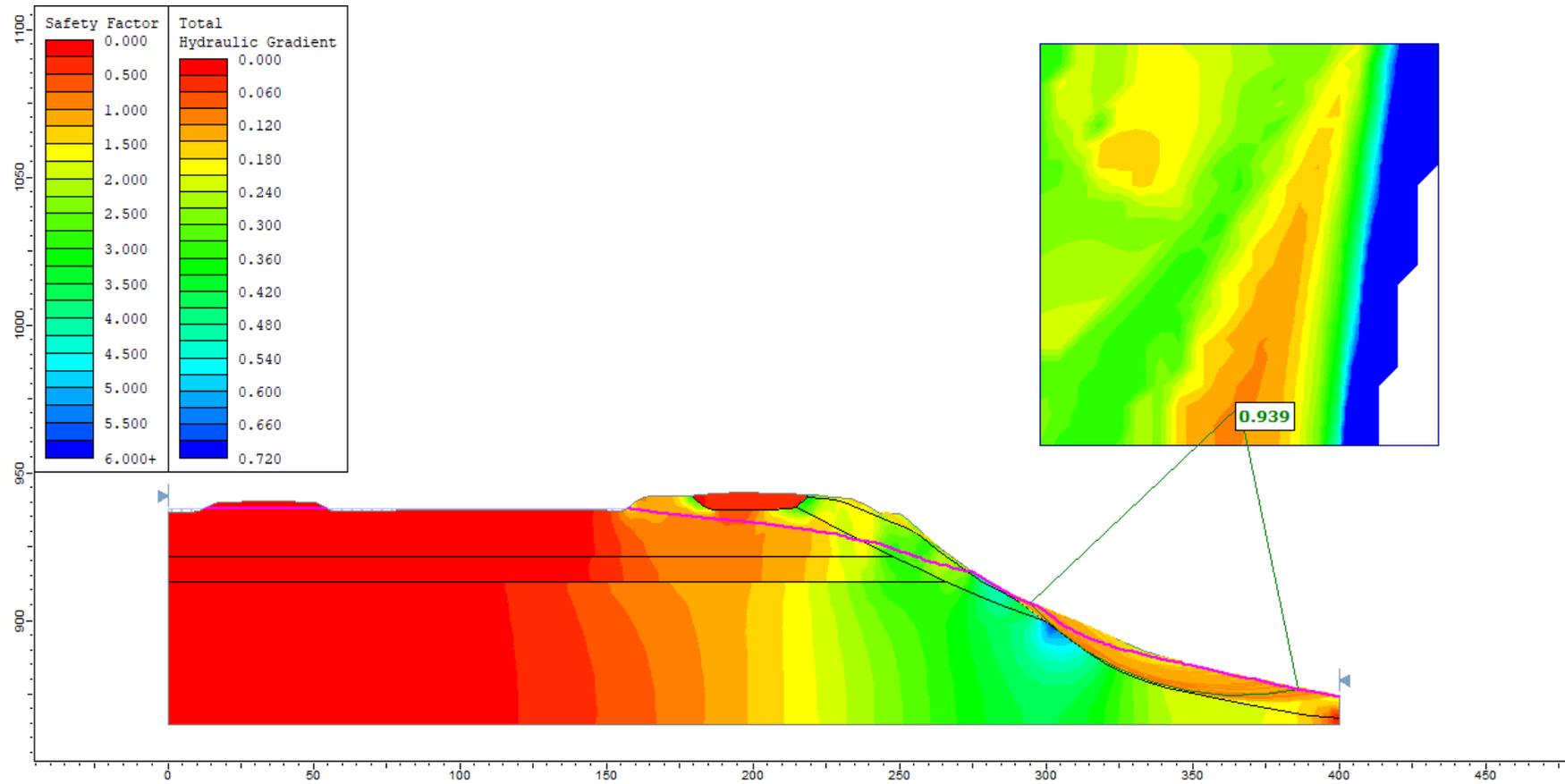


Abbildung A - 8: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

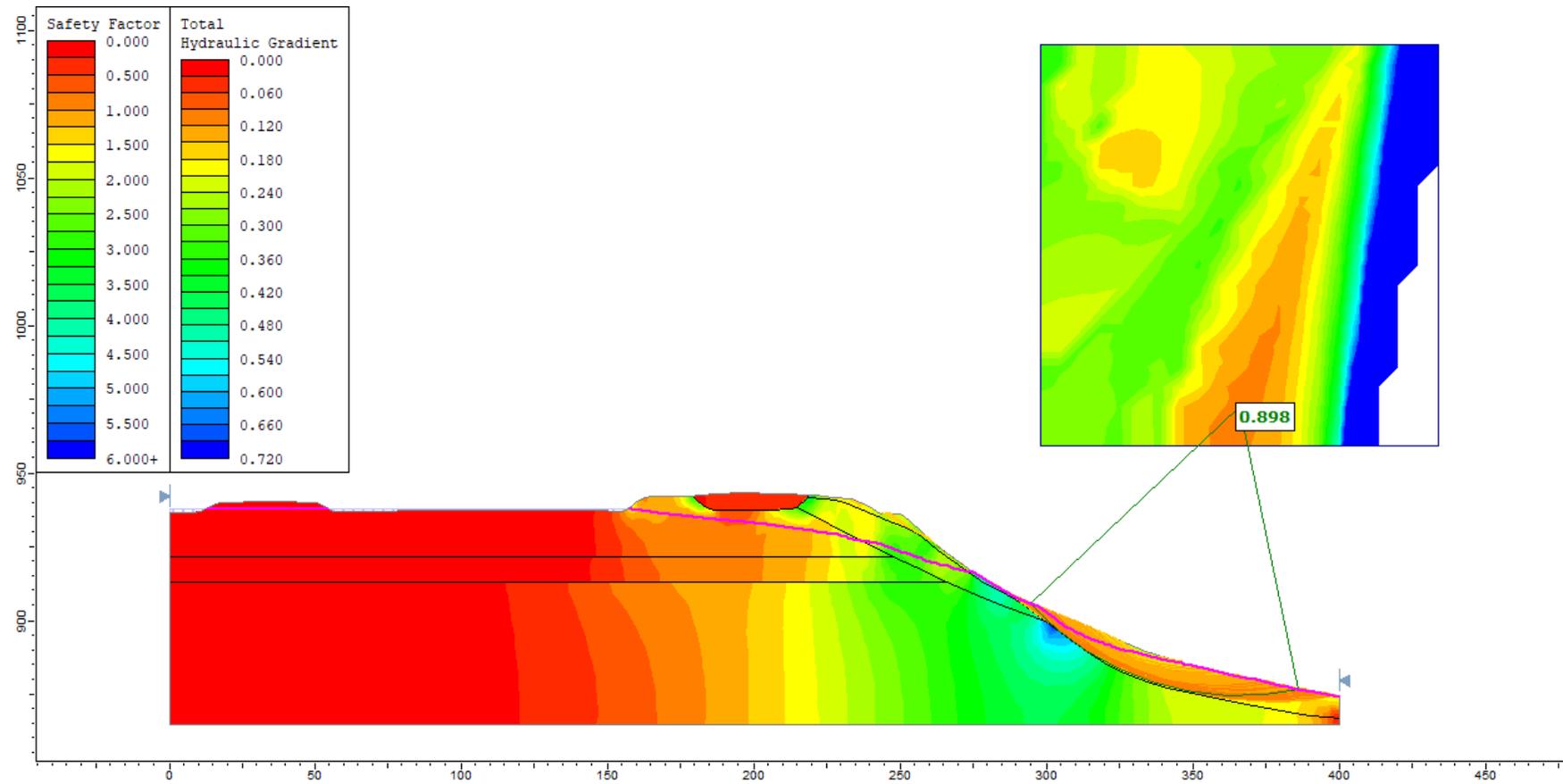


Abbildung A - 9: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

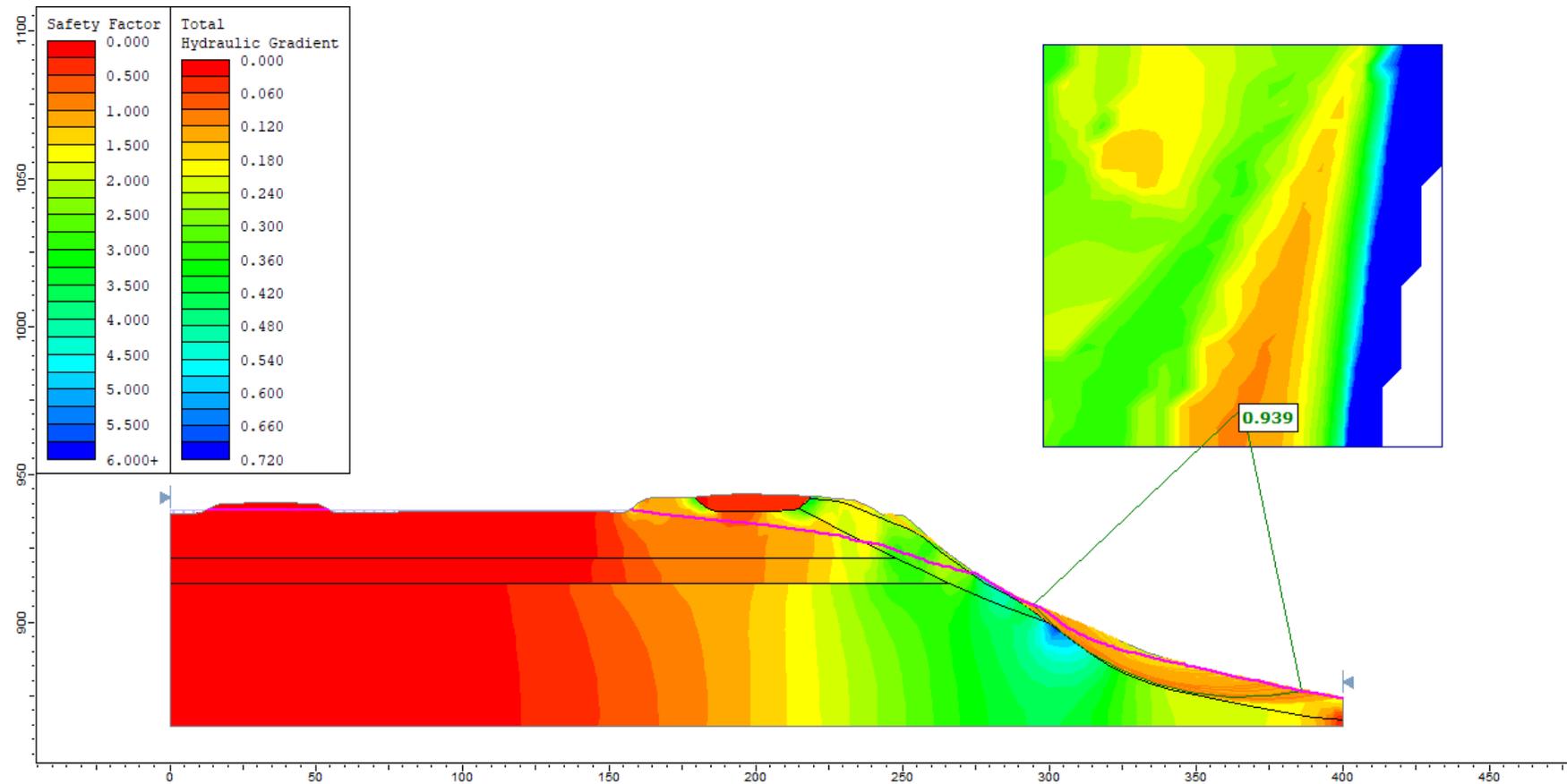


Abbildung A - 10: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

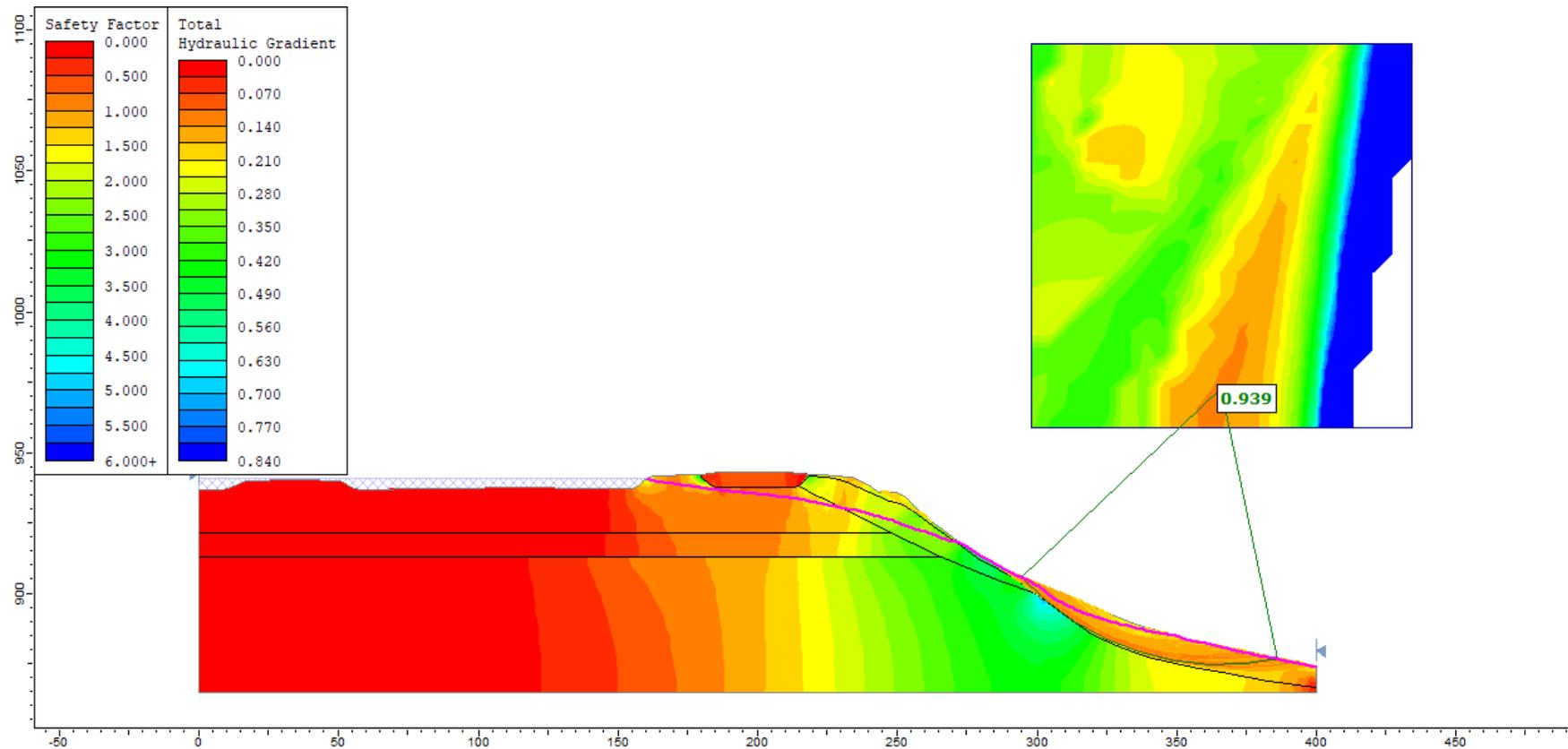


Abbildung A - 11: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei gemessenem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

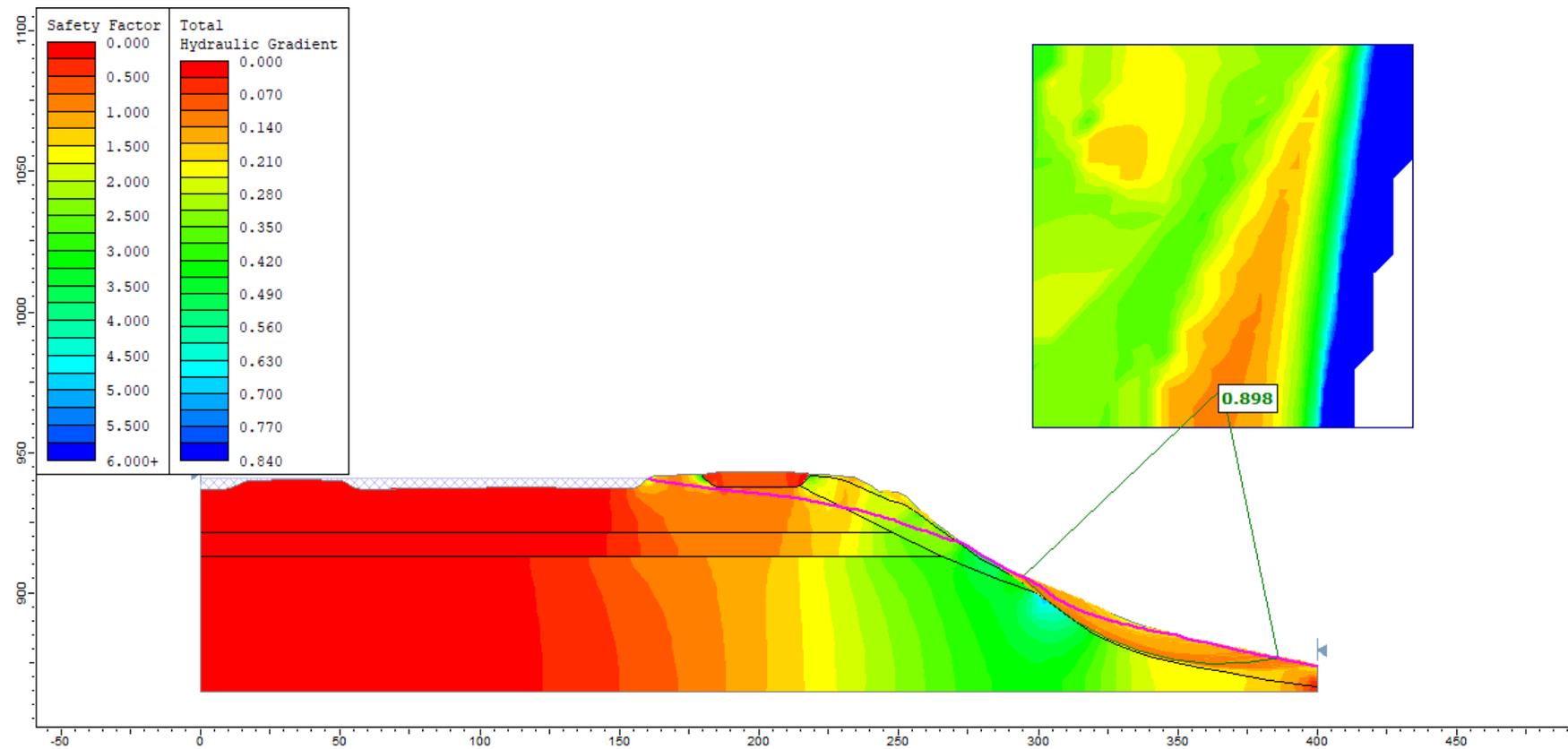


Abbildung A - 12: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei gemessenem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

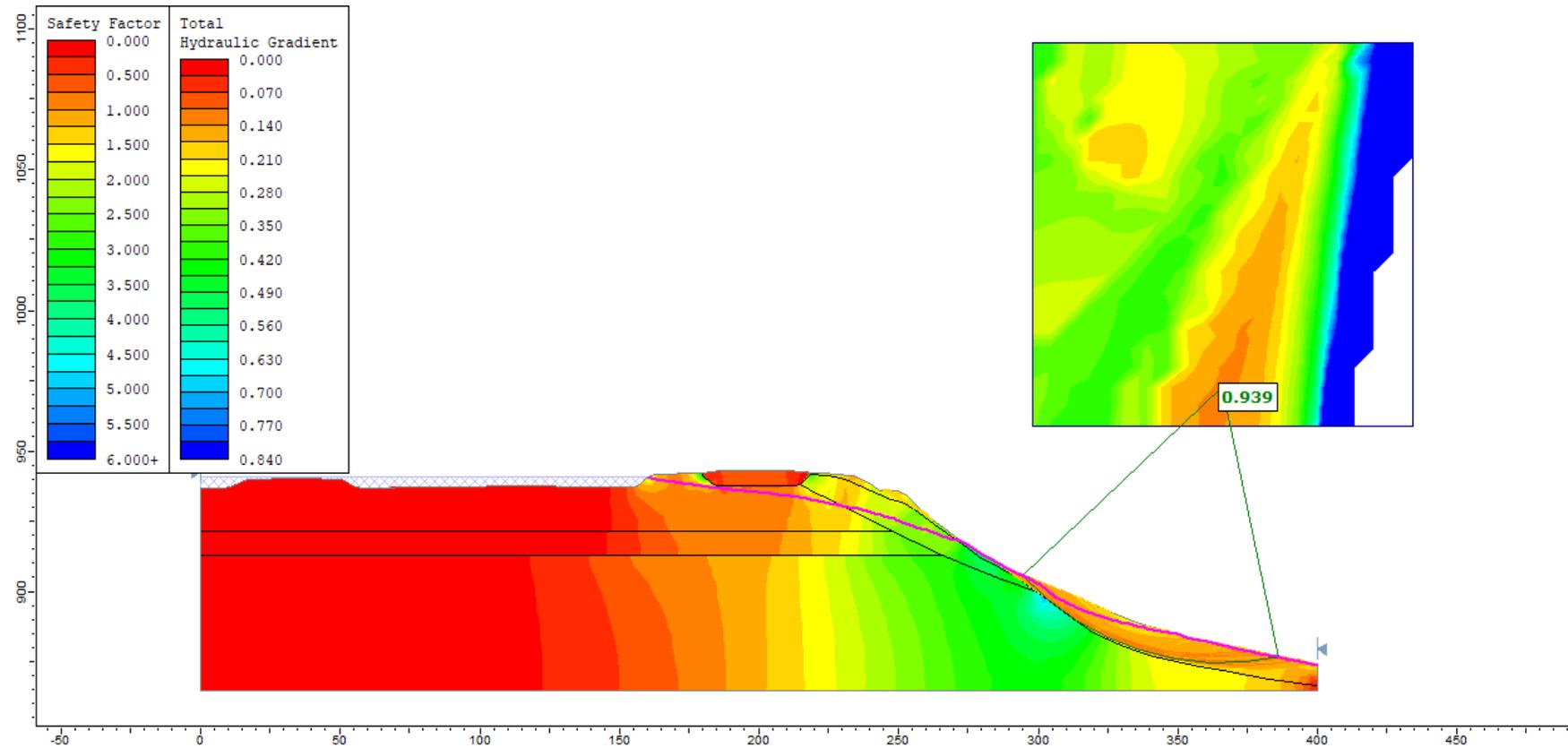


Abbildung A - 13: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei gemessenem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

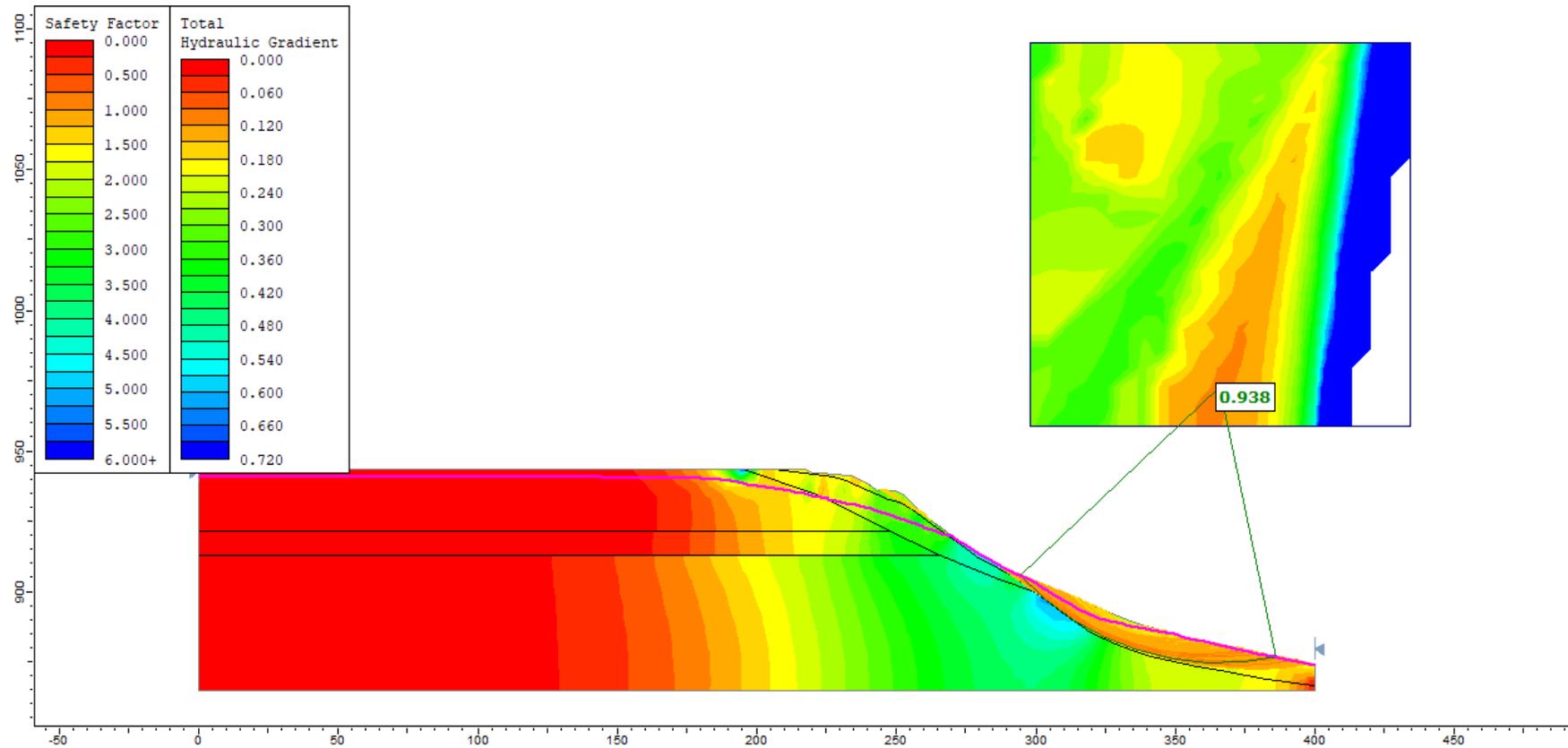


Abbildung A - 14: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) ohne Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

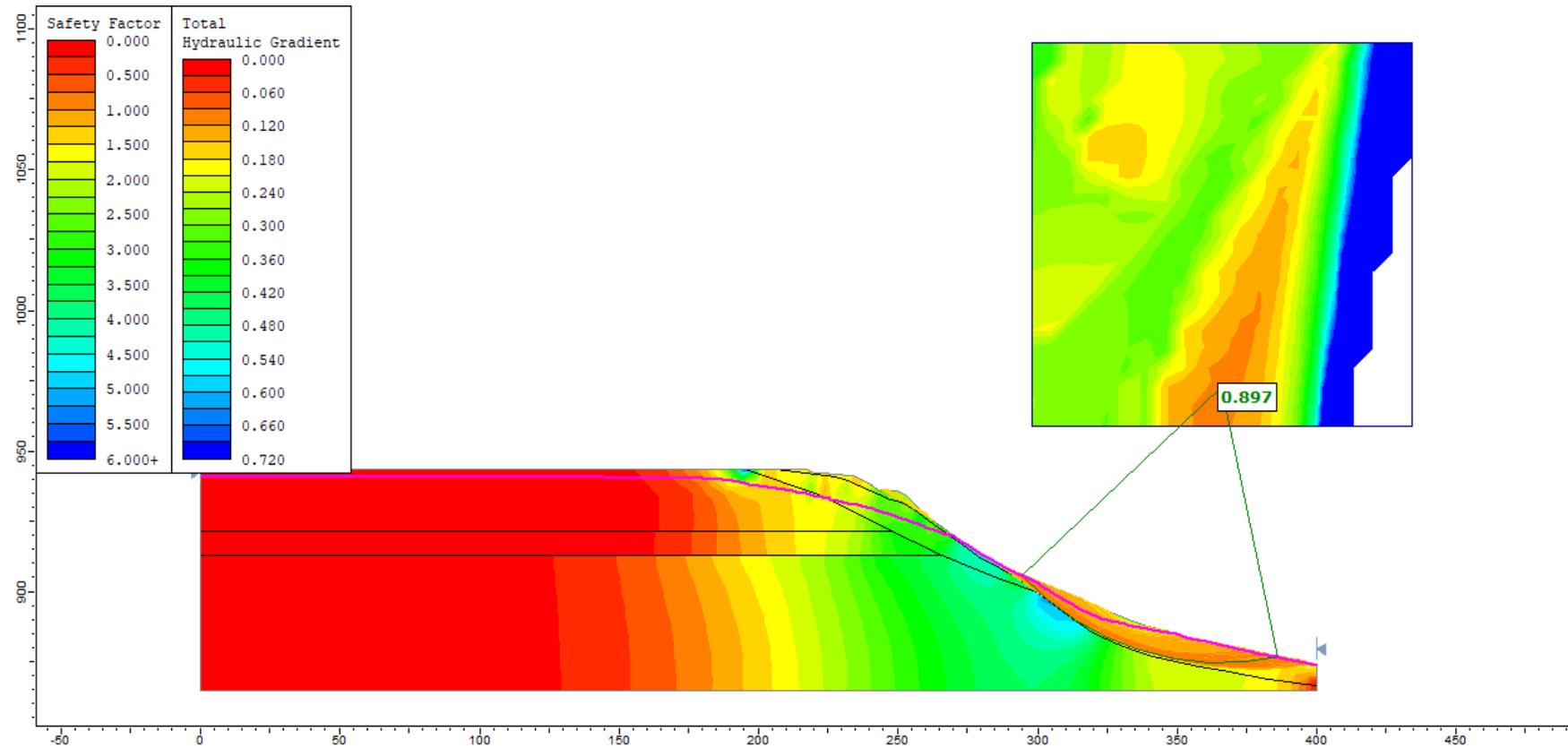


Abbildung A - 15: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) ohne Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

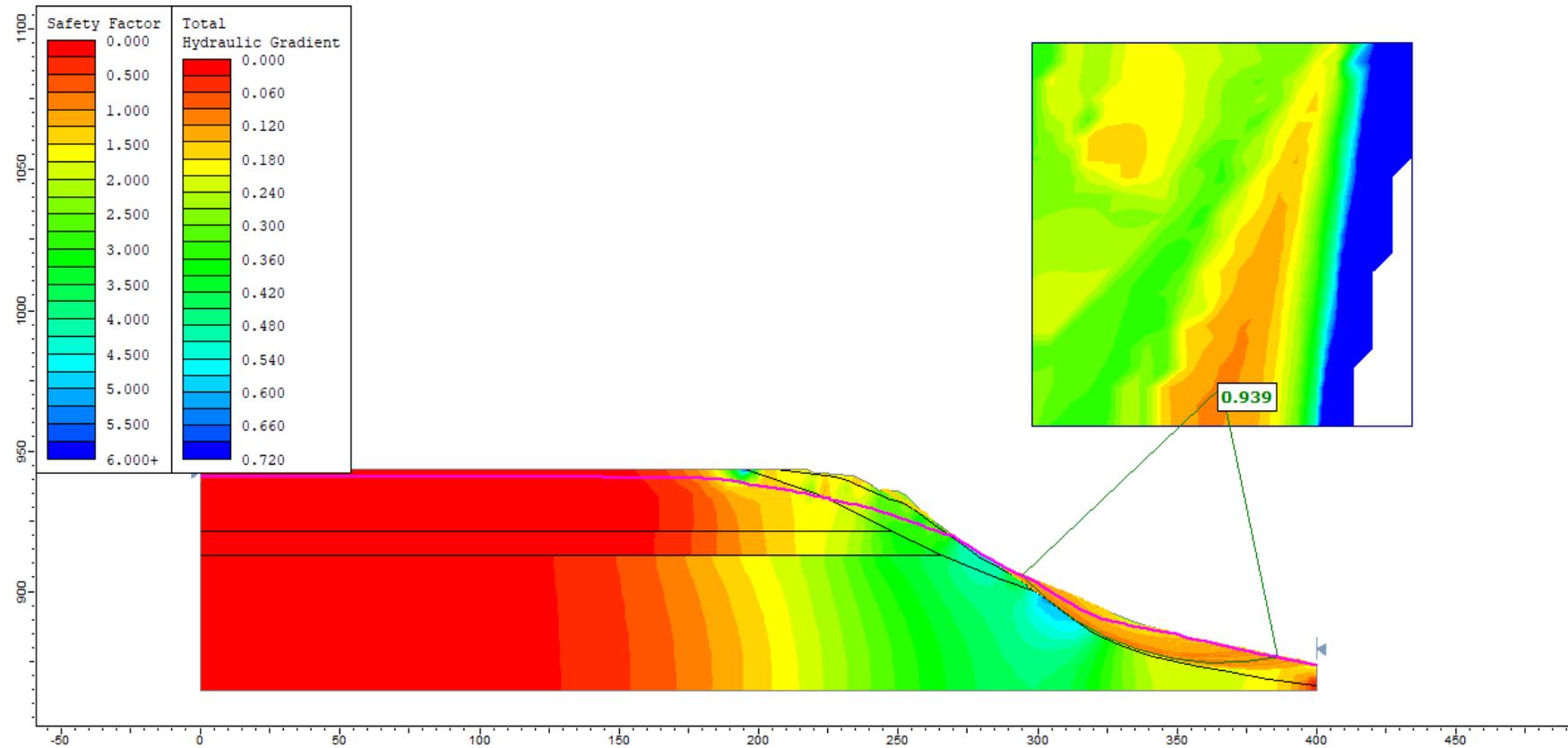


Abbildung A - 16: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) ohne Rückhaltebecken – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, pink: berechnete Sickerlinie

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

| | Becken | Ermittlung Sickerwasserlinie | Wasserstand Becken | seismische Belastung | Bishop | Janbu | Spencer |
|------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|-------|---------|
| B-1 | mit | | - | 0,0881 / 0,0291 | 0,967 | | |
| B-2 | mit | | - | 0,0881 / 0,0291 | | 0,922 | |
| B-3 | mit | | - | 0,0881 / 0,0291 | | | 0,967 |
| B-4 | mit | analytisch | 938,56 | 0,0881 / 0,0291 | 0,681 | | |
| B-5 | mit | analytisch | 938,56 | 0,0881 / 0,0291 | | 0,651 | |
| B-6 | mit | analytisch | 938,56 | 0,0881 / 0,0291 | | | 0,683 |
| B-7 | mit | FEM | 938,56 | 0,0881 / 0,0291 | 0,722 | | |
| B-8 | mit | FEM | 938,56 | 0,0881 / 0,0291 | | 0,692 | |
| B-9 | mit | FEM | 938,56 | 0,0881 / 0,0291 | | | 0,724 |
| B-10 | mit | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | 0,722 | | |
| B-11 | mit | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | | 0,692 | |
| B-12 | mit | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | | | 0,724 |
| B-13 | ohne | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | 0,722 | | |
| B-14 | ohne | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | | 0,691 | |
| B-15 | ohne | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | | | 0,724 |
| B-16 | mit, verjüngtem Damm | FEM | 940,85 | 0,0881 / 0,0291 | | 0,692 | |

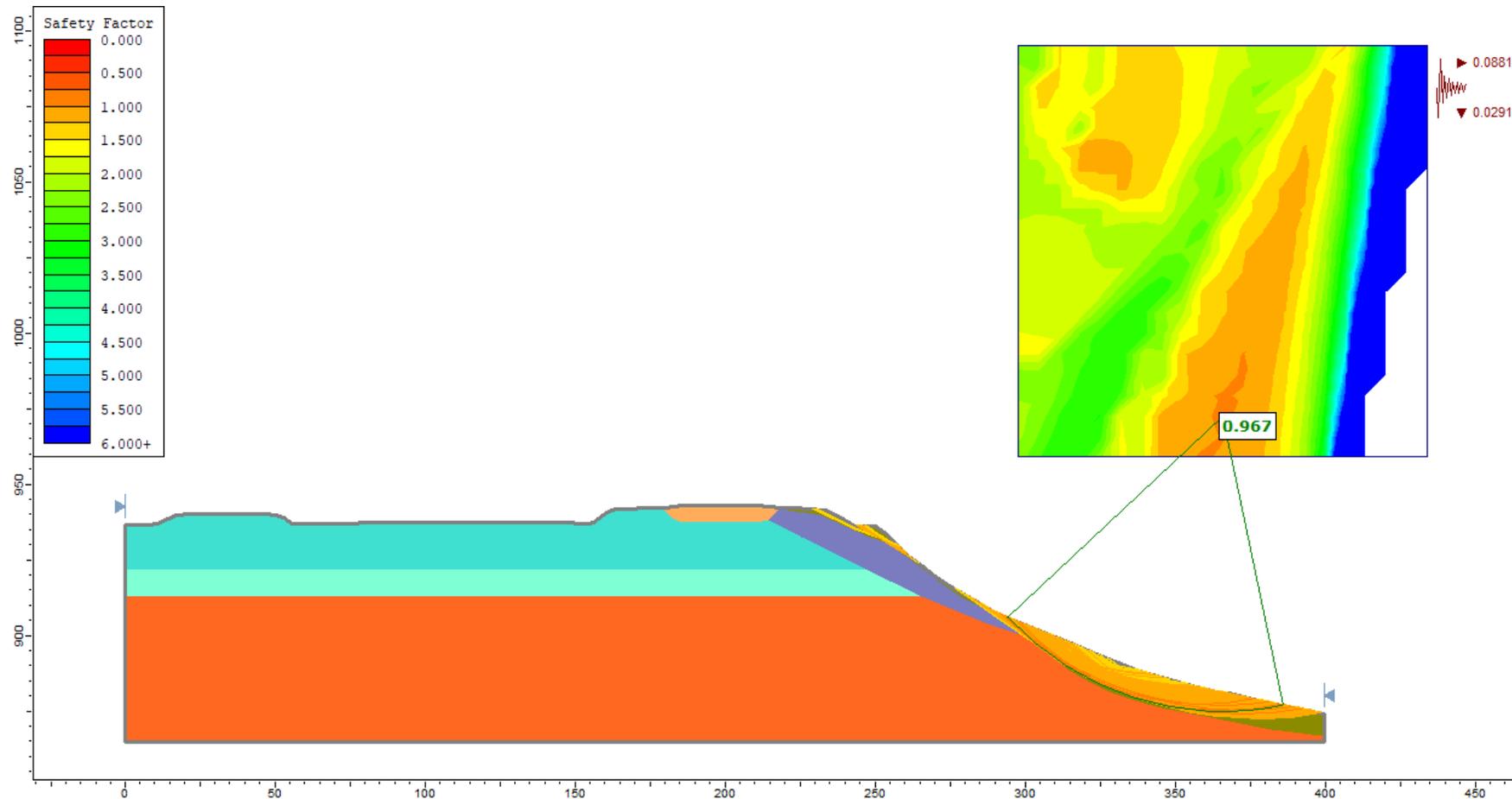


Abbildung B - 1: Profil des Osthangs im grundwasserfreien Zustand und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop

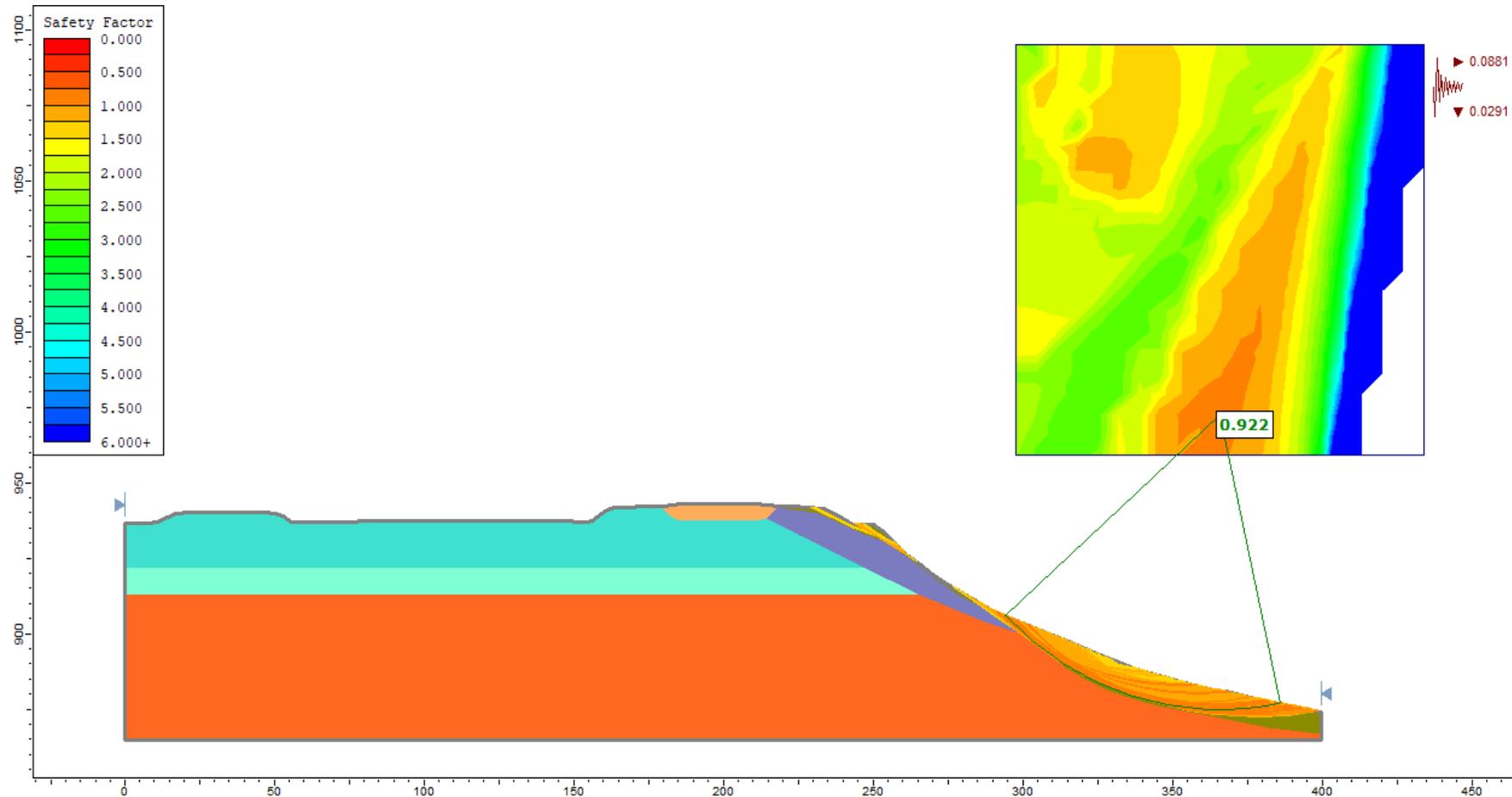


Abbildung B - 2: Profil des Osthangs im grundwasserfreien Zustand und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu

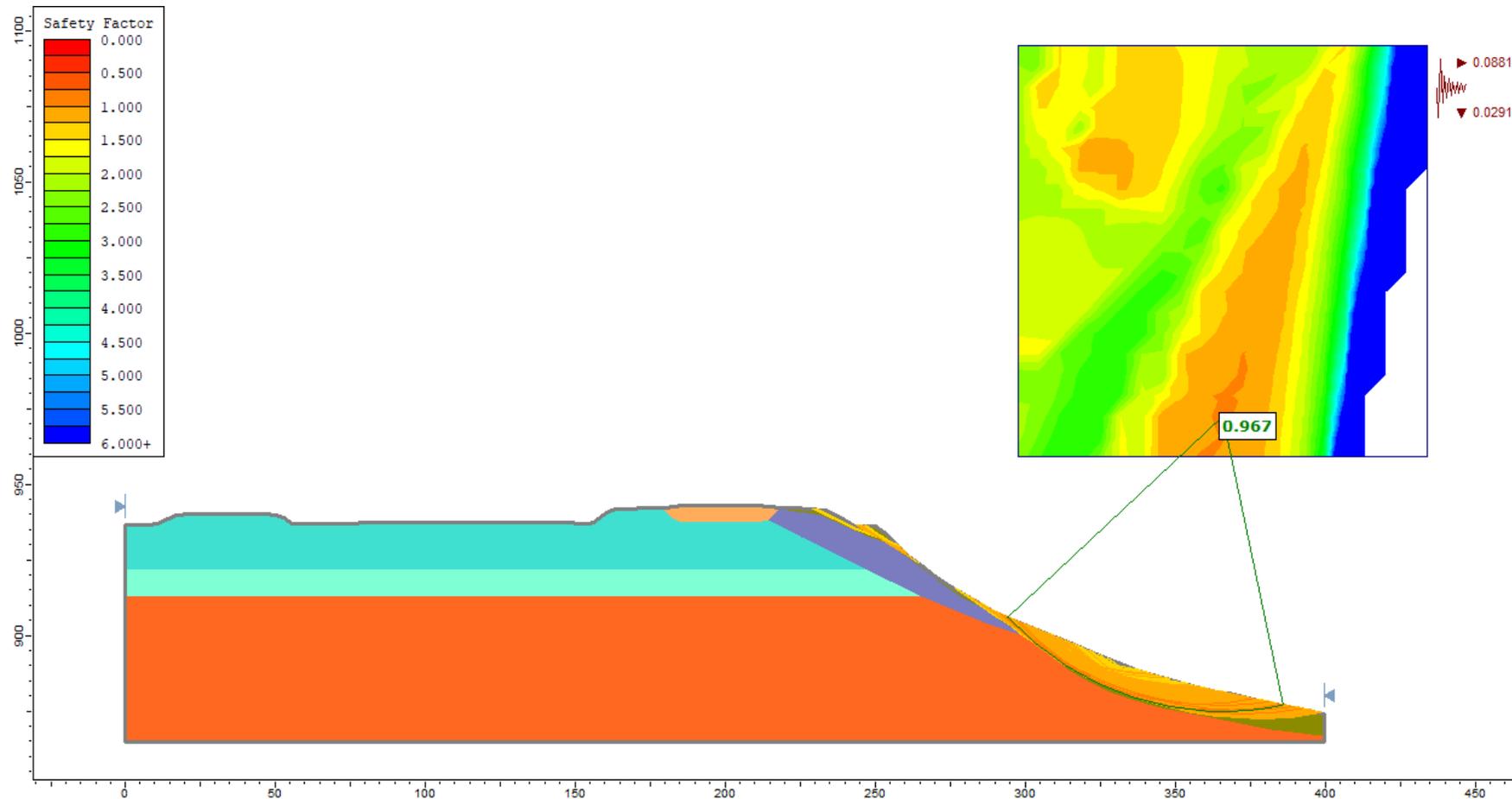


Abbildung B - 3: Profil des Osthangs im grundwasserfreien Zustand und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer

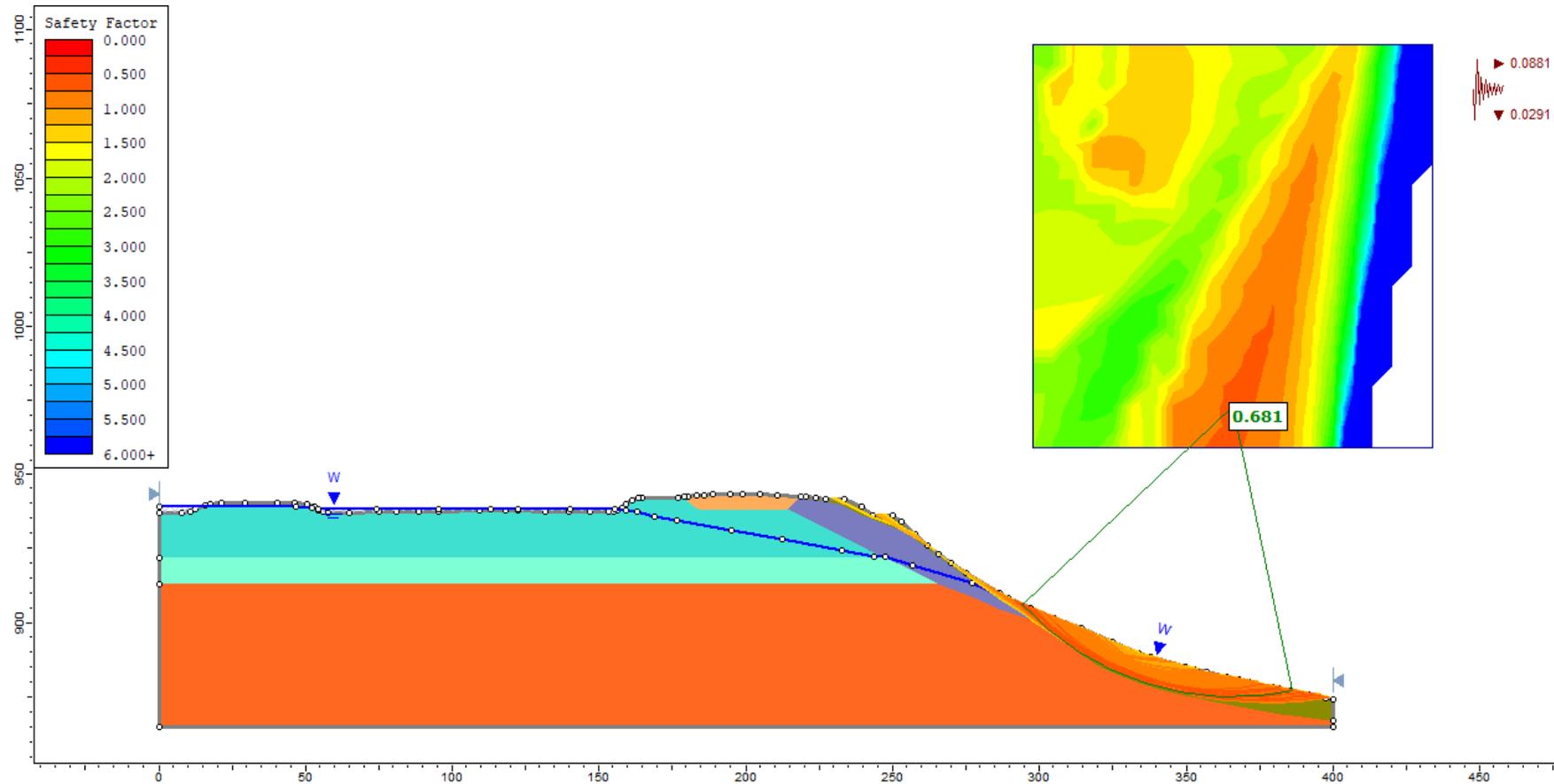


Abbildung B - 4: Profil des Osthangs der analytischen Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop

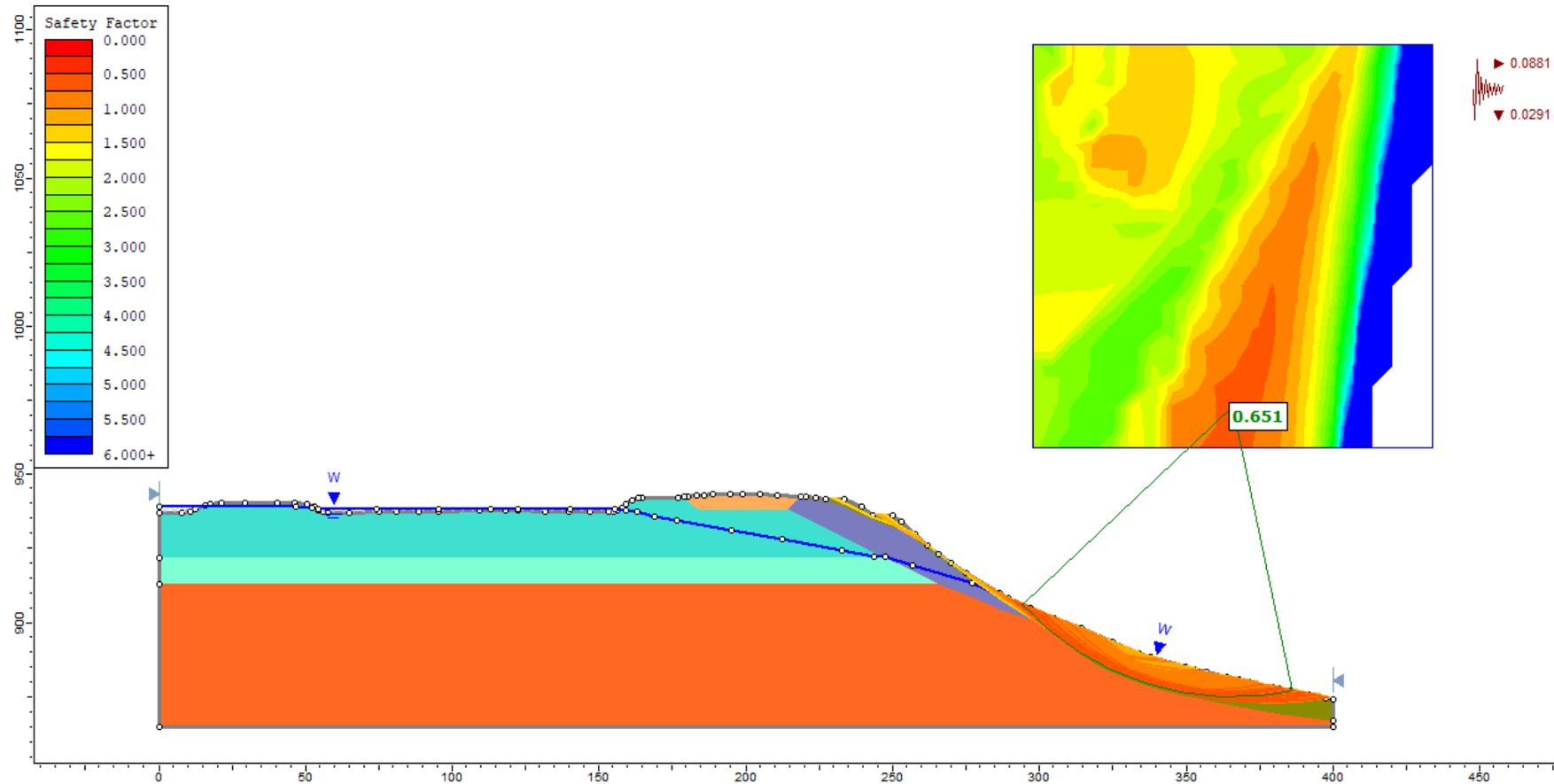


Abbildung B - 5: Profil des Osthangs der analytischen Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

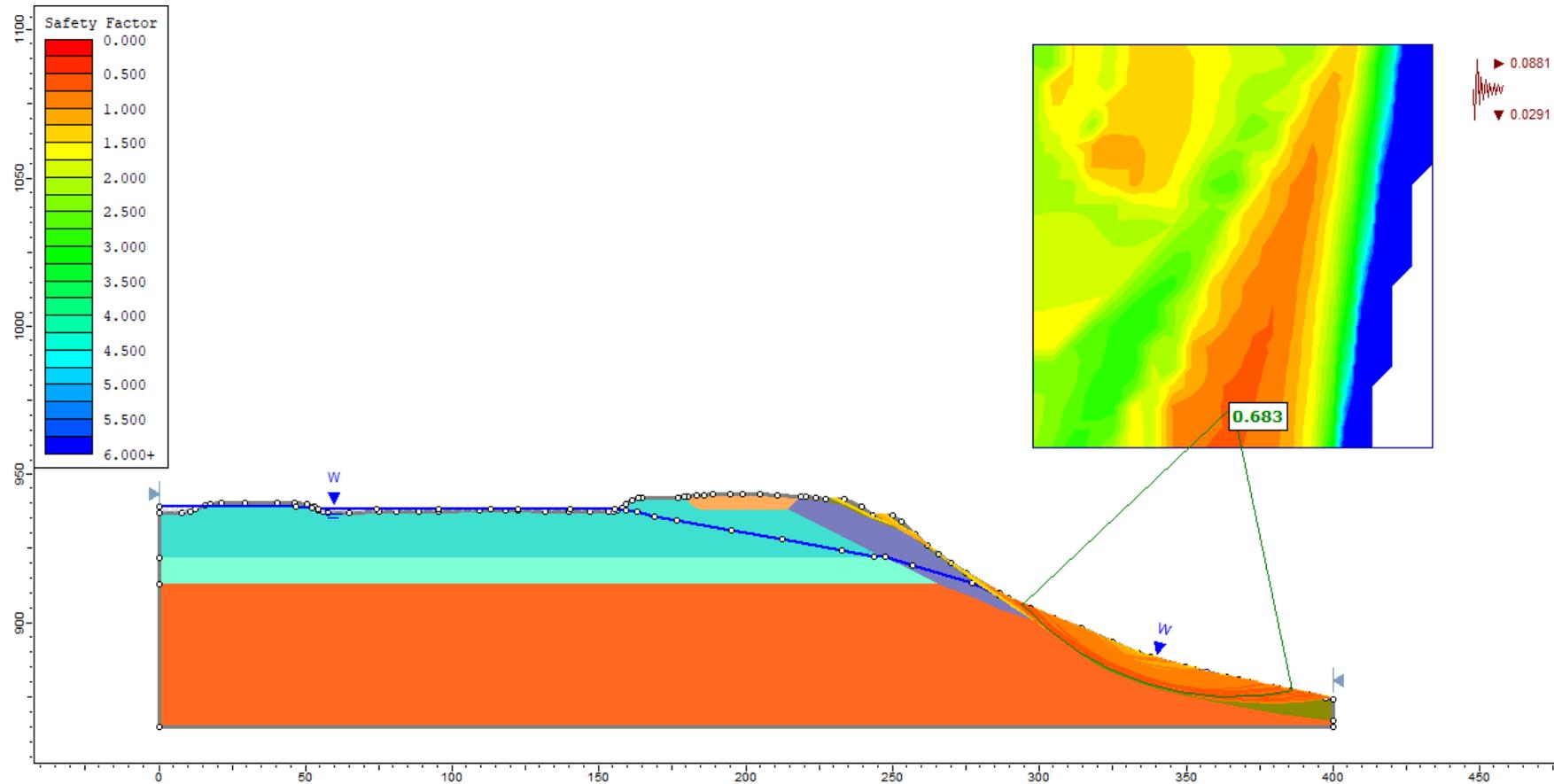


Abbildung B - 6: Profil des Osthangs der analytischen Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

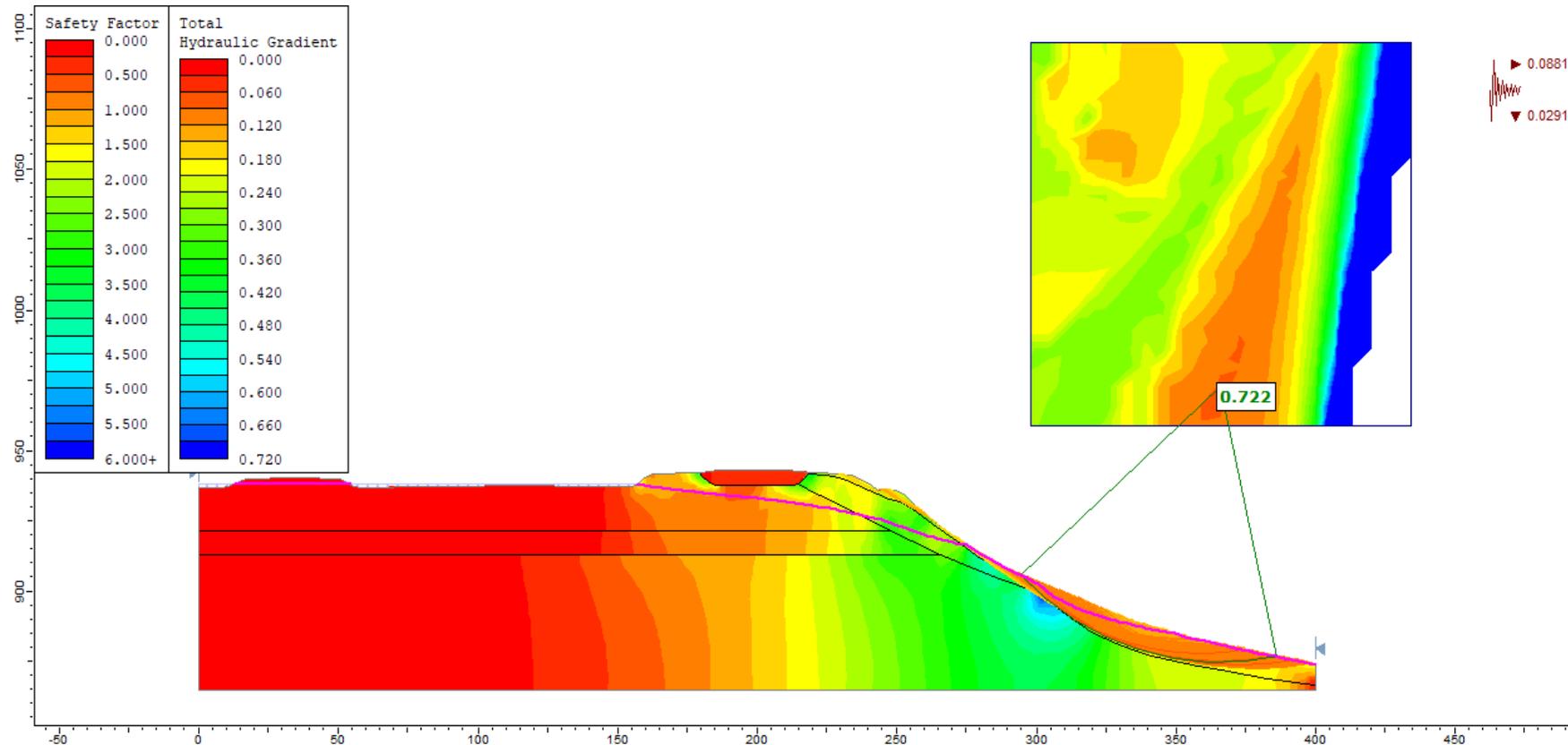


Abbildung B - 7: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

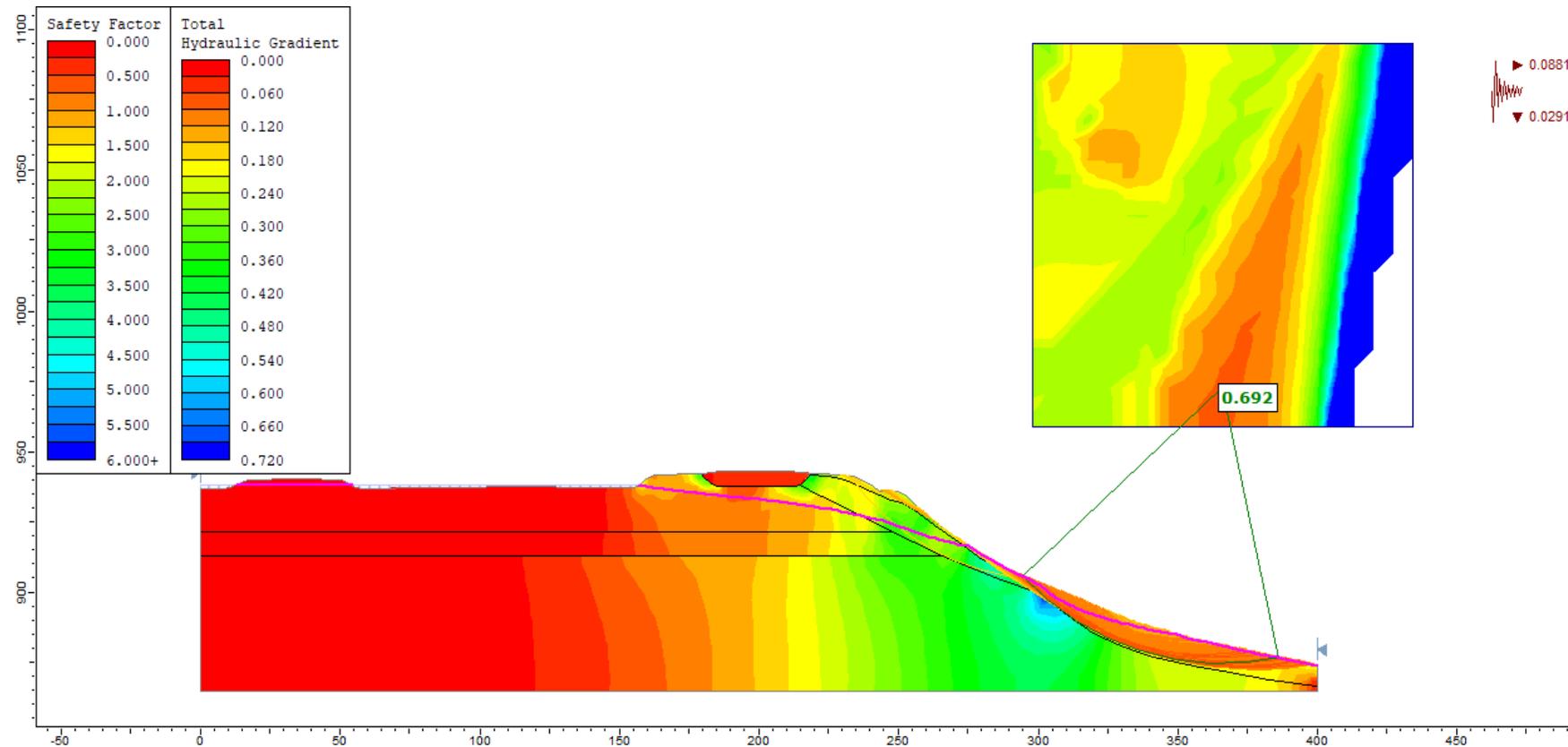


Abbildung B - 8: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

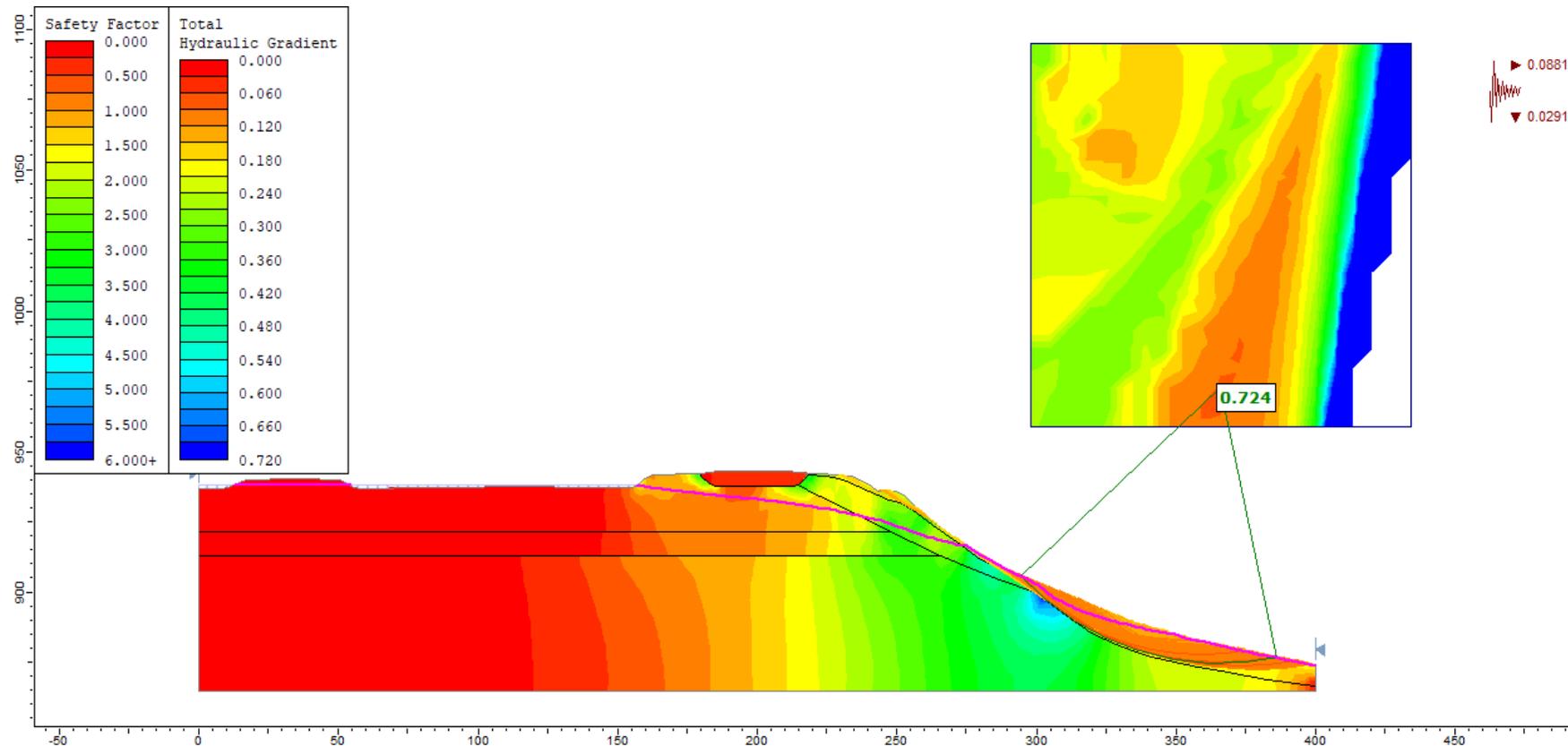


Abbildung B - 9: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei Mittelwasserstand (938,56 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
 Standsicherheit Absetzbecken

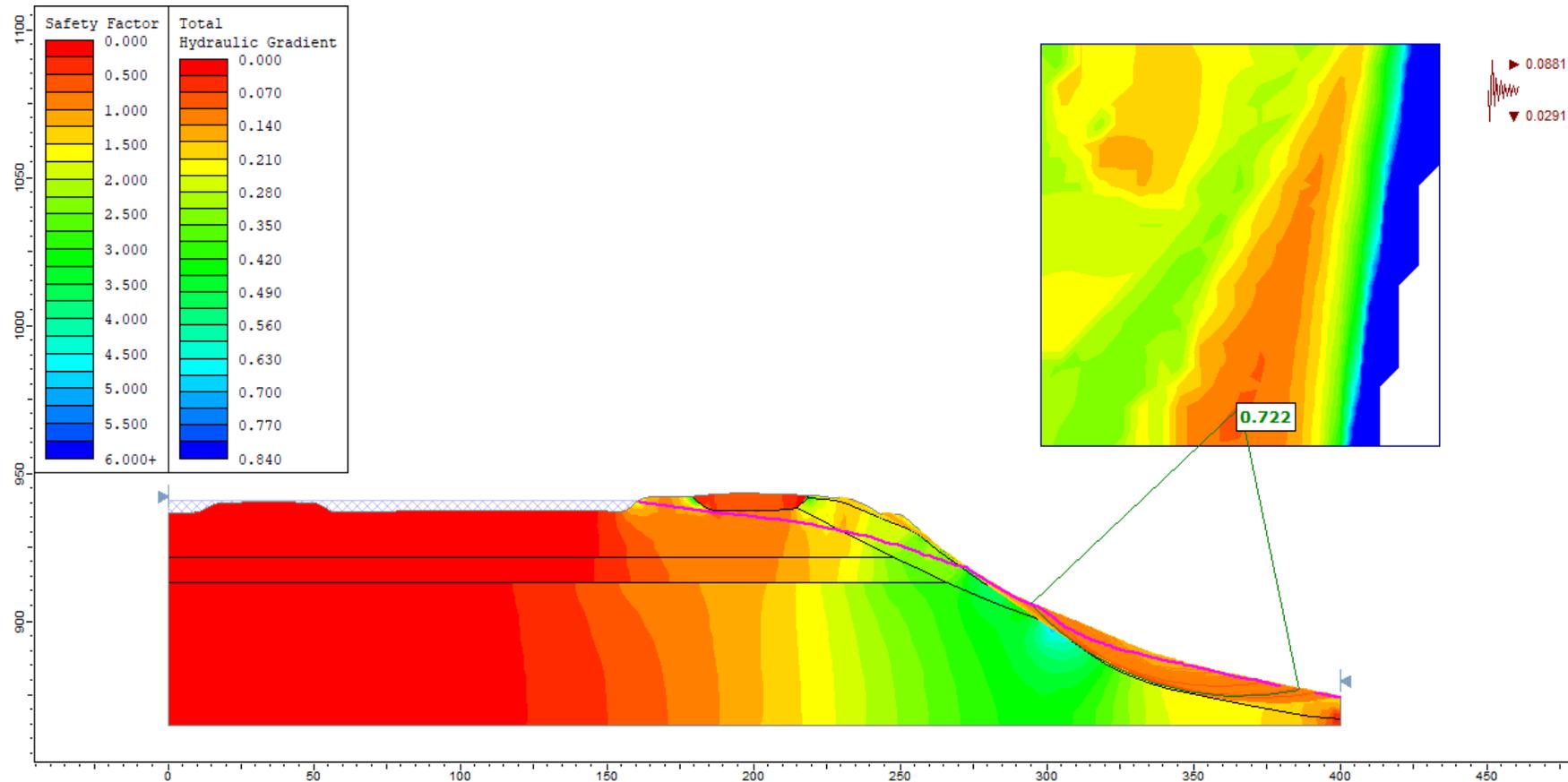


Abbildung B - 10: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigen Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

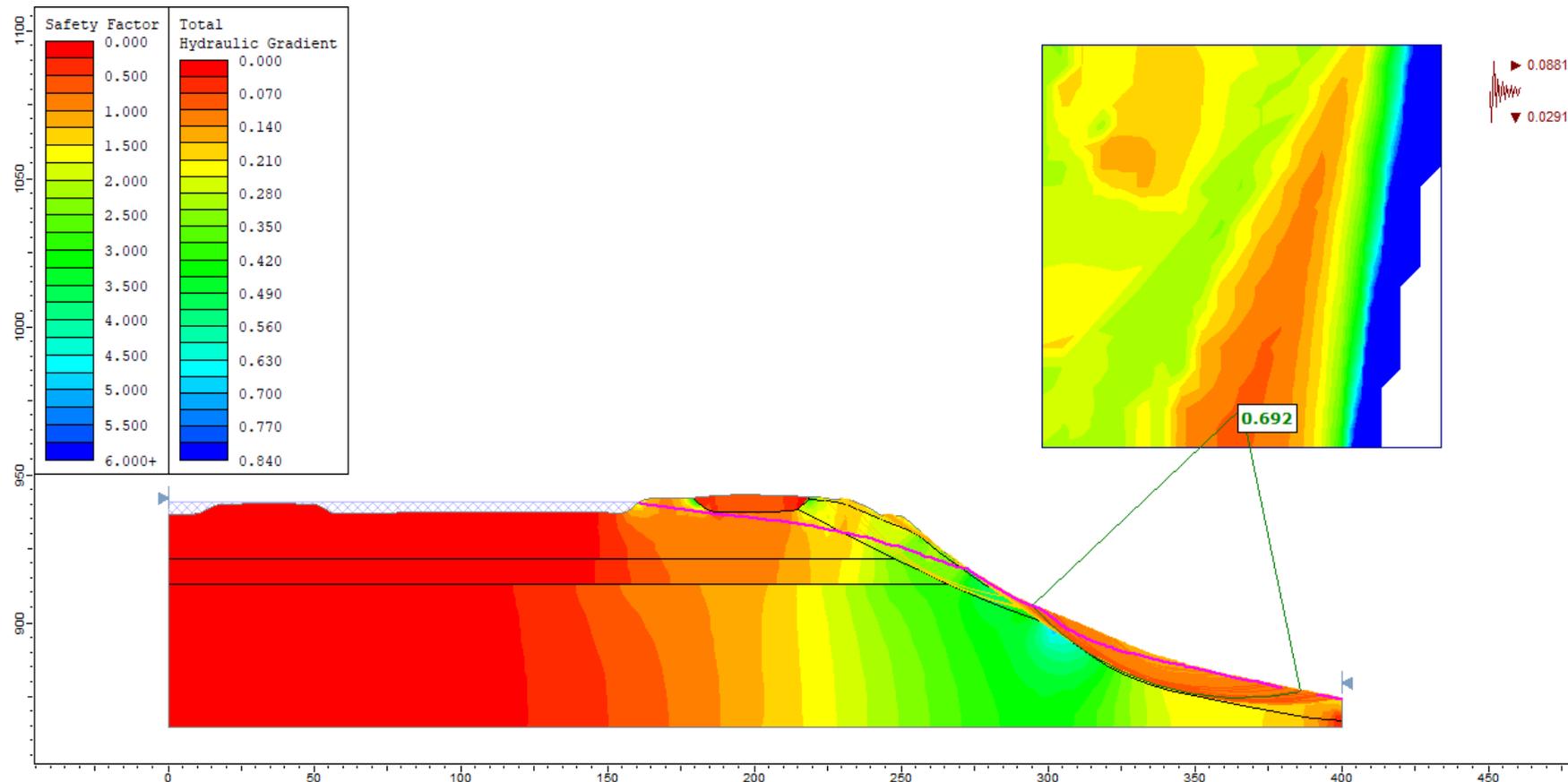


Abbildung B - 11: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigen Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

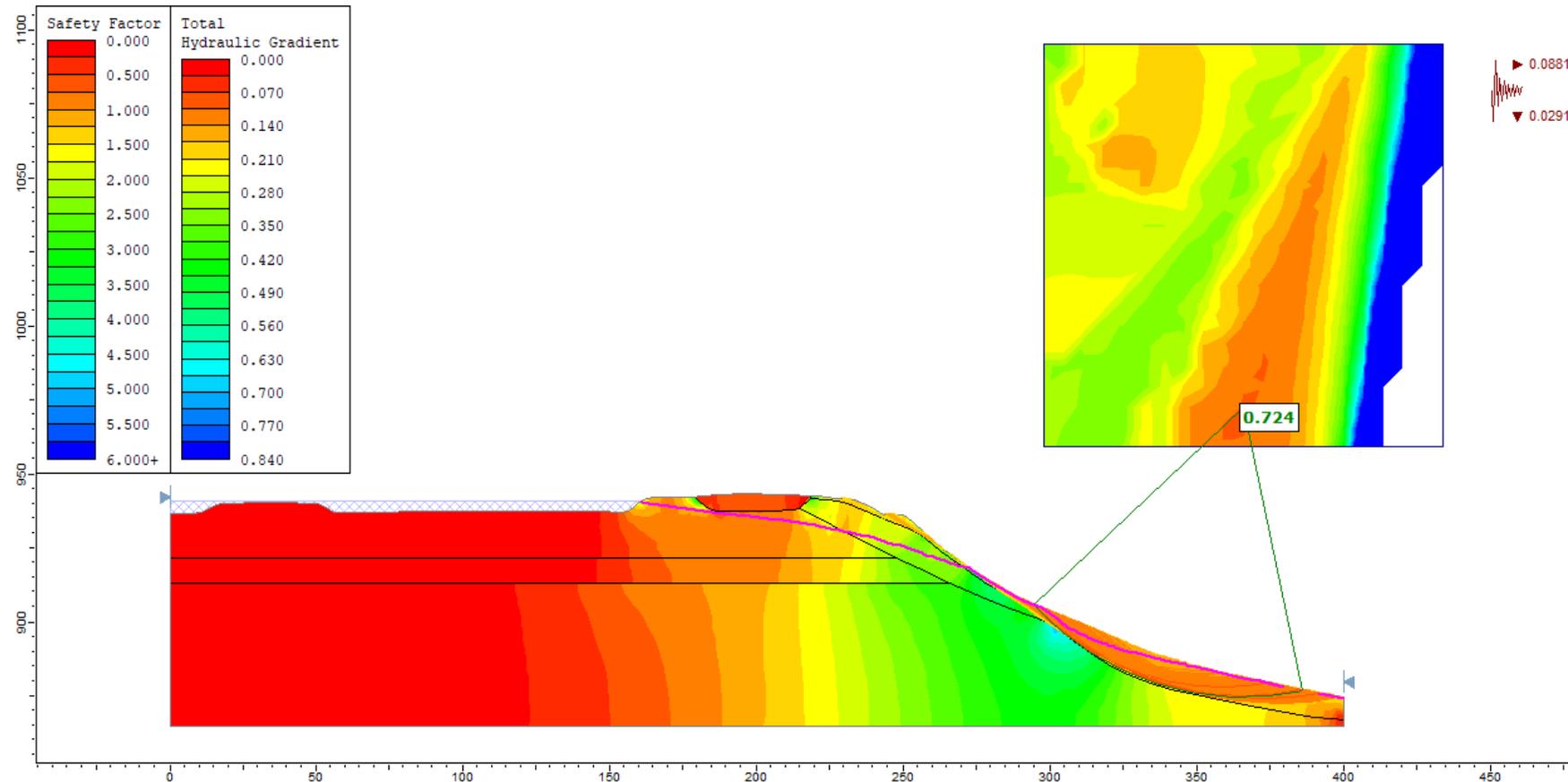


Abbildung B - 12: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigen Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie

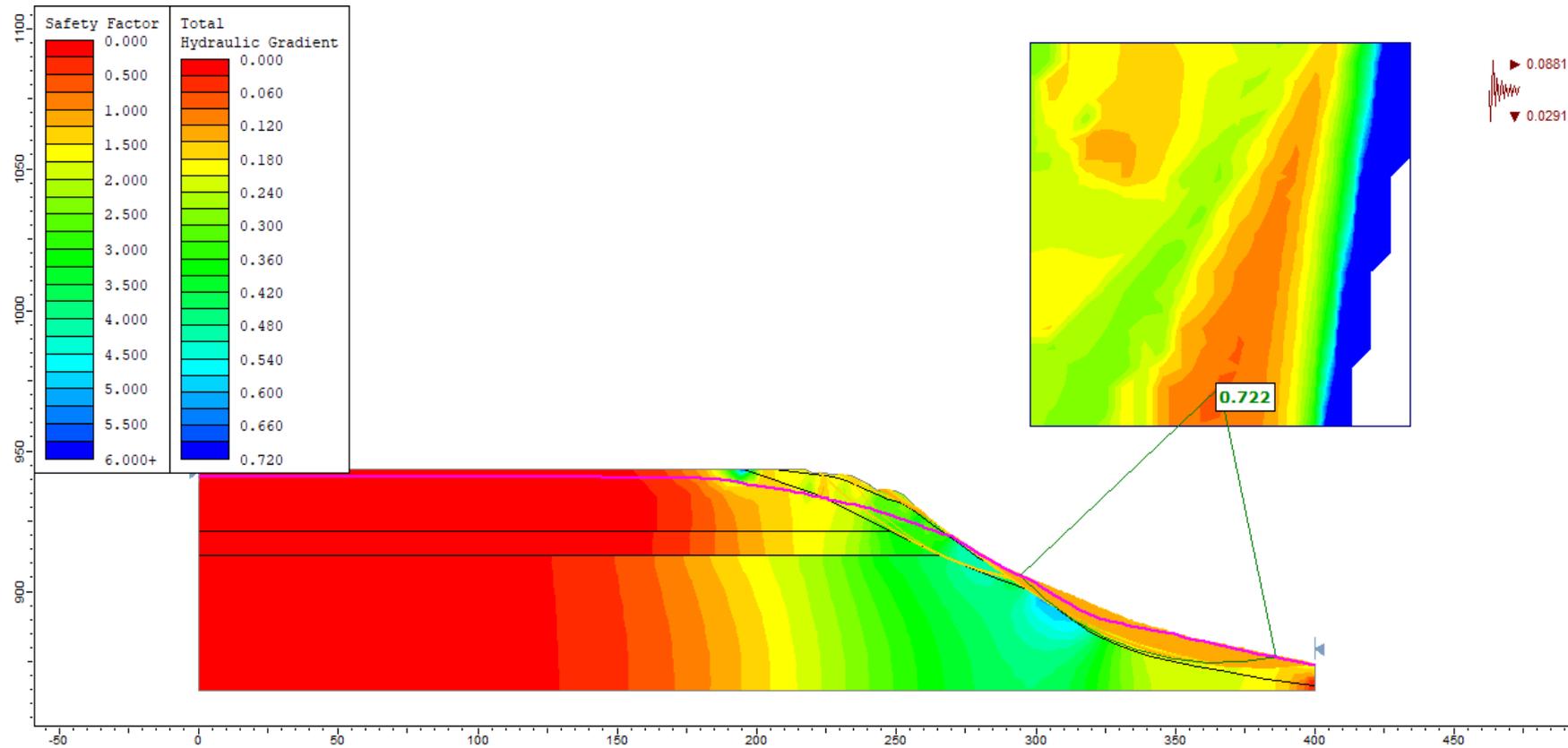


Abbildung B - 13: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) ohne Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Bishop und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, pink: berechnete Sickerlinie

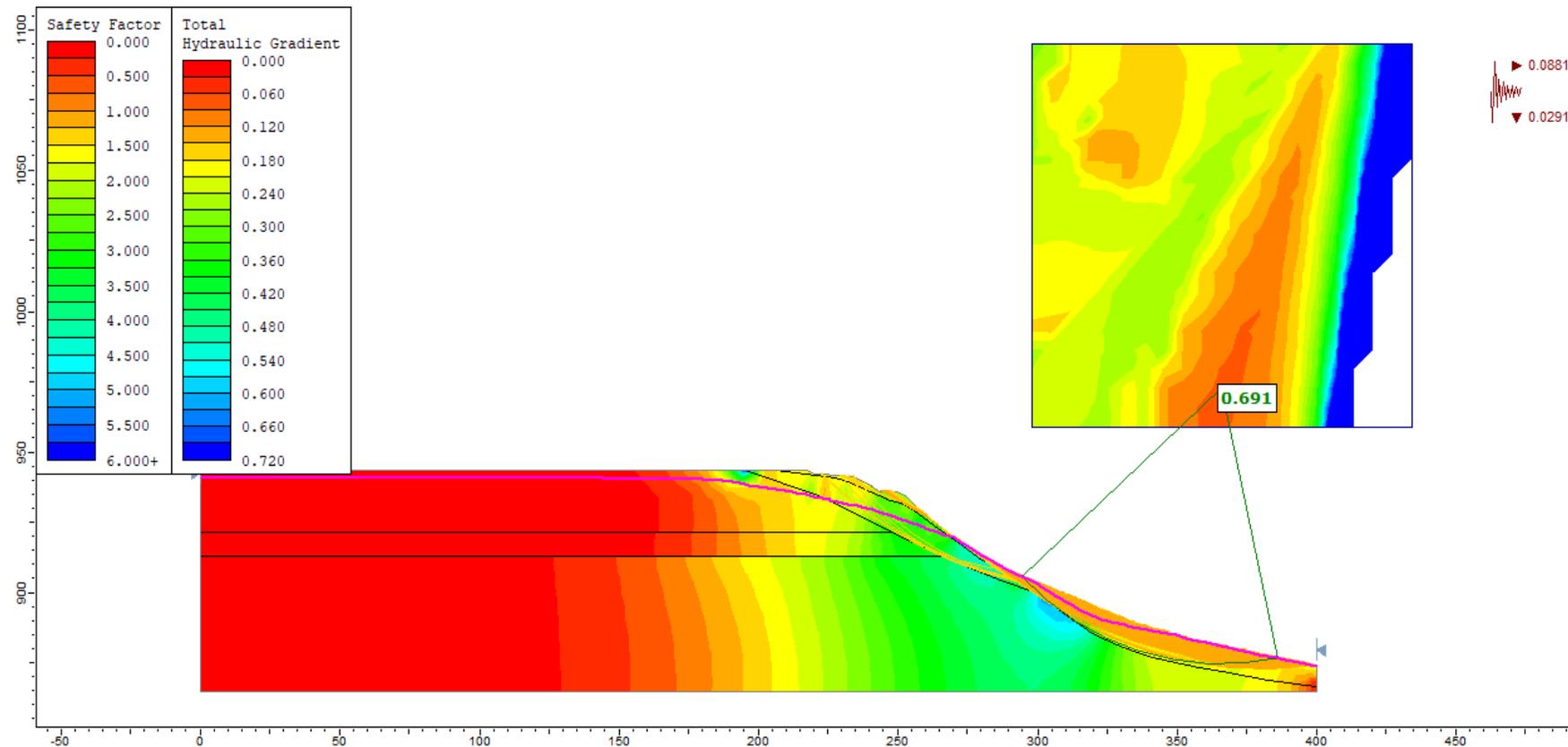


Abbildung B - 14: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) ohne Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, pink: berechnete Sickerlinie

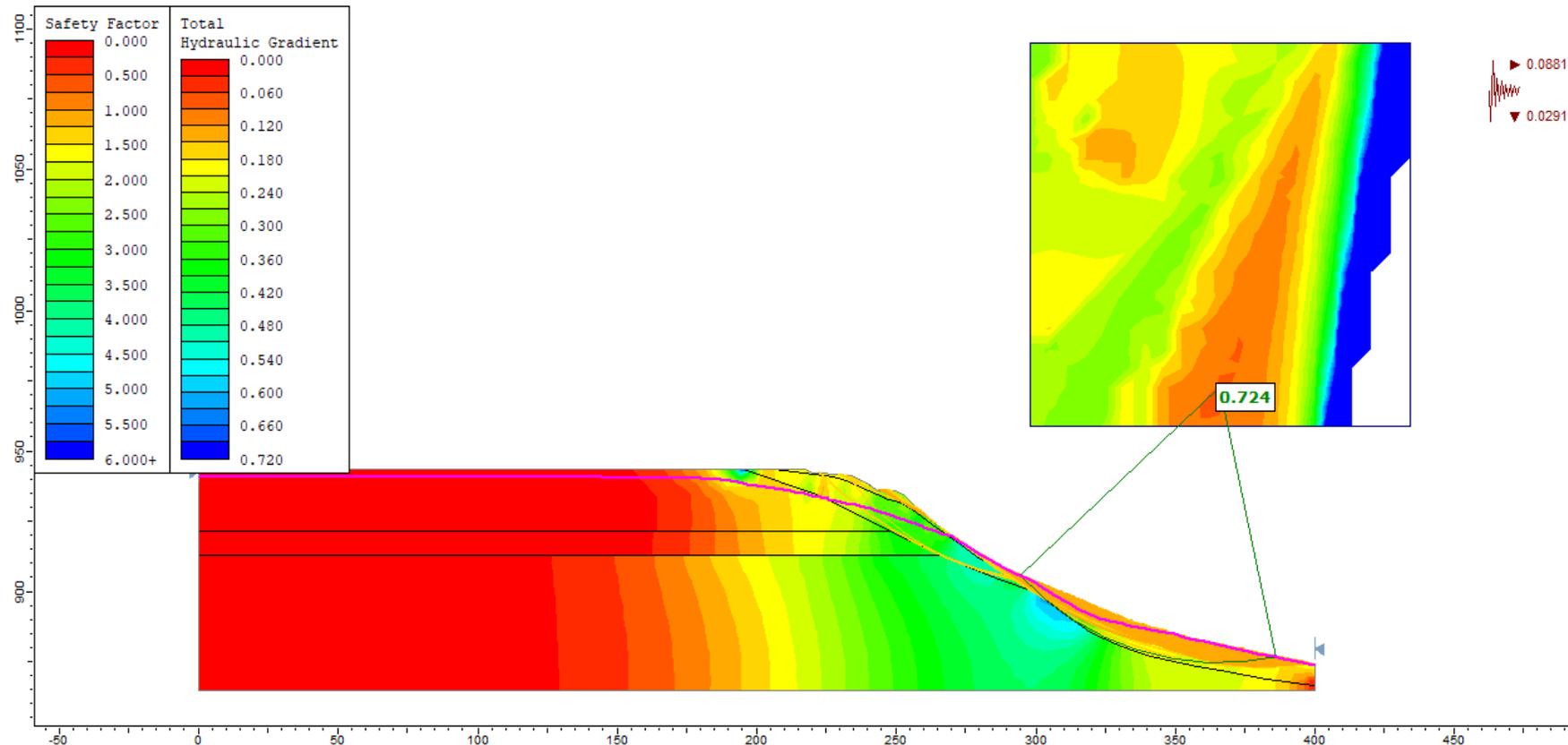


Abbildung B - 15: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei berechnetem 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) ohne Rückhaltebecken und unter seismischen Einwirkungen – Untersuchung der Standsicherheit nach Spencer und Darstellung der resultierenden hydraulischen Gradienten, pink: berechnete Sickerlinie

Steinbruch Plettenberg
Standsicherheit Absetzbecken

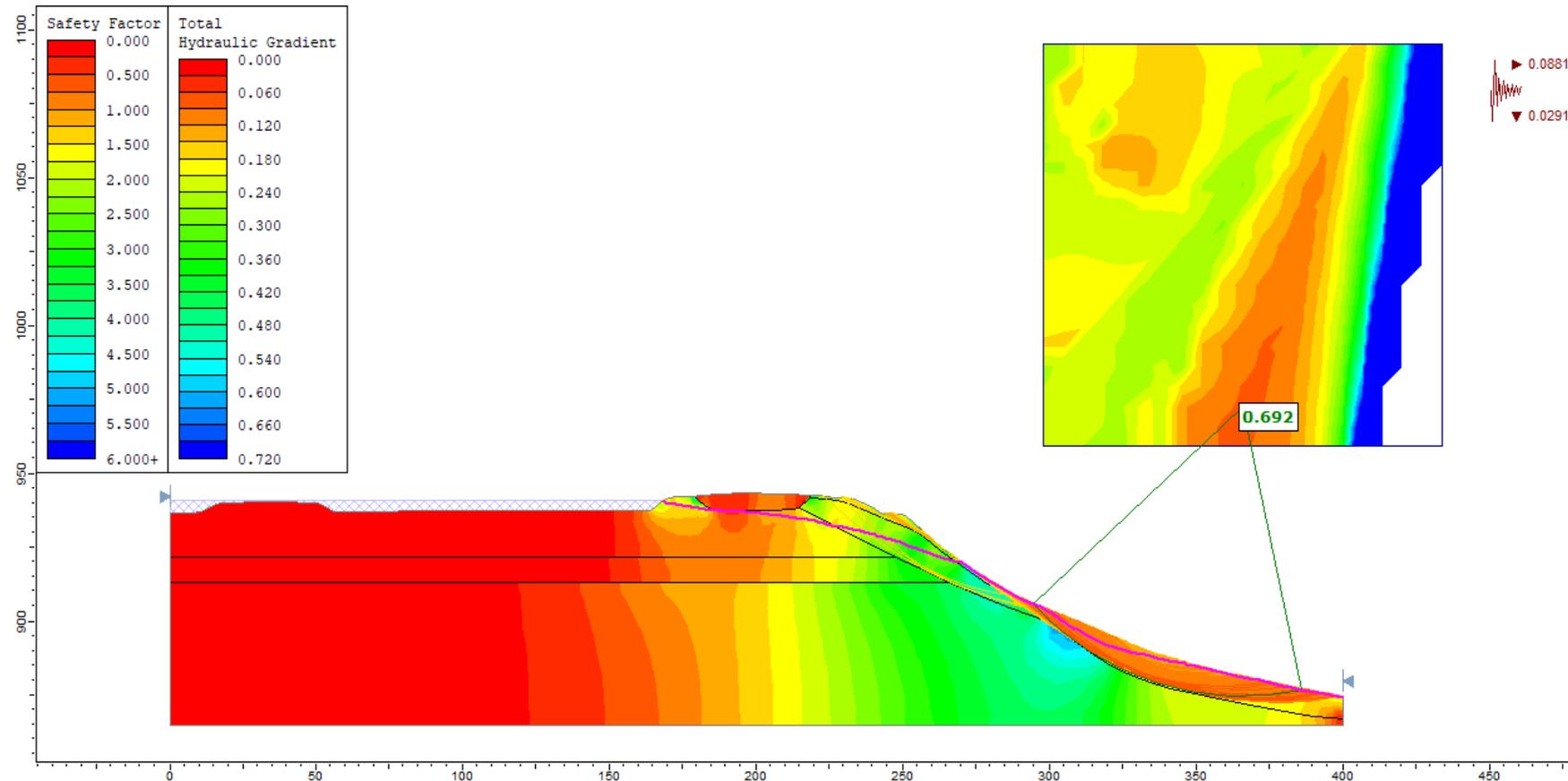


Abbildung B - 16: Profil des Osthangs der FEM-simulierten Sickerwasserlinie bei 100-jährigem Niederschlagsereignis (940,85 m NN) im Rückhaltebecken, unter seismischen Einwirkungen und mit reduzierter Mächtigkeit im Damm – Untersuchung der Standsicherheit nach Janbu und Darstellung der resultierenden, hydraulischen Gradienten, blau kariert: Wasserstand im Becken, pink: berechnete Sickerlinie