



# **Sedimentationsbecken I, II und III der Kläranlage Buchenhofen**

## **Überprüfung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Absperrbauwerke und Dämme nach DIN 19700**

Bearbeitungs-Nr.: 18.187

Aachen, Juli 2021

## Sedimentationsbecken I, II und III der Kläranlage Buchenhofen

### Überprüfung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Absperrbauwerke und Dämme nach DIN 19700

---

**Auftraggeber:** Wupperverband  
Untere Lichtenplatzer Str. 100  
42289 Wuppertal

**Ansprechpartner:** Herr Freund, Frau Bendt und Herr Rück

**Bestellnummer:** 4500039326

**Auftragsdatum:** 28.10.2019

---

**Auftragnehmer:** Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH  
Neuenhofstraße 112  
52078 Aachen

**Projektbearbeiter:** Dr.-Ing. M. Nendza, S. Vonhall, M.Eng.

**Bearbeitungsnummer:** 18.187

**Berichtsdatum:** 05.07.2021

**Berichtsumfang:** 51 Seiten (einschließlich Deckblatt und Inhaltsverzeichnis)  
3 Anlagen (s. Anlagenverzeichnis)

---



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorgang .....</b>	<b>1</b>
1.1	Veranlassung und Aufgabenstellung .....	1
<b>2</b>	<b>Verwendete Unterlagen .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Angaben zum Standort und zur Anlage .....</b>	<b>5</b>
3.1	Lage und Höhen .....	5
3.2	Anlagenbeschreibung - Aufbau der Sedimentationsbecken .....	6
3.3	Geologischer Rahmen, Untergrundsituation und hydrologische Situation .....	10
3.4	Erdbebensituation .....	13
3.5	Klassifikation der Sedimentationsanlage gemäß DIN 19700 .....	14
<b>4</b>	<b>Vorangegangene Untersuchungen .....</b>	<b>15</b>
4.1	Versagensmechanismen .....	16
4.2	Gebrauchstauglichkeit der Absperrdämme .....	17
<b>5</b>	<b>Sanierungsmaßnahmen .....</b>	<b>18</b>
5.1	Geplante Sanierungen mit Herstellung bzw. Aufhöhung von Zwischendämmen .....	18
5.2	Einbauhöhen und Angaben zu den Zwischendämmen .....	21
<b>6</b>	<b>Nachweise gemäß DIN 19700 bzw. DWA-M 542 .....</b>	<b>21</b>
6.1	Grundsätzliche Definitionen .....	21
6.1.1	Grenzzustände der Tragfähigkeit .....	21
6.1.2	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit .....	23
6.1.3	Einwirkungen / Bauwerkszustände .....	24
6.1.4	Bemessungssituationen .....	26
6.1.5	Tragfähigkeitsnachweise .....	27
6.1.6	Sicherheitsbeiwerte .....	27
6.1.7	Gebrauchstauglichkeitsnachweise .....	28
6.1.8	Lastfall Erdbeben .....	29
6.2	Lastfälle, Tragfähigkeitsnachweise .....	30
6.3	Berechnungsergebnisse .....	31
6.3.1	Grenzzustände der Tragfähigkeit .....	31
6.3.1.1	Nachweis der Böschungs-/Geländebruchstabilität .....	31
6.3.1.2	Nachweis der Aufnahme der Spreizspannungen .....	33
6.3.1.3	Nachweis der Gleitsicherheit .....	35
6.3.1.4	Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch / Aufschwimmen .....	36
6.3.1.5	Nachweise der Sicherheit gegen Materialtransport .....	37
6.4	Gebrauchstauglichkeit .....	38
<b>7</b>	<b>Erdbautechnische Hinweise zur Erhöhung der Dämme &amp; Anforderungen an die Ausführung</b>	<b>39</b>



<b>8</b>	<b>Konsolidationsverhalten .....</b>	<b>41</b>
8.1	Theorie .....	41
8.2	Abschätzung der kritischen Aufhöhungsrates .....	42
8.3	Setzungsmaß .....	43
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>44</b>

### Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Übersichtslageplan Projektstandort [18]	5
<b>Abbildung 2:</b>	Geländemorphologie [18]	6
<b>Abbildung 3:</b>	Lage der alten Wupperschlinge und der Klärschlammflächen auf dem Betriebsgelände	7
<b>Abbildung 4:</b>	Schematische Darstellung der geologischen/hydrogeologischen Standortsituation [18]	11
<b>Abbildung 5:</b>	Schematischer geologischer Schnitt [19] (Schnittführung s. Abb. 6)	11
<b>Abbildung 6:</b>	Geologische Karte [19] (Profildarstellung s. Abb. 5)	12
<b>Abbildung 7:</b>	Lageplan der Berechnungsquerschnitte - Absperrdämme I bis III [1]	16
<b>Abbildung 8:</b>	Darstellung der Becken und Zwischendämme (Ausschnitt - Bauphasenplan) [18]	20
<b>Abbildung 9:</b>	Übersichtsplan mit Eintragung der berechneten Absperrdämme AD I bis III (blaue Markierung) und Zwischendämme (magentafarbene Markierung) [18]	22
<b>Abbildung 10:</b>	Verteilung der Normal- und Schubspannungen in der Sohlfuge bei einem rolligen Damm auf nichtbindigem Untergrund (nach RENDULIC)	34
<b>Abbildung 11:</b>	Gleitsicherheitsnachweis Damm (Prinzipdarstellung)	35

### Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Angaben zur Größe der Sedimentationsbecken [18]	8
<b>Tabelle 2:</b>	Zusammenstellung des Baus der Zwischen- und Absperrdämme [18]	10
<b>Tabelle 3:</b>	Angaben zum Aufbau der Absperrdämme zwischen den Sedimentationsbecken I bis III und zur Wupper [1]	13
<b>Tabelle 4:</b>	Zusammenstellung vorhandener, zu ertüchtigender und geplanter Zwischendämme in den Becken [18]	20
<b>Tabelle 5:</b>	Bodenkennwerte	25
<b>Tabelle 6:</b>	Geländehöhen und Lasten	25
<b>Tabelle 7:</b>	Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	26
<b>Tabelle 8:</b>	Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	27
<b>Tabelle 9:</b>	Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Kenngrößen (GZT)	28
<b>Tabelle 10.1:</b>	Berechnungsergebnisse Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) der Absperrdämme, Ausnutzungsgrad $\mu$	31



---

**Tabelle 10.2:** Berechnungsergebnisse Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) der Zwischendämme,  
Ausnutzungsgrad  $\mu$

32

### Verzeichnis der Anlagen

- Anl. 1**      Übersichtslageplan mit Eintragung der untersuchten Absperr- und Zwischendämme
- Anl. 2**      Standsicherheitsberechnungen
  - 2.1 Ausgangszustand**
  - 2.2 Bauzustand 1**
  - 2.3 Bauzustand 2**
  - 2.4 Endzustand für Absperrdamm 3**
- Anl. 3**      Berechnung Spundwand Schlammfläche 3



## **1 Vorgang**

### **1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung**

Der Wupperverband ist Betreiber der Kläranlage Buchenhofen in Wuppertal. Die Klärschlämme wurden seit den 1920er Jahren auf dem Werksgelände in mehreren Absetzbecken sedimentiert. Die Ablagerung endete mit Inbetriebnahme der Verbrennungsanlage 1976. Die dann anfallenden Aschen wurden bis 1992 ebenfalls im Bereich der Sedimentationsbecken abgelagert [18].

Die Anlage wurde 2014 einer Gefährdungsabschätzung nach den Maßstäben des Bodenschutzes unterzogen [19]. Aus den Ablagerungen finden insbesondere durch den Grundwasserkontakt an der Sohle Stoffeinträge in das Grundwasser statt. Diese erfordern nach Art und Umfang Sanierungsmaßnahmen [18].

Da es sich bei den Sedimentationsbecken um oberirdische Gewässer i.S.v. § 3 Ziffer 1 WHG handelt, ist die geplante Sanierung als eine Maßnahme des Gewässerausbaus i.S.v. §§ 67 f. WHG einzustufen. Für das Vorhaben besteht die Pflicht zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung. Aufgrund der Auswirkungen auf die Umwelt ist ein Planfeststellungsverfahren i.S.v. § 68 Abs. 1 WHG durchzuführen [18].

Ziel der Sanierungsmaßnahmen ist die vollständige Abdeckung der Sedimentationsbecken I bis III mit Erdstoffen und die Renaturierung der Fläche der ehemaligen Becken. In diesem Zusammenhang erfolgt in den vorgesehenen Bauphasen die Ertüchtigung der vorhandenen Zwischendämme und der Abschlussdämme, um von diesen Dämmen die vorhandenen Teilbecken mit Maschinenteknik verfüllen bzw. abdecken zu können und die Standsicherheit der Dämme während der Erdbauarbeiten zu gewährleisten [18].

Entsprechend den Bestimmungen des Planfeststellungsverfahrens und gemäß der DIN 19700 (Fassung 07/2004) sind für die o.g. Dämme (Absperr- und Zwischendämme) im Bereich der Becken I bis III im Ist-Zustand, im Bau- und im Endzustand die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit entsprechend den Anforderungen der o.g. Norm unter Berücksichtigung der geplanten Arbeiten bzw. der Vorgaben für den Endzustand zu bewerten.

Die Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH (GBD) wurde im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens von dem Wupperverband beauftragt, die Betrachtungen zur Tragsicherheit und



zur Gebrauchstauglichkeit der Dämme für die maßgeblichen Bauzustände und den geplanten Endzustand entsprechend den Anforderungen der DIN 19700 durchzuführen. Der vorhandene Ausgangszustand wurde bereits in [1] bewertet und ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes.

Auf der Grundlage der aktuellen Vermessung der Schlammflächen bzw. Sedimentationsbecken II und III, des aktuell gültigen Teilsicherheitskonzeptes gemäß DIN EN 1997-1 in Verbindung mit DIN EN 1997-1/NA und der DIN 1054 (EC 7) sowie des vorliegenden Merkblattes DWA-M 542 werden die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Abschlussdämme I bis III der Becken I bis III im Folgenden neu bewertet (vgl. Abb.7) [8, 9, 10, 16].

Ergänzend ist für die Übererdung der Schlammflächen das Konsolidationsverhalten des Klärschlammes zu untersuchen und das Höhenmaß der Übererdung je Zeiteinheit zu begrenzen.

## 2 Verwendete Unterlagen

Die Bearbeitung der o.g. Fragestellungen wurde insbesondere auf der Grundlage der DIN 19700-11 (Talsperren) und DIN 19700-15 (Sedimentationsanlagen) und der DIN EN 1997-1 in Verbindung mit DIN EN 1997-1/NA sowie DIN 1054 (EC 7) durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgte eine Berücksichtigung des Nachweiskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten gemäß Merkblatt DWA-M 542. Eine weitere Grundlage bildete das Wassergesetz des Landes Nordrhein-Westfalen (LWG) in seiner aktuell gültigen Fassung.

Die Angaben zum Aufbau der Baugrundsichtung im Bereich der Sedimentationsbecken werden aus den vorliegenden o.g. Gutachten aus den Jahren 1998, 2006 und 2011 bzw. aus dem Erläuterungsbericht zum Planfeststellungsverfahren für die Übererdung der Klärschlammflächen der Kläranlage Buchenhofen übernommen [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Im Einzelnen wurden folgende Unterlagen verwendet:

### **Gutachten, Stellungnahmen, Planunterlagen (vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt):**

- [1] Zusammenfassender Bericht des Arbeitsschrittes E1 zur vertieften Überprüfung: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Absperrbauwerke der Sedimentationsanlage Buchenhofen; Ingenieurbüro Gell & Partner GbR, Beratende Ingenieure für Grundbau, Felsbau, Bodenmechanik und Spezialtiefbau, Hansmannstraße 19, 52080 Aachen; 24.06.2011;



- [2] Sedimentationsanlage Buchenhofen, Zusammenfassung und Bewertung der Standsicherheitsuntersuchung und der Ortsbegehung am 04.04.2006; Borchert + Lange, Beratende Ingenieure für Umwelt und Geotechnik, Essen; 19.04.2006,
- [3] Sedimentationsanlage Buchenhofen, Ergänzende Standsicherheitsberechnungen für den Abschlussdamm, Borchert + Lange, Beratende Ingenieure für Umwelt und Geotechnik, Essen; 17.03.2006,
- [4] Sedimentationsanlage Buchenhofen, Ergänzende Standsicherheitsuntersuchungen der Erddämme, Borchert + Lange, Beratende Ingenieure für Umwelt und Geotechnik, Essen; 01.02.2006,
- [5] Sedimentationsanlage Buchenhofen, Abschätzung von Intensität und Bodenbeschleunigung für die Lastfälle Betriebs- und Bemessungserdbeben nach DIN 19700; Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld; 05.09.2005,
- [6] Sedimentationsanlage Buchenhofen, Abdeckung der Sedimentationsbecken I und II, Zusammenfassender Bericht für das Sedimentationsbecken II: Klärung der Randbedingungen, Vorschlag für die Abdeckung mit Aschen aus der Klärschlammverbrennungsanlage, Borchert + Lange, Beratende Ingenieure für Umwelt und Geotechnik, Essen; 03.05.2001,
- [7] Sedimentationsanlage Buchenhofen, Sicherheitsbericht, hier: Standsicherheit der Erddämme im Bereich der Klärschlammablagerungen, Erdbaulabor Dipl.-Ing. Borchert + Dipl.-Ing. Lange, Essen; 06.04.1998,

#### **DIN-Normen, Vorschriften, Regelwerke:**

- [8] DIN EN 1997-1:2014-03; Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1, Allgemeine Regeln,
- [9] DIN 1054:2010-12; Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Ergänzende Regeln zu DIN 1997-1,
- [10] DIN EN 1997-2:2010-10, Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 2, Erkundung und Untersuchung des Baugrundes,
- [11] DIN 4084: 2009-01; Baugrund; Gelände- und Böschungsbruchberechnungen,
- [12] DIN EN 1998-1/NA, Teil 1:/2011-015 Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau,
- [13] DIN 19700-11:2004-07; Stauanlagen - Teil 11: Talsperren,
- [14] DIN 19700-15:2004-07; Stauanlagen - Teil 15: Sedimentationsanlagen,
- [15] Merkblatt DWA-M 522: Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken, Gemeinsames Merkblatt der DGGT, DTK und DWA, Stand: Mai 2015,
- [16] Merkblatt DWA-M 542: Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme und Staumauern, Gemeinsames Merkblatt der DGGT, DTK und DWA, Stand: Juli 2017,



---

[17] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Erdarbeiten (Leistungsbereich 205), Ausgabe 2015,

**Archiv des Geotechnisches Büro:**

[18] Planfeststellungsverfahren gemäß § 68 WHG, Übererdung der Klärschlammflächen Buchenhofen in Wuppertal, Erläuterungsbericht (unveröffentlicht); Stand: 02/2021; Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH, Ballenpfad 18, 53332 Bornheim; AG: Wupperverband, Untere Lichtenplatzer Str. 100, 42289 Wuppertal,

[19] Schlammflächen der Kläranlage Buchenhofen – Gefährdungsabschätzung - Bericht; Stand: 29.09.2014; Geotechnisches Büros Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH; Ballenpfad 18, 53332 Bornheim; AG: Wupperverband, Untere Lichtenplatzer Str. 100, 42289 Wuppertal,

**Literatur**

[20] KOPF, M. (1991 ): Eine Revision der Konsolidationstheorie, TIS 4/91, S. 254 – 263.

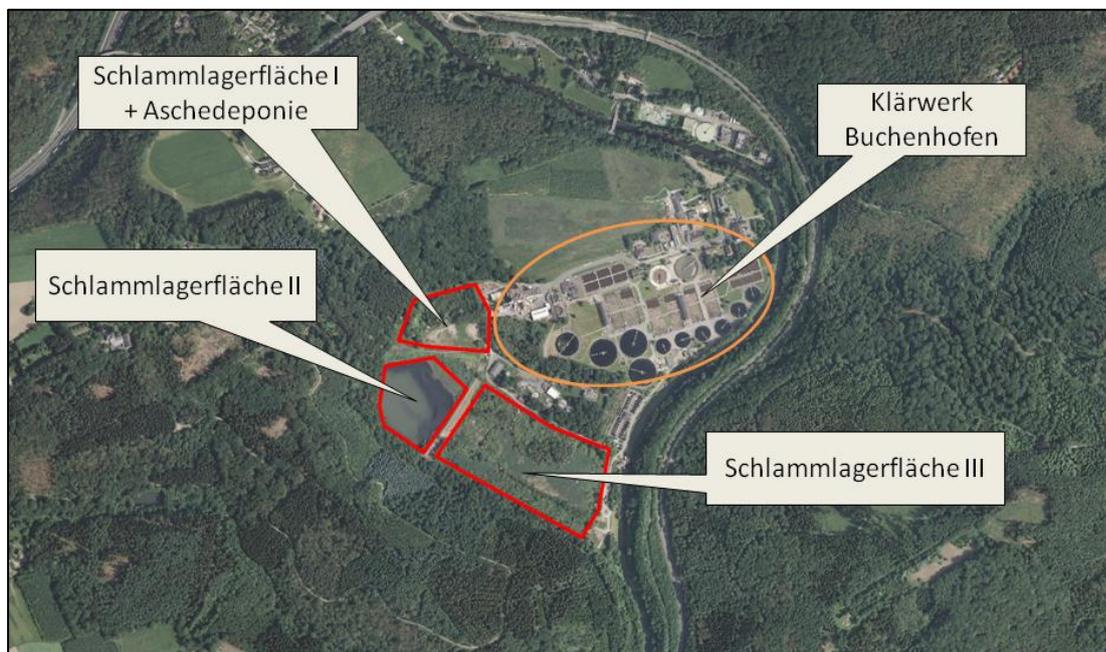


### 3 Angaben zum Standort und zur Anlage

#### 3.1 Lage und Höhen

Der Standort befindet sich südlich der Ortslage Wuppertal-Sonnborn in der Wupperraue (Abb. 1 und 2) und liegt im Bereich einer ehemaligen Wupperschlinge [18].

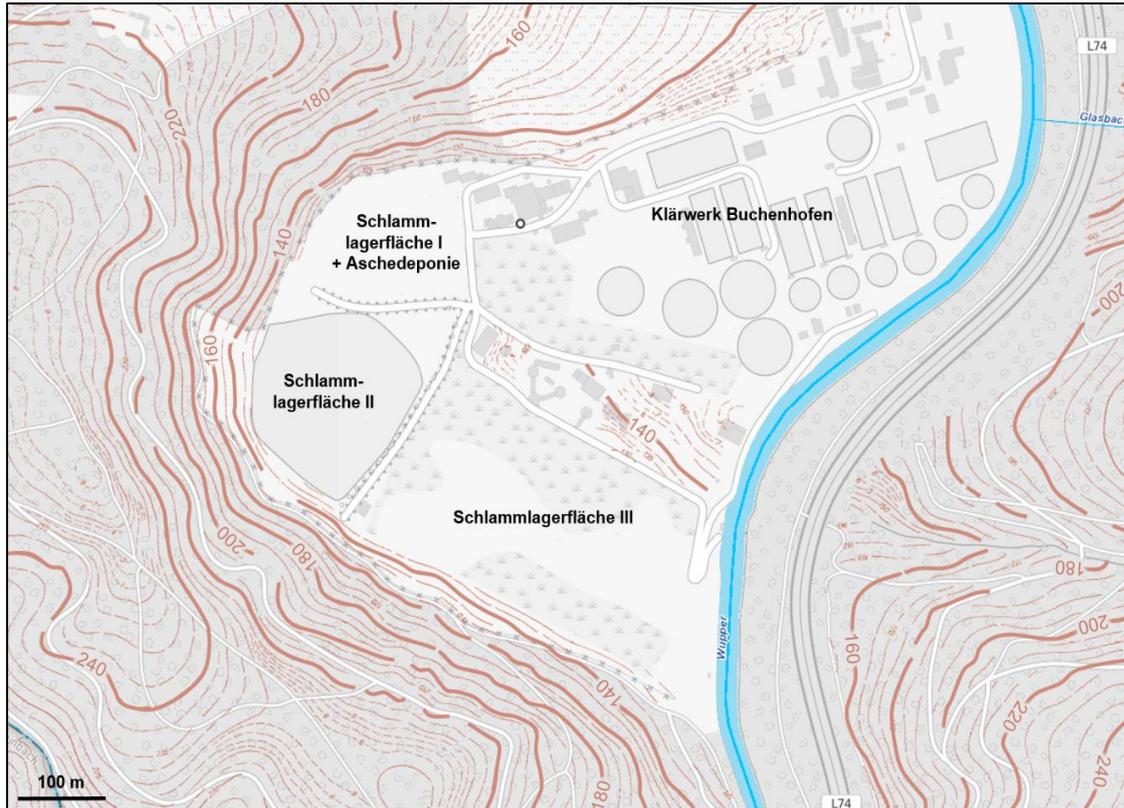
Die Wupper floss ursprünglich nach Westen um die im Talbereich noch erhaltene Evertshöhe herum. In den 1960er Jahren wurde die Wupperschlinge durch Sprengung / Abtragung des von Osten her in das Gebiet hereinragenden Bergrückens abgeschnürt [18].



**Abbildung 1:** Übersichtslageplan Projektstandort [18]

Im Süden, Westen und Norden grenzen an das Gelände steil abfallende, mehr oder weniger stark bewaldete Hänge an. Im Osten verläuft die Wupper.

Das Gelände ist insgesamt ca. 40 ha groß. Die Geländehöhen schwanken zwischen 118,0 m NN (Wasserspiegel der Wupper hinter dem Wehr) und 152,0 m NN (Evertshöhe). Das Höhenniveau des Klärwerksgebietes liegt zwischen 125,0 und 140,0 m NN (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Geländemorphologie [18]

### 3.2 Anlagenbeschreibung - Aufbau der Sedimentationsbecken

Bereits 1925 bestanden südlich der Kläranlage 14 durch Dämme aus Rechen- und Sandfanggut unterteilte Schlammteiche [18].

In den 1930er Jahren war die Wupper im Nordwesten mit einer Wehranlage aufgestaut, um einen Absetzteich zu schaffen. In regelmäßigen Abständen wurde das Wasser abgelassen, der abgesetzte Schlamm ausgebaggert und in die Schlammteiche zur Ablagerung gebracht. Der Bereich des ehemaligen Absetzbeckens wird heute als Schlamm-lagerfläche 0 bezeichnet (Abb. 3) [18].



**Abbildung 3:** Lage der alten Wupperschlinge und der Klärschlamm-lagerflächen auf dem Betriebsgelände [18]

Nach der Abschnürung der Wupperschlinge in den 1960er Jahren diente auch das trocken gelegte alte Wupperbett der Schlamm-lagerung. Im Sohlbereich der ehemaligen Fließrinne wurden zwei Betonrohrleitungen (DN 800) verlegt und Schachtbauwerke errichtet (vgl. Abb. 4). Über die Schächte (Mönche) wird das sich auf den Klärschlämmen ansammelnde Überschusswasser gefasst und durch eine Pumpstation im Südosten des Absperrdammes (Damm III - Absperrdamm zur Wupper) in die Kläranlage zurückgeführt. Die älteren Schlamm-lagerbecken wurden durch drei große Becken (Schlamm-lagerflächen I bis III) überstaut. Die Flächen sind an der Basis nicht abgedichtet und werden durch drei Dämme voneinander abgetrennt [18].

Die Ablagerung von Klärschlämmen wurde mit der Inbetriebnahme der Verbrennungsanlage 1976 eingestellt. Die dann anfallenden Aschen wurden hauptsächlich auf der nördlichen Hälfte der Schlamm-lagerfläche I abgelagert. Die Ablagerungen weisen relativ steile Böschungen auf und sind stark bewachsen. Prinzipiell können sie aber befahren werden [18].

Die Schlamm-lagerfläche II ist momentan noch eine offene Wasserfläche. Die Fläche III kann ebenfalls nicht begangen werden, sie ist aber bereits größtenteils verlandet und bewachsen [18].

Die folgende Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Größen und Kubaturen der Sedimentationsbecken I bis III.

**Tabelle 1:** Angaben zur Größe der Sedimentationsbecken [18]

Rechengröße	Einheit	Klärschlamm				Asche
		Fläche I	Fläche II	Fläche III	Summe	Fläche I
Polderfläche	[m <sup>2</sup> ]	24.000	29.743	67.918	116.050	5.000
(Schlamm)mächtigkeit	[m]	2,3	6,88	5,33	-	6
Kubatur	[m <sup>3</sup> ]	55.200	204.705	362.207	622.112	30.000

Die Fläche und Kubatur der Schlammfläche I wurden aus den Angaben nach [18] abgeleitet.

Die Schlammflächen II und III wurden im Jahr 2020 neu vermessen. Die jeweiligen Flächen und Kubaturen sind aus einem darauf basierenden dreidimensionalen Geländemodell abgeleitet [18].

Bzgl. weiterer Angaben zu den Sedimentationsbecken der Kläranlage Buchenhofen wird auf den Erläuterungsbericht zum Planfeststellungsverfahren verwiesen [18].

### Schlammfläche 0

Der in den 1930er Jahren durch eine Wehranlage aufgestaute Absetzteich wird als Fläche 0 bezeichnet. Über die genauen Abmessungen liegen keine Informationen vor. Bohrungen im Bereich des alten Absetzteiches ergaben Restschlammmächtigkeiten bis zu 6 m [18].

### Schlammfläche I

Die Schlammfläche I befindet sich westlich bis nordwestlich der Evertshöhe. Die Fläche misst etwa 150 m in N-S-Richtung und 160 m in E-W-Richtung [18].

Auf der nördlichen Hälfte der Fläche wurden ab 1977 bis 1992 die Rückstände der Schlammverbrennung abgesetzt (Flugaschen bzw. Filterstäube). Seitdem erfolgt die Ascheentsorgung als Verwertungsmaßnahme im Untertageversatz. Die ehemalige Ablagerungsfläche ist begrünt [18].

Die Mächtigkeit des Klärschlammes beträgt 0,4 bis 4,9 m. Er ist mehr oder weniger konsolidiert und liegt auf Auenlehm oder unmittelbar auf dem Wupperschotter auf. Er ist in der südlichen Hälfte mit



Aushubböden und in der nördlichen mit Aschen überdeckt. Die Klärschlamm- und Ascheablagerungen zusammen sind ca. 10,0 - 12,0 m mächtig (Aufschlussresultate aus 1992) [18].

Im Süden schließt sich die Schlammfläche II an, die durch ein Dammbauwerk abgetrennt ist.

### **Schlammfläche II**

Die Schlammfläche II ist im Norden und Osten mit Dämmen umgeben. Im Westen und Süden grenzt sie an natürliche Böschungen. Die Verfüllung des Beckens erfolgte mit nicht entwässertem Klärschlamm [18].

Sie kann in ein älteres und ein jüngeres Becken unterteilt werden. Das ältere Becken befindet sich in der Evertsaue, in der seit Anfang des vorigen Jahrhunderts schon abgelagert wurde. Das jüngere Becken stellt die Verfüllung des alten Wupperbettes ab 1969/70 dar [18].

Der Klärschlamm ist insgesamt bis zu 9 m mächtig. Die Oberfläche ist dauerhaft eingestaut, wobei eine Wassertiefe von 0,9 bis zu 4,4 m erreicht wird [18].

### **Schlammfläche III**

Wie die Schlammfläche II lässt sich auch die Fläche III in zwei Bereiche unterteilen. Der ältere Bereich liegt wiederum in der Evertsaue, in der seit Beginn des vorigen Jahrhunderts abgelagert wurde. Der jüngere Bereich liegt im Verlauf des alten Wupperbettes. Die Ablagerung begann 1972/73. Hier kamen nur mechanisch entwässerte Klärschlämme zur Ablagerung [1].

Die Schlammmächtigkeit erreicht in der Evertsaue bis zu 7 m, im Wupperbett bis zu 10 m [18].

Das Becken wird im Westen und Osten durch Dämme begrenzt. Im Süden grenzt es an natürliche Böschungen. Im Norden besteht die Einfassung aus einer Spundwand. Die Fläche ist nur im Bereich der Mönche, d.h. im Bereich des ehemaligen Wupperbettes, wasserbedeckt [18].

In der Tabelle 2 ist der zeitliche Ablauf des Baus der vorhandenen Becken und Absperrdämme sowie Zwischendämme zusammengestellt [18].

**Tabelle 2:** Zusammenstellung des zeitlichen Ablaufs des Baus der Zwischen- und Absperrdämme [18]

Jahr	Baumaßnahme
1925	Errichtung 14 kleiner Schlammteiche im Bereich der heutigen Schlammflächen II und III (vgl. Abb. 8)
1928	Errichtung vier großer, in sich weiter unterteilter Schlammflächen (Großteil der heutigen Schlammfläche II und III, aber ohne altes Wupperbett (Becken BII 3 und BIII 8)) (vgl. Abb. 8)
1956 - 1959	<p>Erhöhung der aktuell noch vorhandenen Trenndämme zw. Schlammfläche I u. II, II und III und des Randdamms zur Wupper zur Erweiterung der Schlammkapazität (vgl. Abb. 8)</p> <p>Als Baustoff für diese Dammerhöhungen wurde daher der Erd- und Gesteinsauschub des Wupperdurchstichs genommen. Erhöhung auf ca. 128,0 m NN (vgl. Abb. 8)</p> <p>Erhöhung der Trenndämme innerhalb der Klärschlammfläche III: DIII 1.1 bis 1.4, DIII 2.1 bis 2.3, DIII 3 bis DIII 7, Erhöhung auf 125,0 m bis 128,5 m NN. Erhöhung nimmt von West nach Ost ab (vgl. Abb. 8)</p> <p>Umleitung der Wupper</p>
1963	Erhöhung der Trenndämme innerhalb der Klärschlammfläche III: DIII 1.1 bis 1.4, DIII 2.1 bis 2.3, DIII 3 bis DIII 7. Erhöhung auf 129,0 bis 130,5 m NN (vgl. Abb. 8)
1969 - 1970	Erweiterung der Außendämme der Schlammfläche II zum südwestlich gelegenen Hang (über das alte Wupperbett hinweg). Zusätzlich Erhöhung auf 137,0 m NN (vgl. Abb. 8)
1970	Erweiterung des Außendamms von Schlammfläche III zur Wupper (über das alte Wupperbett hinweg) (vgl. Abb. 8)
1970 - 1971	Erhöhung der Außendämme von Schlammfläche III, Erhöhung auf 137,0 m NN. Errichtung der Spundwand (vgl. Abb. 8)

### 3.3 Geologischer Rahmen, Untergrundsituation und hydrologische Situation

Die geologische/hydrogeologische Situation im Bereich der Sedimentationsbecken bzw. Kläranlagen ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

Der Standort liegt im Niederrheinischen Bergland. Das Grundgebirge besteht aus den mitteldevonischen Brandenburg-Schichten (Lenneschiefern), einer Wechselfolge aus Tonschiefern, Sandsteinen und Grauwacken. Die mehrere hundert Meter mächtigen Schichten streichen WSW-ENE. Sie fallen generell nach NW ein. Das Grundgebirge wird von mehreren Quer- und Längsstörungen durchzogen (vgl. Abb. 5 und 6). Es ist oberflächennah verwittert. Darüber folgen in der Talaue fluviatile Sedimente in Form von schlecht gerundetem Gesteinsschutt und Geröllen mit sandig-schluffiger Matrix [17, 18].

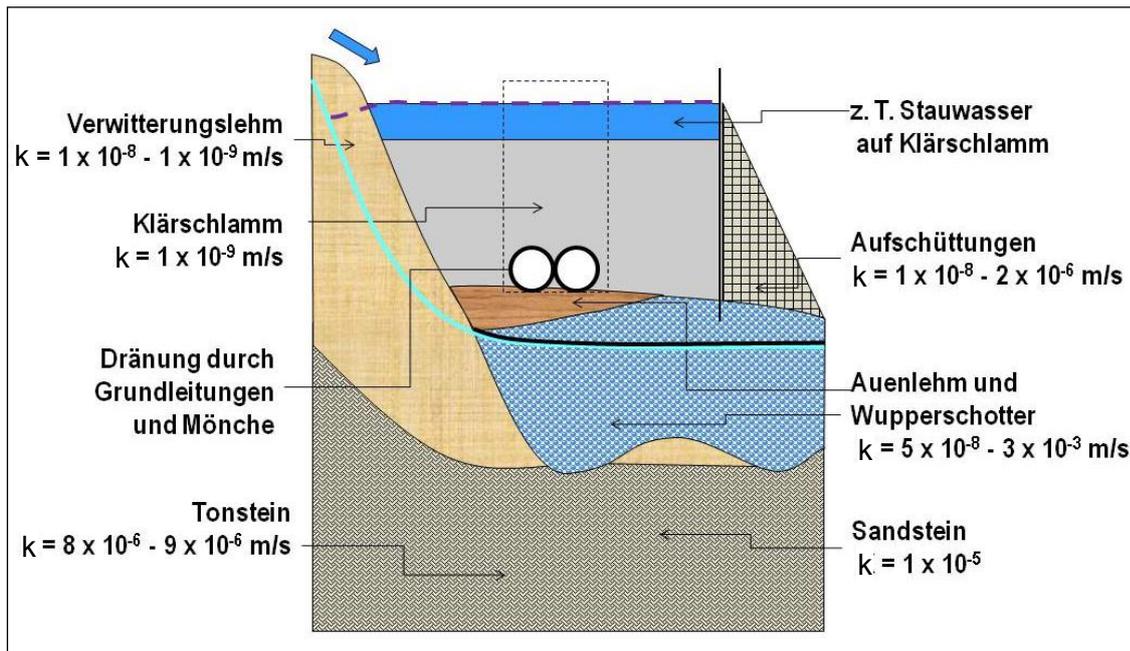


Abbildung 4: Schematische Darstellung der geologischen/hydrogeologischen Standortsituation [18]

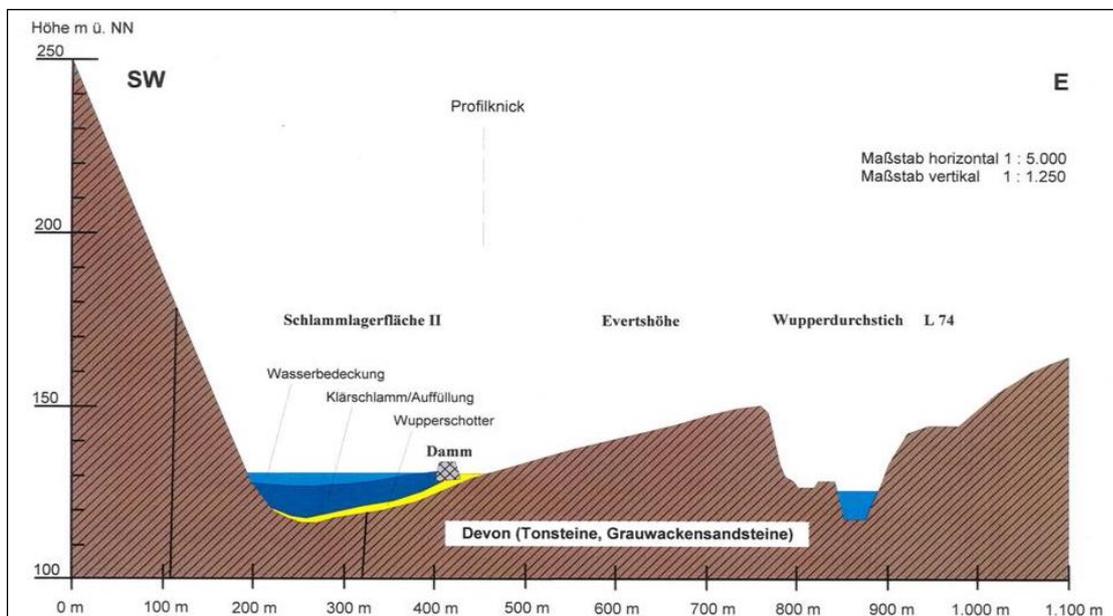


Abbildung 5: Schematischer geologischer Schnitt [19] (Schnittführung s. Abb. 6)



**Abbildung 6:** Geologische Karte [19] (Profildarstellung s. Abb. 5)

Die natürlichen Schichten werden weitflächig von anthropogenen Auffüllungen überlagert. Dabei handelt es sich einerseits um Klärschlamm und Aschen aus der Klärschlammverbrennung und andererseits um Felsbruch und Böden aus dem Wupperdurchstich sowie Bauschutt. Die Talsedimente und anthropogenen Auffüllungen streichen an den aufsteigenden Felshängen aus [17, 18].

Am Standort werden zwei Grundwasserstockwerke unterschieden. In den oberflächennahen Lockergesteinen ist ein Porengrundwasserleiter ausgebildet. Das Grundgebirge stellt einen Kluftgrundwasserleiter dar. Die hydrogeologischen Verhältnisse werden maßgeblich durch den Verlauf der Wupper bestimmt, welche die Vorflut für beide Stockwerke darstellt [17, 18].

Der Grundwasserspiegel korrespondiert mit dem Wasserspiegel der Wupper, der durch den Betrieb der Wehranlage zwischen 118,0 und 125,3 m NN liegt. Die Talablagerungen werden von Nordosten her dem alten Verlauf der Wupper folgend nach Südosten durchströmt. Auch im Festgestein korrespondiert die Grundwasserdruckfläche mit dem Wasserspiegel der Wupper. Die Grundwasser-



oberfläche ist unterhalb der schluffigen Lockergesteine gespannt. Je nach Ausbildung des Verwitterungstons stehen beide Grundwasservorkommen in hydraulischem Kontakt. Die Durchlässigkeit des Grundgebirges ist gering [17, 18].

Die Absperrdämme zwischen den Sedimentationsbecken I bis III und zur Wupper (vgl. Abb. 7) weisen gemäß [1] folgenden Aufbau auf (vgl. Tab. 3).

**Tabelle 3:** Angaben zum Aufbau der Absperrdämme zwischen den Sedimentationsbecken I bis III und zur Wupper [1]

Schichten	Dämme		
	Damm I zw. Becken I u. II	Damm I zw. Becken II u. II	Damm III zw. Becken III u. Wuper
1	Dammschüttung	Dammschüttung	Dammschüttung
2	alter Klärschlamm	alter Klärschlamm	
3	Schluffe	Torf	-
4	Wupperschotter	Wupperschotter	Wupperschotter
5	Fels	Fels	Fels
6	Klärschlamm	Klärschlamm	Klärschlamm
7	frischer Klärschlamm	frischer Klärschlamm	-

Die Zwischendämme innerhalb der Becken sind überwiegend aus Dammschüttmaterial aufgebaut [18].

### 3.4 Erdbebensituation

Nach DIN EN 1998-1/NA (2011-01) liegt das Gelände nicht im Bereich einer Erdbebenzone [12].

In dem 2011 erstellten Gutachten [1] wurden auf Basis zweier seismologischer Gutachten zur Abschätzung der Intensität und Bodenbeschleunigung für die Sedimentationsanlage Buchenhofen ergänzende Berechnungen für die Lastfälle eines Betriebs- und Bemessungserdbebens durchgeführt. Diese werden ebenfalls im vorliegenden Gutachten unter Einbezug des Teilsicherheitskonzeptes untersucht.



### 3.5 Klassifikation der Sedimentationsanlage gemäß DIN 19700

Nach DIN 19700-Teil 15 (Sedimentationsbecken), Abs. 3, werden Stauanlagen, deren Stauraum im weitesten Sinne dem Rückhalt absetzbarer Schwebstoffe und der (meist endgültigen) Ablagerung der betreffenden Sedimente dient, als Sedimentationsbecken bezeichnet [14].

Die Sedimentationsanlage Buchenhofen (Sedimentationsbecken I bis III) ist nach § 75, Abs. 3, des Wassergesetzes des Landes Nordrhein-Westfalen (LWG) in der Fassung vom 1. Juli 2005 (Stand 25.06.2005) eine Talsperre, da das Einstauvolumen mehr als 100.000 m<sup>3</sup> beträgt und die Absperrdämme eine Höhe von 5,0 m überschreiten. Das Einstauvolumen der Becken I bis III liegt zwischen ca. 55.000 m<sup>3</sup> und ca. 360.000 m<sup>3</sup>.

Aufgrund des jeweiligen Einstauvolumens der Sedimentationsbecken werden diese Becken gemäß DIN 19700-15, Punkt 4, der Talsperrenklasse 1 (Becken I auf der sicheren Seite liegend) zugeordnet, da das Einstauvolumen > 100.000 m<sup>3</sup> ist [14].

Nach DIN 19700, Teil 11 Talsperren, erfolgt die Einteilung von Talsperren in zwei Klassen (Klassen 1 u. 2). Die Klassenzuordnung dient der differenzierten Festlegung von Bemessungsanforderungen und trägt der Gesamtbedeutung bzw. dem Gefährdungspotenzial der jeweiligen Anlage Rechnung. Die Zuordnung erfolgt gemäß DIN 19700, Teil 11, nach folgenden Kriterien [13]:

Die Talsperrenklasse 1 umfasst große Talsperren, die im Allgemeinen durch folgende Punkte charakterisiert werden:

- Höhe (h) des Absperrbauwerkes vom tiefsten Punkt der Gründungssohle des Absperrbauwerkes bis zur Krone > 15 m oder Gesamtstauraum des Speicherbeckens ( $V_{\text{ges}}$ ) > 1.000.000 m<sup>3</sup>

Die Talsperrenklasse 2 umfasst mittlere und kleine Talsperren, die die Voraussetzungen für die Zuordnung zur Talsperrenklasse 1 nicht erfüllen [13].

Die Höhen der Absperrdämme der Becken I bis III inkl. des Abschlussdammes zur Wupper liegen gemäß der aktuellen Planungsunterlagen im Ist- bzw. im Bau-Zustand zwischen ca. 5,0 und ca. 15,0 m. Die Zwischendämme, die innerhalb der Becken vorhanden sind und während der Sanierungsmaßnahmen erhöht oder angelegt werden, weisen Höhen zwischen 7,0 und 11,0 m auf.



Somit müssen die Standsicherheitsnachweise für den Abschlussdamm des Beckens III (auf der sicheren Seite liegend) gemäß der Talsperrenklasse 1 (nach DIN 19700-11, Abs. 3, Satz 3) und die Nachweise für die übrigen Dämme gemäß der Talsperrenklasse 2 (nach DIN 19700-11, Abs. 3, Satz 4) geführt werden [13].

#### **4 Vorangegangene Untersuchungen**

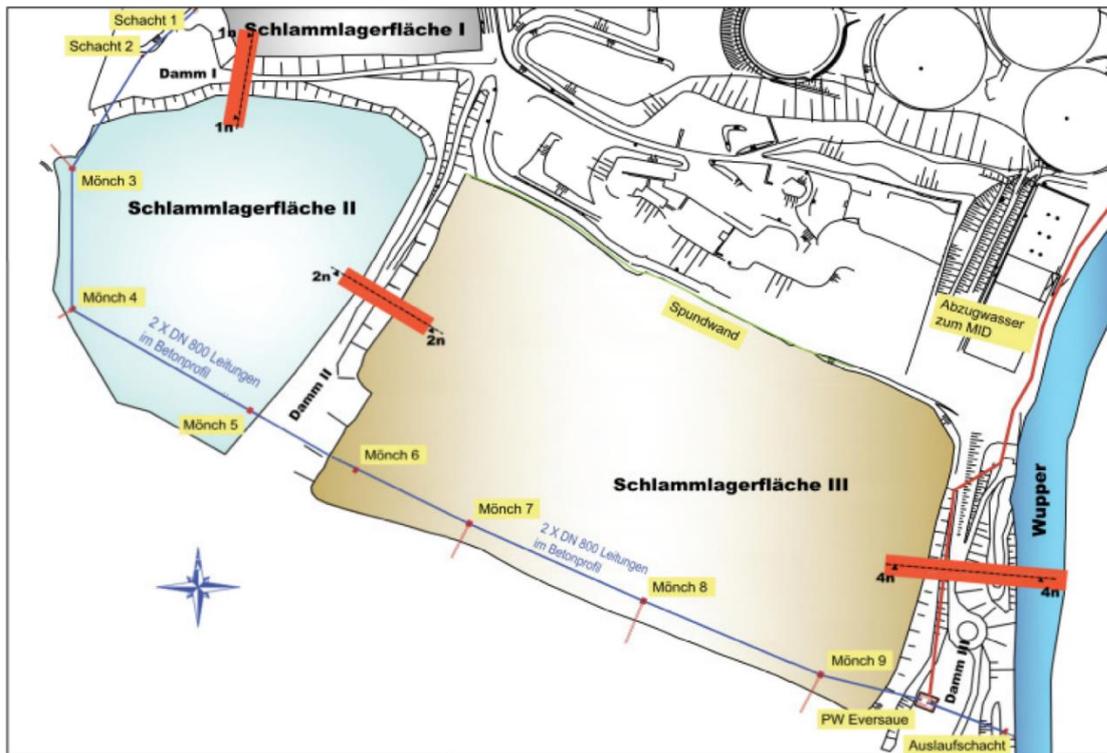
Im Jahre 2011 wurden durch das Ingenieurbüro Gell & Partner im Rahmen der Eigenüberwachung, im Auftrag des Wupperverbandes, vertiefte Überprüfungen der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit auf der Basis der DIN 19700-11, Abs. 3, für die Absperrdämme I und II (Talsperrenklasse 2) zwischen den Sedimentationsbecken I, II und III und dem Absperrdamm III zur Wupper (Talsperrenklasse 1) ausgeführt [1].

Des Weiteren wurde im Rahmen dieser Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsüberprüfungen auch eine Spundwand zwischen der Schlamm lagerfläche III und dem Kläranlagengelände untersucht. Diese Überprüfungen wurden auf der Grundlage der DIN 19700:2004-07 und der DIN 1054:2005-01 durchgeführt [18]. Die Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsüberprüfungen wurden unter Berücksichtigung des Globalsicherheitskonzeptes der DIN 1054:2005-01 durchgeführt [18].

Im Rahmen dieser Überprüfungen wurden folgende Versagensmechanismen überprüft und die nachstehenden Nachweise geführt.

- Böschungsbruch
- Gleitsicherheit
- Spreizspannung in der Aufstandsfläche der Dämme
- Grundbruchsicherheit
- Verflüssigung der Klärschlamm sedimente

Die Abbildung 7 zeigt die Berechnungsquerschnitte aus [1].



**Abbildung 7:** Lageplan der Berechnungsquerschnitte - Absperrdämme I bis III [1]

#### 4.1 Versagensmechanismen

Im Ergebnis der o.g. Untersuchungen wird festgestellt, dass sowohl unter Berücksichtigung der statischen als auch in den dynamischen Einwirkungskombinationen für alle untersuchten Dammquerschnitte in der Tragwiderstandsbedingung A ausreichende Sicherheiten gegen Böschungsbruch gegeben sind [1].

#### Gleitsicherheitsnachweise

Im Ergebnis der Gleitsicherheitsnachweise wird in [1] nachgewiesen, dass für den Damm II und Damm III ein Versagen infolge des Gleitens unkritisch ist. Aufgrund des Sohlsreibungswinkels von  $20^\circ$  im Bereich des Dammes I und vergleichbaren Abmessungen und günstigeren Randbedingungen in Bezug auf den Damm II liegt für diesen Damm gemäß [1] eine größere rechnerische Sicherheit gegenüber dem Gleiten als für den Damm II vor, so dass auf gesonderte Nachweise für den Damm I verzichtet wurde.



### **Spreizspannungsnachweise**

Für die Dämme I bis III wurde in den in [1] enthaltenen Spreizspannungsnachweisen (im Bereich der Aufstandsfläche der Dämme) eine ausreichende Sicherheit nachgewiesen (für statische u. dynamische Lastfälle).

### **Verflüssigung**

In der Auswertung der Betrachtungen in [9] zur Verflüssigung besitzen die Dämme I, II und III auch bei einer Bodenverflüssigung in der Regel eine ausreichende Sicherheit gegen Böschungsbruch. Lediglich für den Damm I sinkt der globale Sicherheitsbeiwert im Lastfall 3.2 mit vorhandenen  $\eta = 1,04$  unter erf.  $\eta = 1,10$  ab, unterschreitet aber nicht das Grenzwertgewicht  $\eta = 1,00$  [1].

## **4.2 Gebrauchstauglichkeit der Absperrdämme**

In [1] wurde auch die Gebrauchstauglichkeit der Dämme bewertet. Hierbei wurden die Sicherheit der Dämme gegenüber dem hydraulischen Grundbruch sowie die Rissicherheit und die Verformungen im Bereich betrachtet [1].

### **Hydraulischer Grundbruch**

Nach [9] ist die Sicherheit der Dämme gegenüber dem hydraulischen Grundbruch aufgrund der abdichtenden Wirkung der tieferen Horizonte der Klärsedimente sowie wegen der großen Breite der Dämme I und II in der Aufstandsfläche bzw. wegen der gut durchlässigen Wupperschotter in der Aufstandsfläche von Damm III gegeben. Aufgrund dieser Punkte wurde in [1] auf einen rechnerischen Nachweis verzichtet.

### **Rissicherheit und Verformungen**

Gemäß [9] wurden im Bereich der Dämme I bis III bisher keine Risse beobachtet. Nach [1] wurden Verformungsmessungen in die Bauwerksüberwachung mit aufgenommen.

Da in den Dämmen weder besondere Dichtungselemente noch andere Einbauten vorhanden sind, spielen die Aspekte Risse und Verformungen eher eine untergeordnete Rolle bei der (rechnerischen) Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit und sind wie die hydraulische Sicherheit regelmäßig bei der Bauwerksüberwachung zu prüfen [1].



## **5 Sanierungsmaßnahmen**

### **5.1 Geplante Sanierungen mit Herstellung bzw. Aufhöhung von Zwischendämmen**

Die Sanierung der Dämme und die Herstellung bzw. die Aufhöhung der Dämme wird im Folgenden kurz erläutert. Die ausführliche Beschreibung der o.g. Maßnahmen ist im Bericht zur Planfeststellung [18] enthalten.

Im ersten Schritt der Übererdung wird das Freibord an der kritischsten Stelle der Klärschlammfläche III erhöht. Zu diesem Zweck werden an der Nordflanke entlang der Spundwand die sogenannten Außendämme S 1 und S 2 aufgebracht. Die Außendämme werden insgesamt bis zu einer Höhe von ca. 132 m NHN errichtet. Die Erhöhung bringt auch eine Verbreiterung des Dammes mit sich. Für einen sicheren Baustellenverkehr ist von ca. 3,5 m Kronenbreite auszugehen (vgl. Anlage 4 in [18]).

Nach Abschluss dieser Maßnahmen ist der unter Standsicherheitsaspekten ungünstigste Bereich der Gesamtanlage verfüllt.

Im zweiten Schritt werden die vorhandenen Trenndämme DIII 1.1, DIII 2.1, DIII 3 und DIII 4 im Nordwesten der Fläche III gleichmäßig auf ca. 132 m NN erhöht und zur gefahrlosen Befahrbarkeit auf 3,5 m verbreitert (vgl. Anlage 4 in [18]).

Daraufhin beginnt die Übererdung der so entstandenen Teilbecken BIII 1 und BIII 2. Der Schlamm wird von den Rändern her im Vor-Kopf-Verfahren überschüttet. Als Einbaumaterial werden die Aschen der nördlich gelegenen Aschehalde verwendet (vgl. Anlage 4 in [18]).

Im Anschluss an die Umlagerung der Aschen wird der Außendamm S 3 aufgeschüttet und der überspülte Trenndamm DIII 2.3 aufgehört und zur gefahrlosen Befahrbarkeit verbreitert (vgl. Anlage 4 in [18]).

Um das Teilbecken BIII 6 abzutrennen, wird schließlich auch der alte Damm DIII 6 auf 132 m NHN erhöht (vgl. Anlage 4 in [18]).

Im nächsten Schritt werden die Trenndämme DIII 2.1 und DIII 2.3 durch die Aufhöhung des Trenndamms DIII 2.2 miteinander verbunden. Durch diese Verbindung entsteht das Teilbecken BIII 4 (vgl. Anlage 4 in [18]).



Im nächsten Schritt werden die Dämme DIII 1.2 - 1.4 aufgeschüttet. Um die Teilbecken BIII 3, 5 und 7 wiederherzustellen, werden anschließend auch die Trenndämme DIII 5 und DIII 7 errichtet (vgl. Anlage 4 in [18]).

Zuletzt wird in Klärschlammfläche III das ehemalige Wupperbett abgedeckt. Das Teilbecken BIII 8 wird hierfür nochmals in vier kleine Teilbecken (BIII 8.1 – 8.4) unterteilt. Da in diesem Bereich keine alten Trenndämme im Klärschlamm existieren, werden diese Trenndämme neu aufgeschüttet (Dämme D III.9 bis D III.10) (vgl. Anlage 4 in [18]).

Ist die Klärschlammoberfläche III vollständig bedeckt, soll zunächst eine Ruhephase bis zum Abklingen der Konsolidation erfolgen. Ein zu schneller Auftrag kann lokal zu hydraulischen Grundbrüchen führen (vgl. Anlage 4 in [1]).

Nachdem die alten Dammstrukturen durch die Entwässerung der Klärschlammfläche II wieder zu Tage treten, kann hier, auch parallel zu den Arbeiten in Klärschlammfläche III, mit der Überschüttung des Teildamms DII 2 begonnen werden. Die Schüttung kann von Norden und Südosten erfolgen. Anschließend kann der alte Trenndamm DII 1 ebenfalls aufgeschüttet werden. Parallel kann das Teilbecken BII 1 an der nordöstlichen Spitze der Klärschlammfläche II allseitig überschüttet werden (vgl. Anlage 4 in [18]).

Das so entstandene Teilbecken BII 2 wird durch den Trenndamm DII 3 in zwei einzelne Becken unterteilt (BII 2.1, BII 2.2). Der Trenndamm DII 3 wird von den Trenndämmen DII 1 und DII 2 aus aufgeschüttet (vgl. Anlage 4 in [18]).

Parallel kann auch bereits das Becken BII 3 im Bereich des alten Wupperbettes in zwei einzelne Becken unterteilt werden. Hierzu wird vom Trenndamm DII 1 ein neuer Trenndamm (DII 4) gegen die bestehende Böschung geschüttet (vgl. Anlage 4 in [18]).

Je nach Ergebnis der Kontrolluntersuchungen können die Bauphasen nach Verfüllung der Becken BIII 1 und BIII 2 auch parallel oder wiederholend stattfinden. So wird es voraussichtlich sinnvoll sein, die Erhöhung der Dämme sukzessive nur in dem Maß vorzunehmen, das benötigt wird. Der Freibord aller Dämme sollte immer mindestens 1,0 m betragen. Wird dieses Maß unterschritten, sind vor einer weiteren Übererdung der Becken zunächst die Außendämme weiter aufzuhöhen [18].

Detaillierte Angaben zum Ablauf des Erdbaus für die Ertüchtigung der vorhandenen Dämme zur Gewährleistung der Standsicherheit während der Einbauvorgänge im Bereich der Becken sowie



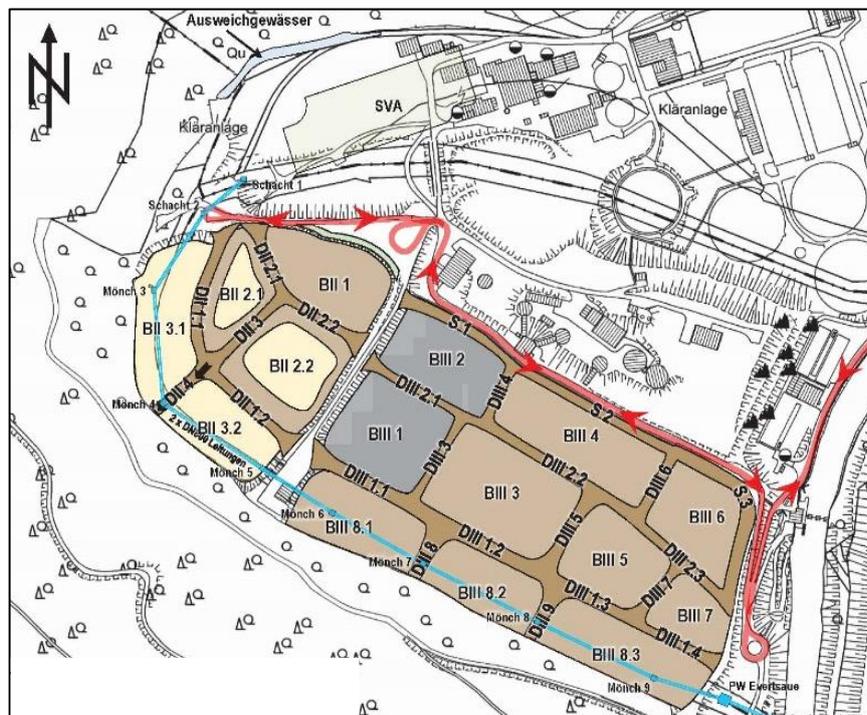
zum Aufbau der erforderlichen neuen Dämme können dem Bericht zur Planfeststellung [18] entnommen werden. Dies gilt auch für die Verfüllung der Becken und Übererdung der Dämme bzw. der Becken.

Die folgende Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung der vorhandenen und zu ertüchtigenden Dämme und der geplanten Zwischendämme in den Becken (vgl. auch Abb. 7).

**Tabelle 4:** Zusammenstellung vorhandener, zu ertüchtigender und geplanter Zwischendämme in den Becken [18]

Zwischendämme				
vorhandene	(nur teilweise) vorhandene		neu zu errichtende	
Becken III	Becken II	Becken III	Becken II	Becken III
DIII 1.1 bis DIII 1.4 DIII 2.1, DIII 3, DIII 4	DII 1, DII 2	DIII 2.2 bis DIII 2.3 DIII 5 bis DIII 7	DII 3, DII 4	DIII 8 bis DIII 10
Hinweis: In Teilbecken BIII 8 werden wahrscheinlich nur zwei Zwischendämme neu aufgeschüttet (DIII 8 u. DIII 9) und diese mittig versetzt. DIII 10 kann dann entfallen.				

Die Abbildung 8 zeigt die o.g. Becken und die Zwischen- bzw. Absperrdämme (vgl. auch Tab. 2).



**Abbildung 8:** Darstellung der Becken und Zwischendämme (Ausschnitt - Bauphasenplan) [18]



## **5.2 Einbauhöhen und Angaben zu den Zwischendämmen**

Der Klärschlamm dringt bei Einbau der Böden z.T. in deren Porenraum ein, wird verdrängt und letztendlich komprimiert. Durch die zeitweise Verdrängung steigt der Klärschlamm Spiegel an. Unter ungünstigen Annahmen (vollständige Verdrängung des Klärschlammes bei Verbreiterung der Dämme, deren Wiederherstellung oder Neubau) steigt der Schlamm Spiegel auf maximal 131 m NHN an [18]. Die Dämme wären dann (temporär) auf maximal 132 m NHN aufzuhöhen (vgl. Anl. 3.1 in [18]) und würden für die Profilierung des Endzustandes wieder abgetragen.

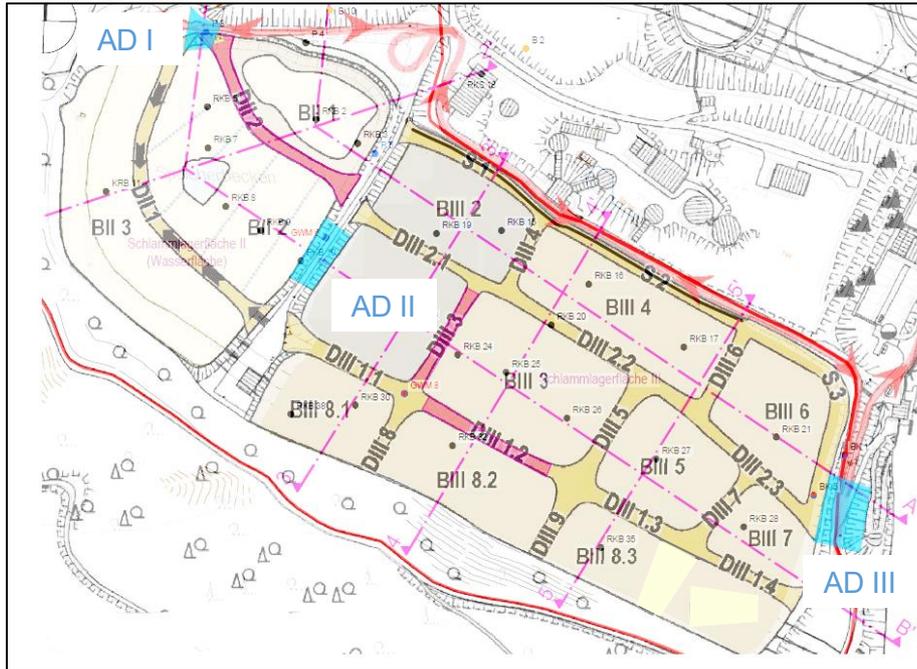
## **6 Nachweise gemäß DIN 19700 bzw. DWA-M 542**

### **6.1 Grundsätzliche Definitionen**

#### **6.1.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit**

Die Tragsicherheit von Absperrbauwerken einschließlich des Untergrunds ist gegeben, wenn die maßgebenden Tragwiderstände durch die Einwirkungen unter Einhaltung der für die verschiedenen Bemessungssituationen durch Sicherheitsbeiwerte vorgegebenen Sicherheitsabstände nicht überschritten werden.

In [1] von 2011 wurden die Standsicherheitsnachweise für die beiden Dämme zwischen den Schlammflächen I, II und III (Talsperrenklasse 2 gemäß DIN 19700-11:2004-07, Abs. 3) und für den Damm zur Wupper (Talsperrenklasse 1 gemäß DIN 19700-11:2004-07, Abs. 3) auf Grundlage der DIN 19700 nach dem Konzept der Tragwiderstandsbedingungen durchgeführt. Nach Einführung des DWA-M 542 2017 [16] erfolgt die Nachweisführung erneut mit dem Teilsicherheitskonzept. Ergänzend sind nun die Standsicherheiten der im Zuge der Sanierungsmaßnahmen anzupassenden vorübergehenden Zwischendämme für die Dämme DII 2, DIII 1.2 und DIII 3 zu überprüfen. Diese drei Dammquerschnitte werden exemplarisch für die vorhandenen Zwischendämme betrachtet, da diese die Zwischendämme in ihrem grundsätzlichen Aufbau repräsentieren bzw. die ungünstigsten Geometrien darstellen. Auf der sicheren Seite liegend werden die Zwischendämme im Rahmen der Standsicherheitsberechnungen ebenfalls als Talsperren der Klasse 2 bewertet.



**Abbildung 9:** Übersichtsplan mit Eintragung der berechneten Absperrdämme AD I bis III (blaue Markierung) und Zwischendämme (magentafarbene Markierung) [18]

Bei den Tragfähigkeitsnachweisen sind folgende Bemessungssituationen zu berücksichtigen:

- Ständige Situationen (BS-P), die den üblichen Nutzungsbedingungen des Tragwerks entsprechen, z.B. Stauspiegelhöhen bzw. Wasserdrücke während des „Normalbetriebs“,
- Vorübergehende Situationen (BS-T), die sich auf zeitlich begrenzte Zustände des Tragwerks beziehen, z.B. Bauzustand oder außerplanmäßiger Betriebszustand, schnellstmögliche Stauspiegelabsenkung, Hochwasserbemessungsfall 1,
- Außergewöhnliche Situationen (BS-A), die sich auf außergewöhnliche Bedingungen für das Tragwerk beziehen, z.B. Ausfall von Sicherungselementen, Hochwasserbemessungsfall bzw. maximierte Gebietsniederschläge, Ansatz ungünstiger Materialkennwerte,
- Situationen bei Erdbeben (BS-E).

Die Standsicherheitsnachweise erfolgen für die Geometrie der Absperrdämme im Ausgangszustand (aktuelle Ist-Situation), im Bauzustand 1 (Aufhohen der Bestandsdämme & Verbreiterung der Dammkrone zur Befahrbarkeit) und im Bauzustand 2 (erhöhte Bestandsdämme und mit Füllmaterial übererdete Sedimentationsbecken). Da die Bauzustände über einen Zeitraum von deutlich mehr als 2 Jahren bestehen werden, erfolgt die Berechnung ebenfalls für die ständige Bemessungssituation (BS-P). Somit entfällt die Betrachtung der vorübergehenden Situation (BS-T).

Die im Sanierungsplan für den Endzustand geplante Geländeprofilierung sieht eine Vereinheitlichung der Geländeoberfläche vor, bei der die Dammkronen der Absperrdämme 1 und 3 um 3,2



bzw. 4,5 m abgetragen werden und der Absperrdamm 2 mehrheitlich entfällt. Nach Abschluss der Profilierung der Abschlussdämme erfüllen diese nicht mehr die geometrischen Kriterien nach DIN 19700-11 für eine Talsperre. Für den Absperrdamm 3 ist im Endzustand dennoch die wasserseitige Böschung zur Wupper auf Ihre Standsicherheit zu überprüfen.

Die Bemessung für den Hochwasserfall der Wupper bzw. die maximierten Gebietsniederschläge und die schnellstmögliche Wasserspiegelabsenkung wird für den maßgeblichen Absperrdamm 3 für die Bemessungssituation BS-A durchgeführt.

Für den Absperrdamm 3 wird ebenfalls der Lastfall eines bordvollen Einstaus mit Klärschlamm betrachtet. Dies dient der Überprüfung der Standsicherheit des Absperrdammes für den Fall, dass während der Übererdungsmaßnahmen der Schlammfläche ein Zwischendamm bricht und infolgedessen das eingebrachte Füllmaterial sowie die Klärschlämme aus dem betroffenen Teilbecken in die restliche Lagerfläche einfließen und das Klärschlammniveau somit ansteigen lassen.

Als weiterer außergewöhnlicher Lastfall ist die Gefährdung infolge Bodenverflüssigung bei dynamischer Lasteinwirkung zu untersuchen. Nach [1] wird der junge Klärschlamm als „schweres“ Wasser ohne Scherfestigkeit abgebildet und dem älteren (teil-) konsolidierten Klärschlamm zunächst eine undrained Kohäsion von  $c_u = 10 \text{ kN/m}^2$  zugewiesen. Der alte Klärschlamm in der Wupperschleife und die Schluffe sind aufgrund der Auflast infolge der aufstehenden Abschlussdämme I und II nicht verflüssigungsgefährdet. Entsprechend [1] werden zur Überprüfung der Standsicherheit für die Schicht des älteren (teil-) konsolidierten Klärschlammes zur Modellierung der Verflüssigung ungünstige Materialkennwerte von  $c \approx 0 \text{ kN/m}^2$  ( $c = 1,0$  bzw.  $2,0 \text{ kN/m}^2$  für den Fall kinematisch nicht plausibler Gleitkörper) und  $\varphi = 1^\circ$  angesetzt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Tabellen 10.1 und 10.2 zusammengestellt.

Analog zu [1] erfolgt der Ansatz der Erdbebenlasten für Betriebs- und Bemessungserdbeben.

### **6.1.2 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit**

Zur Gewährleistung der Funktion und des Erscheinungsbilds des Tragwerks unter normalen Gebrauchsbedingungen sowie zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit sind entsprechende Nachweise zu führen. Je nach Bauwerkstyp ist beispielsweise nachzuweisen, dass Rissbildungen,



Durchsickerungen, Verformungen etc. auf ein für den planmäßigen Betrieb der Anlage verträgliches Maß reduziert werden. Die Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind für quasi ständige, häufige und seltene Bemessungssituationen durchzuführen.

### **6.1.3 Einwirkungen / Bauwerkszustände**

Folgende veränderliche Einwirkungen / Bauwerkszustände sind zu berücksichtigen:

- Verkehrslasten,
- Wasserdruck und Strömungskraft im Ausgangszustand,
- Wasserdruck und Strömungskraft im Bauzustand 1,
- Wasserdruck und Strömungskraft im Bauzustand 2.

Für die vorhandenen Klärschlammflächen kann davon ausgegangen werden, dass kein plötzliches Absinken des Stauspiegels eintreten wird. Die Wasserspiegelhöhen wurden daher auf Grundlage des Gutachtens [1] jeweils auf OK Klärschlamm angesetzt und die Lage der Sickerlinien als lineare Verteilung zwischen den Einstauhöhen angenommen.

Außergewöhnliche Einwirkungen / Bauwerkszustände:

- Einwirkungen infolge von Erdbeben,
- Berücksichtigung ungünstiger Materialkennwerte bei Gefährdung durch Bodenverflüssigung.

**Tabelle 5:** Bodenkenwerte

Nr.	Schichtbezeichnung	Reibungswinkel [°]	Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ]	Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]
1	Dammkörper Bestand			
	Absperrdämme 1 und 3	32,5	5	20
	Absperrdamm 2	35,0	5	20
2	alter Klärschlamm			
	Absperrdamm 1	20,0	15	15
	Absperrdamm 2	15	10	15
3	Schluff	25,0	10	19
4	Wupperschotter			
	Absperrdämme 1 und 2	35,0	0	21
	Absperrdamm 3	37,5	0	21
5	Fels	0	150	23
6	junger Klärschlamm	0	0	15
7	(teil-)konsolidierter Klärschlamm	0	10	15
8	Dammkörper neu	32,5	2	20
9	Füllmaterial	32,5	0	20

**Tabelle 6:** Geländehöhen und Lasten

Damm	Kronenhöhe über OK Klärschlamm [m]		Verkehrslasten [kN/m <sup>2</sup> ]
	Ausgangszustand	Erhöhung Bauzustand	auf Dammkrone
Absperrdamm 1	8,2 links 4,2 rechts	0	16,7
Absperrdamm 2	4,5 links 9,1 rechts	0	16,7
Absperrdamm 3	3,8 links (15,0 rechts zur Wupper)	0 – 0,8	16,7 33,3 auf Weg
Zwischendamm DII 2	2,0 links 0,5 rechts	0,9	16,7
Zwischendamm DIII 1.2	0 (bedeckt)	2,0	16,7
Zwischendamm DIII 3	0,2 links 0,2 rechts	2,0	16,7



Auf der sicheren Seite liegend werden in den betrachteten Zuständen die Wasserspiegelhöhen und der Ansatz von linear verlaufenden Sickerlinien jeweils auf Höhe OK Klärschlamm angenommen. Aus den Baugrunduntersuchungen auf der Schlammfläche I geht hervor, dass die Oberfläche ca. 4,0 m tief mit Wasser eingestaut ist. Dementsprechend werden im Ausgangszustand der Wasserspiegel und die Sickerlinie auf diese Höhe angepasst. In den folgenden Bauzuständen soll die Lagerfläche frei von Wasser sein, sodass dort die angesetzte Wasserspiegelhöhe der OK Klärschlamm entspricht.

#### 6.1.4 Bemessungssituationen

In Anlehnung an DWA-M 542 [16] wurden folgende Bemessungssituationen für die Absperr- und Zwischendämme betrachtet.

**Tabelle 7:** Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) nach DWA-M 542 [16]

Einwirkung	Bemessungssituation im GZT							
	BS-P				BS-A			
	P.1	P.2	P.3	P.4	E.1	E.2	A.1	A.2
Eigengewicht, Erddruck, Überschüttung	x	x	x	x	x	x	x	x
Verkehrslasten	x	x	x	x	x	x	x	x
Wasserdruck und Strömungskraft im Ausgangszustand	x				x	x		
Wasserdruck und Strömungskraft im Bauzustand 1		x			x	x	x	x
Wasserdruck und Strömungskraft im Bauzustand 2			x		x	x		
Wasserdruck und Strömungskraft im Endzustand				x				
Berücksichtigung ungünstiger Materialkennwerte							x	
Betriebserdbeben					x			
Bemessungserdbeben						x	x	
Hochwasser / maximierte Gebietsniederschläge / schnellstmögliche Wasserspiegelabsenkung								x



### 6.1.5 Tragfähigkeitsnachweise

Folgende Tragfähigkeitsnachweise sind gemäß DWA-M 542 [16] für Staudämme zu führen. Die anzuwendenden Nachweisverfahren entsprechen den Grundsätzen des EC 7-1:

- Nachweis der Böschung-/Geländebruchstabilität – Grenzzustand GEO-3,
- Nachweis entlang von potenziellen Gleitflächen – Grenzzustand GEO-3,
- Nachweis der lokalen Gleitsicherheit (u. a. Spreizspannungen) – Grenzzustand GEO-3,
- Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch bzw. Aufschwimmen – Grenzzustand HYD bzw. UPL,
- Nachweise der Sicherheit gegen Materialtransport.

### 6.1.6 Sicherheitsbeiwerte

Die im Folgenden angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte aus DWA-M 542 entsprechen im Wesentlichen dem EC 7-1. Für die Einwirkungen sind die in der Tabelle 8 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte zu verwenden.

**Tabelle 8:** Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) aus DWA-M 542 [16]

Einwirkungen	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
<b>HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen</b>				
Destabilisierende ständige Einwirkungen <sup>a)</sup>	$\gamma_{G,dst}$	1,05	1,05	1,00
Stabilisierende ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,stb}$	0,95	0,95	0,95
Destabilisierende veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,dst}$	1,50	1,30	1,00
Stabilisierende veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,stb}$	0	0	0
Strömungskraft bei günstigem Untergrund	$\gamma_H$	1,35	1,30	1,20
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund	$\gamma_H$	1,80	1,60	1,35
<b>GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit</b>				
Ständige Einwirkungen <sup>a)</sup>	$\gamma_G$	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,30	1,20	1,00
ANMERKUNG				
a) Einschließlich ständigem und veränderlichem Wasserdruck.				



Für die geotechnischen Kenngrößen sind gemäß DWA-M 542 die in der folgenden Tabelle 9 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte anzuwenden. Bei Bestimmung der Kennwerte gemäß DIN 4020 ist die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte gemäß EC 7-1 möglich (BS-P: 1,25; BS-T: 1,15; BS-A: 1,10). Dieser Ansatz liegt in Bezug auf die in Tabelle 11 angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte auf der sicheren Seite.

In der Bemessungssituation BS-E (Bemessungserdbeben) sind die Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungssituation BS-A anzusetzen. Diese Vorgehensweise weicht von den Regelungen des EC 7 ab (Teilsicherheitsbeiwerte dort 1,0), damit das bisher in DIN 19700-11 vorgegebene Sicherheitsniveau erhalten bleibt. Der Vollständigkeit halber wurde analog zu [1] ebenfalls der Lastfall Betriebserdbeben nach DIN 19700-11:2004-07 berechnet.

**Tabelle 9:** Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Kenngrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) gem. DWA-M 542 [16]

Bodenkenngröße	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
<b>HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen</b>				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ bzw. $\tan \varphi_u$ des dränierten bzw. des undränierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}$ , $\gamma_{\varphi_u}$	1,00	1,00	1,00
Kohäsion $c'$ bzw. $c_u$ des dränierten bzw. des undränierten Bodens	$\gamma_{c'}$ , $\gamma_{c_u}$	1,00	1,00	1,00
<b>GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit</b>				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ bzw. $\tan \varphi_u$ des dränierten bzw. des undränierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}$ , $\gamma_{\varphi_u}$	1,30	1,20	1,10
Kohäsion $c'$ bzw. $c_u$ des dränierten bzw. des undränierten Bodens	$\gamma_{c'}$ , $\gamma_{c_u}$	1,30	1,20	1,10

### 6.1.7 Gebrauchstauglichkeitsnachweise

Folgende Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind für Staudämme gemäß DWA-M 542 zu führen:

- Beurteilung der Verformungen,
- Beurteilung der Rissicherheit (Dichtungssysteme),
- Beurteilung der Gefährdung durch Beschädigungen,
- Beurteilung der Durchsickerung.



### 6.1.8 Lastfall Erdbeben

Die Angaben zu den Erdbebenlastfällen wurden wie nachfolgend beschrieben [1] entnommen:

Gemäß den Festlegungen in DIN 19700-11:2004-07 sind die Erdbebenbeanspruchungen bei Talsperren für von der DIN EN 1998-1 NA abweichende Wiederkehrperioden zu ermitteln. Es wird zwischen dem Betriebserdbeben und dem Bemessungserdbeben unterschieden. Die Wiederkehrperioden für Anlagen der Talsperrenklasse 2 betragen 100 Jahre (Betriebserdbeben) bzw. 1.000 Jahre (Bemessungserdbeben) und für Anlagen der Talsperrenklasse 1 500 Jahre (Betriebserdbeben) bzw. 2.500 Jahre (Bemessungserdbeben).

Auf Grundlage der in [1] zur Verfügung gestellten Daten werden analog die folgenden maßgebenden Bodenbeschleunigungen angesetzt:

- Betriebserdbeben E.1 mit einer Wiederkehrperiode

**$T = 100a$  (Talsperrenklasse 2)**

$I = 4,5 \text{ ah} = 16 \text{ cm/s}^2 \text{ av} = 11 \text{ cm/s}^2$

$1,1 \cdot 1,5 \times \text{ah} = 26 \text{ cm/s}^2$

**$T = 500a$  (Talsperrenklasse 1)**

$I = 5,8 \text{ ah} = 26 \text{ cm/s}^2 \text{ av} = 18 \text{ cm/s}^2$

$1,1 \cdot 1,5 \times \text{ah} = 43 \text{ cm/s}^2$

- Bemessungserdbeben E.2 mit einer Wiederkehrperiode

**$T = 1.000a$  (Talsperrenklasse 2)**

$I = 6,3 \text{ ah} = 33 \text{ cm/s}^2 \text{ av} = 23 \text{ cm/s}^2$

$1,1 \cdot 1,5 \times \text{ah} = 54 \text{ cm/s}^2$

**$T = 2.500a$  (Talsperrenklasse 1)**

$I = 6,8 \text{ ah} = 46 \text{ cm/s}^2 \text{ av} = 32 \text{ cm/s}^2$

$1,1 \cdot 1,5 \times \text{ah} = 76 \text{ cm/s}^2$

Die Absperrdämme I und II sind der Talsperrenklasse 2 zuzuordnen, der Absperrdamm III zwischen der Schlammflagerfläche III und der Wupper zählt dagegen zur Talsperrenklasse 1 nach DIN 19700-11:2004-07, Abs. 3. Da die Höhe des Damms III weniger als 40 m beträgt, dürfen die Erdbebennachweise wie bei den beiden Dämmen I und II ebenfalls mit quasistatischen Ersatzlasten geführt werden.

Nach DIN 19700-10 darf auf Nachweise gegenüber Erdbeben verzichtet werden, wenn der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung 4 % der Erdbeschleunigung (= ca.  $40 \text{ cm/s}^2$ ) unterschreitet. Im vorliegenden Fall trifft dies für die Dämme I und II (Talsperrenklasse 2: Bemessungswert  $\text{ah} = 33 \text{ cm/s}^2$ ) zu. Der Vollständigkeit halber werden dennoch rechnerische Nachweise in den Erdbebenlastfällen geführt [1].



## 6.2 Lastfälle, Tragfähigkeitsnachweise

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit werden gemäß DWA-M 542 (vgl. Abschnitt 6.1.4, Tabelle 7) die folgenden Lastfälle betrachtet:

- P.1 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im Ausgangszustand,
- P.2 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im Bauzustand 1,
- P.3 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im Bauzustand 2,
- P.4 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im Endzustand (Absperrdamm 3),
- E.1 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im Ausgangszustand und in den Bauzuständen 1 und 2, Einwirkungen infolge von Betriebserdbeben,
- E.2 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im Ausgangszustand und in den Bauzuständen 1 und 2, Einwirkungen infolge von Bemessungserdbeben,
- A.1 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im maßgebenden Bauzustand 1, Einwirkungen infolge maßgebender Erdbebenbelastung aus Bemessungserdbeben,
- A.2 Eigengewicht, Verkehrslasten, Wasserdruck und Strömungskraft im maßgebenden Bauzustand 1, Einwirkungen infolge Hochwasser bzw. maximierter Gebietsniederschläge und schnellstmöglicher Wasserspiegelabsenkung.

Die Verkehrslasten auf den Dämmen werden mit einer Ersatzflächenlast entsprechend SLW 30 mit  $p = 16,67 \text{ kN/m}^2$  auf einer Breite von 3 m berücksichtigt und entsprechen den Baugeräten, die zur Anlieferung und Übererdung der Lagerflächen mit Füllmaterial eingesetzt werden.

Die Berücksichtigung von ungünstigen Materialkennwerten (Lastfall A.1) erfolgt in der Form, dass für die Bodenkennwerte in den Böschungsbruchberechnungen für die verflüssigungsgefährdete Schicht des älteren (teil-) konsolidierten Klärschlammes zur Abbildung der Verflüssigung ungünstige Materialkennwerte von  $c \approx 0 \text{ kN/m}^2$  ( $c = 1,0$  bzw.  $2,0 \text{ kN/m}^2$  für den Fall kinematisch nicht plausibler Gleitkörper) und  $\varphi = 1^\circ$  angesetzt werden.

Die Berücksichtigung der Einwirkungen infolge von Erdbeben (Lastfall E.1 – Betriebserdbeben und E.2 Bemessungserdbeben) erfolgt auf der sicheren Seite liegend unter gleichzeitigem Ansatz der Verkehrslasten.



## 6.3 Berechnungsergebnisse

### 6.3.1 Grenzzustände der Tragfähigkeit

#### 6.3.1.1 Nachweis der Böschungs-/Geländebruchstabilität

Die Böschungsbruchnachweise wurden mit dem Programm Stability (GGU, Version 13.01) mit dem Teilsicherheitskonzept unter Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte der Tabellen 8 und 9 (Abschnitt 6.1.6) für den Grenzzustand GEO-3 geführt. Betrachtet werden hierbei kreisförmige Gleitlinien mit dem Lamellenverfahren nach BISHOP (DIN 4084). Für die Nachweise wurden die maßgebenden Schnitte mit der größten Dammkronenhöhe und der steilsten Neigung gewählt.

Die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen der Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) entsprechend Tabelle 7 (Abschnitt 6.1.4) sind in den folgenden Tabellen 10.1 und 10.2 zusammengefasst. Die graphische Darstellung der Belastungssysteme und die Berechnungsergebnisse der einzelnen Lastfälle können Anlage 2 entnommen werden.

**Tabelle 10.1:** Berechnungsergebnisse Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) der Absperrdämme, Ausnutzungsgrad  $\mu$

Absperrdamm 1	Ausgangszustand		Bauzustand 1		Bauzustand 2	
	links	rechts	links	rechts	links	rechts
BS-P	0,93	0,95	0,93	0,87	0,93	0,80
Betriebserdbeben E1	0,86	0,74	0,86	0,72	0,85	0,75
Bemessungserdbeben E2	0,90	0,74	0,90	0,77	0,90	0,79
Bodenverflüssigung A.1	-	-	0,96	0,82	-	-
Absperrdamm 2						
BS-P	0,84	0,89	0,79	0,83	0,75	0,81
Betriebserdbeben E1	0,79	0,82	0,75	0,76	0,68	0,74
Bemessungserdbeben E2	0,84	0,86	0,81	0,82	0,72	0,78
Bodenverflüssigung A.1	-	-	0,85	0,86	-	-
Absperrdamm 3						
BS-P	0,75	0,89	0,73	0,90	0,55	0,90
Betriebserdbeben E1	0,71	0,86	0,71	0,86	0,49	0,86
Bemessungserdbeben E2	0,75	0,91	0,75	0,91	0,52	0,92
Bodenverflüssigung A.1	-	-	0,98	0,91	-	-
Hochwasser / MGN A.2.1	-	-	0,62	-	-	-
Wasserspiegelabsenkung A.2.2	-	-	0,64	-	-	-
Bordvoller Einstau BS-P			-	0,89		



<b>Absperrdamm 3 Endzustand</b>		
BS-P	0,88	0,90
Betriebserdbeben E1	-	-
Bemessungserdbeben E2	-	-
Bodenverflüssigung A.1	-	-
Hochwasser / MGN A.2.1	-	-
Wasserspiegelabsenkung A.2.2	-	-

**Tabelle 10.2:** Berechnungsergebnisse Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) der Zwischendämme, Ausnutzungsgrad  $\mu$ 

<b>Zwischendamm DII 2</b>	<b>Bauzustand 1</b>	
	<b>links</b>	<b>rechts</b>
BS-P	0,86	nicht
Betriebserdbeben E1	0,86	maßgebend,
Bemessungserdbeben E2	0,87	da eingestaut
Bodenverflüssigung A.1	0,81	0,93
<b>Zwischendamm DIII 1.2</b>		
BS-P	0,84	0,90
Betriebserdbeben E1	0,73	0,81
Bemessungserdbeben E2	0,77	0,85
Bodenverflüssigung A.1	0,89	0,86
<b>Zwischendamm DIII 3</b>		
BS-P	0,84	0,73
Betriebserdbeben E1	0,76	0,67
Bemessungserdbeben E2	0,79	0,72
Bodenverflüssigung A.1	0,79	0,82

Einstau mit jungem Klärschlamm

Für alle Lastfälle und Dämme werden die Standsicherheitsnachweise für den Grenzzustand GEO-3 mit ermittelten Ausnutzungsgraden zwischen  $\mu = 0,49$  und  $\mu = 0,96$  unter Einhaltung des Kriteriums  $\mu \leq 1,0$  erfolgreich geführt. Da die Dämme mehrheitlich beidseitig eingestaut sind, wurde auf die Bezeichnung der Böschungen mit Luft- und Wasserseite verzichtet. Diese sind in Schnittrichtung mit links und rechts benannt und die angrenzenden Lagerflächen entsprechend beschriftet.

Wie in Abschnitt 6.1.1 und 6.2 ausgeführt, wurde im Lastfall A.1 der Einfluss von ungünstigen Materialkennwerten auf die Standsicherheit der vorhandenen Böschungen untersucht. Zur Modellierung der Bodenverflüssigung wurden für die Schicht des älteren (teil-) konsolidierten Klärschlammes der Reibungswinkel und die Kohäsion auf nahezu Null gesetzt ( $c \approx 0 \text{ kN/m}^2$  bzw.



$c = 1,0$  bis  $2,0 \text{ kN/m}^2$  für den Fall kinematisch nicht plausibler Gleitkörper und  $\varphi = 1^\circ$ ). Der Lastfall wurde für den maßgebenden Bauzustand 1 unter der maßgebenden Belastung des Bemessungs-erdbebens berechnet. Es ist davon auszugehen, dass die eingelagerten Klärschlämme mit fortschreitender Konsolidation eine Erhöhung ihrer kohäsiven Eigenschaften erfahren, so dass in den Berechnungen eine Kohäsion von  $c = 2,5 \text{ kN/m}^2$  angesetzt werden kann.

Die ermittelten Ausnutzungsgrade zwischen  $\mu = 0,75$  und  $\mu = 0,98$  zeigen, dass die betrachteten Dämme auch bei einer Bodenverflüssigung unter Einhaltung des Kriteriums  $\mu \leq 1,0$  als ausreichend standsicher beurteilt werden können.

Das im Rahmen der Sanierungsplanung erstellte Übererdungskonzept der Schlammflächen sieht ein kleinräumiges und gleichmäßiges Einbringen des Füllmaterials in geringmächtigen Lagen von den Zwischendämmen aus vor. Hierbei werden große Höhendifferenzen der Einstauhöhen in den einzelnen Teilbecken vermieden und somit sind ungleichmäßige Belastungen auf die Zwischendämme nicht gegeben.

Zur Überprüfung der Standsicherheit im Versagensfall eines Zwischendamms bildet der Lastfall bordvoller Einstau den ungünstigen Fall eines Anstiegs des Klärschlammniveaus ab. Der ermittelte Ausnutzungsgrad von  $\mu = 0,89$  zeigt, dass ein Anstieg der Einstauhöhe keinen Einfluss auf die Standsicherheit der wupperseitigen Böschung des Absperrdamms 3 hat.

Ein Einfluss des bordvollen Einstaus auf die Gesamtstandsicherheit des Damms ist jedoch nicht auszuschließen. Daher ist der Anstieg der klärschlammseitigen Belastung ebenfalls im Nachweis der Gleitsicherheit zu berücksichtigen (Abschnitt 6.3.1.3.).

### **6.3.1.2 Nachweis der Aufnahme der Spreizspannungen**

Im Rahmen der Bewertung der Grenzzustände der Tragfähigkeit ist der Nachweis der Aufnahme der Spreizspannungen in der Dammaufstandsfläche zu führen. Hierbei ist zu belegen, dass die aus der Dammschüttung resultierenden Spreizspannungen in der Sohle aufgenommen werden können. In Abbildung 10 ist die Verteilung der Normal- und (Spreiz-) Schubspannungen schematisch wiedergegeben.

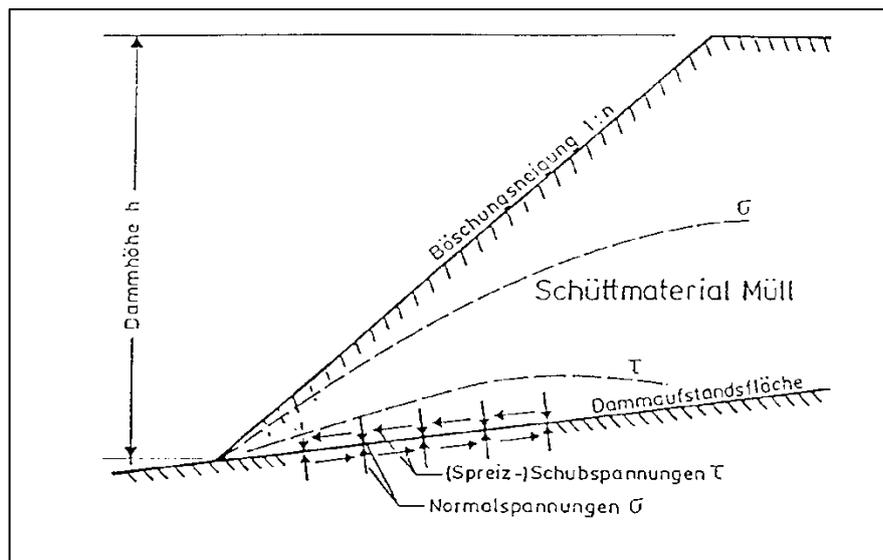
Aus der Spannungsverteilung wird deutlich, dass der maßgebende Bereich am Fußpunkt der Böschung liegt, da hier der Quotient aus Normal- und Schubspannung am kleinsten ist.



Die Spannungsverteilung ist dabei von folgenden Faktoren abhängig:

- Böschungsneigung und -höhe,
- Scherfestigkeit des Schüttmaterials und
- Neigung der Aufstandsfläche.

Die Dammaufstandsflächen im Bereich des jeweiligen Dammfußes werden für beide Dämme als eben angenommen.



**Abbildung 10:** Verteilung der Normal- und Schubspannungen in der Sohle bei einem rolligen Damms auf nichtbindigem Untergrund (nach RENDULIC)

Die lokale Standsicherheit am Böschungsfuß (Spreizsicherheit) ist für den Grenzzustand des Verlustes der Lagesicherheit (EQU) mit den Sicherheiten des BS-P nachzuweisen. Der Nachweis wird nach KAST geführt, welcher die Verfahren von RENDULIC, BRENDLIN und BRAUNS um Einwirkungen aus Strömung und Kohäsion erweiterte:

$$\tan \varphi_{S, \text{erf.}} = \left[ \frac{E_{\text{ahg}} \cdot \gamma_{G, \text{sup}} + \frac{E_{\text{ahc}}}{\gamma_c} + S_{W, h}}{(E_{\text{avg}} + G_v) \cdot \gamma_{G, \text{stb}} - S_{W, v}} \right] \cdot \gamma_{\text{st}}$$

Dabei ist:

$\tan \varphi_{S, \text{erf.}}$  = erforderlicher Sohlreibungswinkel in der Aufstandsfläche

$E_{\text{ahg}}$  = horizontaler Erddruckanteil aus dem Eigengewicht

$E_{\text{avg}}$  = vertikaler Erddruckanteil aus dem Eigengewicht

$E_{\text{ahc}}$  = horizontaler Erddruckanteil aus der Kohäsion

$S_{W, h}$  = horizontaler Wasserdruckanteil aus der Strömung



$S_{Wv}$  = vertikaler Wasserdruckanteil aus der Strömung  
 $G_v$  = vertikaler Gewichtskraftanteil

Dabei berechnen sich die Kräfte zu:

$$E_{ahg} = \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \gamma \cdot k_{ahg} \quad (k_{ahg} = \text{Erddruckbeiwerte für ebene Gleitfläche nach Blum})$$

$$E_{avg} = E_{ahg} \cdot \tan\beta$$

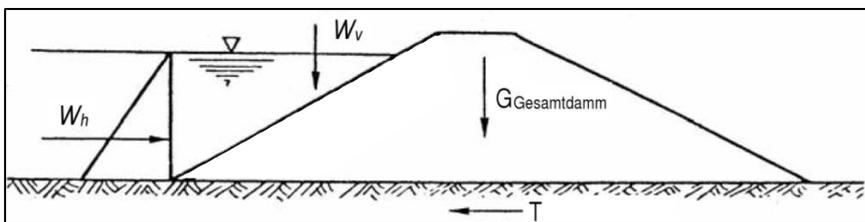
$$G_v = A \cdot \gamma_{\text{Boden}}$$

$$E_{ahc} = -h \cdot c \cdot k_{ahc}$$

Infolge der zusätzlichen Auflast durch die Klärschlammüberdeckung der Absperrdämme I und II sowie der Zwischendämme sind die Gleit- und Grundbruchsicherheiten sichergestellt. Lediglich der wupperseitige Dammfuß des Absperrdammes 3 liegt frei. In [1] wurde die Standsicherheit des Dammfußes mit Hilfe der Gleitkörpermethode nach JANBU für unterschiedliche Fußkeilgeometrien in GGU Stability überprüft und mit ausreichender Sicherheit nachgewiesen. Da die Sanierungsmaßnahmen der Klärschlammbecken keinen Einfluss auf die Geometrie des wupperseitigen Dammfußes nehmen, kann eine erneute Überprüfung der Standsicherheit des Dammfußes an dieser Stelle entfallen.

### 6.3.1.3 Nachweis der Gleitsicherheit

Beim Nachweis der Gleitsicherheit eines Dammkörpers wirkt als treibende Kraft die horizontale Wasserdruckkraft auf der Stauseite (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Gleitsicherheitsnachweis Damm (Prinzipdarstellung)

Zur Berechnung der aufnehmbaren Schubspannung in der Dammsohle werden das Gewicht des Dammkörpers und die vertikale Wasserauflast  $W_v$  angesetzt. Mit dem Sohlreibungswinkel  $\delta$  ergibt sich der Ausnutzungsgrad zum Nachweis der Gleitsicherheit eines Dammes zu:



$$\mu = \frac{F_d}{R_d} = \frac{W_{H,k} \cdot \gamma_G}{(G_k + W_{V,k}) \cdot \frac{\tan \varphi'}{\gamma_{Gl}}} \leq 1,0$$

mit:

$$W_{H,k} = \gamma_w \cdot \frac{H_w^2}{2}$$

$$W_{V,k} = \gamma_w \cdot \frac{H_w^2}{2} \cdot \cot \beta$$

Der Nachweis kann für den Absperrdamm 2 und die Zwischendämme entfallen, da diese beidseitig und etwa auf gleicher Höhe eingestaut sind und so ein Abschieben der Dämme in eine Richtung nicht möglich ist.

Nach [1] erbringt der Nachweis für den Absperrdamm 1 ausreichende Standsicherheiten, da dieser im Vergleich mit Absperrdamm 2 bei ähnlicher Geometrie den höheren Sohlreibungswinkel aufweist.

Der Gleitnachweis für Absperrdamm 3 kann laut [1] auf Grund der großen Kubatur, der niedrigen Sickerlinie und der Gründung auf Wupperschotter mit einem Sohlreibungswinkel von  $37,5^\circ$  als unkritisch eingestuft werden.

Bei der Überprüfung des Lastfalles bordvoller Einstau des Absperrdammes 3 überwiegt ebenfalls das Eigengewicht des Dammes aufgrund seiner sehr großen Kubatur im Verhältnis zu der erhöhten horizontalen Belastung durch den Klärschlamm, so dass der Gleitnachweis erbracht werden kann.

#### 6.3.1.4 Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch / Aufschwimmen

Der Nachweis des Grenzzustands des Versagens durch hydraulischen Grundbruch (HYD) ist für den luftseitigen Böschungsfuß zu führen, wenn der anstehende Boden vertikal (von unten nach oben) durchströmt wird. Es ist nachzuweisen, dass die Bemessungswerte der ungünstigen, destabilisierenden Einwirkungen durch die Strömungskraft  $S'_k$  nicht größer sind als diejenigen der günstigen, stabilisierenden Einwirkungen aus der Eigenlast  $G'_k$  des durchströmten Bodenkörpers unter Auftrieb.



Damit ergibt sich die Grenzzustandsbedingung zu:

$$S'_k \cdot \gamma_H \leq G'_k \cdot \gamma_{G,stab}$$

mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_H$  für die ungünstig wirkende Strömungskraft und  $\gamma_{G,stab}$  für die günstig, stabilisierend wirkende Eigenlast des Bodenprismas. Somit darf die Bemessungsgröße der Strömungskraft die Bemessungsgröße der Gewichtskraft des Bodens nicht überschreiten.

Der Nachweis des Grenzzustands des Versagens durch Auftrieb (UPL, Aufschwimmen einer gering durchlässigen Bodenschicht) ist zu führen, wenn in Folge einer hydrostatischen Auftriebskraft bzw. der nach oben gerichteten Strömungskraft des Grundwassers der Verlust der Lagesicherheit einer Bodenschicht besteht.

Die betrachteten Absperr- und Zwischendämme weisen eine breite Aufstandsfläche auf (ca. 35 bis 45 m). Auf Grund der abdichtenden Wirkung der unterlagernden alten Klärsedimente im Bereich der Absperrdämme I und II sowie des gut durchlässigen Wupperschotters bei Absperrdamm III ist die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch auch ohne rechnerischen Nachweis gegeben.

Weiterhin ist aufgrund der nicht vorhandenen aufwärtsgerichteten Strömung hier auch die Gefahr des Aufschwimmens nicht vorhanden. Auch dieser rechnerische Nachweis kann entfallen.

### **6.3.1.5 Nachweise der Sicherheit gegen Materialtransport**

Obwohl die Schüttmaterialien der Dämme innerhalb großer Bandbreiten variieren, stellen sowohl die Absperrdämme als auch die Zwischendämme in ihrer Bauweise Homogendämme dar. Sie enthalten weder Dichtungszonen noch Drainagekörper. Aufgrund dessen und unter der Annahme, dass das feinkörnige eingelagerte Sediment des Klärschlammes bei Materialtransporten in Richtung Dammkörper eher zu einer Abminderung des Durchlässigkeitsbeiwertes des Deichmaterials (also einer größeren Abdichtungswirkung) beitragen würde, können an dieser Stelle rechnerische Betrachtungen zur Erosions- und Suffosionsbeständigkeit entfallen.

Die Überprüfung der hydraulischen Sicherheit ist Teil der Bauwerksüberwachung.



## 6.4 Gebrauchstauglichkeit

Zur Gewährleistung der dauerhaften Funktionstüchtigkeit der Dämme unter normalen Gebrauchsbedingungen sowie zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit sind gemäß DWA-M 542 [16] Nachweise der Gebrauchstauglichkeit zu führen.

Folgende Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind für Dämme zu bewerten:

- Beurteilung der Verformungen,
- Beurteilung der Rissicherheit (Dichtungssysteme),
- Beurteilung der Gefährdung durch Beschädigungen,
- Beurteilung der Durchsickerung.

### Verformungen

Die Dämme der Klärschlammflächen wurden im Zeitraum von 1925 bis 1971 errichtet und erweitert bzw. erhöht. Nach einer Standzeit von nun mehr als 50 Jahren ist sicher davon auszugehen, dass die Setzungen infolge Eigengewicht und temporären Belastungen durch regelmäßigen Einstau im Bereich des Dammes und des Dammauflagers abgeschlossen sind. Weitere signifikante Verformungen sind auch bei Steigerung der Auflast durch Erhöhung der Dämme im Rahmen der Sanierungsmaßnahmen nicht zu erwarten. Ggf. eintretende Verformungen werden zum Zeitpunkt der Endgestaltung der Fläche ausgeglichen.

### Rissicherheit / Gefährdung durch Beschädigungen

Nach [1] wurden und werden im Rahmen der Bauwerksüberwachung Untersuchungen auf Risse und Verformungen durchgeführt. Bis dato wurde keine Rissbildung beobachtet. Da es sich bei den Dämmen um Homogendämme ohne Dichtungselemente handelt, bedarf auch die Gefahr einer Beschädigung von Dichtungen infolge Verformungen keiner weiteren Betrachtung.

### Durchsickerung

Die Beurteilung der Durchsickerung dient gemäß DWA-M 542 [16] der Beurteilung von Wasserverlusten. Dies betrifft insbesondere Absperrbauwerke mit Dichtungselementen und / oder Dauereinstau.

Die im Rahmen der Bauwerksüberwachung regelmäßig durchgeführten Messungen zeigen nach [1] ausschließlich Wasserstände und daraus abgeleitete Sickerlinien, die nicht oberhalb der jeweiligen luftseitigen Böschungsfüße (betr. Absperrdamm I und III) austreten.



## **7 Erdbautechnische Hinweise zur Erhöhung der Dämme & Anforderungen an die Ausführung**

Die folgenden Punkte gelten für die Erweiterung der Zwischendämme im Bereich der Sedimentationsbecken.

Vor Beginn der Dammverbreiterung sind im Bereich der Aufstandsfläche sowie der Böschungen der bestehenden Dammkörper ggf. mögliche vorhandene Oberboden- bzw. Vegetationsschichten sowie jede Art von Bewuchs vollständig und flächendeckend zu entfernen.

Für den Fall, dass im Bereich der Böschungsoberkante weiche Schichten angetroffen werden, sind diese auszukoffern bzw. zu entwässern. Zur Gewährleistung der Standsicherheit der jeweils aufgebauten Erdkörper ist eine gute Verzahnung des aktuellen Dammkörpers mit dem aufgeschütteten Erdkörper zu gewährleisten.

Beim Anschütten von Böden sind Stufen mit einer Höhe von ca. 0,6 m bis 1,0 m Verzahnung auszubilden. Eine ausreichende Entwässerung des Verzahnungsbereiches ist sicherzustellen.

Die einzelnen Lagen sind zur Entwässerung mit einem Quergefälle nach außen einzubauen und zu verdichten, bei bindigen Böden auch glatt zu walzen. Unmittelbar vor dem Aufbringen der nächsten Schicht ist der Boden wieder aufzurauen.

Der Einbau und die Verdichtung sind den Witterungsverhältnissen anzupassen und ggf. bei nasser Witterung einzustellen. Durch Niederschlag und mechanische Beanspruchung aufgeweichte Böden sollten nicht überschüttet werden. Diese Böden sind auszubauen oder zu verdichten, nachdem diese abgetrocknet bzw. mit Bindemitteln verbessert wurden.

Für das Material der Dammaufschüttung und dessen Verdichtungsanforderungen gelten die Vorgaben der ZTV E-StB 17 sowie der ZTV-W [17]. Es eignen sich ausschließlich verdichtungswillige und reibungsbegabte Böden. Insbesondere kommen weitgestufte Sand-Kies-Gemische (z.B. Kies-sande mit einer Körnung 0/32 ( $U > 7$ ) oder Schotter-Splitt-Sand-Gemische mit einer Körnung 0/45 ( $U > 7$ ) bzw. RCL-Material mit entsprechendem Eignungszeugnis) in Betracht.

Beim Einbau von Erdstoffen ist zu beachten, dass das Größtkorn nicht größer als  $2/3$  der zulässigen Schütthöhe sein darf.



Das Material ist lagenweise einzubauen. Ein Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} \geq 98 \%$  der einfachen Proctordichte und ein  $E_{v2}$ -Wert  $\geq 100 \text{ MN/m}^2$  (GW, GI) bzw.  $E_{v2}$ -Wert  $\geq 80 \text{ MN/m}^2$  (SW, SI) sind nachzuweisen. Im obersten Meter unterhalb des Planums ist das Material auf einen Wert  $D_{Pr} \geq 100 \%$  zu verdichten.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass aufgrund von Erfahrungswerten vertikale Verformungen der Dammkrone infolge der Setzungen der Dammbaustoffe in der Regel nicht vermeidbar sind. Dies ist beim Aufbau des jeweiligen Dammes zu beachten.

Um die o.g. möglichen Setzungen zu reduzieren, wird empfohlen, den Dammkörper aus überwiegend gut abgestuften, verdichtungsfähigen und frostunempfindlichen Erdstoffen herzustellen.

Des Weiteren sind die Angaben und Hinweise der ZTV E-STB 2017 und der ZTV-W [17] für die Herstellung von Erdbauwerken und den Aufbau von Dammkörpern bzw. die Erweiterung von Dammkörpern zu berücksichtigen.

Die Ausführung von baubegleitenden Lastplattenversuchen zur Überprüfung der Verdichtung wird empfohlen.



## 8 Konsolidationsverhalten

Unabhängig von den Tragfähigkeiten der Dämme ist für die Übererdung der Schlammflächen auch das Konsolidationsverhalten des vorhandenen Klärschlammes zu bewerten. Wird die Belastung des Klärschlammes im Zuge der Übererdung zu schnell aufgebracht, besteht die Gefahr eines zu großen Anstiegs des Porenwasserdrucks, der zu einer temporären Endfestigung des Klärschlammes führen kann. Ein unkontrolliertes Eindringen des Materials der Übererdung in den Klärschlamm kann die Folge sein. Aus diesem Grund ist das Höhenmaß der Übererdung je Zeiteinheit zu begrenzen.

### 8.1 Theorie

Mit Konsolidierung wird die Setzung eines wassergesättigten, bindigen Materials bezeichnet. Bei einer Spannungsänderung (Auflast) wird die zusätzliche Spannung zunächst durch das Porenwasser aufgenommen. Dieser Druckanstieg bewirkt ein Abströmen des Porenwassers bis schließlich die Zusatzspannungen durch das Korngerüst aufgenommen werden. Dieser Prozess ist als ein instationärer Vorgang eine Funktion der Zeit.

Nach [19] lässt sich die Konsolidation mittels einer negativen natürlichen Exponentialfunktion beschreiben.

Die zeitabhängige Setzung  $S_T$  einer einseitig entwässernden Schicht berechnet sich danach wie folgt:

$$S_T = H \cdot \frac{\sigma}{E_s} (1 - e^{-\tau_V}) \quad (1)$$

Dabei gilt:

$$\tau_V = \frac{k \cdot E_s \cdot T}{H^2 \cdot \gamma_W} \quad (2)$$

mit:

- $S_T$  = Absenkung der Oberfläche der konsolidierenden Schicht in [m] bis zum Zeitpunkt T in [sec]
- H = ursprüngliche Höhe der konsolidierenden Schicht in [m]
- $\sigma$  = Konsolidationsspannung in [MN/m<sup>2</sup>]



$E_s$	=	Steifemodul in [MN/m <sup>2</sup> ]
$\tau_v$	=	Zeitfaktor [1]
$k$	=	Permeabilität [m/s]
$\gamma_w$	=	Wichte des Wassers in [MN/m <sup>3</sup> ]

Das im Verlauf der Konsolidierung bis zum Zeitpunkt T freiwerdende Wasservolumen  $V_T$  berechnet sich zu:

$$V_T = S_T \cdot A \quad (3)$$

mit:

$A$  = Grundfläche der konsolidierenden Schicht in [m<sup>2</sup>]

Die Frage, ob eine Konsolidierung als exponentiell abklingender Prozess verläuft, hängt davon ab, ob sich innerhalb der betrachteten Schicht ein Porenwasserüberdruck aufbauen kann oder nicht.

Bei einer Aufschüttung ist zu klären, ob der Materialauftrag schneller erfolgt, als Wasser aus der Schicht austritt und sich so ein Überdruck aufbauen kann.

Für eine einseitige Entwässerung in vertikaler Richtung nur zur Deponieoberfläche berechnet sich die kritische Aufhöhungsrate  $h_k$  zu:

$$h_k = \frac{k \cdot E_s}{H \cdot \gamma} \quad (4)$$

mit:

$\gamma$  = Wichte des aufgespülten Materials in [MN/m<sup>3</sup>]

Solange dieser kritische Wert unterschritten wird, findet ausschließlich eine Sofortsetzung statt.

## 8.2 Abschätzung der kritischen Aufhöhungsrate

Wie vorstehend erläutert wurde, hängt das Konsolidierungsverhalten des Klärschlammes i.W. von der Durchlässigkeit, dem Steifemodul und der Geschwindigkeit der Aufschüttung ab.



Für den Standort Buchenhofen wurden im Jahr 2001 für die Klärschlammfläche II die Ergebnisse von Materialuntersuchungen hinsichtlich einer Abdeckung mit Aschen untersucht [6]. Die maßgeblichen Kennwerte werden aus diesen Untersuchungen der Klärschlämme hergeleitet:

- Wichte des Klärschlammes  $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$
- Steifemodul an der Basis der Klärschlammablagerungen  $E_S = 1,5 \text{ MN/m}^2$
- Durchlässigkeit des an der Basis komprimierten Klärschlammes  $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$

Mit diesen Werten wird in (4) für die Basis der Klärschlammflächen in durchschnittlich 7,0 m Tiefe die kritische Aufhöhungsgeschwindigkeit mit 0,45 m/a errechnet.

Sofern die jährliche Auftragshöhe unter dem theoretisch zulässigen Wert liegt bzw. diesen bei größerer Überlagerungshöhe gerade erreicht, treten ausschließlich Sofortsetzungen auf.

Der Eintritt einer Sofortsetzung bedeutet, dass die Setzungen durch Profilierung und Rekultivierung zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht stehen und zu jeder Zeit in dem Maße fortschreiten, wie die Profilierungs- und Rekultivierungsschicht aufgebracht bzw. die daraus resultierenden Auflasten erhöht werden.

Bei der Bewertung des Ergebnisses ist zu berücksichtigen, dass sich das Systemverhalten mit gängigen Bruchmechanismen nicht ausreichend genau darstellen lässt. Die Abschätzung setzt streng genommen voraus, dass die Belastung ideal gleichmäßig erfolgt, was in der Praxis nicht realisiert werden kann. Das Aufhöhungsmaß für ein Jahr wird aufgrund des geringen Betrages in einem Schritt erfolgen müssen, wobei eine absolut gleichmäßige Belegung der Schlammoberflächen kaum gewährleistet werden kann. Vor diesem Hintergrund kommt der permanenten Kontrolle der Vorgänge - gerade in der Anfangszeit - eine große Bedeutung zu.

### 8.3 Setzungsmaß

Die setzungswirksame Belastung ergibt sich aus der Lastfläche, der Schütthöhe und dem Eigengewicht des über dem Klärschlamm abgelagerten Bodens.

Die einschlägigen Berechnungsansätze gehen von einem einheitlichen Schichtenmodell aus. Ein solches kann nach Erfahrungen an anderen Standorten nicht unterstellt werden. Der Klärschlamm



wird bei der Verbreiterung der Dämme zunächst seitlich ausweichen und zum Inneren der Klärschlammbecken hin verdrängt. Dabei findet in einem gewissen Maß eine Vermischung mit den Dammschüttungen statt.

Erst wenn die Teilbecken vom Rand aus fortschreitend mit Böden abgedeckt werden, treten eine Konsolidation und damit verbundene Setzungen ein.

Nach einschlägigen Erfahrungen kann unterstellt werden, dass der Klärschlamm auf ca. 30 % seiner Ausgangsmächtigkeit komprimiert wird.

## 9 Spundwand an Schlammfläche III

Die Nordseite der Schlammfläche III wird nicht durch einen Absperrdamm vom restlichen Kläranlagengelände getrennt, sondern durch eine ca. 257 m lange Spundwand. Im Rahmen des Gutachtens [1] des Ingenieurbüros Gell & Partner wurde die Standsicherheit der Spundwand für den damaligen Zustand nachgewiesen. Dieser entspricht dem im vorliegenden Gutachten betrachteten Ausgangszustand. Im Rahmen der Sanierungsplanung ist auf der Seite der Schlammfläche eine Aufschüttung eines Dammes geplant, von dem aus das Füllmaterial für die Übererdung eingebracht wird. Für diese zusätzliche Belastung ist die Standsicherheit der Spundwand im maßgeblichen Bauzustand 1 zu überprüfen.

Auf Grundlage von [1] werden für das System die folgenden Höhen und Abmessungen angesetzt:

Passivseite:	OK Straße = 128,7 mNN
	Grundwasserspiegel = 128,7 mNN
Aktivseite:	OK Spundwand = 129,9 mNN
	UK Spundwand = 124,5 mNN
	OK Damm hinter Spundwand = 132,0 mNN
	OK Schlammfläche III hinter Damm = 131,0 mNN
	Einstau bei MGN bis OK Spundwand = 129,9 mNN
	Verkehrslast auf Dammkrone = 16,7 kN/m <sup>2</sup>

Bei dem Spundwandprofil handelt es sich um 5,4 m lange Spundbohlen Larssen 23, die 4,2 m in den anstehenden Boden einbinden und 1,2 m über die OK Straße reichen.



Gemäß den in [1] abgebildeten Bodenschichten, stehen straßenseitig bis in eine Tiefe von 122 mNN ca. 8,0 m mächtige Auffüllungen an, die von einer ca. 2,0 m mächtigen Schicht Wupperschotter unterlagert werden.

Für die gemischtkörnigen Auffüllungen werden die folgenden Bodenkennwerte nach [1] angesetzt. Die Bodenkennwerte für den Wupperschotter und das Dammmaterial sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Schichtbezeichnung	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	Kohäsion $c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Wichte $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]
gemischtkörnige Auffüllungen	30	0	19

Die Standsicherheitsberechnung erfolgt mit dem Programm GGU-Retain (Version 10.38). Die Überprüfung einer vorgegebenen Spundwandlänge erfordert den Ansatz eines horizontalen Bettungsmoduls auf der Passivseite. Nach dem Ansatz:

$$k_s = \frac{E_s}{d}$$

mit:  $k_s$  – Bettungsmodul [MN/m<sup>3</sup>]  
 $E_s$  – Steifemodul [MN/m<sup>2</sup>]  
 $d$  – 1,0 [lfdm]

kann für die unter dem seit vielen Jahrzeiten befahrenen Straßenaufbau anstehenden Auffüllungen auf der sicheren Seite liegend ein Steifemodul von  $E_s \geq 10,0$  MN/m<sup>2</sup> angesetzt werden. Bezogen auf die Breite einer Spundwandbohle bzw. den laufenden Meter ergibt sich ein Bettungsmodul von  $k_s \geq 10$  MN/m<sup>3</sup>.

Die Standsicherheitsnachweise können mit einem Ausnutzungsgrad von  $\mu = 0,61 < 1,0$  erfolgreich geführt werden. Das Maß der Verformung am Spundwandkopf beträgt 23,5 mm und ist hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit als verträglich zu bewerten.

Der Nachweis für den Endzustand entfällt, da die Profilierung des Geländes im Endzustand keine größere Geländehöhe erreicht als im bereits nachgewiesenen Ausgangszustand.



## 10 Zusammenfassung

Der Wupperverband ist Betreiber der Kläranlage Buchenhofen in Wuppertal. Die anfallenden Klärschlämme wurden seit den 1920er Jahren auf dem Werksgelände in mehreren Absetzbecken sedimentiert. Die Dämme, die diese Becken umschließen, sind gemäß der DIN 19700-11 als Talsperren zu klassifizieren und entsprechenden standsicherheitstechnischen Überprüfungen zu unterziehen.

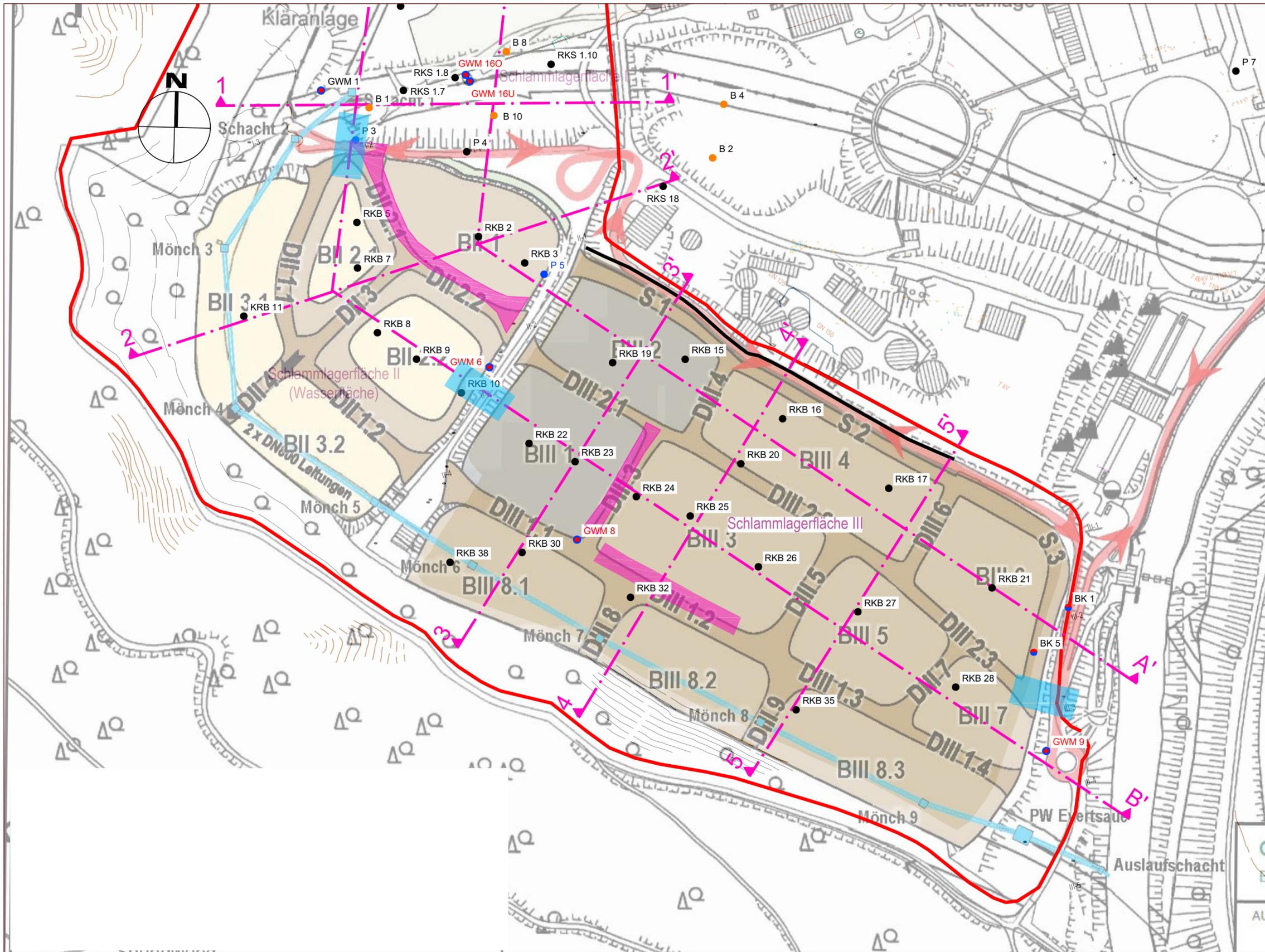
Die Geotechnisches Büro Prof. Düllmann GmbH wurde vom Wupperverband beauftragt, eine vertiefte Überprüfung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Absperr- und Zwischendämme um und in den drei Schlammflächen entsprechend den Anforderungen der DIN 19700 durchzuführen. Die Bewertung erfolgte unter Berücksichtigung des Merkblatts DWA-M 542 (07/2017) und dem Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten. Berücksichtigt wurden dabei der aktuelle Zustand der Dämme sowie die Zustände in den Bauphasen bei Erhöhung der Dämme und Übererdung der Lagerflächen.

Ergänzend erfolgte eine Bewertung des Konsolidationsverhaltens des Klärschlammes während des Aufbringens der Übererdung. Um einer temporären Endfestigung des Klärschlammes infolge einer zu schnell eingebrachten Auflast vorzubeugen, ist die Schichtmächtigkeit bei dem Einbau der Übererdung auf 0,45 m/a zu begrenzen.

Die durchgeführten Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass sich die vorhandenen Dämme sowie die Spundwand an der Nordseite der Schlammfläche III in Bezug auf die geplante Baumaßnahme in einem anforderungskonformen Zustand befinden. Für die untersuchten Systembelastungen konnte in allen Tragsicherheitsbewertungen für die geplante Erhöhung der Dämme ein den Anforderungen entsprechender Auslastungsgrad nachgewiesen werden. Auch aus der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit ergeben sich keine Anforderungen, die die vorliegende Planung der Maßnahme beeinflusst.

  
S. Vonhall, M.Eng.

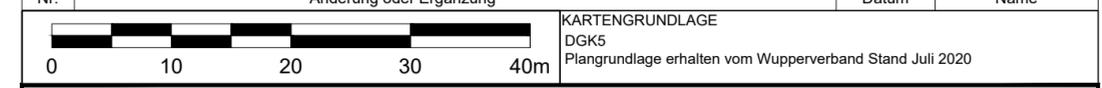
  
Dr.-Ing. M. Nendza



**Legende:**

- RKS... Kleinrammbohrung
- RKB... Kleinrammbohrung
- GWM... Grundwassermessstelle
- P... Ansatzpunkt Bohruntersuchung
- B... Maschinenbohrung
- BK... Bohrkern
- Schnitt
- exemplarische Überprüfung der Standsicherheit der Zwischendämme
- Überprüfung der Standsicherheit der Absperrdämme (nach Ingenieurbüro Gell & Partner GbR)
- Planfeststellungsbereich

Nr.	Änderung oder Ergänzung	Datum	Name



**GEOTECHNISCHES BÜRO PROF. DR.-ING. H. DÜLLMANN GMBH**

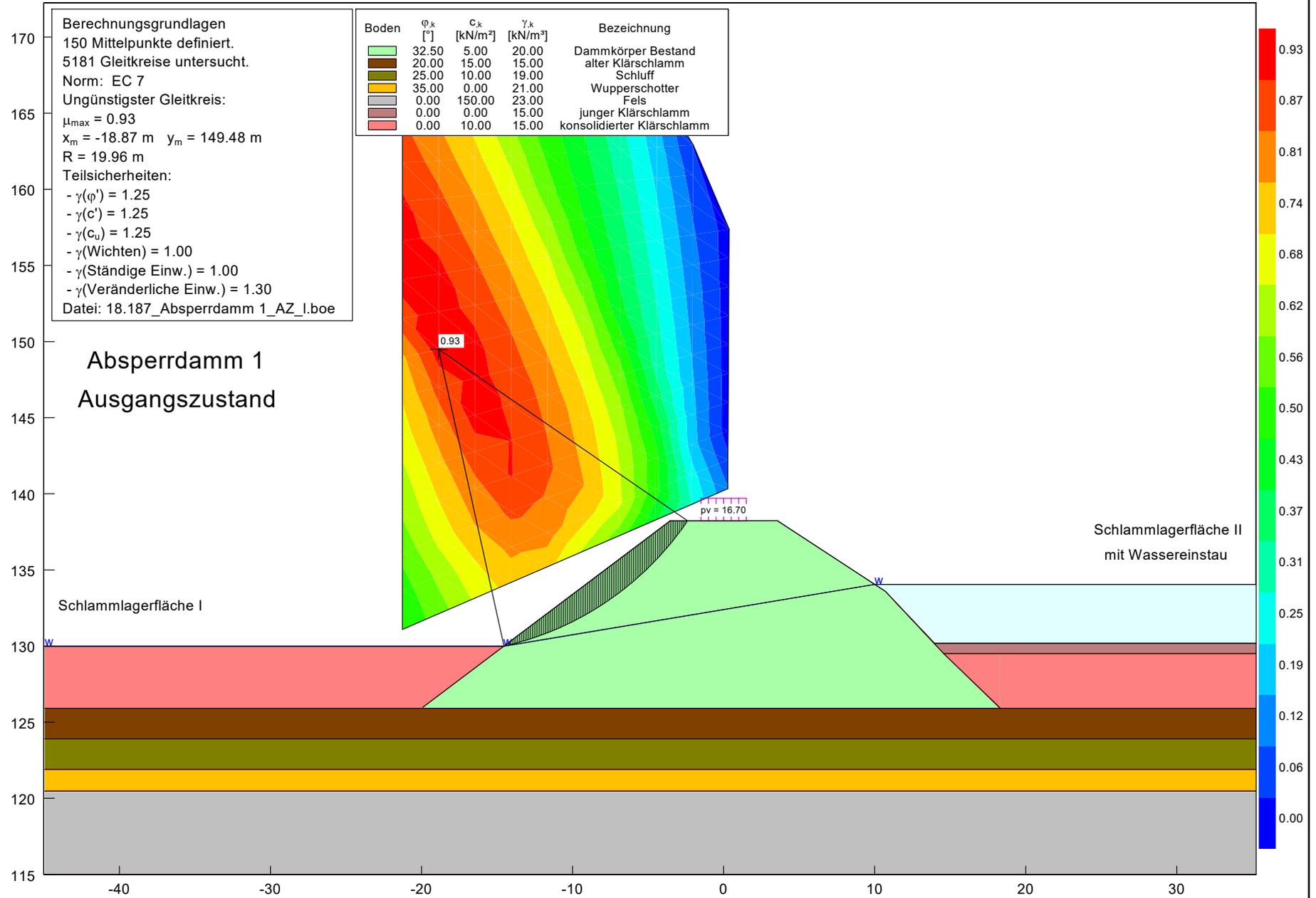
Neuenhofstraße 112      52078 Aachen      Tel.: 0241 / 92839-0

<b>AUFTRAGGEBER</b>	Wupperverband Untere Lichtenplazer Str. 100 42289 Wuppertal	 <b>WUPPERVERBAND</b> für Wasser, Mensch und Umwelt
---------------------	---	---

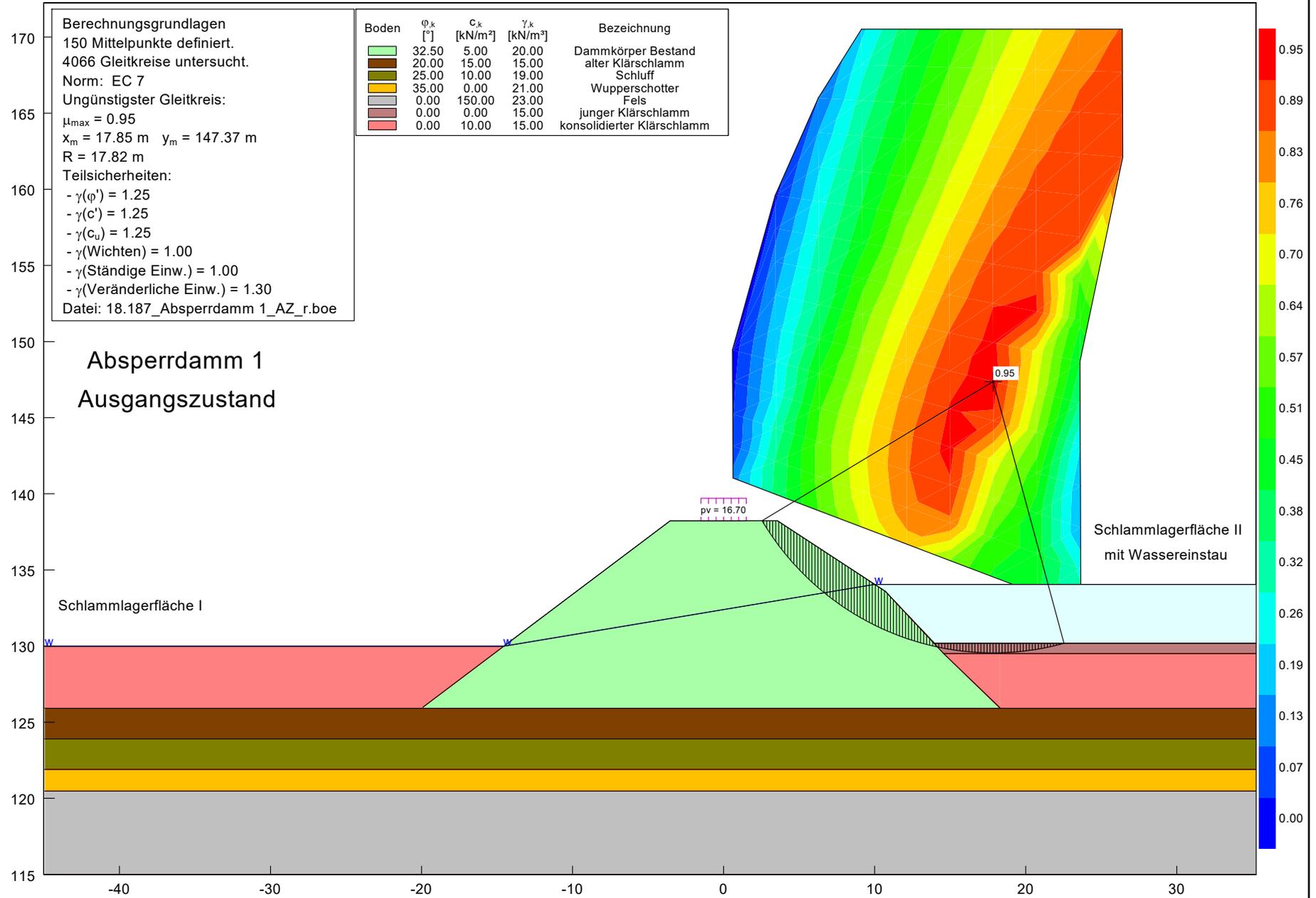
<b>PROJEKT</b>	Sedimentationsbecken I, II und III der Kläranlage Buchenhofen Überprüfung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Absperrbauwerke und Dämme nach DIN 19700	Bearb. - Nr.: <b>18.187</b>
----------------	--	--------------------------------

<b>TITEL</b>	Übersichtsplan der Absperr- und Zwischendämme	Anlage - Nr.: <b>1</b>
--------------	---	---------------------------

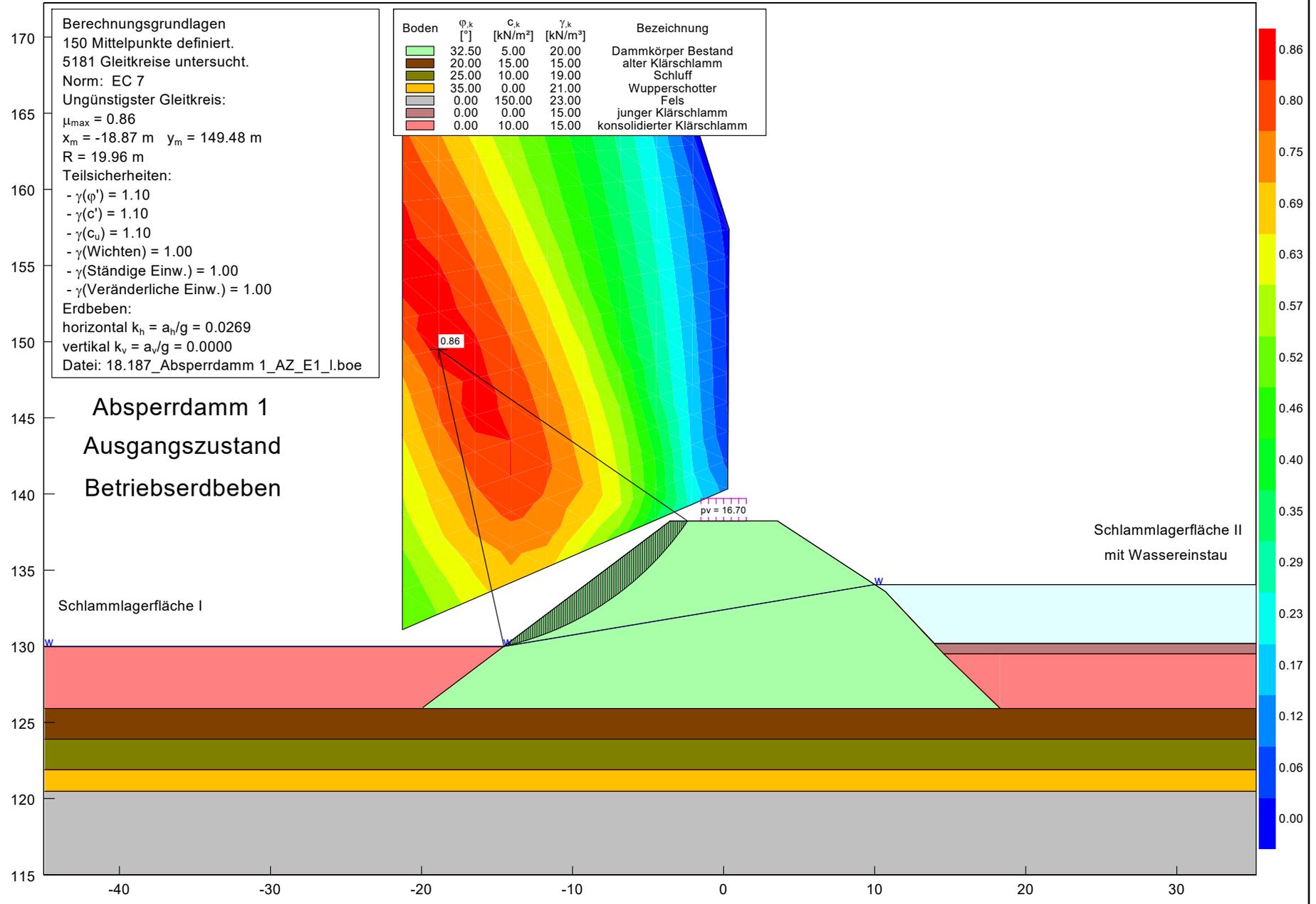
Sachbearbeiter	gezeichnet	geprüft	Aachen, den	Maßstab d. Länge	Maßstab d. Höhe
Veldenz	Vonhall	Obernosterer	18.03.2021	1:2000	--



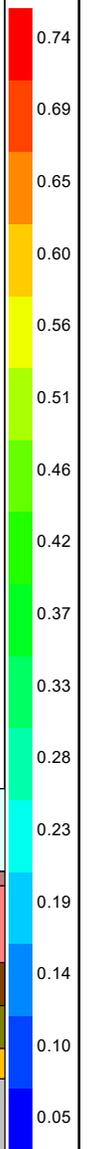
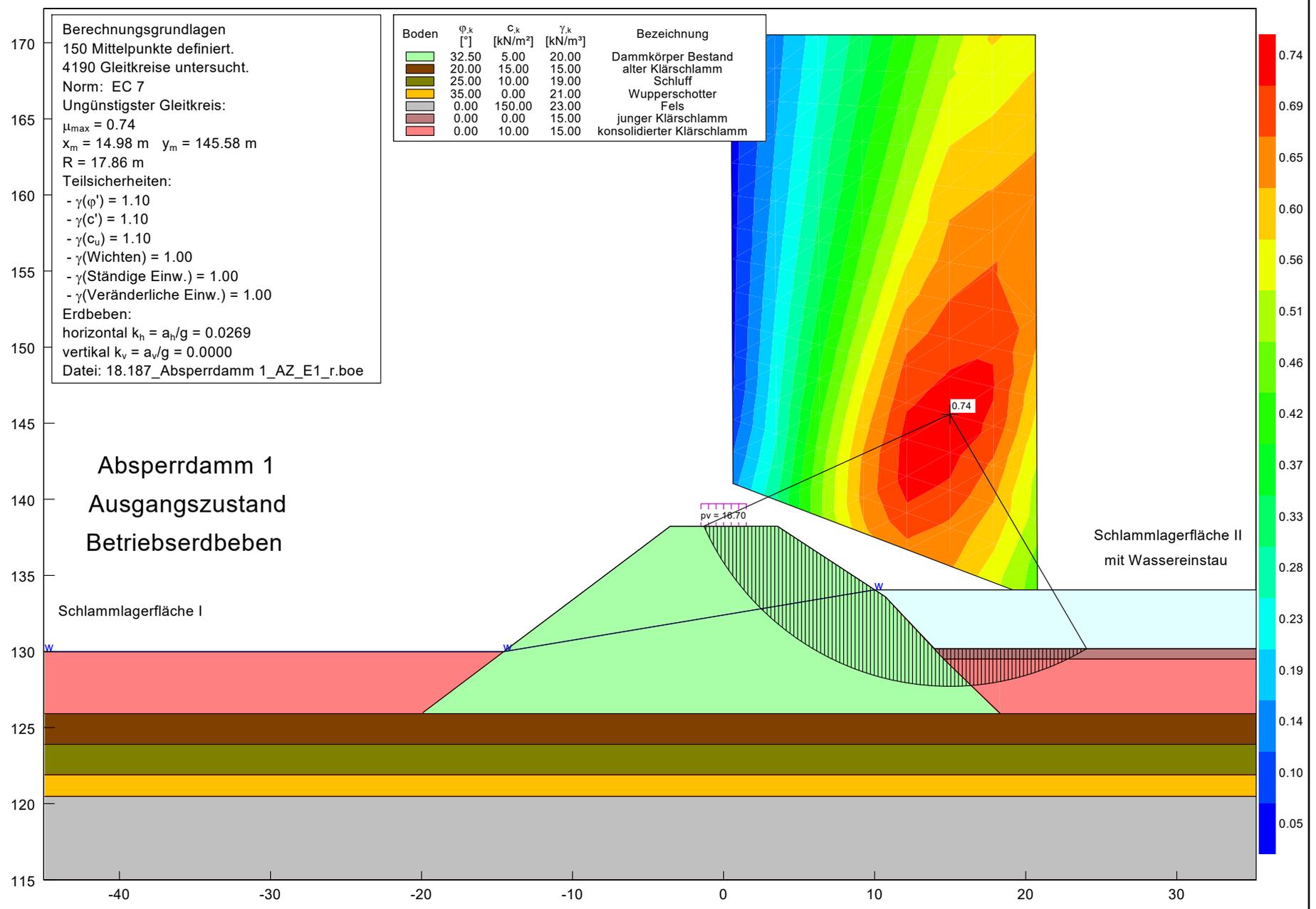
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

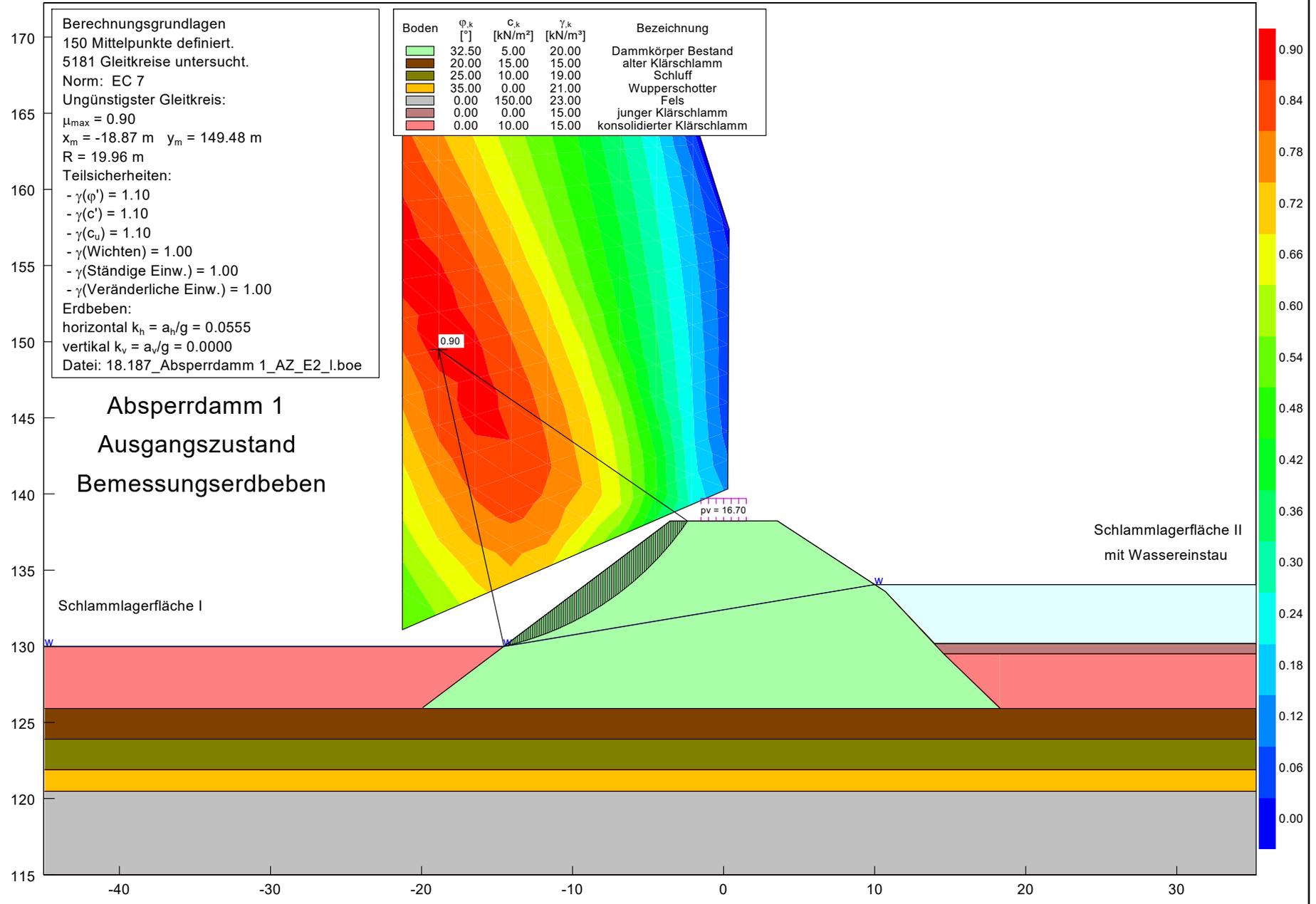


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

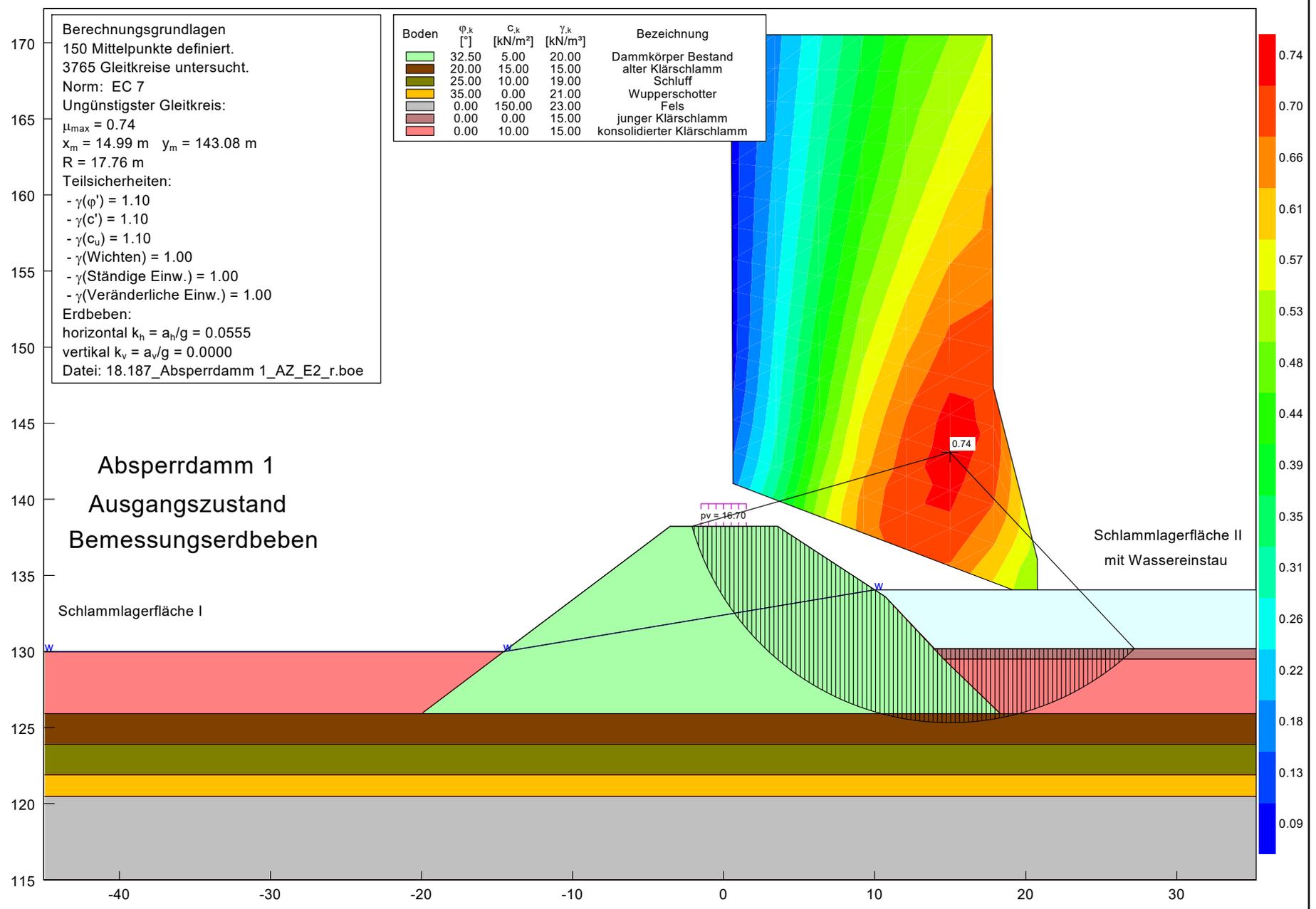


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

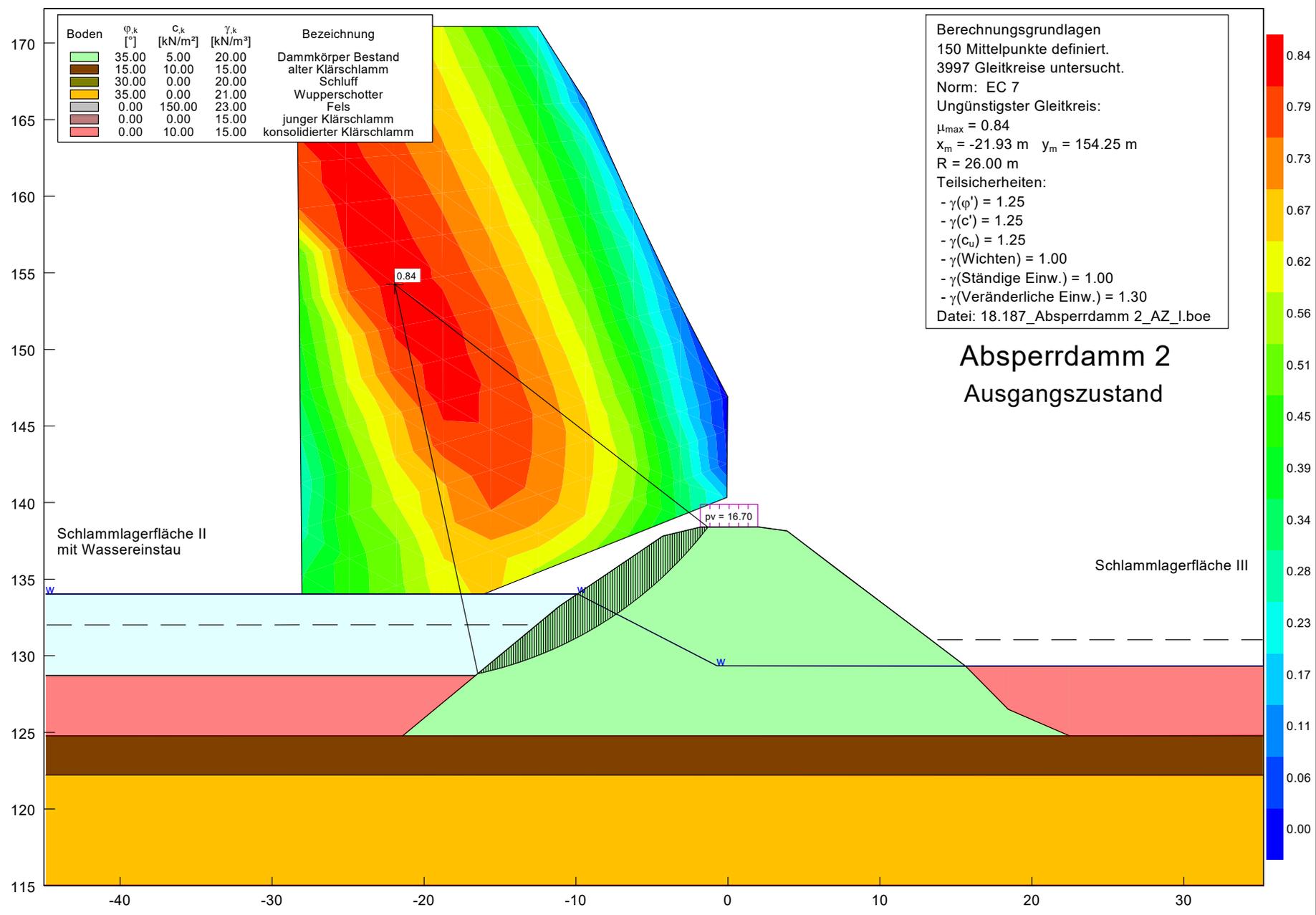




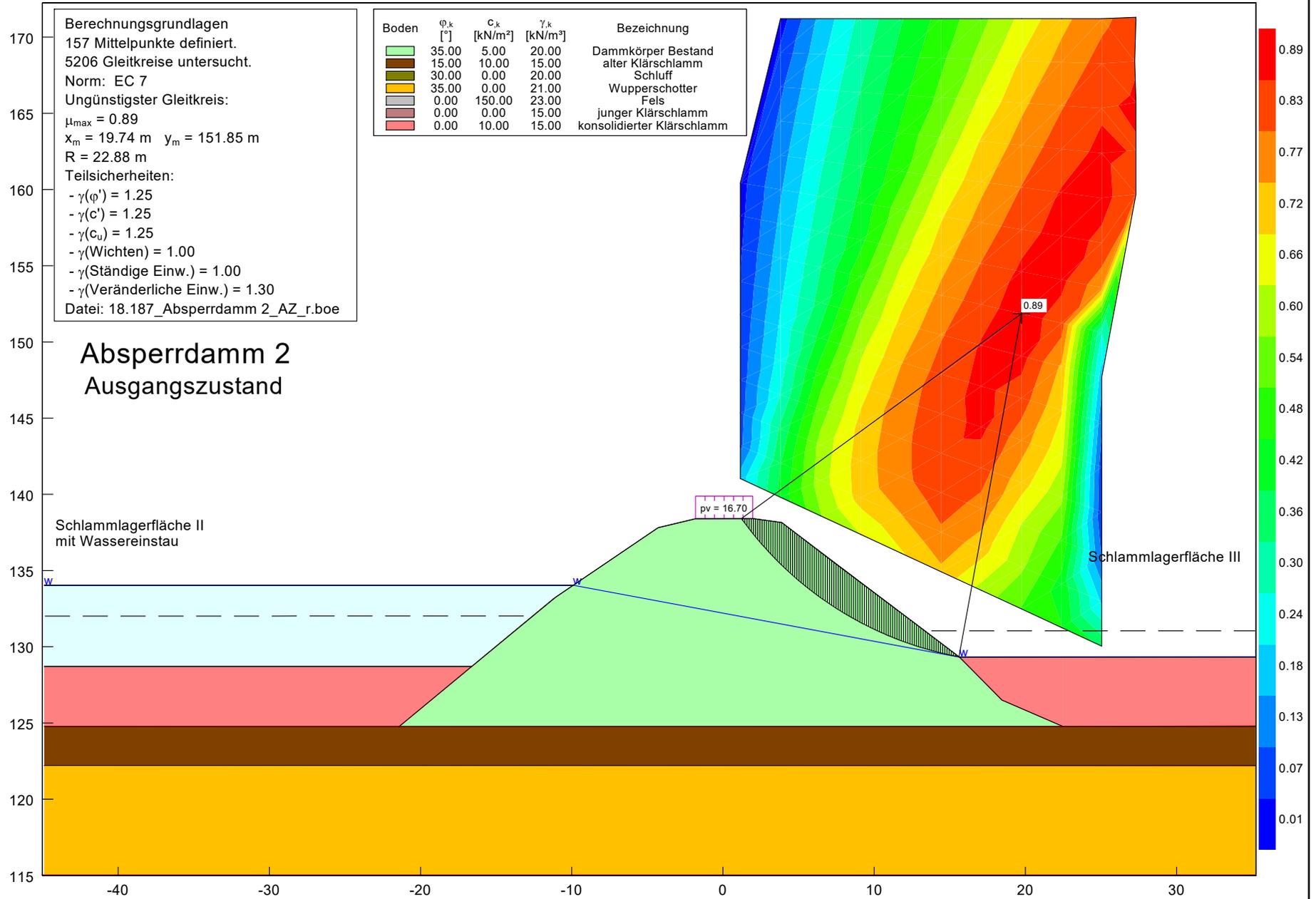
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

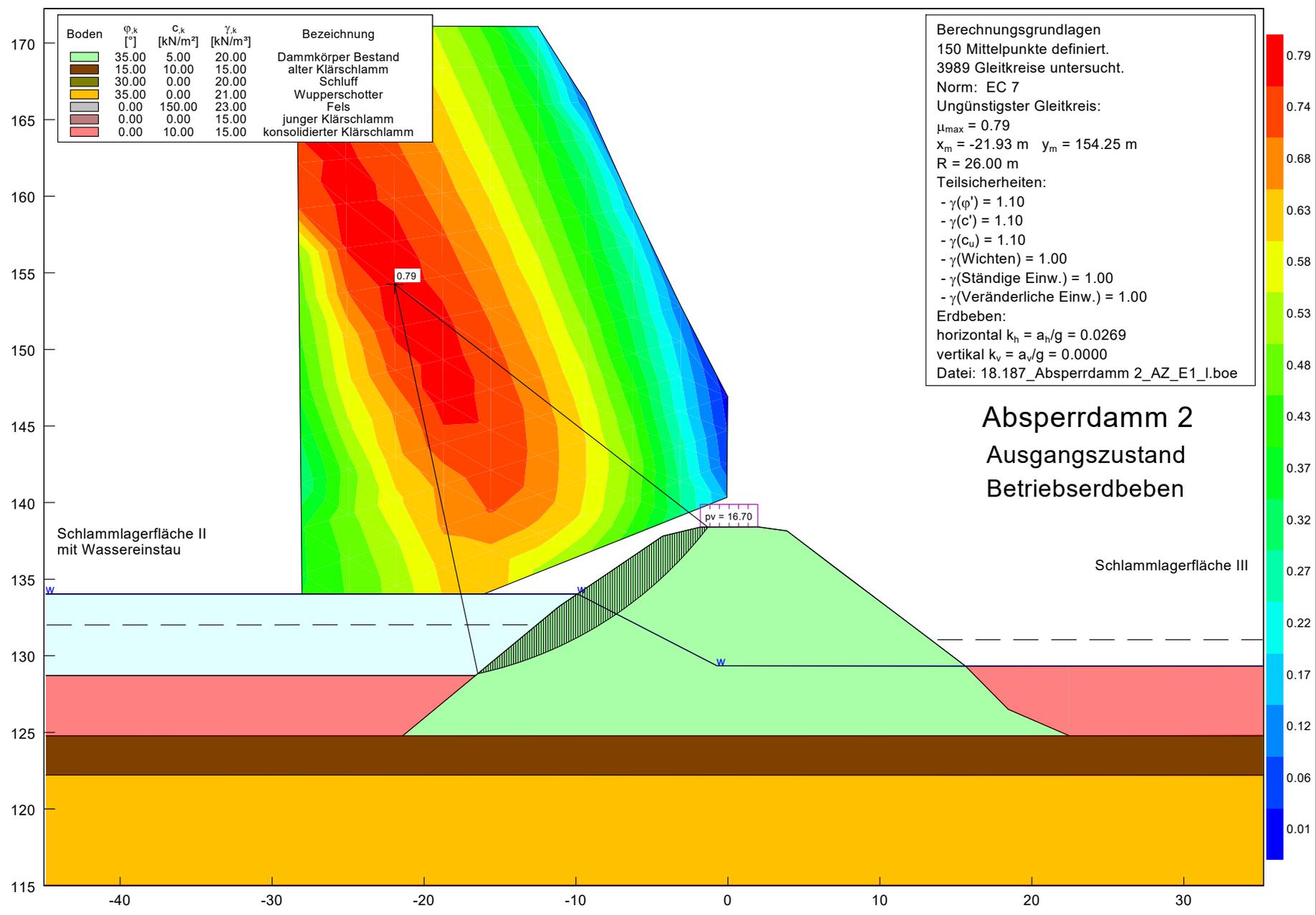


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

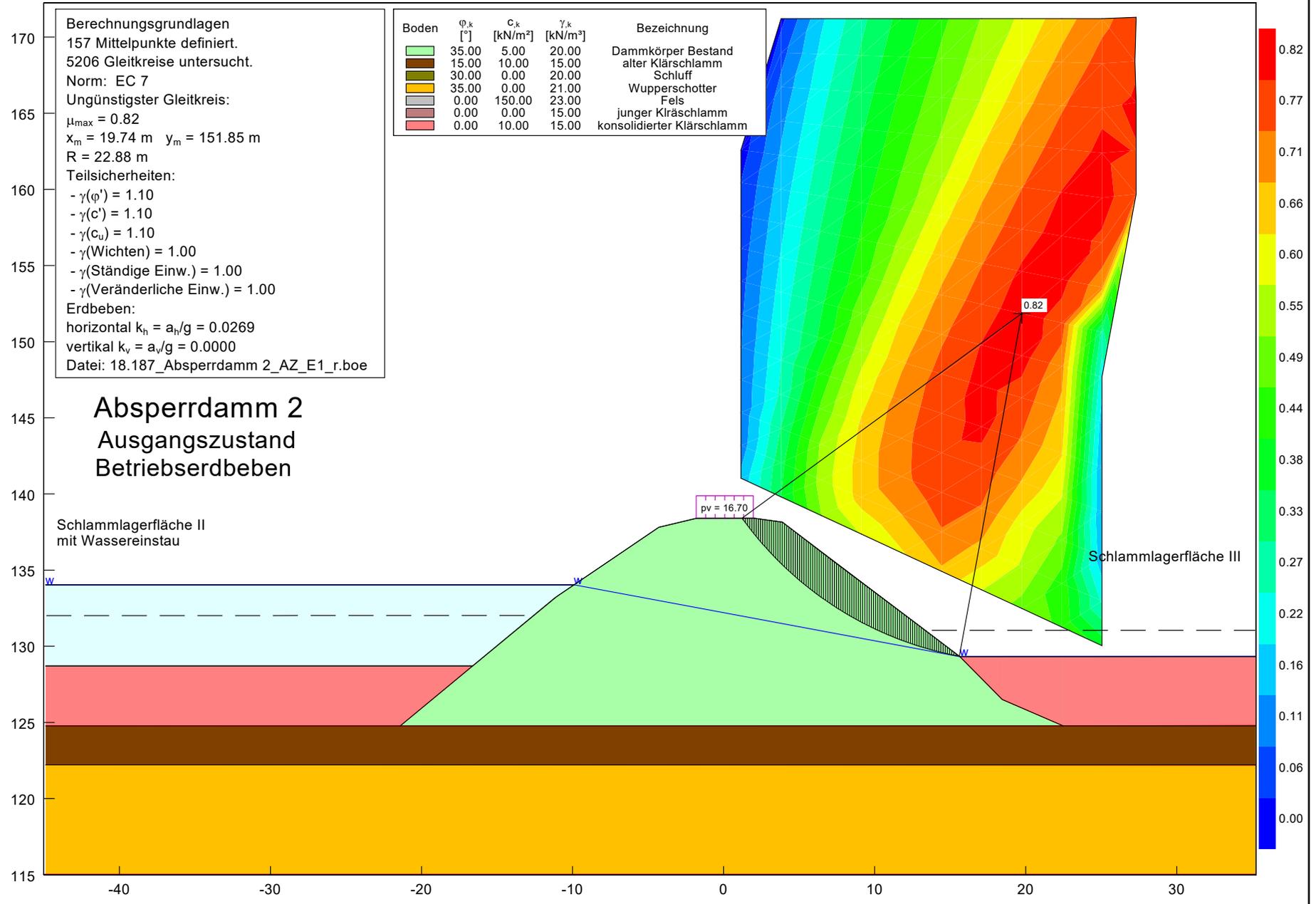


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

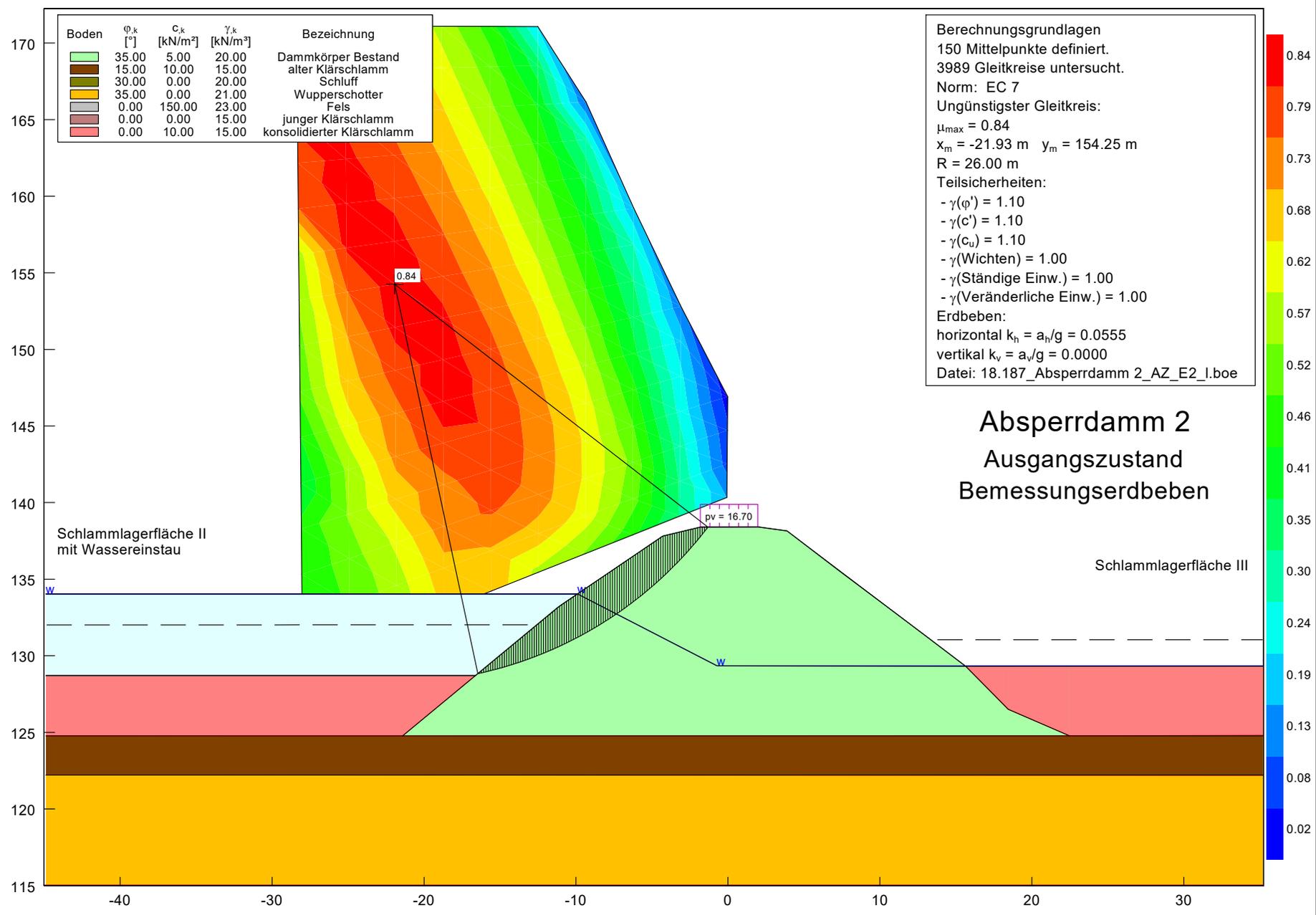




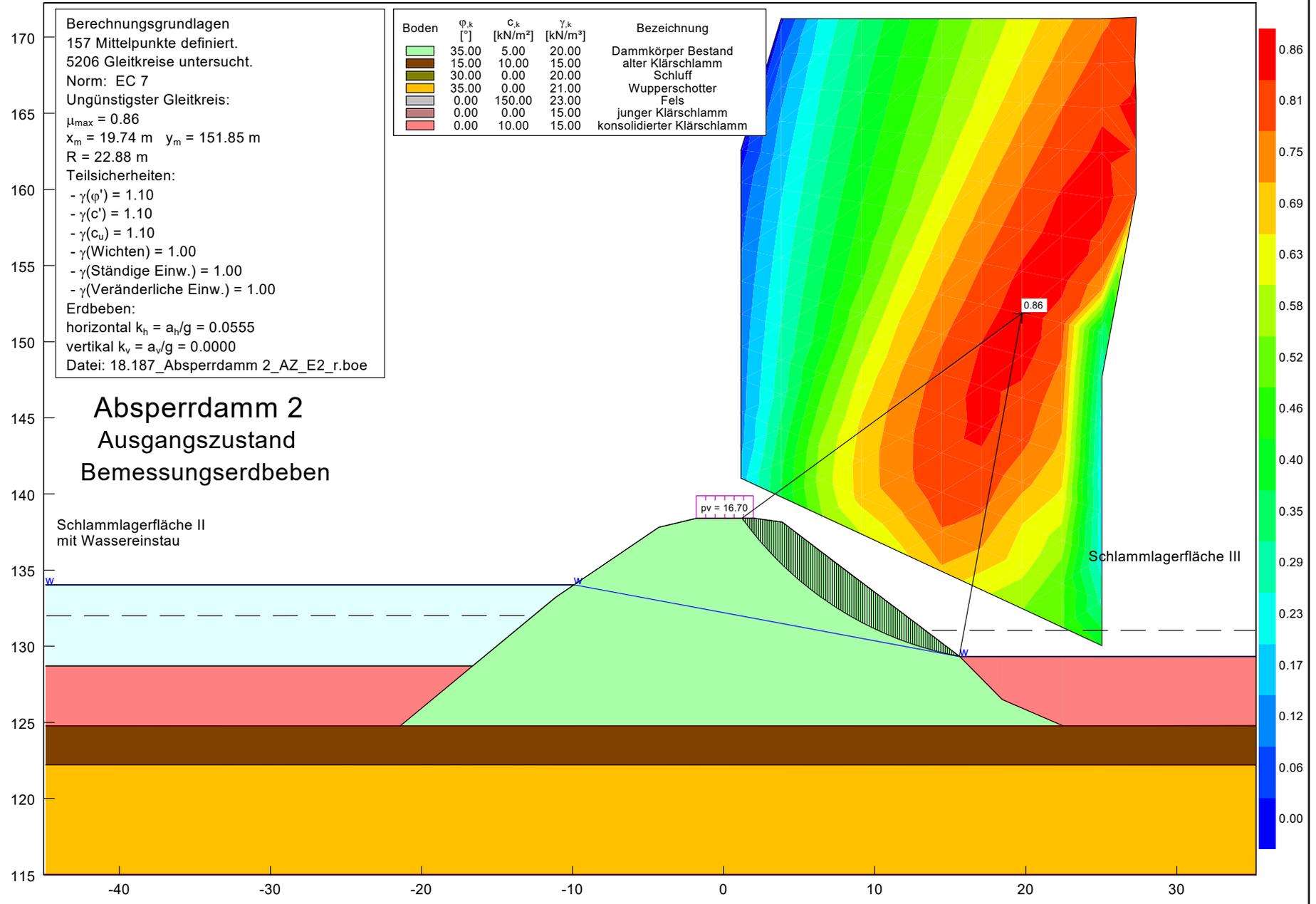
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



**Berechnungsgrundlagen**  
 157 Mittelpunkte definiert.  
 5206 Gleitkreise untersucht.  
 Norm: EC 7  
 Ungünstigster Gleitkreis:  
 $\mu_{max} = 0.86$   
 $x_m = 19.74 \text{ m}$   $y_m = 151.85 \text{ m}$   
 $R = 22.88 \text{ m}$   
 Teilsicherheiten:  
 -  $\gamma(\phi') = 1.10$   
 -  $\gamma(c') = 1.10$   
 -  $\gamma(c_u) = 1.10$   
 -  $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$   
 Erdbeben:  
 horizontal  $k_h = a_h/g = 0.0555$   
 vertikal  $k_v = a_v/g = 0.0000$   
 Datei: 18.187\_Absperrdam 2\_AZ\_E2\_r.boe

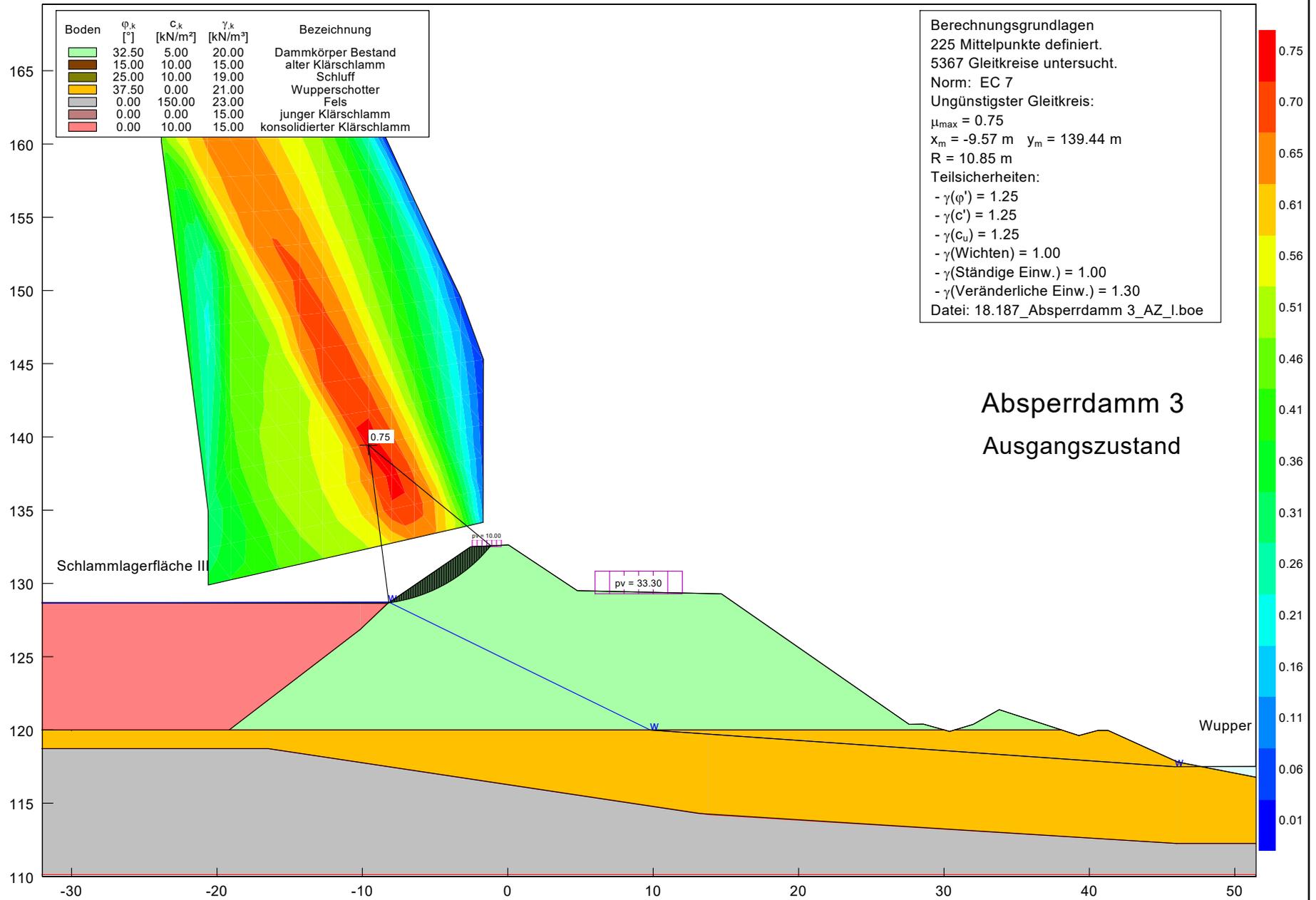
Boden	$\phi_k$ [°]	$c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Bezeichnung
	35.00	5.00	20.00	Dammkörper Bestand
	15.00	10.00	15.00	alter Klärschlamm
	30.00	0.00	20.00	Schluff
	35.00	0.00	21.00	Wupperschotter
	0.00	150.00	23.00	Fels
	0.00	0.00	15.00	junger Klärschlamm
	0.00	10.00	15.00	konsolidierter Klärschlamm

**Absperrdam 2**  
**Ausgangszustand**  
**Bemessungserdbeben**

Schlammklärfläche II  
 mit Wassereinstau

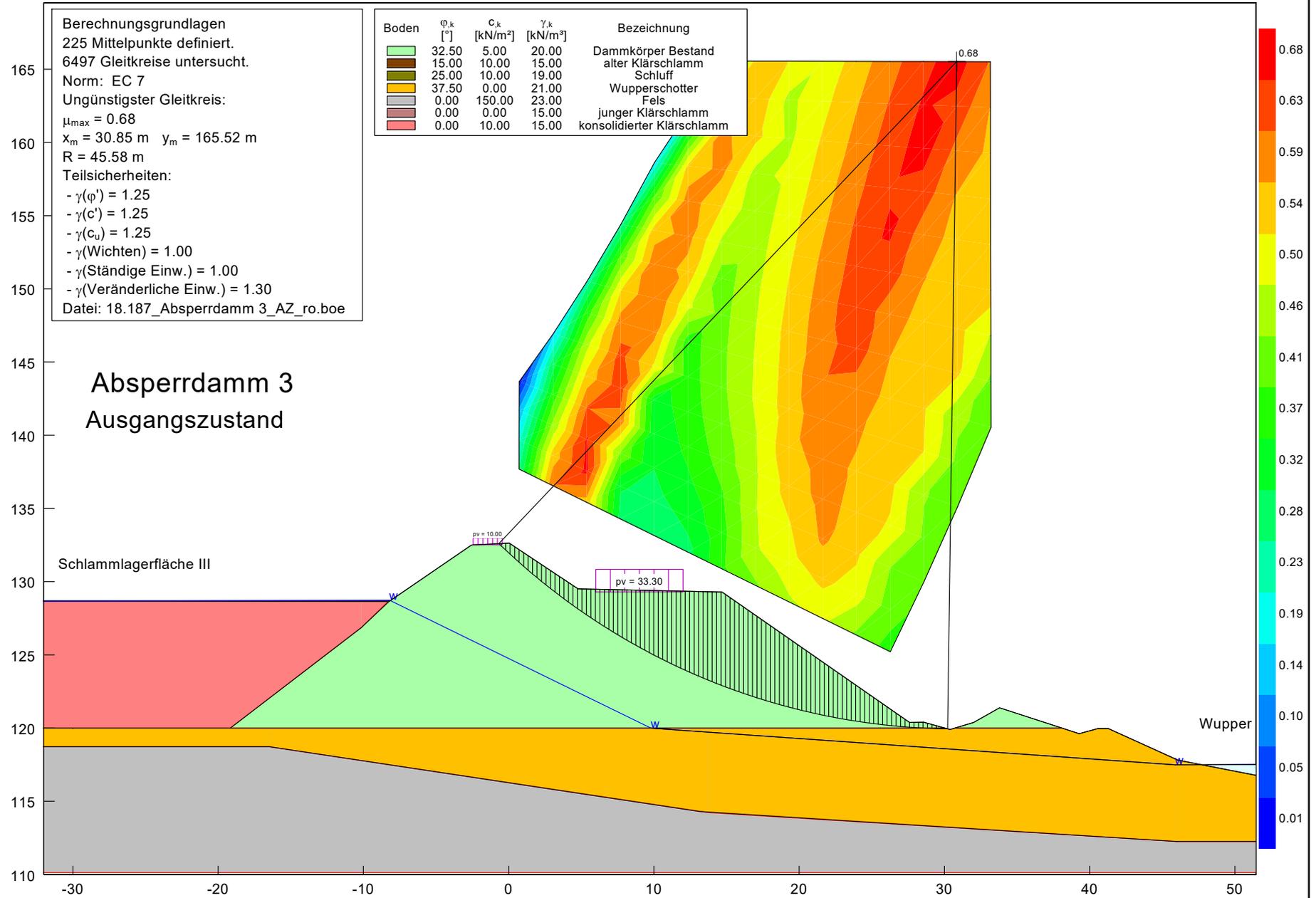
Schlammklärfläche III

Schlammklärflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

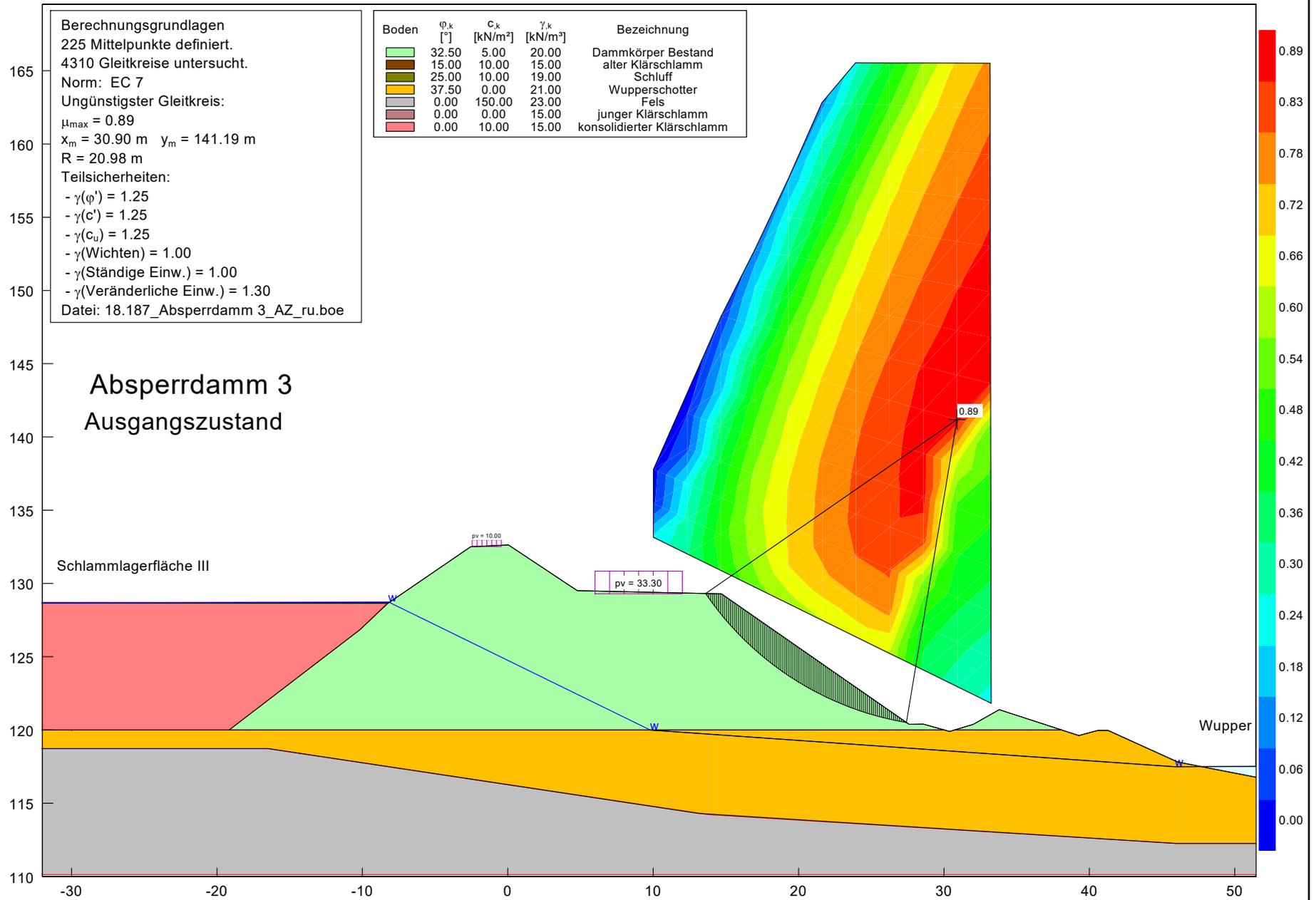


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit

Stand sicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



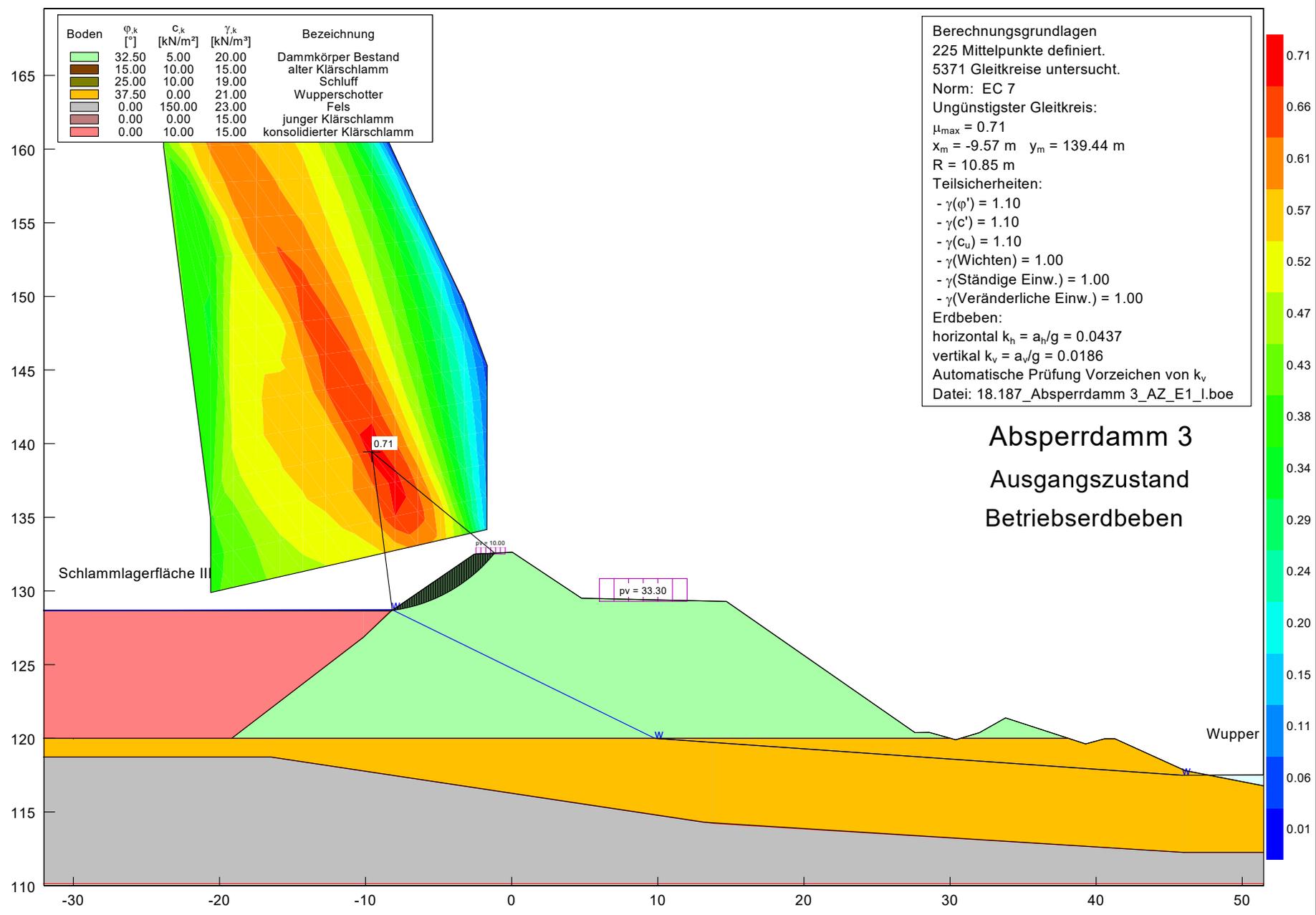
**Absperrdamm 3  
Ausgangszustand**

Schlammagerfläche III

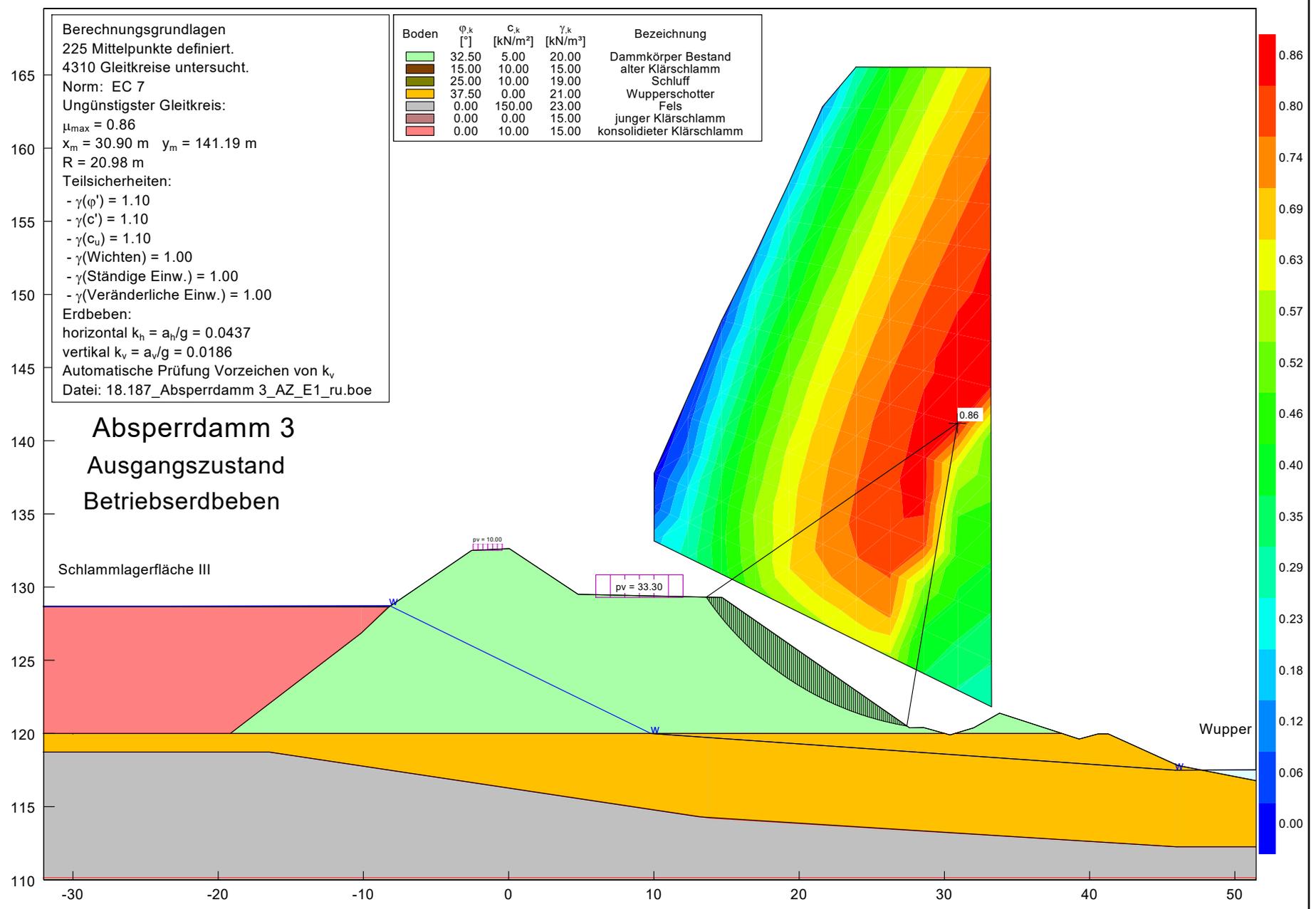
Wupper

Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit

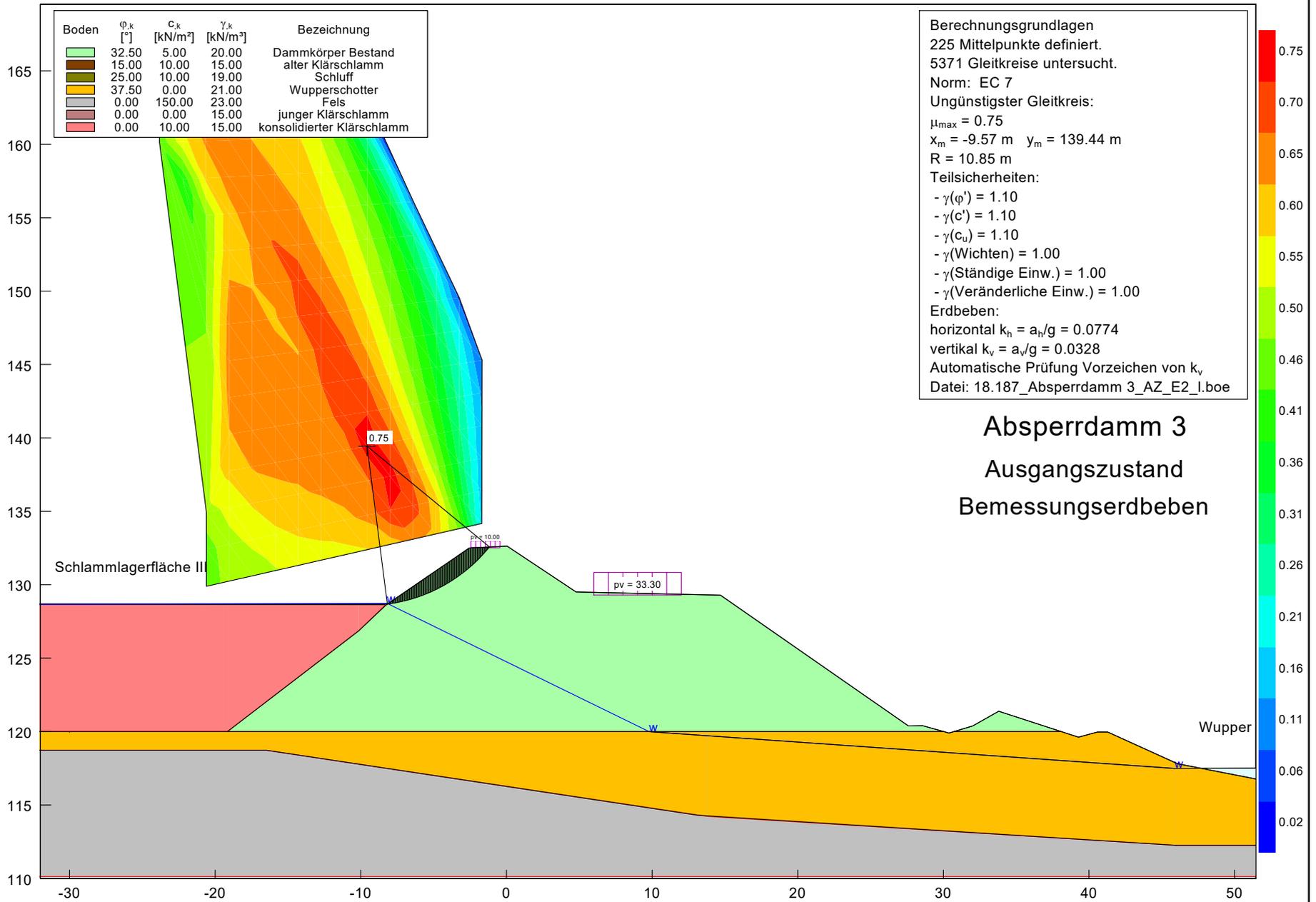
Stand sicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



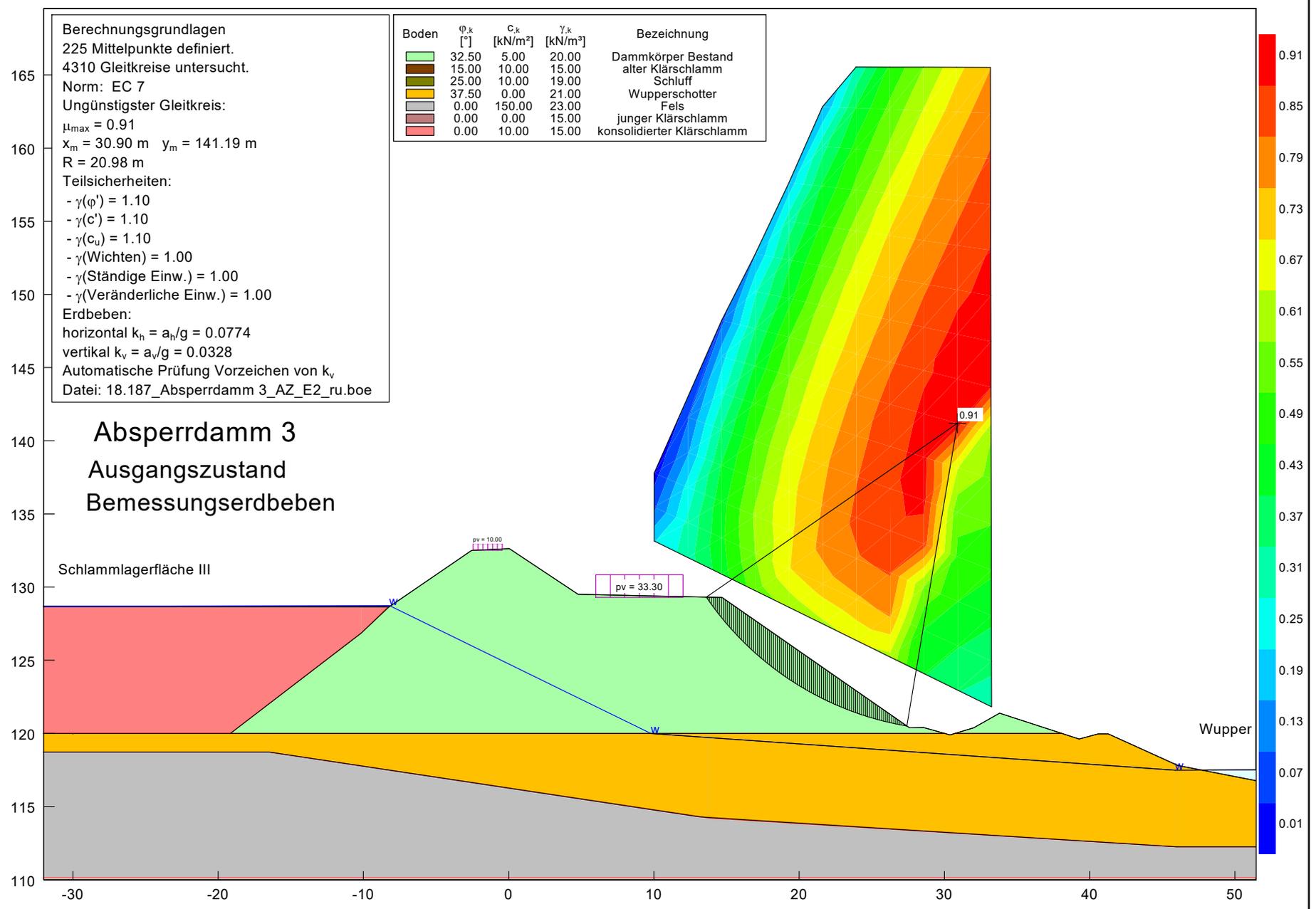
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



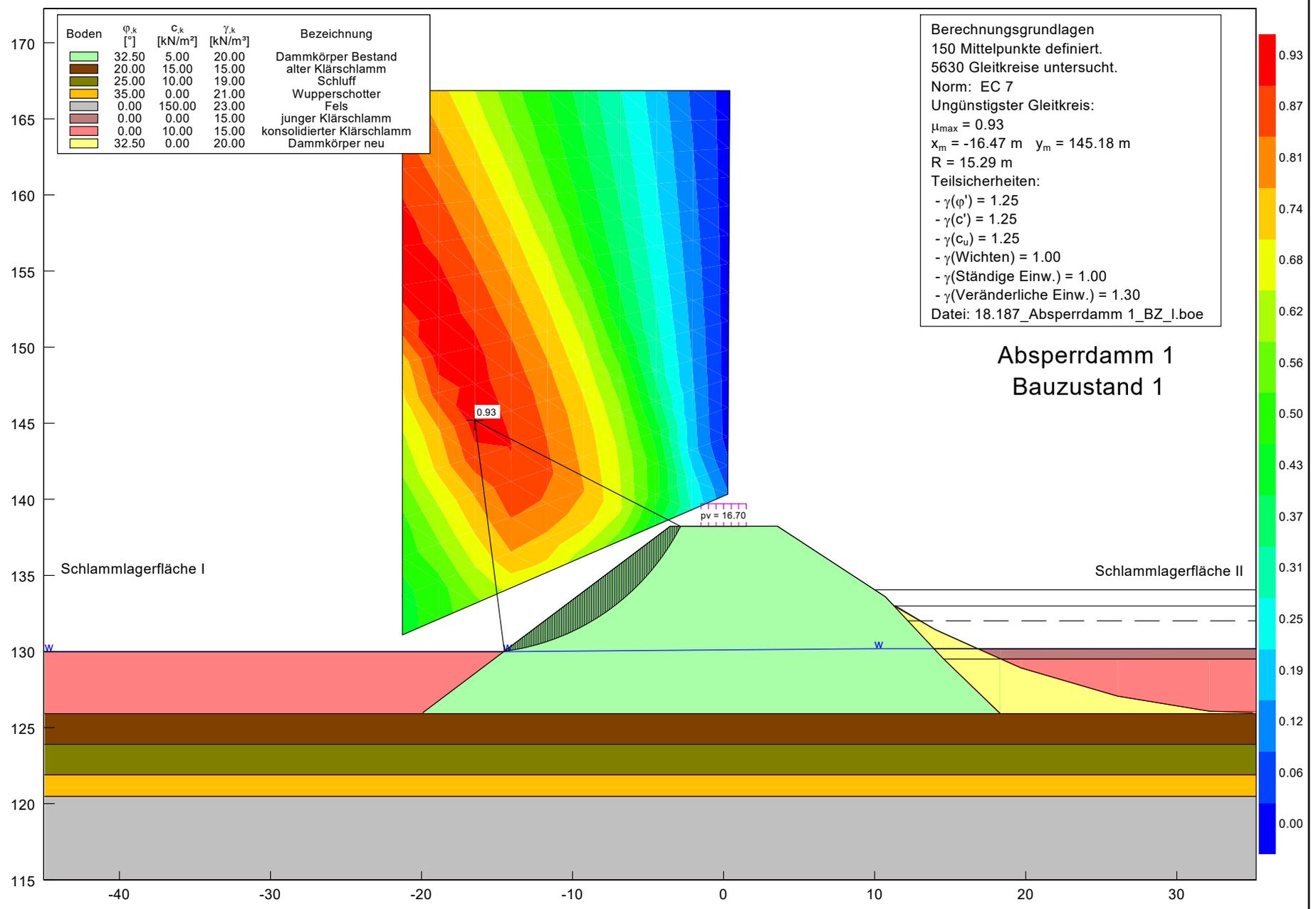
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



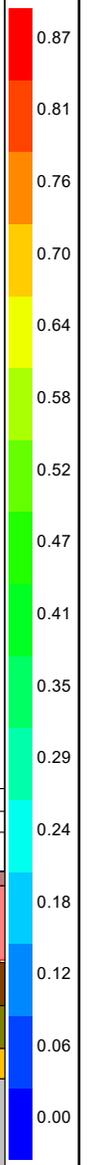
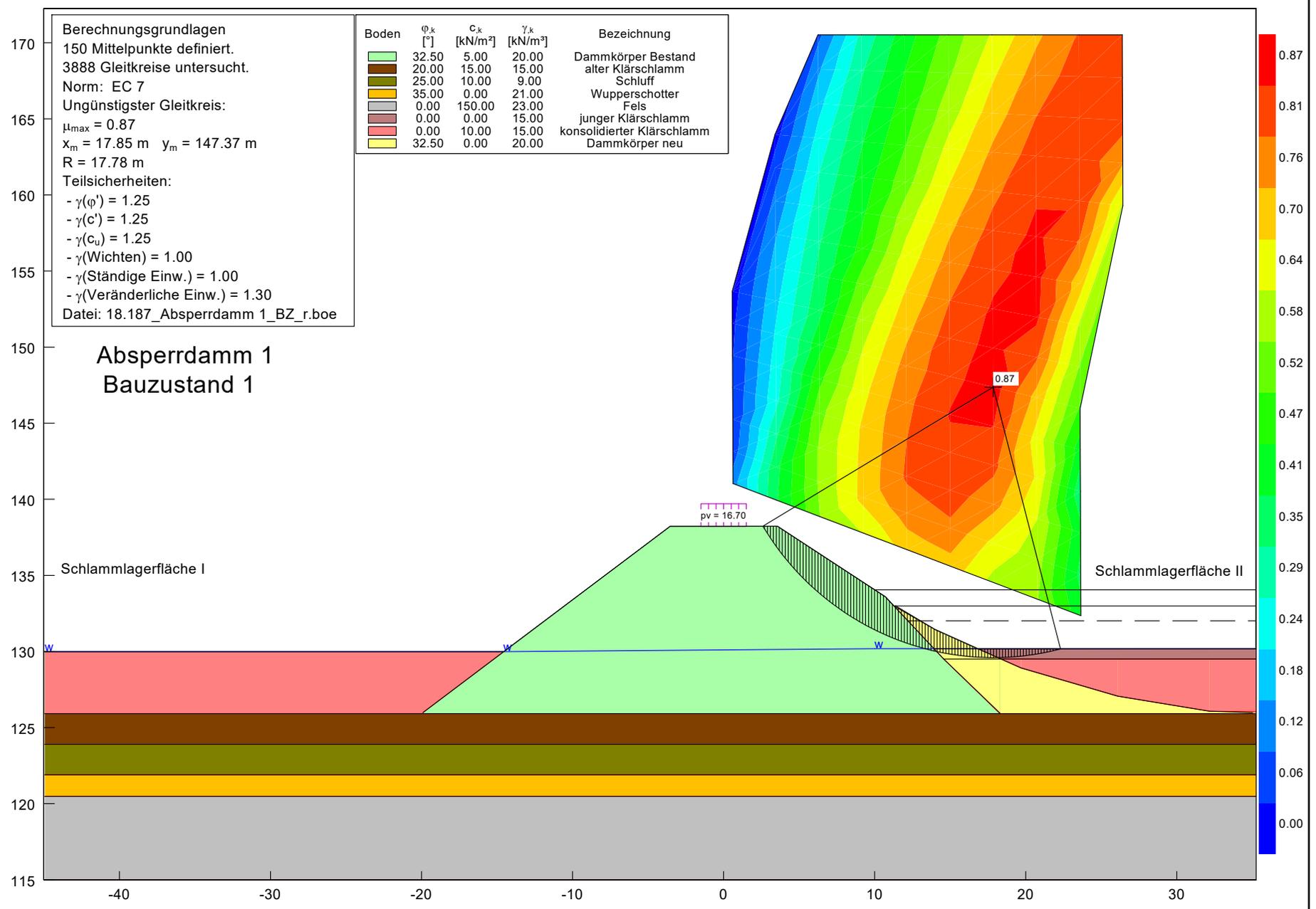
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

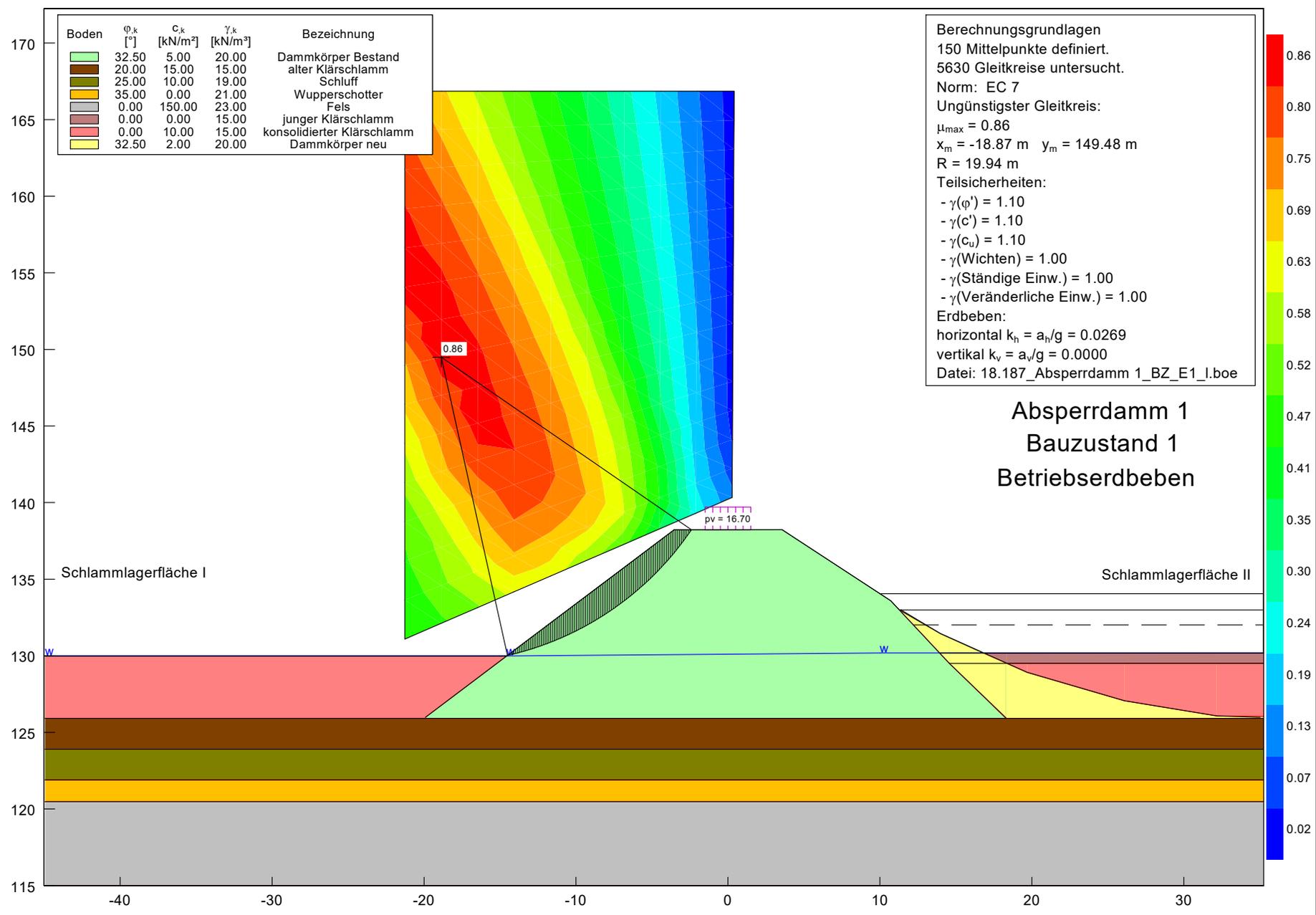


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

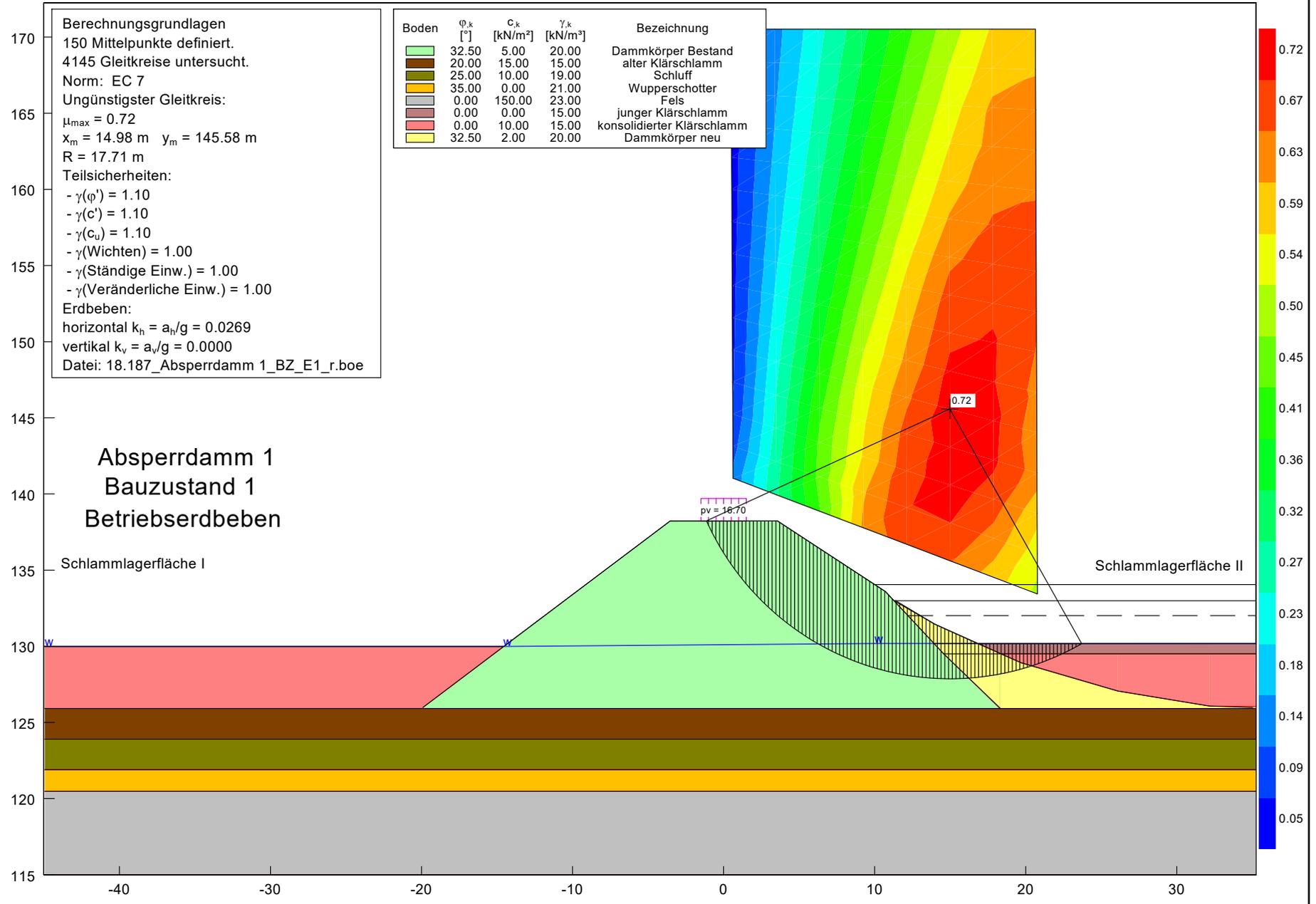


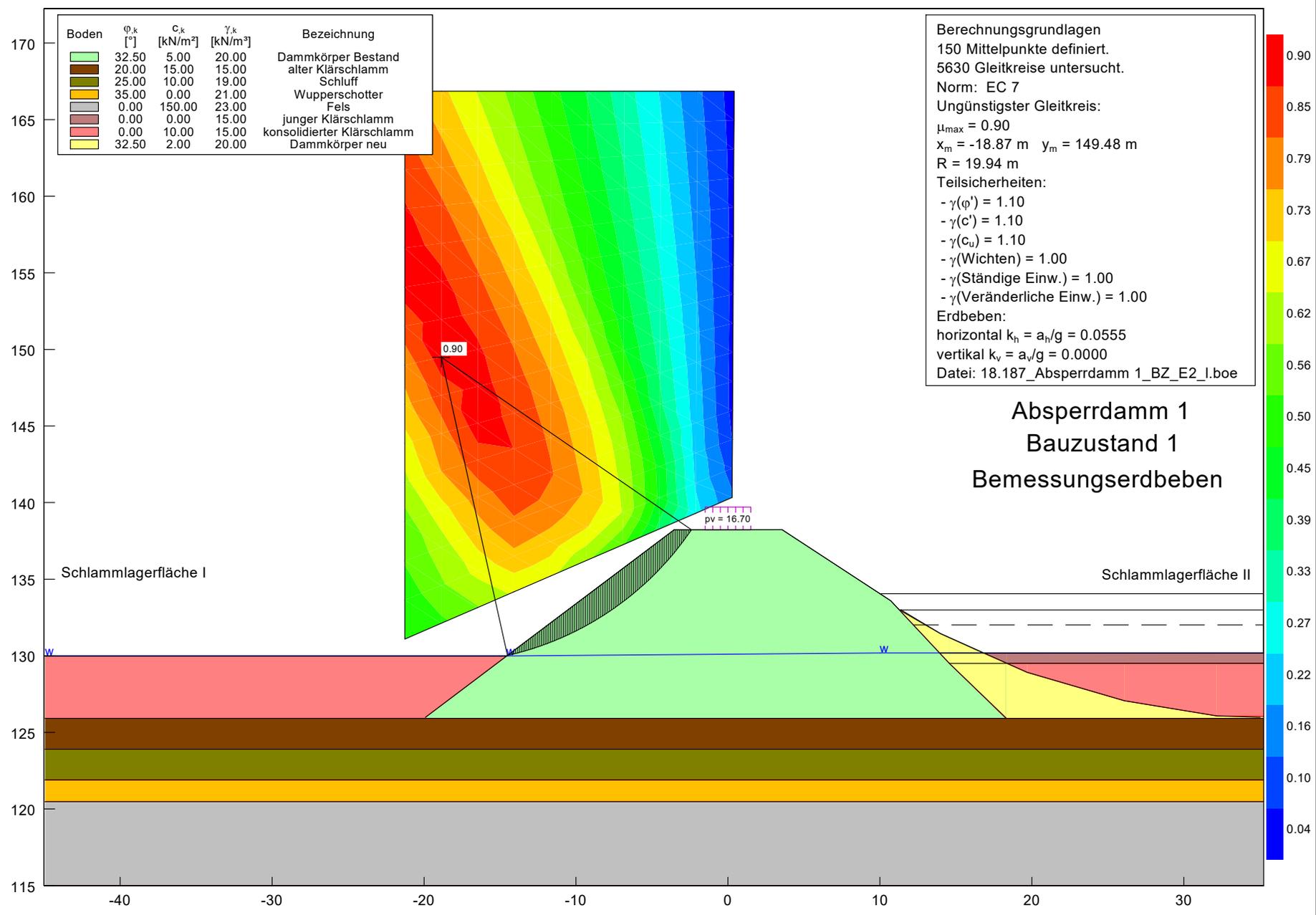
Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



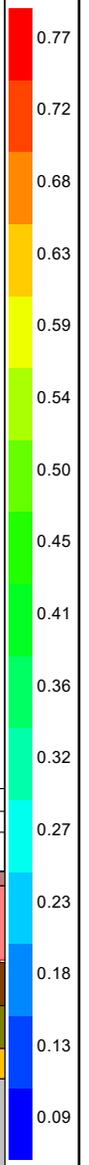
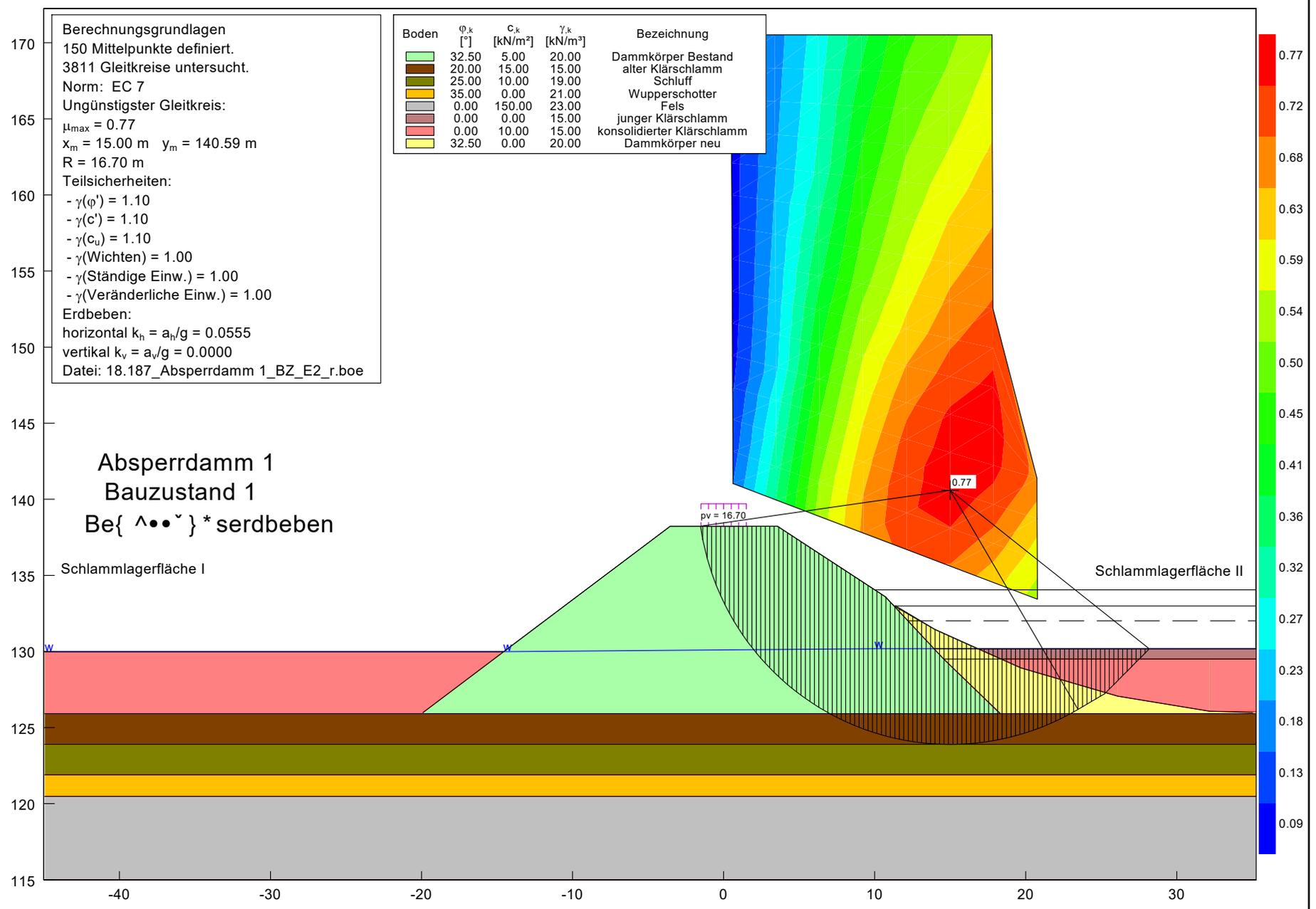


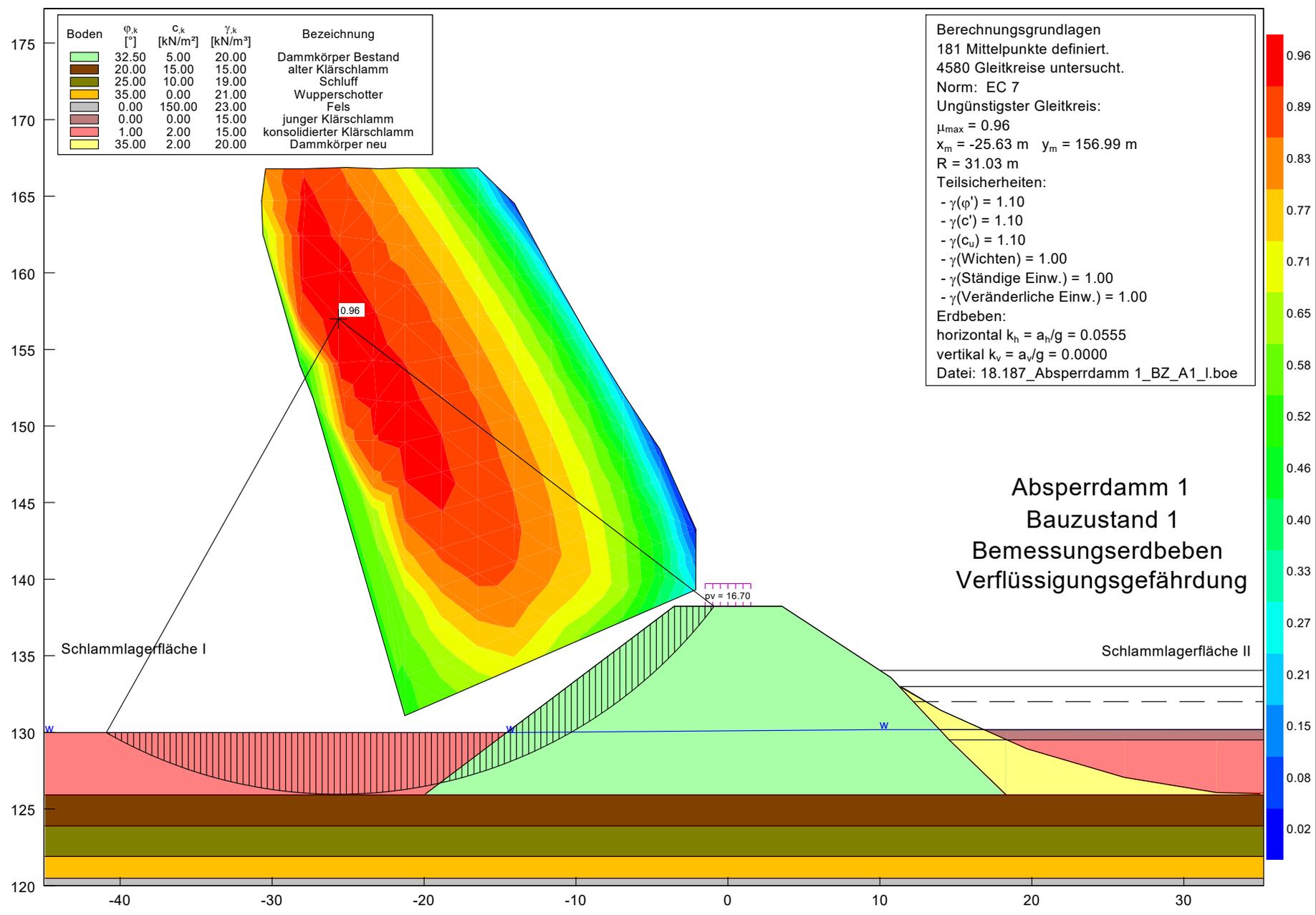
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



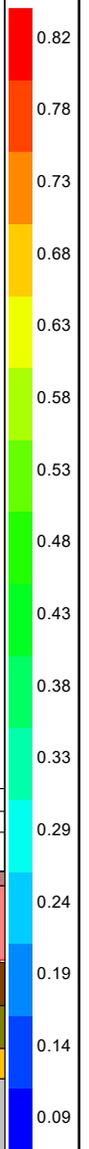
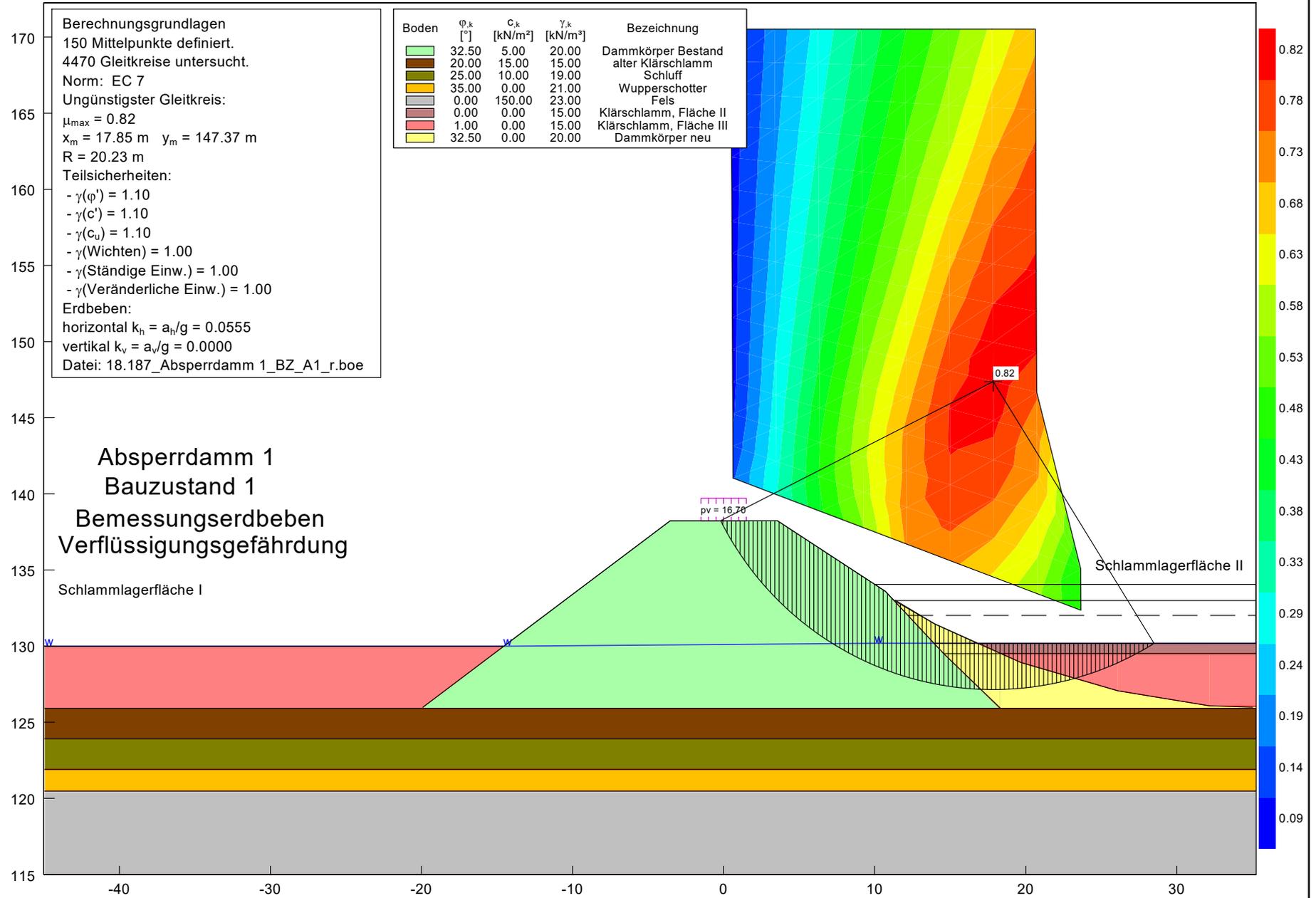


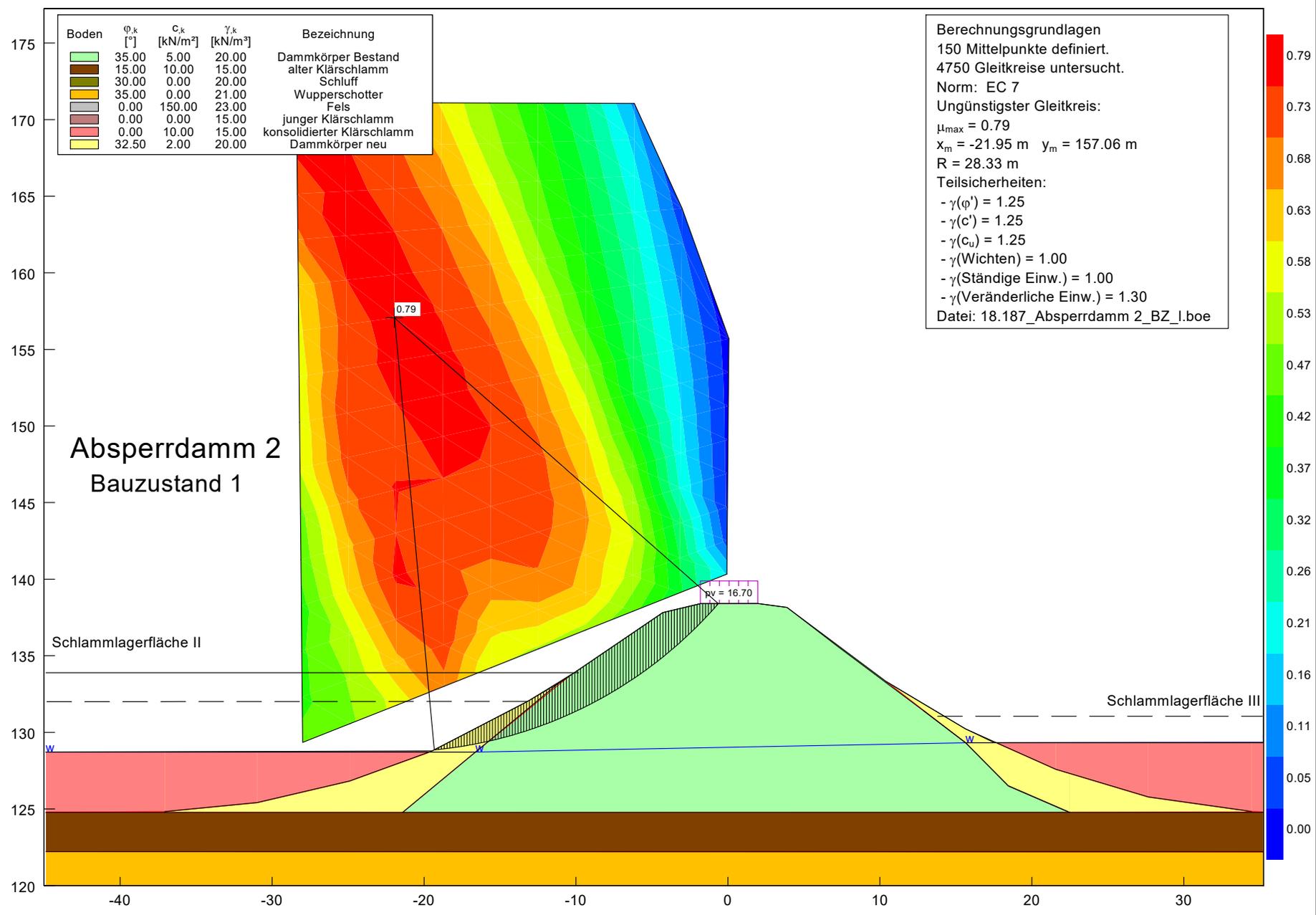
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



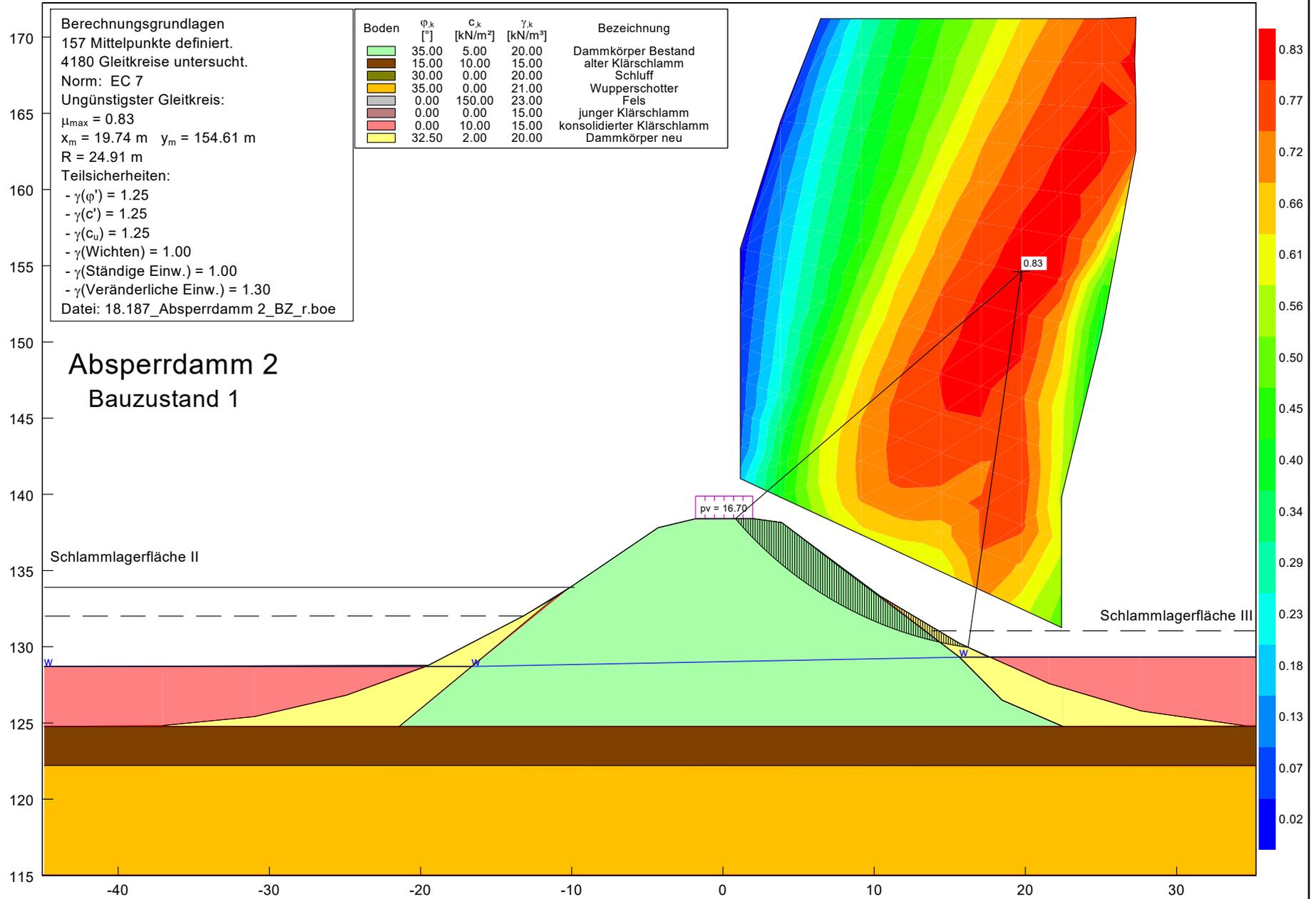


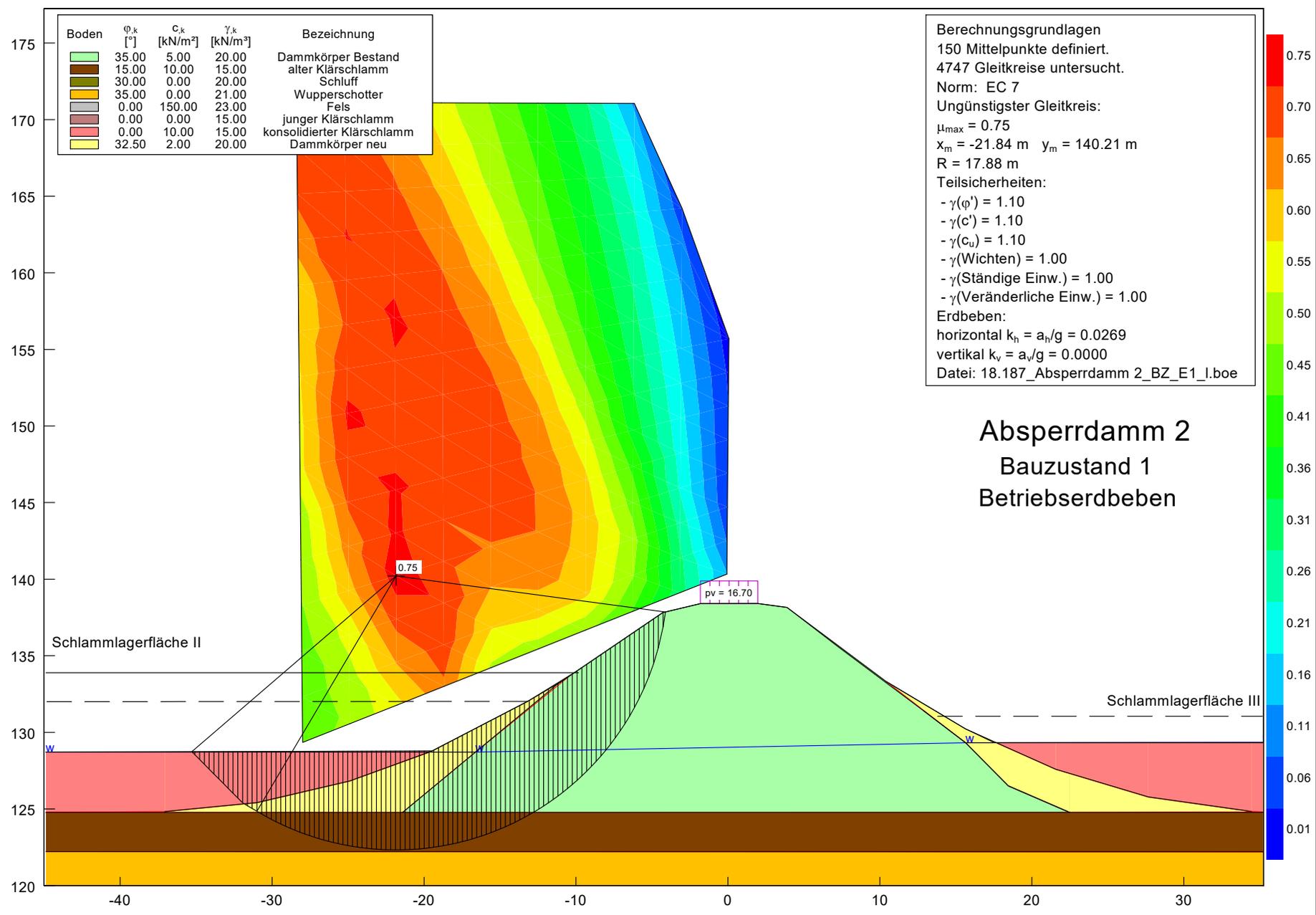
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



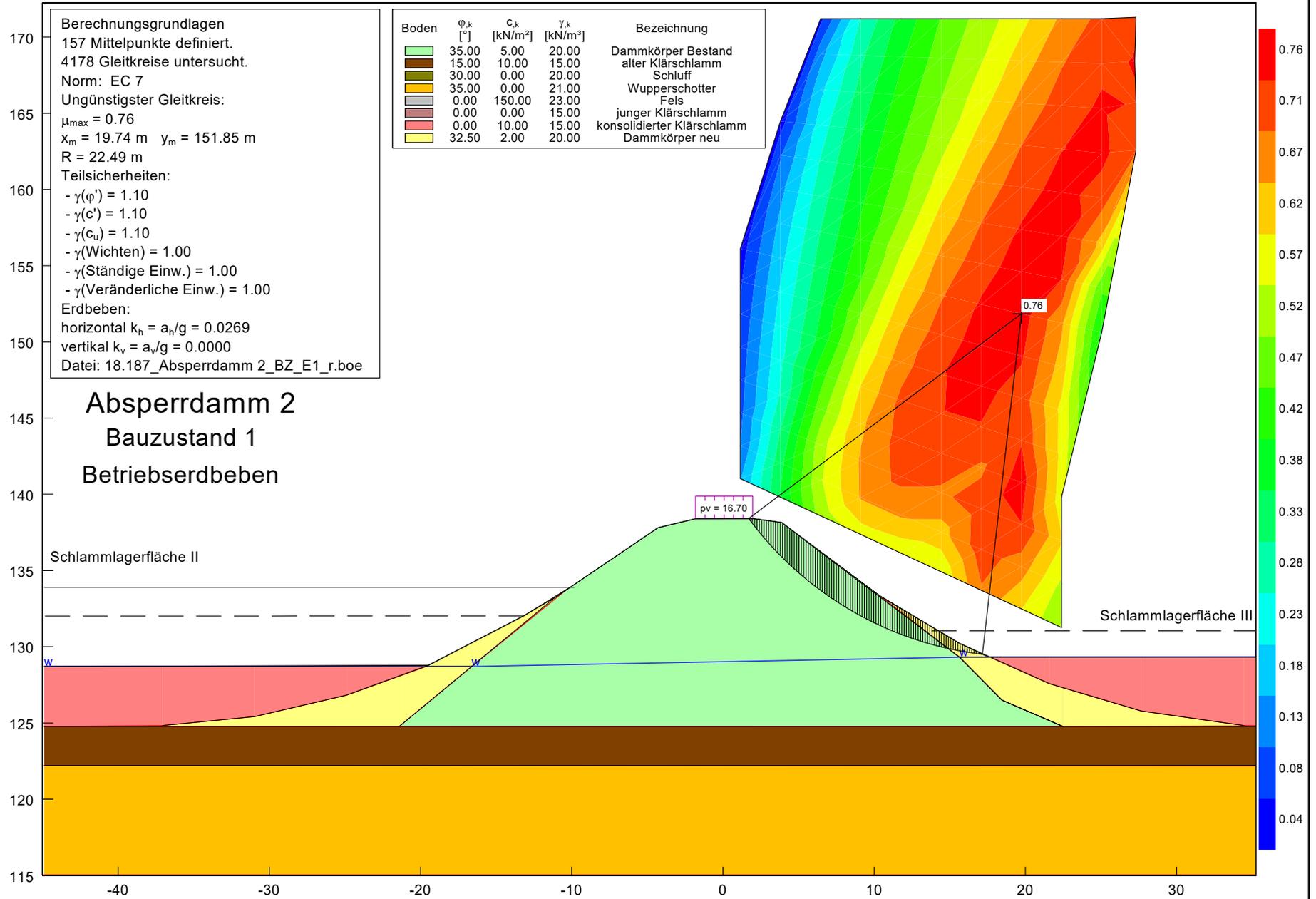


Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P





Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



**Berechnungsgrundlagen**  
 157 Mittelpunkte definiert.  
 4178 Gleitkreise untersucht.  
 Norm: EC 7  
 Ungünstigster Gleitkreis:  
 $\mu_{max} = 0.76$   
 $x_m = 19.74 \text{ m}$   $y_m = 151.85 \text{ m}$   
 $R = 22.49 \text{ m}$   
 Teilsicherheiten:  
 -  $\gamma(\phi') = 1.10$   
 -  $\gamma(c') = 1.10$   
 -  $\gamma(c_u) = 1.10$   
 -  $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$   
 Erdbeben:  
 horizontal  $k_h = a_h/g = 0.0269$   
 vertikal  $k_v = a_v/g = 0.0000$   
 Datei: 18.187\_Absperrdamm 2\_BZ\_E1\_r.boe

Boden	$\phi_k$ [°]	$c_k$ [kN/m²]	$\gamma_k$ [kN/m³]	Bezeichnung
[Light Green]	35.00	5.00	20.00	Dammkörper Bestand
[Brown]	15.00	10.00	15.00	alter Klärschlamm
[Dark Green]	30.00	0.00	20.00	Schluff
[Yellow-Green]	35.00	0.00	21.00	Wupperschotter
[Grey]	0.00	150.00	23.00	Fels
[Pink]	0.00	0.00	15.00	junger Klärschlamm
[Red]	0.00	10.00	15.00	konsolidierter Klärschlamm
[Yellow]	32.50	2.00	20.00	Dammkörper neu

**Absperrdamm 2**  
 Bauzustand 1  
 Betriebserdbeben

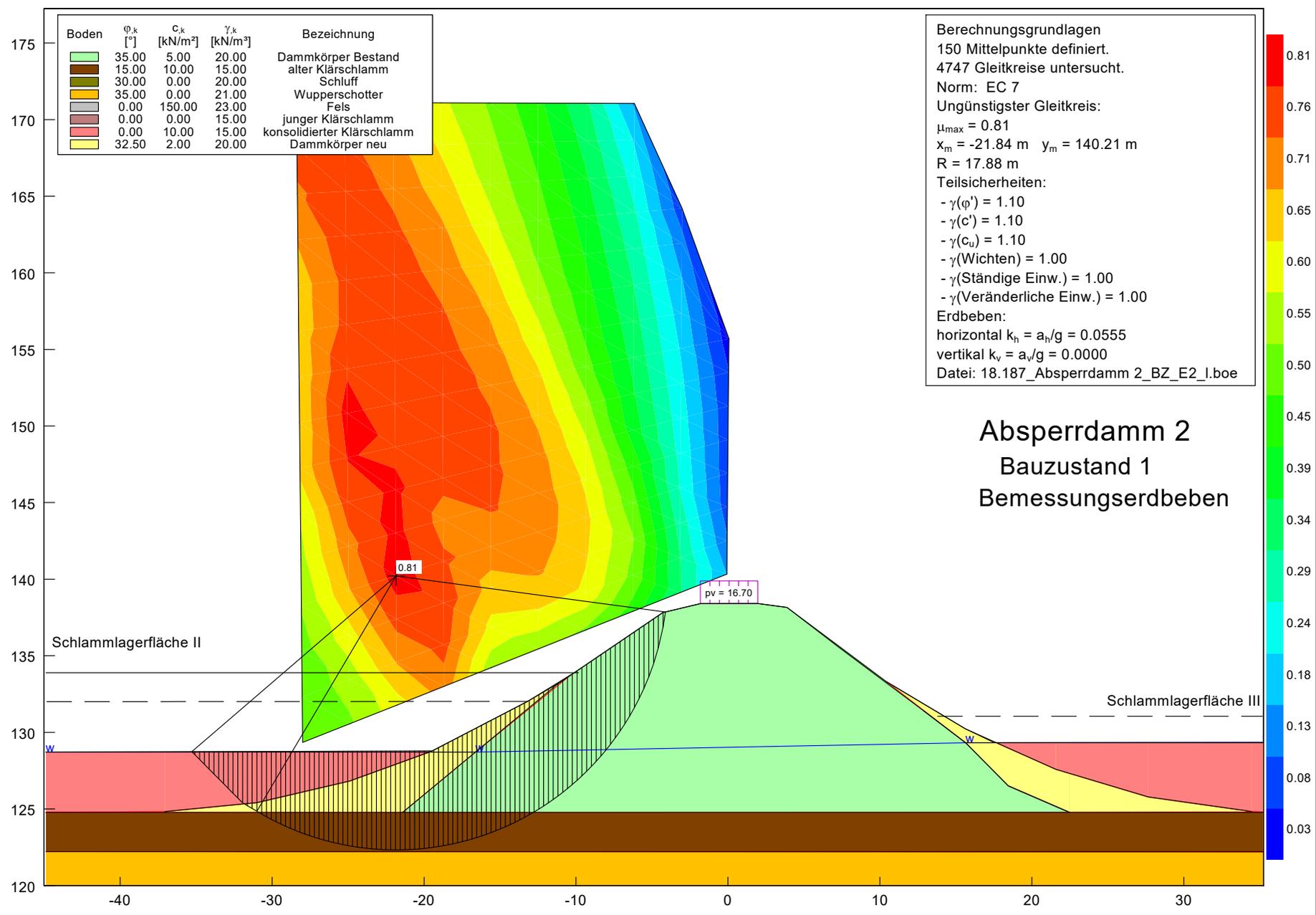
Schlammflagerfläche II

Schlammflagerfläche III

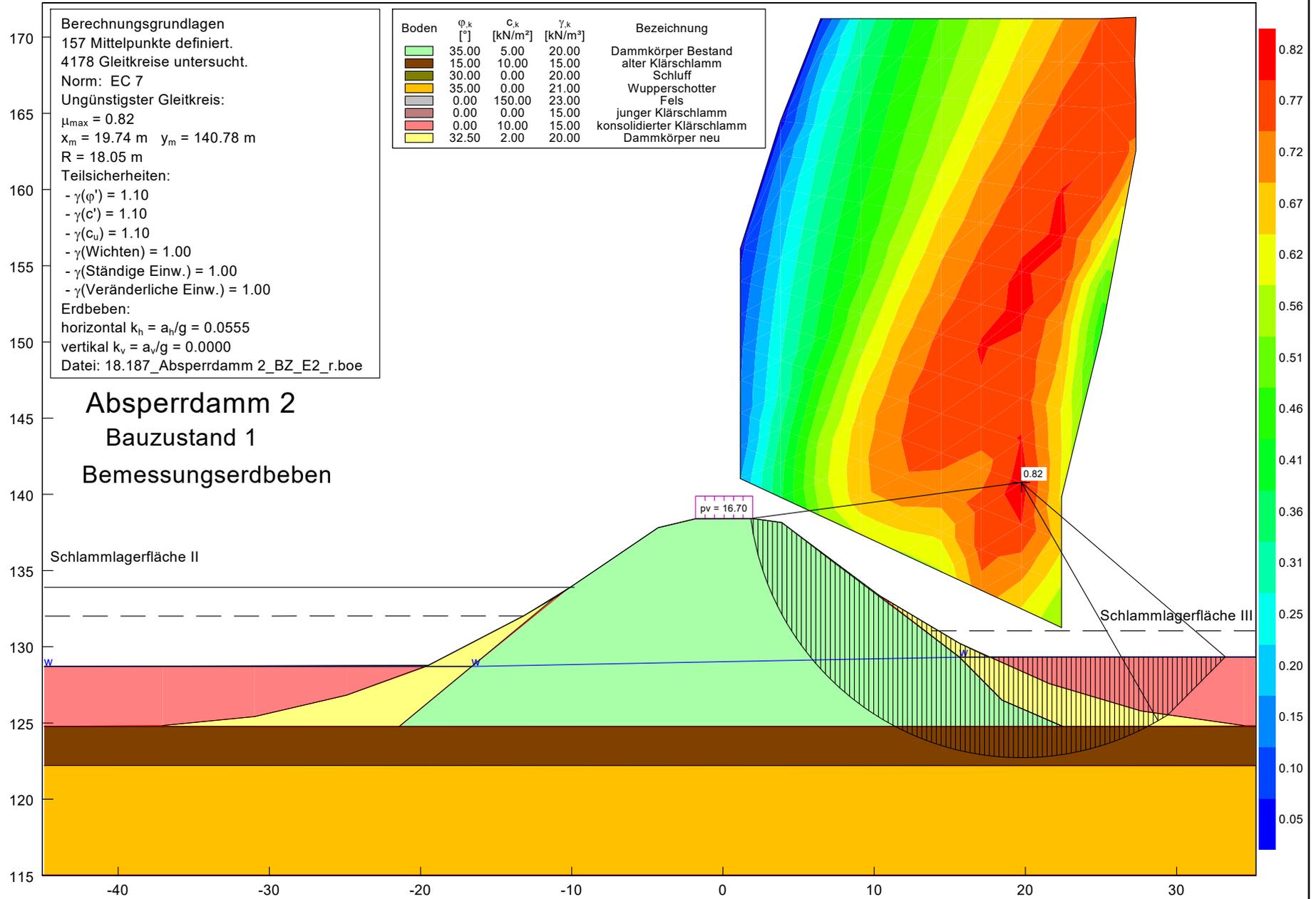
pv = 16.70

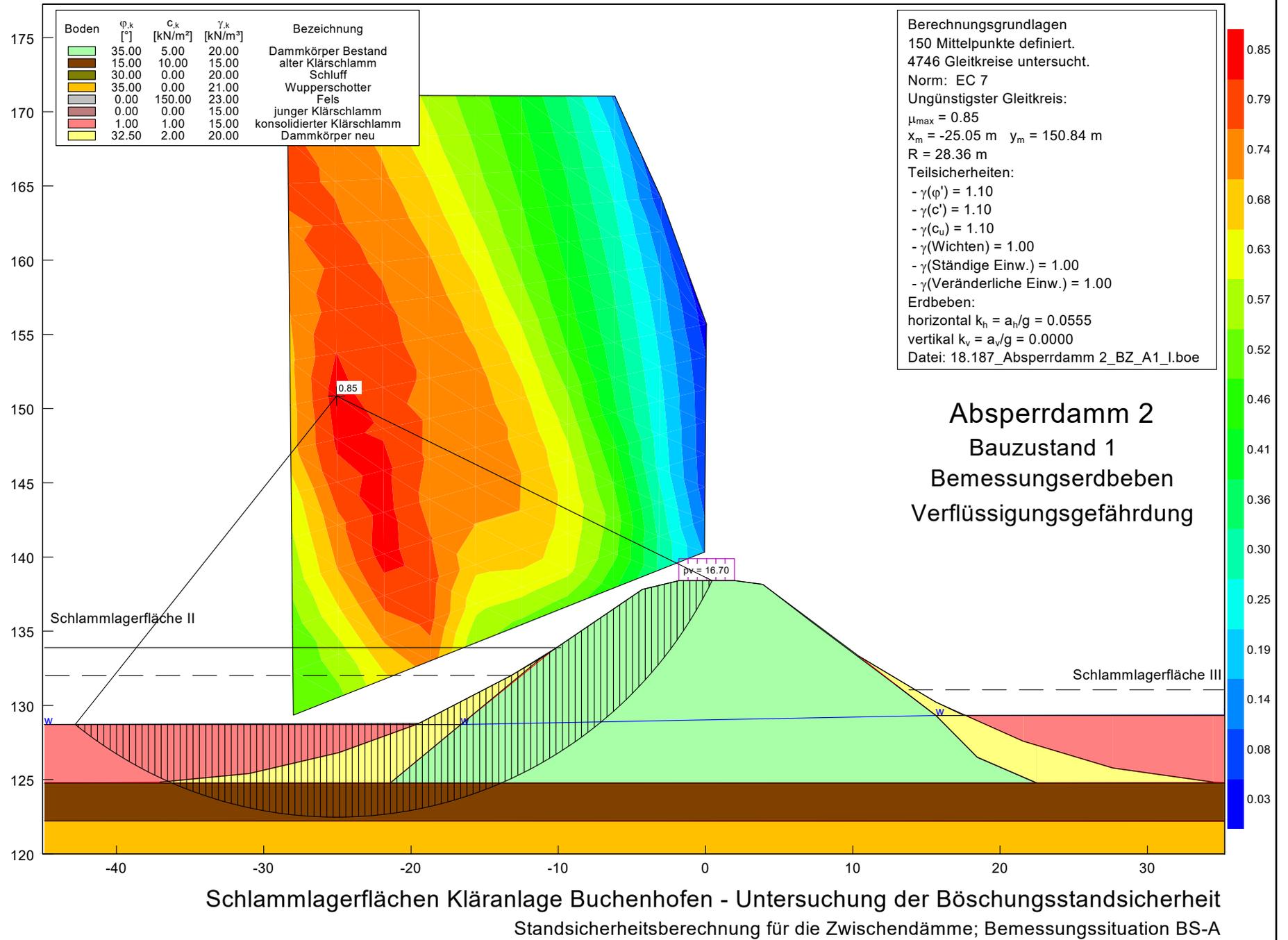
0.76

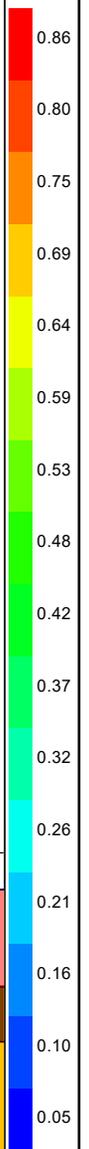
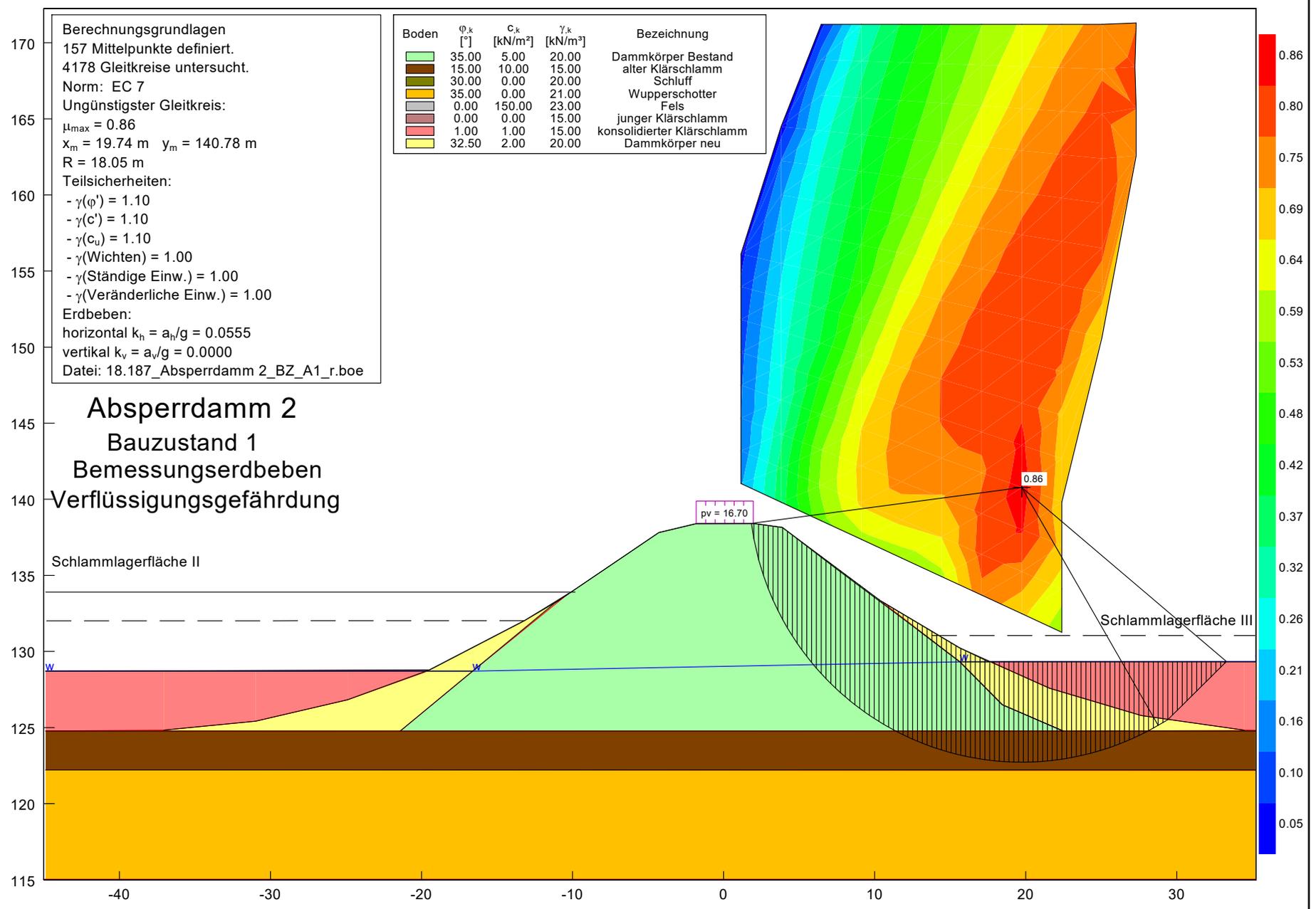
Schlammflagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

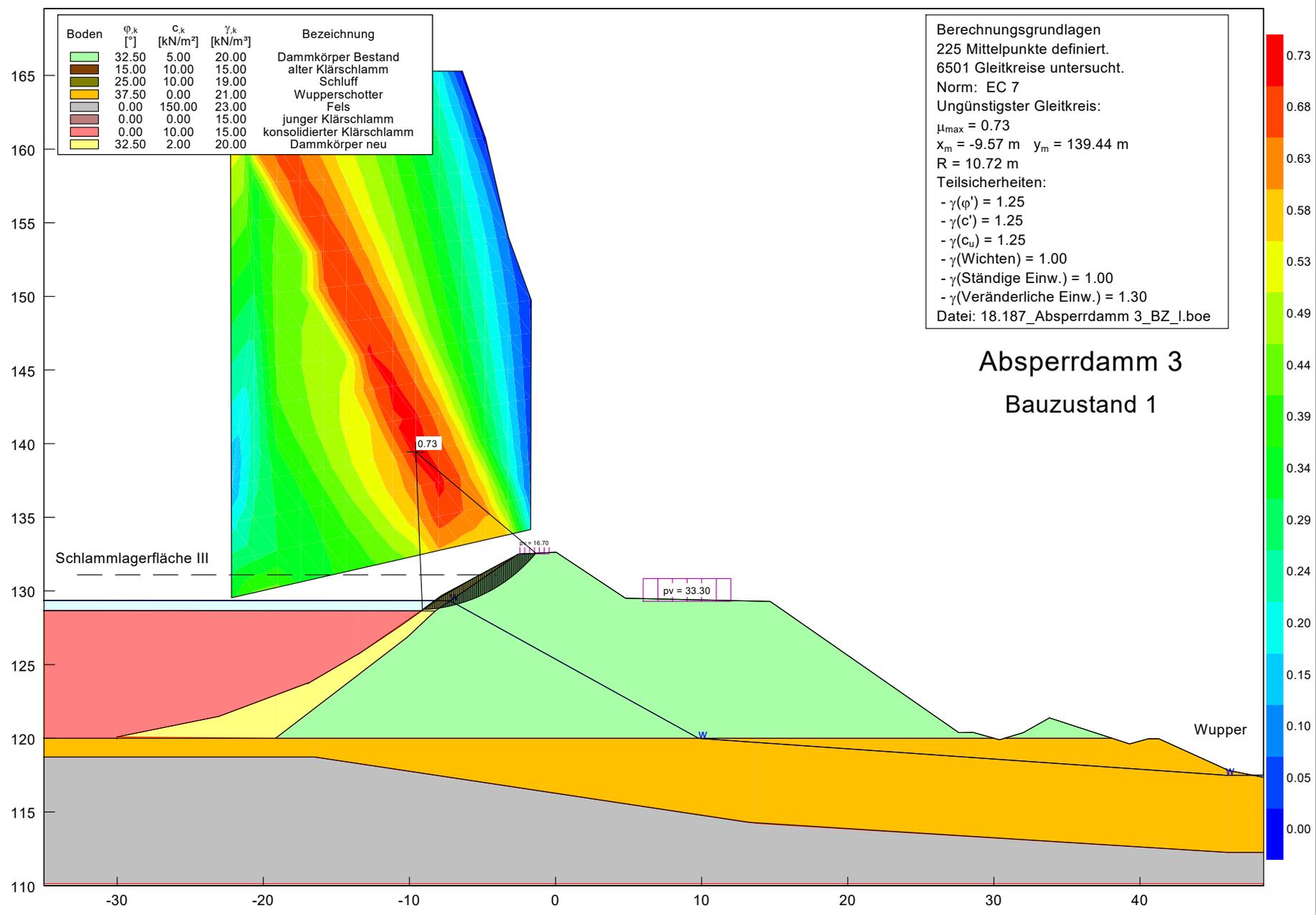


Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

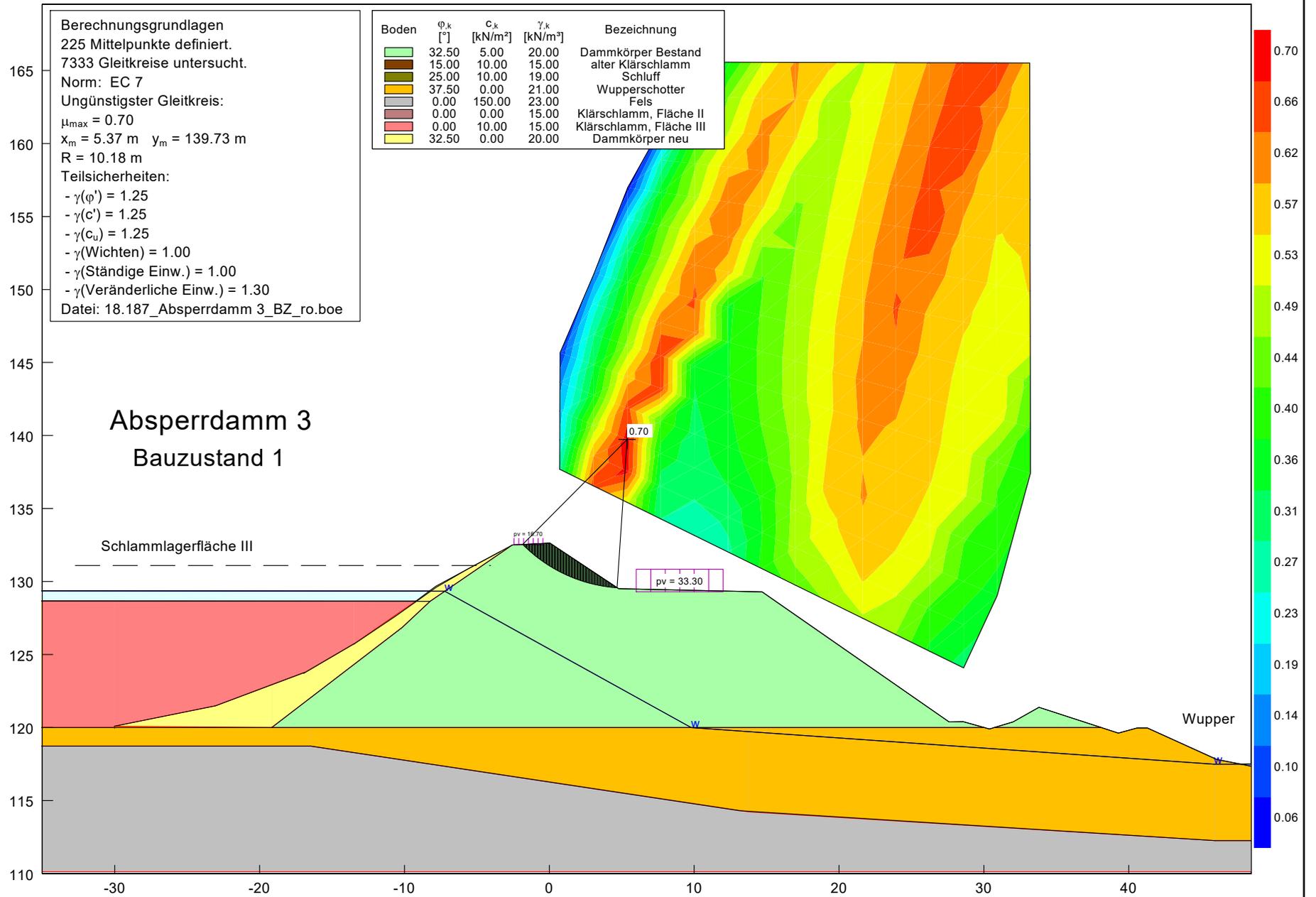




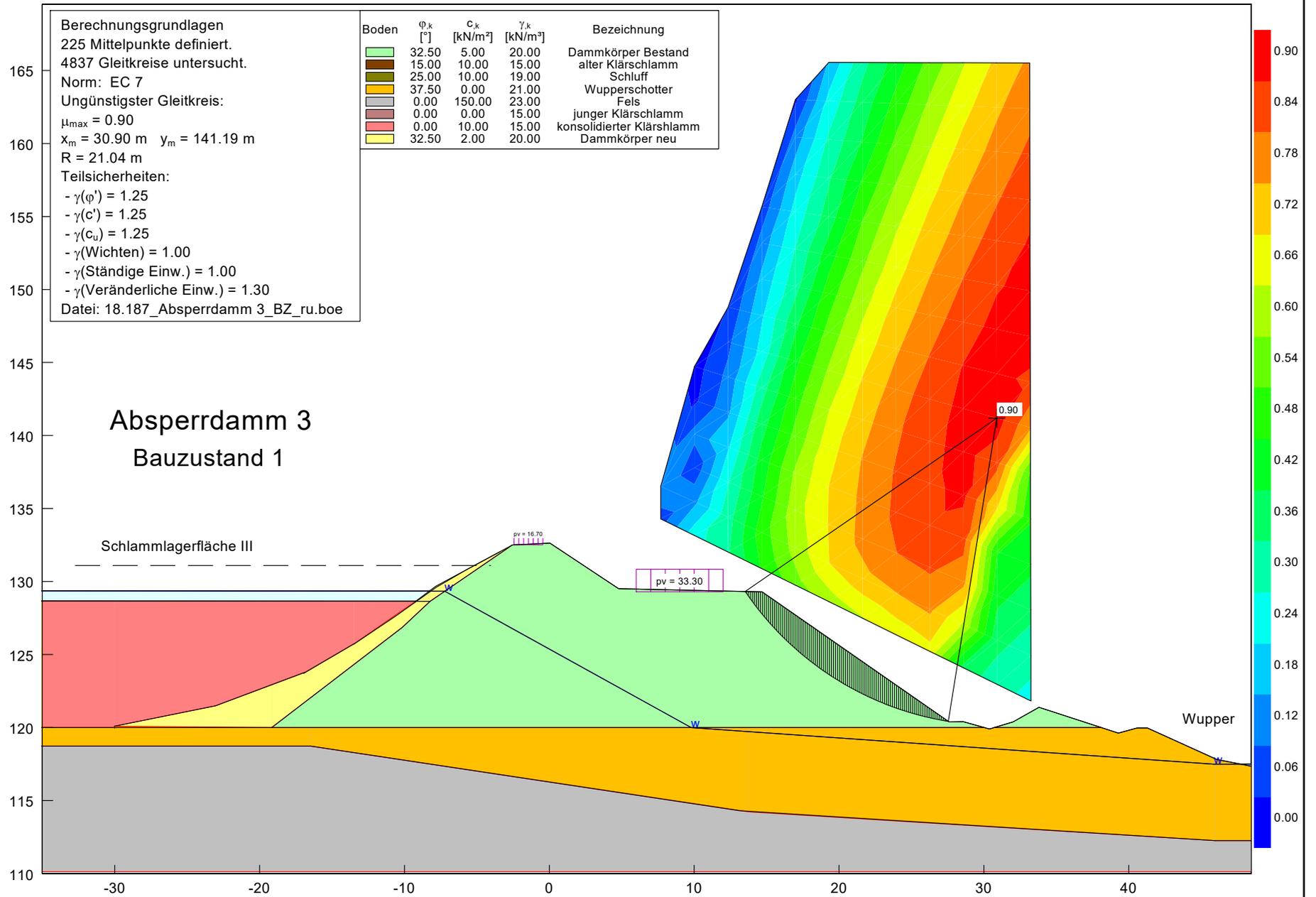




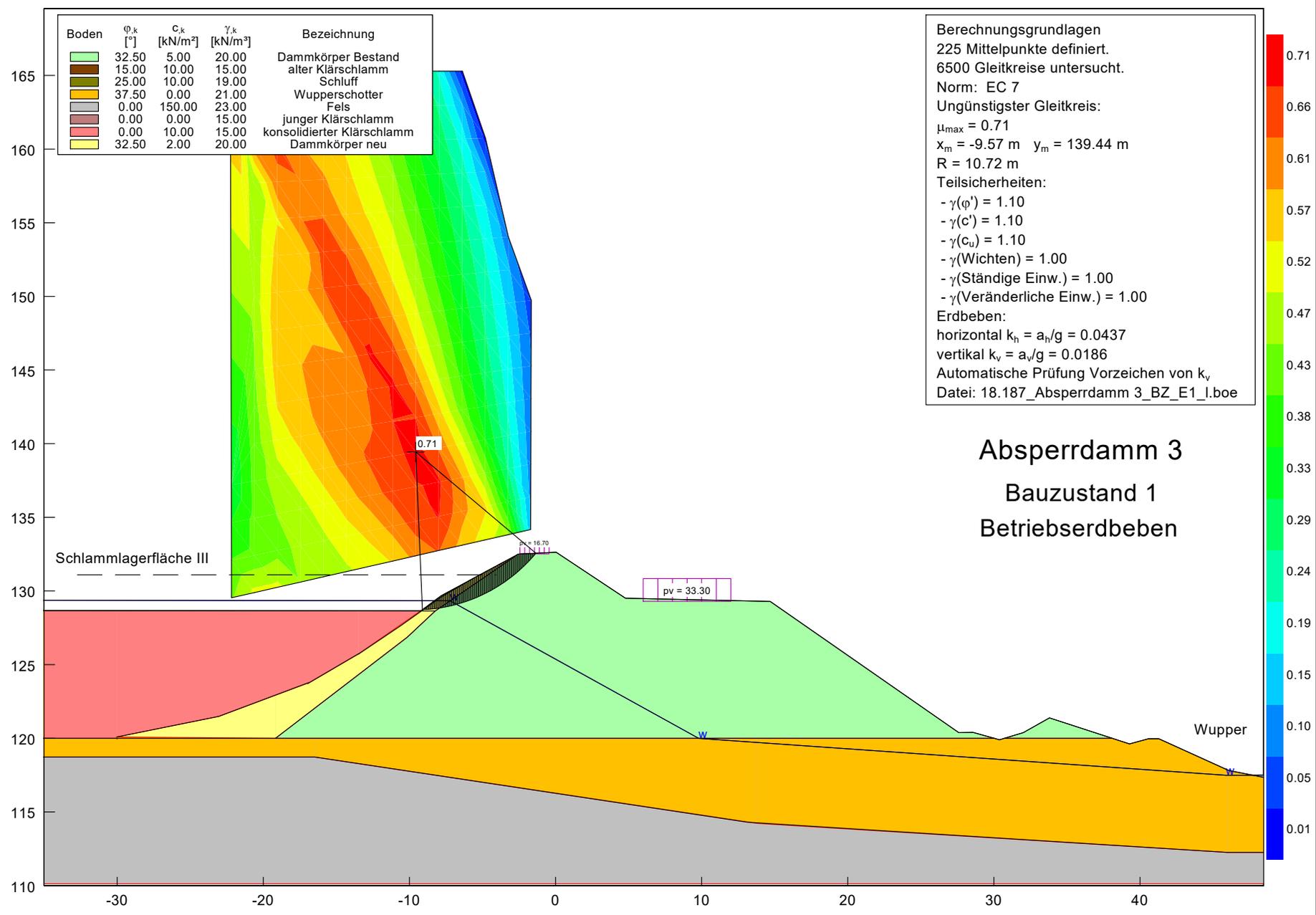
Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



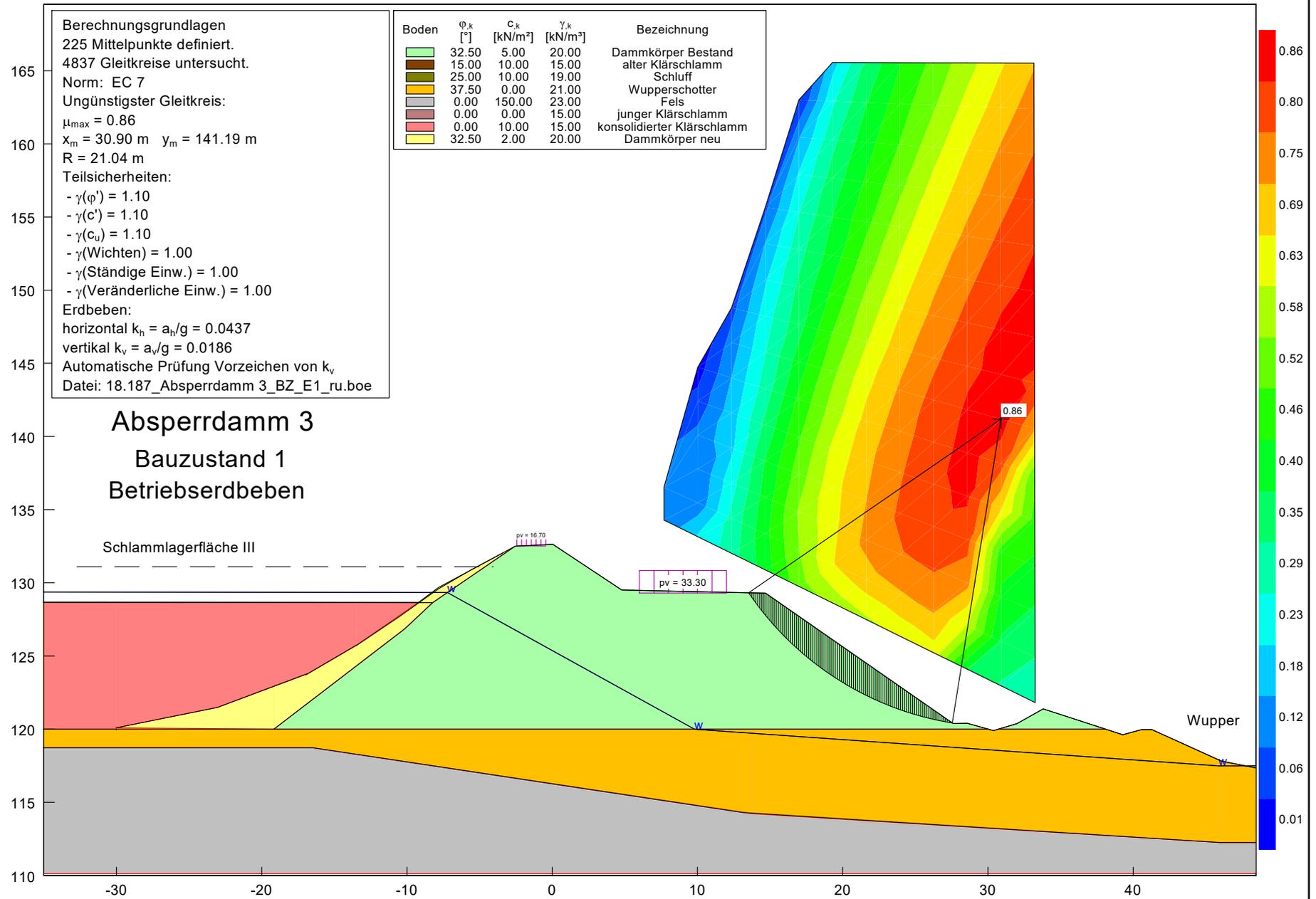
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

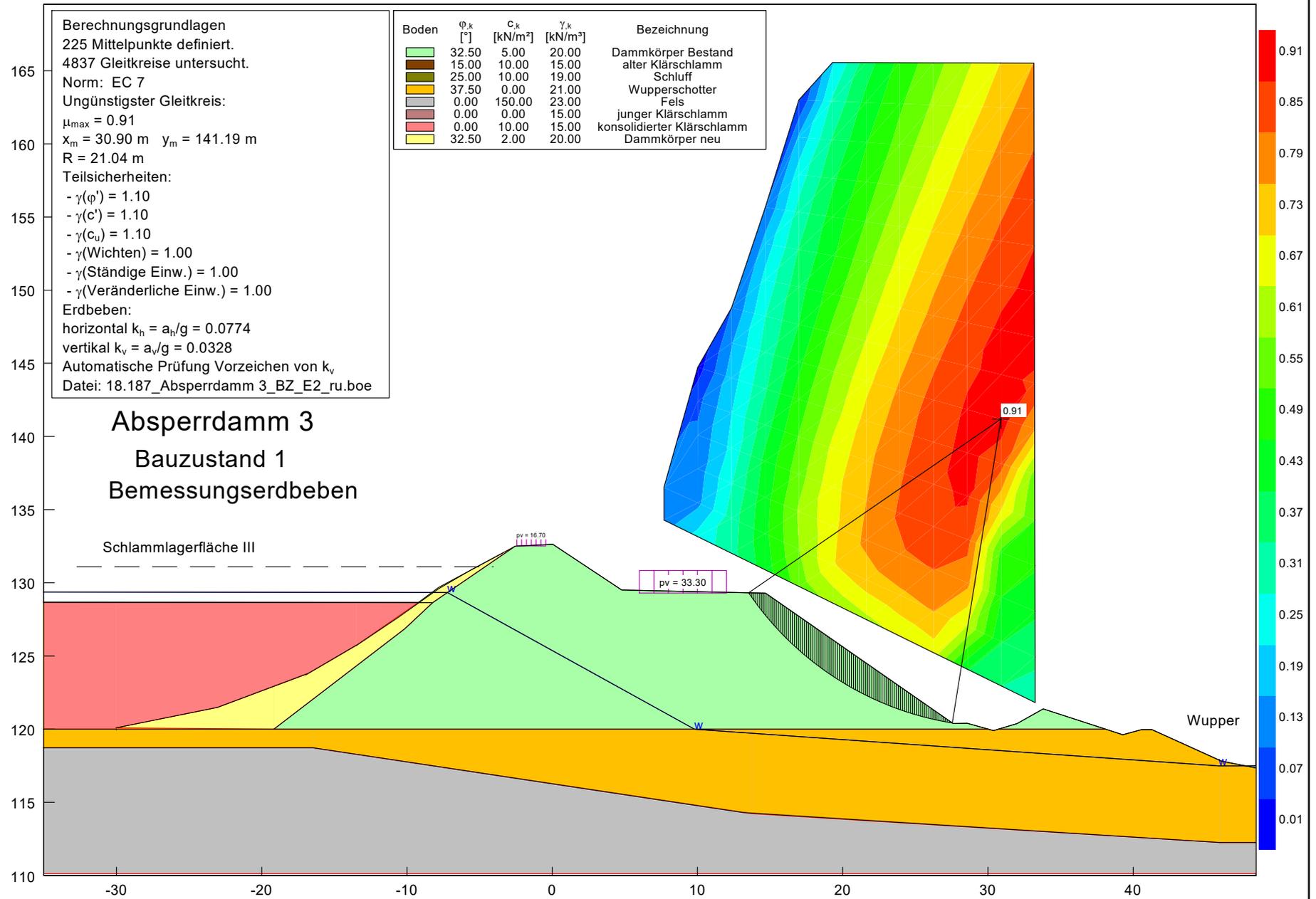


Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

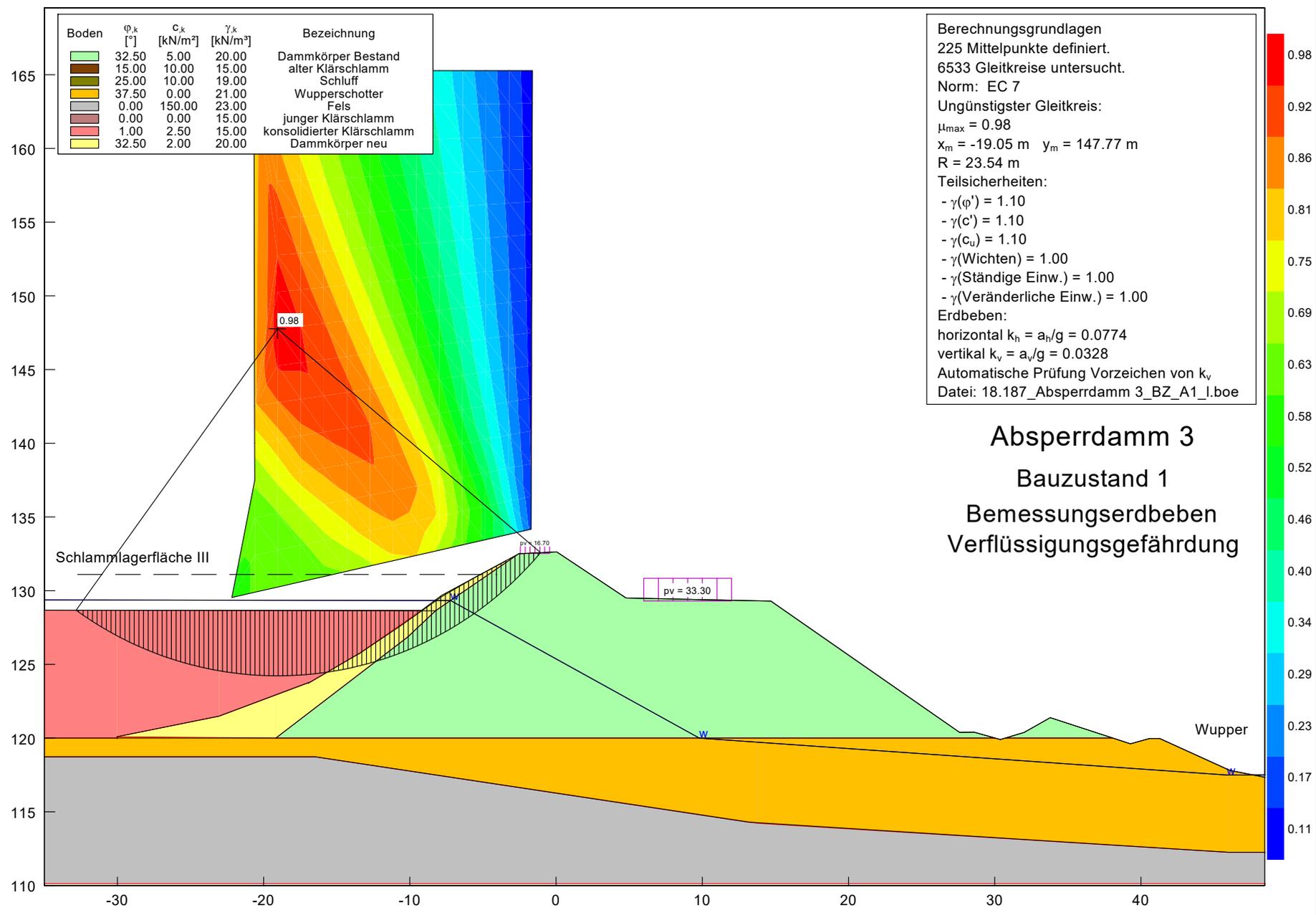


Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



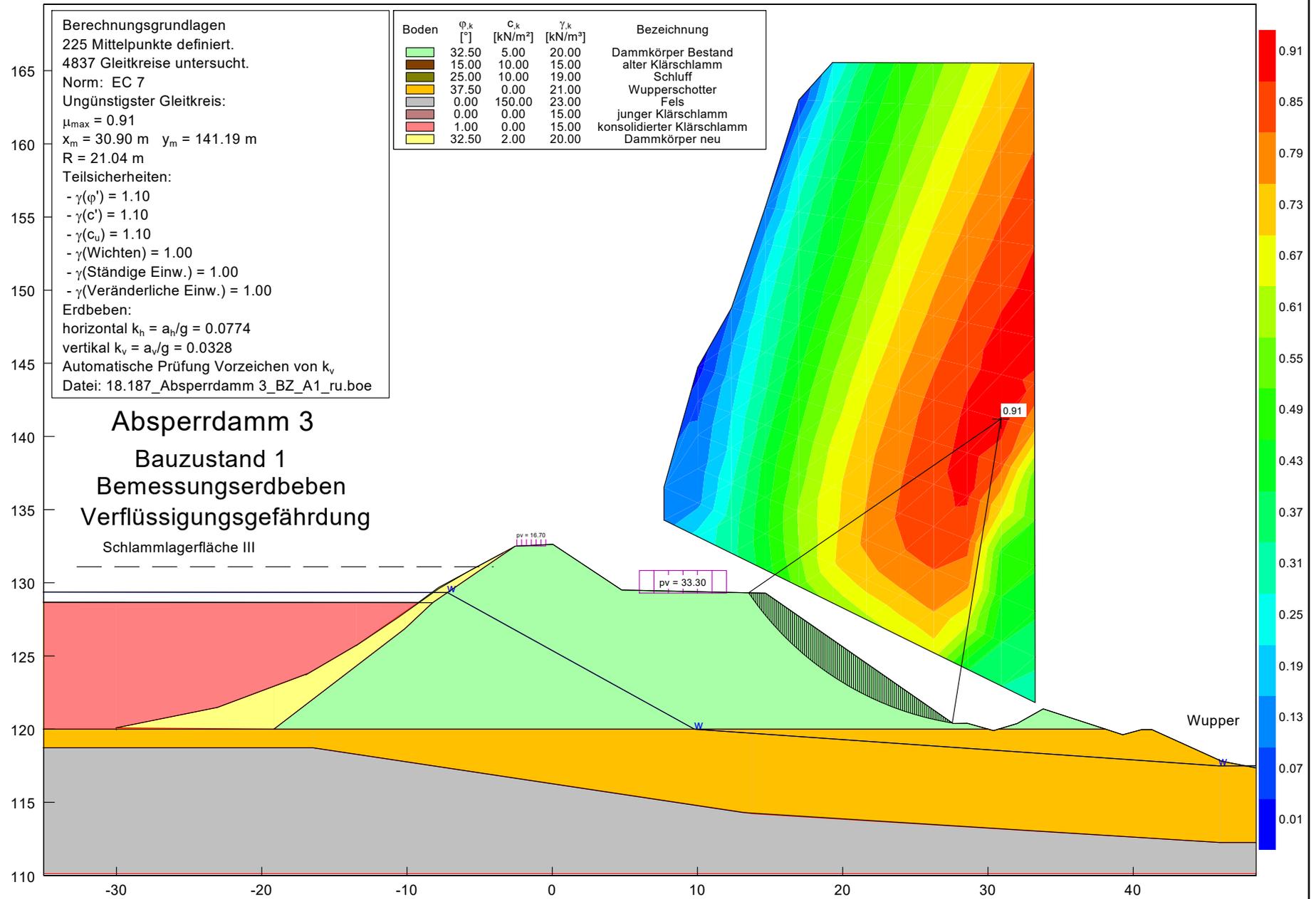


Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

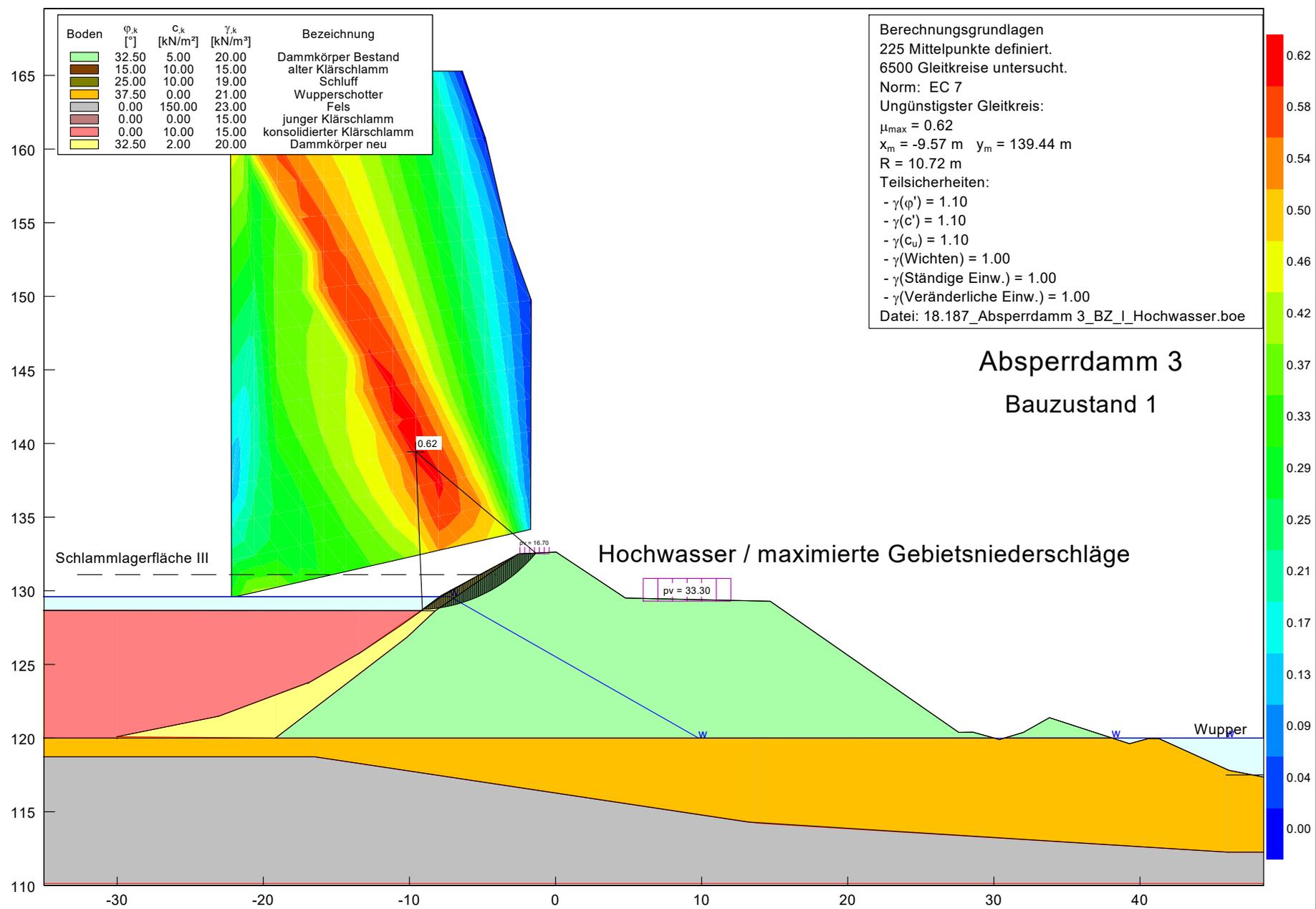


**Absperrdamm 3**  
**Bauzustand 1**  
**Bemessungserdbeben**  
**Verflüssigungsgefährdung**

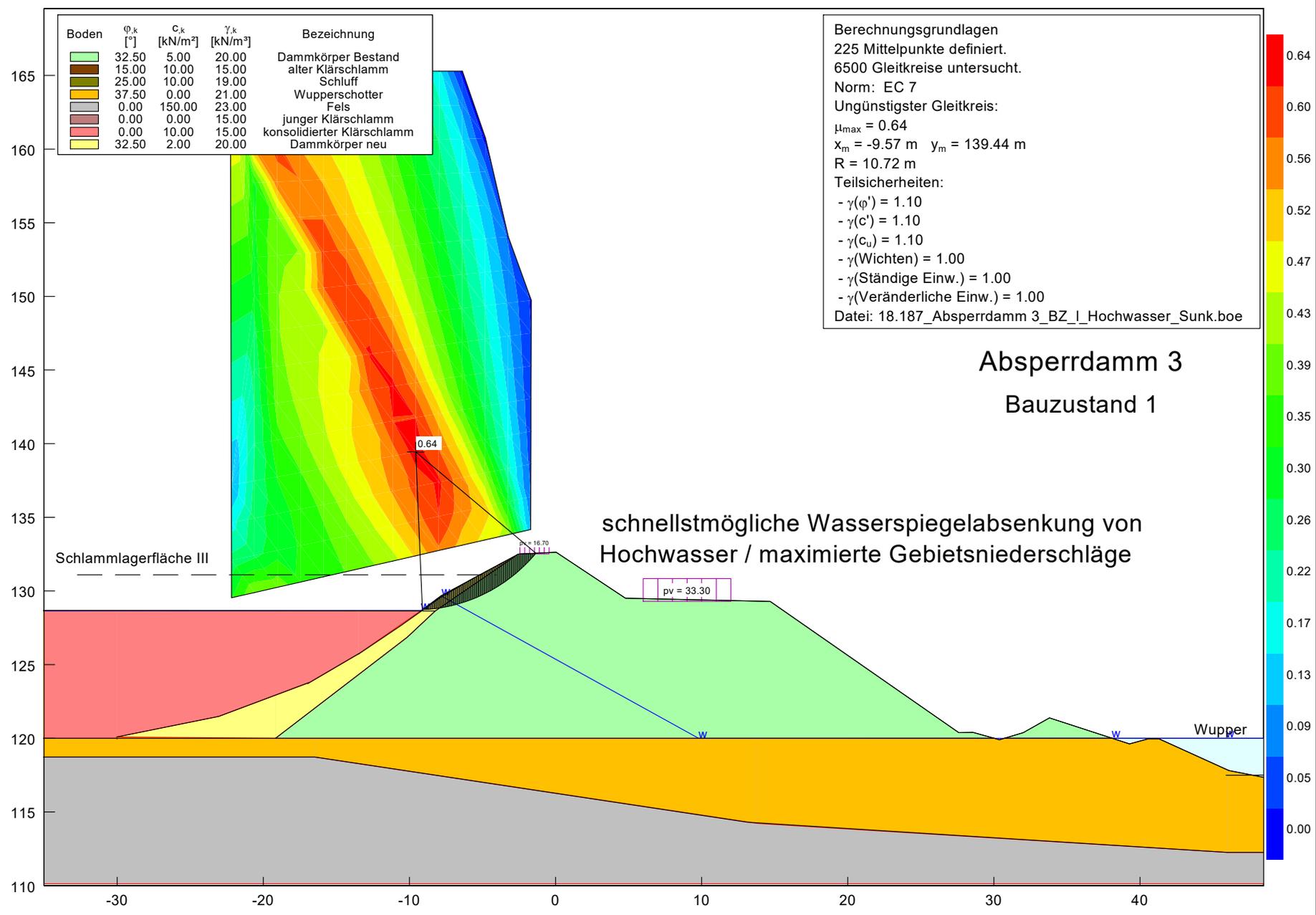
Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



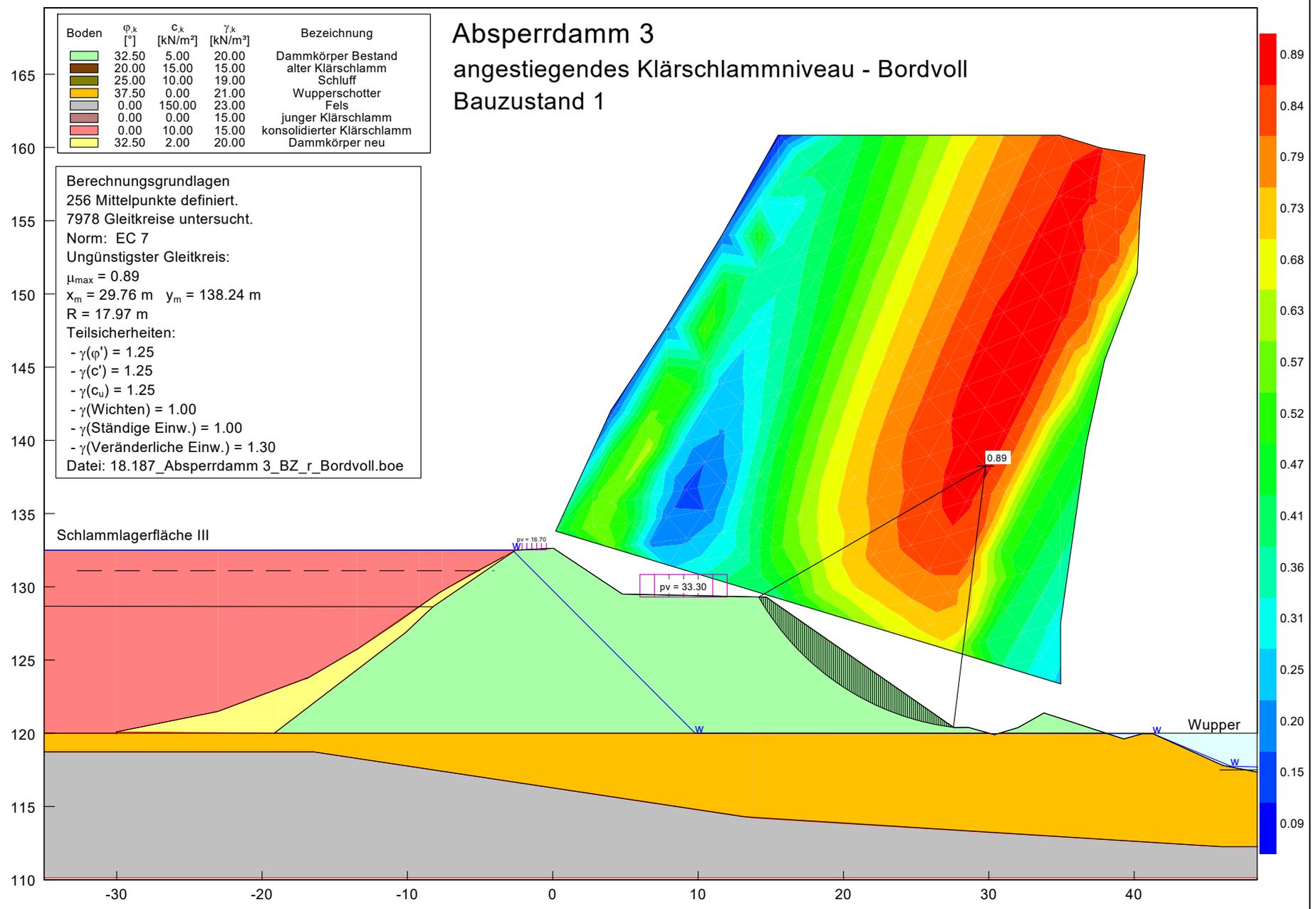
Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



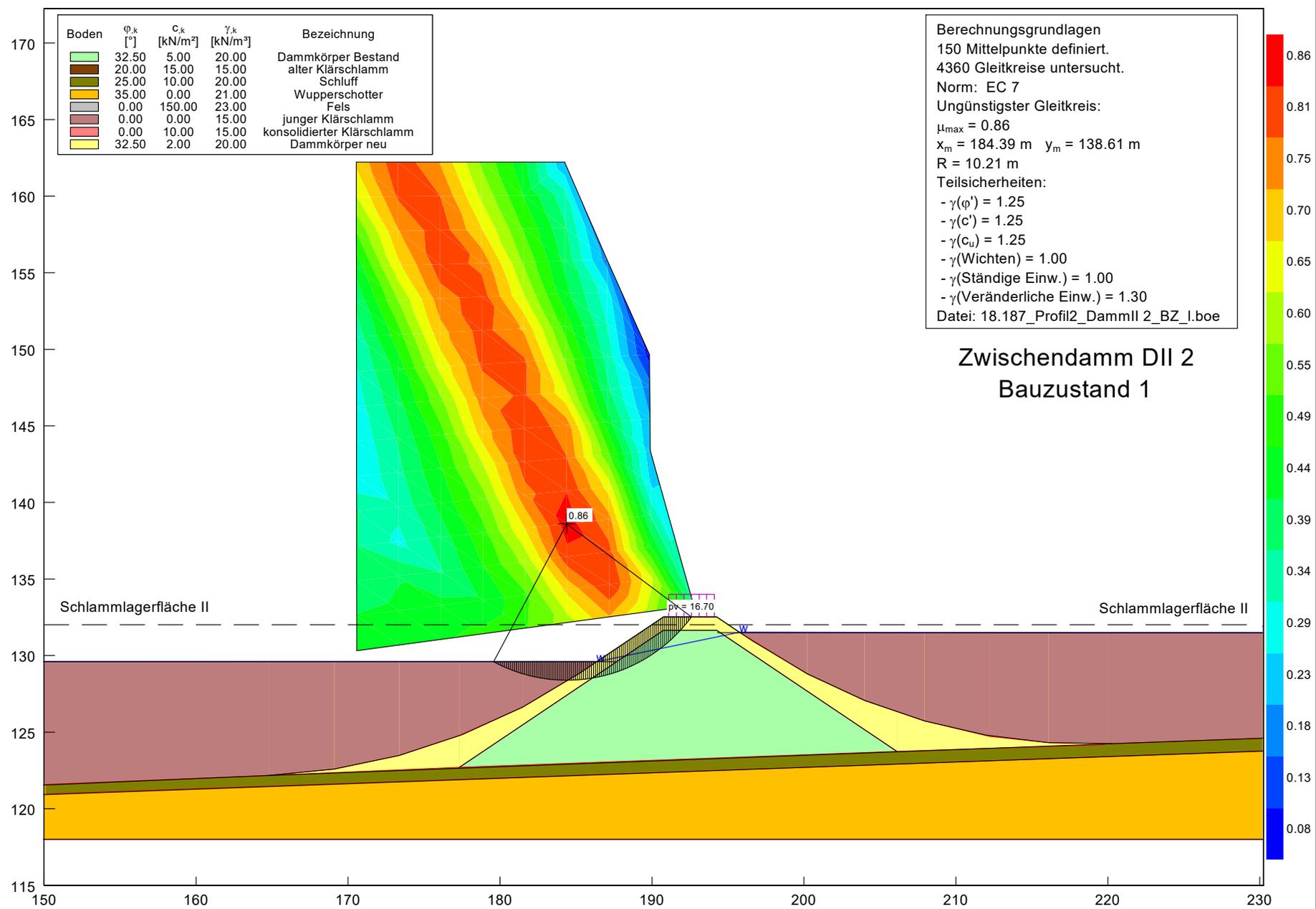
Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A - Hochwasser/MGN



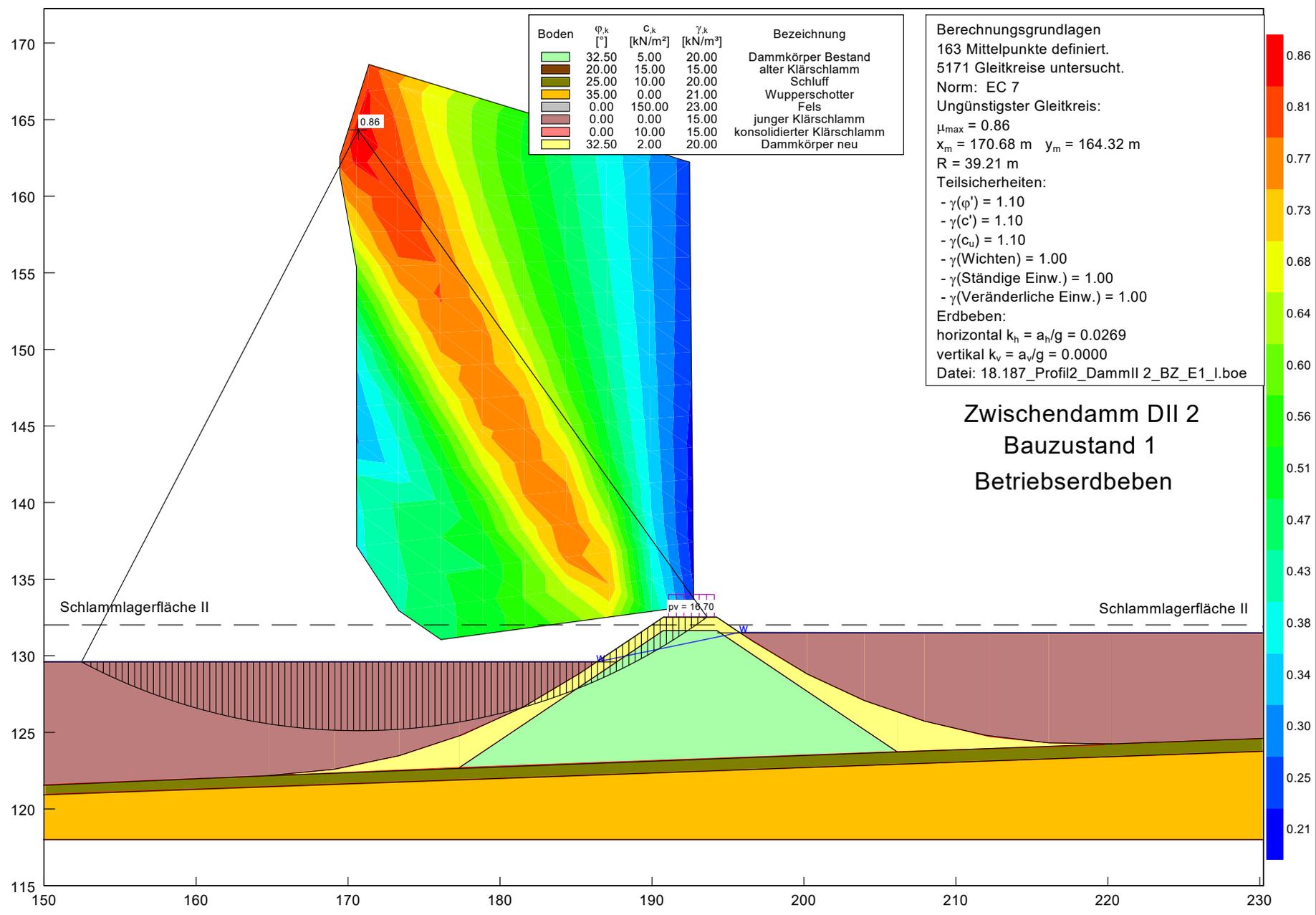
Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A - Hochwasser/MGN



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P - Bordvoll



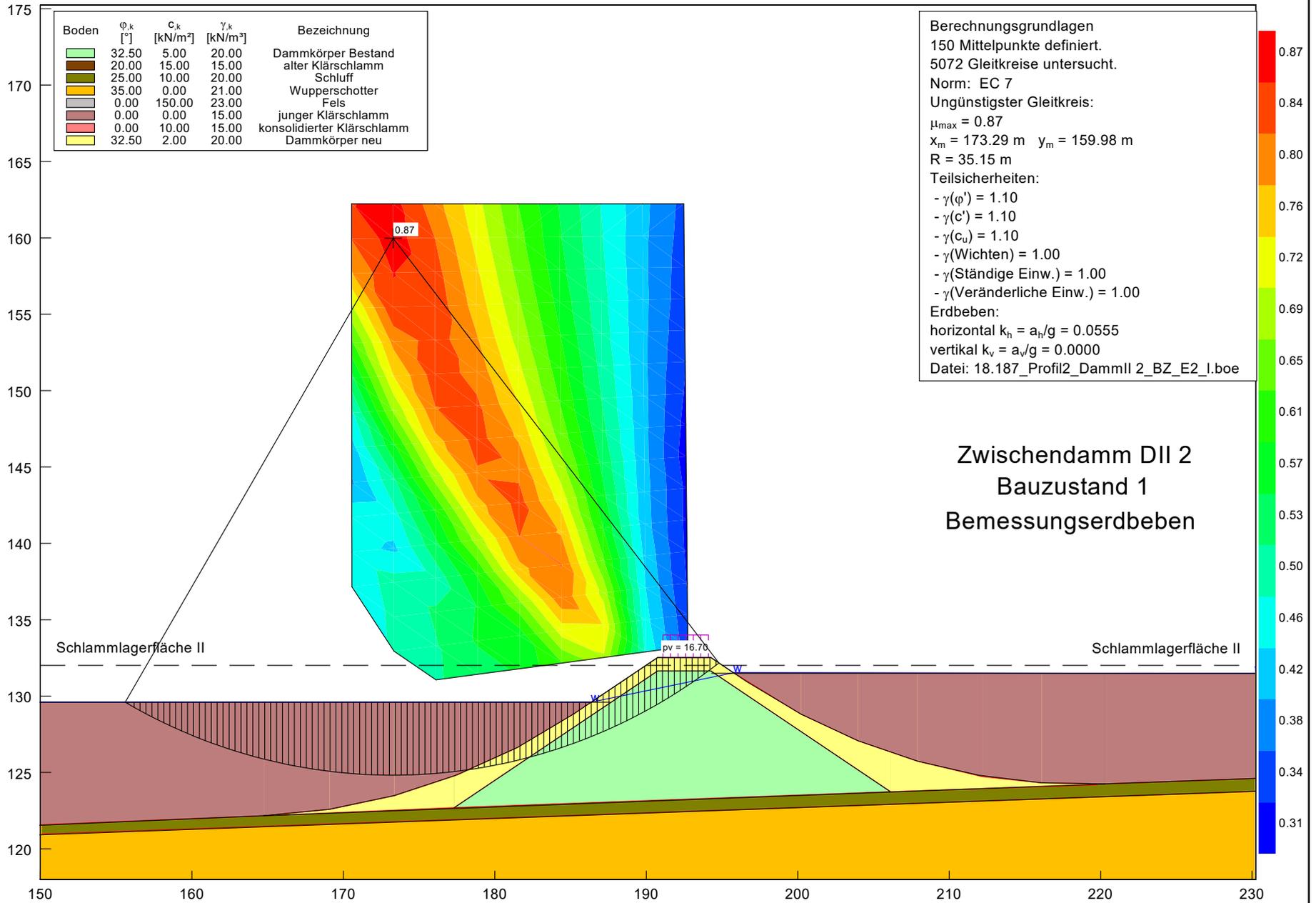
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



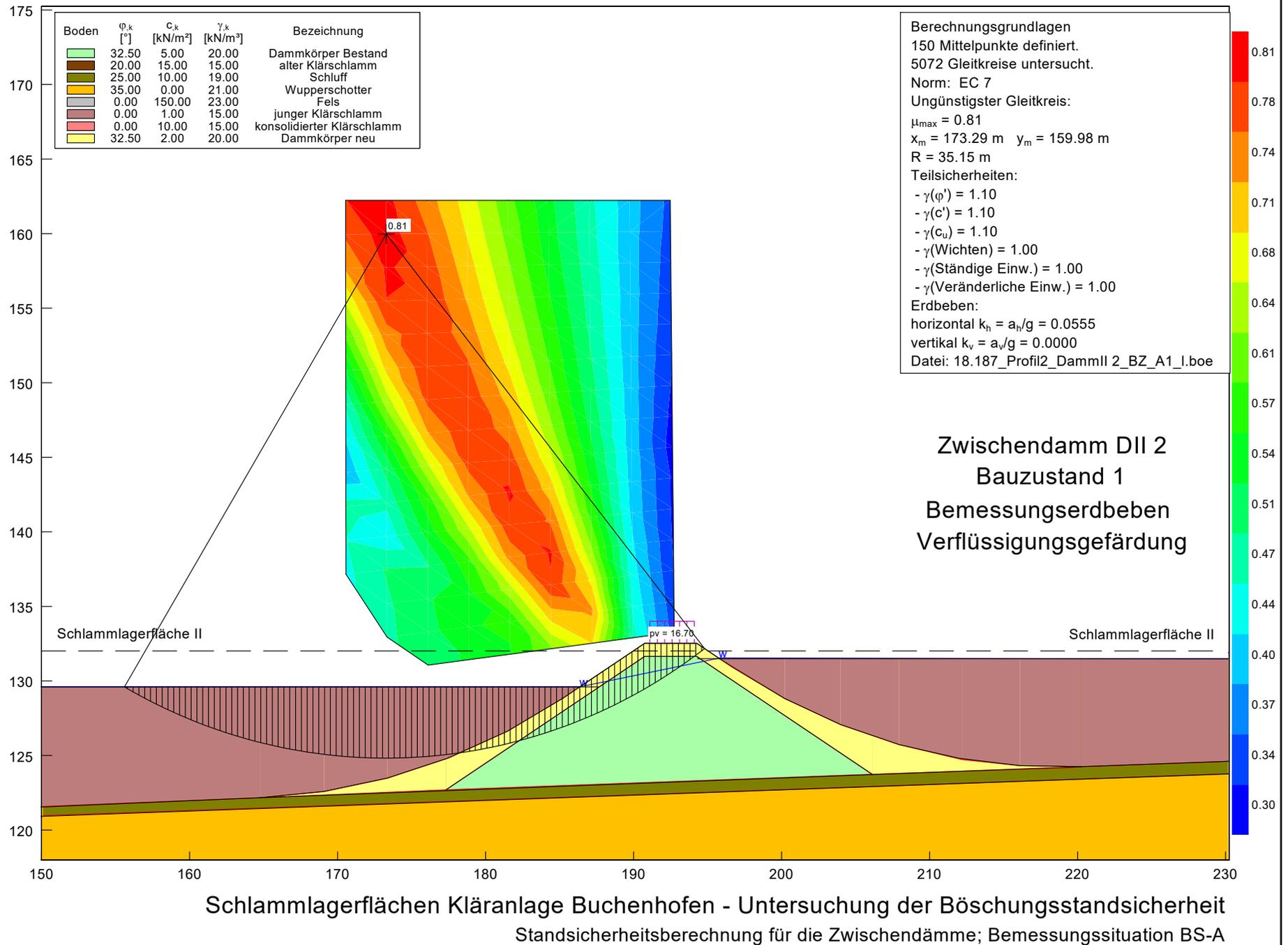
**Berechnungsgrundlagen**  
 163 Mittelpunkte definiert.  
 5171 Gleitkreise untersucht.  
 Norm: EC 7  
 Ungünstigster Gleitkreis:  
 $\mu_{max} = 0.86$   
 $x_m = 170.68 \text{ m}$   $y_m = 164.32 \text{ m}$   
 $R = 39.21 \text{ m}$   
 Teilsicherheiten:  
 -  $\gamma(\varphi') = 1.10$   
 -  $\gamma(c') = 1.10$   
 -  $\gamma(c_u) = 1.10$   
 -  $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$   
 Erdbeben:  
 horizontal  $k_h = a_h/g = 0.0269$   
 vertikal  $k_v = a_v/g = 0.0000$   
 Datei: 18.187\_Profil2\_DammII 2\_BZ\_E1\_I.boe

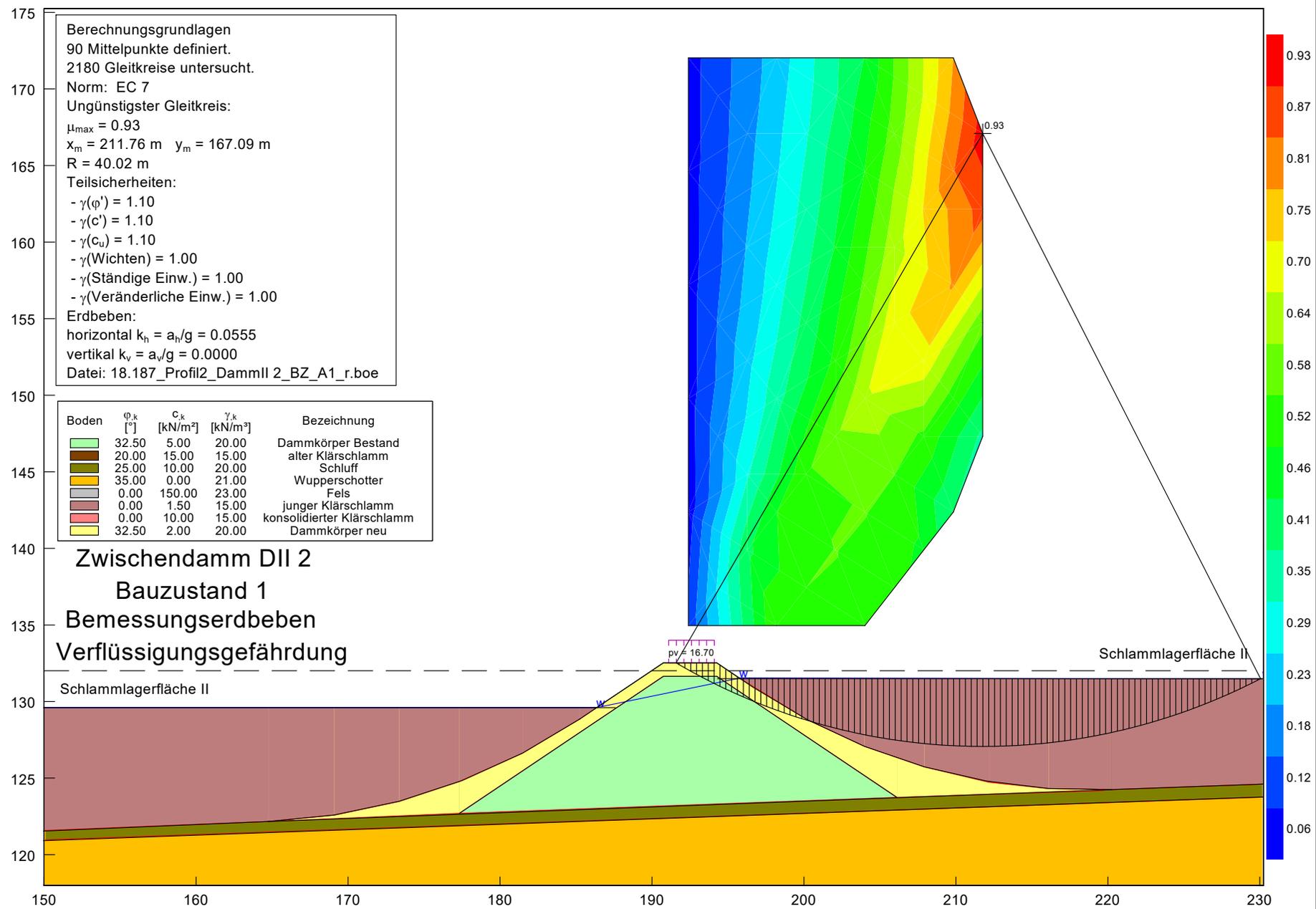
**Zwischendamm DII 2  
 Bauzustand 1  
 Betriebserdbeben**

Schlammlagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

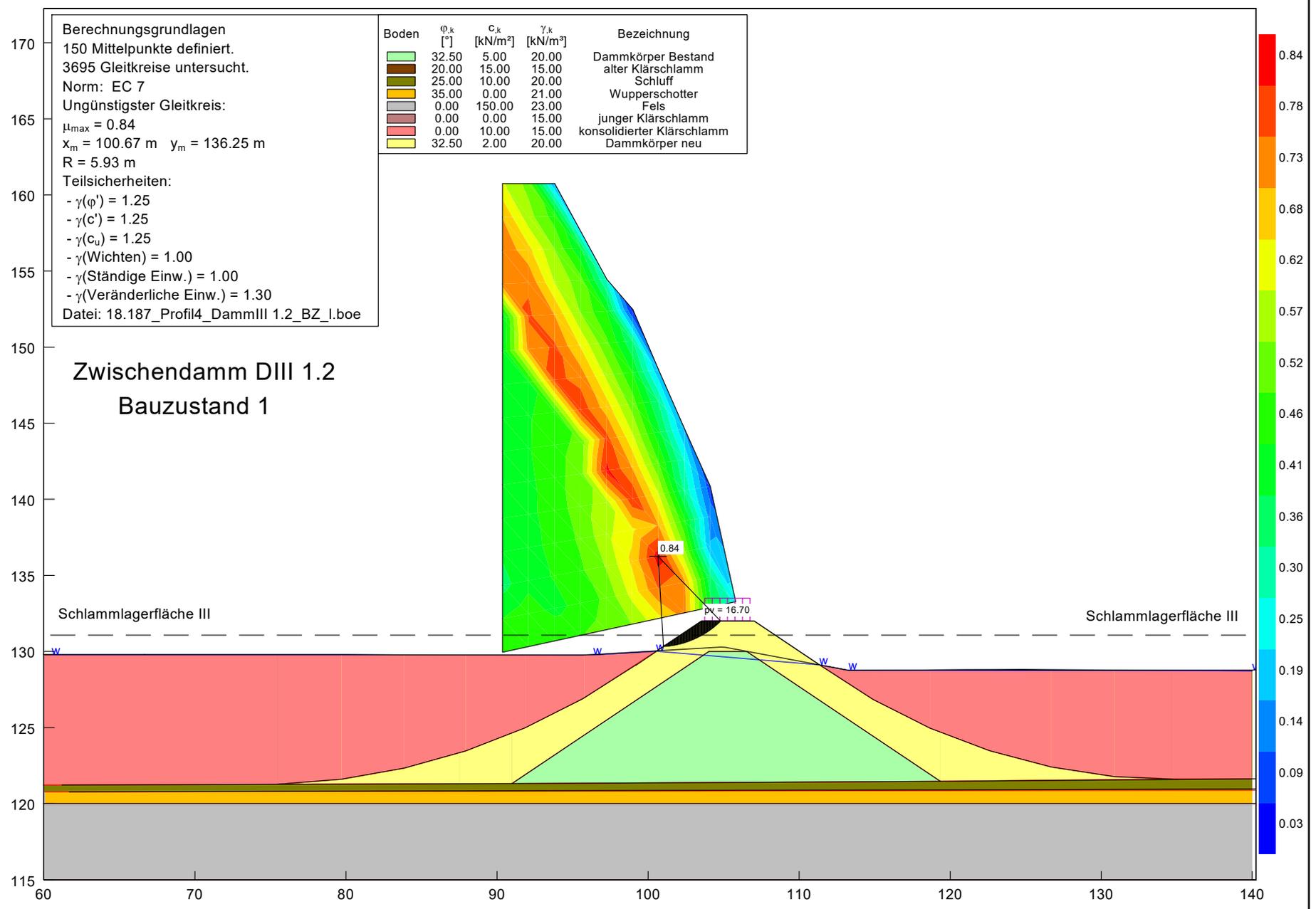


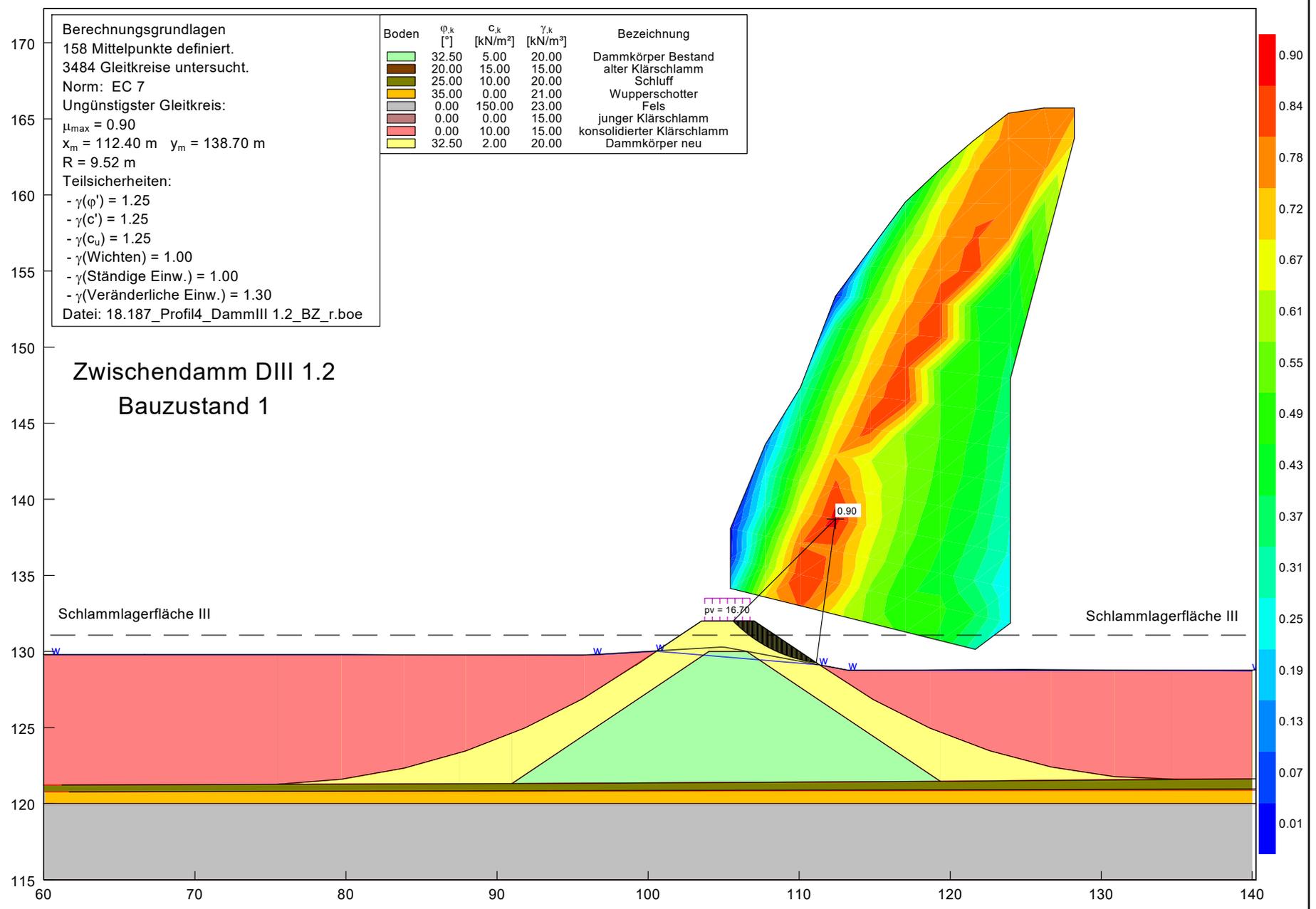
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



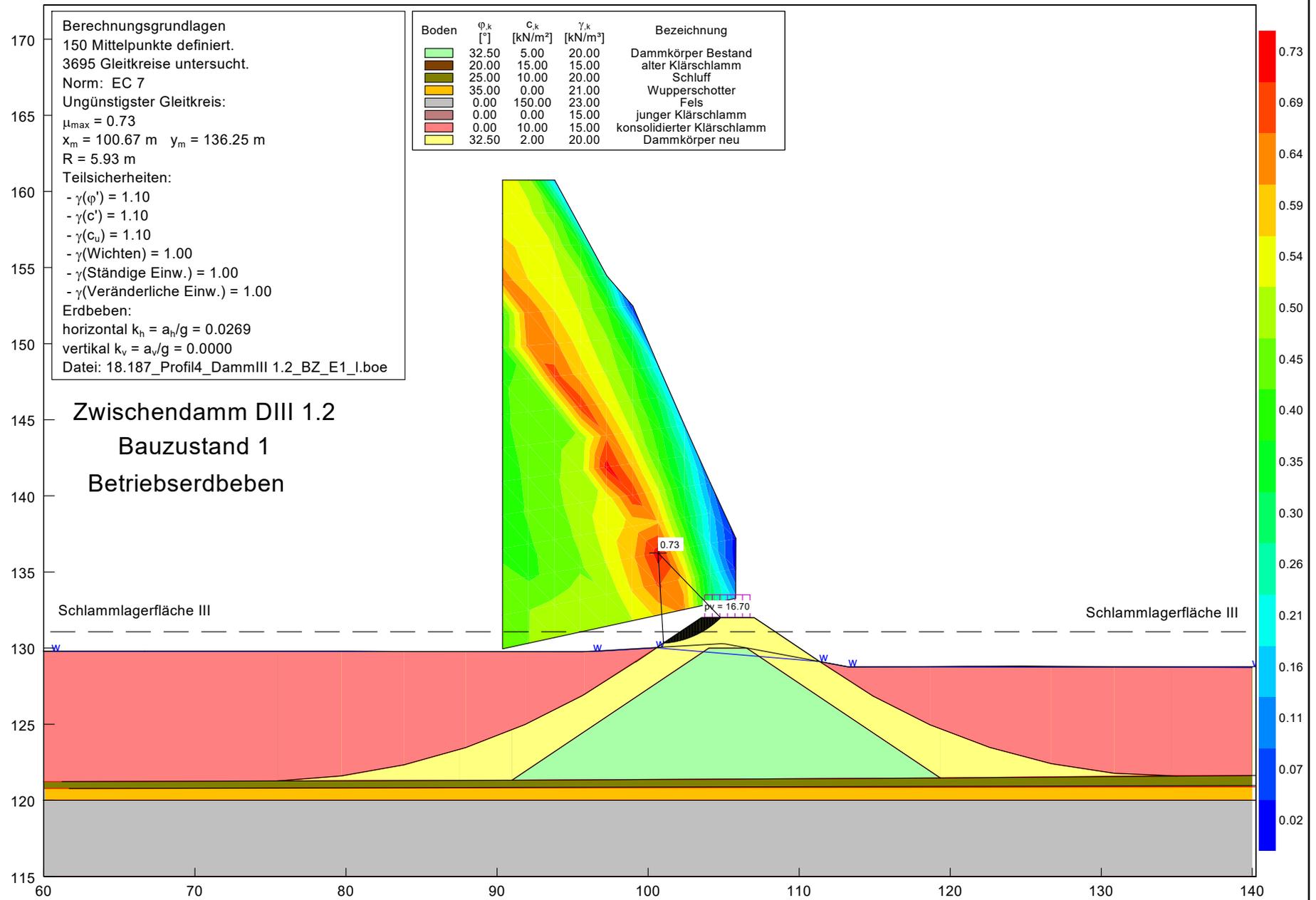


**Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit**  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

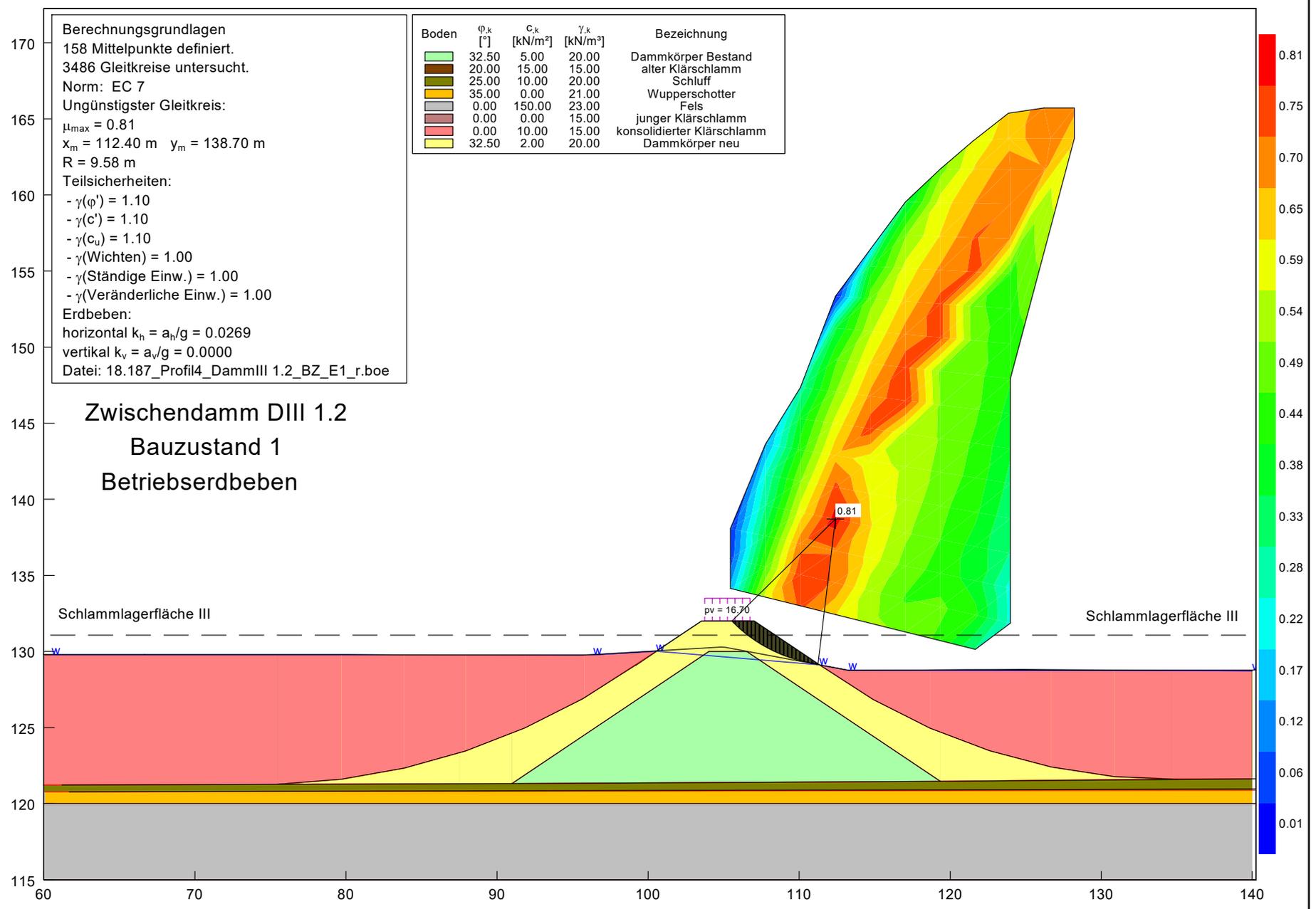




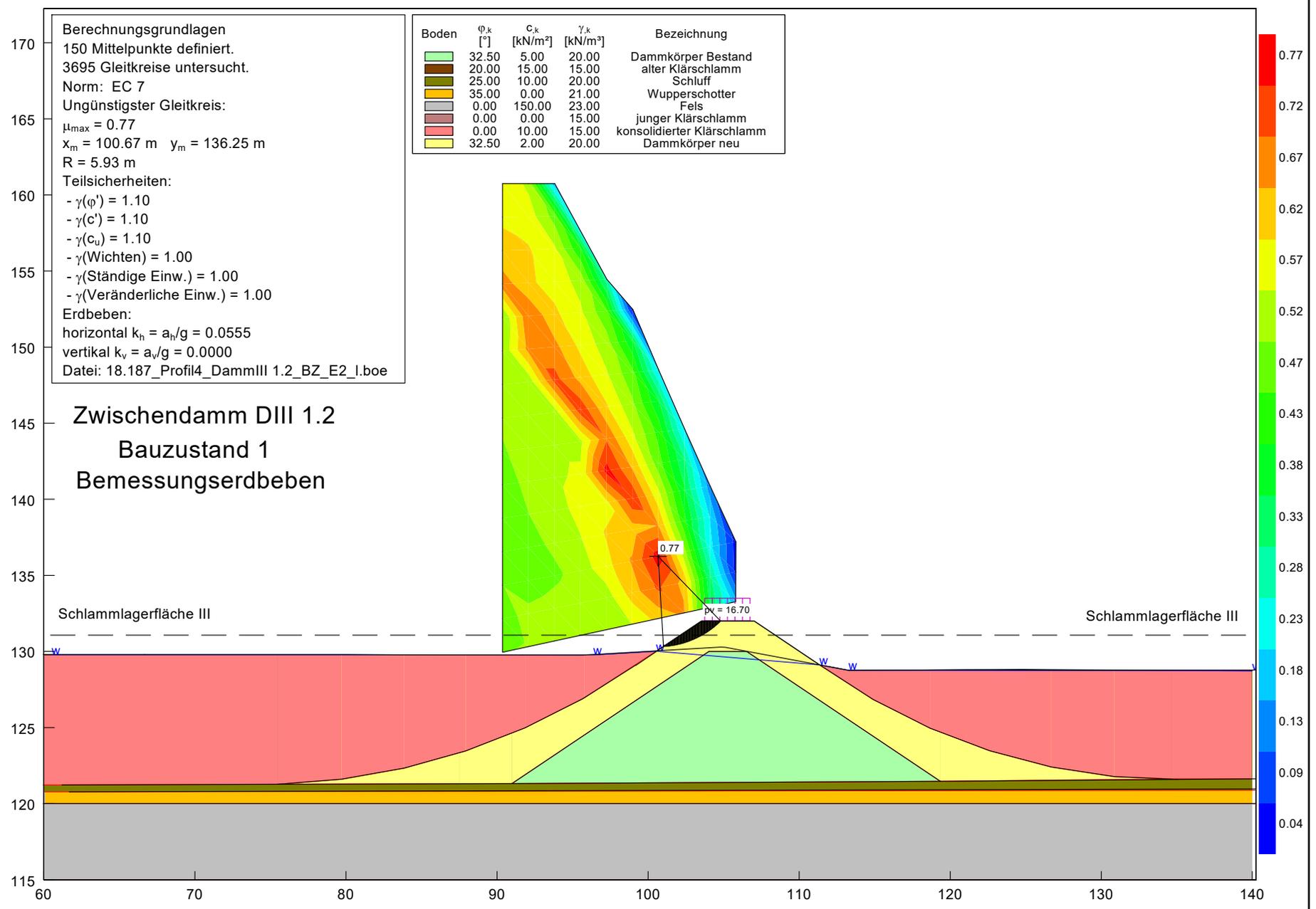
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



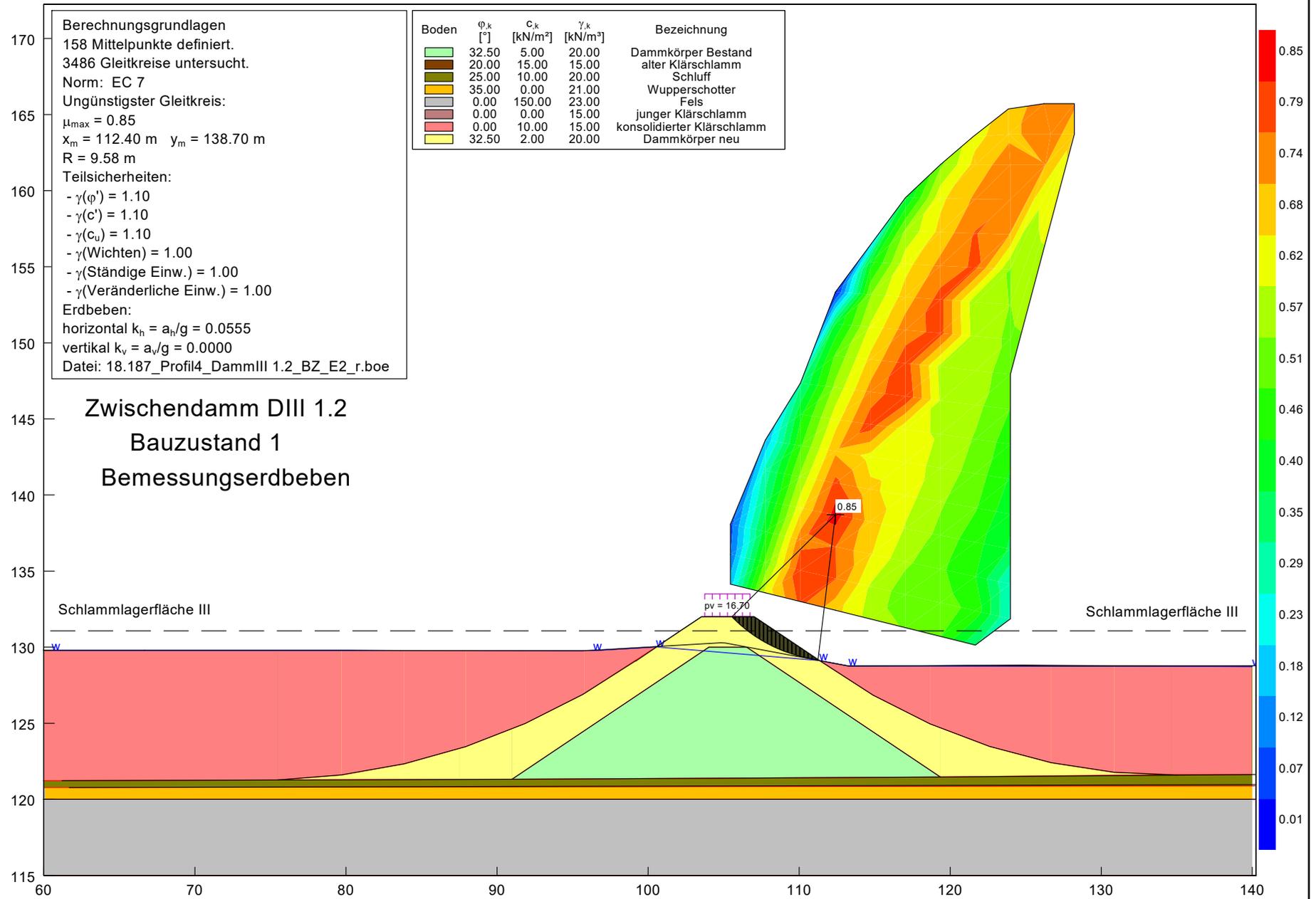
**Berechnungsgrundlagen**  
 150 Mittelpunkte definiert.  
 3695 Gleitkreise untersucht.  
 Norm: EC 7  
 Ungünstigster Gleitkreis:  
 $\mu_{max} = 0.77$   
 $x_m = 100.67 \text{ m}$   $y_m = 136.25 \text{ m}$   
 $R = 5.93 \text{ m}$   
 Teilsicherheiten:  
 -  $\gamma(\varphi') = 1.10$   
 -  $\gamma(c') = 1.10$   
 -  $\gamma(c_u) = 1.10$   
 -  $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$   
 Erdbeben:  
 horizontal  $k_h = a_h/g = 0.0555$   
 vertikal  $k_v = a_v/g = 0.0000$   
 Datei: 18.187\_Profil4\_DammIII 1.2\_BZ\_E2\_I.boe

Boden	$\varphi_k$ [°]	$c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Bezeichnung
[Green]	32.50	5.00	20.00	Dammkörper Bestand
[Brown]	20.00	15.00	15.00	alter Klärschlamm
[Olive]	25.00	10.00	20.00	Schluff
[Yellow]	35.00	0.00	21.00	Wupperschotter
[Grey]	0.00	150.00	23.00	Fels
[Pink]	0.00	0.00	15.00	junger Klärschlamm
[Red]	0.00	10.00	15.00	konsolidierter Klärschlamm
[Light Yellow]	32.50	2.00	20.00	Dammkörper neu

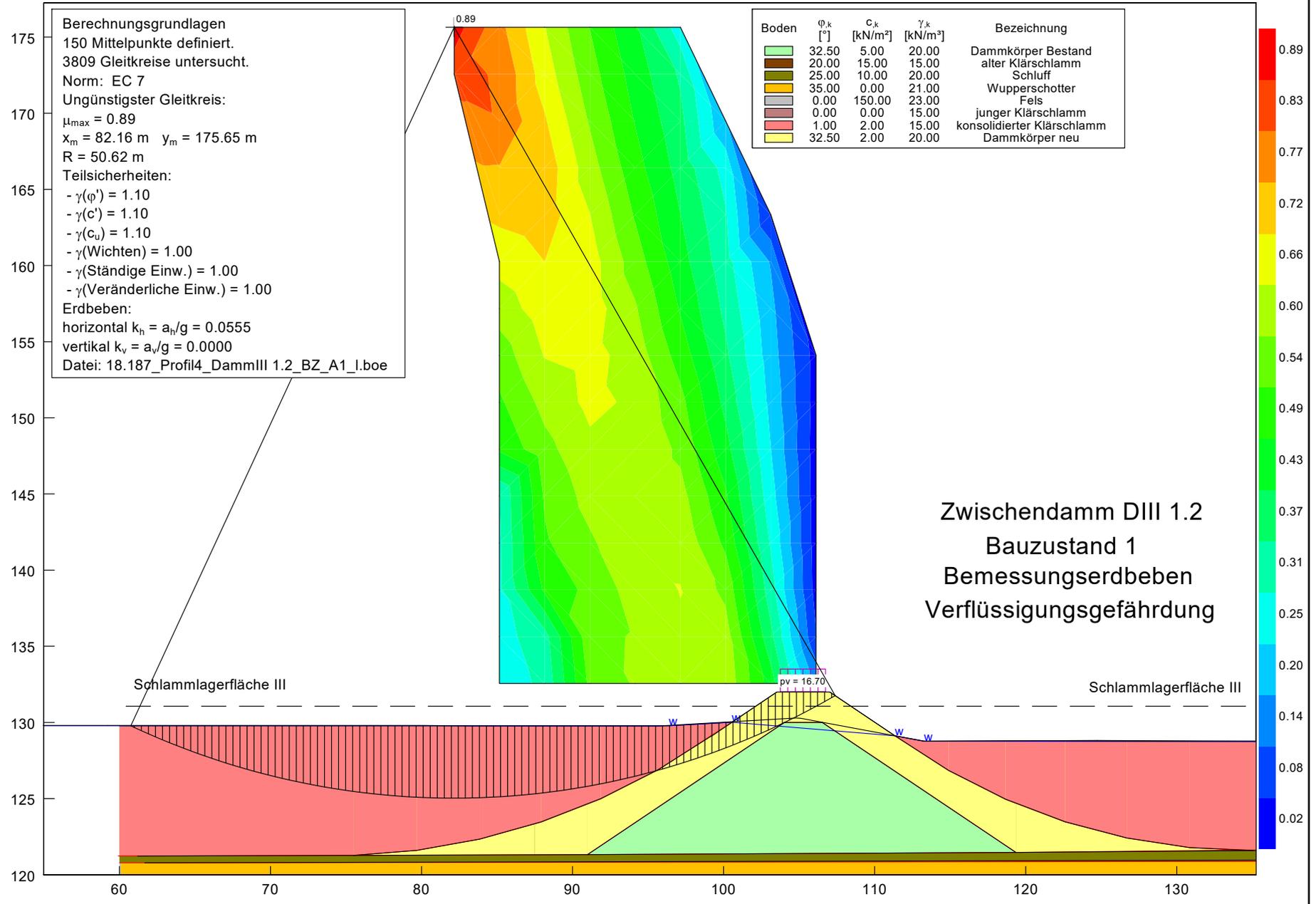
**Zwischendamm DIII 1.2**  
**Bauzustand 1**  
**Bemessungserdbeben**

Schlammagerfläche III

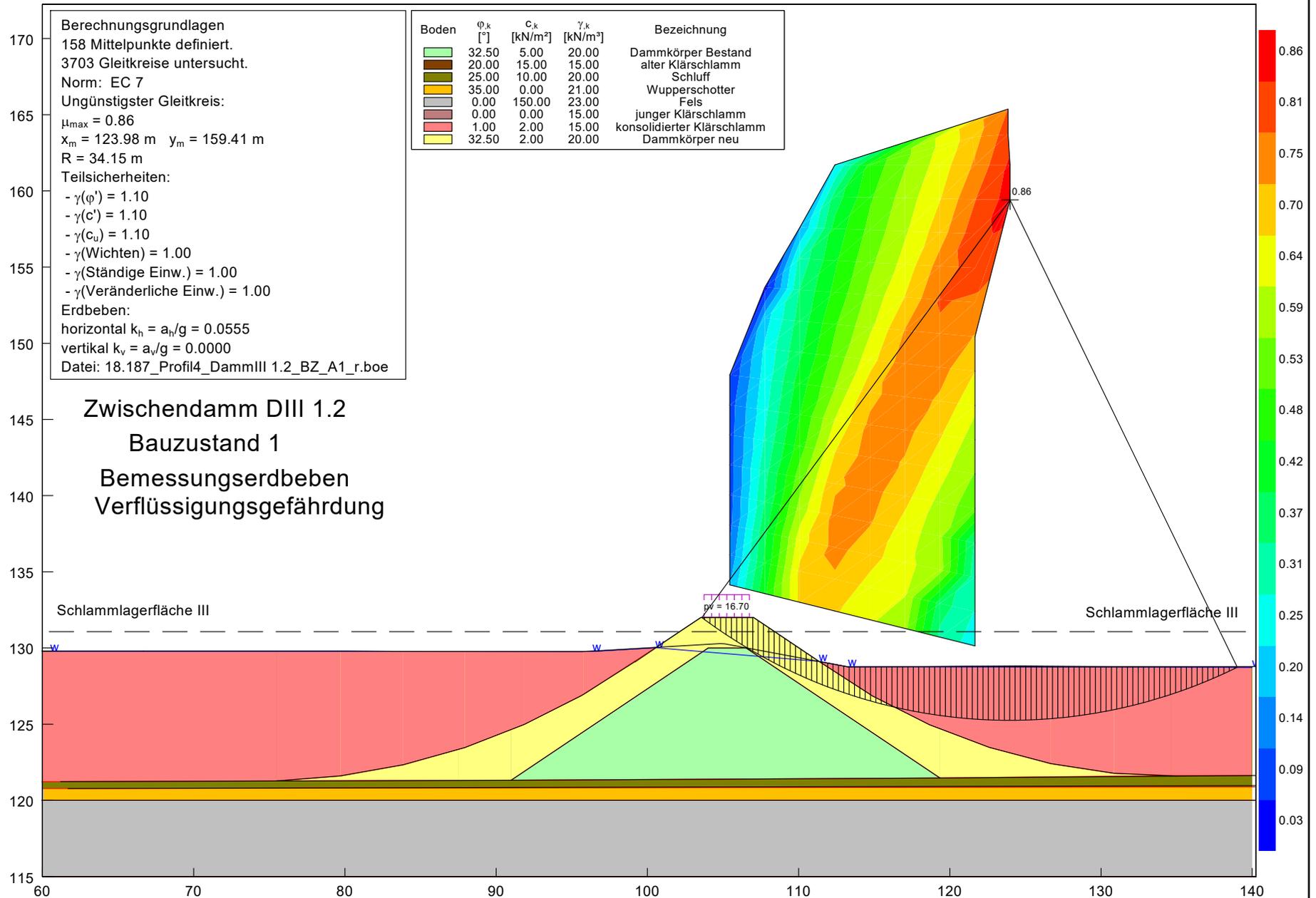
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



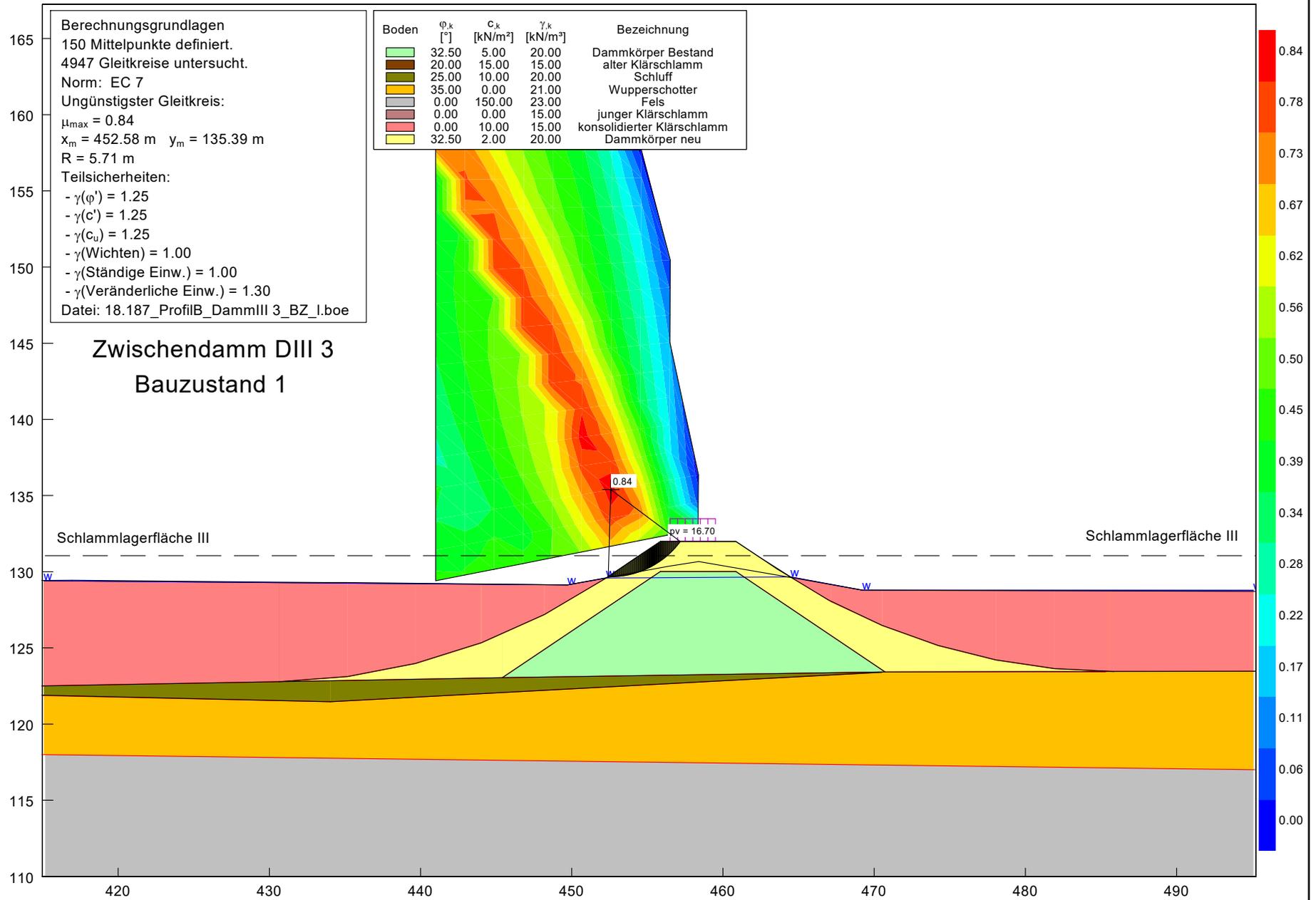
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



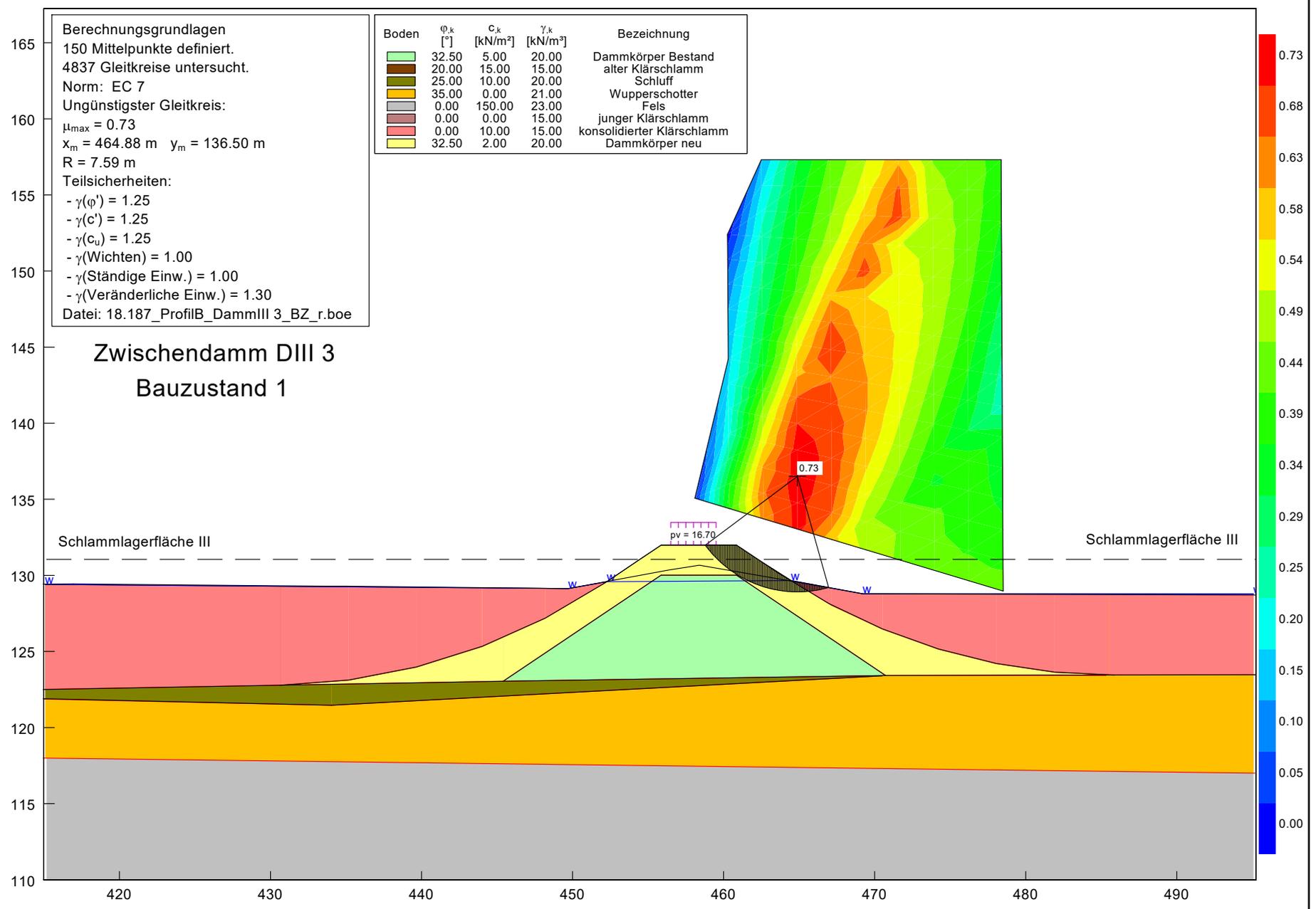
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

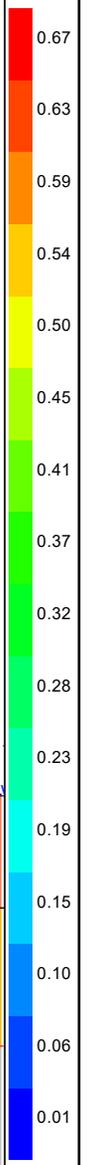
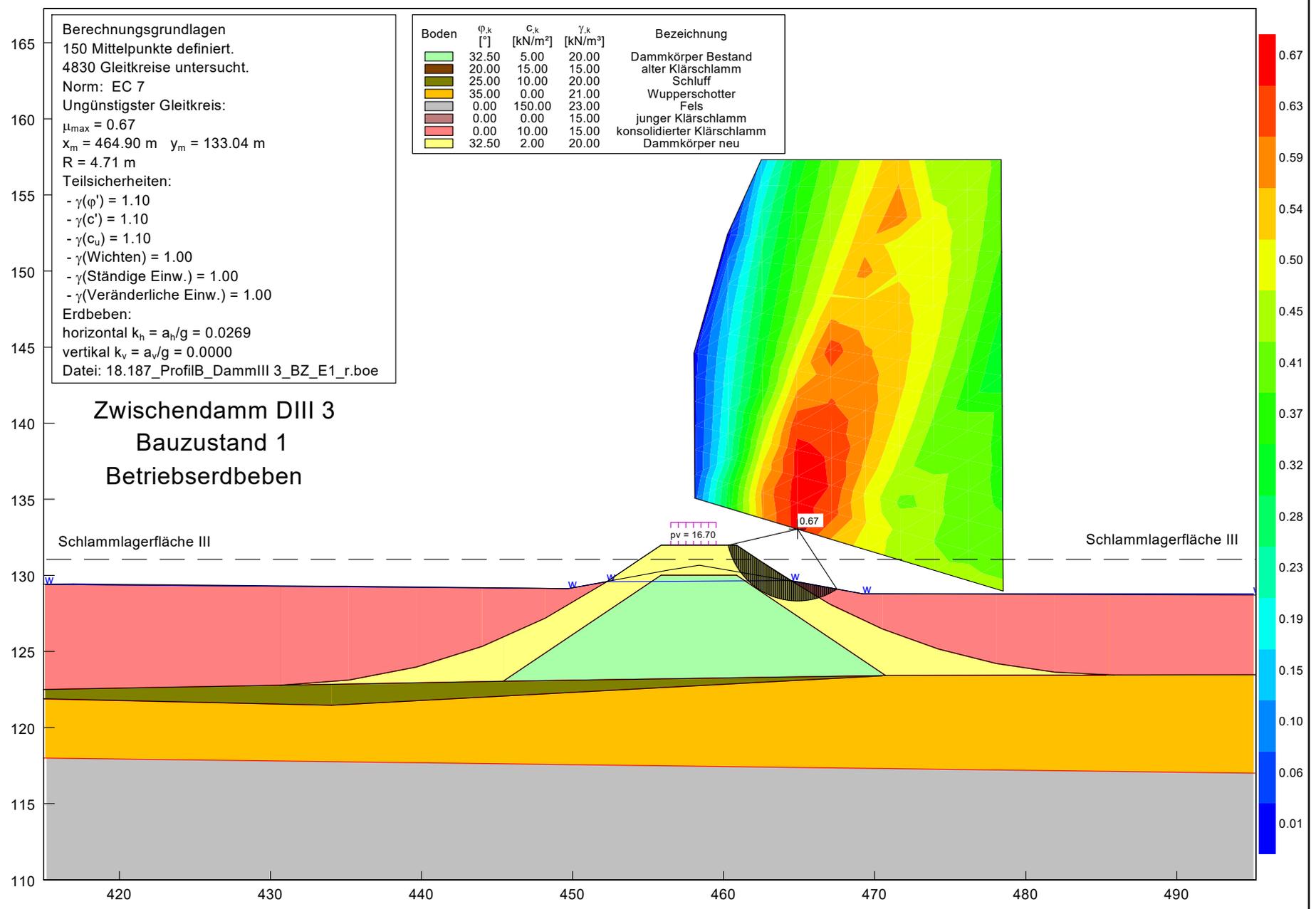


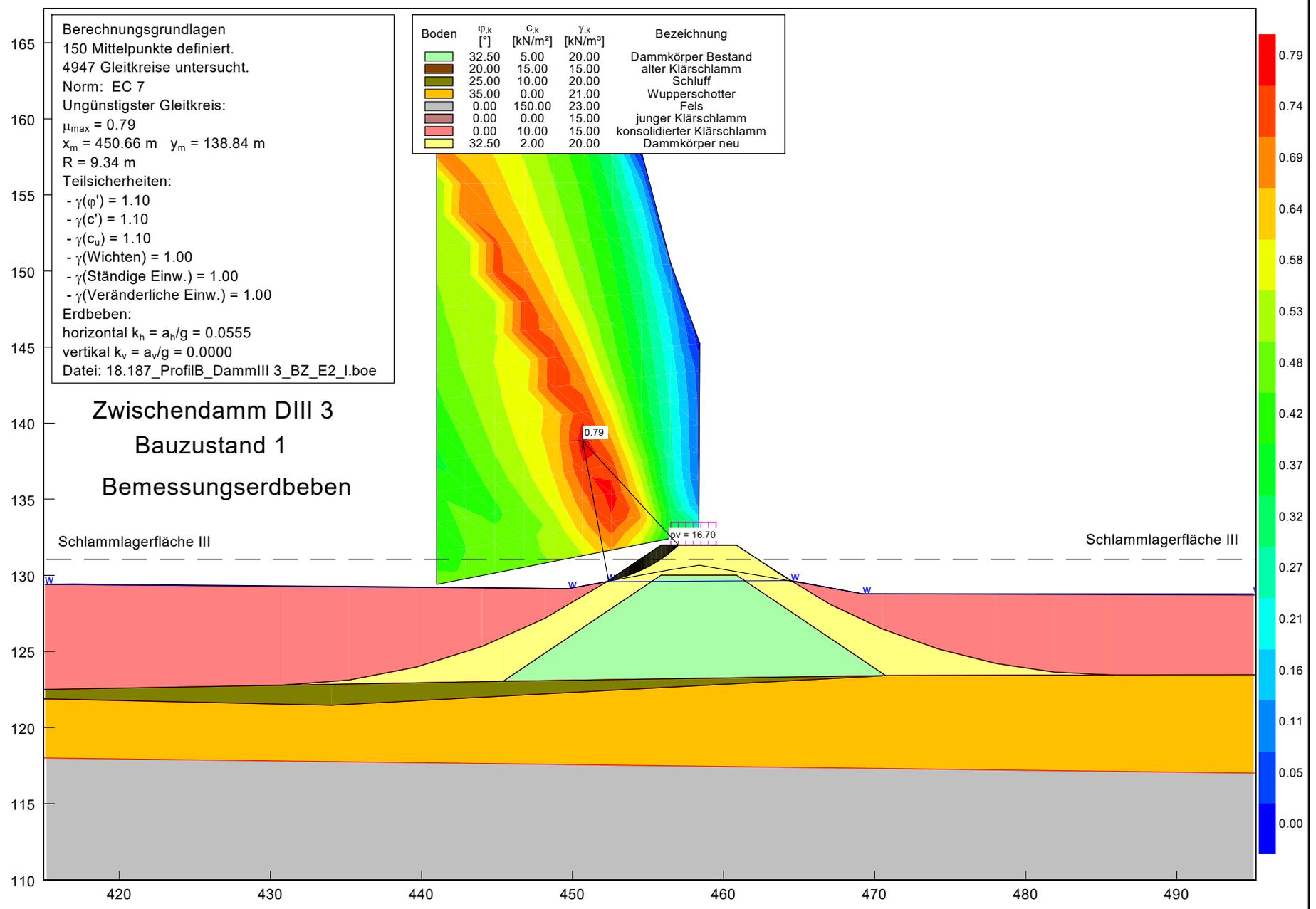
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
Stand sicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



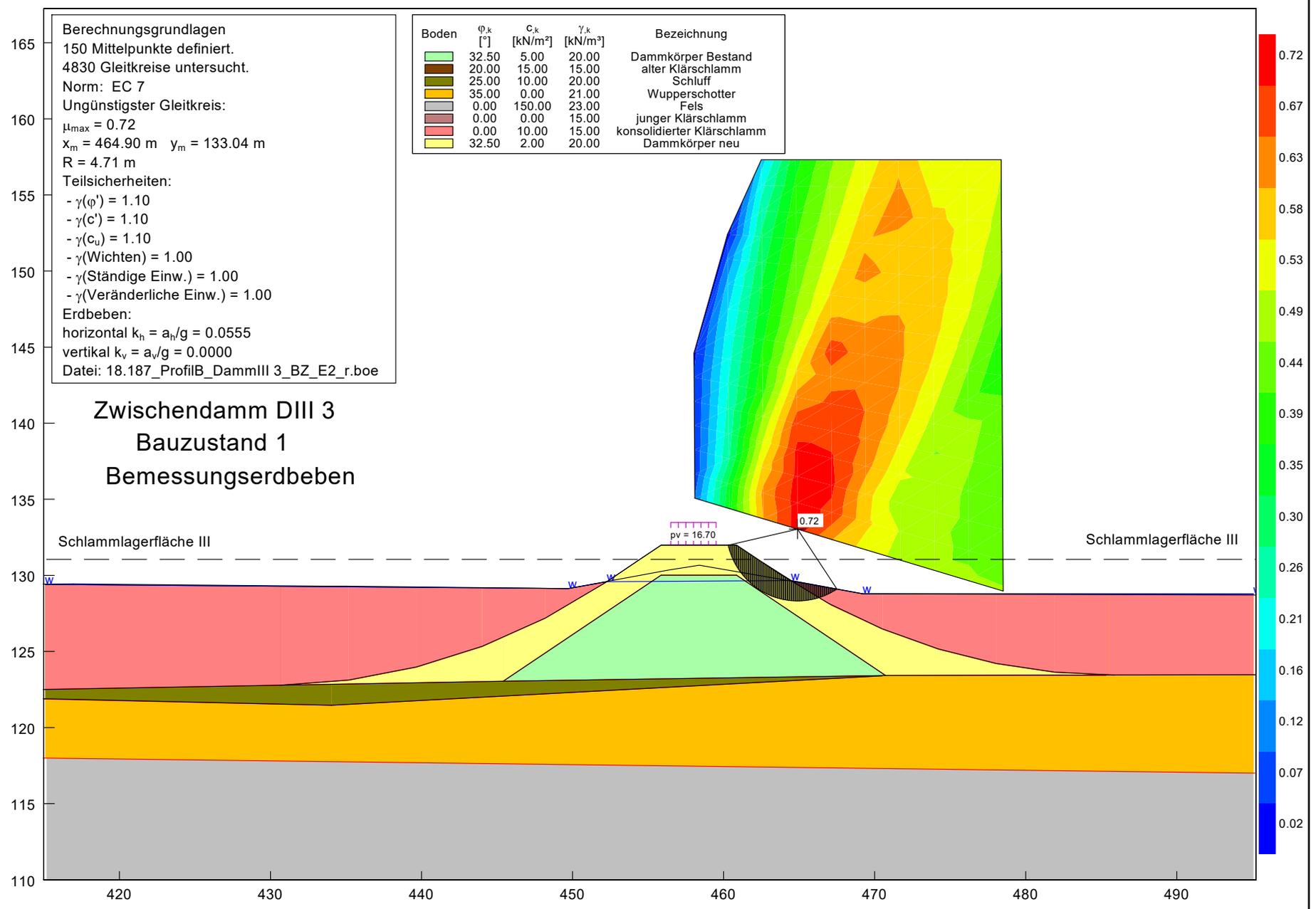
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



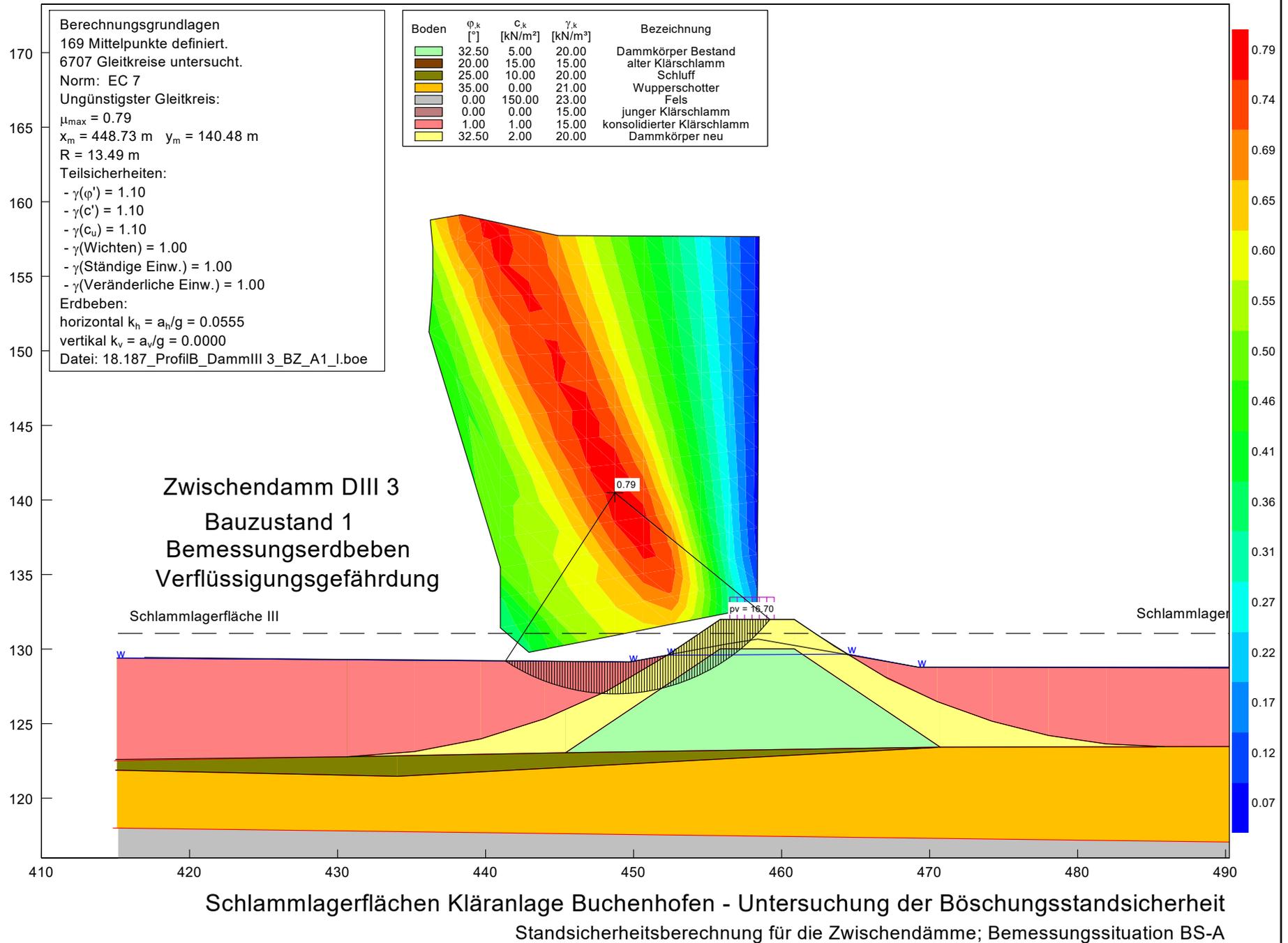


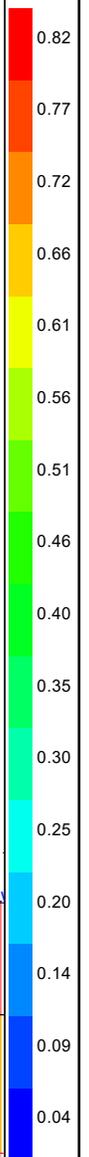
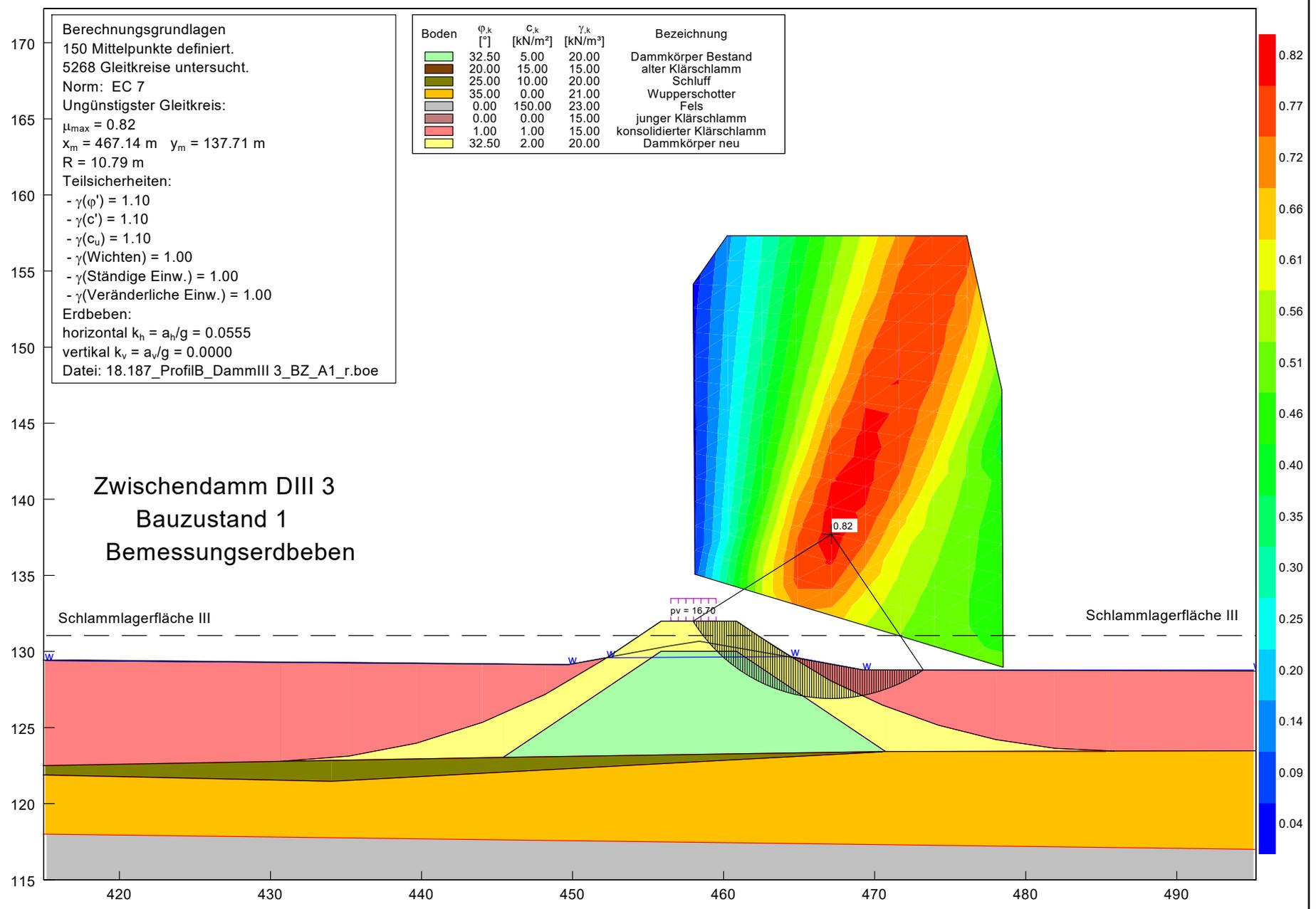


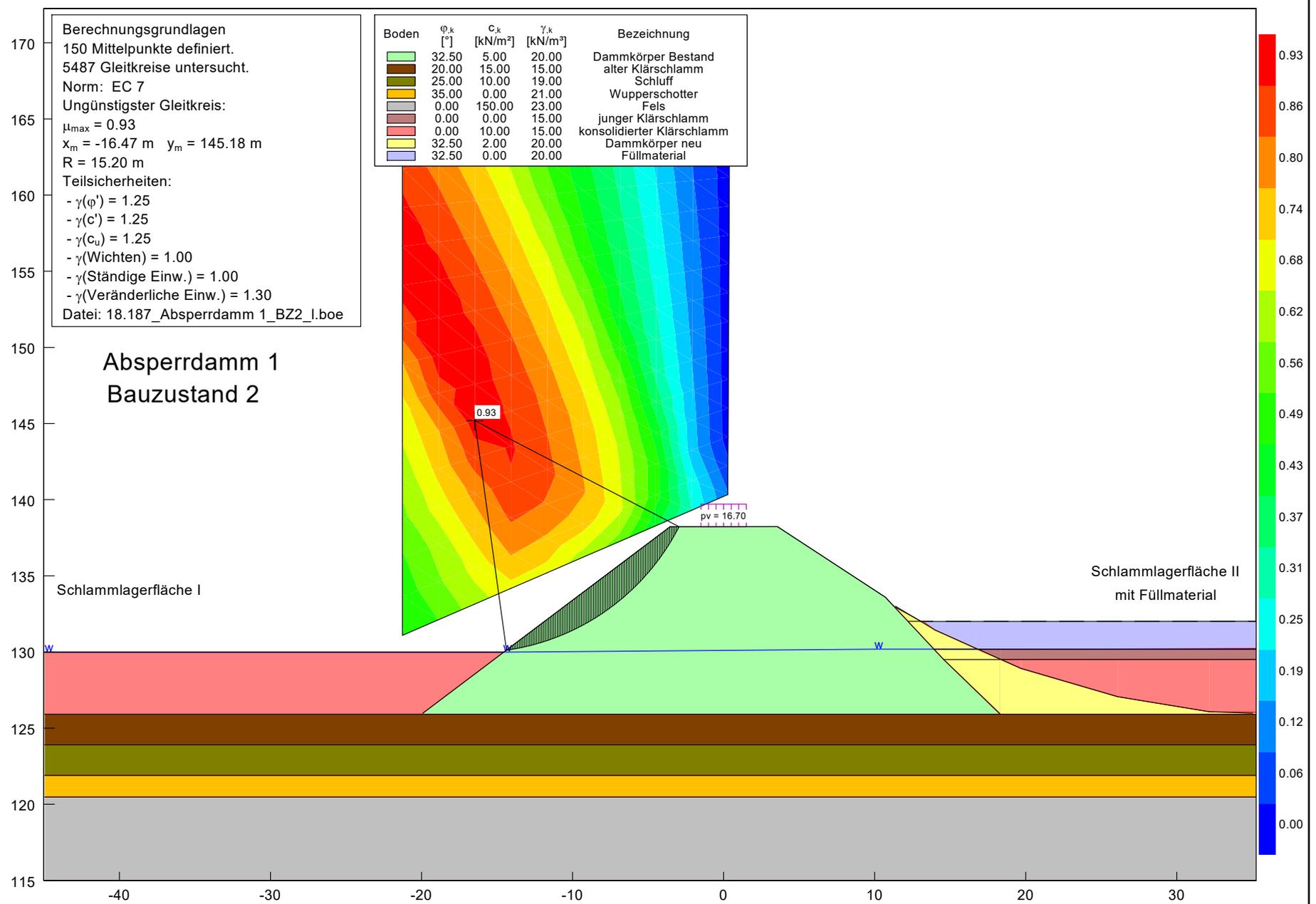
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



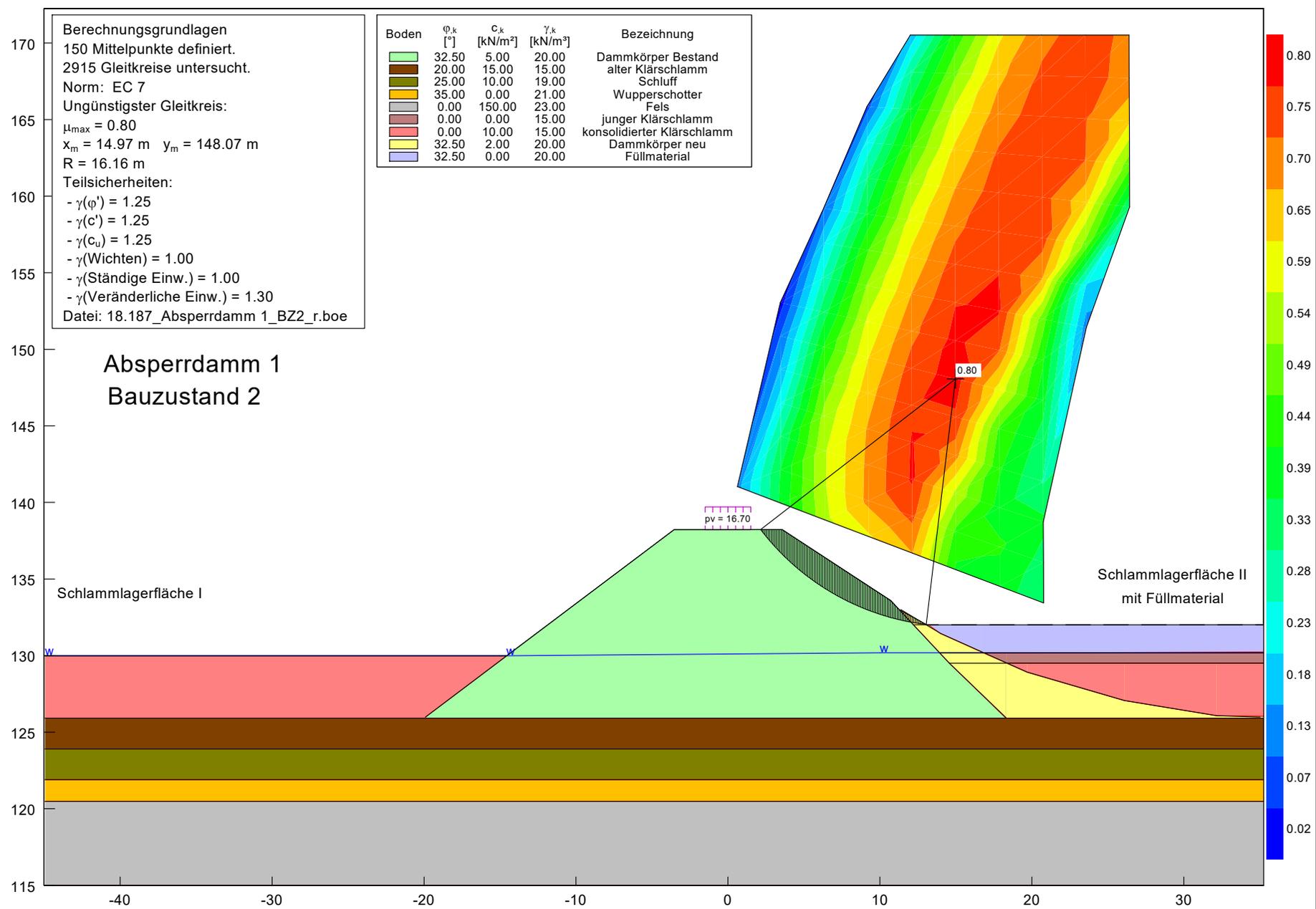
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



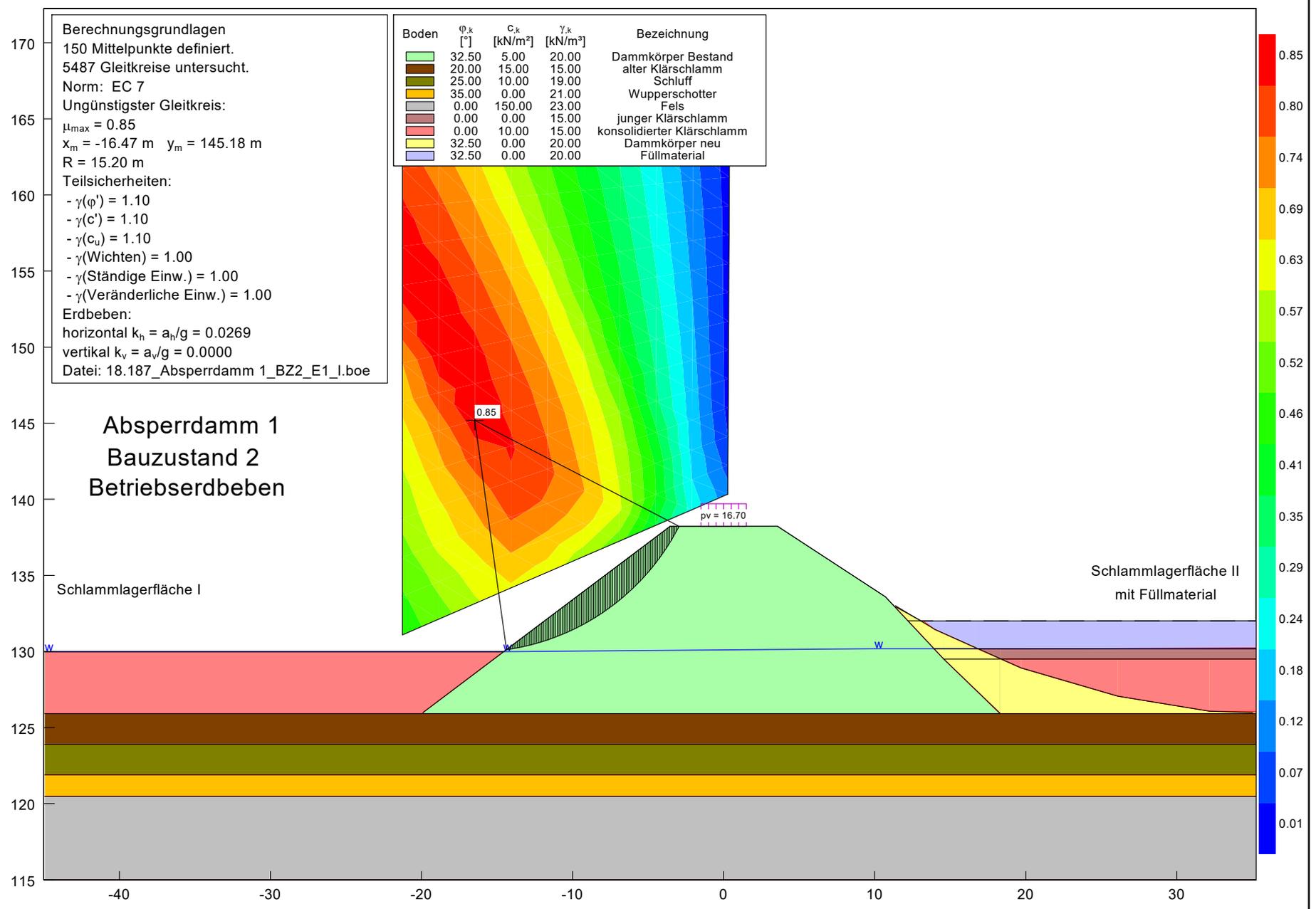




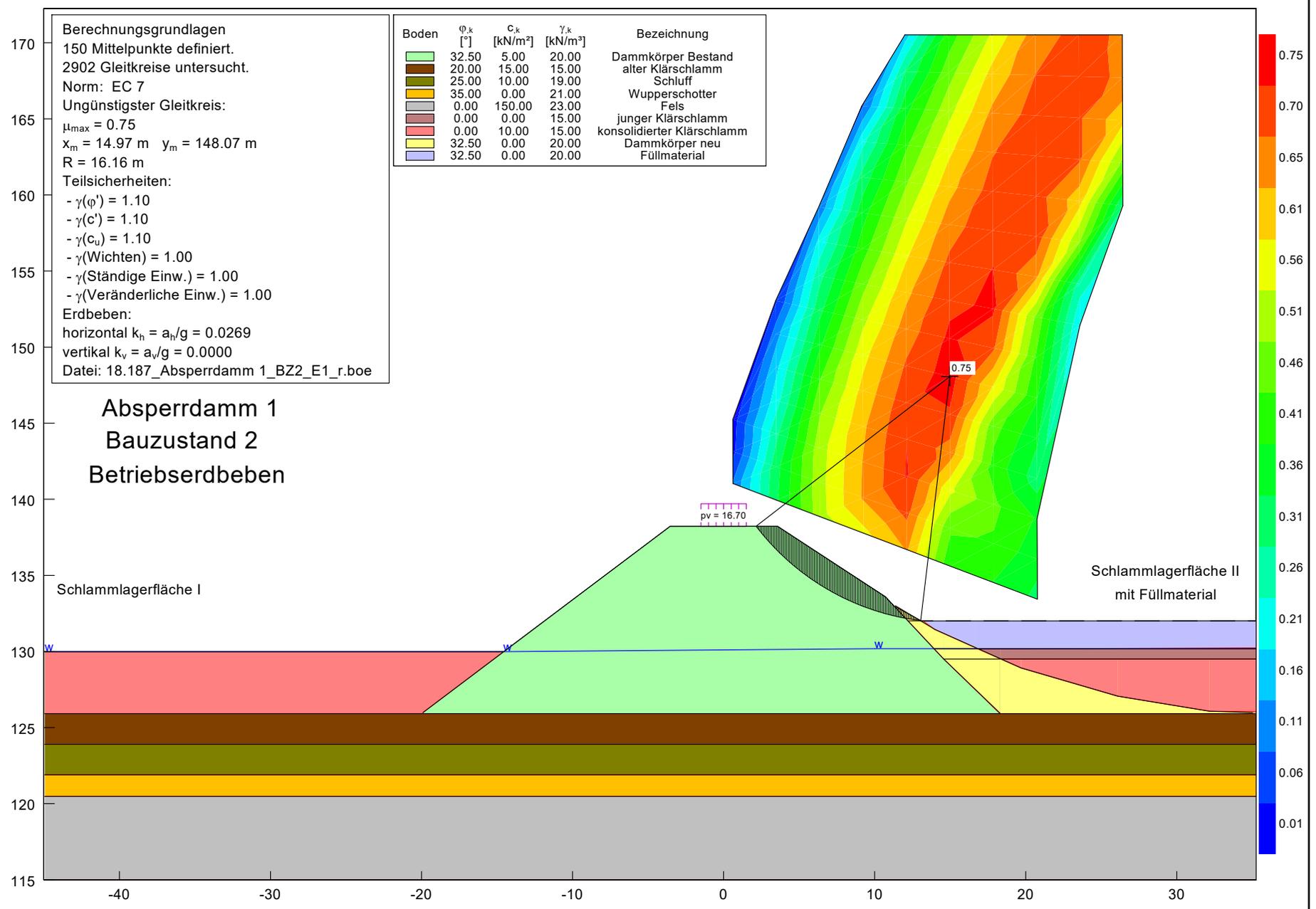
Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



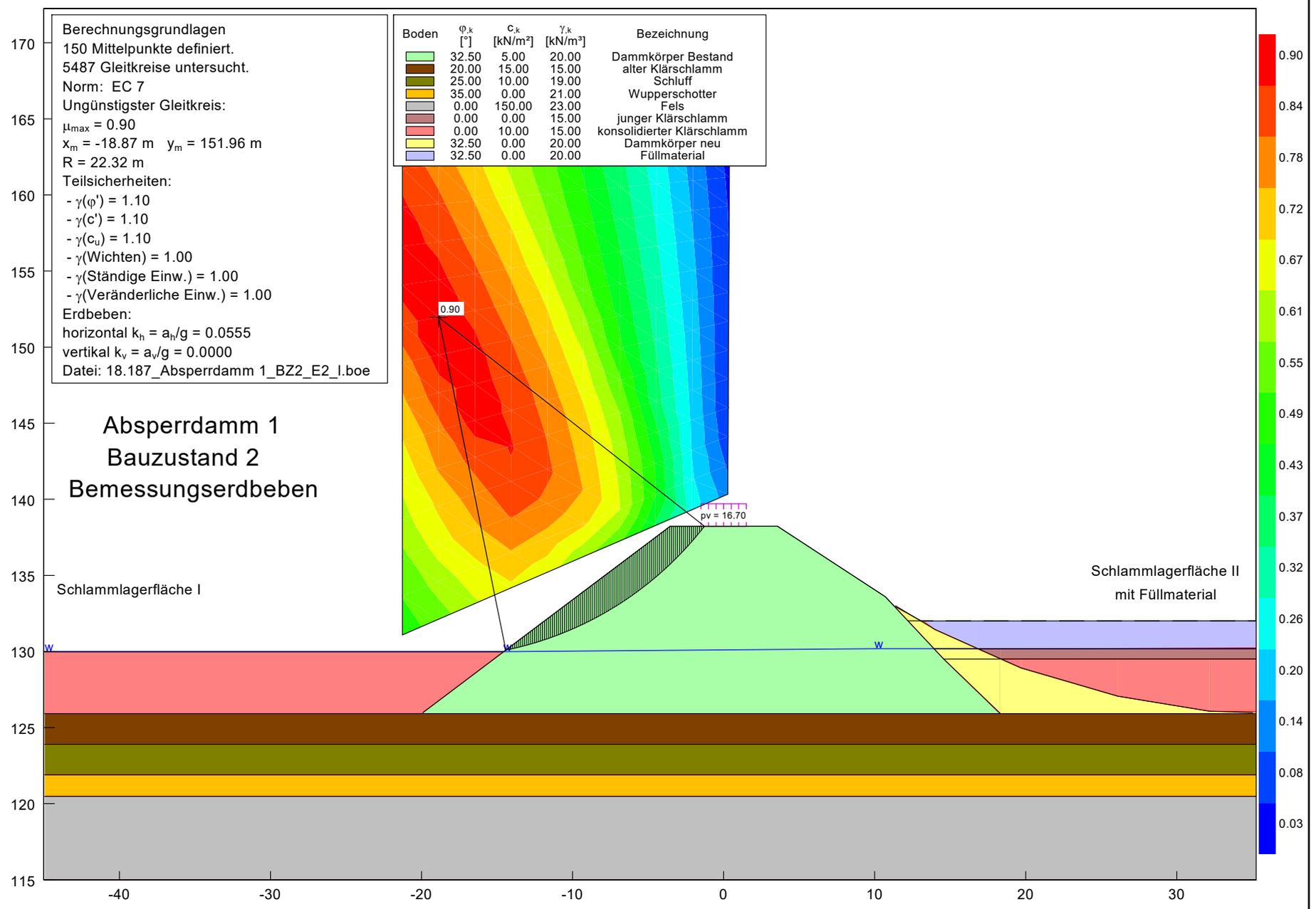
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



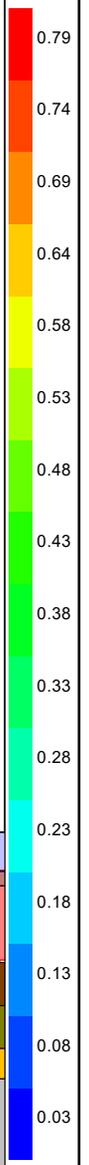
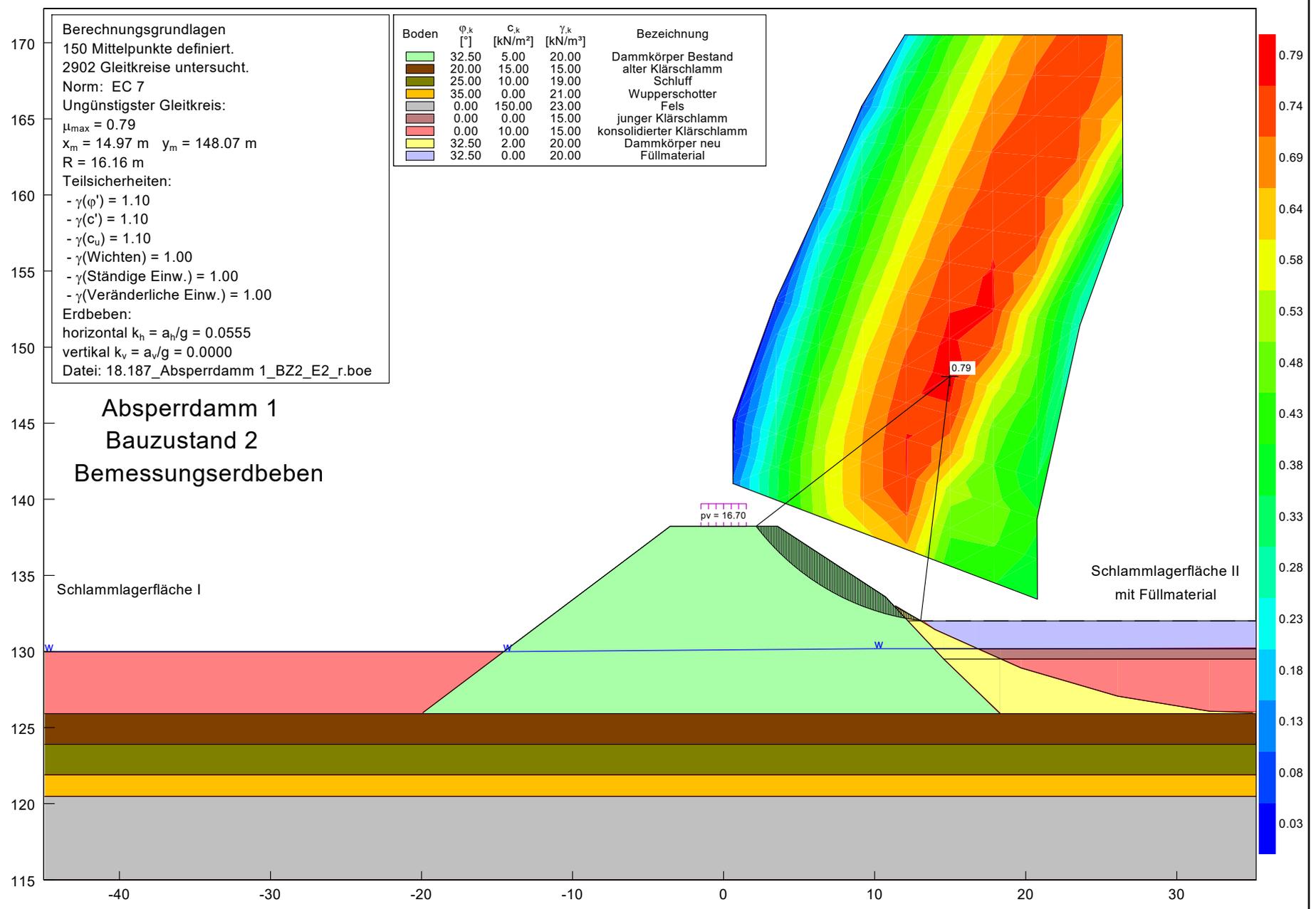
**Berechnungsgrundlagen**  
 150 Mittelpunkte definiert.  
 5487 Gleitkreise untersucht.  
 Norm: EC 7  
 Ungünstigster Gleitkreis:  
 $\mu_{max} = 0.90$   
 $x_m = -18.87 \text{ m}$   $y_m = 151.96 \text{ m}$   
 $R = 22.32 \text{ m}$   
 Teilsicherheiten:  
 -  $\gamma(\phi') = 1.10$   
 -  $\gamma(c') = 1.10$   
 -  $\gamma(c_u) = 1.10$   
 -  $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$   
 Erdbeben:  
 horizontal  $k_h = a_h/g = 0.0555$   
 vertikal  $k_v = a_v/g = 0.0000$   
 Datei: 18.187\_Absperrdamm 1\_BZ2\_E2\_I.boe

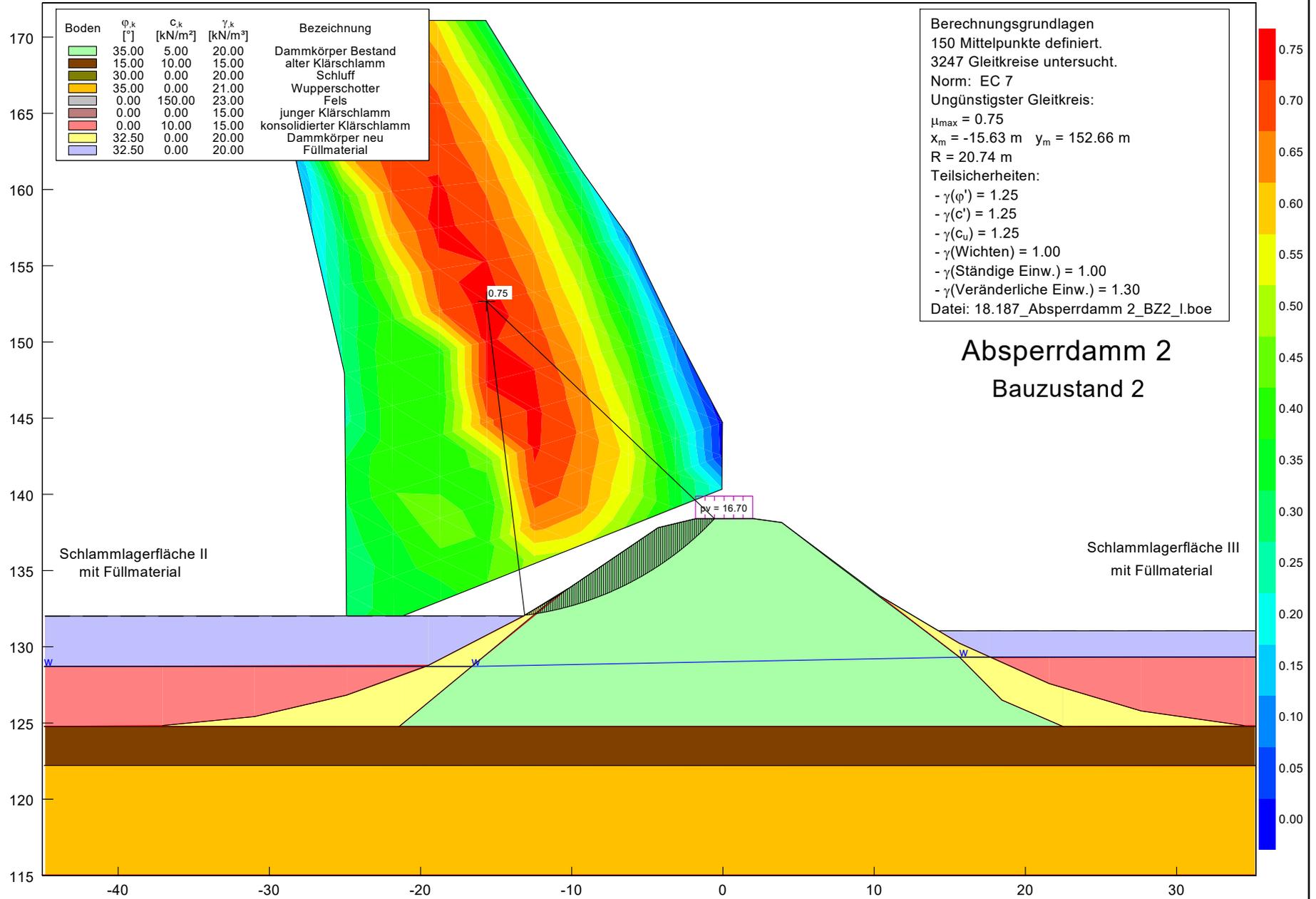
**Absperrdamm 1**  
**Bauzustand 2**  
**Bemessungserdbeben**

Schlammagerfläche I

Schlammagerfläche II  
 mit Füllmaterial

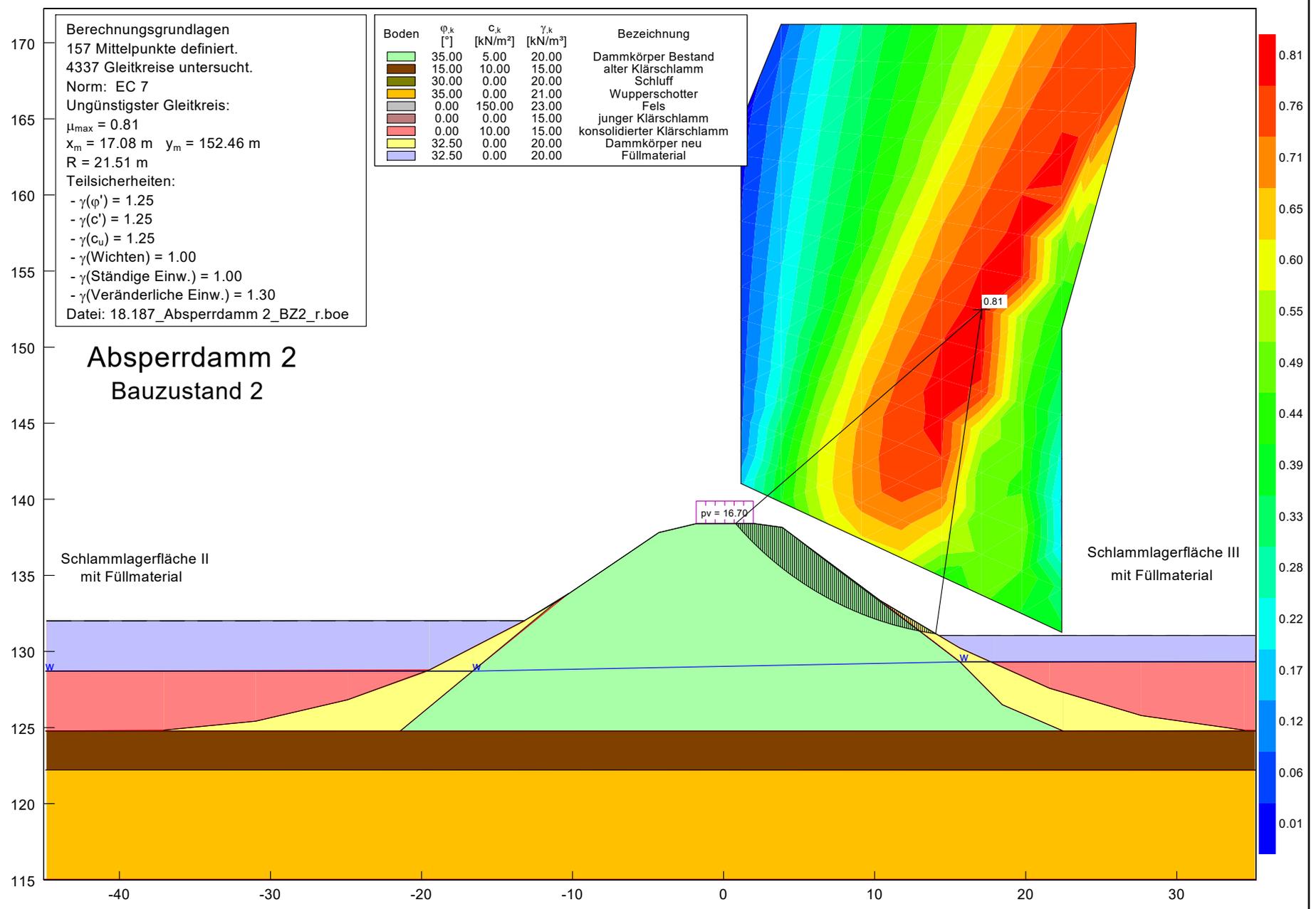
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A





Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit

Stand sicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

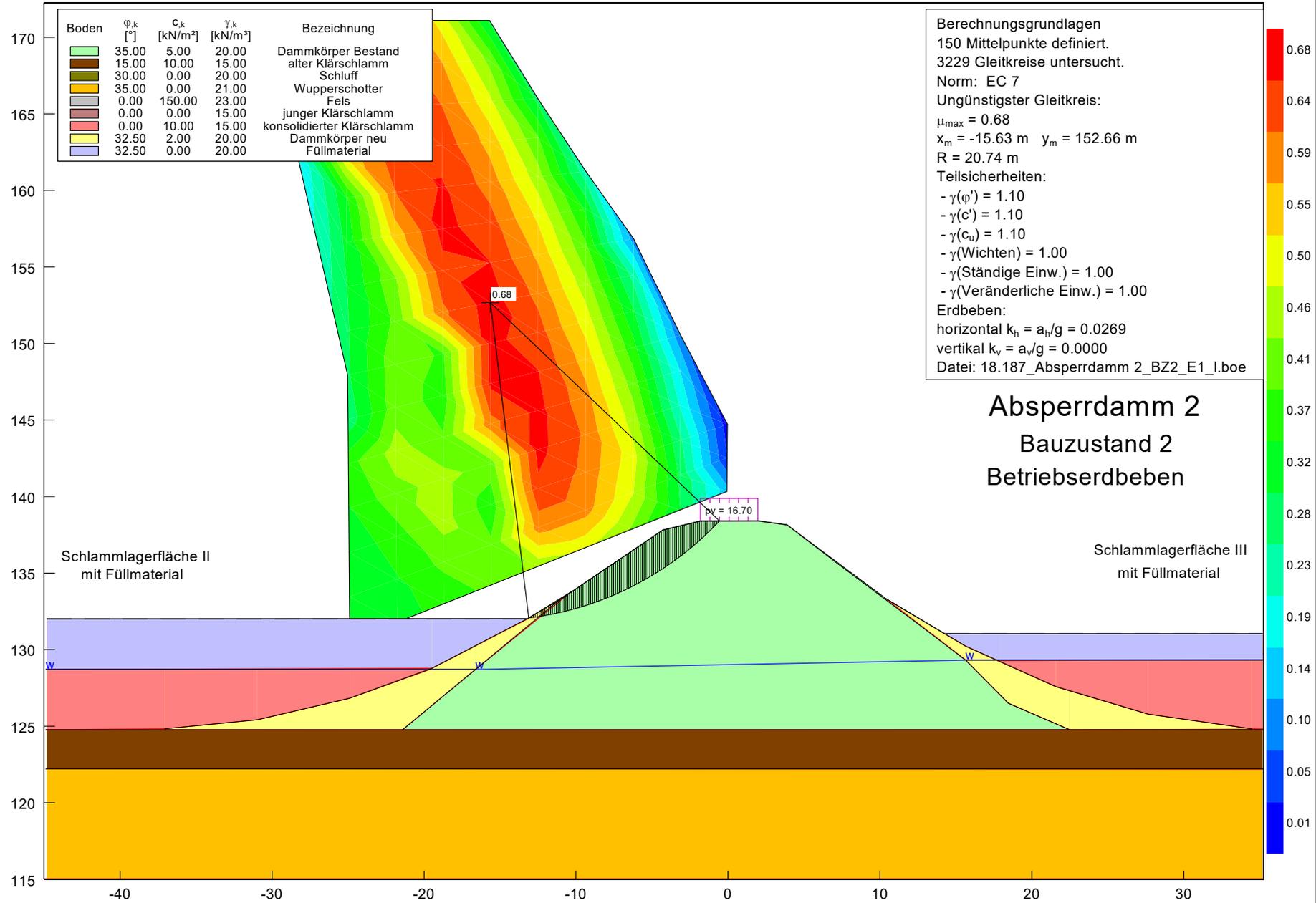


**Berechnungsgrundlagen**  
 157 Mittelpunkte definiert.  
 4337 Gleitkreise untersucht.  
 Norm: EC 7  
 Ungünstigster Gleitkreis:  
 $\mu_{max} = 0.81$   
 $x_m = 17.08 \text{ m}$   $y_m = 152.46 \text{ m}$   
 $R = 21.51 \text{ m}$   
 Teilsicherheiten:  
 -  $\gamma(\phi') = 1.25$   
 -  $\gamma(c') = 1.25$   
 -  $\gamma(c_u) = 1.25$   
 -  $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 -  $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$   
 Datei: 18.187\_Absperrdamm 2\_BZ2\_r.boe

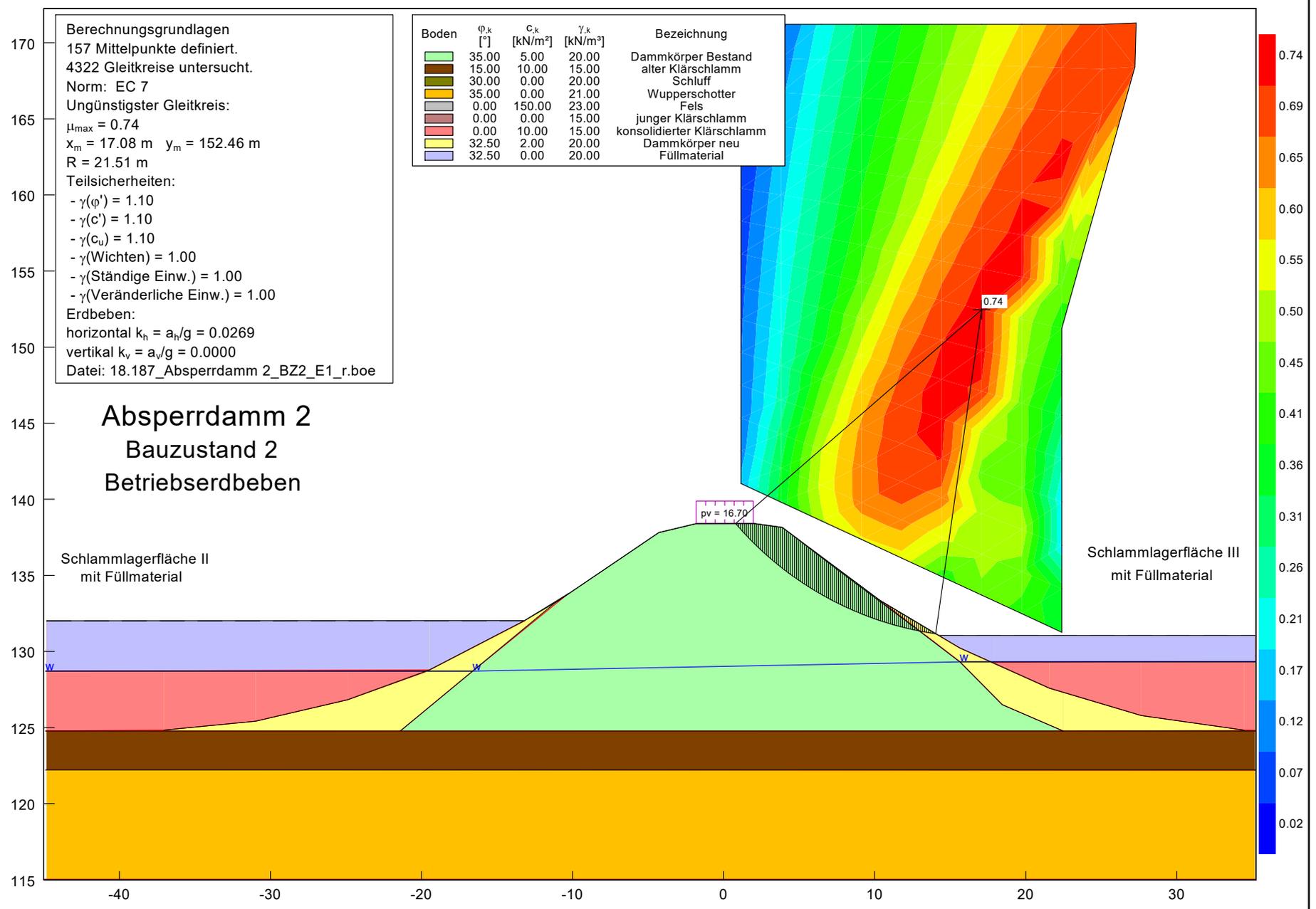
Boden	$\phi_k$ [°]	$c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Bezeichnung
[Light Green]	35.00	5.00	20.00	Dammkörper Bestand
[Brown]	15.00	10.00	15.00	alter Klärschlamm
[Dark Green]	30.00	0.00	20.00	Schluff
[Yellow]	35.00	0.00	21.00	Wupperschotter
[Grey]	0.00	150.00	23.00	Fels
[Red]	0.00	0.00	15.00	junger Klärschlamm
[Pink]	0.00	10.00	15.00	konsolidierter Klärschlamm
[Light Yellow]	32.50	0.00	20.00	Dammkörper neu
[Purple]	32.50	0.00	20.00	Füllmaterial

**Absperrdamm 2**  
**Bauzustand 2**

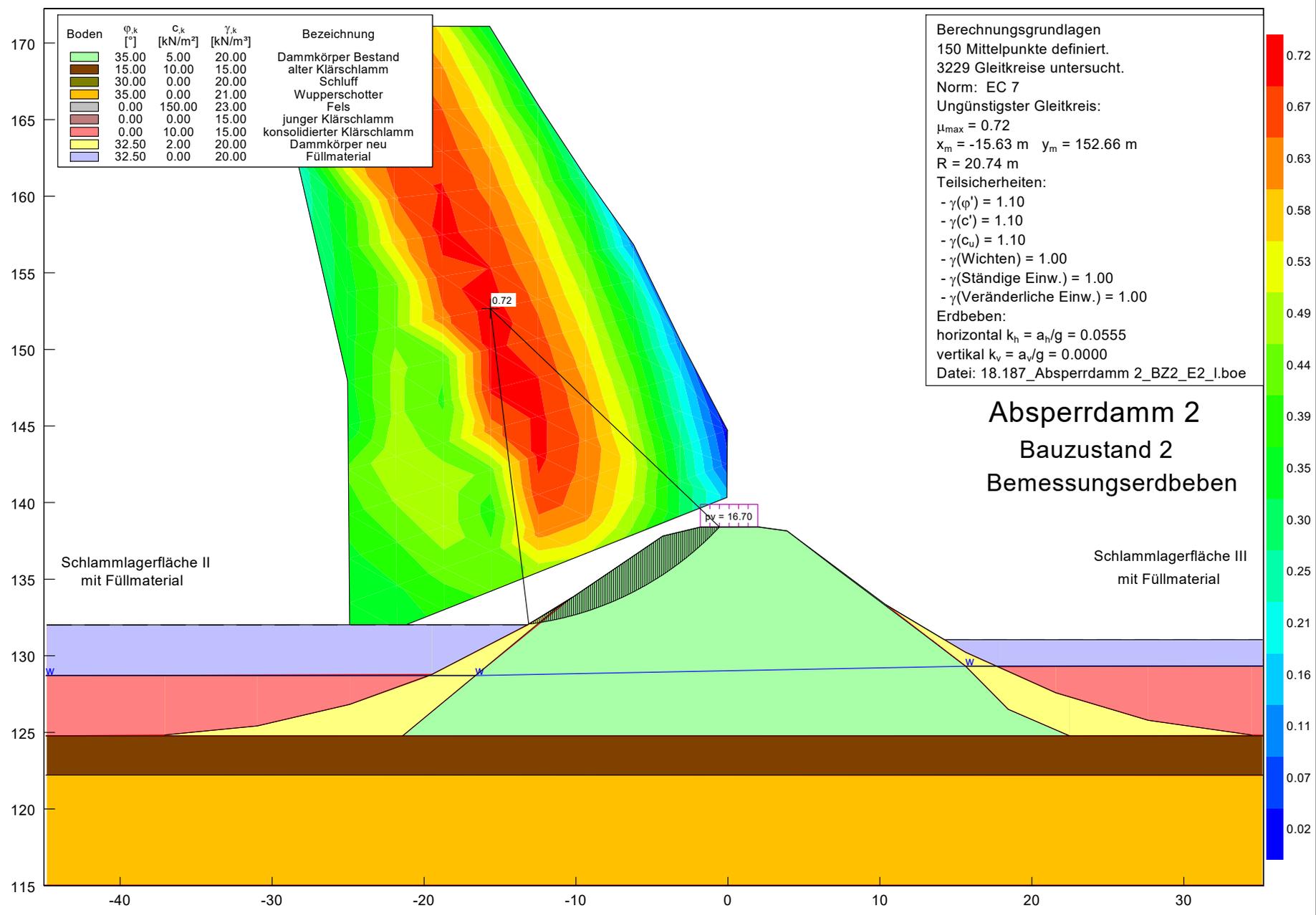
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



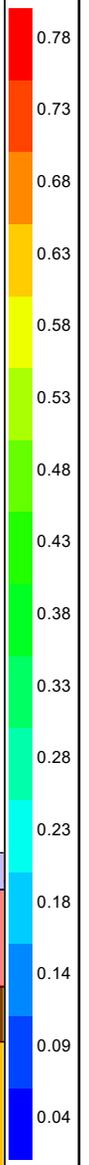
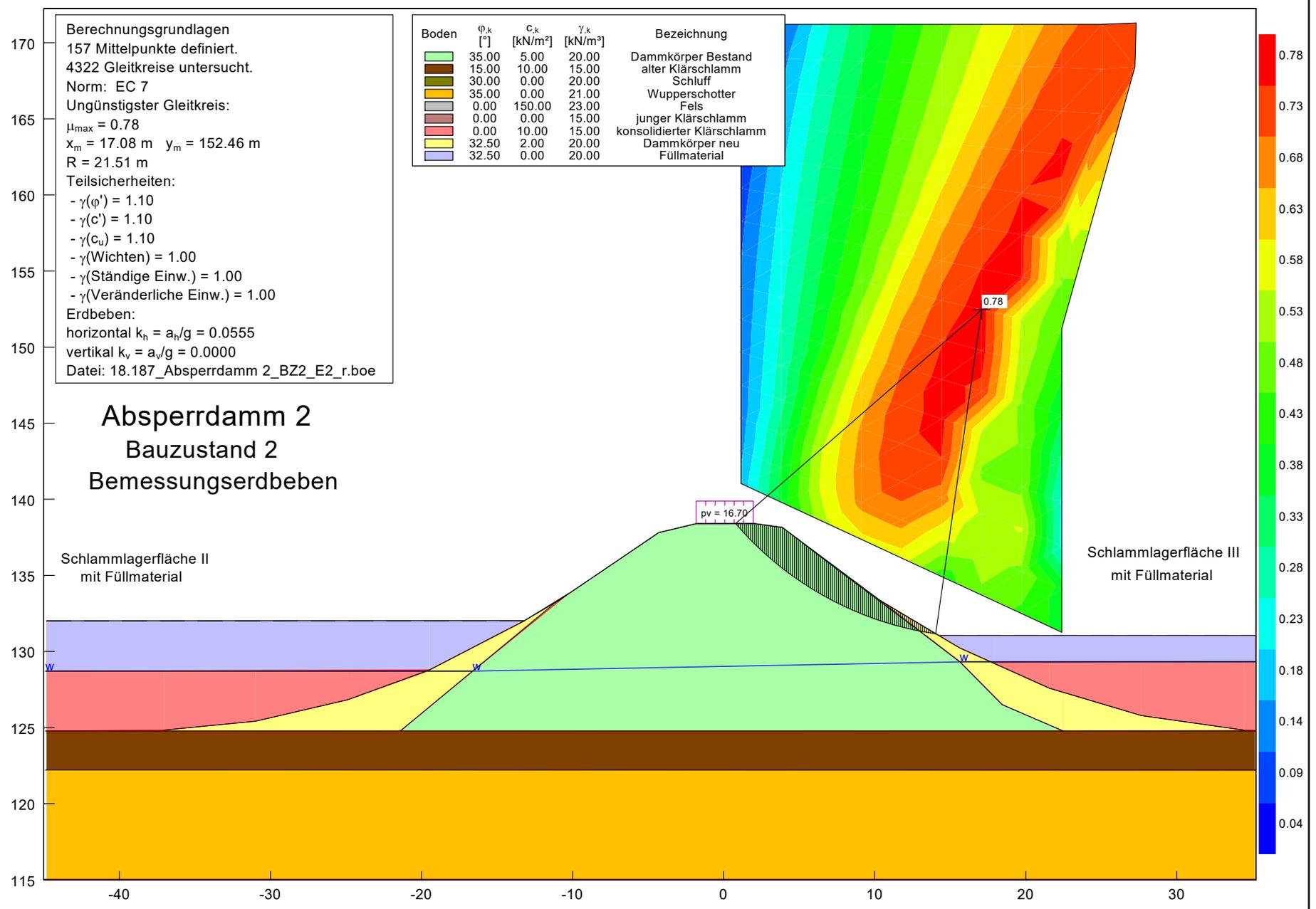
Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

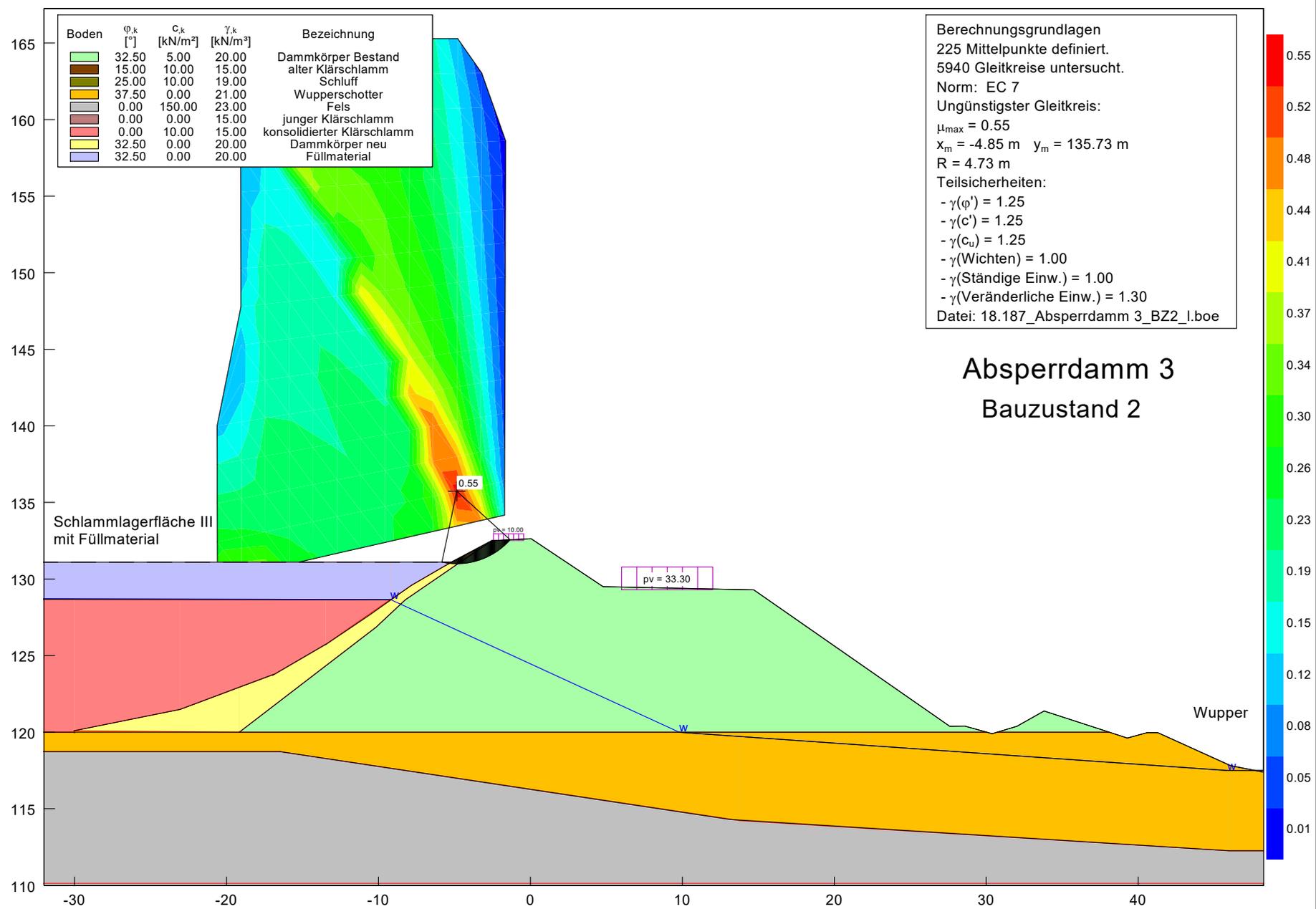


Schlammlagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

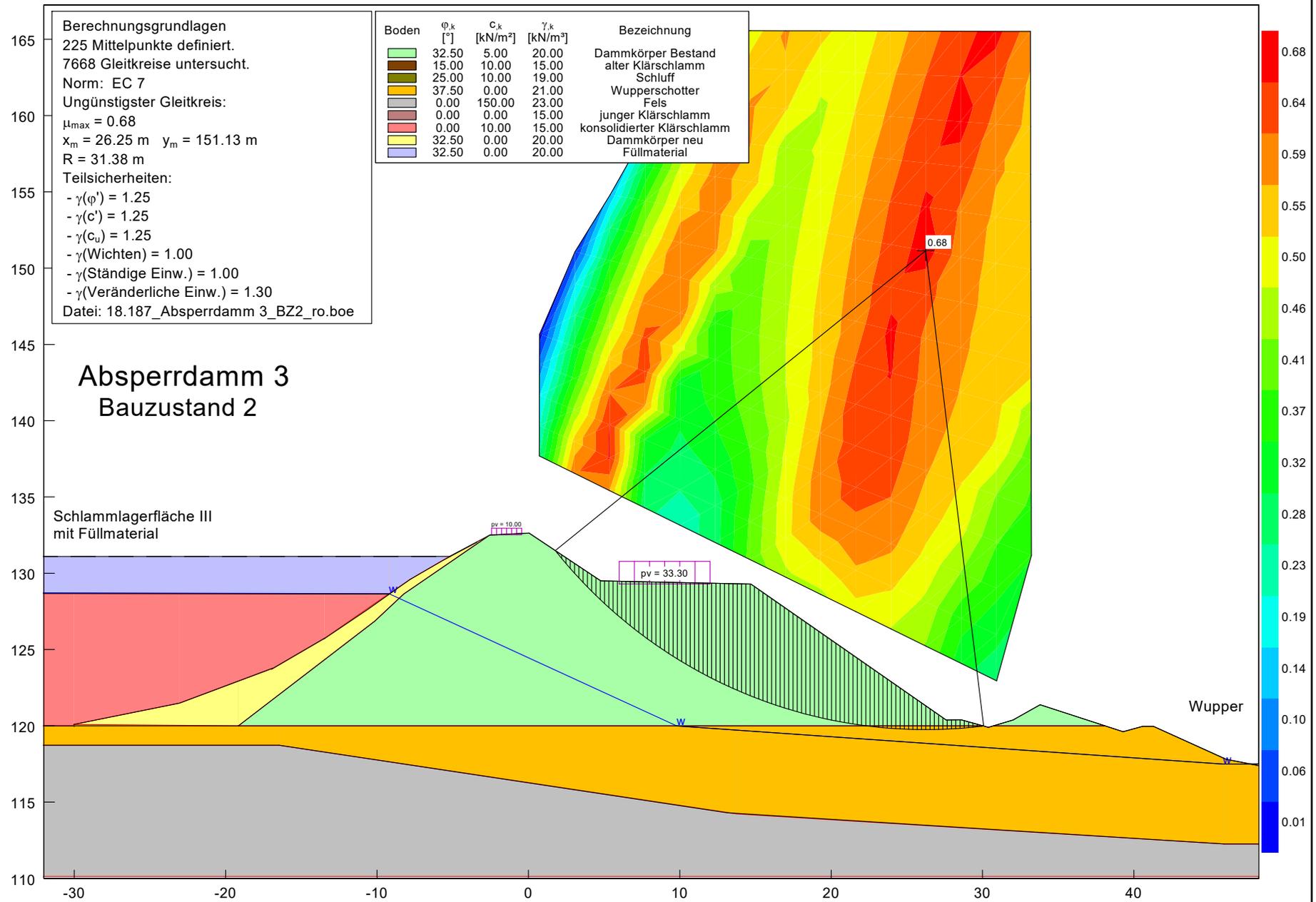


Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

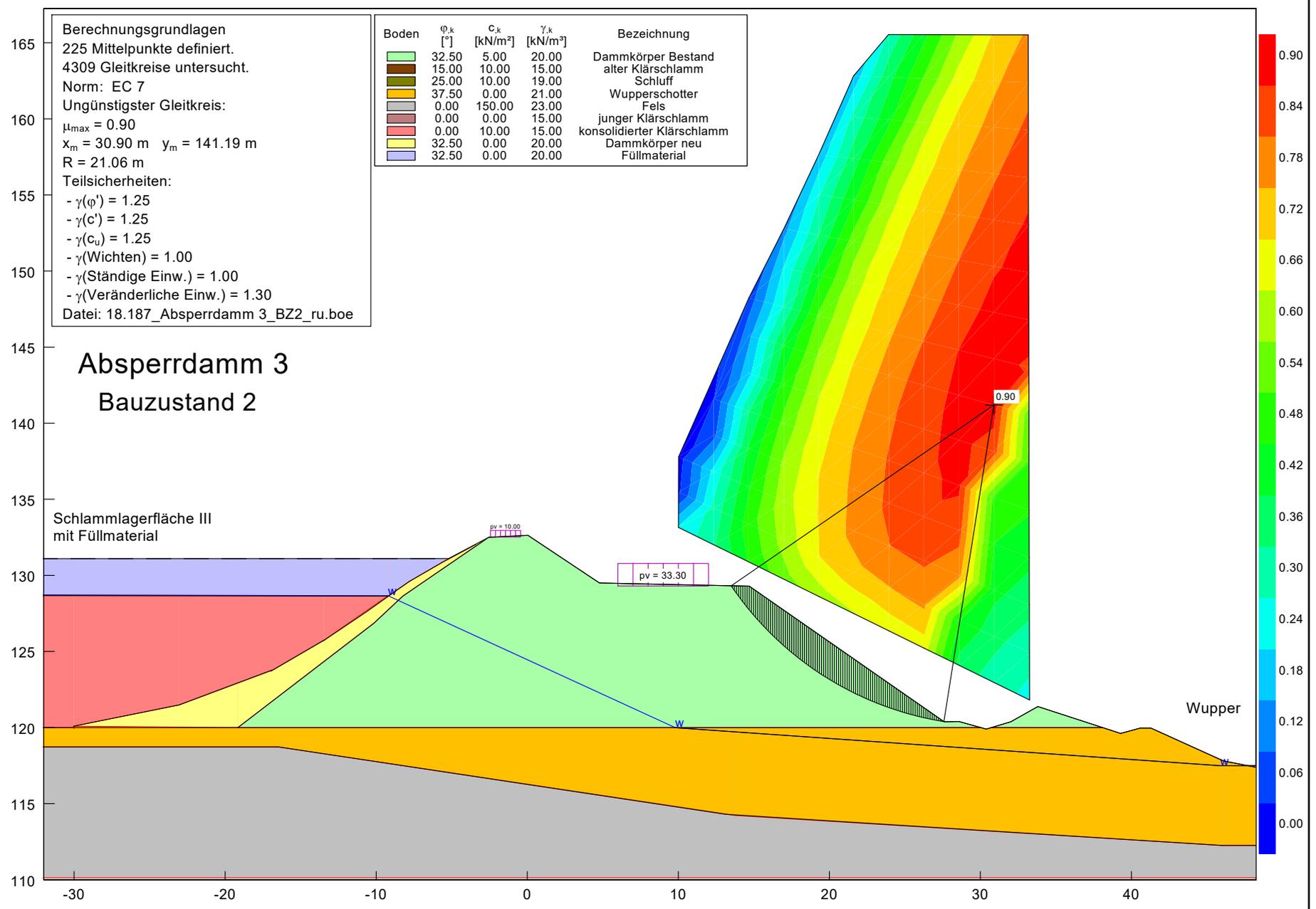




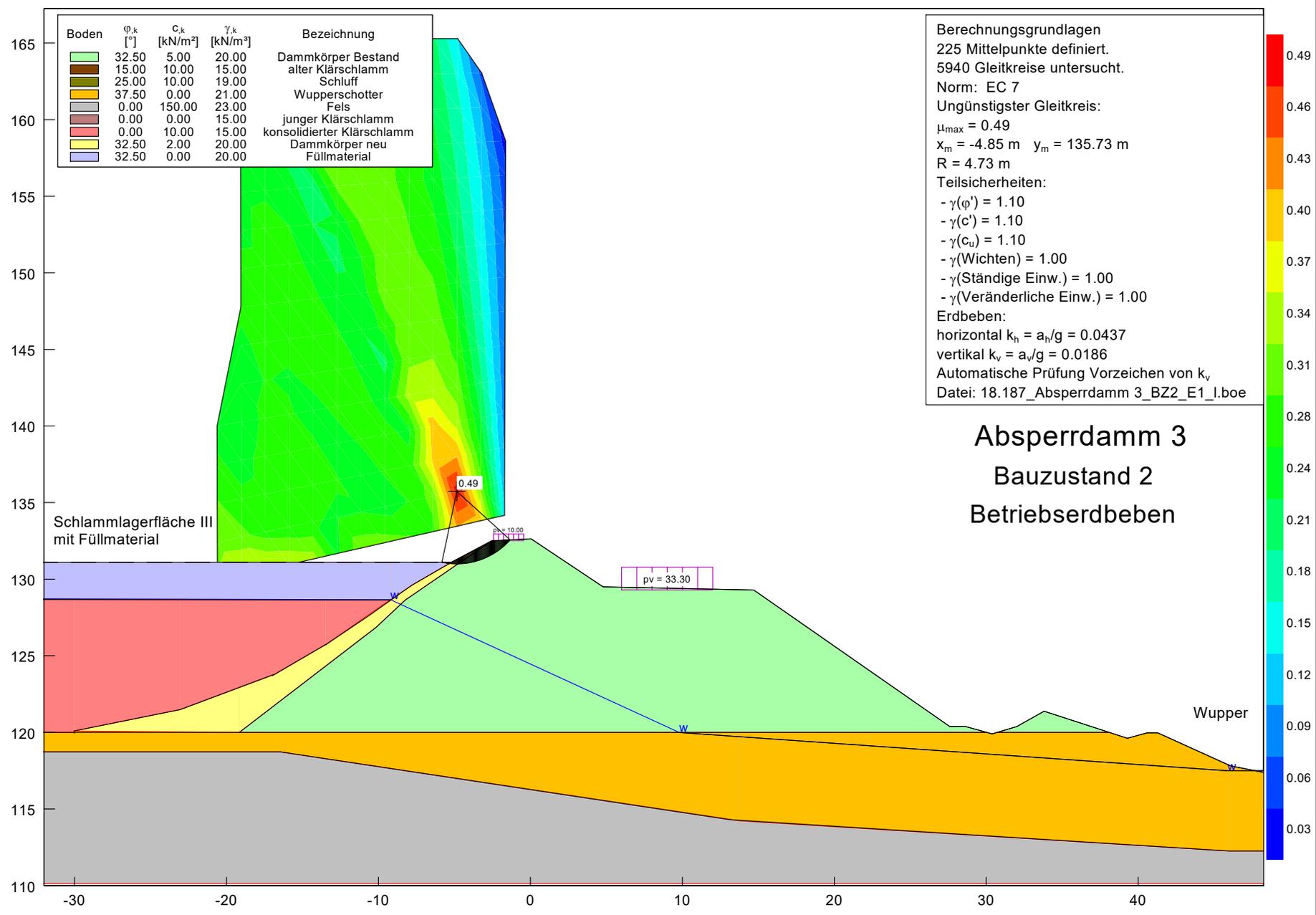
Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

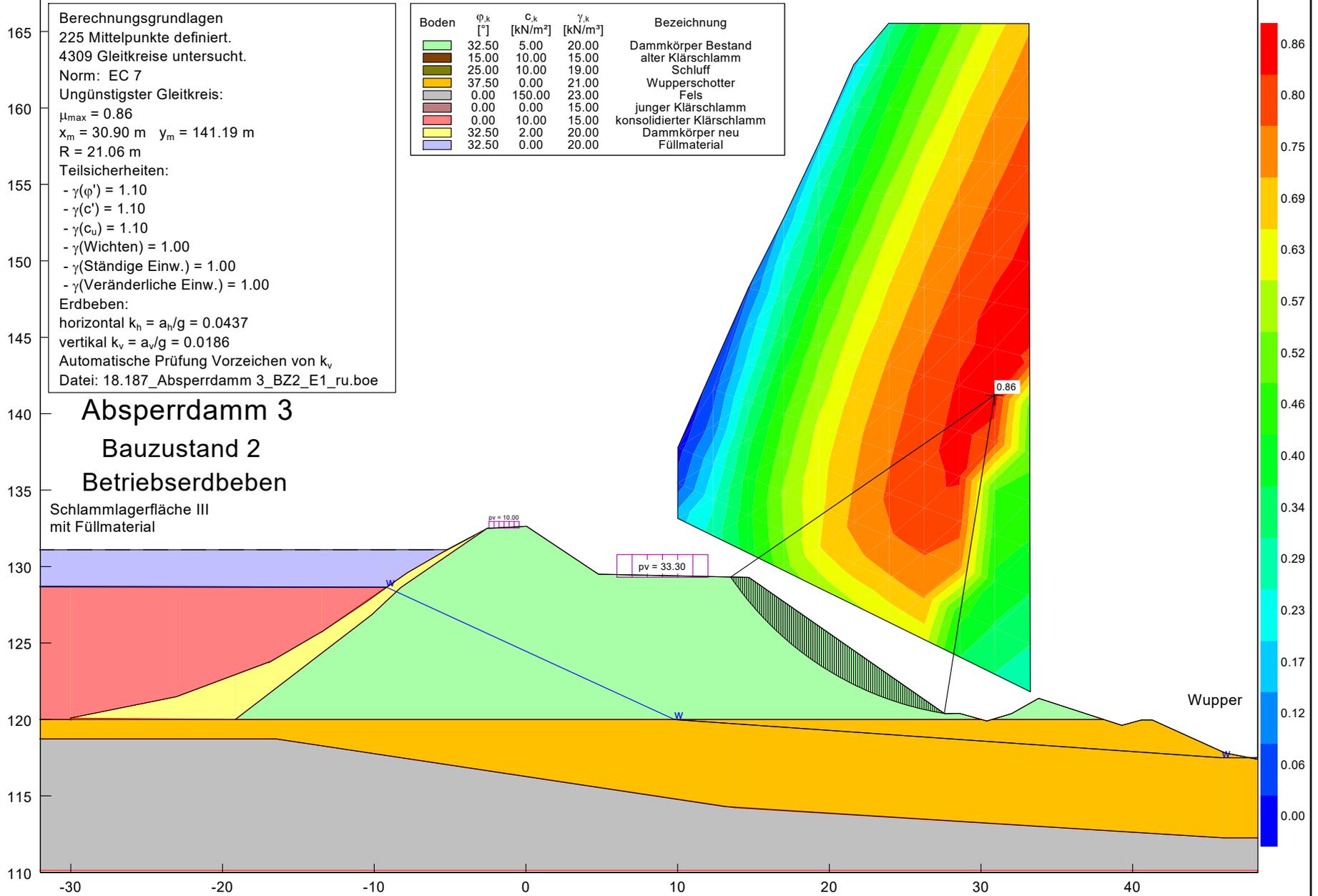


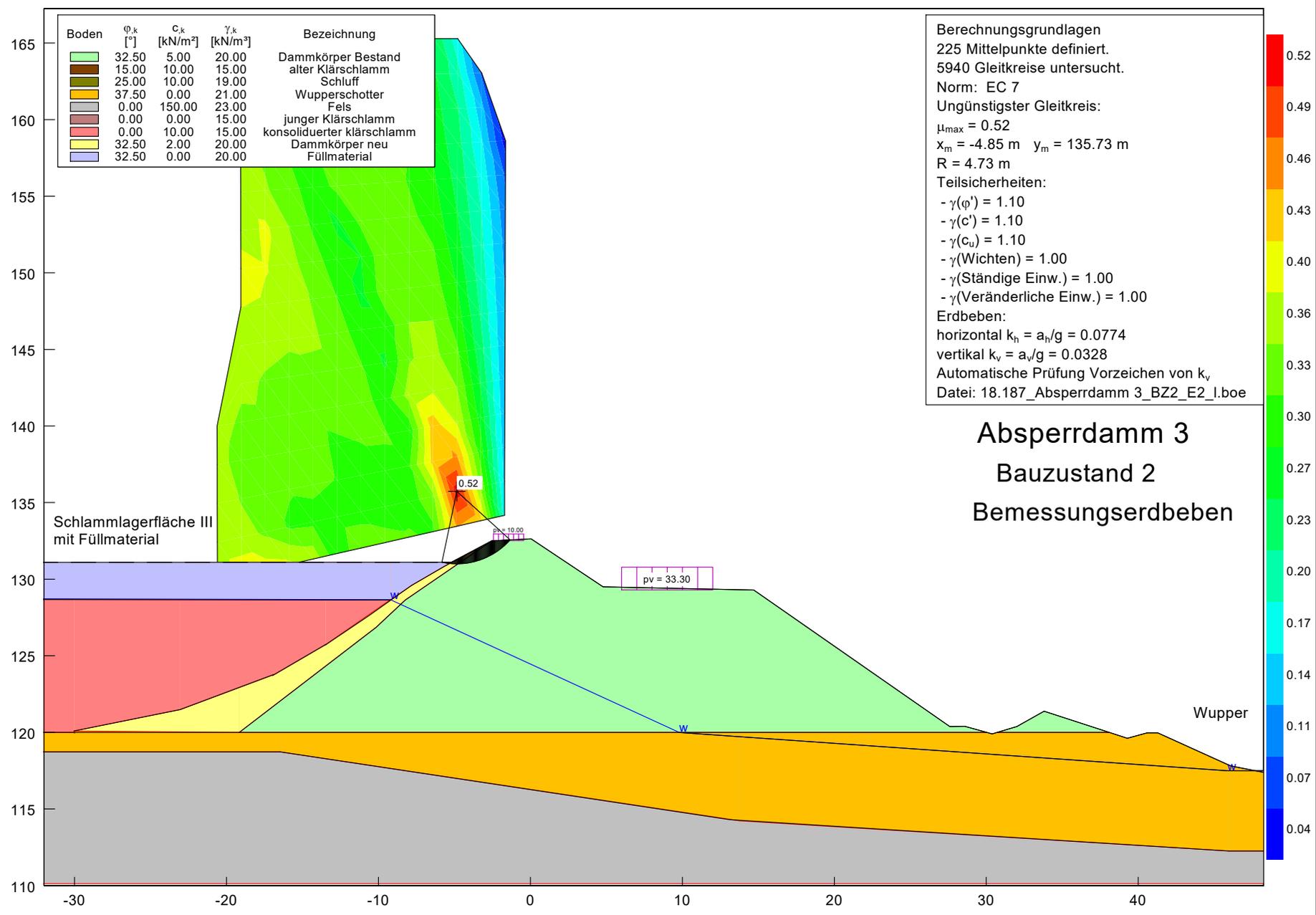
Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



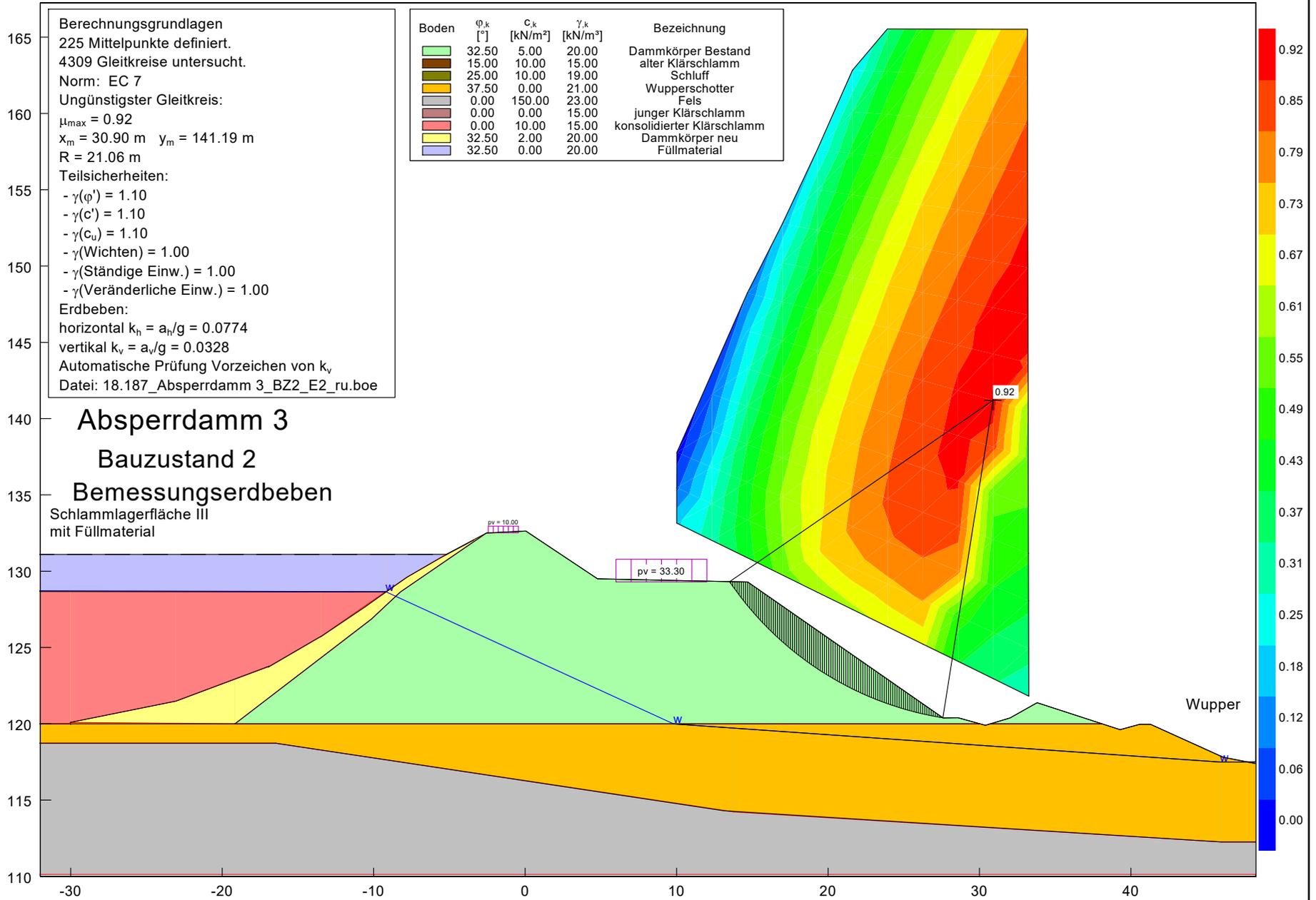
**Absperrdamm 3**  
**Bauzustand 2**  
**Betriebserdbeben**

Schlammflagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A

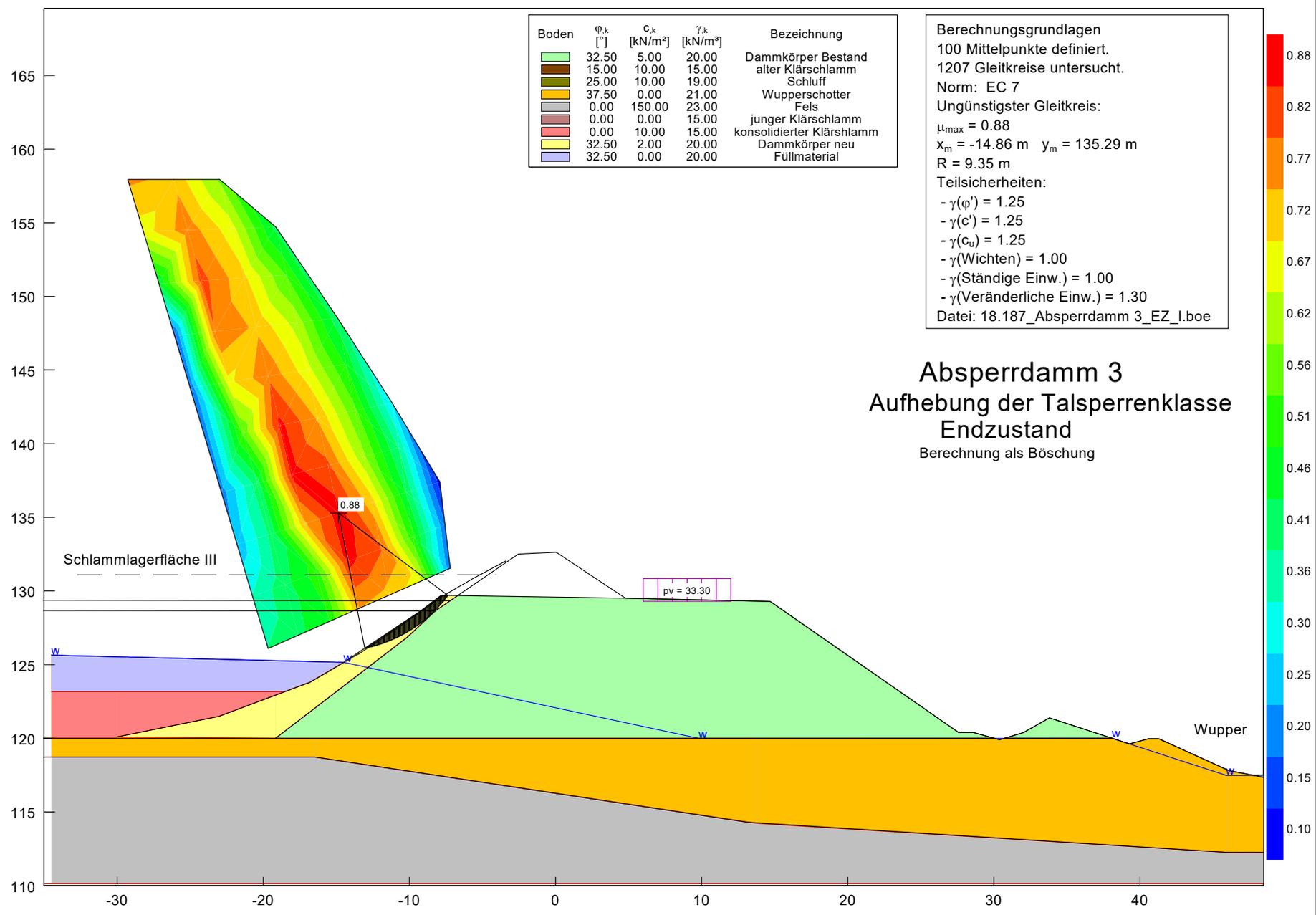




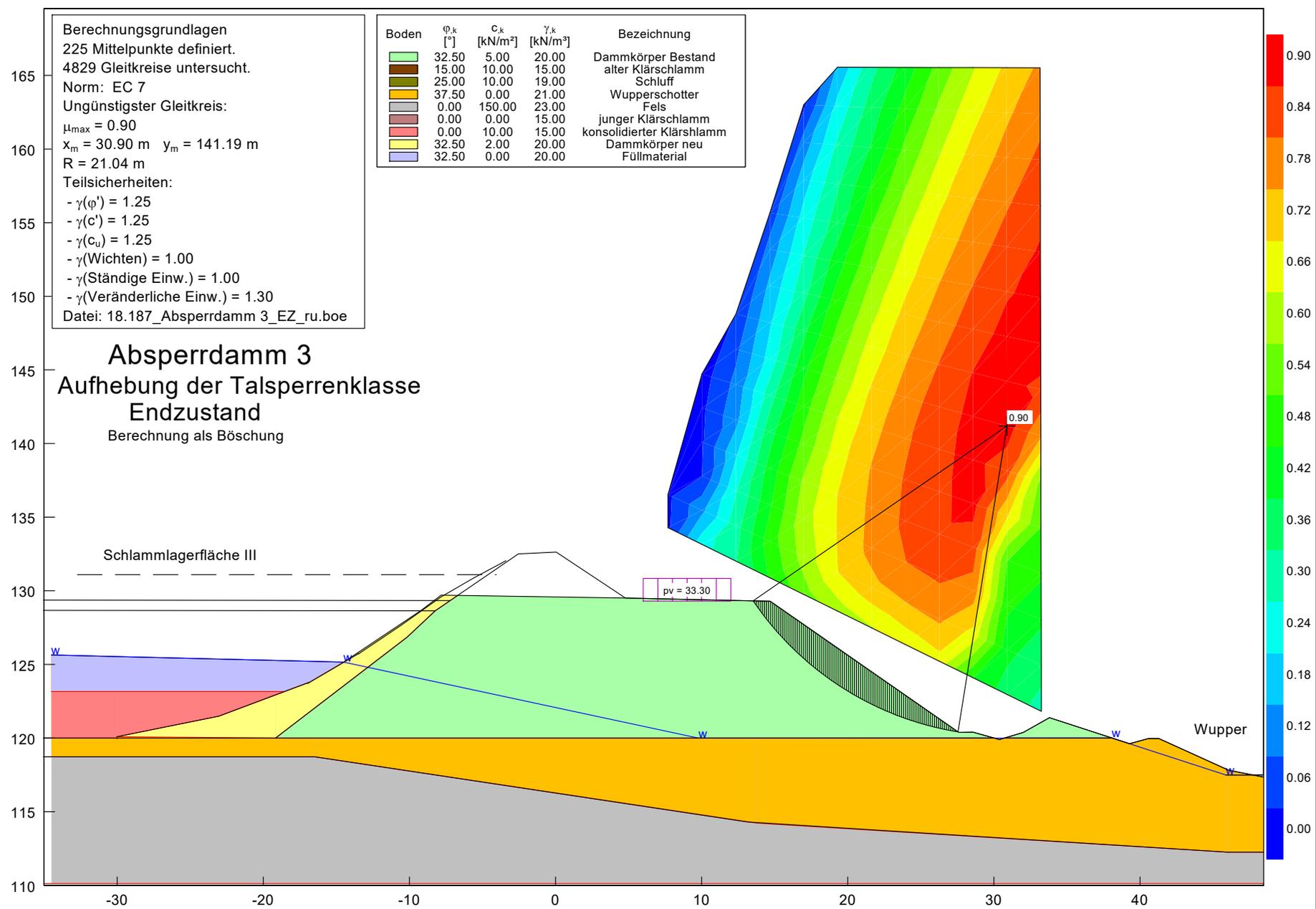
Schlammflagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlamm lagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-A



Schlammagerflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P



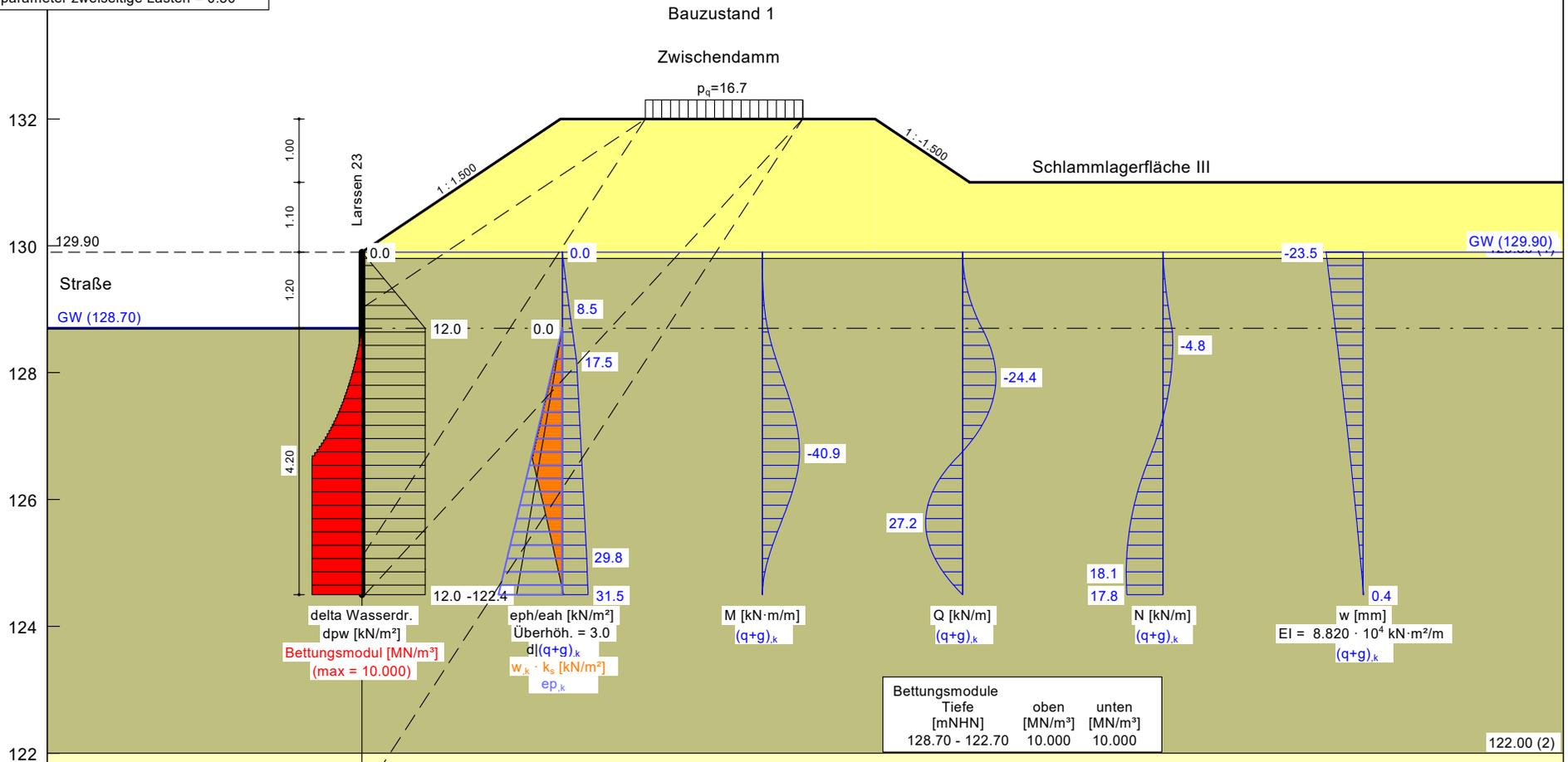
Schlammflächen Kläranlage Buchenhofen - Untersuchung der Böschungsstandsicherheit  
 Standsicherheitsberechnung für die Zwischendämme; Bemessungssituation BS-P

Norm: EC 7  
 Spundwand  
 Larssen 23  
 Aktiver Erddruck nach: DIN 4085  
 Ersatzerddruck-Beiwert mit  $\varphi = 40^\circ$   
 Pass. Erddruck nach: DIN 4085:2017 ger. GF  
 Erf. Profillänge = 5,40 m  
 Erf. Einbindetiefe = 4,20 m  
 BS: DIN EN 1997-1: BS-P  
 $\gamma_G = 1,35$   
 $\gamma_Q = 1,50$   
 $\gamma_{EP} = 1,40$   
 mob. Ep erfüllt /  $\mu = 0,61$   
 $\mu$  (Vert. Tragfähigkeit) = 0,38  
 Steuerparameter zweiseitige Lasten = 0,50

Bemessung:  
 Bemessung nach EC 3 (el.-el.)  
 Bemessungssituation: max M,gq  
 $M_{Ed} = 55,3 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$   
 $V_{Ed} = 0,5 \text{ kN}$  (50 % abgemindert)  
 $N_{Ed} = 7,7 \text{ kN/m}$  (Zug)  
 Profil: Larssen 23 Stahlgüte: S 240 GP  
 $b = 500,0 \text{ mm}$  /  $b_f = 275,0 \text{ mm}$   
 $t_f = 11,5 \text{ mm}$  /  $t_w = 10,0 \text{ mm}$  /  $A = 197,4 \text{ cm}^2/\text{m}$   
 $h = 420,0 \text{ mm}$  /  $\alpha = 70,0^\circ$   
 $W_{el} = 2000,0 \text{ cm}^3/\text{m}$  /  $I = 42000,0 \text{ cm}^4/\text{m}$   
 U-Bohle ist eine Doppelbohle

Boden ist gut tragfähig  
 $\gamma_{M0} = 1,00$  /  $\gamma_{M1} = 1,10$   
 $\varepsilon = 0,990 \rightarrow b_f / t_f / \varepsilon = 24,2$   
 Querschnittsklasse: 2  
 $\beta_B = 1,000$  /  $\beta_D = 1,000$   
 $f_{y,red} = 240,0 \text{ N/mm}^2$   
 $M_{c,Rd} = 480,0 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$   
 $V_{pl,Rd} = 1132,1 \text{ kN/m}$  ( $\mu = 0,000$ )  
 $N_{pl,Rd} = 4737,6 \text{ kN/m}$  ( $\mu = 0,002$ )  
 Querkraft-Interaktion  
 $V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} \rightarrow$  keine Abm.  
 Normalkraft-Interaktion

keine Abm.  
 Nachweis  $M_{Rd}$   
 $M_{c,Rd} = 480,0 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$   
 $\mu = M_{Ed} / M_{c,Rd} = 0,115$   
 $N_{Ed} > 0,0$  (Zug)  
 $\rightarrow$  Kein Knicknachweis  
 max  $\mu = 0,115$



Boden	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma'_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_k$ [°]	$c(p)_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c(a)_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\delta/\varphi$ passiv	$\delta/\varphi$ aktiv	$q_c$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$C_{u,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Bezeichnung
1	20,0	11,0	35,0	0,0	2,0	-0,667	0,667	10,00	0,00	Dammmaterial neu
2	19,0	10,0	30,0	0,0	0,0	-0,333	0,667	10,00	0,00	Auffüllungen
3	21,0	11,0	35,0	0,0	0,0	-0,333	0,667	10,00	0,00	Wupperschotter
4	23,0	13,0	0,0	150,0	150,0	-0,333	0,667	10,00	0,00	Fels

