



**Zentraldeponie Sankt Augustin, IV. BA**

**Bau eines  
Oberflächenabdichtungssystems  
Standardsicherheitsbetrachtung**

**Projekt-Nr.: 102719**

**Bericht-Nr.: 03**

erstellt im Auftrag von:  
**Rhein-Sieg-Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH**  
**Pleiser Hecke 4**  
**53721 Siegburg**

Dipl.-Ing. Ulrich Klos,  
M.Sc. Tobias Bergander

**2022-05-03**

## INHALTSVERZEICHNIS

|          | Seite                                                                       |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>1</b> | <b>VERANLASSUNG .....5</b>                                                  |
| <b>2</b> | <b>UNTERLAGEN .....5</b>                                                    |
| <b>3</b> | <b>ZU BETRACHTENDE VERHÄLTNISSE UND AUFGABENSTELLUNG .....6</b>             |
| 3.1      | Aufbau der Abdichtungssysteme .....8                                        |
| 3.2      | Bodenkennwerte .....11                                                      |
| <b>4</b> | <b>BERECHNUNGEN ZUM BÖSCHUNGSBRUCH .....11</b>                              |
| 4.1      | Berechnungsschnitte .....11                                                 |
| 4.2      | Berechnungsverfahren/ -programm für den Böschungsbruchnachweis .....11      |
| 4.3      | Lastfälle und geforderter Standsicherheitskoeffizient.....12                |
| 4.4      | Lastansätze .....13                                                         |
| 4.5      | Berechnungsergebnisse zum Böschungsbruch.....15                             |
| <b>5</b> | <b>BERECHNUNGEN ZUR GLEITSICHERHEIT .....16</b>                             |
| 5.1      | Nachweisführung.....16                                                      |
| 5.2      | Scher- und Bodenparameter der zum Einsatz kommenden min. Materialien.....18 |
| 5.3      | Nachweise.....18                                                            |
| 5.3.1    | Nachweis Bemessungssituation BS-P.....18                                    |
| 5.3.1.1  | Fuge 1.....19                                                               |
| 5.3.1.2  | Fuge 2.....19                                                               |
| 5.3.1.3  | Fuge 3.....20                                                               |
| 5.3.1.4  | Fuge 4.....20                                                               |
| 5.3.2    | Nachweis Bemessungssituation BS-T .....21                                   |
| 5.3.2.1  | Fuge 3.....21                                                               |
| 5.3.3    | Nachweis Bemessungssituation BS-A.....22                                    |
| 5.3.3.1  | Fuge 3.....22                                                               |
| <b>6</b> | <b>FAZIT .....23</b>                                                        |
| <b>7</b> | <b>GÜLTIGKEIT DER VORLIEGENDEN UNTERSUCHUNGEN .....25</b>                   |

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|               | Seite                                                                         |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Abbildung 3.1 | notwendige Profilierung der vorhandenen Oberfläche ..... 6                    |
| Abbildung 3.2 | geplante Oberfläche Rekultivierungsschicht mit Schnittführung ..... 7         |
| Abbildung 3.3 | Aufbau des Dichtungssystems im BA 4.2 ..... 8                                 |
| Abbildung 3.4 | Aufbau des Dichtungssystems im BA 4.1 aus geosynthetischen Baustoffen ..... 9 |

## TABELLENVERZEICHNIS

|              | Seite                                                                                                                                    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tabelle 3-1  | Aufbau Oberflächenabdichtungssystem BA 4.2 (von oben nach unten) ..... 9                                                                 |
| Tabelle 3-2  | Aufbau Oberflächenabdichtungssystem BA 4.1 (von oben nach unten) ..... 10                                                                |
| Tabelle 3-3  | Aufbau Oberflächenabdichtungssysteme mit Kennwerten ..... 11                                                                             |
| Tabelle 4.1: | Teilsicherheiten nach [U5] ..... 13                                                                                                      |
| Tabelle 4.2: | Ausnutzungsgrade und Verweise auf Anlagen ..... 15                                                                                       |
| Tabelle 5-1  | Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge Ausgleichsschicht vs. mineralische Dichtung (Fuge 1) für Bemessungssituation BS-P ..... 19     |
| Tabelle 5-2  | Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge mineralische Dichtung vs. KDB (Fuge 2) für Bemessungssituation BS-P ..... 19                   |
| Tabelle 5-3  | Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) für Bemessungssituation BS-P ..... 20                    |
| Tabelle 5-4  | Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge Entwässerungsschicht vs. Rekultivierungsschicht (Fuge 4) für Bemessungssituation BS-P ..... 21 |
| Tabelle 5-5  | Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) für Bemessungssituation BS-T ..... 21                    |
| Tabelle 5-6  | Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) für Bemessungssituation BS-T ..... 22                    |
| Tabelle 6-1  | Tabellarische Zusammenstellung der notwendigen rechnerischen Mindestanforderungen (charakteristische Werte) ..... 23                     |

## ANLAGENVERZEICHNIS

|            |                                                          |
|------------|----------------------------------------------------------|
| Anlage 1   | Berechnungsergebnisse der Böschungsbruchuntersuchungen   |
| Anlage 1.1 | Schnitt 1 – 1 (Bishop und Janbu), Lastfall BS-P und BS-T |
| Anlage 1.2 | Schnitt 2 – 2 (Bishop und Janbu), Lastfall BS-P und BS-T |
| Anlage 1.3 | Schnitt 3 – 3 (Bishop und Janbu), Lastfall BS-P und BS-T |
| Anlage 1.4 | Schnitt 1 – 1 (Bishop und Janbu), Lastfall BS-A          |
| Anlage 1.5 | Schnitt 2 – 2 (Bishop und Janbu), Lastfall BS-A          |
| Anlage 1.6 | Schnitt 3 – 3 (Bishop und Janbu), Lastfall BS-A          |

|            |                                                        |
|------------|--------------------------------------------------------|
| Anlage 2   | Berechnungsergebnisse der Gleitsicherheitsuntersuchung |
| Anlage 2.1 | Fuge 1, BS-P                                           |
| Anlage 2.2 | Fuge 2, BS-P                                           |
| Anlage 2.3 | Fuge 3, BS-P                                           |
| Anlage 2.4 | Fuge 4, BS-P                                           |
| Anlage 2.5 | Fuge 3, BS-T                                           |
| Anlage 2.6 | Fuge 3, BS-A                                           |

## **1 VERANLASSUNG**

Die Rhein-Sieg-Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH (RSAG) betreibt im Bereich der Zentraldeponie Sankt Augustin-Niederpleis den 4. Bauabschnitt (IV. BA). Da die Setzungen inzwischen nur noch in geringem Umfang stattfinden, soll nun ein Oberflächenabdichtungssystem geplant, beantragt, ausgeschrieben und gebaut werden.

Die CDM Smith Consult GmbH erhielt den Auftrag über Planungsleistungen für die genannten Maßnahmen. Für die sichere Ausführung des Oberflächenabdichtungssystems ist eine Prognose der Standsicherheit erforderlich. In diesem Zusammenhang ist der Nachweis der geotechnisch standsicheren Ausbildung zu führen.

## **2 UNTERLAGEN**

- [U1] CDM Smith Consult GmbH, Mai 2022: Deponie St. Augustin, BA IV: Planungsunterlagen
- [U2] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) Deponieverordnung vom 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 09. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598) geändert worden ist
- [U3] DIN EN 1998-1/ NA, Januar 2011
- [U4] DIN EN 1991: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten, 12/2010
- [U5] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 (Geotechnik der Deponiebauwerke), E 2-7 Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen, Überarbeitung 08/2015, GDA online
- [U6] DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“, 12/2010
- [U7] DIN 4084: Baugrund – Geländebruchberechnungen, 01/2009
- [U8] Geologischer Dienst NRW: Ermittlung von Erdbebenlasten für Standsicherheitsberechnungen bei Abgrabungen, 18.06.2013

### 3 ZU BETRACHTENDE VERHÄLTNISSE UND AUFGABENSTELLUNG

Die Deponie wurde lokal höher als zulässig geschüttet, weil die die eingerechneten Setzungsmaße nicht wie prognostiziert eingetreten sind. Im Planungsprozess wurde eine intensive Abstimmung der notwendigen Profilierungsarbeiten vorgenommen, um die zulässigen Höhen nach Herstellung der Oberflächenabdichtung einhalten zu können. Das Ergebnis der Abstimmung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

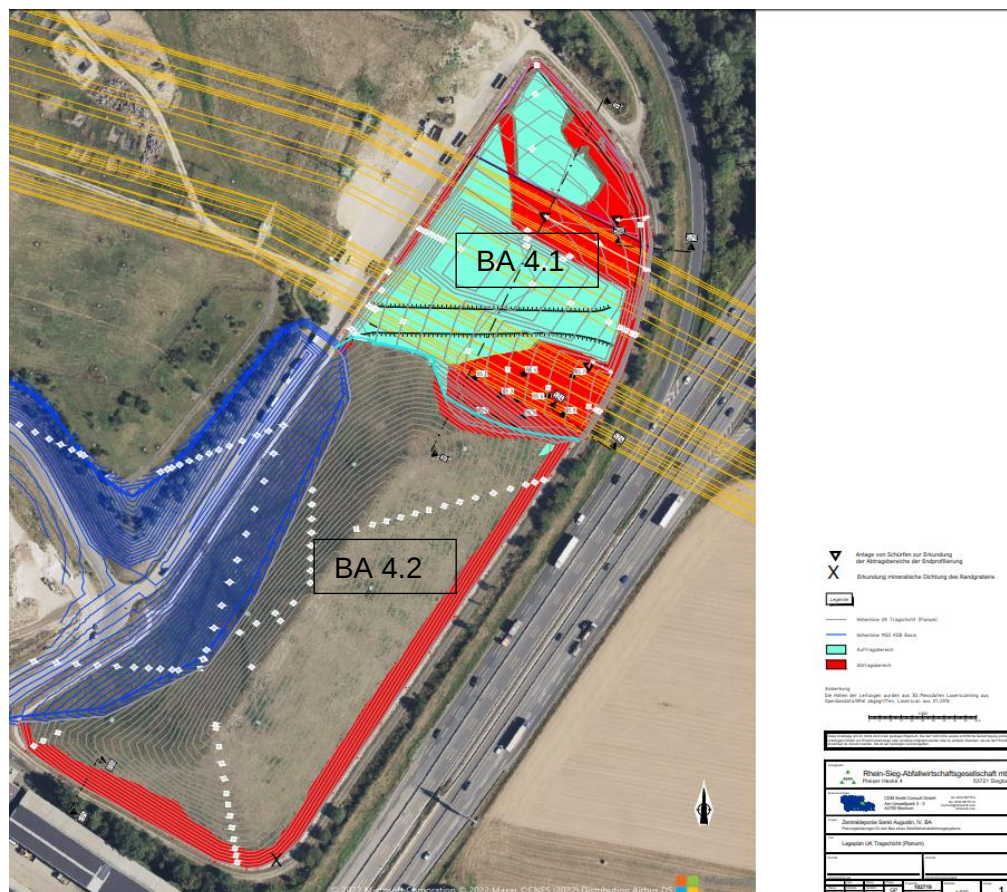


Abbildung 3.1 notwendige Profilierung der vorhandenen Oberfläche

Zur Minimierung des Sickerwasseranfalls wird ein Oberflächenabdichtungssystem gemäß Depo-  
nieverordnung (DepV, [U2]) errichtet, dessen oberste Abdichtungskomponente die Rekultivie-  
rungsschicht darstellt (s. folgende Abbildung).

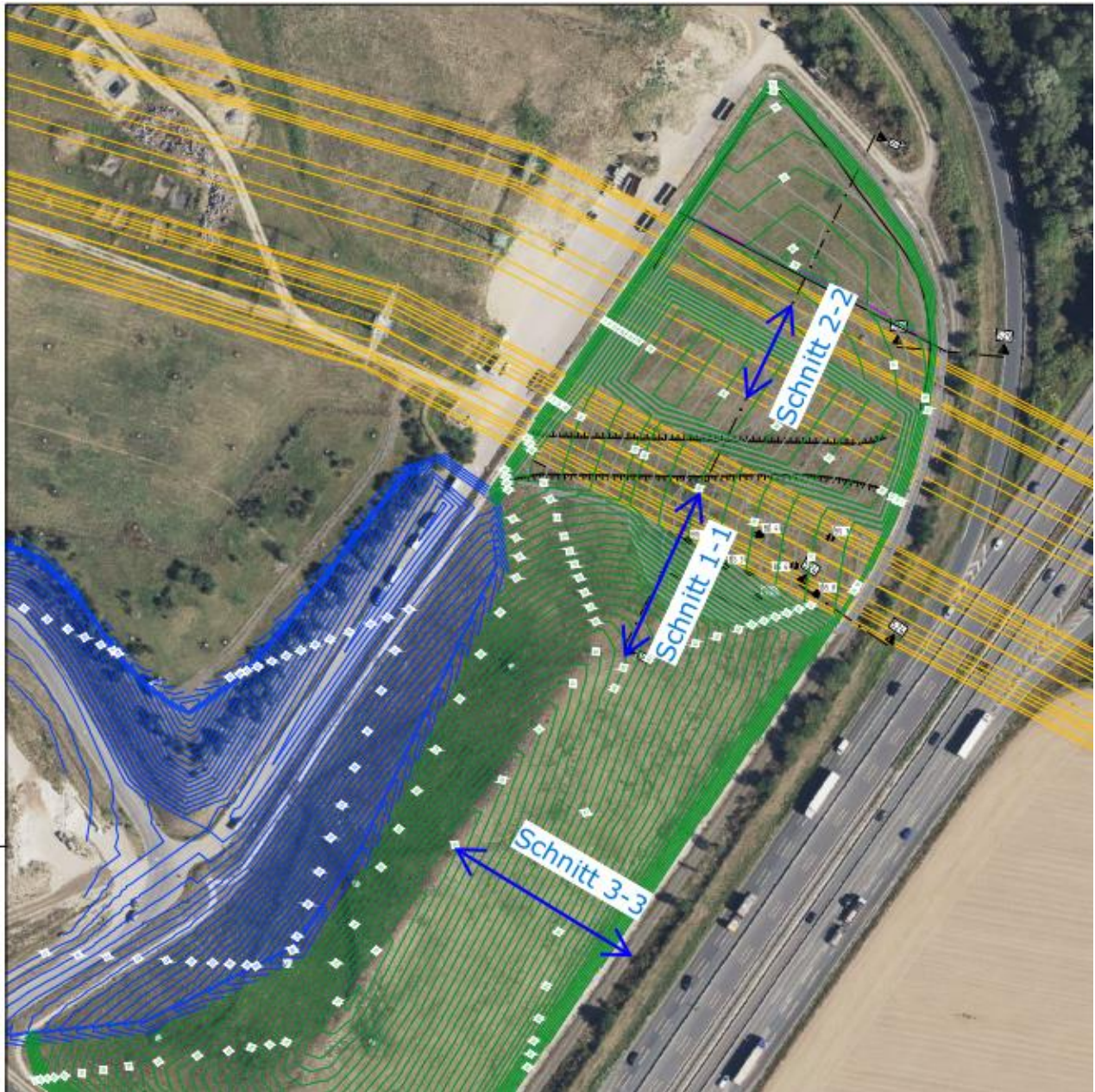


Abbildung 3.2 geplante Oberfläche Rekultivierungsschicht mit Schnittführung

Im nördlichen BA 4.1 wird ein dünneres Kombinationsdichtungssystem, im größeren südlichen BA 4.2 wird ein mächtigeres Kombinationsdichtungssystem hergestellt. Für den Schnitt 2-2 wird das System im BA 4.1, für den Schnitt 1-1 der Übergang vom dünneren auf das mächtigere System im BA 4.2 untersucht. Im Schnitt 3-3 wird die Regelausbildung und insbesondere der Übergang auf das Bestandsgelände am Böschungsfuß untersucht.

Für die Oberflächenabdichtung sind Neigungsverhältnisse zwischen 1 : 3 und 1 : 20 vorgesehen.

Die Böschungen mit der größten Neigung sind in Abbildung 3.2 mit Schnitt 1-1 und Schnitt 2-2 gekennzeichnet.

### 3.1 Aufbau der Abdichtungssysteme

Für die geotechnischen Modellschnitte wird von Systemaufbauten ausgegangen, wie sie in den folgenden Abbildungen dargestellt sind:

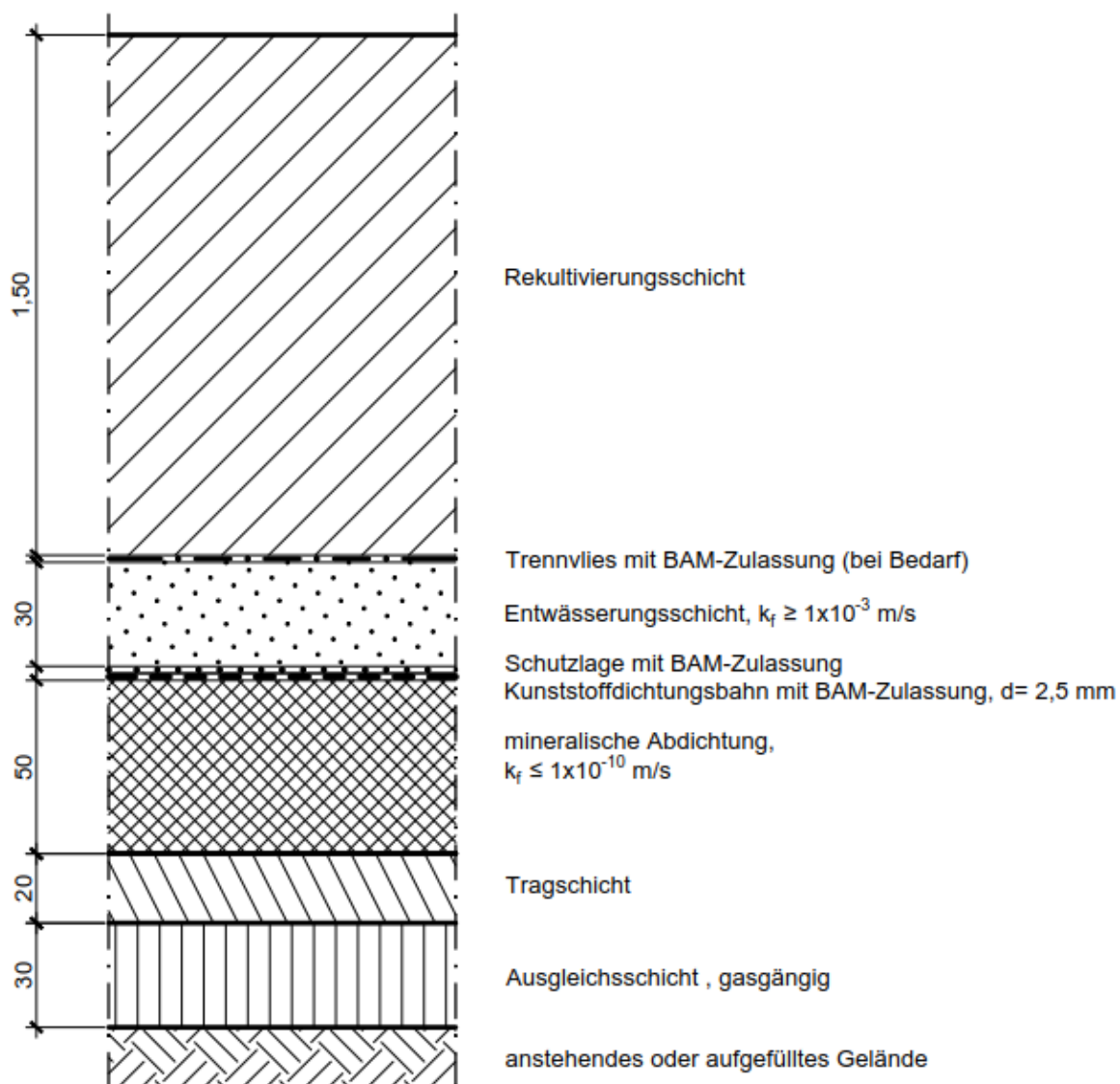


Abbildung 3.3 Aufbau des Dichtungssystems im BA 4.2

Der Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems im BA 4.2 kann gemäß [U1] wie folgt ausgeführt werden (weitere Systemkomponenten, die zum Zeitpunkt der Ausführung eine Zulassung der BAM oder eine Eignungsbeurteilung der LAGA aufweisen, bleiben vorbehalten und sind im Bedarfsfall ergänzend zu beurteilen):

Tabelle 3-1 Aufbau Oberflächenabdichtungssystem BA 4.2 (von oben nach unten)

| Funktion                                                                                       | Material**                                               | Feuchtwichte / Wichte unter Auftrieb [kN/m³] | Lagenstärke [m] |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
| <b>Rekultivierungsschicht</b>                                                                  | Bodenmaterial                                            | 18 / 10 *                                    | 1,5             |
| <b>Trennvlies (bei Bedarf)</b>                                                                 | Geotextil                                                | -                                            | -               |
| <b>Dränschicht</b>                                                                             | sandiger Kies                                            | 19 / 10 *                                    | 0,3             |
| <b>Schutzlage (bei Bedarf)</b>                                                                 | Geotextil                                                | -                                            | -               |
| <b>Kunststoffdichtungsbahn</b>                                                                 | PEHD                                                     | -                                            | 0,0025          |
| <b>Mineralische Dichtung</b>                                                                   | bindiger bis toniger Boden                               | 20 / 10 *                                    | 0,5             |
| <b>Trag- und Ausgleichsschicht (gasgängig) (im Folgenden als Ausgleichsschicht bezeichnet)</b> | Deponieersatzbaustoffe (z. B. HMVA, Schlacken, Altsande) | 19 / 10 *                                    | 0,5             |

\*Erfahrungswerte auf sicherer Seite, \*\* die Materialien haben die Eignung nach BQS/BAM/LAGA zu erfüllen

Der Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems im BA 4.1 kann gemäß [U1] wie folgt ausgeführt werden (weitere Systemkomponenten, die zum Zeitpunkt der Ausführung eine Zulassung der BAM oder eine Eignungsbeurteilung der LAGA aufweisen, bleiben vorbehalten und sind im Bedarfsfall ergänzend zu beurteilen):

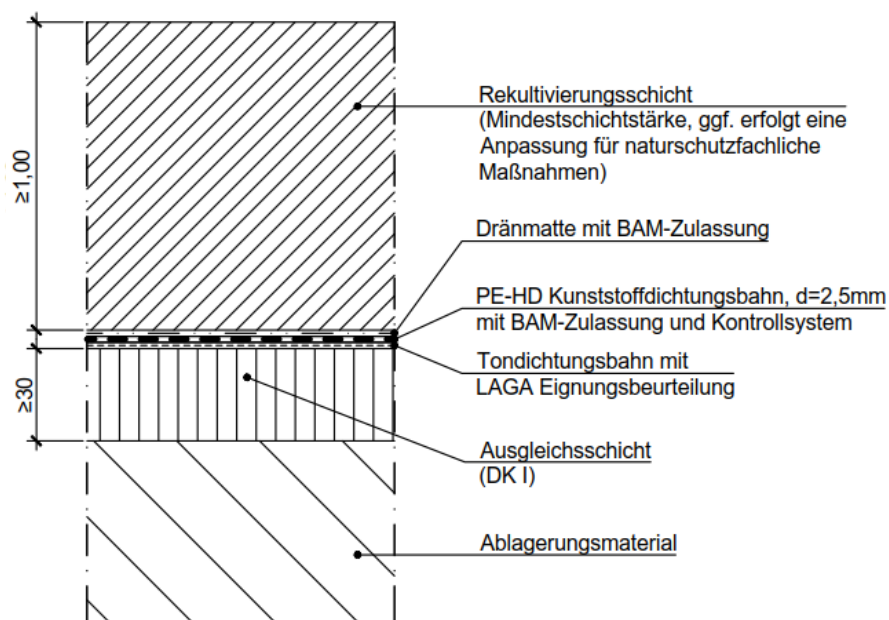


Abbildung 3.4 Aufbau des Dichtungssystems im BA 4.1 aus geosynthetischen Baustoffen

Tabelle 3-2      Aufbau Oberflächenabdichtungssystem BA 4.1 (von oben nach unten)

| Funktion                                                                                       | Material**                                               | Feuchtwichte / Wichte unter Auftrieb [kN/m³] | Lagenstärke [m] |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------|
| <b>Rekultivierungsschicht</b>                                                                  | Bodenmaterial                                            | 18 / 10 *                                    | 1,0             |
| <b>Kunststoffdränelement mit BAM-Zulassung</b>                                                 | Dränkern, Geotextilien                                   | vernachlässigbar, 1,5 kg/m²***               | 0,02 *          |
| <b>Kunststoffdichtungsbahn</b>                                                                 | PEHD                                                     | -                                            | 0,0025          |
| <b>Geosynthetische Tondichtungsbahn</b>                                                        | Trägergeotextil, Natriumbentonit, Deckgeotextil          | vernachlässigbar, < 8 kg/m²                  | 0,01***         |
| <b>Trag-, Ausgleichsschicht, gasgängig<br/>(im Folgenden als Ausgleichsschicht bezeichnet)</b> | Deponieersatzbaustoffe (z. B. HMVA, Schlacken, Altsande) | 19 / 10 *                                    | 0,3             |

\*Erfahrungswerte auf sicherer Seite, \*\* die Materialien haben die Eignung nach BQS/BAM/LAGA zu erfüllen, \*\*\*Annahme

Für die in den Tabellen 3-1 und 3-2 beschriebenen Aufbauten des Oberflächenabdichtungssystems werden im Folgenden die Standsicherheiten für die einzelnen Systemkomponenten hinsichtlich Gleiten im Bau- und Endzustand ermittelt. Der Böschungsbruch wird für das Gesamtsystem im Bau- und Endzustand sowie für den Lastfall Erdbeben ermittelt (s. Kap. 4.5). Im Rahmen der Bauausführung ist der Bauzustand mit den zum Einsatz vorgesehenen Baugeräten (Verkehrslasten) zu verifizieren.

Die in der folgenden Tabelle zusammengestellten und im Rahmen der erdstatischen Untersuchungen verwendeten Berechnungskennwerte, wurden aufgrund von Erfahrungswerten festgelegt.

### 3.2 Bodenkennwerte

Tabelle 3-3 Aufbau Oberflächenabdichtungssysteme mit Kennwerten

| Funktion                                                                                                             | Material**                                                       | Feuchtwichte /<br>Wichte unter<br>Auftrieb [kN/m³] | Lagenstärke<br>[m]                    | Reibungswinkel $\phi_K'$ [°]/<br>Kohäsion $c_K'$ [kN/m²] |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Rekultivierungsschicht                                                                                               | Bodenmaterial                                                    | 18 / 10 *                                          | 1,0 (BA 4.1),<br>bzw.<br>1,5 (BA 4.2) | 25 / 3                                                   |
| Dränschicht (BA 4.2)                                                                                                 | sandiger Kies                                                    | 19 / 10 *                                          | 0,3                                   | 32 / 0                                                   |
| Dränmatte (BA 4.1)                                                                                                   | Geokomposit                                                      |                                                    |                                       | 24 / 0                                                   |
| Kunststoffdichtungs-<br>bahn                                                                                         | HDPE-Bahnen (rau)                                                |                                                    |                                       | 24 / 0                                                   |
| mineralische Dichtung<br>(BA 4.2)                                                                                    | bindiger bis toniger<br>Boden                                    | 20 / 10 *                                          | 0,5                                   | 22 / 10                                                  |
| Bentonitmatte (BA 4.1)                                                                                               | Geokomposit                                                      |                                                    |                                       | 25,8 / 0                                                 |
| Trag-, Ausgleichs-<br>schicht, teilweise gas-<br>gängig<br>(im Folgenden als Aus-<br>gleichsschicht bezeich-<br>net) | Deponieersatzbau-<br>stoffe (z. B. HMVA,<br>Schlacken, Altsande) | 19 / 10 *                                          | 0,3 (BA 4.1),<br>bzw.<br>0,5 (BA 4.2) | 30 / 0                                                   |
| Abfallschüttung                                                                                                      | verschiedene                                                     | 19 / 10 *                                          | Deponie-<br>höhe                      | 27,5 / 2 (bindig) bzw.<br>30 / 0 (nicht bindig)          |

\*Erfahrungswerte auf sicherer Seite, \*\* die Materialien haben die Eignung nach BQS/BAM/LAGA zu erfüllen

Eine spannungsabhängige Festigkeitszunahme mit der Teufe fand in den Kennwertfestlegungen keine Berücksichtigung.

## 4 BERECHNUNGEN ZUM BÖSCHUNGSBRUCH

### 4.1 Berechnungsschnitte

Die Schnitte 1-1 bis 3-3 wurden in ihrer Geometrie und Schichtabfolge im erdstatischen Berechnungsprogramm als geotechnische Modellschnitte abgebildet.

### 4.2 Berechnungsverfahren/ -programm für den Böschungsbruchnachweis

Unter den gegebenen geometrischen und geotechnischen Bedingungen ist die Untersuchung der Standsicherheit längs kreiszylindrischer Prüfflächen maßgebend. Es kommt das Berechnungsverfahren nach KREY/BISHOP zum Einsatz. Bei dem Verfahren nach KREY/BISHOP wird ein

Versagen eines Bruchkörpers auf einer kreisförmigen Gleitfuge untersucht. Durch Veränderungen des Kreismittelpunktes und -radius wird derjenige (maßgebende) Bruchkörper ermittelt, der die geringste Sicherheit (höchsten Sicherheitsbeiwert) gegenüber einem Böschungsbruch aufweist. Hierbei ist ein Ausnutzungsgrad von  $\mu \leq 1,0$  einzuhalten. Die Ergebnisplots zeigen jeweils die Berechnungen für den maßgebenden kritischen Gleitkreis. In allen Lastfällen wurden darüber hinaus programmtechnisch sämtliche mögliche Gleitkreiskombinationen überprüft.

In Ergänzung zum Verfahren nach KREY/BISHOP wurden für die betrachteten Böschungen fest definierte Gleitkörper nach dem Janbu-Verfahren ebenfalls untersucht (siehe Anlage 18.2). Diese fest definierten Gleitkörper beinhalten die ungünstigste (niedrigste Verbund- bzw. Bodenparameter) Gleitfuge und wurden iterativ ermittelt. Hierbei ist ebenfalls ein Ausnutzungsgrad von  $\mu \leq 1,0$  einzuhalten.

Die Berechnungen wurden nach probabilistischem Konzept (Teilsicherheiten, Ausnutzungsgrade) durchgeführt. Verwendet wurde das Programm GGU-STABILITY in der Version 13.05 (Stand 2019).

#### **4.3 Lastfälle und geforderter Standsicherheitskoeffizient**

Zum Nachweis der Böschungsbruchsicherheit (s. Kap. 4.5) wurden die Berechnungen gemäß DIN 1054, 2010-12 bzw. Eurocode EC 7, DIN 1997 für die Bemessungssituation BS-P (permanent), d. h. für den Endzustand ausgeführt. Die Bemessungssituationen BS-T (transient/ vorübergehend/ Bauzustand) wird beim Nachweis der Gleitsicherheit (s. Kap. 5) herangezogen. Die Bemessungssituation BS-A (accidental/ außergewöhnliches Ereignis/ Erdbebeneinwirkung) wurde ergänzend untersucht, da der Standort in einem durch Erdbeben beeinflusstem Gebiet gemäß [U3] liegt.

Folgende Teilsicherheiten gemäß [U5] werden berücksichtigt.

Tabelle 4.1: Teilsicherheiten nach [U5]

| Teilsicherheitsbeiwerte                                                                                                                           |                                         | Bemessungssituationen |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|------|------|
|                                                                                                                                                   |                                         | BS-P                  | BS-T | BS-A |
| Ständige Einwirkungen                                                                                                                             | $\gamma_G$                              | 1,00                  | 1,00 | 1,00 |
| Ungünstige veränderliche Einwirkungen                                                                                                             | $\gamma_Q$                              | 1,30                  | 1,20 | 1,00 |
| Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ in der dränierten Scherfuge und Reibungsbeiwert $\tan \delta$ in Scherfugen mit geosynthetischen Reibungspartnern | $\gamma_{\varphi}$<br>$\gamma_{\delta}$ | 1,25                  | 1,15 | 1,10 |
| Kohäsion in der dränierten Scherfuge und Adhäsion in Scherfugen mit geosynthetischen Reibungspartnern                                             | $\gamma_c$<br>$\gamma_a$                | 1,25                  | 1,15 | 1,10 |

Bemessungssituation BS-P: ständige Bemessungssituation, ständige sowie während der Funktionszeit des Bauwerkes regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkungen, z.B. Einstau der Entwässerungsschicht

Bemessungssituation BS-T: vorübergehende Bemessungssituation, zeitlich begrenzte Zustände oder planmäßig einmalig auftretende Einwirkungen

Bemessungssituation BS-A: außergewöhnliche Bemessungssituation, z. B. standortspezifische Schneelast, Teileinstau Rekultivierungsschicht, Erdbeben

#### 4.4 Lastansätze

Eine Stützung durch den Böschungsfuß wird, auf der sicheren Seite liegend, nicht berücksichtigt.

Eine Sickerlinie wurde aufgrund der Dränwirkung der vorhandenen Entwässerungsschicht (Dränschicht) nicht berücksichtigt. Eine Porenwasserdrucklinie wurde nicht berücksichtigt, da der Aufbau oberhalb der Dichtung betrachtet wird.

#### BS-P

Die Berechnung erfolgt für den Endzustand der Deponie, das heißt für die Situation mit endgültig hergestellter Oberflächenabdichtung. Für diesen Zustand sind folgende Bedingungen maßgebend.

- Verkehrslasten, hydraulische Lasten und Schneelasten sind nicht gleichzeitig zu berücksichtigen
- dynamische Lasten aus dem Baubetrieb sind nicht gleichzeitig zu berücksichtigen

## BS-T

Die Berechnung erfolgt für den Lastfall BS-T (Bauzustand) für die Geometrie des Endzustandes unter zusätzlicher Berücksichtigung von Verkehrslasten auf der Böschungskrone. Die Verkehrslast wurde mit  $p_v = 16,7 \text{ kN/m}^2$  berücksichtigt, welches der Ersatzlast für einen SLW 30 entspricht.

## BS-A

Die Erdbebenzone 1 umfasst Gebiete, denen ein Intensitätsintervall von 6,5 bis 7,0 zugeordnet ist. Der zugehörige Bemessungswert der Bodenbeschleunigung  $a_g$  beträgt hier  $0,4 \text{ m/s}^2$ .

Entsprechend dem Baugrundaufbau im lokalen Projektgebiet erfolgt eine Zuordnung in die Baugrundklasse C. Diese Einstufung gilt auch bei der Lage in einer ehemaligen Auskiesung, da diese vergleichbare Baugrundeigenschaften aufweist. Der Deponiestandort wird der Bedeutungsklasse II und der Untergrundklasse T zugewiesen. Auf dieser Grundlage werden gemäß DIN EN 1998-1/NA die folgenden Kennwerte gewählt:

- Bedeutungsbeiwert  $\gamma_I = 1,0$  (Tabelle NA.6)
- Untergrundparameter  $S = 1,25$  (Tabelle NA.4)

Der Einhängewert bestimmt sich somit zu:

$$a_g * S * \gamma_I = 0,4 * 1,25 * 1,0 = 0,5 \text{ m/s}^2.$$

Der Maximalwert der Bodenbeschleunigung  $a_{\max}$  lässt sich nach [U10] unter Ansatz eines Faktors  $1/0,7$  wie folgt abschätzen:

$$a_{\max} = a_g / 0,7 = 0,714 \text{ m/s}^2.$$

Um dem Aspekt Rechnung zu tragen, dass es sich in der Realität um dynamische Einwirkungen handelt, ist die Maximalbeschleunigung  $a_{\max}$  in einer statischen Berechnung abzumindern. Gemäß HYNES-GRIFFIN und FRANKLIN [U10] kann diese Abminderung der Beschleunigung durch Multiplikation mit dem Faktor 0,5 erfolgen. Der Rechenwert  $a_h$  ergibt sich damit zu

$$a_h = 0,714 * 0,5 = 0,357 \text{ m/s}^2.$$

Gemäß DIN 4149 kann die vertikale Bodenbeschleunigung  $a_v$  mit dem Faktor 0,7 der horizontalen Bodenbeschleunigung berücksichtigt werden:

$$a_v = 0,357 * 0,7 = 0,250 \text{ m/s}^2.$$

Die Rechenwerte der Bodenbeschleunigung  $k_h$  und  $k_v$  für die Standsicherheitsberechnungen betragen somit bei Verwendung des Programmsystems der Fa. GGU als Anteil der Erdbeschleunigung  $g$  ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ):

$$k_h = a_h/g = 0,357/9,81 = 0,0364$$

$$k_v = a_v/g = 0,250/9,81 = 0,0255.$$

#### 4.5 Berechnungsergebnisse zum Böschungsbruch

Für den geplanten Zustand wurden jeweils unter den untersuchten geotechnischen Randbedingungen Ausnutzungsgrade von  $\mu_{\max} = 0,72 - 0,95$  ( $\leq \mu_{\text{zul}} = 1,0$ ) berechnet, siehe Anlagen 1 und 2. Die Böschungen sind damit unter den beschriebenen Umständen dauerhaft standsicher.

Tabelle 4.2: Ausnutzungsgrade und Verweise auf Anlagen

| Böschungsneigung                      | Schnitt 1-1               |                         | Schnitt 2-2               |                         | Schnitt 3-3               |                         |
|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                                       | Kreisförmige Gleitflächen | Polygonale Gleitflächen | Kreisförmige Gleitflächen | Polygonale Gleitflächen | Kreisförmige Gleitflächen | Polygonale Gleitflächen |
| Lastfall BS-P und BS-T<br>(s. Anlage) | 0,93<br>(A 1.1.1)         | 0,75<br>(A 1.1.2)       | 0,95<br>(A 1.2.1)         | 0,95<br>(A 1.2.2)       | 0,85<br>(A 1.3.1)         | 0,72<br>(A 1.3.2)       |
| Lastfall BS-A<br>(s. Anlage)          | 0,92<br>(A 1.4.1)         | 0,76<br>(A 1.4.2)       | 0,84<br>(A 1.5.1)         | 0,84<br>(A 1.5.2)       | 0,75<br>(A 1.6.1)         | 0,63<br>(A 1.6.2)       |

## 5 BERECHNUNGEN ZUR GLEITSICHERHEIT

### 5.1 Nachweisführung

Zur Gewährleistung der Standsicherheit ist grundsätzlich jede einzelne Systemschicht und jede Grenzfläche (Kontaktfläche) zwischen den einzelnen Komponenten des mehrschichtigen Systems zu betrachten.

Allen Nachweisen der Standsicherheit gegen Gleiten ist der Grenzzustand GEO-3 nach DIN 1054 [U1] zugrunde zu legen. Die charakteristischen Werte der Scherfestigkeit sind dabei mit dem entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert für Widerstände in Bemessungswerte der Scherfestigkeit umzurechnen. Bei der Berechnung der Standsicherheit nach DIN 4084 wird eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen eingehalten, wenn die Bedingung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0$$

mit

$E_d$  Resultierende der Einwirkungen

$R_d$  Resultierende der Widerstände

erfüllt ist. Alle Größen bezeichnen dabei Bemessungswerte.

Die Gleichung lässt sich umformen zu:

$$\mu = \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + P \cdot \gamma_Q + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br}}{(\sum G \cdot l + P + S_K \cdot l) \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi'_D + C'_D \cdot l} \quad (1)$$

mit

$G$  Gewichtskraft des betrachteten Böschungsabschnittes [KN/m<sup>2</sup>]

$P$  Verkehrslast auf dem betrachteten Böschungsabschnitt [KN/m<sup>2</sup>]

$\beta$  Böschungsneigung [°]

$\varphi'_K$  charakteristischer Wert des wirksamen Reibungswinkels [°]

$\varphi'_D$  Bemessungswert des wirksamen Reibungswinkels [°],  $\tan \varphi'_D = \tan \varphi'_K / \gamma_\varphi$

$C'_K$  charakteristischer Wert der wirksamen Kohäsion/Adhäsion [KN/m<sup>2</sup>]

$C'_D$  Bemessungswert der wirksamen Kohäsion/Adhäsion [KN/m<sup>2</sup>],  $C'_D = C'_K / \gamma_C$

$l$  Länge des Böschungsabschnittes [m]

$S_W$  Strömungskraft [KN/m<sup>2</sup>]

$F_{Br}$  Schubkraft aus dynamischer Belastung [KN/m]

$S_K$  charakteristischer Wert der Schneelast [KN/m<sup>2</sup>] nach DIN EN 1991 [U4],  
Kreis Olpe = Schneelastzone 2, für  $H = 500\text{m}$  ist  $s_k = 1,6 \text{ KN/m}^2$

$\gamma_\varphi$  Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungsbeiwert  $\varphi$ , Grenzzustand GEO-3

$\gamma_C$  Teilsicherheitsbeiwert für Kohäsion im Grenzzustand GEO-3

$\gamma_G$  Teilsicherheitsbeiwert für ständige Beanspruchungen im Grenzzustand GEO-3

$\gamma_Q$  Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen im Grenzzustand GEO-3

wobei

$$S_w = \gamma_w \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta \quad (2)$$

mit

$\gamma_w$  Wichte des Wassers

$d$  Einstauhöhe in der Entwässerungsschicht

$\gamma_Q$  Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen im Grenzzustand GEO-3

und

$$F_{Br} = (G_r/g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u \quad (3)$$

mit

$G_r$  Gewichtskraft maßgebliches Baugerät

$g$  Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$a_v$  Bremsverzögerung, hier zu 1/1,6 = 0,625 m/s<sup>2</sup> angesetzt

$\gamma_Q$  Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen im Grenzzustand GEO-3

$A_u$  Aufstandsfläche in der zu betrachtenden Gleitfuge

gilt.

Die Berechnungen sind grundsätzlich nach den Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" – GDA [U5] im Bau- und Endzustand für die einzelnen System-schichten (sog. "inneren" Gleitsicherheiten) und die Fugen (Kontaktflächen) der Systemschichten durchzuführen.

Bei Verwendung eines lamellenfreien Verfahrens sind nach DIN 1054 [U1] ebenfalls die in Tabelle 4.1 zusammengestellten Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen definiert.

Eine Schneelast wird in Abhängigkeit von der Schneelastzone und der Geländehöhe nach DIN EN 1991 angesetzt, da sie als regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkung bewertet wird.

Eine Strömungskraft wird mit einer mittleren Einstauhöhe von  $d = 0,15$  m in der Entwässerungsschicht berücksichtigt.

Die Bemessungswerte werden aus den projektspezifischen Randbedingungen durch Rückwärtsrechnung als Sollwert für die eignungsgeprüften und zum Einsatz vorgesehenen Baustoffe bestimmt, indem in Gleichung (1) der Ausnutzungsgrad  $\mu = 1,0$  gesetzt und die Gleichung nach dem charakteristischen Wert für den wirksamen Reibungswinkel  $\phi'_k$  aufgelöst wird.

## **5.2 Scher- und Bodenparameter der zum Einsatz kommenden min. Materialien**

Unter Beachtung des vorgegebenen Aufbaus des Oberflächenabdichtungssystems (vgl. Tabelle 3-1, bzw. Tabelle 3-2) werden in den Gleitfugen Ausgleichsschicht vs. mineralische Dichtung (Fuge 1), mineralische Dichtung vs. Kunststoffdichtungsbahn (Fuge 2), Kunststoffdichtungsbahn vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) und Entwässerungsschicht vs. Rekultivierungsschicht (Fuge 4) im Folgenden die Scherparameter berechnet, die zur Einhaltung der Gleitsicherheit erforderlich sind, bzw. ob die in Tabelle 3-3 genannten Ansätze ausreichend sind.

Die in den Gleitfugen errechneten Scherparameter sind durch objektbezogene Scherversuche bzw. durch gesicherte Literaturwerte an den tatsächlich zum Einsatz kommenden Abdichtungselementen zu prüfen.

## **5.3 Nachweise**

Die Oberflächenabdichtungssysteme werden mit einer maximalen Böschungsneigung von  $\leq 1:3$  ausgeführt, deren Gleitsicherheit im Rahmen dieses Berichtes nachgewiesen wird.

Die für die Bemessungssituation BS-P (Endzustand) ermittelten Scherparameter sind unabhängig von der betrachteten Böschungslänge. Für die Bemessungssituation BS-T (Bauzustand) wird auf der sicheren Seite eine minimale Böschungslänge von 10 m berücksichtigt. Mit zunehmender Böschungslänge verringern sich die Einflüsse der Verkehrslasten und somit auch die erforderlichen Scherparameter.

Die Nachweise werden für den Aufbau des Abdichtungssystems des BA 4.2 geführt, da dort die vergleichsweise größeren Schichtdicken zu größeren Beanspruchungen führen. Der Nachweis für das dünnere Abdichtungssystem im BA 4.1 ist damit ebenfalls geführt.

Im Folgenden werden die charakteristischen Scherparameter ermittelt, die erforderlich sind, um die Gleitsicherheit der Oberflächenabdichtung in den 4 Scherfugen zu gewährleisten.

### **5.3.1 Nachweis Bemessungssituation BS-P**

Die maßgeblichen Eingangswerte und Berechnungsformeln sind der Anlage 2 zu entnehmen.

Für die Bemessungssituation BS-P wird der Endzustand untersucht. In den Berechnungen wird keine Verkehrslast  $P$  und somit auch keine Schubkraft aus dynamischer Belastung  $F_{Br}$  berücksichtigt. Eine Schneelast wird in Abhängigkeit von der Schneelastzone und der Geländehöhe

nach DIN EN 1991 angesetzt, da sie als regelmäßig auftretende veränderliche Einwirkung bewertet wird.

Eine Strömungskraft wird bei Bedarf mit einer mittleren Einstauhöhe von  $d = 0,15$  m in der Entwässerungsschicht berücksichtigt.

### 5.3.1.1 Fuge 1

Gemäß den in Anlage 2.1 beigefügten Berechnungen ergeben sich in der Gleitfuge Ausgleichsschicht vs. mineralische Dichtung (Fuge 1) die in nachfolgender Tabelle 5-1 zusammengestellten Scherparameter.

Tabelle 5-1 Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge Ausgleichsschicht vs. mineralische Dichtung (Fuge 1) für Bemessungssituation BS-P

| Endzustand                | Höhe Überbau [m]* | Ansatz Strömungskraft | Ansatz Schneelast | Reibungswinkel $\phi'_k$ [°] | Kohäsion/Adhäsion $C'_k$ [KN/m²] | zugehörige Anlage |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| OK Rekultivierungsschicht | 2,42              | nein                  | ja                | 22,7                         | 0,0                              | 2.1.1             |
|                           |                   |                       |                   | 20,2                         | 2,0                              | 2.1.2             |

\*: senkrechter Abstand OK Rekultivierungsschicht zu Gleitfuge

Für die Gleitfuge Ausgleichsschicht vs. mineralische Dichtung (Fuge 1) ergeben sich somit gemäß Tabelle 5-1 die folgenden maßgeblichen Scherparameter für den Endzustand:

erf.  $\phi'_k \geq 22,7^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C'_k$  (charakteristischer Wert)  $\geq 0,0$  KN/m² bzw.

erf.  $\phi'_k \geq 20,2^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C'_k$  (charakteristischer Wert)  $\geq 2,0$  KN/m².

### 5.3.1.2 Fuge 2

Gemäß den in Anlage 2.2 beigefügten Berechnungen ergeben sich in der Gleitfuge mineralische Dichtung vs. KDB (Fuge 2) die in nachfolgender Tabelle zusammengestellten Scherparameter.

Tabelle 5-2 Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge mineralische Dichtung vs. KDB (Fuge 2) für Bemessungssituation BS-P

| Endzustand                | Höhe Überbau [m]* | Ansatz Strömungskraft | Ansatz Schneelast | Reibungswinkel $\phi'_k$ [°] | Kohäsion/Adhäsion $C'_k$ [KN/m²] | zugehörige Anlage |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| OK Rekultivierungsschicht | 1,90              | nein                  | ja                | 22,7                         | 0,0                              | 2.2.1             |
|                           |                   |                       |                   | 19,7                         | 2,0                              | 2.2.2             |

\*: senkrechter Abstand OK Rekultivierungsschicht zu Gleitfuge

Für die Gleitfuge mineralische Dichtung vs. KDB (Fuge 2) ergeben sich somit gemäß Tabelle 5-2 die folgenden maßgeblichen Scherparameter für den Endzustand:

erf.  $\varphi_K' \geq 22,7^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 0,0$  KN/m<sup>2</sup> bzw.

erf.  $\varphi_K' \geq 19,7^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 2,0$  KN/m<sup>2</sup>.

Die Kohäsion ist als Adhäsionsbeiwert im Versuch nachzuweisen.

### 5.3.1.3 Fuge 3

Gemäß den in Anlage 2.3 beigefügten Berechnungen ergeben sich in der Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) die in nachfolgender Tabelle zusammengestellten Scherparameter.

Tabelle 5-3 Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) für Bemessungssituation BS-P

| Endzustand                | Höhe Überbau [m]* | Ansatz Strömungskraft | Ansatz Schneelast | Reibungswinkel $\varphi_K'$ [°] | Kohäsion/Adhäsion $C_K'$ [KN/m <sup>2</sup> ] | zugehörige Anlage |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|
| OK Rekultivierungsschicht | 1,33              | ja                    | ja                | 23,9                            | 0,0                                           | 2.3.1             |
|                           |                   |                       |                   | 20,6                            | 2,0                                           | 2.3.2             |

\*: senkrechter Abstand OK Rekultivierungsschicht zu Gleitfuge

Für die Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) ergeben sich somit gemäß Tabelle 5-3 die folgenden maßgeblichen Scherparameter für den Endzustand:

erf.  $\varphi_K' \geq 23,9^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 0,0$  KN/m<sup>2</sup> bzw.

erf.  $\varphi_K' \geq 20,6^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 2,0$  KN/m<sup>2</sup>.

Die Kohäsion ist als Adhäsionsbeiwert im Versuch nachzuweisen.

### 5.3.1.4 Fuge 4

Gemäß den in Anlage 2.4 beigefügten Berechnungen ergeben sich in der Gleitfuge Entwässerungsschicht vs. Rekultivierungsschicht (Fuge 4) die in nachfolgender Tabelle zusammengestellten Scherparameter.

Tabelle 5-4 Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge Entwässerungsschicht vs. Rekultivierungsschicht (Fuge 4) für Bemessungssituation BS-P

| Endzustand                | Höhe Überbau [m]* | Ansatz Strömungskraft | Ansatz Schneelast | Reibungswinkel $\phi'_k$ [°] | Kohäsion/Adhäsion $C'_k$ [KN/m²] | zugehörige Anlage |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| OK Rekultivierungsschicht | 1,58              | ja**                  | ja                | 24,2                         | 0,0                              | 2.4.1             |
|                           |                   |                       |                   | 20,3                         | 2,0                              | 2.4.2             |

\*: senkrechter Abstand OK Rekultivierungsschicht zu Gleitfuge

\*\* : unterhalb betrachteter Fuge

Für die Gleitfuge Entwässerungsschicht vs. Rekultivierungsschicht (Fuge 3) ergeben sich somit gemäß der vorigen Tabelle die folgenden maßgeblichen Scherparameter für den Endzustand:

erf.  $\phi'_k \geq 24,2^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C'_k$  (charakteristischer Wert)  $\geq 0,0$  KN/m² bzw.

erf.  $\phi'_k \geq 20,3^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C'_k$  (charakteristischer Wert)  $\geq 2,0$  KN/m².

### 5.3.2 Nachweis Bemessungssituation BS-T

Die maßgeblichen Eingangswerte und Berechnungsformeln sind der Anlage 2.5 zu entnehmen.

Für die Bemessungssituation BS-T wird der Bauzustand für die maßgebliche Fuge 3 untersucht. In den Berechnungen wird eine Verkehrslast P und somit eine Schubkraft aus dynamischer Belastung  $F_{Br}$  berücksichtigt. Eine Schneelast wird nicht angesetzt, da die Baudurchführung nicht im Winter stattfindet. Eine Strömungskraft in der Entwässerungsschicht wird nicht berücksichtigt, da dieser Fall nicht gleichzeitig erfolgt.

#### 5.3.2.1 Fuge 3

Gemäß den in Anlage 2.5 beigefügten Berechnungen ergeben sich in der Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) die in nachfolgender Tabelle 5-6 zusammengestellten Scherparameter.

Tabelle 5-5 Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) für Bemessungssituation BS-T

| Endzustand                | Höhe Überbau [m]* | Ansatz Strömungskraft | Ansatz Schneelast | Reibungswinkel $\phi'_k$ [°] | Kohäsion/Adhäsion $C'_k$ [KN/m²] | zugehörige Anlage |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| OK Rekultivierungsschicht | 2,42              | nein                  | ja                | 24,1                         | 0,0                              | 2.5.1             |
|                           |                   |                       |                   | 15,1                         | 2,0                              | 2.5.2             |

\*: senkrechter Abstand OK Rekultivierungsschicht zu Gleitfuge

Für die Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) ergeben sich somit gemäß Tabelle 5-5 die folgenden maßgeblichen Scherparameter für den Endzustand:

erf.  $\varphi_K' \geq 24,1^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 0,0$  KN/m<sup>2</sup> bzw.

erf.  $\varphi_K' \geq 15,1^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 2,0$  KN/m<sup>2</sup>.

### 5.3.3 Nachweis Bemessungssituation BS-A

Die maßgeblichen Eingangswerte und Berechnungsformeln sind der Anlage 2.6 zu entnehmen.

Für die Bemessungssituation BS-A wird der Endzustand für die Situation eines Erdbebens untersucht. In den Berechnungen wird anstelle einer Bremslast die Erdbebenlast und somit eine Schubkraft aus dynamischer Belastung für die maßgebliche Fuge 3 berücksichtigt. Eine Strömungskraft in der Entwässerungsschicht wird mit einer Einstauhöhe von 0,15 m berücksichtigt. Alle anderen Lasten werden für den Fall vernachlässigt, da sie nicht gleichzeitig erfolgen.

#### 5.3.3.1 Fuge 3

Gemäß den in Anlage 2.6 beigefügten Berechnungen ergeben sich in der Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) die in nachfolgender Tabelle 5-6 zusammengestellten Scherparameter.

Tabelle 5-6 Zusammenstellung Scherparameter Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) für Bemessungssituation BS-T

| Endzustand                | Höhe Überbau [m]* | Ansatz Strömungskraft | Ansatz Schneelast | Reibungswinkel $\varphi_K'$ [°] | Kohäsion/Adhäsion $C_K'$ [KN/m <sup>2</sup> ] | zugehörige Anlage |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|
| OK Rekultivierungsschicht | 1,97              | nein                  | ja                | 23,6                            | 0,0                                           | 2.6.1             |
|                           |                   |                       |                   | 20,3                            | 2,0                                           | 2.6.2             |

\*: senkrechter Abstand OK Rekultivierungsschicht zu Gleitfuge

Für die Gleitfuge KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3) ergeben sich somit gemäß Tabelle 5-6 die folgenden maßgeblichen Scherparameter für den Endzustand:

erf.  $\varphi_K' \geq 23,6^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 0,0$  KN/m<sup>2</sup> bzw.

erf.  $\varphi_K' \geq 20,3^\circ$  (charakteristischer Wert) und erf.  $C_K'$  (charakteristischer Wert)  $\geq 2,0$  KN/m<sup>2</sup>.

## 6 FAZIT

Im Rahmen der vorstehenden Böschungsbruch- und Gleitsicherheitsberechnungen wurde die Bemessungssituationen BS-P, BS-T und BS-A des Oberflächenabdichtungssystems für maßgebliche Kontaktfugen betrachtet.

Die aus den Berechnungen ermittelten erforderlichen charakteristischen Werte für den wirksamen Reibungswinkel  $\varphi'_k$  bzw. die wirksame Kohäsion/Adhäsion  $C'_k$  in den Kontaktfugen sind auf die angrenzende Ausgleichsschicht, die Abdichtungskomponenten, die Entwässerungsschicht und die Rekultivierungsschicht zu übertragen.

Somit ergeben sich zur Einhaltung der Anforderungen an die Böschungsbruch- und Gleitsicherheit die folgenden Scherparameter gemäß nachfolgender Tabelle 6-1:

Tabelle 6-1 Tabellarische Zusammenstellung der notwendigen rechnerischen Mindestanforderungen (charakteristische Werte)

| Scherfugen                                                       | Reibungswinkel<br>$\varphi'_k$ [°] | Kohäsion/ Adhäsion<br>$C'_k$ [KN/m²] | Bodenkennwerte aus<br>Bodenkennwerte<br>Tabelle 3-3 | Kennwerte<br>ausrei-<br>chend? |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Rekultivierungsschicht                                           | 24,2                               | 2                                    | 25,0/3                                              | ja                             |
| Entwässerungsschicht<br>vs. Rekultivierungs-<br>schicht (Fuge 4) | 24,2<br>20,3                       | 0<br>2                               |                                                     | ja                             |
| Entwässerungsschicht                                             |                                    |                                      | 32,0/0                                              | ja                             |
| KDB vs. Entwässerungsschicht (Fuge 3)                            | 24,1<br>20,6                       | 0<br>2                               |                                                     | ja                             |
| Mineralische Dichtung<br>vs. KDB (Fuge 2)                        | 22,7<br>19,7                       | 0<br>2                               |                                                     | ja                             |
| Mineralische Dichtung                                            |                                    |                                      | 22,0/10                                             | ja                             |
| Ausgleichsschicht vs.<br>mineralische Dichtung<br>(Fuge 1)       | 22,7<br>20,2                       | 0<br>2                               |                                                     | ja                             |
| Abfall                                                           |                                    |                                      | 30,0/0                                              | ja                             |

Die Mindestanforderungen an die Scherparameter gemäß Tabelle 6-1 werden von den berücksichtigten Bodenkennwerten gemäß Tabelle 3-3 sicher eingehalten.

Im Rahmen der Bauausführung ist der Bauzustand mit den zum Einsatz vorgesehenen Baugeräten (Verkehrslasten) zu verifizieren.

Die errechneten Scherparameter sind durch objektbezogene Scherversuche im Rahmen der Erstellung von Eignungsprüfungen an den tatsächlich zum Einsatz kommenden mineralischen Materialien und Geokunststoffen zu prüfen.

Im noch zu erstellenden Qualitätsmanagementplan werden die Mindestanforderungen an die Scherparameter aufgenommen. Die Einhaltung der Mindestanforderungen wird im Rahmen der vorzulegenden Eignungsprüfungen durch die Fremdprüfung überprüft.

Im Rahmen der Bauausführung ist die Standsicherheit mit den zum Einsatz kommenden Baustoffen (mineralische Materialien und Geokunststoffe) und vorgesehenen Baugeräten (Verkehrslasten) nachzuweisen.

## 7 GÜLTIGKEIT DER VORLIEGENDEN UNTERSUCHUNGEN

Die Untersuchungsergebnisse in dieser Bearbeitung besitzen Gültigkeit für die konkreten geotechnischen / hydrogeologischen Verhältnisse und geometrischen Randbedingungen der geplanten Deponie St. Augustin.

Die Aussagen besitzen Gültigkeit, sofern:

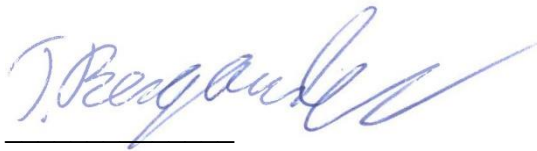
- der berücksichtigte Kenntnisstand bzgl. der hydrologischen und geotechnischen Verhältnisse weiterhin aktuell ist,
- sich die Zusammensetzung der Abfälle nicht wesentlich ändert.

Sämtliche Aussagen beziehen sich auf die für diese Bearbeitung zur Verfügung gestellten Vermessungs- und Planungsdaten der bestehenden und geplanten Böschungskontur. Die Richtigkeit der zur Verfügung gestellten Unterlagen wird vorausgesetzt. Die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen sind beim Vorliegen neuer Erkenntnisse im Rahmen einer Fortschreibung zu prüfen.

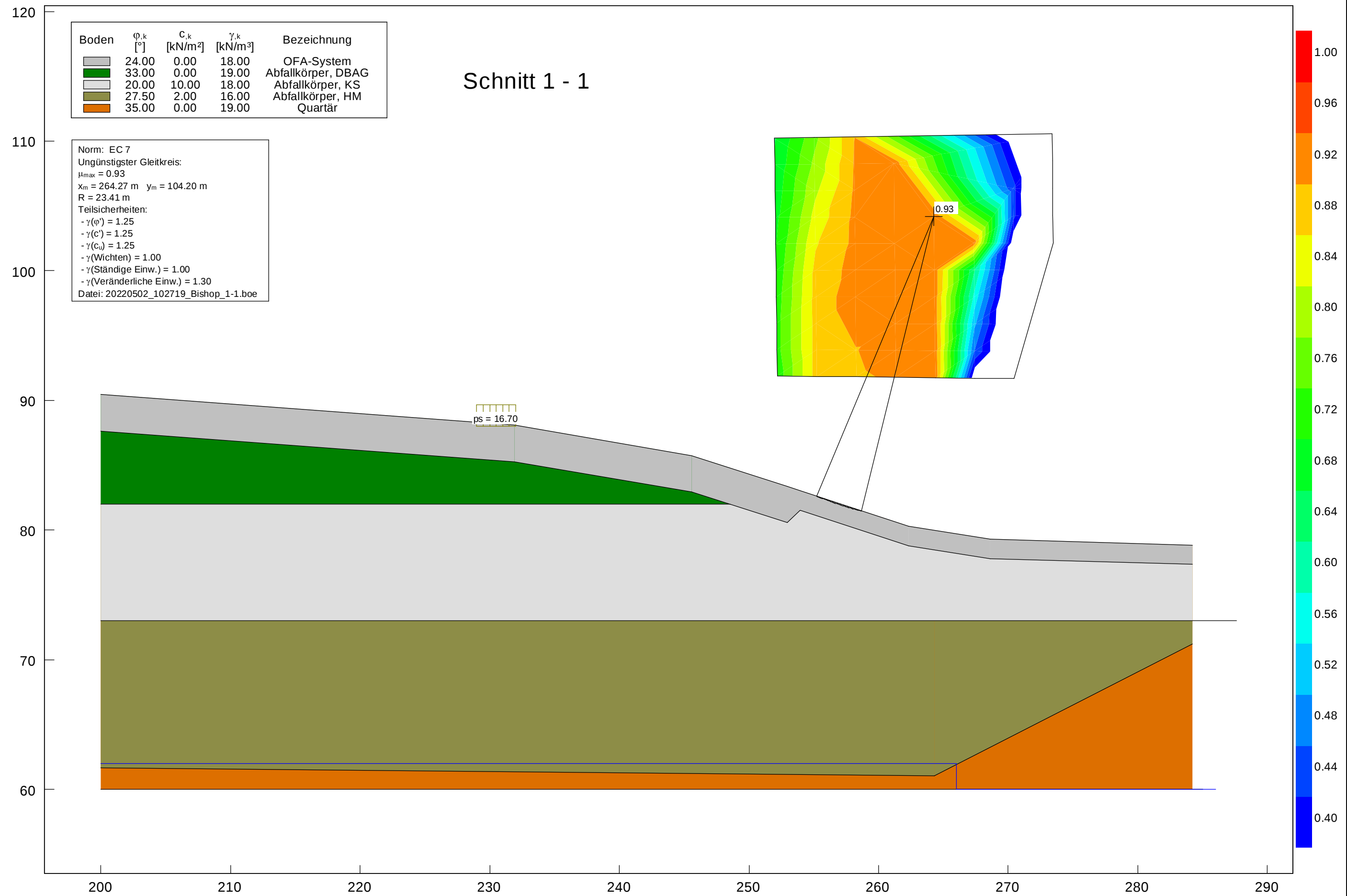
CDM Smith Consult GmbH  
Bochum, 2022-05-03

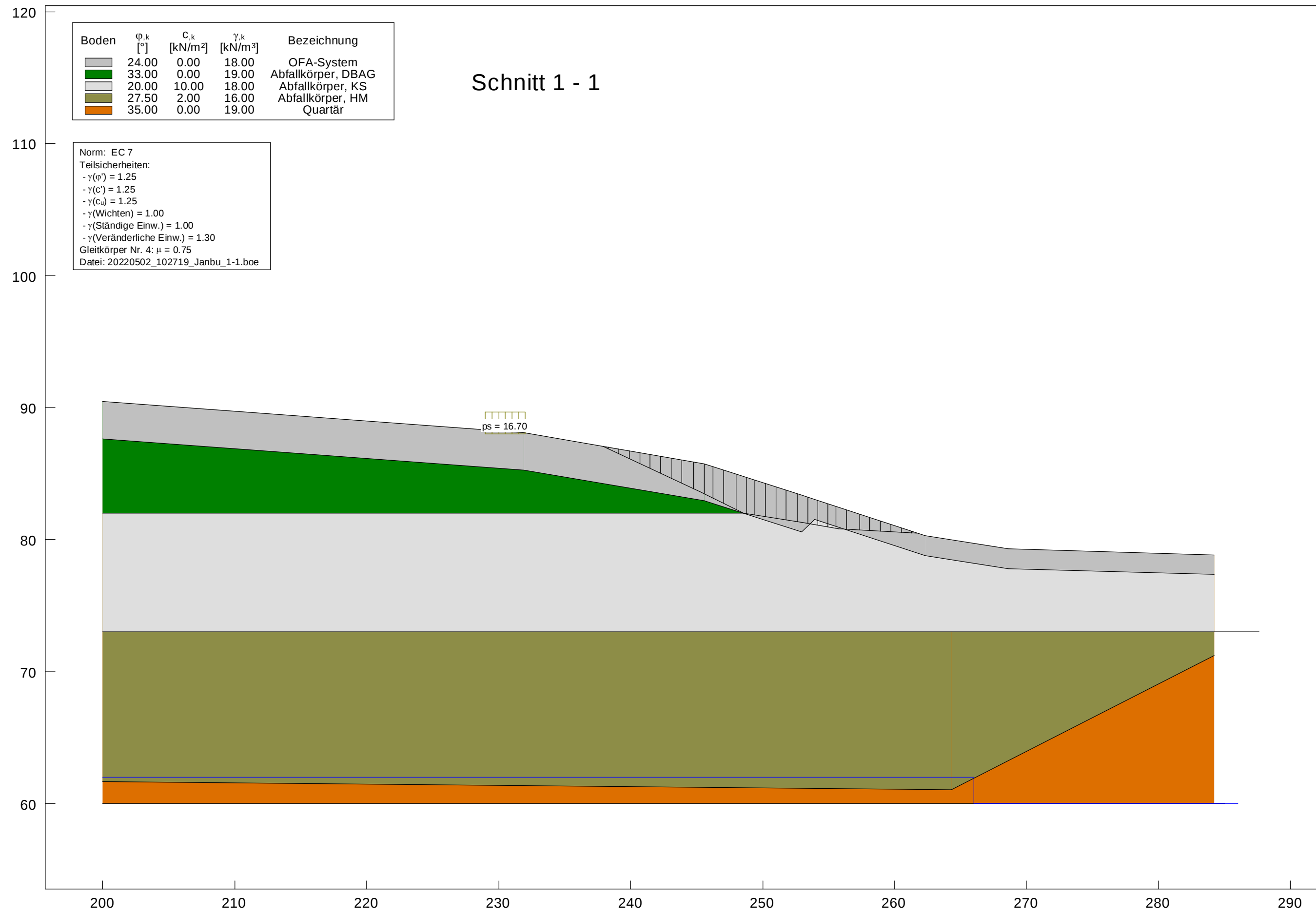


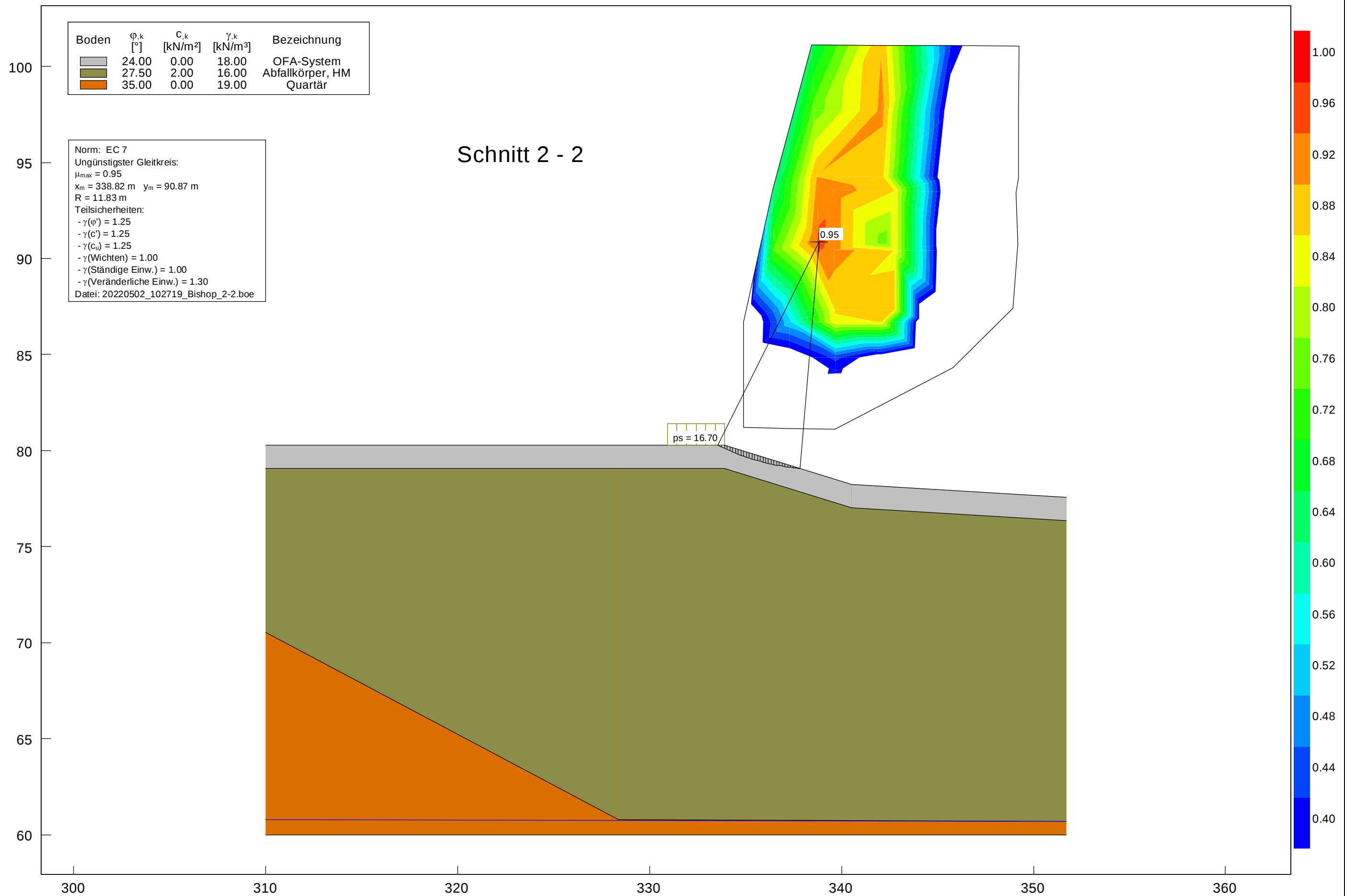
Dipl.-Ing. U. Klos

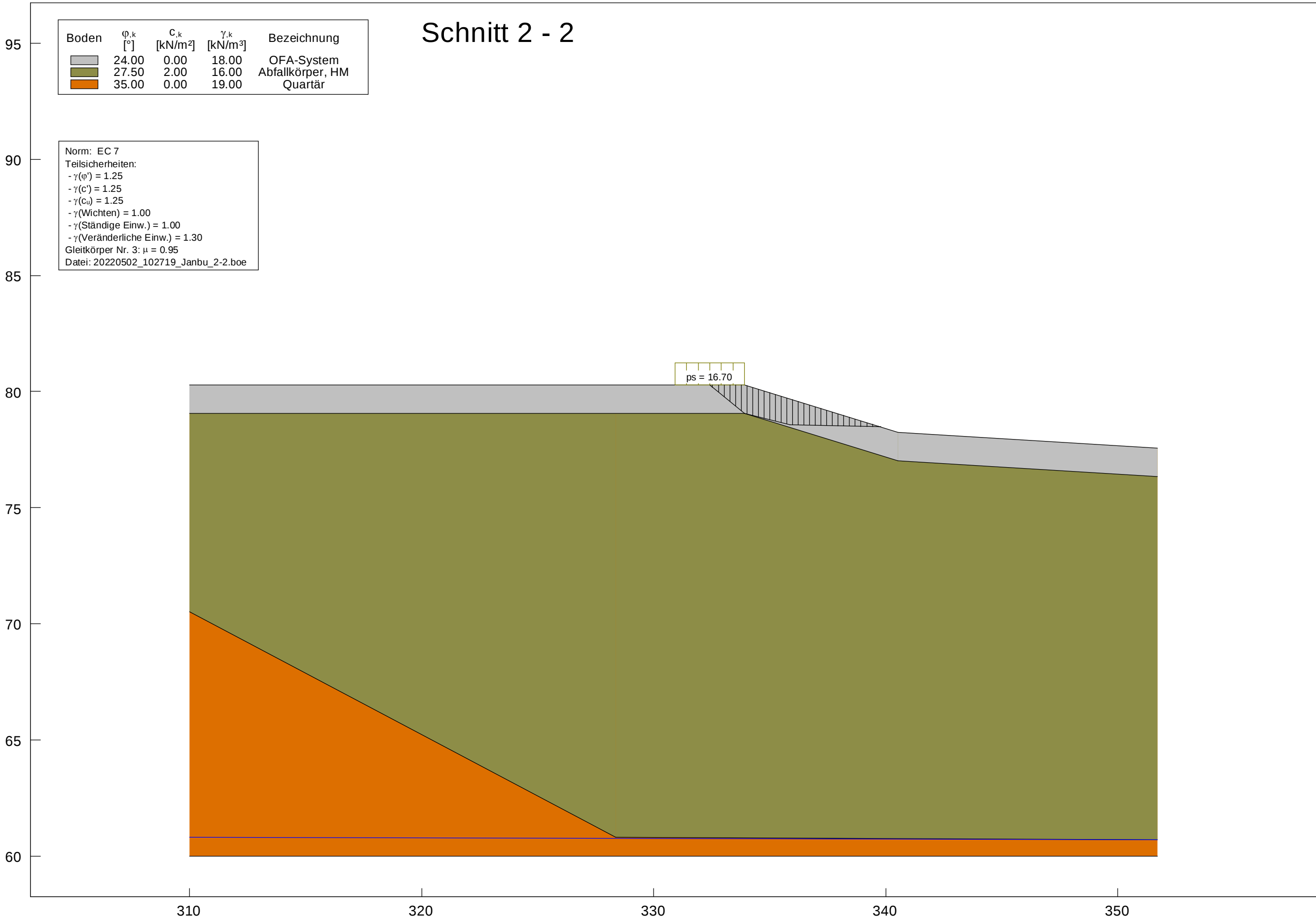


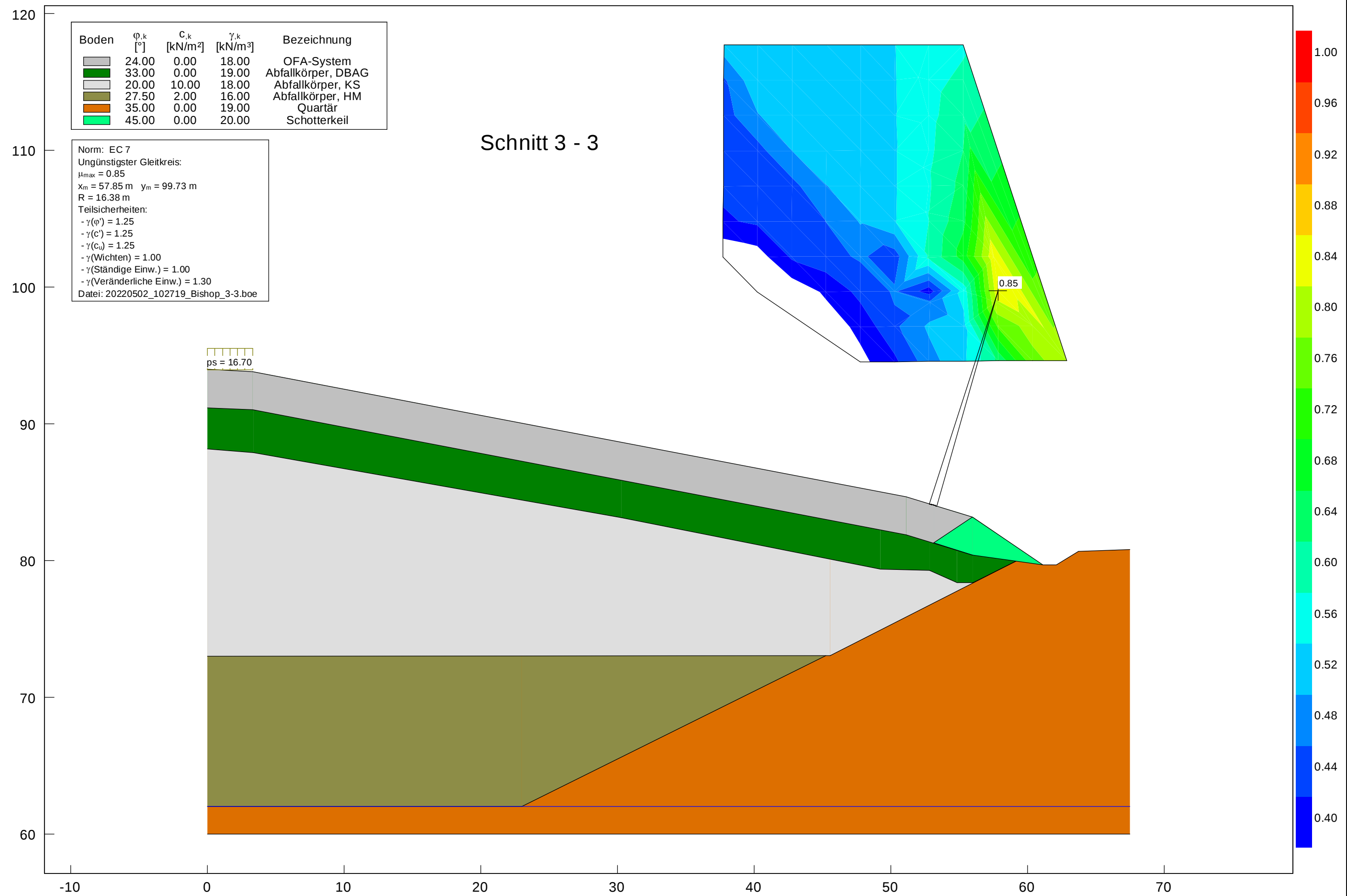
M.Sc. T. Bergander

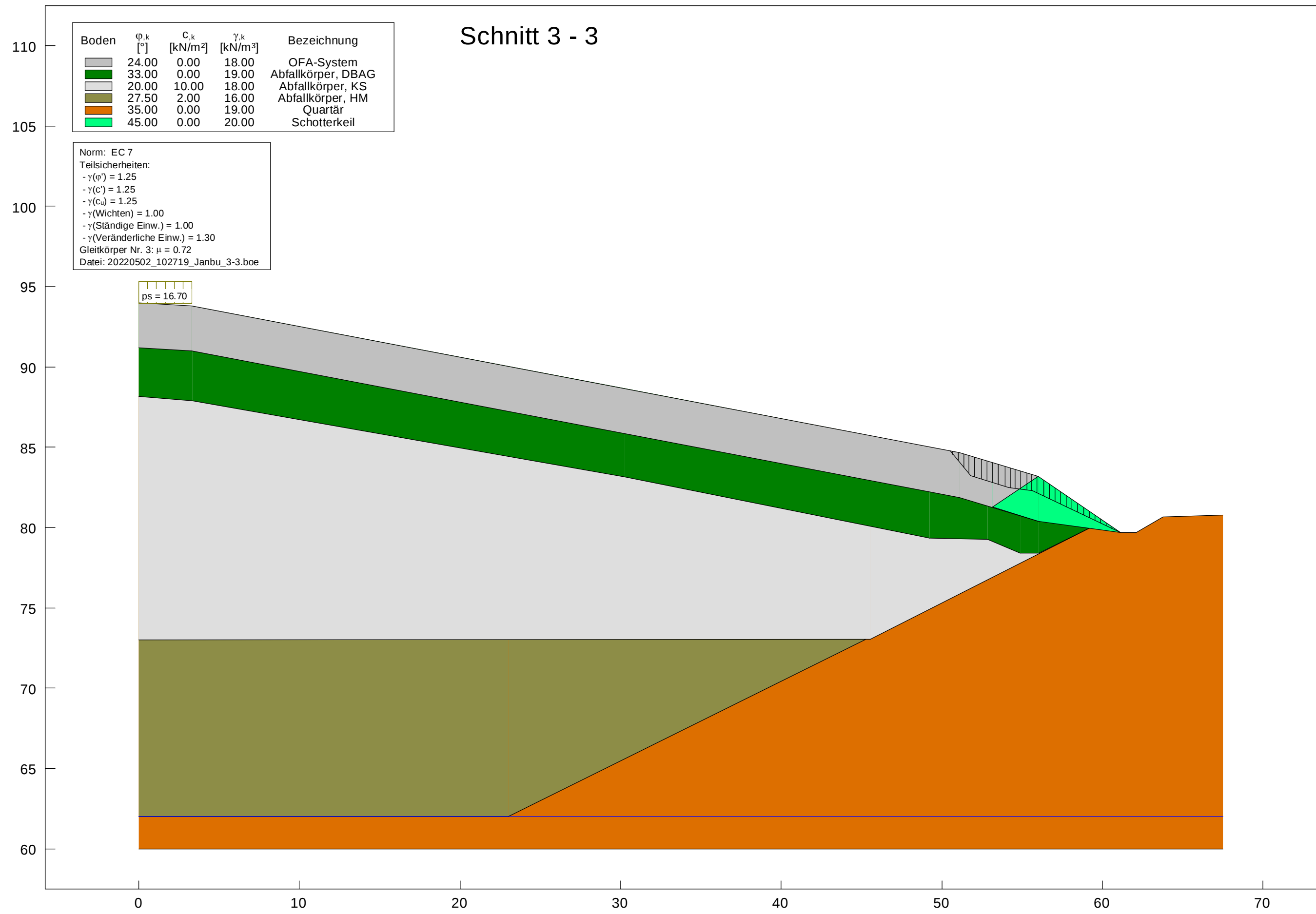


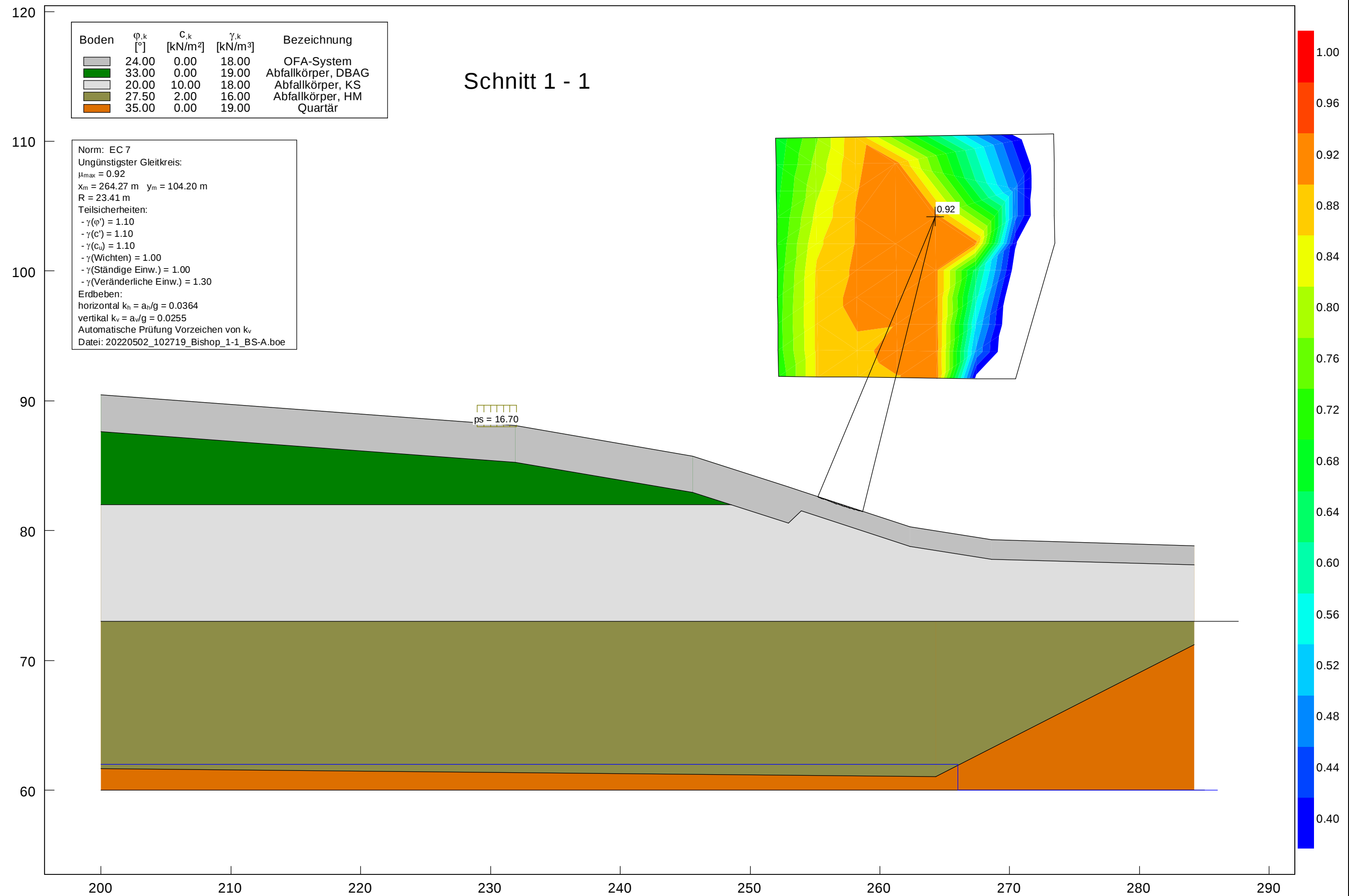


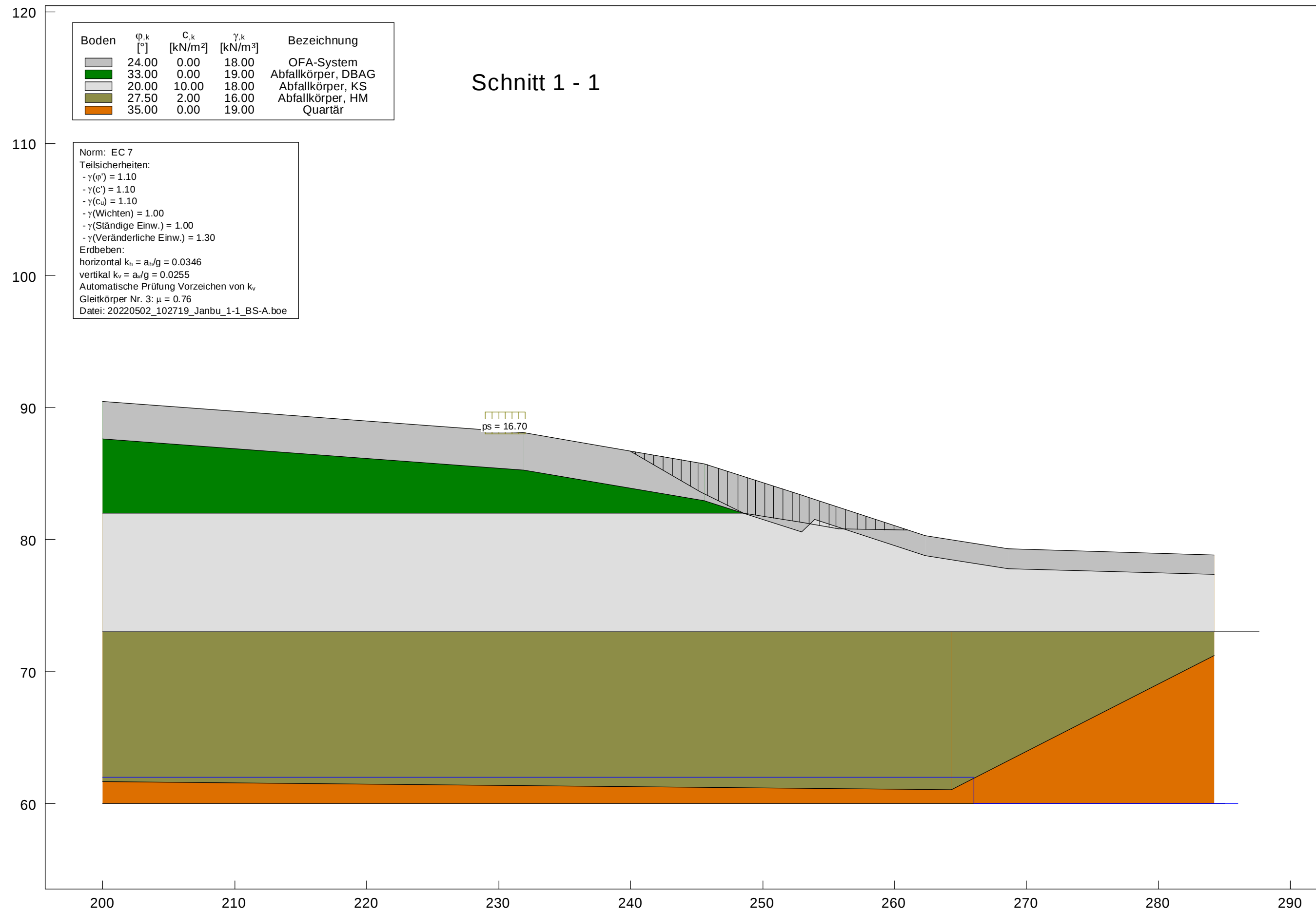


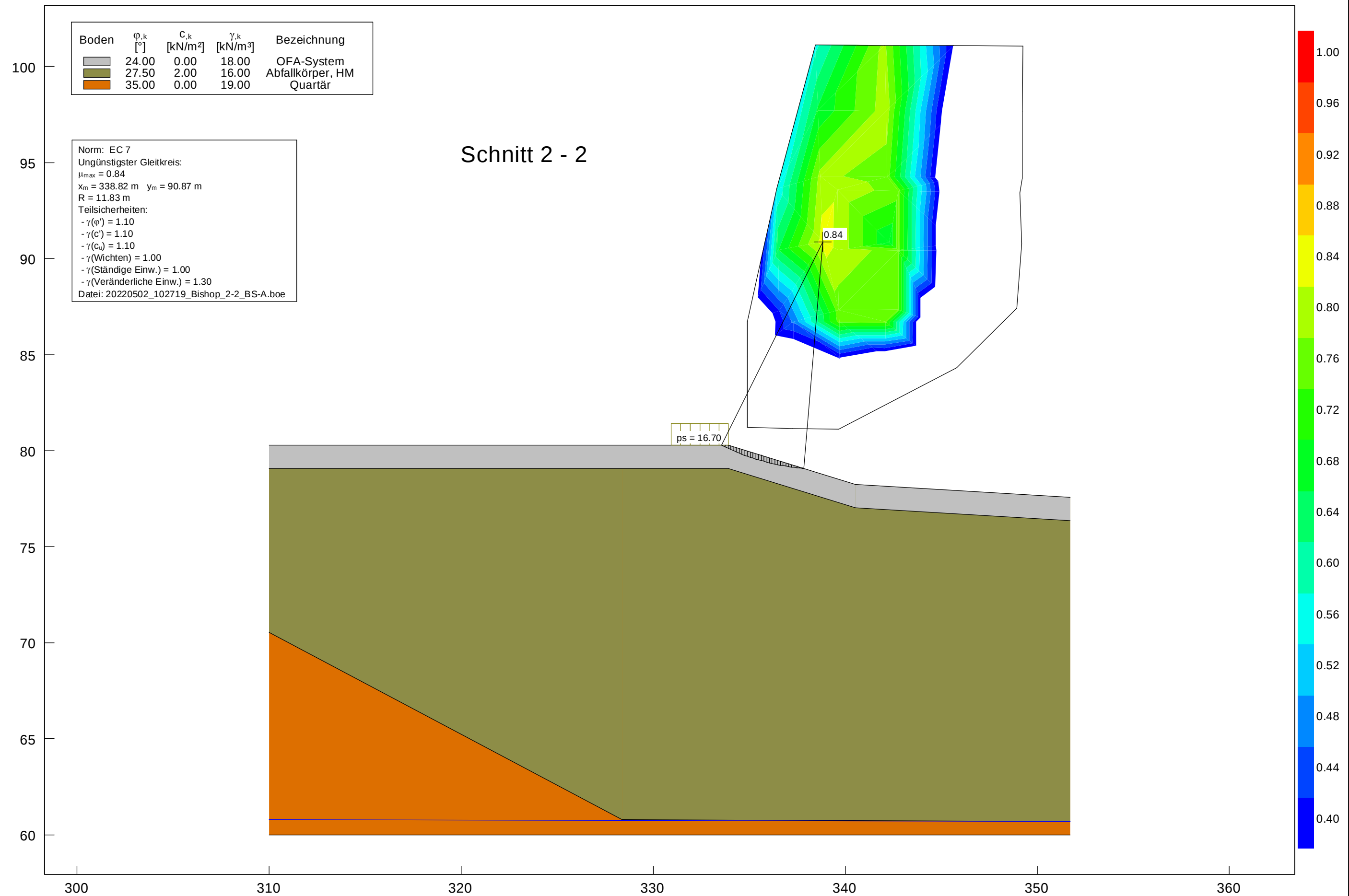


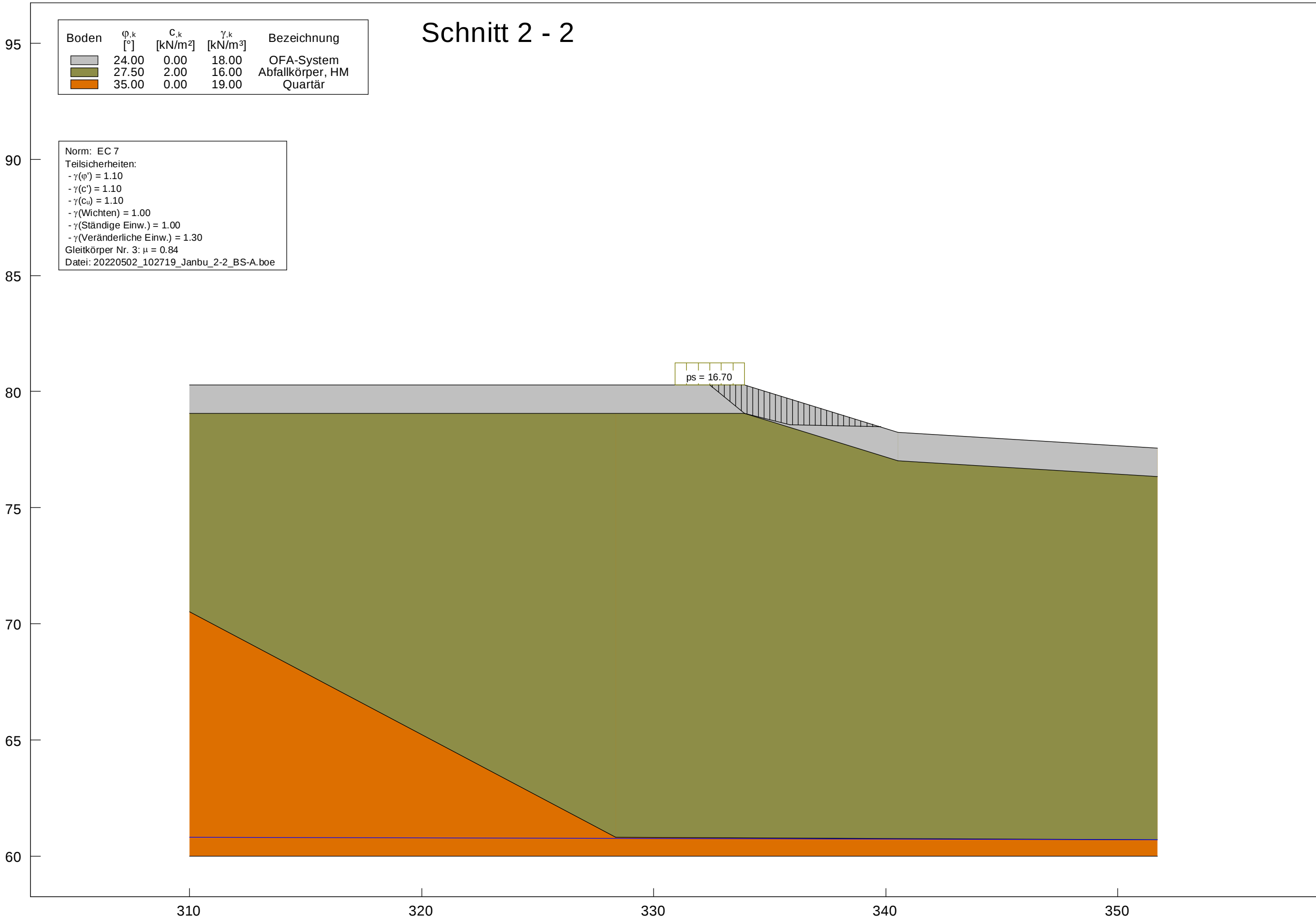


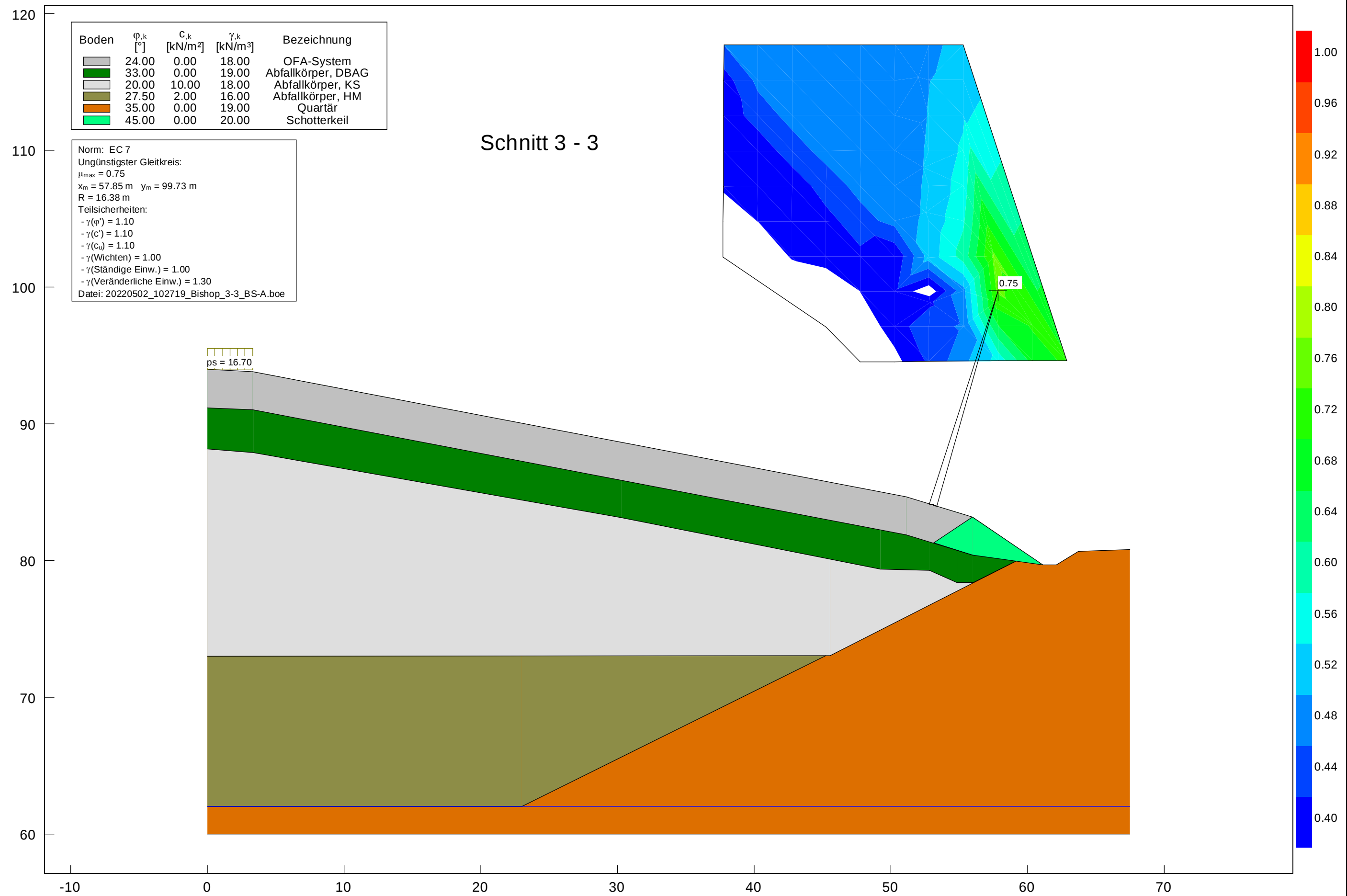


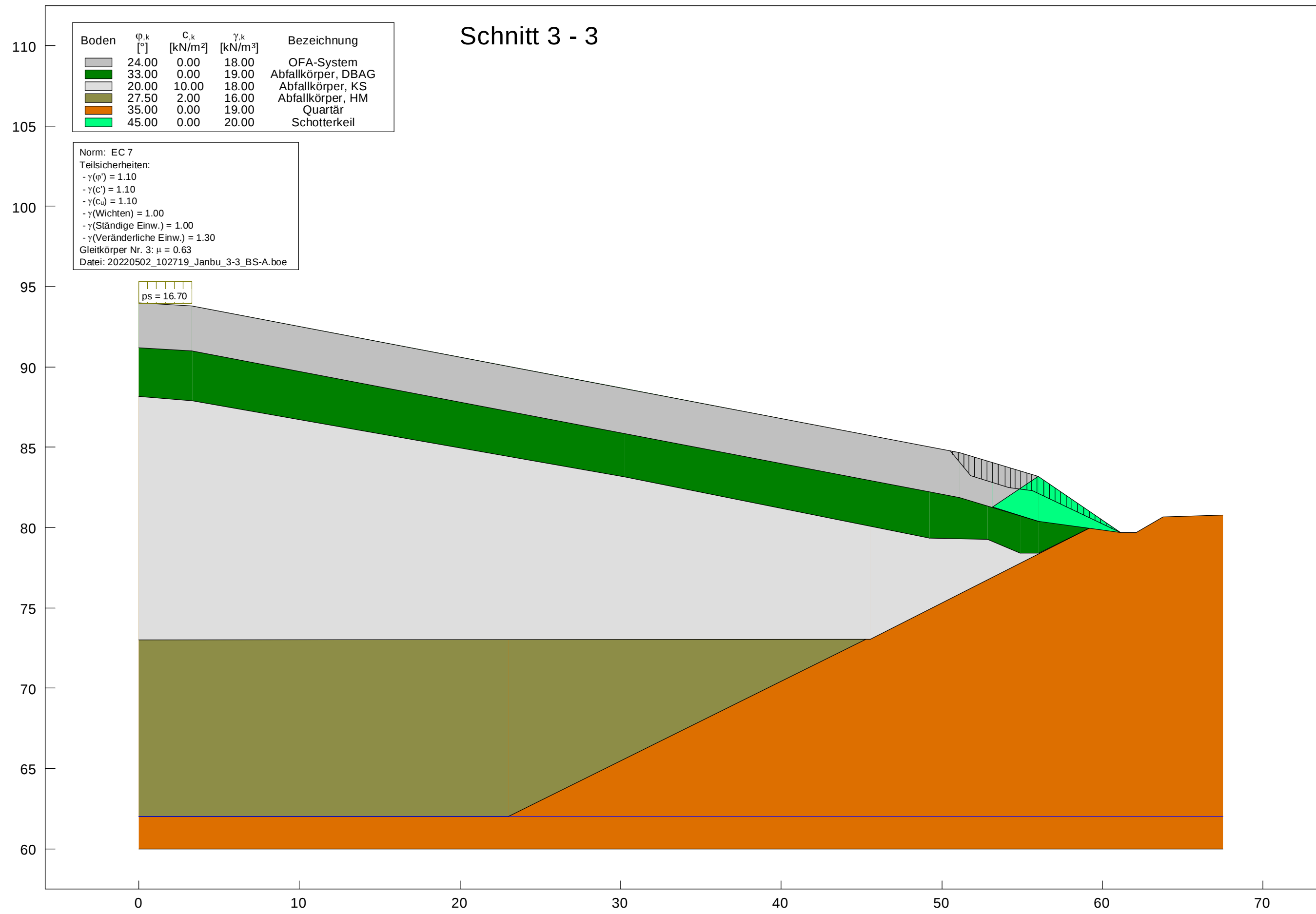










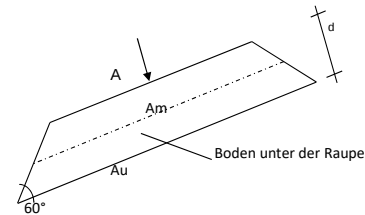


## Anlage 2.1.1:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 1, ohne Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 2,42 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Betriebsgewicht (G <sub>i</sub> ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge (l <sub>i</sub> ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite (b <sub>i</sub> ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit (v):                             | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand (t):                           | 1,6 [s]          |
| Kohäsion C <sub>K</sub> '                              | 0 [kN/m²]        |
| Schneelast S <sub>K</sub>                              | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_K' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_i / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_i \cdot b_i + 4 \cdot (l_i + b_i) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \text{ für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_i / A_u$$

$$C_D = C_K / \gamma_C$$

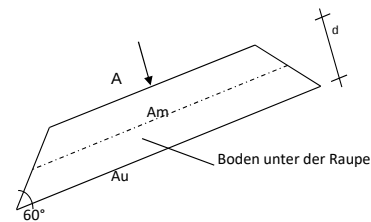
|                                  | γ<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | A <sub>u</sub><br>[m²] | d<br>[m] | sin β<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[kN/m] | Bremslast F <sub>Br</sub><br>[kN/m] | Verkehrslast P<br>[kN/m] | Strömungskraft S <sub>W</sub><br>[kN/m] | Schneelast S <sub>K</sub><br>[kN/m] | Kohäsion C <sub>D</sub> '<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | arctan(erfφ <sub>K</sub> ') [rad] | erfφ <sub>K</sub> ' [°] |
|----------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Strömungskraft                   | 10           | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        | 0        | 0,31622777     |                           |                                     |                          | 0,00                                    |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Verkehrslast                     |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           |                                     | 0,00                     |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,5      |                | 10,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Eigenlast Drainage               | 19,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,3      |                | 5,70                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 1,5      |                | 27,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Schneelast                       |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         | 0,65                                |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Bremslast                        |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           | 0,00                                |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Kohäsion                         |              |                     |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         |                                     | 0,00                                |                            |                           |                                   |                         |
|                                  |              |                     |                        |          |                | 42,70                     | 0,00                                | 0,00                     | 0,00                                    | 0,65                                | 0,00                                | 137,70                     | 329,00                    | 0,42                              | 22,71                   |

## Anlage 2.1.2:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 1, mit Kohäsion

|                                                |                  |
|------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                     | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:               | 2,42 [m]         |
| Böschungslänge:                                | 10 [m]           |
| Neigung                                        | 1:3              |
| Böschungswinkel beta:                          | 0,32175055 [rad] |
| $\beta$                                        | 18,43 [°]        |
| $\sin \beta$                                   | 0,31622777       |
| $\cos \beta$                                   | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c, \gamma_\phi$ | 1,25             |
| Betriebsgewicht ( $G_r$ ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge ( $l$ ):                           | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite ( $b_r$ ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit ( $v$ ):                 | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand ( $t$ ):               | 1,6 [s]          |
| Kohäsion $C_k$ :                               | 2 [kN/m²]        |
| Schneelast $S_k$                               | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}_{\phi_k} = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_k \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_k \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_k = 0,65 \text{ für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_c$$

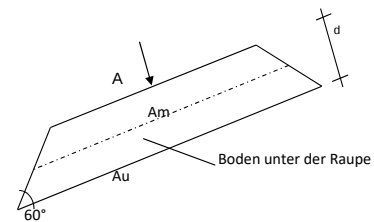
|                                  | $\gamma$<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | $A_u$<br>[m²] | $d$<br>[m] | $\sin \beta$<br>[rad] | Gewichtskraft $G$<br>[kN/m] | Bremslast $F_{Br}$<br>[kN/m] | Verkehrslast $P$<br>[kN/m] | Strömungskraft $S_W$<br>[kN/m] | Schneelast $S_k$<br>[kN/m] | Kohäsion $C_D$<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | $\arctan(\text{erf}_{\phi_k})$ [rad] | $\text{erf}_{\phi_k}$ [°] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Strömungskraft                   | 10                  | 1,3 $\gamma_Q$      |               | 0          | 0,31622777            |                             |                              |                            | 0,00                           |                            |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Verkehrslast                     |                     | 1,3 $\gamma_Q$      | 20,71         |            |                       |                             |                              | 0,00                       |                                |                            |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,5        |                       | 10,00                       |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Eigenlast Drainage               | 19,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,3        |                       | 5,70                        |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 1,5        |                       | 27,00                       |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Schneelast                       |                     | 1,3 $\gamma_Q$      |               |            |                       |                             |                              |                            |                                | 0,65                       |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Bremslast                        |                     | 1,3 $\gamma_Q$      | 20,71         |            |                       |                             | 0,00                         |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                      |                           |
| Kohäsion                         |                     |                     |               |            |                       |                             |                              |                            |                                |                            | 2,00                     |                            |                           |                                      |                           |
|                                  |                     |                     |               |            |                       | 52,20                       | 0,00                         | 0,00                       | 0,00                           | 0,65                       | 2,00                     | 147,74                     | 401,10                    | 0,37                                 | 20,22                     |

## Anlage 2.2.1:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 2, ohne Kohäsion

|                                             |                  |
|---------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                  | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:            | 2,42 [m]         |
| Böschungslänge:                             | 10 [m]           |
| Neigung                                     | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                       | 0,32175055 [rad] |
| $\beta$                                     | 18,43 [°]        |
| $\sin \beta$                                | 0,31622777       |
| $\cos \beta$                                | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_G, \gamma_Q$ | 1,25             |
| Betriebsgewicht ( $G_r$ ):                  | 0 kN             |
| Kettenlänge ( $l_r$ ):                      | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite ( $b_r$ ):               | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit ( $v$ ):              | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand ( $t$ ):            | 1,6 [s]          |
| Kohäsion $C_k$ :                            | 0 [kN/m²]        |
| Schneelast $S_k$ :                          | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_k = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_k \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_w \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_k \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_w = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_k = 0,65 \text{ für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_C$$

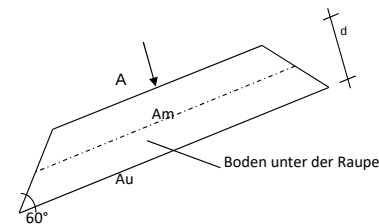
|                                  | $\gamma$<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | $A_u$<br>[m²] | $d$<br>[m] | $\sin \beta$<br>[rad] | Gewichtskraft $G$<br>[kN/m] | Bremslast $F_{Br}$<br>[kN/m] | Verkehrslast $P$<br>[kN/m] | Strömungskraft $S_w$<br>[kN/m] | Schneelast $S_k$<br>[kN/m] | Kohäsion $C_D$<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | $\arctan(\text{erf}\phi_k)$ [rad] | $\text{erf}\phi_k$ [°] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Strömungskraft                   | 10                  | 1,3 $\gamma_Q$      |               | 0          | 0,31622777            |                             |                              |                            | 0,00                           |                            |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Verkehrslast                     |                     | 1,3 $\gamma_Q$      | 20,71         |            |                       |                             |                              | 0,00                       |                                |                            |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,5        |                       | 10,00                       |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Eigenlast Dränage                | 19,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,3        |                       | 5,70                        |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 1,5        |                       | 27,00                       |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Schneelast                       |                     | 1,3 $\gamma_Q$      |               |            |                       |                             |                              |                            |                                | 0,65                       |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Bremslast                        |                     | 1,3 $\gamma_Q$      | 20,71         |            |                       |                             | 0,00                         |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                   |                        |
| Kohäsion                         |                     |                     |               |            |                       |                             |                              |                            |                                |                            | 0,00                     |                            |                           |                                   |                        |
|                                  |                     |                     |               |            |                       | 42,70                       | 0,00                         | 0,00                       | 0,00                           | 0,65                       | 0,00                     | 137,70                     | 329,00                    | 0,42                              | 22,71                  |

## Anlage 2.2.2:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 2, mit Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 2,42 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Betriebsgewicht (G <sub>B</sub> ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge (l <sub>t</sub> ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite (b <sub>t</sub> ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit (v):                             | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand (t):                           | 1,6 [s]          |
| Kohäsion C <sub>K</sub> '                              | 2 [KN/m²]        |
| Schneelast S <sub>K</sub>                              | 0 [KN/m²]        |

$$erf_{\phi_K}' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D' \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_K / \gamma_C$$

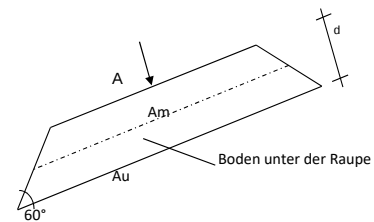
|                                  | γ<br>[KN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | A <sub>u</sub><br>[m²] | d<br>[m] | sin β<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[KN/m] | Bremslast F <sub>Br</sub><br>[KN/m] | Verkehrslast P<br>[KN/m] | Strömungskraft S <sub>W</sub><br>[KN/m] | Schneelast S <sub>K</sub><br>[KN/m] | Kohäsion C <sub>D</sub> '<br>[KN/m] | treibende Kräfte<br>[KN/m] | haltende Kräfte<br>[KN/m] | arctan(erf <sub>φ<sub>K</sub>'</sub> ) [rad] | erf <sub>φ<sub>K</sub>'</sub> [°] |
|----------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Strömungskraft                   | 10           | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        | 0        | 0,31622777     |                           |                                     |                          | 0,00                                    |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Verkehrslast                     |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           |                                     | 0,00                     |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,5      |                | 10,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast Dränage                | 19,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,3      |                | 5,70                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 1,5      |                | 27,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Schneelast                       |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         | 0,65                                |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Bremslast                        |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           | 0,00                                |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Kohäsion                         |              |                     |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         |                                     | 2,00                                |                            |                           |                                              |                                   |
|                                  |              |                     |                        |          |                | 52,20                     | 0,00                                | 0,00                     | 0,00                                    | 0,65                                | 2,00                                | 147,74                     | 401,10                    | 0,37                                         | 20,22                             |

## Anlage 2.3.1:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 3, ohne Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 1,90 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Betriebsgewicht (G <sub>r</sub> ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge (l <sub>k</sub> ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite (b <sub>p</sub> ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit (v):                             | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand (t):                           | 1,6 [s]          |
| Kohäsion C <sub>k</sub> :                              | 0 [KN/m²]        |
| Schneelast S <sub>k</sub> :                            | 0 [KN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_K = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \text{ für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_C$$

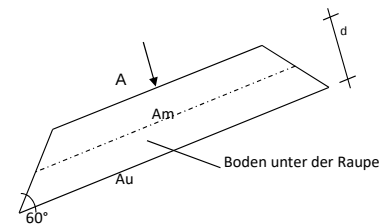
|                                  | γ<br>[KN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | A <sub>u</sub><br>[m²] | d<br>[m] | sinβ<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[KN/m] | Bremslast F <sub>Br</sub><br>[KN/m] | Verkehrslast P<br>[KN/m] | Strömungskraft S <sub>w</sub><br>[KN/m] | Schneelast S <sub>K</sub><br>[KN/m] | Kohäsion C <sub>0</sub> '<br>[KN/m] | treibende Kräfte<br>[KN/m] | haltende Kräfte<br>[KN/m] | arctan(erfφ <sub>K</sub> ) [rad] | erfφ <sub>K</sub> [°] |
|----------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------|---------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Strömungskraft                   | 10           | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        | 0,15     | 0,31622777    |                           |                                     |                          | 0,62                                    |                                     |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Verkehrslast                     |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |               |                           |                                     | 0,00                     |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0        |               | 0,00                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Eigenlast Dränage                | 19,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,3      |               | 5,70                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 1,5      |               | 27,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Schneelast                       |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        |          |               |                           |                                     |                          |                                         | 0,65                                |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Bremslast                        |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |               |                           | 0,00                                |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                  |                       |
| Kohäsion                         |              |                     |                        |          |               |                           |                                     |                          |                                         |                                     | 0,00                                |                            |                           |                                  |                       |
|                                  |              |                     |                        |          |               | 32,70                     | 0,00                                | 0,00                     | 0,62                                    | 0,65                                | 0,00                                | 112,25                     | 253,11                    | 0,44                             | 23,92                 |

## Anlage 2.3.2:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 3, mit Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 1,90 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Betriebsgewicht (G <sub>B</sub> ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge (l <sub>t</sub> ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite (b <sub>t</sub> ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit (v):                             | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand (t):                           | 1,6 [s]          |
| Kohäsion C <sub>K</sub> '                              | 2 [KN/m²]        |
| Schneelast S <sub>K</sub>                              | 0 [KN/m²]        |

$$erf_{\phi_K}' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D' \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_K / \gamma_C$$

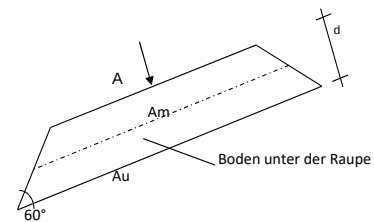
|                                  | γ<br>[KN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | A <sub>u</sub><br>[m²] | d<br>[m] | sin β<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[KN/m] | Bremslast F <sub>Br</sub><br>[KN/m] | Verkehrslast P<br>[KN/m] | Strömungskraft S <sub>W</sub><br>[KN/m] | Schneelast S <sub>K</sub><br>[KN/m] | Kohäsion C <sub>D</sub> '<br>[KN/m] | treibende Kräfte<br>[KN/m] | haltende Kräfte<br>[KN/m] | arctan(erf <sub>φ<sub>K</sub>'</sub> ) [rad] | erf <sub>φ<sub>K</sub>'</sub> [°] |
|----------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Strömungskraft                   | 10           | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        | 0,15     | 0,31622777     |                           |                                     |                          | 0,62                                    |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Verkehrslast                     |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           |                                     | 0,00                     |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0        |                | 0,00                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast Dränage                | 19,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,3      |                | 5,70                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 1,5      |                | 27,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Schneelast                       |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         | 0,65                                |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Bremslast                        |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           | 0,00                                |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Kohäsion                         |              |                     |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         |                                     | 2,00                                |                            |                           |                                              |                                   |
|                                  |              |                     |                        |          |                | 42,20                     | 0,00                                | 0,00                     | 0,62                                    | 0,65                                | 2,00                                | 122,29                     | 325,21                    | 0,38                                         | 20,61                             |

## Anlage 2.4.1:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 4, ohne Kohäsion

|                                                |                  |
|------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                     | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:               | 1,58 [m]         |
| Böschungslänge:                                | 10 [m]           |
| Neigung                                        | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                          | 0,32175055 [rad] |
| $\beta$                                        | 18,43 [°]        |
| $\sin \beta$                                   | 0,31622777       |
| $\cos \beta$                                   | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_C, \gamma_\phi$ | 1,25             |
| Betriebsgewicht ( $G_r$ ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge ( $l_r$ ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite ( $b_r$ ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit ( $v$ ):                 | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand ( $t$ ):               | 1,6 [s]          |
| Kohäsion $C_k$ :                               | 0 [kN/m²]        |
| Schneelast $S_k$ :                             | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_k = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_k \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_w \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_k \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_w = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_k = 0,65 \text{ für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_C$$

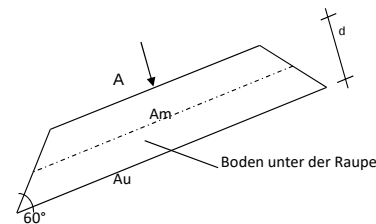
|                                  | $\gamma$<br>[KN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | $A_u$<br>[m²] | d<br>[m] | $\sin\beta$<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[KN/m] | Bremslast $F_{Br}$<br>[KN/m] | Verkehrslast P<br>[KN/m] | Strömungskraft $S_w$<br>[KN/m] | Schneelast $S_K$<br>[KN/m] | Kohäsion $C_0'$<br>[KN/m] | treibende Kräfte<br>[KN/m] | haltende Kräfte<br>[KN/m] | $\arctan(erf\phi_K)$ [rad] | $erf\phi_K$ [°] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|----------|----------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------|
| Strömungskraft                   | 10                  | 1,3 $\gamma_Q$      |               | 0,15     | 0,31622777           |                           |                              |                          | 0,62                           |                            |                           |                            |                           |                            |                 |
| Verkehrslast                     |                     | 1,3 $\gamma_Q$      | 20,71         |          |                      |                           |                              | 0,00                     |                                |                            |                           |                            |                           |                            |                 |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0        |                      | 0,00                      |                              |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                            |                 |
| Eigenlast Dränage                | 19,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0        |                      | 0,00                      |                              |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                            |                 |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 1,5      |                      | 27,00                     |                              |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                            |                 |
| Schneelast                       |                     | 1,3 $\gamma_Q$      |               |          |                      |                           |                              |                          |                                | 0,65                       |                           |                            |                           |                            |                 |
| Bremslast                        |                     | 1,3 $\gamma_Q$      | 20,71         |          |                      |                           | 0,00                         |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                            |                 |
| Kohäsion                         |                     |                     |               |          |                      |                           |                              |                          |                                |                            | 0,00                      |                            |                           |                            |                 |
|                                  |                     |                     |               |          |                      | 27,00                     | 0,00                         | 0,00                     | 0,62                           | 0,65                       | 0,00                      | 94,22                      | 209,85                    | 0,45                       | 24,18           |

## Anlage 2.4.2:

## BS-P Endzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 4, mit Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 1,58 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Betriebsgewicht (G <sub>i</sub> ):                     | 0 kN             |
| Kettenlänge (l <sub>i</sub> ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite (b <sub>i</sub> ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit (v):                             | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand (t):                           | 1,6 [s]          |
| Kohäsion C <sub>k</sub> '                              | 2 [kN/m²]        |
| Schneelast S <sub>K</sub>                              | 0 [kN/m²]        |

$$erf_{\phi_k}' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_f / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_i \cdot b_i + 4 \cdot (l_i + b_i) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_f / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_C$$

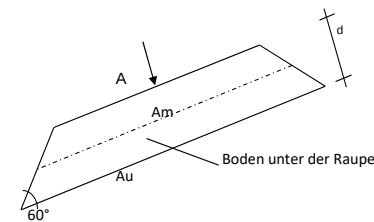
|                                  | γ<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | A <sub>u</sub><br>[m²] | d<br>[m] | sin β<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[kN/m] | Bremslast F <sub>Br</sub><br>[kN/m] | Verkehrslast P<br>[kN/m] | Strömungskraft S <sub>W</sub><br>[kN/m] | Schneelast S <sub>K</sub><br>[kN/m] | Kohäsion C <sub>D</sub> '<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | arctan(erf <sub>φ<sub>k</sub>'</sub> ) [rad] | erf <sub>φ<sub>k</sub>'</sub> [°] |
|----------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Strömungskraft                   | 10           | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        | 0,15     | 0,316227766    |                           |                                     |                          | 0,62                                    |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Verkehrslast                     |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           |                                     | 0,00                     |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0        |                | 0,00                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast Drainage               | 19,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0        |                | 0,00                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 1,5      |                | 27,00                     |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Schneelast                       |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         | 0,65                                |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Bremslast                        |              | 1,3 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           | 0,00                                |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                              |                                   |
| Kohäsion                         |              |                     |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         |                                     | 2,00                                |                            |                           |                                              |                                   |
|                                  |              |                     |                        |          |                | 36,50                     | 0,00                                | 0,00                     | 0,62                                    | 0,65                                | 2,00                                | 104,26                     | 281,95                    | 0,37                                         | 20,29                             |

## Anlage 2.5.1:

## BS-T Bauzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 3, ohne Kohäsion

|                                                |                  |
|------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                     | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:               | 0,32 [m]         |
| Böschungslänge:                                | 10 [m]           |
| Neigung                                        | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                          | 0,32175055 [rad] |
| $\beta$                                        | 18,43 [°]        |
| $\sin \beta$                                   | 0,31622777       |
| $\cos \beta$                                   | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_C, \gamma_\phi$ | 1,25             |
| Betriebsgewicht ( $G_r$ ):                     | 262 kN           |
| Kettenlänge ( $l_r$ ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite ( $b_r$ ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit ( $v$ ):                 | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand ( $t$ ):               | 2 [s]            |
| Kohäsion $C_k$ :                               | 0 [kN/m²]        |
| Schneelast $S_k$ :                             | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}\phi'_k = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_k \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_w \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_k \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_w = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_k = 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_C$$

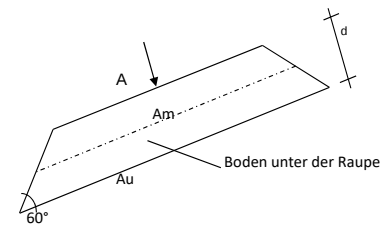
|                                  | $\gamma$<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | $A_u$<br>[m²] | $d$<br>[m] | $\sin \beta$<br>[rad] | Gewichtskraft $G$<br>[kN/m] | Bremslast $F_{Br}$<br>[kN/m] | Verkehrslast $P$<br>[kN/m] | Strömungskraft $S_w$<br>[kN/m] | Schneelast $S_k$<br>[kN/m] | Kohäsion $C_D$<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | $\arctan(\text{erf}\phi'_k)$ [rad] | $\text{erf}\phi'_k$ [°] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Strömungskraft                   | 10                  | 1,2 $\gamma_Q$      |               | 0          | 0,3162278             |                             |                              |                            | 0,00                           |                            |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Verkehrslast                     |                     | 1,2 $\gamma_Q$      | 20,71         |            |                       |                             |                              | 12,65                      |                                |                            |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0          |                       | 0,00                        |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Eigenlast Dränage                | 19,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,3        |                       | 5,70                        |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,0        |                       | 0,00                        |                              |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Schneelast                       |                     | 1,2 $\gamma_Q$      |               |            |                       |                             |                              |                            |                                | 0,00                       |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Bremslast                        |                     | 1,2 $\gamma_Q$      | 20,71         |            |                       |                             | 0,77                         |                            |                                |                            |                          |                            |                           |                                    |                         |
| Kohäsion                         |                     |                     |               |            |                       |                             |                              |                            |                                |                            | 0,00                     |                            |                           |                                    |                         |
|                                  |                     |                     |               |            |                       | 5,70                        | 0,77                         | 12,65                      | 0,00                           | 0,00                       | 0,00                     | 23,60                      | 52,86                     | 0,45                               | 24,06                   |

## Anlage 2.5.2:

## BS-T Bauzustand: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 3, mit Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 0,32 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Betriebsgewicht (G <sub>i</sub> ):                     | 262 kN           |
| Kettenlänge (l <sub>i</sub> ):                         | 3,40 m           |
| Bodenplattenbreite (b <sub>i</sub> ):                  | 0,60 m           |
| Raupengeschwindigkeit (v):                             | 1 [m/s]          |
| Zeit bis zum Stillstand (t):                           | 2 [s]            |
| Kohäsion C <sub>K</sub> '                              | 2 [kN/m²]        |
| Schneelast S <sub>K</sub>                              | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_K' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D' \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_f / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_i \cdot b_i + 4 \cdot (l_i + b_i) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \text{ für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_f / A_u$$

$$C_D = C_K / \gamma_C$$

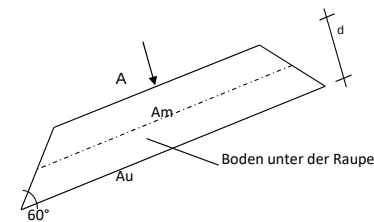
|                                  | γ<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | A <sub>u</sub><br>[m²] | d<br>[m] | sin β<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[kN/m] | Bremslast F <sub>Br</sub><br>[kN/m] | Verkehrslast P<br>[kN/m] | Strömungskraft S <sub>W</sub><br>[kN/m] | Schneelast S <sub>K</sub><br>[kN/m] | Kohäsion C <sub>D</sub> '<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | arctan(erfφ <sub>K</sub> ') [rad] | erfφ <sub>K</sub> ' [°] |
|----------------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Strömungskraft                   | 10           | 1,2 γ <sub>Q</sub>  |                        | 0        | 0,3162278      |                           |                                     |                          | 0,00                                    |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Verkehrslast                     |              | 1,2 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           |                                     | 12,65                    |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0        |                | 0,00                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Eigenlast Dränage                | 19,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,3      |                | 5,70                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00        | 1 γ <sub>G</sub>    |                        | 0,0      |                | 0,00                      |                                     |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Schneelast                       |              | 1,2 γ <sub>Q</sub>  |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         | 0,00                                |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Bremslast                        |              | 1,2 γ <sub>Q</sub>  | 20,71                  |          |                |                           | 0,77                                |                          |                                         |                                     |                                     |                            |                           |                                   |                         |
| Kohäsion                         |              |                     |                        |          |                |                           |                                     |                          |                                         |                                     | 2,00                                |                            |                           |                                   |                         |
|                                  |              |                     |                        |          |                | 15,20                     | 0,77                                | 12,65                    | 0,00                                    | 0,00                                | 2,00                                | 33,64                      | 124,96                    | 0,27                              | 15,07                   |

## Anlage 2.6.1:

## BS-A Endzustand, Erdbebenfall: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 3, ohne Kohäsion

|                                             |                  |
|---------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                  | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:            | 1,97 [m]         |
| Böschungslänge:                             | 10 [m]           |
| Neigung                                     | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                       | 0,32175055 [rad] |
| $\beta$                                     | 18,43 [°]        |
| $\sin \beta$                                | 0,31622777       |
| $\cos \beta$                                | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_G, \gamma_Q$ | 1,25             |
| Bodenlast                                   | 35,4 kN          |
| Grundlänge                                  | 1,00 m           |
| Grundbreite                                 | 1,00 m           |
| Horizontalbeschleunigung (v):               | 0,0255 [m/s]     |
| Durchlaufzeit (t):                          | 0,2 [s]          |
| Kohäsion $C_k'$                             | 0 [kN/m²]        |
| Schneelast $S_k$                            | 0 [kN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_K' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_k \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_w \cdot l + F_{Br} - C_D' \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_k \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G_r / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_w = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_k = 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_k / \gamma_C$$

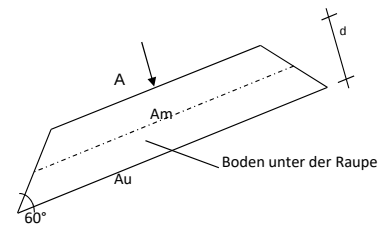
|                                  | $\gamma$<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | $A_u$<br>[m²] | d<br>[m] | $\sin \beta$<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[kN/m] | Erdbebenlast<br>[kN/m] | Verkehrslast P<br>[kN/m] | Strömungskraft $S_w$<br>[kN/m] | Schneelast $S_k$<br>[kN/m] | Kohäsion $C_D'$<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | $\arctan(\text{erf}\phi_K')$ [rad] | $\text{erf}\phi_K'$ [°] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|----------|-----------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Strömungskraft                   | 10                  | 1 $\gamma_Q$        |               | 0,15     | 0,3162278             |                           |                        |                          | 0,47                           |                            |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Verkehrslast                     |                     | 1 $\gamma_Q$        |               |          |                       |                           |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0        |                       | 0,00                      |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Eigenlast Dränage                | 19,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,3      |                       | 5,70                      |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 1,5      |                       | 27,00                     |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Schneelast                       |                     | 1 $\gamma_Q$        |               |          |                       |                           |                        |                          |                                | 0,00                       |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Bremslast                        |                     | 1 $\gamma_Q$        | 10,31         |          |                       |                           | 0,04                   |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                                    |                         |
| Kohäsion                         |                     |                     |               |          |                       |                           |                        |                          |                                |                            | 0,00                      |                            |                           |                                    |                         |
|                                  |                     |                     |               |          |                       | 32,70                     | 0,04                   | 0,00                     | 0,47                           | 0,00                       | 0,00                      | 108,19                     | 248,18                    | 0,44                               | 23,56                   |

## Anlage 2.6.2:

## BS-A Endzustand, Erdbebenfall: OK Rekultivierungsschicht, Betrachtung Fuge 3, mit Kohäsion

|                                                        |                  |
|--------------------------------------------------------|------------------|
| Entwässerung Schichtdicke:                             | 0,3 [m]          |
| über Fuge liegende Schichtdicke:                       | 1,97 [m]         |
| Böschungslänge:                                        | 10 [m]           |
| Neigung                                                | 1: 3             |
| Böschungswinkel beta:                                  | 0,32175055 [rad] |
| β                                                      | 18,43 [°]        |
| sin β                                                  | 0,31622777       |
| cos β                                                  | 0,9486833        |
| Teilsicherheitsbeiwert γ <sub>C</sub> , γ <sub>φ</sub> | 1,25             |
| Bodenlast                                              | 35,4 kN          |
| Grundlänge                                             | 1,00 m           |
| Grundbreite                                            | 1,00 m           |
| Horizontalbeschleunigung (v):                          | 0,0255 [m/s]     |
| Durchlaufzeit (t):                                     | 0,2 [s]          |
| Kohäsion C <sub>K</sub> '                              | 2 [KN/m²]        |
| Schneelast S <sub>K</sub>                              | 0 [KN/m²]        |

$$\text{erf}\phi_K' = \arctan \left( \frac{(\sum G \cdot \gamma_G \cdot l + S_K \cdot \gamma_Q \cdot l + P \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_W \cdot l + F_{Br} - C_D \cdot l}{(\sum G \cdot l + S_K \cdot l + P) \cdot \cos \beta / \gamma_\phi} \right)$$



$$F_{Br} = (G / g \cdot a_v \cdot \gamma_Q) / A_u$$

$$a_v = v / t$$

$$S_W = \gamma \cdot \gamma_Q \cdot d \cdot \sin \beta$$

$$A_u = 2 \cdot l_r \cdot b_r + 4 \cdot (l_r + b_r) \cdot d \cdot \tan 30^\circ$$

$$A = 2 \cdot l_r \cdot b_r$$

$$S_K = 0,65 \quad \text{für Schneelastzone 1 im Kreis Siegburg}$$

$$G = \gamma \cdot d$$

$$P = G_r / A_u$$

$$C_D = C_K / \gamma_C$$

|                                  | $\gamma$<br>[kN/m³] | Teilsicherh.<br>[-] | $A_u$<br>[m²] | $d$<br>[m] | $\sin\beta$<br>[rad] | Gewichtskraft G<br>[kN/m] | Erdbebenlast<br>[kN/m] | Verkehrslast P<br>[kN/m] | Strömungskraft $S_w$<br>[kN/m] | Schneelast $S_K$<br>[kN/m] | Kohäsion $C_D'$<br>[kN/m] | treibende Kräfte<br>[kN/m] | haltende Kräfte<br>[kN/m] | $\arctan(erf\phi_K')$ [rad] | $erf\phi_K'$ [°] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|------------|----------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|
| Strömungskraft                   | 10                  | 1 $\gamma_Q$        |               | 0,15       | 0,3162278            |                           |                        |                          | 0,47                           |                            |                           |                            |                           |                             |                  |
| Verkehrslast                     |                     | 1 $\gamma_Q$        |               |            |                      |                           |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                             |                  |
| Eigenlast min. Dichtung          | 20,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0          |                      | 0,00                      |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                             |                  |
| Eigenlast Drainage               | 19,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 0,3        |                      | 5,70                      |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                             |                  |
| Eigenlast Rekultivierungsschicht | 18,00               | 1 $\gamma_G$        |               | 1,5        |                      | 27,00                     |                        |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                             |                  |
| Schneelast                       |                     | 1 $\gamma_Q$        |               |            |                      |                           |                        |                          |                                | 0,00                       |                           |                            |                           |                             |                  |
| Bremslast                        |                     | 1 $\gamma_Q$        | 10,31         |            |                      |                           | 0,04                   |                          |                                |                            |                           |                            |                           |                             |                  |
| Kohäsion                         |                     |                     |               |            |                      |                           |                        |                          |                                |                            | 2,00                      |                            |                           |                             |                  |
|                                  |                     |                     |               |            |                      | 42,20                     | 0,04                   | 0,00                     | 0,47                           | 0,00                       | 2,00                      | 118,24                     | 320,28                    | 0,37                        | 20,26            |