

12.12.2024

Erweiterung und Instandsetzung Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt

Teil D:

Teilobjekte Nebenanlagen (TO13, 16 und weitere Betroffenheiten)
Unterlage 5.1 – Standsicherheits- und statische Nachweise
Dämme

Entwurfs- und Genehmigungsplanung



Schöpfwerk Henschleben II mit Mahlbusen

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt
c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

TRACTEBEL


 **INROS LACKNER**

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt

c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH
Rießnerstraße 18 | 99427 Weimar
Tel: +49 3643 746-400 | Fax: +49 3643 746-405
hydroprojekt-DE@tractebel.engie.com
www.hydroprojekt.de

Unterschriftenblatt

Projekt **Erweiterung und Instandsetzung HRB Straußfurt**
Teil D:
Teilobjekte Nebenanlagen (TO13, 16 und weitere Betroffenenheiten)
Unterlage 5.1 – Standsicherheits- und statische Nachweise, Dämme

Projektnummer 100 3492 (Tractebel Hydroprojekt GmbH)
2022-0617 (Inros Lackner SE)

Auftraggeber **Thüringer Fernwasserversorgung**
Anstalt des öffentlichen Rechts
Haarbergstr. 37
99097 Erfurt
Freigabe:


i. V. Dr. Michael Sabrowski
Leiter Stauanlagenmanagement
Erfurt, den 12.12.2024


i. V. Detlef Hogh
Projektingenieur

Auftragnehmer **Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt**
c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

Projektleitung Dipl.-Ing. Lars Schaarschmidt

Fachliche Qualitätssicherung Dipl.-Ing. Holger Rosenkranz

Bearbeitung Dipl.-Ing. Lars Schaarschmidt
Dipl.-Ing. Albrecht Köhler
Dipl.-Ing. Fabius Volmer
Dipl.-Ing. Gottfried Peschel
Dipl.-Ing. Olaf Schneider

Weimar, 12.12.2024

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt


Lars Schaarschmidt
Projektleiter


Gottfried Peschel
Projektingenieur

Standsicherheitsbericht Dämme

INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung und Zielstellung	1
2	Materialeigenschaften	3
2.1	Geologie/Hydrogeologie	3
2.2	allgemeiner Überblick zum Baugrund	4
2.3	Boden- und felsmechanische sowie hydraulische Kennwerte	4
2.3.1	Vorbemerkung	4
2.3.2	Tragwiderstandsbedingung A	4
2.3.3	Tragwiderstandsbedingung C (nur TO 16)	4
2.4	Abgeleitete Kennwerte für Durchströmungsberechnungen	4
3	Bemessungssituationen, Nachweise	6
3.1	Vorbemerkungen	6
3.2	Projektbezogene Bemessungssituationen	6
3.3	Nachweise	7
3.3.1	Vorbemerkung	7
3.3.2	Nachweise der Tragsicherheit	7
3.3.2.1	Böschungs- und Grundbruchsicherheit	7
3.3.2.2	Gleit- und Spreizsicherheit	7
3.3.2.3	Setzungserwartung	7
3.3.2.4	Nachweise der Gebrauchstauglichkeit	7
4	Berechnungsergebnisse und Nachweise	8
4.1	Schutzdamm Schwerstedt (TO16)	8
4.1.1	Durchströmungsberechnungen	8
4.1.2	Suffosions- und Erosionssicherheit	8
4.1.2.1	Dammbaustoff	8
4.1.2.2	Untergrund	9
4.1.2.3	Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch	9
4.1.2.4	Sicherheit gegen Kontakterosion	9
4.1.3	Böschungsbruchsicherheit	10
4.1.4	Gleitsicherheit	11

4.1.5	Auftrieb/hydraulischer Grundbruch	11
4.1.6	Spreizsicherheit	11
4.1.7	Setzungen/Risssicherheit	11
4.1.8	Dauerhaftigkeit	12
4.2	Straßendamm B4 nördlich Gebesee (M10)	12
4.2.1	Durchströmungsberechnungen	12
4.2.2	Suffosions- und Erosionssicherheit	13
4.2.2.1	Dammbaustoff	13
4.2.2.2	Untergrund	13
4.2.2.3	Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch	13
4.2.2.4	Sicherheit gegen Kontakterosion	13
4.2.3	Böschungsbruchsicherheit	13
4.2.4	Gleitsicherheit	14
4.2.5	Auftrieb/hydraulischer Grundbruch	15
4.2.6	Spreizsicherheit	15
4.2.7	Setzungen/Risssicherheit	15
4.2.8	Dauerhaftigkeit	15
5	Zusammenfassung	16

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	territoriale Einordnung der Teilobjekte, Stand 2023	1
Abbildung 2:	regionalgeologische Übersicht [43]	3

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	projektspezifische Bemessungssituationen für die GZT	6
Tabelle 2:	Ergebnis der Durchströmungsberechnungen TO16	8
Tabelle 3:	Ergebnisse Gleit- und Böschungsbruchsicherheit TO16	10
Tabelle 4:	Ergebnis der Durchströmungsberechnungen Straßendamm B4	12
Tabelle 5:	Ergebnisse Gleit- und Böschungsbruchsicherheit Straßendamm B4	14

VERZEICHNIS DER ANHÄNGE

Anhang 1	Querschnitt Schutzdamm Schwerstedt (TO16)
Anhang 2	Querschnitt Straßendamm B4 bei Gebesee (M10)

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Brendlin, Heinz: Die Schubspannungsverteilung in der Sohlfuge von Dämmen und Böschungen, Dissertation, Karlsruhe 1962
- [2] Busch, Luckner und Tiemer: Geohydraulik, 3. neubearbeitete Auflage: Gebrüder Bornträger. Berlin. Stuttgart 1993
- [3] DIN 1055-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Bodenkenngößen, November 2010
- [4] DIN 1072 Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen
- [5] DIN 4019 Baugrund, Setzungsberechnungen, Mai 2015
- [6] DIN 4020:2010-12 Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2
- [7] DIN 4023:2006 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen
- [8] DIN 4084, Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, Januar 2009
- [9] DIN 18196:2011-05 Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
- [10] DIN 19700:2004-07 Stauanlagen - Teile 10 bis 12
- [11] DIN 19712:1997-11 Flussdeiche (alte Fassung) und DIN 19712:2013-01 Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern
- [12] DIN EN 1997-1:2014-03 Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln einschließlich DIN EN 1997-1/NA:2010-12 Nationaler Anhang und DIN 1054:2010-12 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regeln zu DIN EN 1997-1 (s.a. Normenhandbuch zum EC-7, herausgegeben vom Beuth-Verlag, Ausgabe 2011-05)
- [13] DIN EN 1998-1:2010-12: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben und Erdbebenzonenkarte von Deutschland mit Orts-/Koordinatenabfrage unter https://www.gfz-potsdam.de/din4149_erdbebenzonenabfrage/ (Stand 25.04.2023)
- [14] DIN EN ISO 14688:2020-11 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1 Benennung und Beschreibung sowie Teil 2 Grundregeln für Bodenklassifizierungen
- [15] DIN EN ISO 14689:2018-05, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Klassifizierung und Beschreibung von Fels (ISO 14689:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14689:2018
- [16] DVWK-M231:1995: Sicherheitsbericht Talsperren - Leitfaden
- [17] DWA-M 514:2011-07: Bauwerksüberwachung an Talsperren

- [18] DWA-M 542: Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme und Staumauern. Juli 2017. Herausgegeben von: DGGT, DTK und DWA
- [19] EN 1991-2:2003 (EC-1 Einwirkungen auf Tragwerke, Verkehrslasten auf Brücken) + AC: 2010 + Nationaler Anhang DIN EN 1991-2/NA 08/2012. Deutsche Fassung.
- [20] Erweiterung und Instandsetzung HRB Straußfurt TO12+15 – Hauptdamm mit Verlängerung sowie zu den TO 16, TO 17 und M10 bei Gebesee | Vorplanung. Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH Dezember 2023 (Entwurfsplanung in Bearbeitung)
- [21] Geologische Karte 1:25.000 Blatt Gebesee Nr. 4831, heruntergeladen beim Kartendienst des TLUBN am 08.03.2023
- [22] Grundbautaschenbuch, 8. Auflage, Teil 1 – S. 142/143 (charakteristische Bodenkennwerte nach Soos und Engel, s.a. 4. Aufl. S. 112/113), Ernst und Sohn 2017
- [23] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt. Präsentation von Tractebel Hydroprojekt GmbH zur Anlaufberatung am 25.01.2023 mit dem Auftraggeber TFW
- [24] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt. Lastenheft zu den Standsicherheitsnachweisen der Erdbauwerke, Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt (Tractebel Hydroprojekt GmbH/INROS Lackner SE), Mai 2024.
- [25] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, Erkundungskonzept und Erkundungsprogramm, Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt (Tractebel Hydroprojekt GmbH/INROS Lackner SE), Februar 2023
- [26] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, vertiefte Überprüfung. Teil A4 Absperrbauwerk und Untergrund, Geotechnische Untersuchungen. m4 Ingenieure GmbH, August 2016.
- [27] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, Sicherheitsbericht mit umfangreichem Anlagenteil. m4 Ingenieure GmbH, 03. Februar 2021.
- [28] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, Zuverlässigkeitsnachweise Absperrbauwerke und Untergrund. Prüfbericht Baustatik Nr. P 2909/3/2017-3 vom 29.05.2019, Dr. Jörg Diener (vpi) Erfurt.
- [29] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, Ingenieurgeologische Stellungnahme bzgl. einer möglichen Subrosionsgefährdung der Staubauwerke des Hochwasserrückhaltebeckens Straußfurt. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 21.03.2018.
- [30] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, vertiefte Überprüfung. Abschlussbauwerk, Geotechnische Untersuchungen 2014 mit geotechnischem Bericht. Geotechnik umweltschutz hauck, 30.06.2015.
- [31] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt: Herstellung der Hochwassersicherheit des Schutzdammes Henschleben, Instandsetzung und Herstellung der Überströmbarkeit des Nebendamms - Standsicherheitsbericht. Tractebel Hydroprojekt GmbH, 16.12.2021

- [32] HRB Straußfurt – Vertiefte Überprüfung, Teil A-1: Absperrbauwerk und Untergrund/Grundlagen Absperrbauwerk und Untergrund. M4 Ingenieure GmbH München, Februar 2016
- [33] HRB Straußfurt – Vertiefte Überprüfung, Teil A-5: Absperrbauwerke und Untergrund/Lasten- und Pflichtenheft. M4 Ingenieure GmbH München, September 2017
- [34] HRB Straußfurt – Vertiefte Überprüfung, Teil A-6: Absperrbauwerke und Untergrund/Zuverlässigkeitsnachweise. M4 Ingenieure GmbH München, Mai 2019
- [35] HRB Straußfurt, Vertiefte Überprüfung, Teil D: Messtechnische Bauwerksüberwachung. M4 Ingenieure GmbH München, April 2017
- [36] Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK), Bundesanstalt für Wasserbau, Ausgabe 1989 und 2013
- [37] Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB), Bundesanstalt für Wasserbau, Ausgabe 2013
- [38] Merkblatt über die Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Bundesanstalt für Wasserbau, Ausgabe 2011
- [39] Saucke, U. (2006): Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe. Zeitschrift geotechnik 29, Nr. 1 (Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Essen) mit Verweis auf BURENKOVA
- [40] Smolczyk, U. (Hrsg.): Grundbautaschenbuch Teil 1, 4. Auflage, Ernst und Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1990
- [41] Striegler, W.: Dammbau. Verlag für Bauwesen Berlin, 2. Auflage 1998
- [42] Türke, H. Statik im Erdbau, Ernst Verlag Berlin, 1999
- [43] Wagenbreth/Steiner: Geologische Streifzüge, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1982
- [44] WAPRO 4.04.: Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerströmung, Projektierung Wasserwirtschaft, Januar 1970
- [45] Wendehorst: Bautechnische Zahlentafeln, 35. Auflage, 2014
- [46] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, vertiefte Überprüfung. Teil C7 sonstige Anlagenteile, Grundlagen und Bericht. m4 Ingenieure GmbH, August 2018.
- [47] Baugrunderkundung HRB Straußfurt, Geotechnischer Bericht, Geotechnische Erkundung 2023. GGL Leipzig vom 26.01.2024
- [48] Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt (030) – ingenieurgeologisch/seismologische Vorbewertung über die Notwendigkeit eines seismologischen Gutachtens am Standort des HRB Straußfurt des Referates 82 des TLUBN. TLUBN, 13. August 2020

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bezeichnung
BS	Bemessungssituation
BQ	Berechnungsquerschnitt
FEM	Finite-Elemente-Methode
GFZ	Geoforschungszentrum Potsdam
GGU	Gesellschaft für Grundbau und Umwelttechnik mbH
GOK	Geländeoberkante
GSK	Gesamtsicherheitskonzept, globales Sicherheitskonzept
HQ (T)	Hochwasser in m³/s mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von T Jahren
LF	Lastfall
HRB	Hochwasserrückhaltebecken
IL	INROS Lackner SE
Ls/Is	Luftseite/luftseitig
OK	Oberkante
QP	Querprofil/Querschnitt
TFW	Thüringer Fernwasserversorgung Erfurt AöR
THP	Tractebel Hydroprojekt GmbH
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TO	Teilobjekt
TSF	Teilsicherheitsfaktor(en)
TSK	Teilsicherheitskonzept
TWB	Tragwiderstandsbedingung
VL	Verkehrslast
VÜ	Vertiefte Überprüfung
Ws/ws	Wasserseite/wasserseitig

1 Veranlassung und Zielstellung

Die in Bearbeitung befindliche Entwurfsplanung umfasst eine Instandsetzung der Anlage für eine weitere Nutzungsdauer von 50 Jahren und die Anhebung des Vollstauzieles um 1,0 m auf 150,80 m NHN (Erweiterung Hochwasserschutzraum).

Zum HRB Straußfurt existiert letztmalig eine vertiefte Überprüfung aus dem Jahr 2016 [32][33][34] mit zugehörigem Prüfbericht [28]. Aktueller Anlass für die Ausführung der Standsicherheitsnachweise ist eine Stauzielerhöhung/Erweiterung des Stauraums.

Für die Erdbauwerke sind die erdstatischen Nachweise nach aktuellem Stand der Normung zu führen. Für TO 16 sind maßgebend zum Einen DIN 19700:2004 [10] sowie das Merkblatt DWA-M 542:2017 [18]. Für M10 gilt der EC-7 [12].

Für folgende Teilobjekte/Dämme (TO) sind Standsicherheitsnachweise zu führen:

TO 16 - Maßnahmen Schwerstedt - Neubau

M10 – Maßnahme 10 – Auswirkung auf B4 vor Ortslage Gebesee

Keine Relevanz hat die Anpassung von Flussscheiden an der Gera südlich des Hochwasserrückhaltebeckens (HRB) bei Gebesee (Abbildung 1 unten).

Regionale Einordnung

Der Gesamtstandort befindet sich von der Ortslage Straußfurt aus in westsüdwestlicher Richtung. Der Standort des HRB Straußfurt ist regional wie folgt eingeordnet (Abbildung 1):

Anlage 2.3 überflutete Fläche „Z_{H1} und Z_{H2} neu“ – 151,84 m NHN, Überblick notwendige Maßnahmen

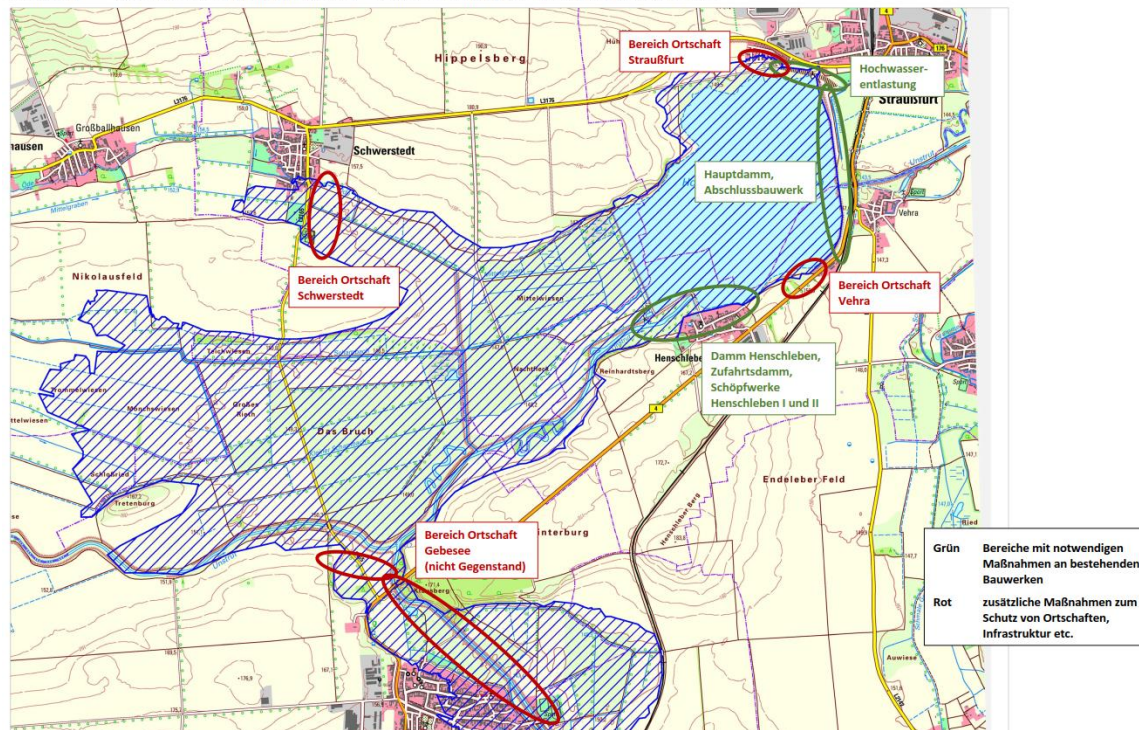


Abbildung 1: territoriale Einordnung der Teilobjekte, Stand 2023

Die Thüringer Fernwasserversorgung AöR (TFW) beauftragte die Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt (c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH - THP) mit der Planungsleistung, der gutachterlichen

geologischen Begleitung und Bauüberwachung der Baugrunduntersuchung zum HRB Straußfurt sowie der Ausführung von Standsicherheitsnachweisen. Gegenstand dieses Standsicherheitsberichtes sind die Erdbauwerke. Weitere Nachweise für Massivbauwerke u.a.m. sind nicht Untersuchungsgegenstand.

Im Lastenheft wurden die Festlegungen, Annahmen, Grundlagen und der Umfang der Nachweise zusammengestellt.

Auftraggeber (AG): Thüringer Fernwasserversorgung (TFW)
 Anstalt Öffentlichen Rechts
 Haarbergstraße 37
 99097 Erfurt

Planer Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt
 c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH (THP)
 Rießnerstraße 18
 99427 Weimar

Der Untersuchungsstandort befindet sich im Bundesland Thüringen, westsüdwestlich der Ortslage Straußfurt im Landkreis Sömmerda.

Das TO 16/Schutzdamm Schwerstedt mit Pumpwerk befindet sich südlich der Ortslage Schwerstedt. Die Maßnahme M10 – Auswirkungen auf B4 vor Ortslage Gebesee befindet sich nördlich dieser Ortslage.

Die Lage dieses Teilobjekts/der Maßnahme ist in Abbildung 1 ersichtlich.

Gegenstand dieser Unterlage sind Standsicherheitsuntersuchungen des zu erweiternden HRB Straußfurt nach aktuellem Stand der Technik, insbesondere nach DWA-M 542:2017 [18].

Das DWA-M 542 [18] ist eine Untersetzung der DIN 19700 [10] für das Teilsicherheitskonzept und hinsichtlich der Führung der Nachweise. **Im Gegensatz zu TO 16 ist der Straßendamm B4 keine Stauanlage – daher gilt hier EC-7 [12].**

Die maßgebenden Berechnungsquerschnitte wurden im Lastenheft [24] festgelegt.

Die Gesteine der Keuperformationen sind im Hangenden mehrere Meter vollständig zu Lockergestein zersetzt. *Beim darunter folgenden Fels handelt es sich hier um veränderlich festen verwitterten Tonstein.*

Die hydrogeologische, für das Bauwerk relevante Situation wird von der Ausbildung eines oberen Grundwasserleiters in den quartären Kiesen – „Unstrutschotter“ – bestimmt. Der Unstrutschotter lagert dem Keuperton auf.

2.2 allgemeiner Überblick zum Baugrund

Im Projekt HRB Straußfurt wurde eine aktuelle Hauptuntersuchung [47] als Grundlage für die Entwurfs- und Genehmigungsplanung durchgeführt, um darauf aufbauend mit den entsprechenden statischen Berechnungskennwerten für die TO Standsicherheitsnachweise führen zu können.

Vor allem für den Hauptdamm, aber auch für weitere TO im Bestand wurden seit der Bauzeit in den 1950er Jahren bis zum Jahr 2024 [26][47] eine umfassende Baugrunderkundung und -begutachtung durchgeführt.

2.3 Boden- und felsmechanische sowie hydraulische Kennwerte

2.3.1 Vorbemerkung

Nach DWA-M 542 [18] sind die Tragwiderstandsbedingungen (= TWB) A und C zu untersuchen. Die Materialeigenschaften, beschrieben durch Kennwerte für die gewählten Stoffgesetze und die Wirksamkeit baulicher Einrichtungen werden für die verschiedenen Tragwiderstandsbedingungen bestimmt. TWB C hat für M10 keine Relevanz.

Die auf den aktuellen bodenmechanischen Untersuchungen [47] und der VÜ [26] beruhenden erd- und felsstatistischen Kennwerte sind in Anhang 3/Lastenheft zusammengestellt. Diese wurden für die aktuelle Planung anhand von Erfahrungswerten vergleichbarer Projekte und aus der Literatur (z.B. Baugrunderkennung nach SOOS/ENGEL, s. Grundbautaschenbuch [40]) vom Verfasser für die Planung ergänzt.

Die Durchlässigkeitsbeiwerte sind z.T. abgestuft. Z.T. wurden vom Verfasser Mittelwerte gebildet.

2.3.2 Tragwiderstandsbedingung A

Die betreffenden Kennwerte sind in Anhang 3/Lastenheft zusammengestellt. Es handelt sich nach DIN 19700 [xx] bzw. DWA-M 542 [18] um gesicherte oder allgemein anerkannte Kennwerte.

2.3.3 Tragwiderstandsbedingung C (nur TO 16)

Die betreffenden Kennwerte sind in Anhang 3/Lastenheft zusammengestellt. Es handelt sich nach DIN 19700 [10] bzw. DWA-M 542 [18] um ungünstige Kennwerte in Grenzbereichen.

2.4 Abgeleitete Kennwerte für Durchströmungsberechnungen

Für den Übergang von der gesättigten zur ungesättigten Durchströmung wird bei Böden mit einer Durchlässigkeit $> 1 \cdot 10^{-5}$ m/s eine für Sande und durchlässigere Böden zutreffende Übergangsfunktion entsprechend der Abbildung in der Programmdokumentation gewählt. Bei den geringer durchlässigen Böden wird die in dem Programm 2D-SS-FLOW vorgeschlagene Übergangsfunktion für dichten Boden verwendet (s. Programmdokumentation).

Für die instationäre Durchströmungsberechnung bei schnellstmöglicher Wasserspiegelabsenkung ist die Bestimmung des freiwerdenden Porenraumes erforderlich. Maßgeblich ist die Angabe für die Materialien des Stützkörpers und der Dichtungszone.

Das effektive Porenvolumen und die Sättigungskennziffer werden an Hand der in der vertieften Überprüfung in 2019 [34] definierten Werte gemäß dortiger Tabelle 2 in Anhang 3/Lastenheft übernommen bzw. vom Verfasser gerundet.

Es wird angenommen, dass die Differenz zwischen n und n_w als Wassermenge unverzögert frei wird, wenn der Wasserstand unter die jeweilige Höhe sinkt.

Diese Kennwerte gelten für die Tragwiderstandsbedingungen A und C.

3 Bemessungssituationen, Nachweise

3.1 Vorbemerkungen

Die bestehende Talsperre ist in die Talsperrenklasse 1 bzw. „Großes Becken“ (Stauraum > 1 Mio. m³ oder Dammhöhe > 15 m) einzustufen [10].

Die Definition der Einwirkungen (Lasten) erfolgt auf der Grundlage der DIN 19700-11 [10] bzw. DWA-M 542 [18].

Aus der Planung ist der Vollstau mit $Z_v = 150,81$ m NHN zu entnehmen. Für M10 wird ein Einstau bordvoll betrachtet, der mit $Z_{bv} = 151,53$ mNHN zwischen dem Z_v und Z_{H1} liegt, für den daher die ständige Bemessungssituation gilt. Des Weiteren wird in der Risikobetrachtung für TO 16 der Kronenstau mit $Z_K = 153,00$ m NHN definiert. Dieser Kronenstau wird bei der Böschungsbruchsicherheit mit allen Teilsicherheiten = 1,0 untersucht.

3.2 Projektbezogene Bemessungssituationen

Aus der Kombination von Einwirkungen und Tragwiderstandsbedingungen ergeben sich die Bemessungssituationen. Für die Bemessungssituationen gelten unterschiedliche Sicherheitsanforderungen. In der Tabelle 1 sind die für TO16 und M10 zu untersuchenden Bemessungssituationen aufgeführt.

Tabelle 1: projektspezifische Bemessungssituationen für die GZT

Einwirkungen	Bemessungssituationen im GZT						
	BS-P P.1	P.2	P.3	BS-T T.1	T.2	BS-A A.1	BS-R ⁵⁾ R.1
Ständige Einwirkungen							
Eigengewicht, Erddruck, Überschüttung	x	x	x	x	x	x	x
Veränderliche Einwirkungen							
Verkehrslast	x	x		x	x	x	
Wasserdruck und Strömungskraft bei leerem Becken ¹⁾		(x)			x	Ws	
Wasserdruck und Strömungskraft bei Z_v	x					Ls	
Wasserdruck und Strömungskraft bei Z_{H1}				x ⁴⁾			
Wasserdruck und Strömungskraft bei Z_{H2}				x ⁴⁾			
Wasserdruck und Strömungskraft infolge schneller Stauspiegelabsenkung aus Z_v ²⁾		x					
außerplanmäßige Betriebs- und Belastungszustände, Bauzustände					x		
Außergewöhnl. Einwirkungen/Zustände							
Berücksichtigung ungünstiger Materialkennwerte			x ³⁾			x	
Risikobetrachtung (BS-R)							
Kronenstau Z_K ⁵⁾			x ³⁾				x

Anmerkungen zu Tabelle 1:

¹⁾ Der Nachweis Vollstau auf der Luftseite deckt den Zustand leeres Becken luftseitig mit ab (Kennwerte TWB A und C). In der BS-A.2 wird für ein leeres Becken/Wasserseite die Böschungsbruchsicherheit bei Kennwerten der TWB A und C untersucht

²⁾ Es darf der Wasser- und Strömungsdruck bei Stauziel Z_v (entspricht dem Vollstau) angesetzt werden,

³⁾ BS-P.3 Abschieben Damm im Kronenstau deckt alle übrigen BS mit ab.

⁴⁾ BS-T.1 deckt die BS-A mit ab, da Stauziel identisch ist

⁵⁾ für M10 gilt statt des Kronenstaus ein Einstau bordvoll Z_{bv}

GZT: Grenzzustände der Tragfähigkeit

3.3 Nachweise

3.3.1 Vorbemerkung

Die zu führenden Nachweise sind im Lastenheft zusammengestellt [24]. Nachweise, die offensichtlich nicht maßgebend sind, da sie durch höhere Bemessungsfälle abgedeckt sind, werden nicht geführt. Dies gilt insbesondere, wenn für Lastfälle der Bemessungssituationen T und A die Sicherheitskriterien der Bemessungssituationen P bzw. T erfüllt werden.

3.3.2 Nachweise der Tragsicherheit

Zum Nachweis der Tragsicherheit sind folgende Nachweise zu führen:

- Böschungs- und Grundbruchsicherheit maßgebender Gleitkörper
- Gleit- und Spreizsicherheit in der Aufstandsfläche des Dammes
- Kippsicherheit
- Überflutungssicherheit
- Setzungserwartung (nur neue Dämme)

3.3.2.1 Böschungs- und Grundbruchsicherheit

Die in den Nachweisen der Böschungs- und Grundbruchsicherheit einzubeziehenden Berechnungslastfälle und dabei zu berücksichtigende Dammbereiche (Wasser- und/oder Luftseite) sind im Lastenheft aufgeführt. Die Untersuchung der Grundbruchsicherheit wird im GGU-stability dadurch abgedeckt, dass durch einen hinreichend tief eingestellten Suchbereich auch tiefe Gleitkreise mit erfasst werden.

3.3.2.2 Gleit- und Spreizsicherheit

Die Nachweise der Gleit- und Spreizsicherheit erfolgen zuerst für ungünstigste Verhältnisse am Böschungsdreieck unter Ansatz einer dreieckigen Bruchfigur nach JANBU am Böschungsfuß.

3.3.2.3 Setzungserwartung

Auf einen Setzungsnachweis von M10 kann verzichtet werden, da die Bestandsdauer des Straßendamms mehrere Jahrzehnte beträgt. Für den Damm TO16 wird der Nachweis wie im Lastenheft beschrieben geführt (s. TÜRKE [42]).

3.3.2.4 Nachweise der Gebrauchstauglichkeit

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind folgende Nachweise zu führen, die im Lastenheft beschrieben sind:

- Bestimmung der Lage der Sickerlinie
- Bestimmung der Sickerwassermengen
- Erosions- und Suffosionsstabilität des Dammes und Untergrundes
- NW hydraulische Grundbruch- bzw. Auftriebssicherheit
- Setzungen

4 Berechnungsergebnisse und Nachweise

4.1 Schutzdamm Schwerstedt (TO16)

4.1.1 Durchströmungsberechnungen

In Anhang 1 sind der Berechnungsquerschnitt, das FE-Netz, die Materialeigenschaften (k-Werte, effektives Porenvolumen n_{eff}) sowie die berechneten Potenzialverteilungen ersichtlich.

Instationäre Durchströmungsberechnungen werden nur bei der Stauspiegelabsenkung durchgeführt, die weiteren Berechnungen werden gemäß DIN 19700 [10] als stationäre Durchströmungsberechnungen geführt.

Für die BS-P.1 wird der Vollstau untersucht. Diese Potentialverteilung bildet die Grundlage/den Ausgangspunkt für die instationäre Berechnung der schnellen Stauspiegelabsenkung in der BS-P.2.

Das Stauziel Z_{H1} entspricht der vorübergehenden BS-T.1.

Das Stauziel Z_{H2} entspricht der BS-A und ist – da mit Z_{H1} identisch – von der BS-T.1 abgedeckt.

In der Risikobetrachtung BS-R.1 wird ein Kronenstau Z_K untersucht.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Durchströmungsberechnungen zusammengestellt. Es werden die jeweils größten hydraulischen Gradienten im Damm und im Auelehm ausgewiesen. Die größten Gradienten treten im Damm auf. Die Bewertung erfolgt im Kapitel 4.1.2.

In allen Bemessungssituationen ergeben sich sehr geringe bis geringe (nur Kronenstau) Sickerwassermengen.

Eine Betrachtung einer „Leckage in der Dichtung“ des homogenen Dammes kommt wegen der großräumigen Ausdehnung der „Dichtung“ nicht in Betracht.

Anmerkung

Die Nachweise - außer der Nachweis schnelle Stauspiegelabsenkung - erfolgten unter stationären Bedingungen, die sich erst bei einem Dauerstau einstellen. Damit liegen diese Nachweise auf der sicheren Seite.

Nachstehende Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den Ergebnissen der Durchströmungsberechnungen:

Tabelle 2: Ergebnis der Durchströmungsberechnungen TO16

BS	Anhang Nr.	Lage Sickerlinie	Gradient $i_{(max)}$ [-]		Sickerwassermenge [l/s je m] Dammfuß L_s
			Damm	Auelehm	
BS P.1 (Zv)	1.1.2	zulässig	0,1	0,8	$7,6 \cdot 10^{-7}$
BS-P.2 schnelle Absenkung	1.1.3	hängt etwas nach	0,3	0,6	0,0
BS-T.1 (Z_{H1})	1.1.4	zulässig	0,1	2,0	$2,9 \cdot 10^{-6}$
BS-A.1 Kennwerte TWB C	1.1.5	zulässig	0,1	0,8	$7,3 \cdot 10^{-7}$
BS-R.1 (Z_K)	1.1.6	pot. kritisch ^{*)}	1,2	3,3	$1,8 \cdot 10^{-5}$

^{*)} Gebrauchstauglichkeitsproblem

4.1.2 Suffosions- und Erosionssicherheit

4.1.2.1 Dammbaustoff

Der Damm wird als homogener bindiger Damm (Ton wie für eine Dichtung) und an seinen Füßen mit vorgelagerten dränierend wirkenden Wegebermen geplant.

Die geometrische Suffosionssicherheit kann für den ws Damm (Keuperton) als erfüllt angesehen werden, da der Tonkornanteil $d_{<0,002\text{mm}} > 10 \%$ betragen wird. Für die Bermen besteht keine nennenswerte hydraulische Belastung, da die Gradienten bei $i < 0,1$ liegen, womit schon nach hydraulischem Kriterium Suffosionssicherheit gegeben ist.

Nach „Dammbau“ von STRIEGLER [41] wird ein hydraulisches Gefälle i im Damm, mithin auch in Dichtungen, zwischen $i = 1$ (< 1 immer zulässig) und $i = 5$ festgelegt.

Diese Kriterien werden für den bindigen Damm auch bei Extremeinstau Z_K mit $i = 1,2 < 5$ und bei schneller Absenkung mit $i = 0,3 < 5$ sicher eingehalten.

4.1.2.2 Untergrund

Maßgebend für die Suffosionssicherheit des Untergrundes ist der Auelehm, da in diesem die Gradienten am höchsten sind.

Die geometrische Suffosionssicherheit kann für den Aue-/Hanglehm als erfüllt angesehen werden, da der Tonkornanteil $d_{<0,002\text{mm}} > 15 \%$ beträgt (Kornverteilungen Lastenheft, s. dort Anhang 4). Die Gradienten erreichen maximale Werte ähnlich wie im Damm (s. Potenzialverteilungen Anhang 1.1).

Für den Aquifer, einen SU-SU*-Boden (Äquivalent des Unstrutschotters), liegt keine Kornverteilung vor. Die Gradienten betragen $i < 0,1$, womit schon nach hydraulischem Kriterium die Suffosionssicherheit gegeben ist.

Der anstehende Keuper ist grundsätzlich suffosionssicher, da es sich um einen festen bzw. bindig verwitterten ($d_{<0,002\text{mm}} > 15\%$ - Anhang 7 Lastenheft [24]) Gesteinsverband handelt.

4.1.2.3 Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch

Die Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch wird nach CHUGAEV [42] nachgewiesen. Für den durchschnittlichen Gradienten i_K über die Strecke L (Dammbreite in der Aufstandsfläche ohne Berme) gilt:

$i_K = H_W / L < i_{zul}$	mit	schluffiger Ton	$i_{zul} = 0,20 \dots 0,26;$
		Mittelsand	$i_{zul} = 0,15 \dots 0,20$ und
		Grobsand, Kies	$i_{zul} = 0,25 \dots 0,33.$

Dabei ist H_W die Einstauhöhe. Durch Einsetzen ergibt sich bei Z_K (hier größte Potenzialdifferenz):

$$i_K = 3,0 \text{ m} / 21 \text{ m} = 0,14 \Rightarrow \text{Nachweis erfüllt !}$$

Ein Nachweis gegen Fugenerosion an Schichtgrenzen kommt nicht in Betracht, da der bindige Damm auf bindigem Untergrund aufliegt.

4.1.2.4 Sicherheit gegen Kontakterosion

In der Dammaufstandsfläche besteht zwischen Auelehm und bindigem Dammmaterial Filterstabilität, da der Auelehm eine zum Damm ähnliche Kornverteilung aufweist.

Der Keuperton/Auelehm ist zum Unstrutschotteräquivalent SU(-SU*) auf Grund des Schluffanteils noch filterstabil:

Für die Sicherheit gegen Kontakterosion gilt die vereinfachte Filterregel nach DIN 19712:1997, Abschn. 7.4.4 [11]: Für eine Plastizität $I_P \geq 20\%$ darf das Verhältnis der d_{50} -Durchgänge zueinander 150 betragen. Der Aquifer hat nach Schätzung $d_{50} = 0,4 \text{ mm}$, während der Keuperton bzw. Auelehm $d_{50} = 0,01 \text{ mm}$ und höher aufweist. Das d_{50} -Verhältnis zueinander beträgt 40. Die Filterstabilität ist gegeben.

Die Wegeberman sind zum bindigen Untergrund/Damm nicht filterstabil (geometrisches Kriterium/Kornverteilung). Sollte hier rein theoretisch eine Kolmation auftreten, würde sich dies bei Vollstau

in Sickerwasseraustritten oberhalb des Böschungsfußes bemerkbar machen. Da das geometrische Kriterium nicht erfüllt ist, wird die hydraulische Belastung maßgebend: Diese ist jedoch mit Gradienten $i < 0,1$ hinreichend klein, so dass ein Einbau eines Trennvlieses oder Zwischenfilters entfallen kann.

4.1.3 Böschungsbruchsicherheit

In die Böschungsbruchberechnungen wurde der jeweils zugehörige Potenzialzustand entsprechend Tabelle 2 eingeführt.

In Anhang 1.2 sind der Berechnungsquerschnitt, das Berechnungsmodell sowie die EDV-Ausdrucke der ausgeführten Berechnungen enthalten. Den EDV-Ausdrucken können die entsprechend der zugehörigen Tragwiderstandsbedingung (TWB) angesetzten Bodenkennwerte entnommen werden.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Böschungsbruchberechnungen für den Berechnungsquerschnitt BQ1 zusammengefasst. Es wird für jede Bemessungssituation die ungünstigste Gleitfläche bestimmt.

Tabelle 3: Ergebnisse Gleit- und Böschungsbruchsicherheit TO16

Bemessungssituation Beschreibung	Böschung	Ergebnis		Anhang
		TSK	GSK	
		μ_{\max}	η_{\min}	
BS-P.1 Stauziel $Z_V = 150,81$ mNHN	Luftseite	0,94<1,0	1,46>1,3	1.2.1
	Ls JANBU	0,74<1,0	1,77>1,3	1.2.2
BS-P.2 (T) schnellste Stauspiegelabsenkung instationär Abstau 27,3 h (langsame betriebliche Absenkung mit abgedeckt)	Wasserseite	0,67<1,0	1,96>1,3	1.2.3
	Ws - Gleiten	0,46<1,0	2,85>1,3	1.2.4
BS-T.1 (A) Stauziel $Z_{H1/2} = 151,85$ mNHN	Luftseite	0,86<1,0	1,46>1,2	1.2.5
	Ls JANBU	0,69<1,0	1,74>1,0	1.2.6
BS-T.2 Bauzustand $p_v = 248$ kN/m ² **) iteriert (<i>Dammkrone</i>) (Ws $p_v = 278$ kN/m ² it.)	Luftseite	1,00=1,0	1,2 = 1,2	1.2.7
	Wasserseite	1,00=1,0	1,2 = 1,2	1.2.8
BS-T.2 Bauzustand $p_v = 100$ kN/m ² **) iteriert (<i>Berme</i>) (Ws $p_v > 300$ kN/m ² iteriert)	Luftseite	1,00=1,0	1,2 = 1,2	1.2.9
	Wasserseite	1,00=1,0	1,2 = 1,2	1.2.10
BS-A.1 Kennwerte TWB C *) Ls: Z_V Ws: Becken leer	Luftseite	1,02~1,0	1,07~1,1	1.2.11
	Wasserseite	0,96<1,0	1,13>1,1	1.2.12
BS-R.1 Extremeinstau $Z_K = 153,00$ mNHN	Luftseite	0,50<1,0	2,01>1,0	1.2.13
BS-P.3 Extremeinstau Abschieben des Dammes	Luftseite	0,14<1,0	9,43>1,3	1.2.14

*) Kohäsion im Auelehm mit $c=1$ kN/m² statt 0 angesetzt (tatsächlich auch im aufgeweichten Zustand vorhanden)

**) wird maßgebend

Die Nachweise erfolgten nach dem Teilsicherheitskonzept im Grenzzustand GEO 3. Für den Tragsicherheitsnachweis der Böschungen ergeben sich maximale Ausnutzungsgrade μ_{\max} , d. h. der Nachweis ist erfüllt, wenn $\mu \leq 1,0$ gegeben ist. Zusätzlich wird zur Vergleichbarkeit der Sicherheitsbeiwert nach dem Gesamtsicherheitskonzept (globalen Sicherheitskonzept) angegeben.

In den Einstau - Bemessungssituationen wird die wasserseitige Böschung durch den Wasserdruck bzw. durch die Strömungskräfte günstig beeinflusst (Nachweise Anhang 1.2). Deshalb ist die wasserseitige Böschung in den Einstau-BS meist nicht maßgebend → Nachweisführung nur bei Relevanz wie schnelle Stauspiegelabsenkung.

Zusammenfassung

Für den Berechnungsquerschnitt TO16 kann die Böschungsbruchsicherheit mit den Berechnungskennwerten gemäß DIN 19700 [10] und DWA-M 542 [18] in allen Bemessungssituationen nachgewiesen werden.

4.1.4 Gleitsicherheit

Die Gleitsicherheit/das Abschieben des Dammes wurde in der maßgebenden Bemessungssituation BS-P.3 Extremeinstau Z_K mit dem Programm STABILITY (GGU) mit den TSF der BS-P untersucht. Die Berechnung erfolgt auf der sicheren Seite liegend nach JANBU durch Vorgabe maßgebender Gleitlinien.

Der Nachweis erfüllt die Anforderungen mit den TSF der BS-P mit hohen rechnerischen Reserven und liegt damit auf der sicheren Seite und deckt alle weiteren Bemessungssituationen mit ab.

Auch ein Nachweis gegen lokales Abgleiten der ws Böschung konnte in der Bemessungssituation schnelle Stauspiegelaabsenkung BS-P.2(T) sicher erbracht werden.

Die Nachweise sind in Tabelle 3 und Anhang 1.2 enthalten.

4.1.5 Auftrieb/hydraulischer Grundbruch

Die Nachweise gegen Auftrieb und hydraulischen Grundbruch werden üblicherweise für die BS-P.1 Vollstau Z_V am ls Dammfuß bzw. für die BS-A.1 Stauziel Z_V Kennwerte TWB C am ls Dammfuß geführt.

Auf diese Nachweise kann verzichtet werden, da an den Potenzialverteilungen in Anhang 1.1.2 und 1.1.5 erkennbar ist, dass die Situation offensichtlich unkritisch ist.

4.1.6 Spreizsicherheit

Die Spreizsicherheit wird durch den Nachweis des Dammfußdreiecks gegen Grundbruch und Gleiten nachgewiesen.

Die erfüllten Nachweise für die Luft- und die Wasserseite sind in Anhang 1.3 zu entnehmen und in der BS-P und der BS-A beidseitig mit den Sicherheitsbeiwerten nach DIN 1054 [12] erfüllt.

Den berechneten Ausnutzungsgraden von deutlich $<<1$ stehen deutlich über dem Wert 2 liegende Sicherheitsbeiwerte nach dem globalen Sicherheitskonzept gegenüber.

4.1.7 Setzungen/Risssicherheit

Die Setzung des Teilobjektes 16 wurde nach DIN 4019 [5] bzw. TÜRKE [42] berechnet. Der nachgiebige Bereich der Untergrundsichtung wurde mit hinreichender Genauigkeit über die Eingabe der Bodenschichten unter Berücksichtigung der Steifemodulen modelliert.

Für die Setzungsberechnung, wurde der Damm als ein homogener Damm betrachtet und mit einer durchschnittliche Wichte von 20 kN/m^3 angesetzt. Dies entspricht der Wichte des Dammbaumaterials. Für die Berechnung wurden die Bermen als Dammbaumaterial betrachtet, aufgrund des geringen Anteils an den Querschnitt.

Die Berechnungsergebnisse sind in Anhang 1.4 angegeben. Es ist eine maximale Setzung von ca. 30 mm im Bereich der Dammkrone zu erwarten.

4.1.8 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit des Absperrbauwerkes ergibt sich aus einer hinreichenden Suffosions- und Erosionssicherheit und aus einer Beständigkeit der Baustoffe und des Untergrundes gegenüber den chemischen Eigenschaften des Sickerwassers. Dies wurde durch die Auswahl geeigneter Baustoffe erreicht.

Die Suffosions- und Erosionssicherheit wurde im Kapitel 4.1.2 beurteilt.

Die Setzungserwartung beträgt 3 cm, wovon ein größerer Teil als Sofortsetzung abklingen wird.

Eine Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit ist eine hinreichende Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sowie eine regelmäßige Bauwerksüberwachung und Bauwerkswartung – insbesondere nach einem Hochwasserereignis.

4.2 Straßendamm B4 nördlich Gebesee (M10)

4.2.1 Durchströmungsberechnungen

In Anhang 2.1 sind der Berechnungsquerschnitt, das FE-Netz, die Materialeigenschaften (k -Werte, effektives Porenvolumen n_{eff}) sowie die berechneten Potenzialverteilungen ersichtlich. Der ws Dichtungsteppich ersetzt die vorher z.T. vorhandene Lücke im Auelehm und wurde im Modell mit dem Auelehm zusammengefasst.

Instationäre Durchströmungsberechnungen werden nur bei der schnellen Stauspiegelabsenkung durchgeführt, die weiteren Berechnungen werden gemäß DIN 19700 [10] als stationäre Durchströmungsberechnungen geführt.

Für die BS-P.1 wird ein Kronenstau untersucht, welcher noch unterhalb des Stauziels Z_{H1} liegt. Diese Potentialverteilung bildet die Grundlage/den Ausgangspunkt für die instationäre Berechnung der schnellen Stauspiegelsenkung in der BS-P.2.

Die Stauziele Z_{H1} und Z_{H2} werden nicht relevant, da die Gradienten der Straße B4 den Wert Z_{H1} nicht erreicht. Stattdessen wird stellvertretend ein Einstau bordvoll Z_{bv} in der BS-P.1 untersucht.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Durchströmungsberechnungen zusammengestellt. Es werden die jeweils größten hydraulischen Gradienten im Straßendamm und im Auelehm ausgewiesen. Die größten Gradienten treten im Auelehm auf. Die Bewertung erfolgt im Kapitel 4.2.2.

In allen Bemessungssituationen ergeben sich relativ hohe Sickerwassermengen.

Anmerkung

Die Nachweise - außer der Nachweis schnelle Stauspiegelabsenkung - erfolgten unter stationären Bedingungen, die sich erst bei einem Dauerstau einstellen. Damit liegen diese Nachweise auf der sicheren Seite.

Nachstehende Tabelle 4 gibt einen Überblick zu den Ergebnissen der Durchströmungsberechnungen:

Tabelle 4: Ergebnis der Durchströmungsberechnungen Straßendamm B4

BS ^{*)}	Anhang Nr.	Lage Sickerlinie	Gradient $i_{(\text{max})}$ [-]		Sickerwassermenge [l/s je m] Is Graben
			Damm	Auelehm	
BS P.1 (Zv)	2.1.2	zulässig	<0,1	0,2	0,021
BS-P.2 schnelle Absenkung	2.1.3	zulässig	0,1	0,2	0,0
BS-bv.1 (Z_{bv})	2.1.4	zulässig	0,1	0,2	0,053

4.2.2 Suffosions- und Erosionssicherheit

4.2.2.1 Dammbaustoff

Für den bestehenden Straßendamm wird ein gut wasserdurchlässiger Kies angenommen. Der anstehende Baugrund wird über den Baugrundaufschluss BS 49 an der Einmündung der L2165 definiert.

Die geometrische Suffosionssicherheit kann für den Straßendamm (Kies) als erfüllt angesehen werden (geometrisches Kriterium), da die Gradienten in allen BS $i = 0,1$ (hydraulisches Kriterium) betragen, womit nach hydraulischem Kriterium Suffosionssicherheit besteht.

4.2.2.2 Untergrund

Maßgebend für die Suffosionssicherheit des Untergrundes ist der Auelehm, da in diesem die Gradienten am höchsten sind.

Die geometrische Suffosionssicherheit kann für den Auelehm als erfüllt angesehen werden, da der Tonkornanteil $d_{<0,002\text{mm}} > 15\%$ beträgt (Kornverteilungen Lastenheft, s. dort Anhang 4). Die Gradienten werden damit nicht mehr relevant.

Im Aquifer beträgt der Gradient $i_{\text{max}} < 0,1$ womit hier nach hydraulischem Kriterium Suffosionssicherheit besteht.

Der anstehende Keuper ist grundsätzlich suffosionssicher, da es sich um einen festen bzw. bindig verwitterten ($d_{<0,002\text{mm}} > 15\%$ - Anhang 9 Lastenheft [24]) Gesteinsverband handelt.

4.2.2.3 Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch

Die Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch wird nach CHUGAEV [42] nachgewiesen. Für den durchschnittlichen Gradienten i_k über die Strecke L (Dammbreite in der Aufstandsfläche ohne Berme) gilt:

$i_k = H_W / L < i_{\text{zul}}$	mit	schluffiger Ton	$i_{\text{zul}} = 0,20 \dots 0,26;$
		Mittelsand	$i_{\text{zul}} = 0,15 \dots 0,20$ und
		Grobsand, Kies	$i_{\text{zul}} = 0,25 \dots 0,33.$

Dabei ist H_W die Einstauhöhe. Durch Einsetzen ergibt sich bei Z_{bv} (hier größte Potenzialdifferenz):

$$i_k = 2,0 \text{ m} / 21 \text{ m} = 0,10 \Rightarrow \text{Nachweis erfüllt !}$$

(Es wird davon ausgegangen, dass sich mit dem w_s Einstau fast zeitgleich der l_s Straßengraben mit Wasser füllt.)

Auf einen Nachweis gegen Fugenerosion kann verzichtet werden, da die Konstellation bindiger Damm auf durchlässigem Untergrund nicht besteht.

4.2.2.4 Sicherheit gegen Kontakterosion

Die Dammaufstandsfläche mit Kies über Auelehm ist potenziell kritisch nach geometrischem Kriterium. Da jedoch die Gradienten im Damm mit $i = 0,1$ hinreichend klein sind nach hydraulischem Kriterium (-> keine maßgebende hydraulische Belastung) und der der Auelehm kohäsiv ist, kann es nicht zu einer Kontakterosion kommen.

4.2.3 Böschungsbruchsicherheit

In die Böschungsbruchberechnungen wurde der jeweils zugehörige Potenzialzustand entsprechend Tabelle 5 eingeführt.

In Anhang 2.2 sind der Berechnungsquerschnitt, das Berechnungsmodell sowie die EDV-Ausdrucke der ausgeführten Berechnungen enthalten. Den EDV-Ausdrucken können die entsprechend der zugehörigen Tragwiderstandsbedingung (TWB) angesetzten Bodenkennwerte entnommen werden.

In Anhang 2.2 sind die Ergebnisse der Böschungsbruchberechnungen für den Berechnungsquerschnitt Straßendamm B4 zusammengefasst. Es wird für jede Bemessungssituation die ungünstigste Gleitfläche bestimmt.

Tabelle 5: Ergebnisse Gleit- und Böschungsbruchsicherheit Straßendamm B4

Bemessungssituation Beschreibung	Böschung	Ergebnis		Anhang
		TSK	GSK	
		μ_{\max}	η_{\min}	
BS-P.1 Stauziel $Z_v = 150,81$ mNHN	Luftseite	0,85<1,0	1,56>1,3	2.2.1
	Ls JANBU	0,36<1,0	3,48>1,3	2.2.2
BS-P.2 schnellste Stauspiegelabsenkung instationär Abstau 42,9 h	Wasserseite	0,62<1,0	2,04>1,3	2.2.3
	Ws JANBU	0,36<1,0	3,48>1,3	2.2.4
BS-P.3 Abschieben des Dammes bei Einstau bordvol	Luftseite	0,20<1,0	3,82>1,3	2.2.5
BS-bv.1 (P) Stauziel $Z_{bv} = 151,53$ mNHN	Luftseite	0,83<1,0	1,50>1,3	2.2.6
BS-T.2 Bauzustand $p_v = 136$ kN/m ² *) iteriert (Ws: $p_v = 260$ kN/m ² iteriert)	Luftseite	1,00=1,0	1,2 = 1,2	2.2.7
	Wasserseite	1,00=1,0	1,2 = 1,2	2.2.8ab

*) wird maßgebend

Die Nachweise erfolgten nach dem Teilsicherheitskonzept im Grenzzustand GEO 3. Für den Tragsicherheitsnachweis der Böschungen ergeben sich maximale Ausnutzungsgrade μ_{\max} , d. h. der Nachweis ist erfüllt, wenn $\mu \leq 1,0$ gegeben ist. Zusätzlich wird zur Vergleichbarkeit der Sicherheitsbeiwert nach dem Gesamtsicherheitskonzept (globalen Sicherheitskonzept) angegeben.

In den Einstau - Bemessungssituationen wird die wasserseitige Böschung durch den Wasserdruck bzw. durch die Strömungskräfte günstig beeinflusst (Auftrieb auf der Luftseite unkritisch, Nachweise Anhang 2.2). Deshalb ist die wasserseitige Böschung in den Einstau-BS meist nicht maßgebend → Nachweisführung nur bei Relevanz wie schnelle Stauspiegelabsenkung.

Zusammenfassung

Für den Berechnungsquerschnitt M10 (Straßendamm B4) kann die Böschungsbruchsicherheit mit den Berechnungskennwerten gemäß DIN 19700 [10] und DWA-M 542 [18] in allen Bemessungssituationen nachgewiesen werden.

Ist ein Einstau des Straßendamms zu erwarten, ist ab Einstaubeginn die Straße B4 vorübergehend zu sperren. Bei einem kurzzeitigen Einstau bleibt die Böschungsbruchsicherheit des Straßendamms erhalten; dauert dieser Einstau > 1 Tag an, so kann es über mehrere Tage zu einem nachhaltig kritischen Aufweichen des Untergrundes mit einer erwarteten Konsistenz von bis zu breiig ($I_c < 0,5$) kommen. Es kommt dann im Zuge des Wiederbefahrens zu Setzungen. Bei trockener Witterung kommt es zu einer Wiederkonsolidierung des bindigen Untergrundes.

4.2.4 Gleitsicherheit

Die Gleitsicherheit/das Abschieben des Dammes wurde in der maßgebenden Bemessungssituation BS-P.3 Einstau bordvoll Z_{bv} mit dem Programm STABILITY (GGU) mit den TSF der BS-P untersucht. Die Berechnung erfolgt auf der sicheren Seite liegend nach JANBU durch Vorgabe maßgebender Gleitlinien.

Der Nachweis erfüllt die Anforderungen mit den TSF der BS-P mit hohen rechnerischen Reserven und liegt damit auf der sicheren Seite und deckt alle weiteren Bemessungssituationen mit ab.

Auch ein Nachweis gegen lokales Abgleiten der ws Böschung konnte in der Bemessungssituation schnelle Stauspiegelabsenkung BS-P.2 sicher erbracht werden.

Die Nachweise sind in Tabelle 5 und Anhang 2.2 enthalten.

4.2.5 Auftrieb/hydraulischer Grundbruch

Die Nachweise gegen Auftrieb und hydraulischen Grundbruch werden für die BS-P.1 Vollstau Z_v am Is Dammfuß, für die BS-A.1 Stauziel Z_v Kennwerte TWB C in der Is Grabensohle geführt.

Die Nachweise sind in Anhang 2.4 dokumentiert.

Die Nachweise sind für die BS-P.1 Z_v mit $\mu = 0,892$ bzw. $0,314 < 1$ erbracht (Anhang 2.4.1).

Die Nachweise für die BS-A.1 Kennwerte TWB C sind mit $\mu = 0,913$ bzw. $0,361 < 1$ erbracht (Anhang 2.4.2).

In den EDV-Ausdrucken in Anhang 2.4 sind den berechneten Ausnutzungsgraden auch die teils deutlich über dem Wert 1 liegenden Sicherheitsbeiwerte nach dem globalen Sicherheitskonzept gegenübergestellt.

4.2.6 Spreizsicherheit

Die Spreizsicherheit wird durch den Nachweis des Dammfußdreiecks gegen Grundbruch und Gleiten nachgewiesen.

Die erfüllten Nachweise für die Luft- und die Wasserseite sind in Anhang 2.3 zu entnehmen und in der BS-P beidseitig mit den Sicherheitsbeiwerten nach DIN 1054 [12] erfüllt.

Den berechneten Ausnutzungsgraden von deutlich $<<1$ stehen zugleich über dem Wert 1,7 liegende Sicherheitsbeiwerte nach dem globalen Sicherheitskonzept gegenüber.

4.2.7 Setzungen/Risssicherheit

Auf eine Setzungsberechnung wird verzichtet, da die Dammsetzungen **nach mehreren Jahrzehnten Nutzungsdauer** weitgehend abgeklungen sind.

4.2.8 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit des Straßendamms ergibt sich aus einer hinreichenden Suffosions- und Erosionssicherheit und aus einer Beständigkeit der Baustoffe und des Untergrundes gegenüber den chemischen Eigenschaften des Sickerwassers.

Die Suffosions- und Erosionssicherheit wurde im Kapitel 4.2.2 beurteilt.

Die Dammsetzungen sind nach einigen Jahrzehnten Nutzungsdauer weitgehend abgeklungen.

Eine Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit ist eine hinreichende Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sowie eine regelmäßige Bauwerksüberwachung und Bauwerkswartung – insbesondere nach einem Hochwasserereignis.

5 Zusammenfassung

Für den Teil D des Projektes waren für die Erdbauwerke von Teilobjekt 16 und Maßnahme 10 (M10) die Böschungsbruchsicherheit und Gebrauchstauglichkeit einschließlich der entsprechenden Durchströmungsberechnungen nachzuweisen.

Die Tragsicherheiten, die Gleit- und die Spreizsicherheit der Dämme, die Grundbruchsicherheit sowie Gebrauchstauglichkeit sind normgerecht nachgewiesen.

Die hydraulischen Sicherheitskriterien (Lage Sickerlinie, Sickerwassermenge, Auftriebssicherheit, Erosions- und Suffosionssicherheit) können in allen Berechnungslastfällen nachgewiesen werden.

Die Stauraumhänge werden als ausreichend standsicher beurteilt (vgl. die diesbezüglichen Ausführungen im Lastenheft).

Der Nachweis Kronenstau war für den Straßendamm B4 (M10) ersatzweise wegen des niedrigen Höhengniveaus von $Z_{bv} < Z_{H1}$ mit den TSF der BS-P zu führen – EC-7 kein Kronenstau definiert.

Auf Setzungsberechnungen von M10 konnte verzichtet werden, da nach mehreren Jahrzehnten Nutzungsdauer die Setzungen weitgehend abgeklungen sind. Die Setzungsberechnung für TO 16 liefert im Ergebnis erwartete Werte von 1 cm Setzung je 1 m Dammhöhe (entspricht max. 4 cm Gesamtsetzung der Dammkrone bei 3,6 m Gesamtdammhöhe), wobei ein überwiegender Teil davon als Sofortsetzung abklingen wird.

Für einen Bauzustand mit erhöhten Lasten wurde iterativ berechnet, bis zu welcher Verkehrslast, bei einem definierten Abstand von der Böschungsschulter und einer Breite eines Raupenfahrwerks mit 0,5 m, die Dammkrone bei einem Ausnutzungsgrad von $\mu = 1,0$ belastet werden kann. Hier ergibt sich eine Belastbarkeit mit $p_v = 136 \text{ kN/m}^2$ für den Straßendamm und $p_v = 100 \text{ kN/m}^2$ für den Damm TO16 in der ungünstigsten Situation/BS.

Die Sicherheit gegen Kontakterosion zwischen bindigen und nicht bindigen Baustoffen ist nach geometrischem Kriterium nicht immer gegeben – hier gibt es aber keine kritische hydraulische Belastung, da die Gradienten max. $i = 0,1$ betragen.

Für den Aquifer Unstrutschotter wurde die geometrische Suffosionssicherheit im Projektteil C nach WAPRO 4.04 nachgewiesen. Zudem bestehen hier niedrige hydraulischer Gradienten von $i_{\max} = 0,1$, was keine kritische hydraulische Belastung bedeutet.

Das homogene Dammmaterial TO 16 und der anstehende Auelehm/Keupermergel sind suffosionssicher, da mit einem Kornanteil $d_{<0,002\text{mm}} \geq 15\%$ die Suffosionssicherheit immer gegeben ist. Im Damm TO16 treten maximale Gradienten von bis zu $i = 1,2$ auf, die nach STRIEGLER [41] im zulässigen Bereich von Dämmen und Dichtungen ($i = 1 \dots 5$; < 1 immer unkritisch) liegen. Im Damm M10 treten maximale Gradienten $i(\max) = 0,1$ auf. Das ist nach hydraulischem Kriterium suffosionssicher, da der zulässige Gradient nach Bild 8/DIN 190712:1997 $i_{Gr} > 0,2$ beträgt.

Auf eine Untersuchung des bindigen Dammes auf „Leckage in der Dichtung“ wird wegen der großräumigen Ausdehnung der „Dichtung“ verzichtet.

Die gemäß Lastenheft [24] bzw. dem geotechnischen Bericht [47] zugrundeliegenden Kennwerte sind (sehr) konservativ angesetzt – bindige Böden haben auch in der TWB C immer noch eine Kohäsion von $c > 0$.

Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit ist eine regelmäßige Bauüberwachung und Wartung der Bauwerke erforderlich.









Anhang 1

Querschnitt Schutzdamm Schwerstedt (TO16)

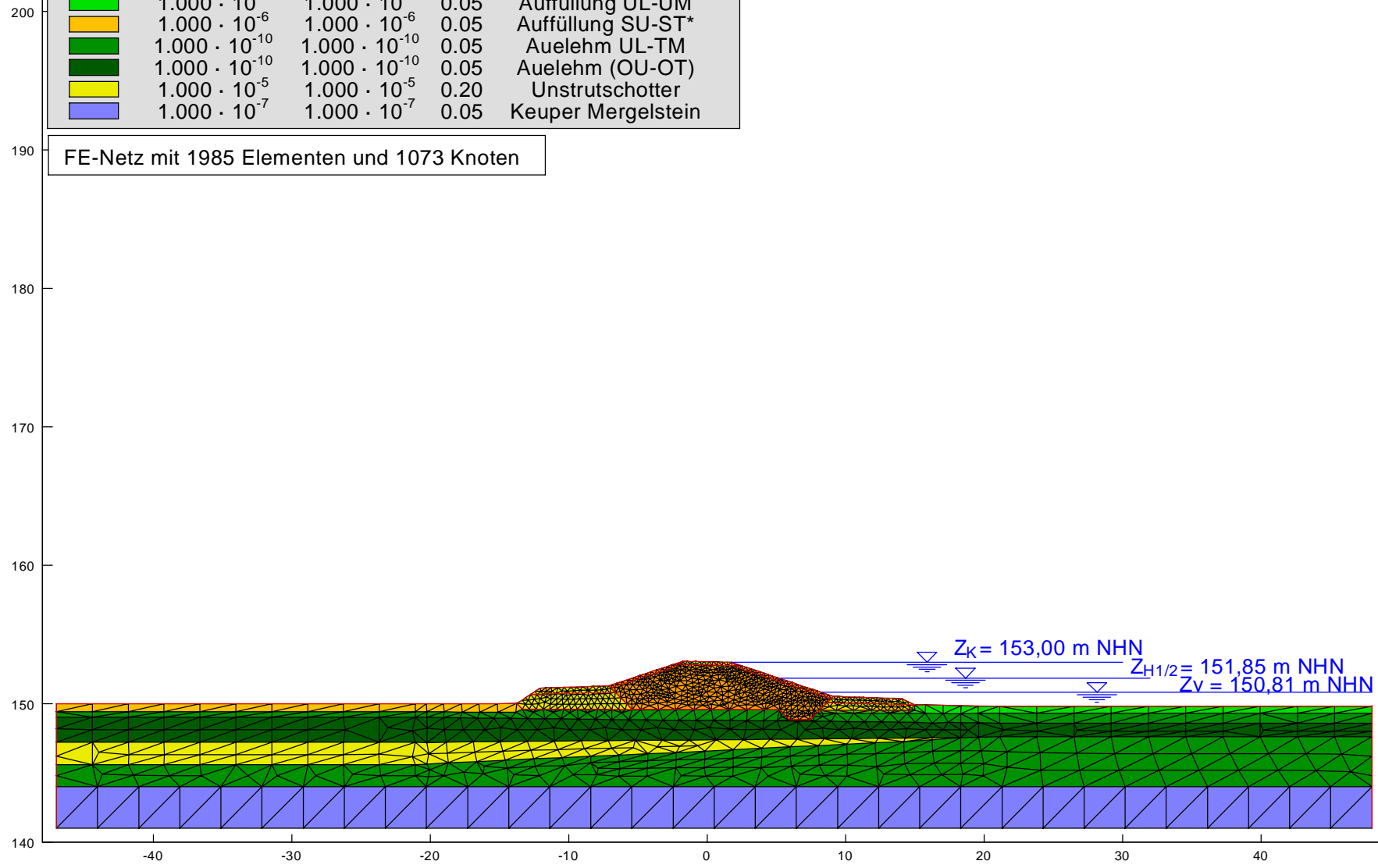
- 1.1 Durchströmungsberechnungen
- 1.2 Berechnungen Böschungsbruchsicherheit
- 1.3 Spreizsicherheit
- 1.4 Setzungsberechnung

Berechnungsquerschnitt TO16









vernetztes Modell

Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$2.000 \cdot 10^{-4}$	$2.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Wege/Berme GI-GW
	$1.000 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-8}$	0.05	Damm TL-TM(ST*)
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Auffüllung UL-UM
	$1.000 \cdot 10^{-6}$	$1.000 \cdot 10^{-6}$	0.05	Auffüllung SU-ST*
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm (OU-OT)
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keuper Mergelstein

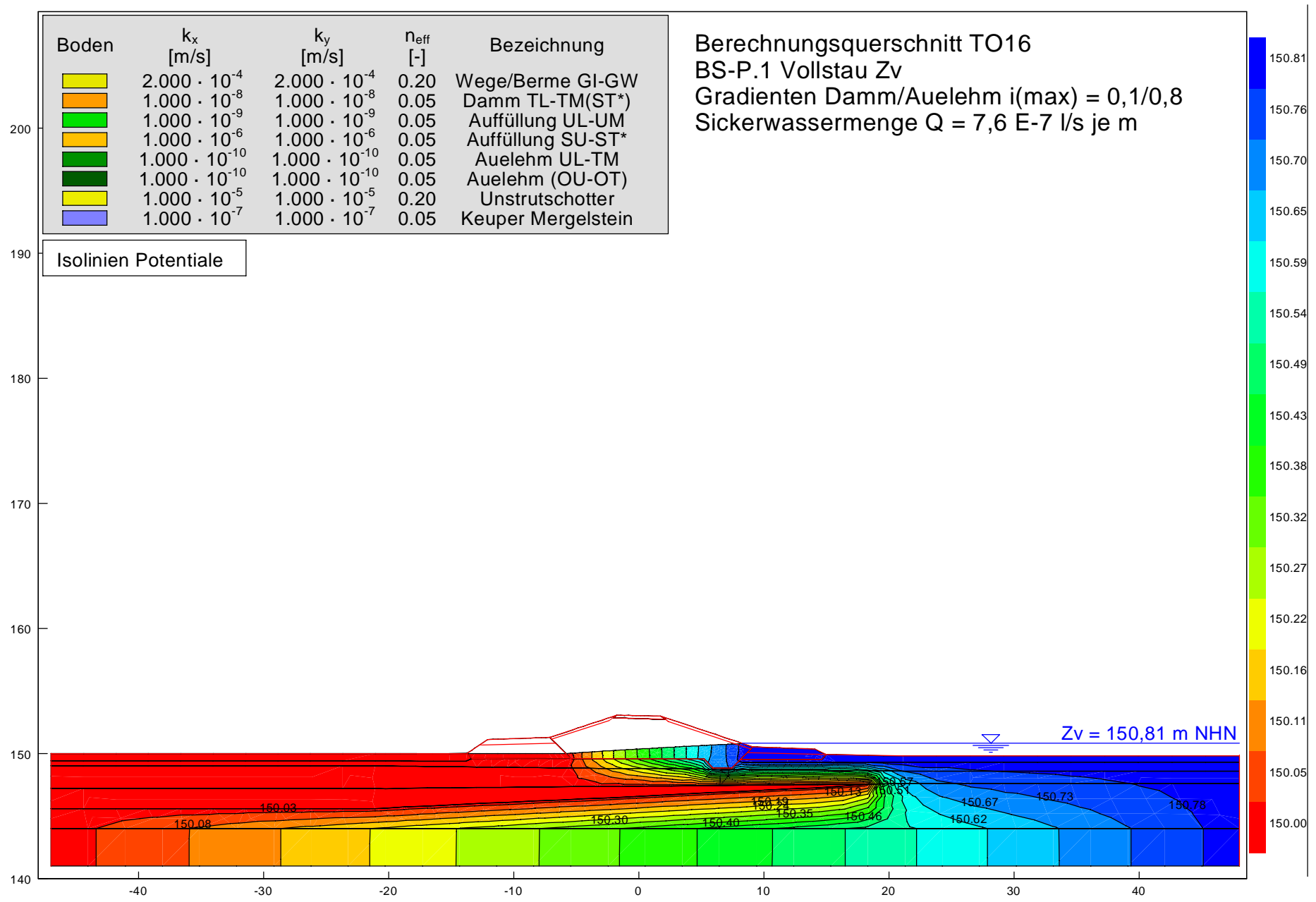
FE-Netz mit 1985 Elementen und 1073 Knoten



Berechnungsquerschnitt TO16
BS-P.1 Vollstau Z_v
Gradienten Damm/Auelehm $i(\max) = 0,1/0,8$
Sickerwassermenge $Q = 7,6 \text{ E-7 l/s je m}$

Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$2.000 \cdot 10^{-4}$	$2.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Wege/Berme GI-GW
	$1.000 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-8}$	0.05	Damm TL-TM(ST*)
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Auffüllung UL-UM
	$1.000 \cdot 10^{-6}$	$1.000 \cdot 10^{-6}$	0.05	Auffüllung SU-ST*
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm (OU-OT)
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keuper Mergelstein

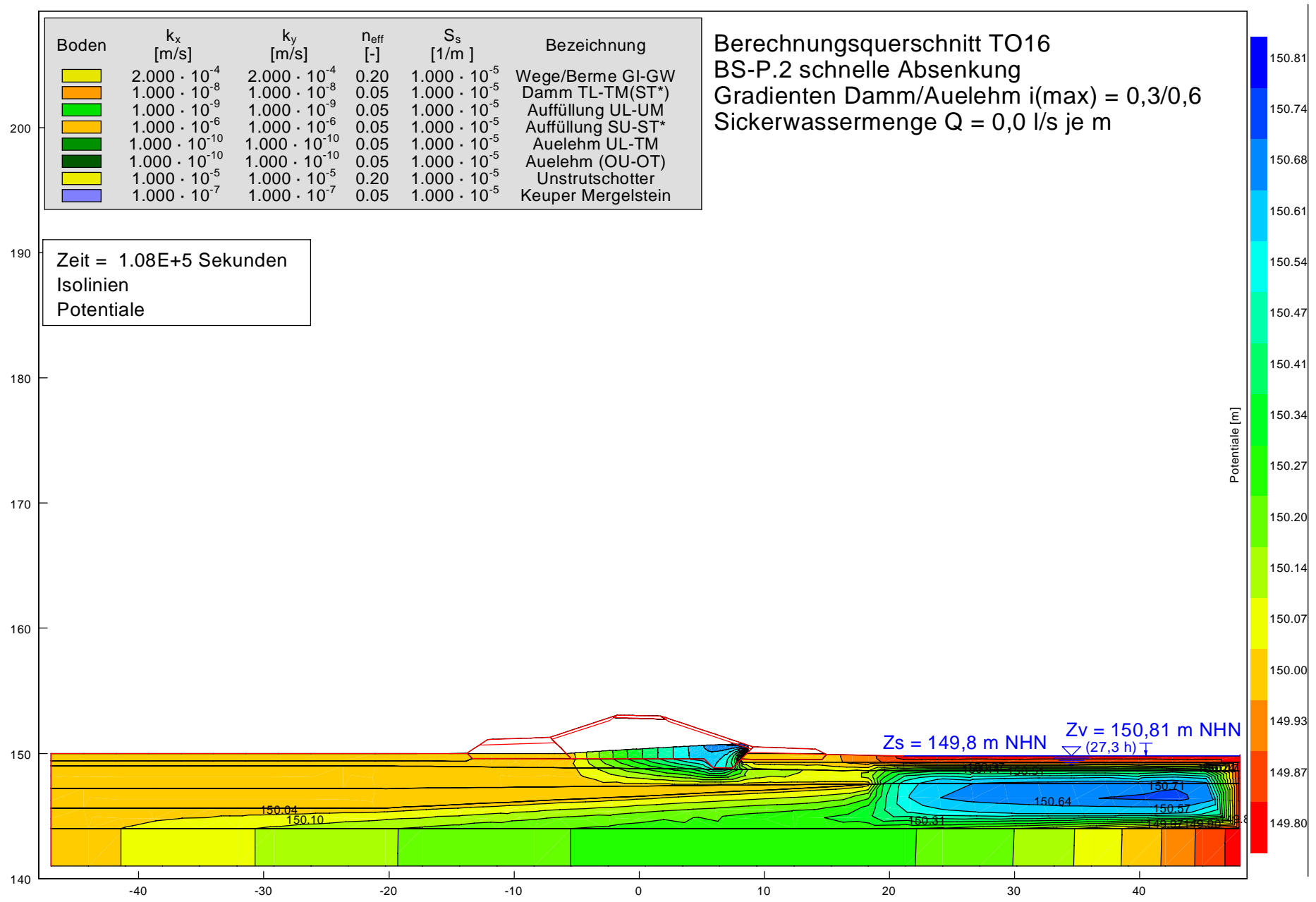
Isolinien Potentiale











Berechnungsquerschnitt TO16
BS-P.2 schnelle Absenkung
Gradienten Damm/Auelehm $i(\max) = 0,3/0,6$
Sickerwassermenge $Q = 0,0 \text{ l/s je m}$

Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	S_s [1/m]	Bezeichnung
	$2.000 \cdot 10^{-4}$	$2.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Wege/Berme GI-GW
	$1.000 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-8}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Damm TL-TM(ST*)
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Auffüllung UL-UM
	$1.000 \cdot 10^{-6}$	$1.000 \cdot 10^{-6}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Auffüllung SU-ST*
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Auelehm (OU-OT)
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Keuper Mergelstein

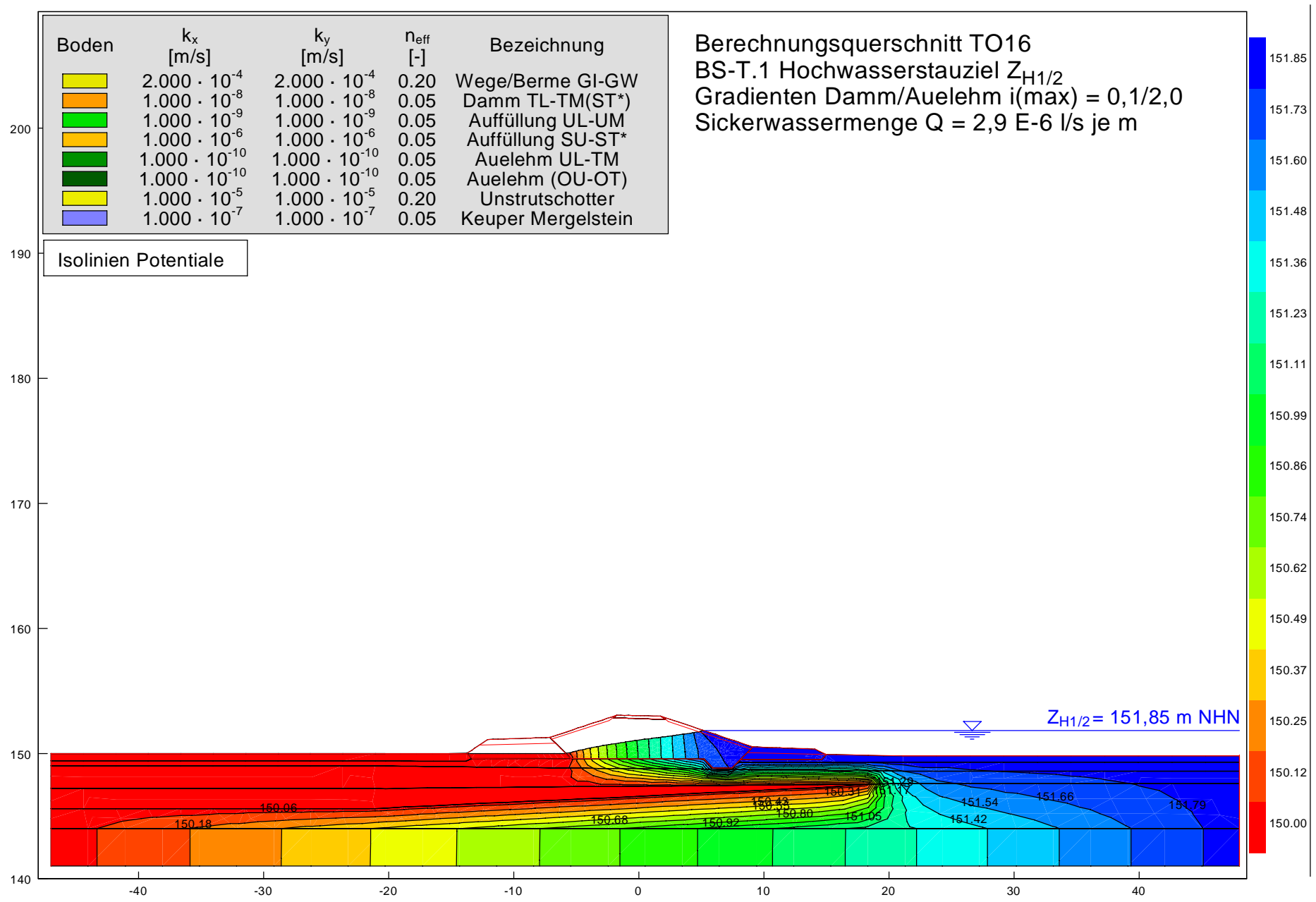
Zeit = $1.08\text{E}+5$ Sekunden
Isolinien
Potentiale











Berechnungsquerschnitt TO16
BS-T.1 Hochwasserstauziel $Z_{H1/2}$
Gradienten Damm/Auelehm $i(\max) = 0,1/2,0$
Sickerwassermenge $Q = 2,9 \text{ E-6 l/s je m}$

Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$2.000 \cdot 10^{-4}$	$2.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Wege/Berme GI-GW
	$1.000 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-8}$	0.05	Damm TL-TM(ST*)
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Auffüllung UL-UM
	$1.000 \cdot 10^{-6}$	$1.000 \cdot 10^{-6}$	0.05	Auffüllung SU-ST*
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm (OU-OT)
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keuper Mergelstein

Isolinien Potentiale

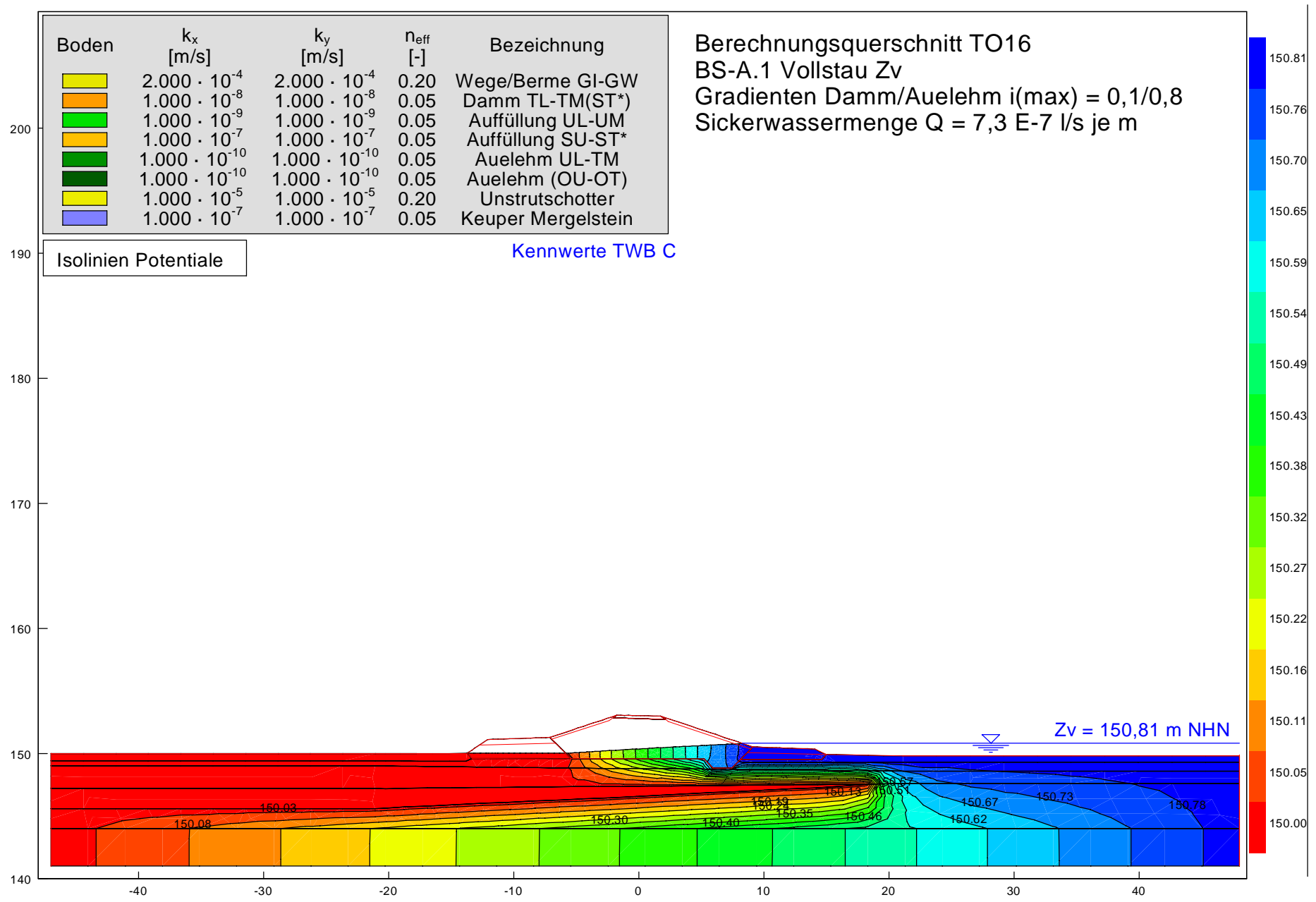


Berechnungsquerschnitt TO16
BS-A.1 Vollstau Z_v
Gradienten Damm/Auelehm $i(\max) = 0,1/0,8$
Sickerwassermenge $Q = 7,3 \text{ E-7 l/s je m}$









Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$2.000 \cdot 10^{-4}$	$2.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Wege/Berne GI-GW
	$1.000 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-8}$	0.05	Damm TL-TM(ST*)
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Auffüllung UL-UM
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Auffüllung SU-ST*
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm (OU-OT)
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keuper Mergelstein

Isolinien Potentiale

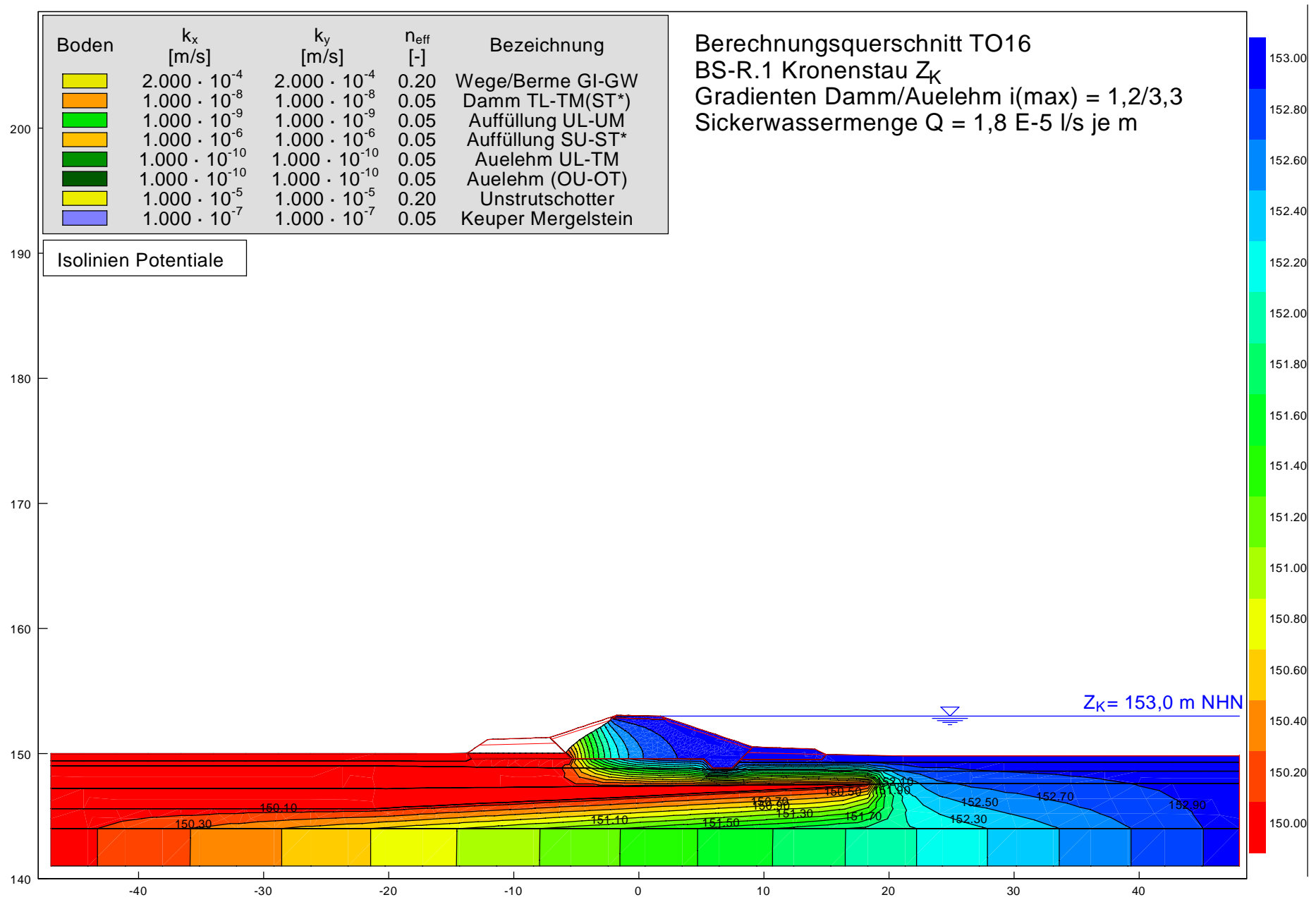
Kennwerte TWB C

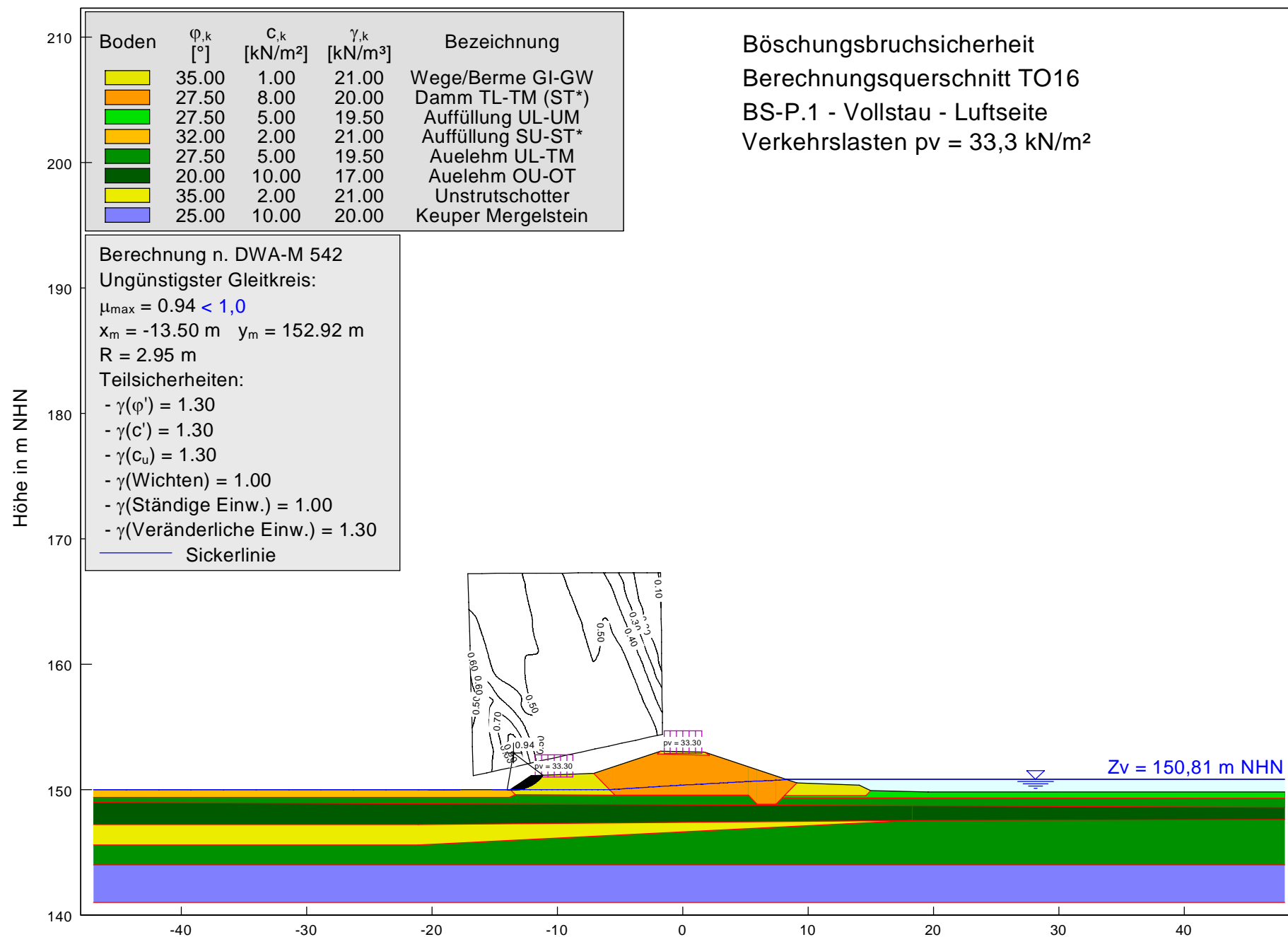


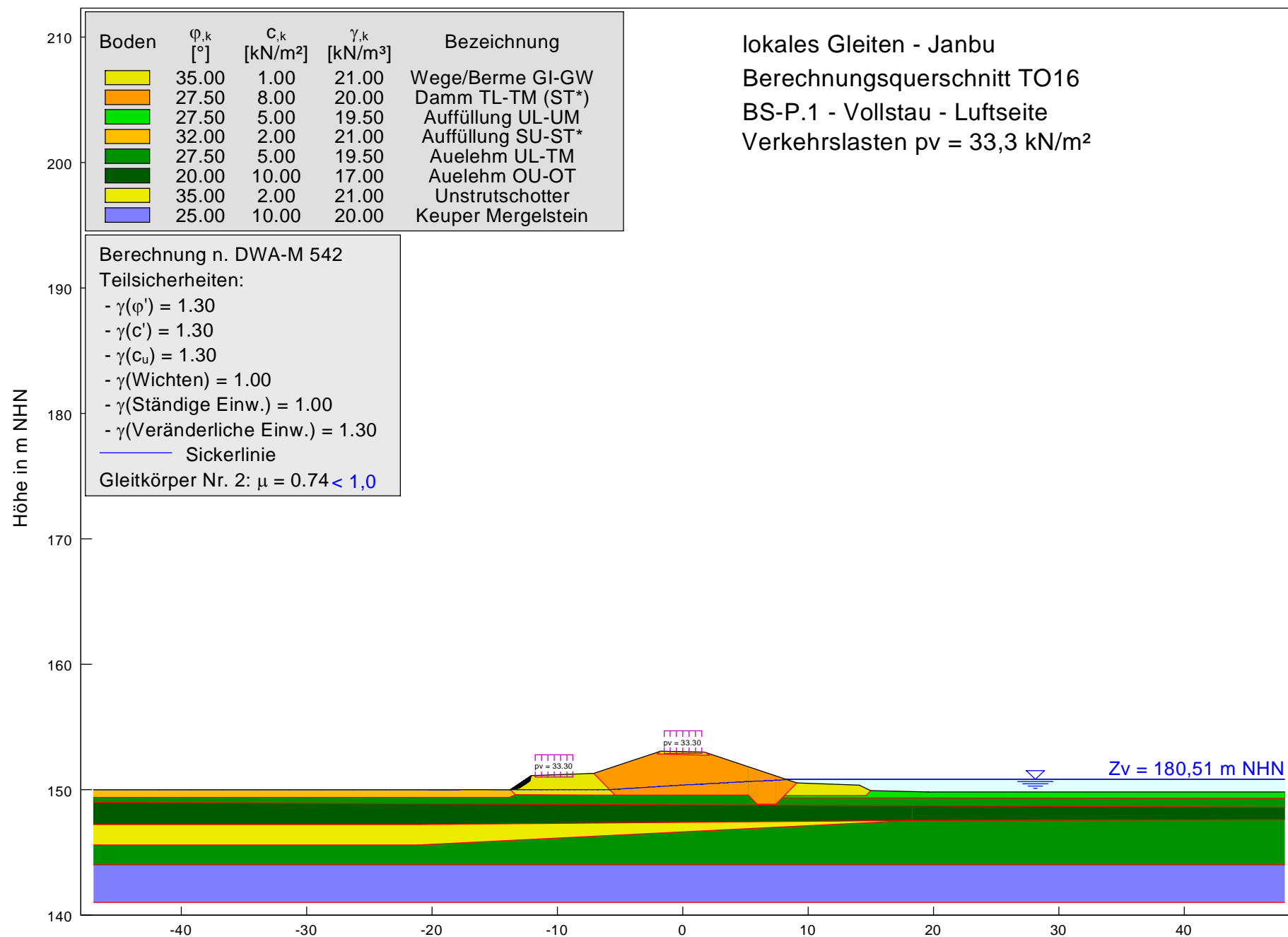
Berechnungsquerschnitt TO16
BS-R.1 Kronenstau Z_K
Gradienten Damm/Auelehm $i(\max) = 1,2/3,3$
Sickerwassermenge $Q = 1,8 \text{ E-}5 \text{ l/s je m}$

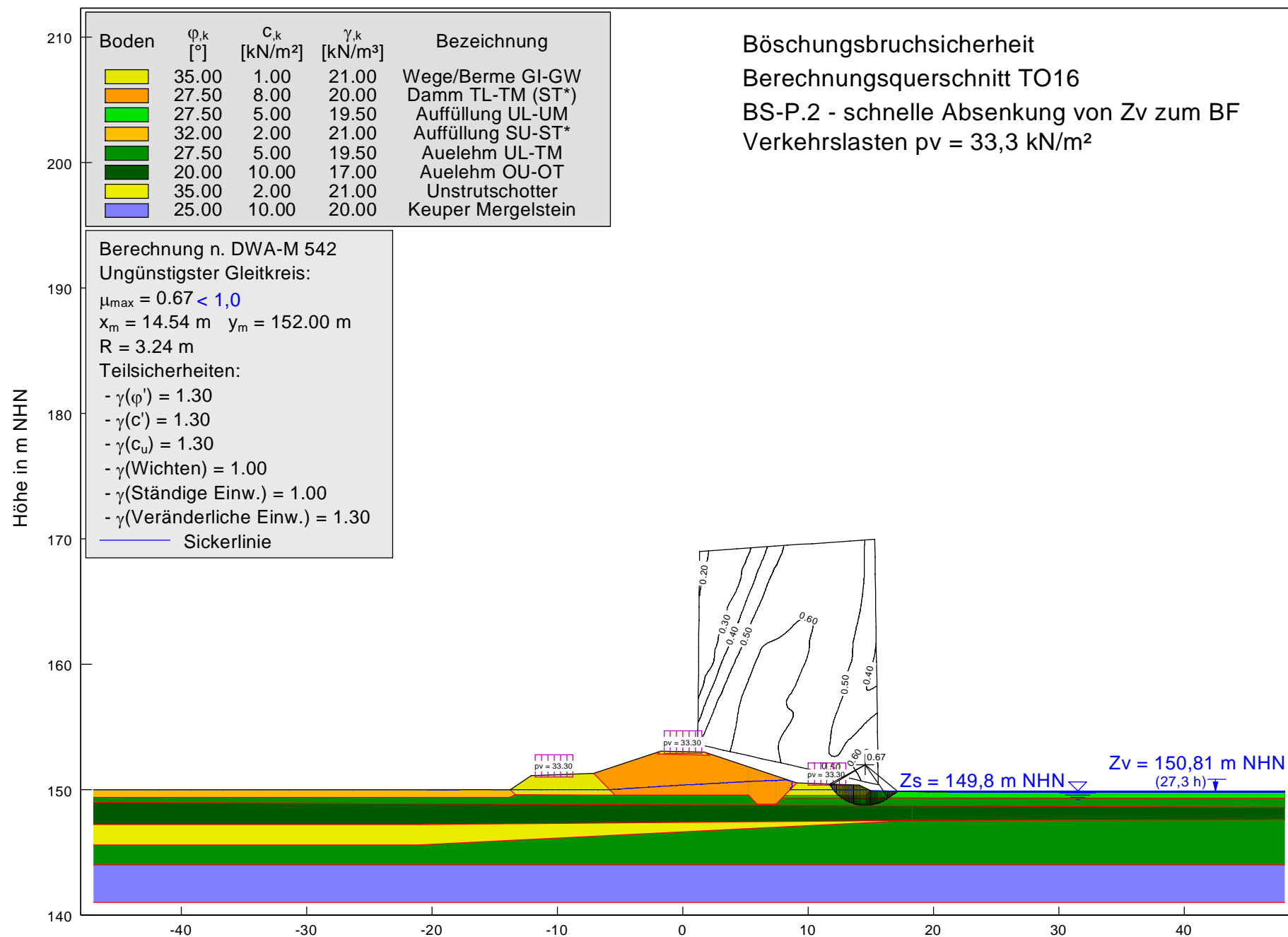
Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$2.000 \cdot 10^{-4}$	$2.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Wege/Berme GI-GW
	$1.000 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-8}$	0.05	Damm TL-TM(ST*)
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Auffüllung UL-UM
	$1.000 \cdot 10^{-6}$	$1.000 \cdot 10^{-6}$	0.05	Auffüllung SU-ST*
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm (OU-OT)
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keuper Mergelstein

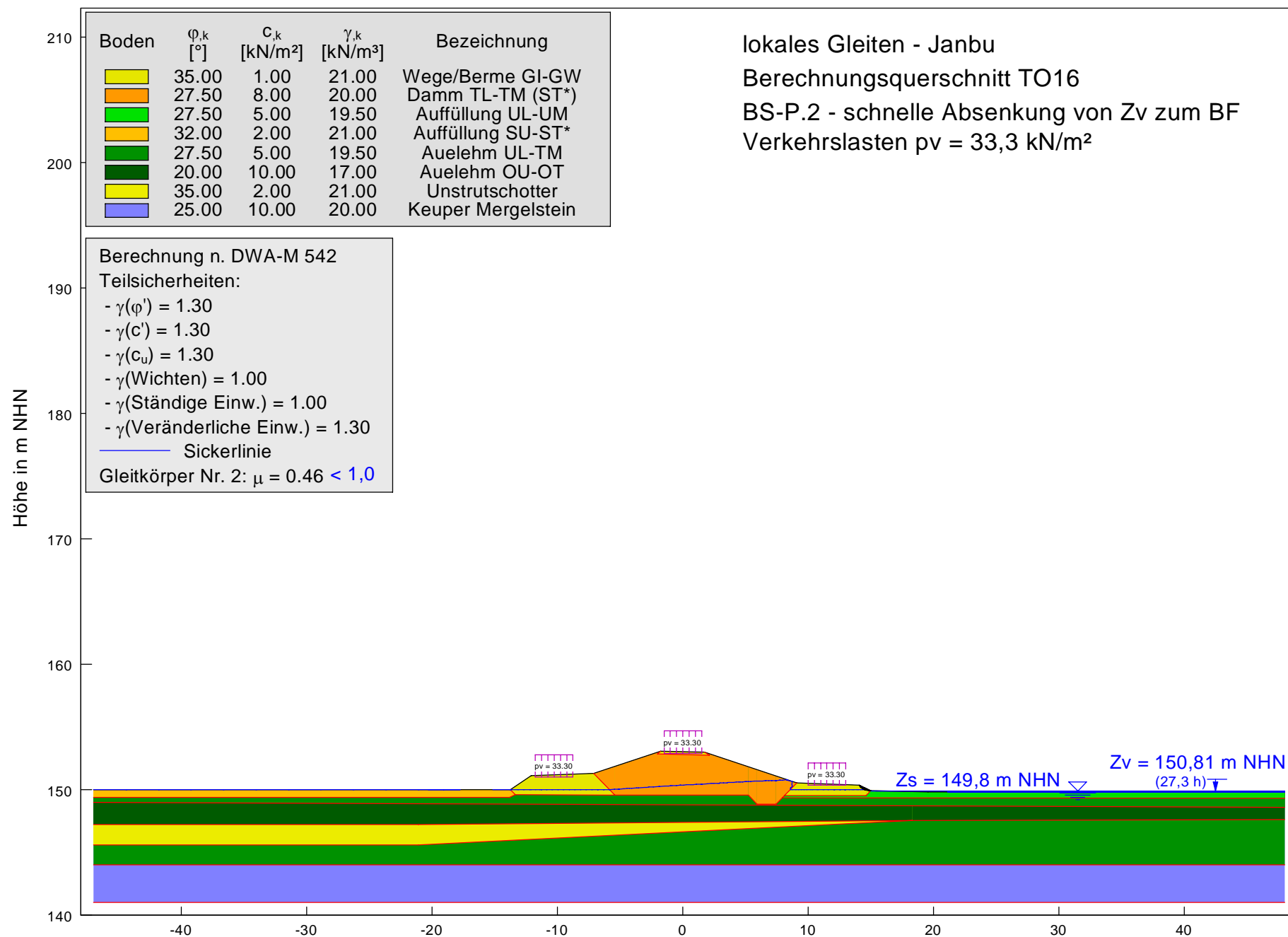
Isolinien Potentiale





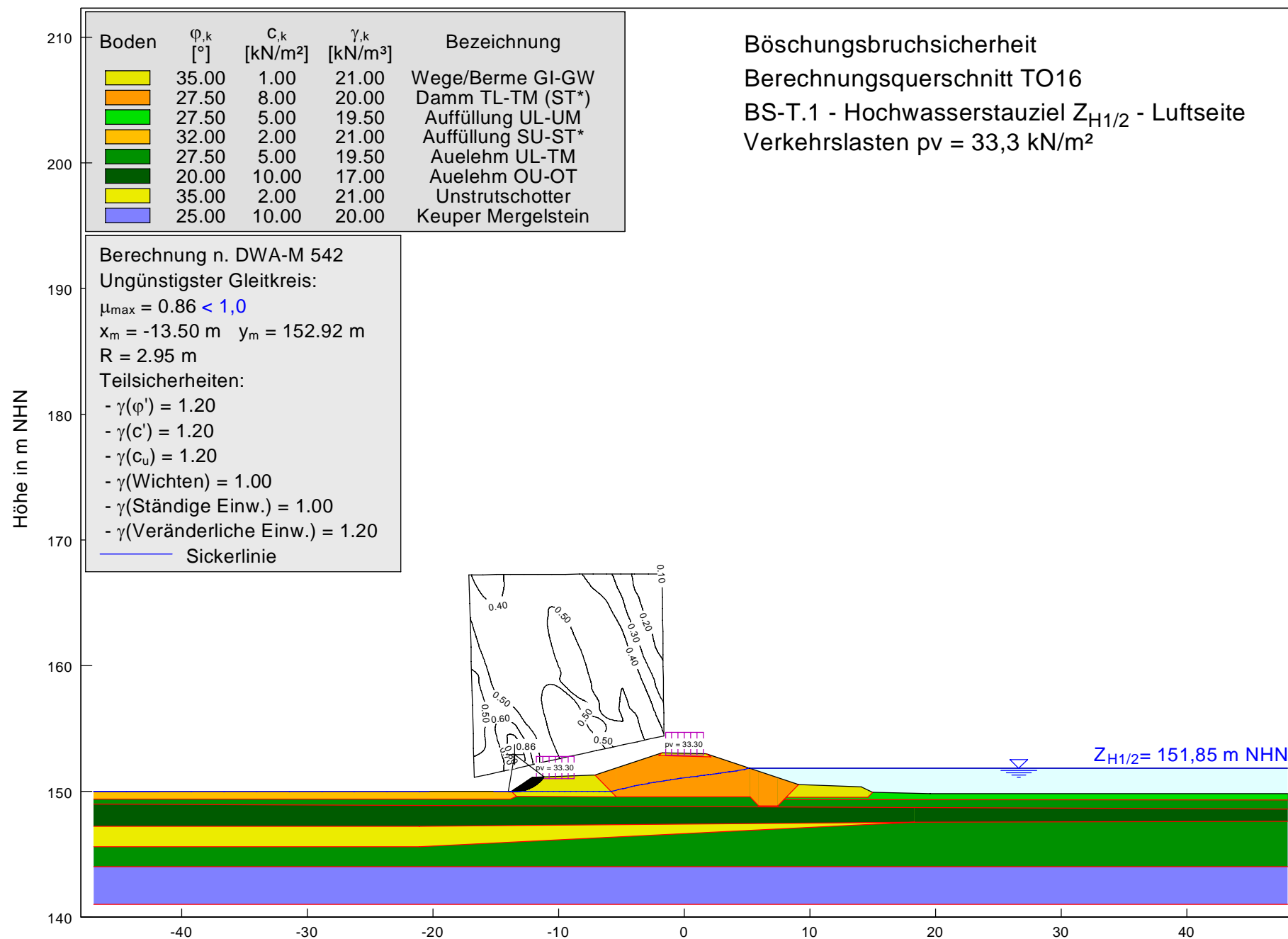


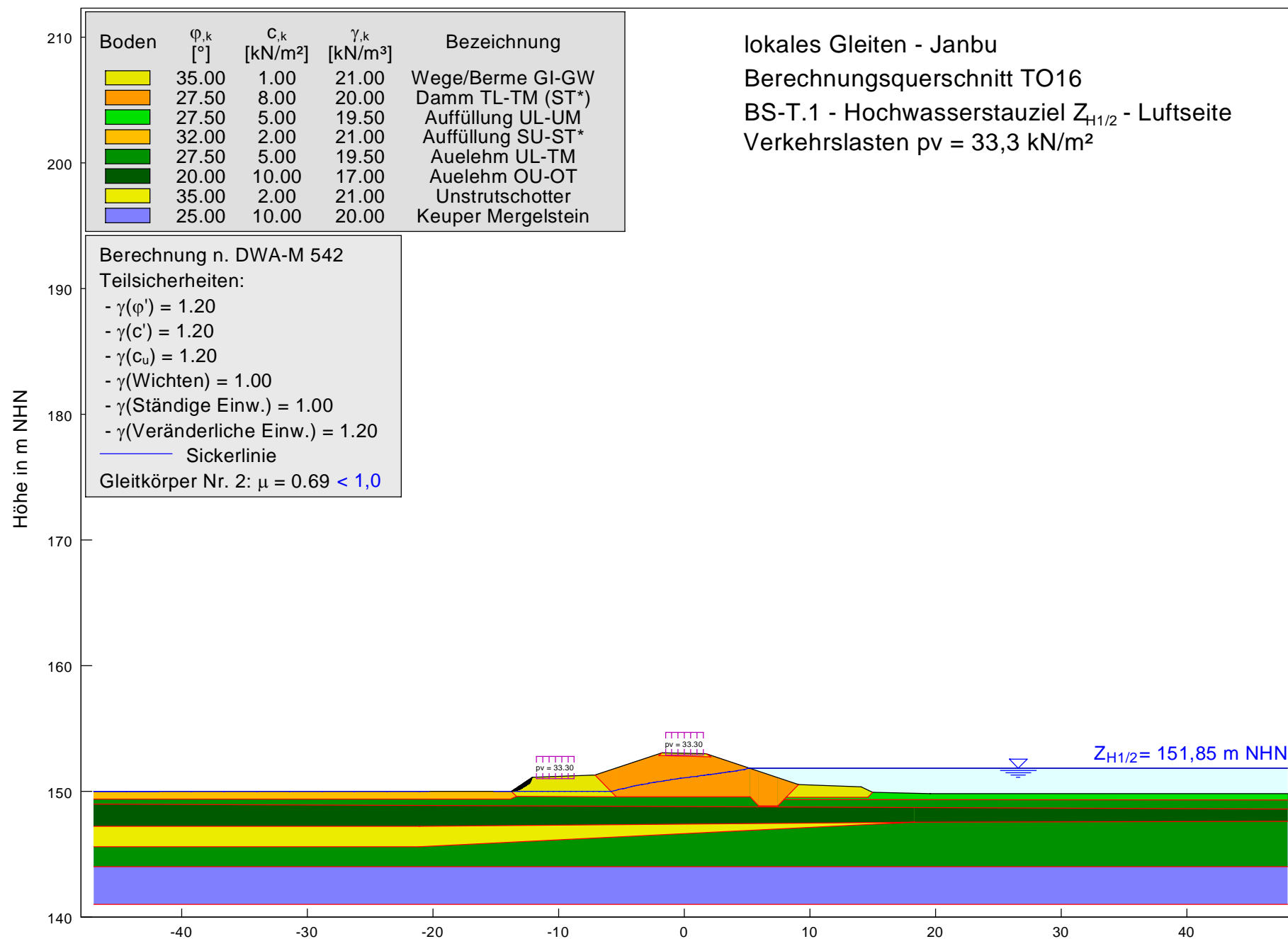




Böschungsbruchsicherheit

Berechnungsquerschnitt TO16

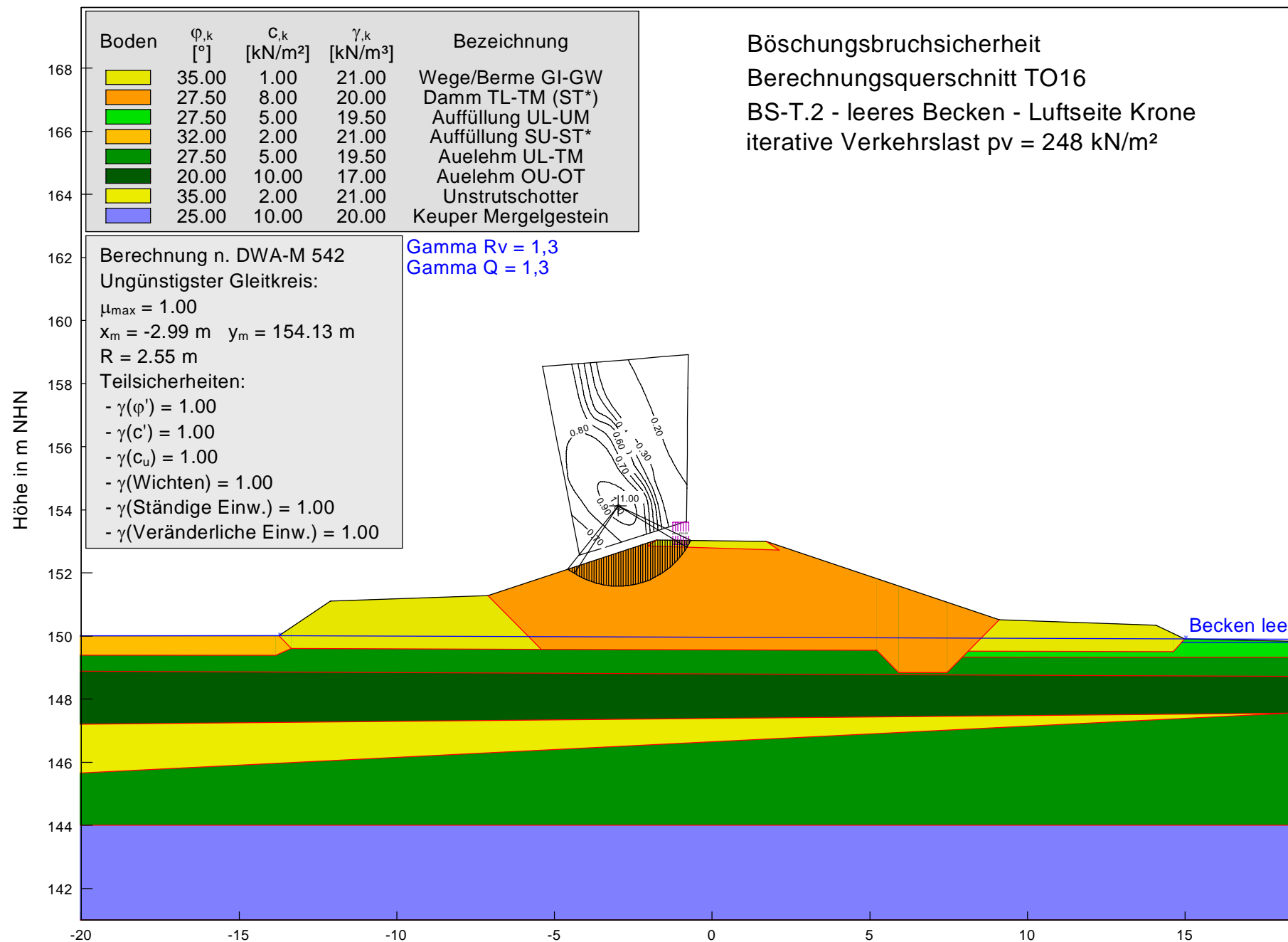
BS-T.1 - Hochwasserstauziel $Z_{H1/2}$ - LuftseiteVerkehrslasten $p_v = 33,3 \text{ kN/m}^2$ 



Böschungsbruchsicherheit

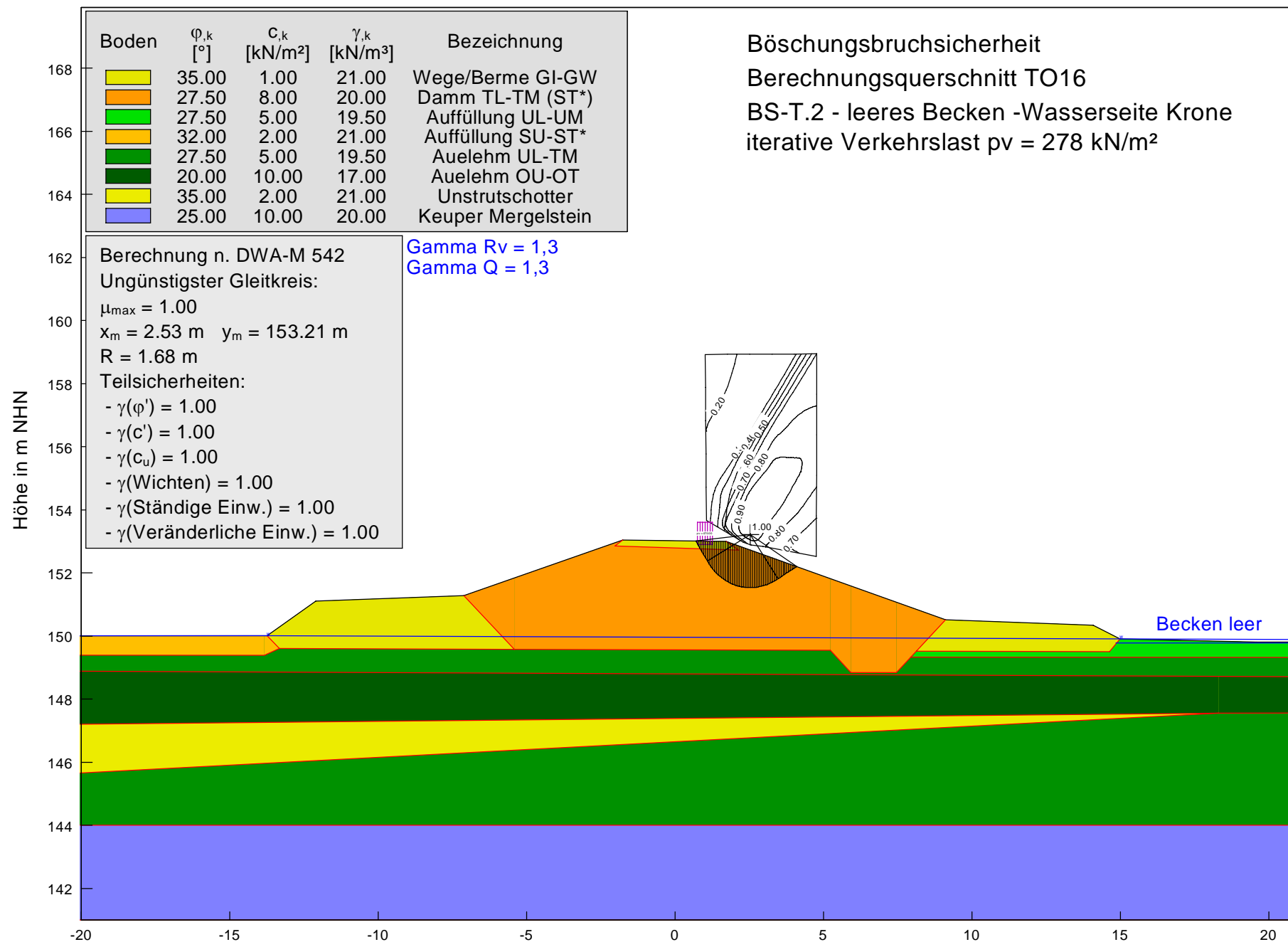
Berechnungsquerschnitt TO16

BS-T.2 - leeres Becken - Luftseite Krone

iterative Verkehrslast $p_v = 248 \text{ kN/m}^2$ 

Böschungsbruchsicherheit

Berechnungsquerschnitt TO16

BS-T.2 - leeres Becken -Wasserseite Krone
iterative Verkehrslast $p_v = 278 \text{ kN/m}^2$ 

Böschungsbruchsicherheit

Berechnungsquerschnitt TO16

BS-T.2 - leeres Becken - Luftseite Berme

iterative Verkehrslast $p_v = 100 \text{ kN/m}^2$

Berechnung n. DWA-M 542

Ungünstigster Gleitkreis:

$$\mu_{\max} = 1.00$$

$$x_m = -13.47 \text{ m} \quad y_m = 152.98 \text{ m}$$

$$R = 2.91 \text{ m}$$

Teilsicherheiten:

$$- \gamma(\varphi') = 1.00$$

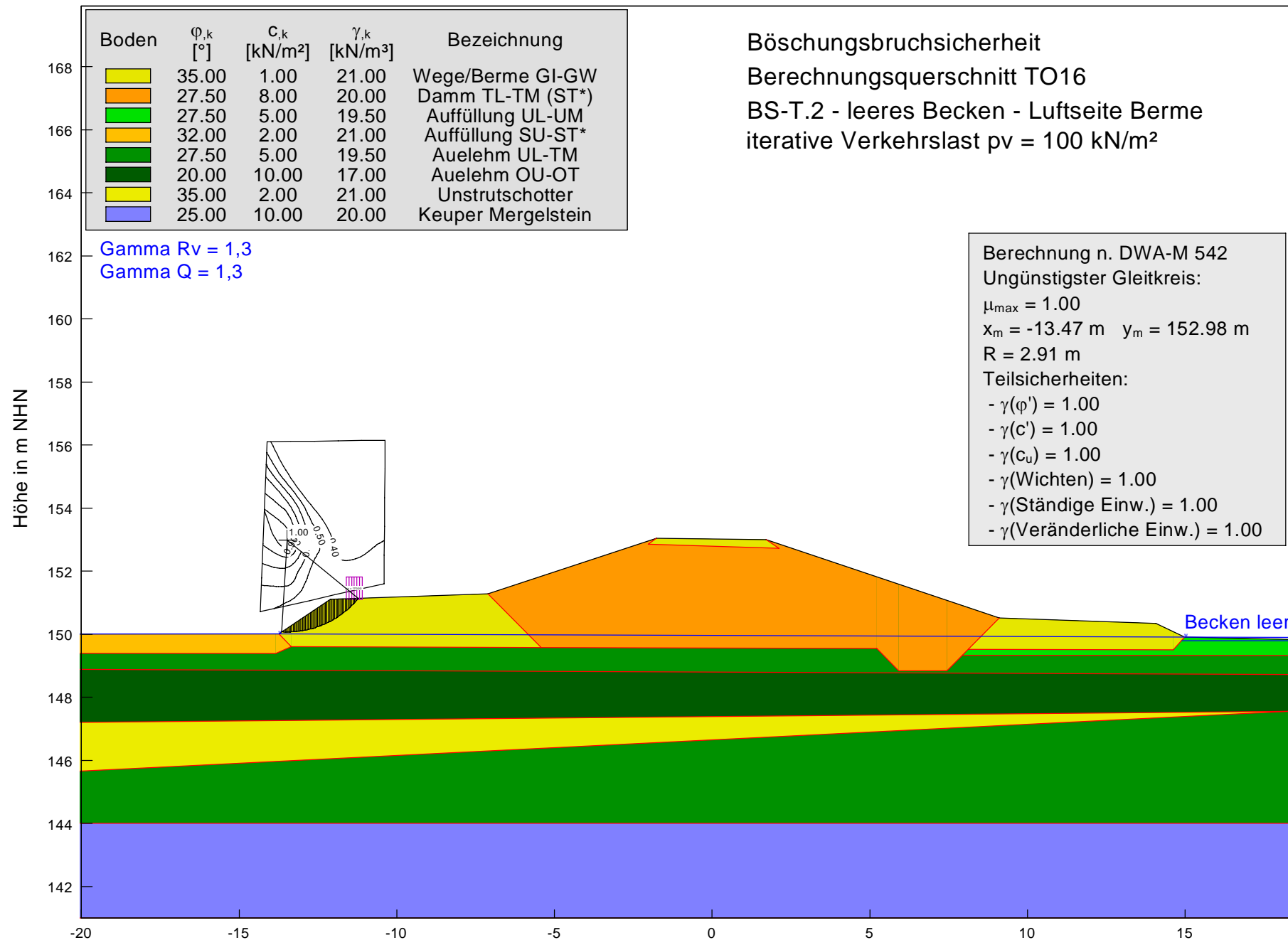
$$- \gamma(c') = 1.00$$

$$- \gamma(c_u) = 1.00$$

$$- \gamma(\text{Wichten}) = 1.00$$

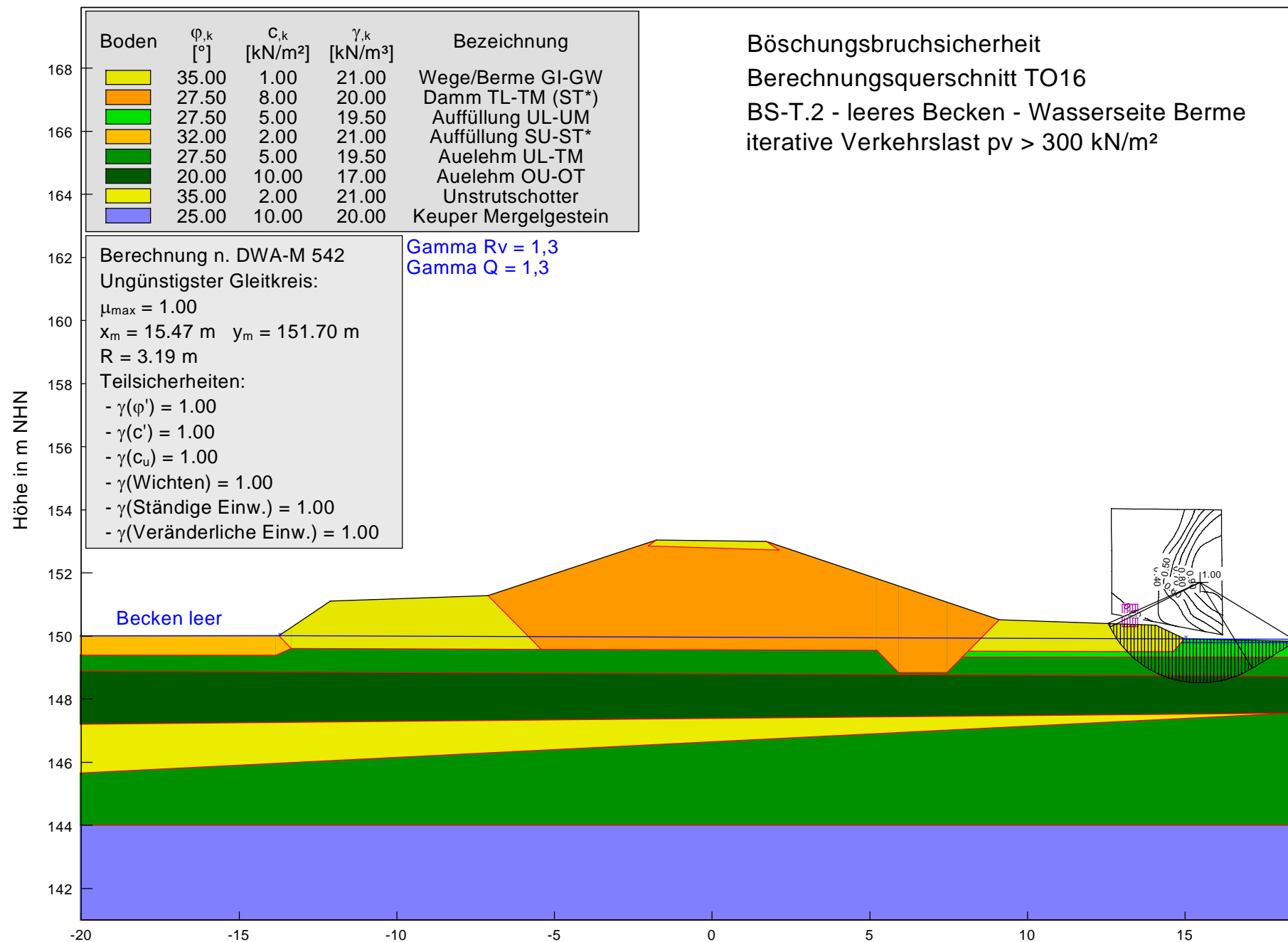
$$- \gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$$

$$- \gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$$



Böschungsbruchsicherheit

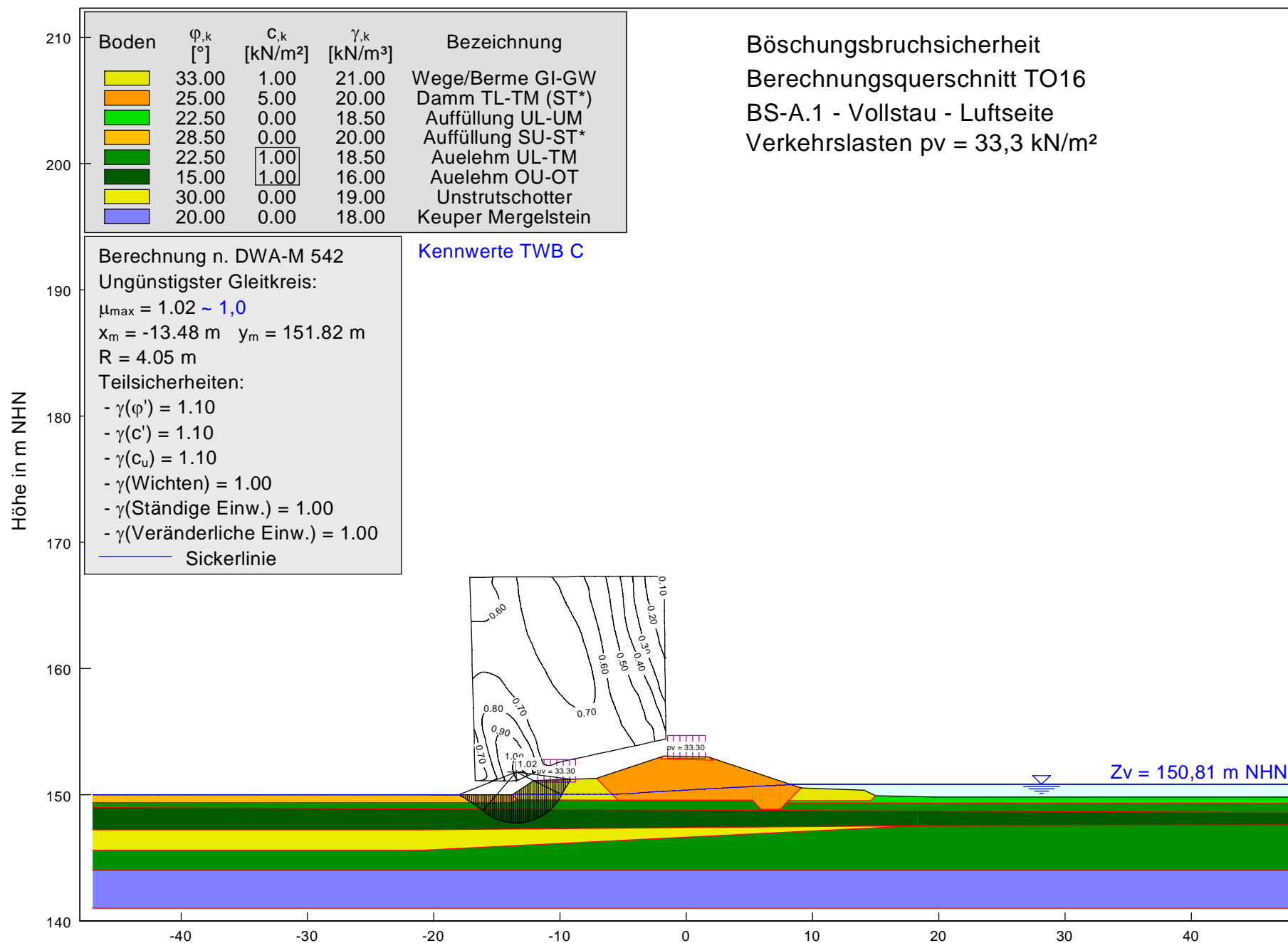
Berechnungsquerschnitt TO16

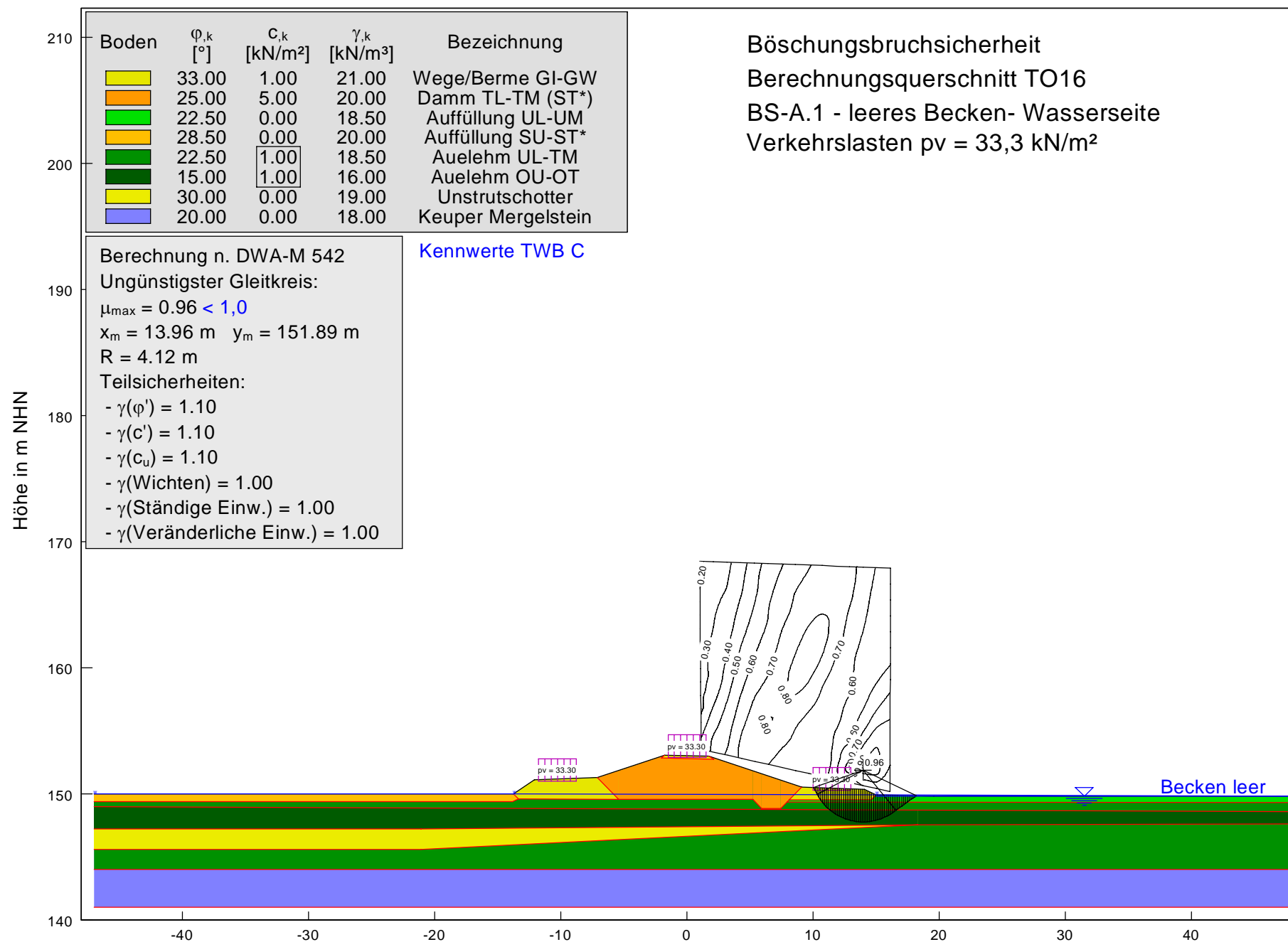
BS-T.2 - leeres Becken - Wasserseite Berme
iterative Verkehrslast $p_v > 300 \text{ kN/m}^2$ 

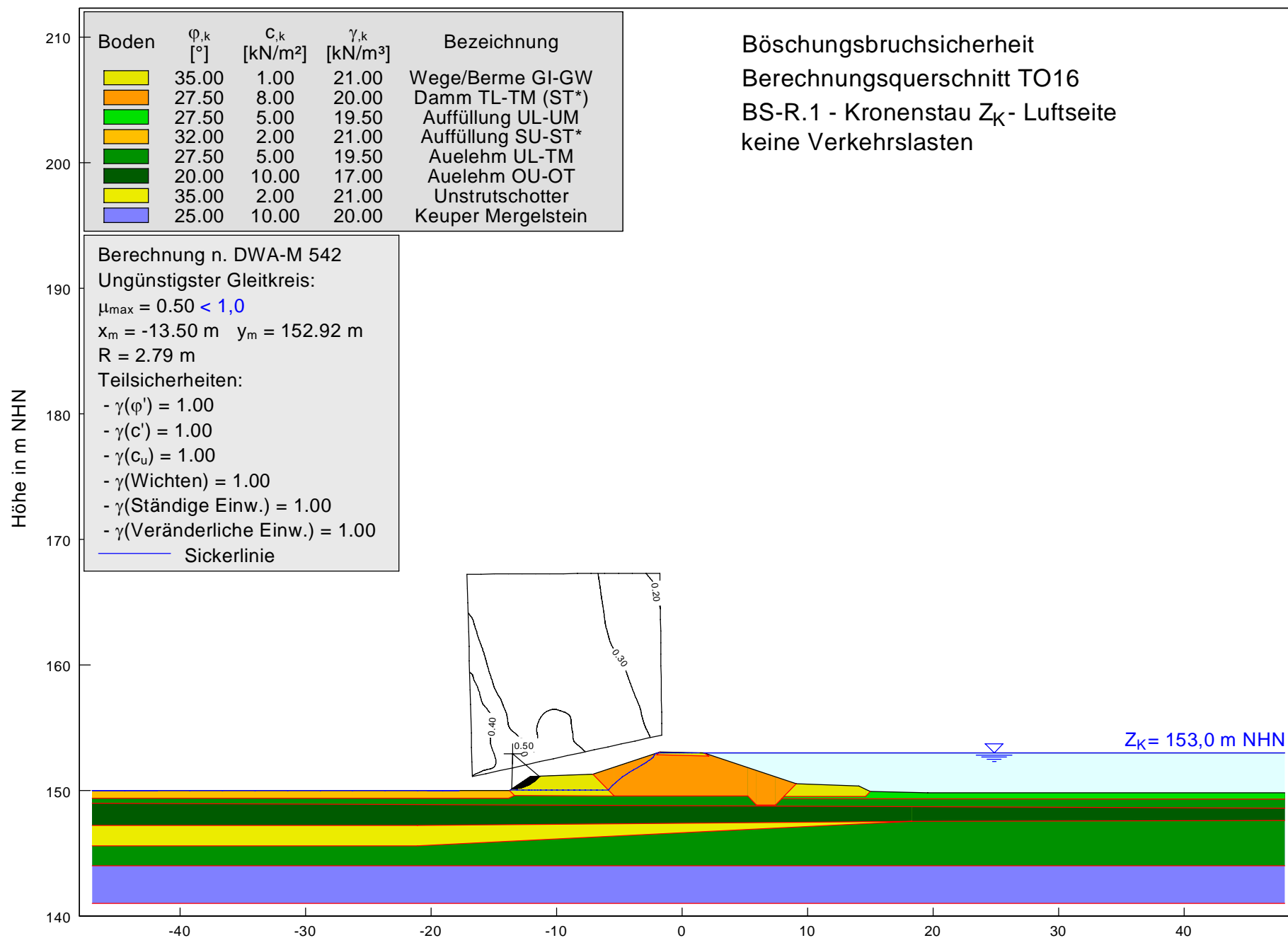
Böschungsbruchsicherheit

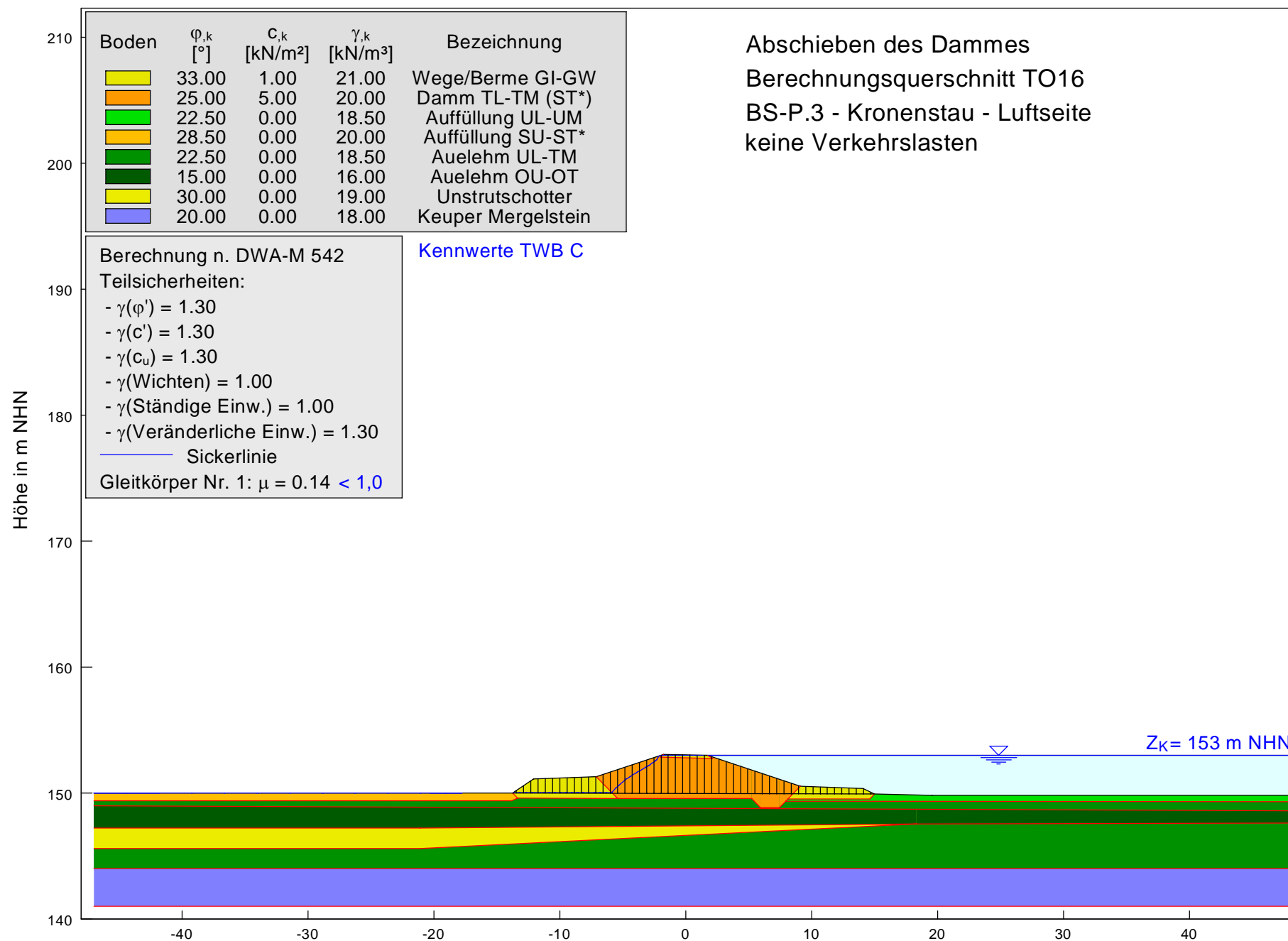
Berechnungsquerschnitt TO16

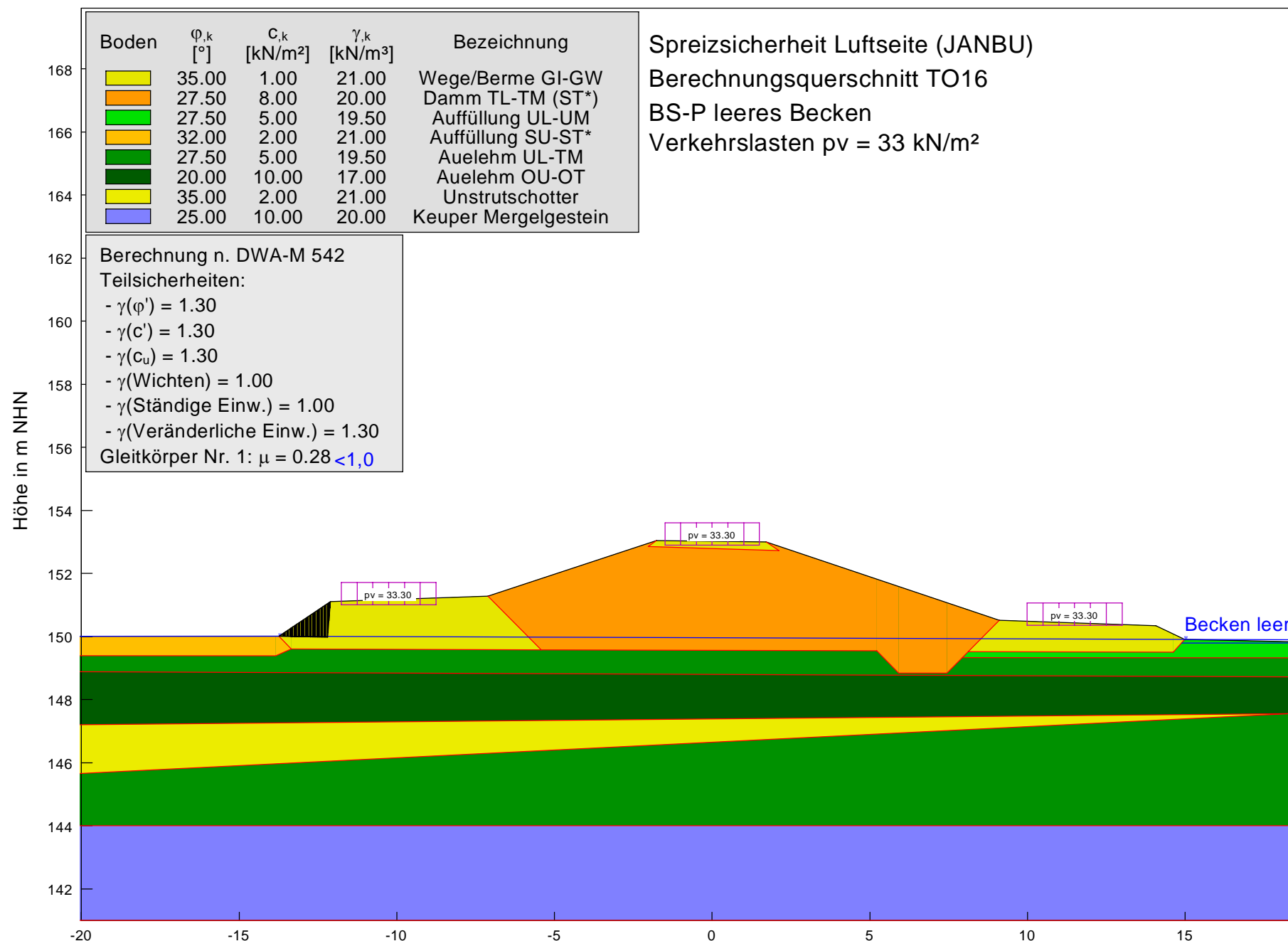
BS-A.1 - Vollstau - Luftseite

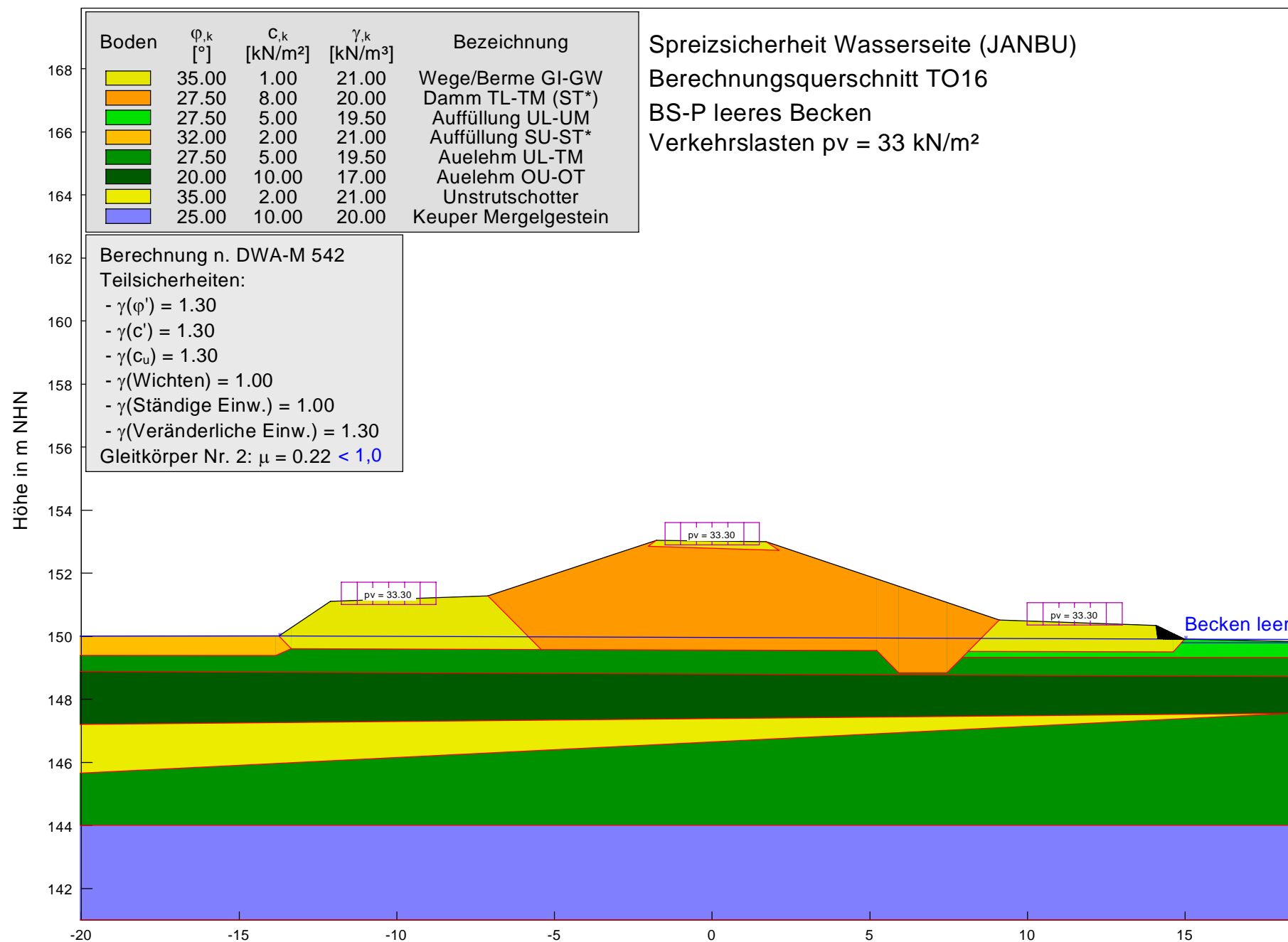
Verkehrslasten $p_v = 33,3 \text{ kN/m}^2$ 

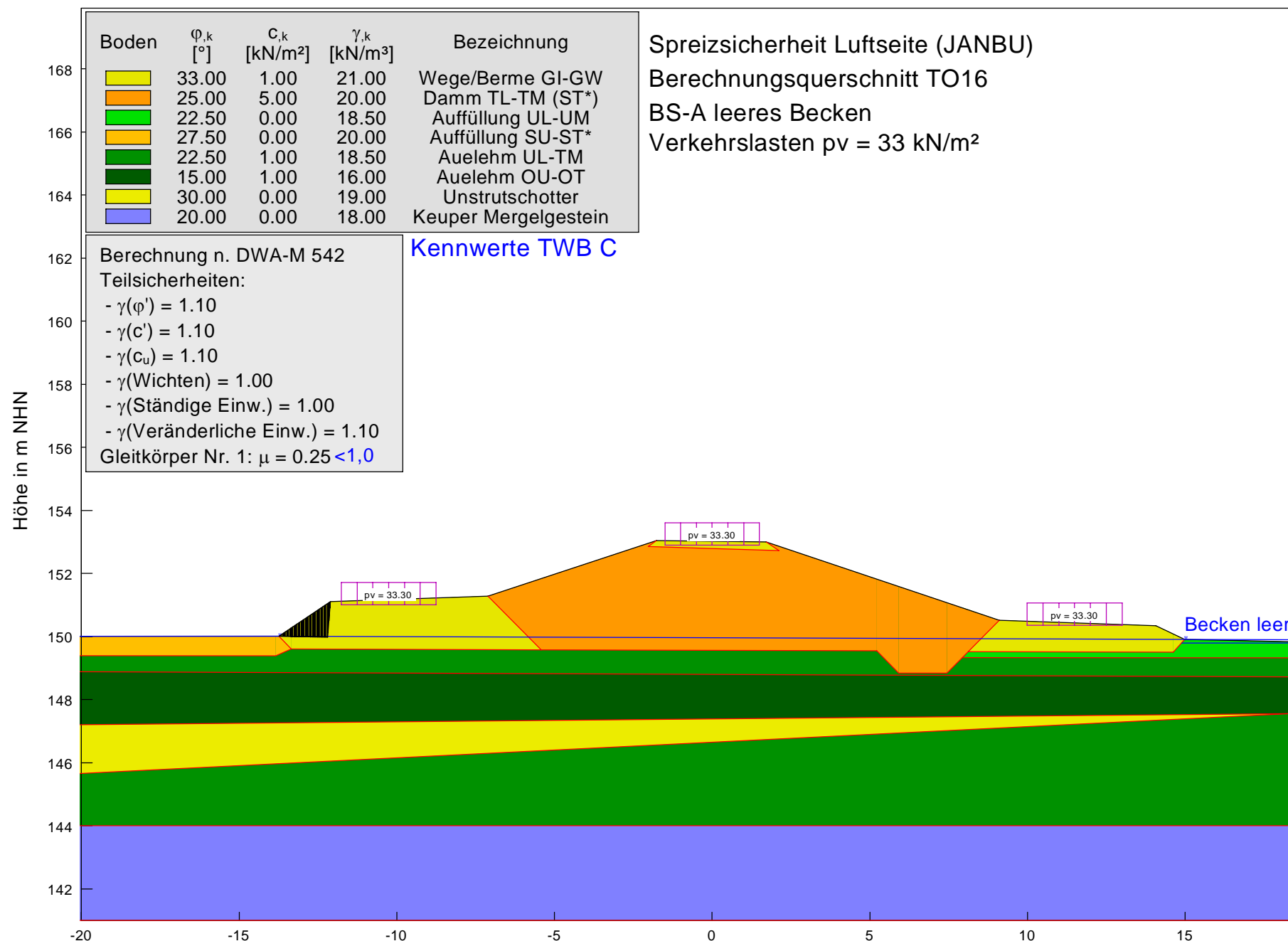


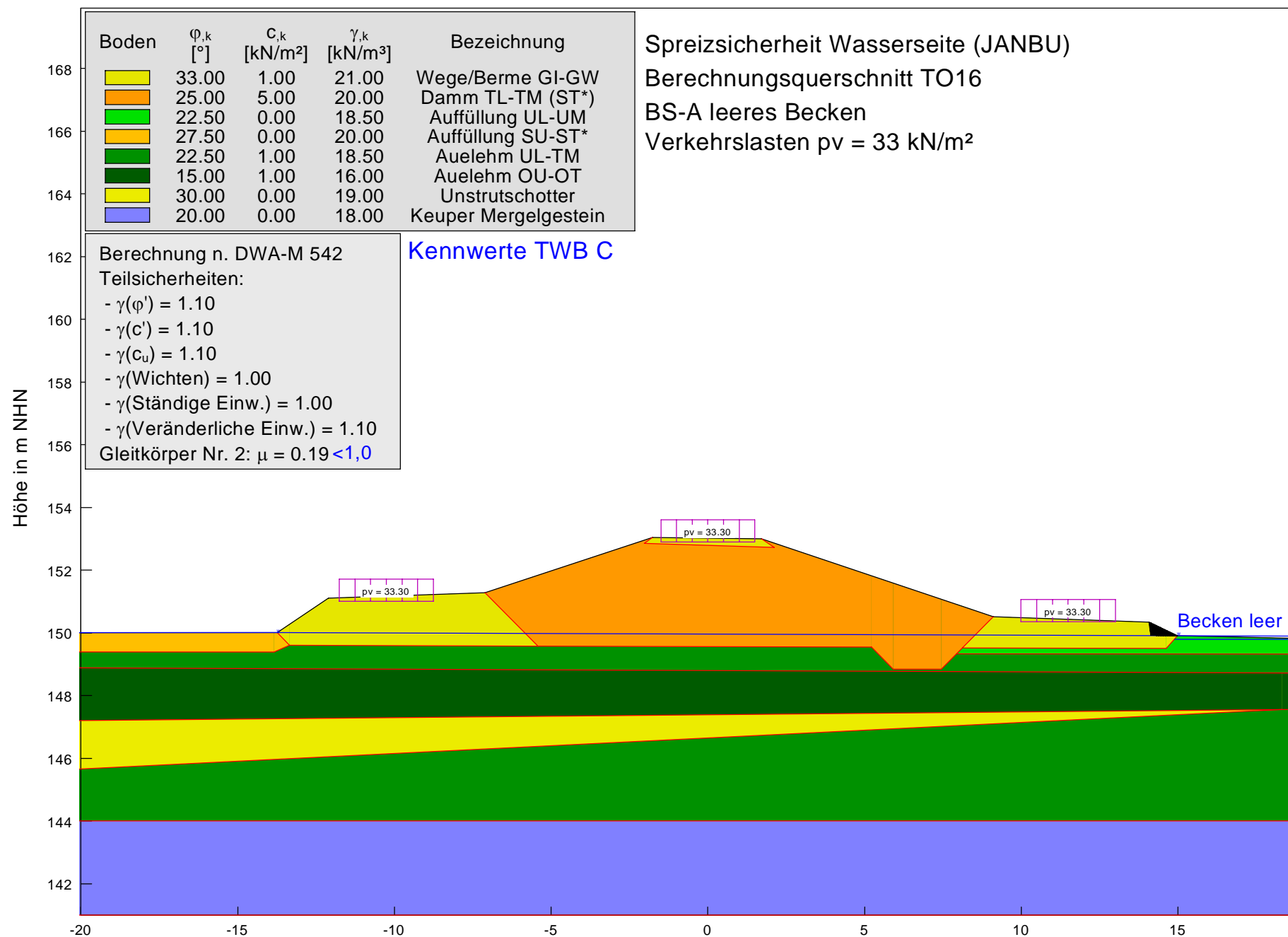






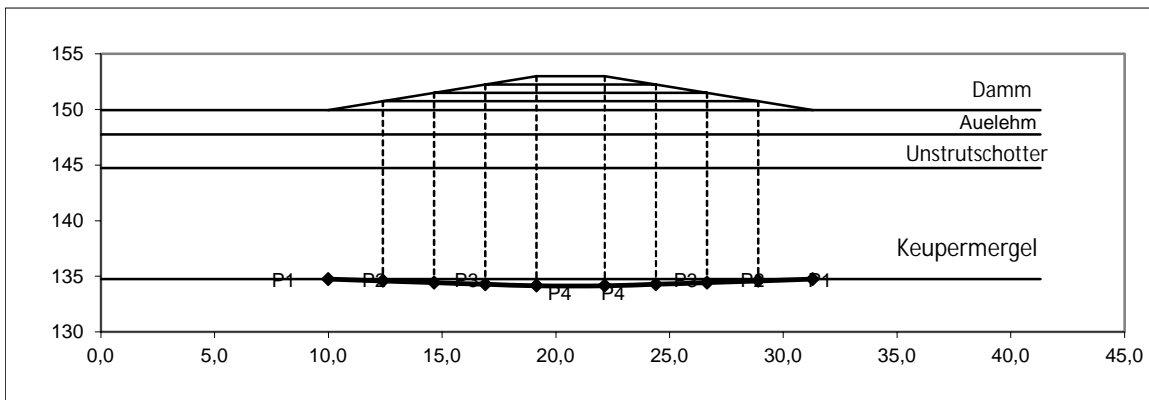






Setzungsberechnung

Für die Setzungsberechnung wird der Damm in einzelne horizontale Lamellen unterteilt. Es erfolgt eine hinreichend genaue Diskretisierung in 4 Lamellen. Durch Berechnung der jeweiligen Randpunkte lässt sich näherungsweise eine Setzungsmulde ableiten. Für die Berechnung wird für den gesamten Damm eine Wichte von $\gamma' = 20,00 \text{ kN/m}^3$ angenommen.



Eingabewerte: **Absperrbauwerk gemittelte Schichtung**

OK Krone	153 m ü.NN
OK Gelände _{Wasserseite}	149,9 m ü.NN
OK Gelände _{Luftseite}	150,0 m ü.NN
mittlere Dammhöhe	3,05 m

Neigung Wasserseite	1 :	3,00
Neigung Luftseite	1 :	3,00
Kronenbreite		3 m
Böschungslänge Wasserseite		9,30 m
Böschungslänge Luftseite		9,00 m

Geometrie der Lamellen	h [m]	b [m]
Lamelle 1	0,80	21,30
Lamelle 2	0,75	16,50
Lamelle 3	0,75	12
Lamelle 4	0,75	7,5

setzungsempfindliche Schichten	z [m]	E _s [kN/m²]
Auelehm	2,20	14000
Unstrutschotter	3,00	100000
Keupermergel / Auelehm	10,00	22500







F1	b	z	z/b	f	d	$\Delta\sigma_0$	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[kN/m ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lamelle 1	21,30	2,20	0,1033	0,0931	0,80	16,00	2,27	2,27	2,27	2,27
Lamelle 2	16,50	2,20	0,1333	0,1216	0,75	15,00	0,00	2,15	2,15	2,15
Lamelle 3	12,00	2,20	0,1833	0,1691	0,75	15,00	0,00	0,00	2,17	2,17
Lamelle 4	7,50	2,20	0,2933	0,2550	0,75	15,00	0,00	0,00	0,00	2,05
Σ						61,00	2,27	4,42	6,59	8,64
F2	b	z	z/b	f	d	$\Delta\sigma_0$	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[kN/m ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lamelle 1	21,30	3,00	0,1408	0,1288	0,80	16,00	0,44	0,44	0,44	0,44
Lamelle 2	16,50	3,00	0,1818	0,1677	0,75	15,00	0,00	0,42	0,42	0,42
Lamelle 3	12,00	3,00	0,2500	0,2225	0,75	15,00	0,00	0,00	0,40	0,40
Lamelle 4	7,50	3,00	0,4000	0,3350	0,75	15,00	0,00	0,00	0,00	0,38
Σ						61,00	0,44	0,85	1,25	1,63
F3	b	z	z/b	f	d	$\Delta\sigma_0$	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
	[m]	[m]	[-]	[-]	[m]	[kN/m ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Lamelle 1	21,30	10,00	0,4695	0,3761	0,80	16,00	5,70	5,70	5,70	5,70
Lamelle 2	16,50	10,00	0,6061	0,4634	0,75	15,00	0,00	5,10	5,10	5,10
Lamelle 3	12,00	10,00	0,8333	0,5900	0,75	15,00	0,00	0,00	4,72	4,72
Lamelle 4	7,50	10,00	1,3333	0,8083	0,75	15,00	0,00	0,00	0,00	4,04
Σ						61,00	5,70	10,79	15,51	19,56
Gesamtsetzung in [mm]:							8	16	23	30

Anhang 2

Querschnitt Straßendamm B4 bei Gebesee (M10)

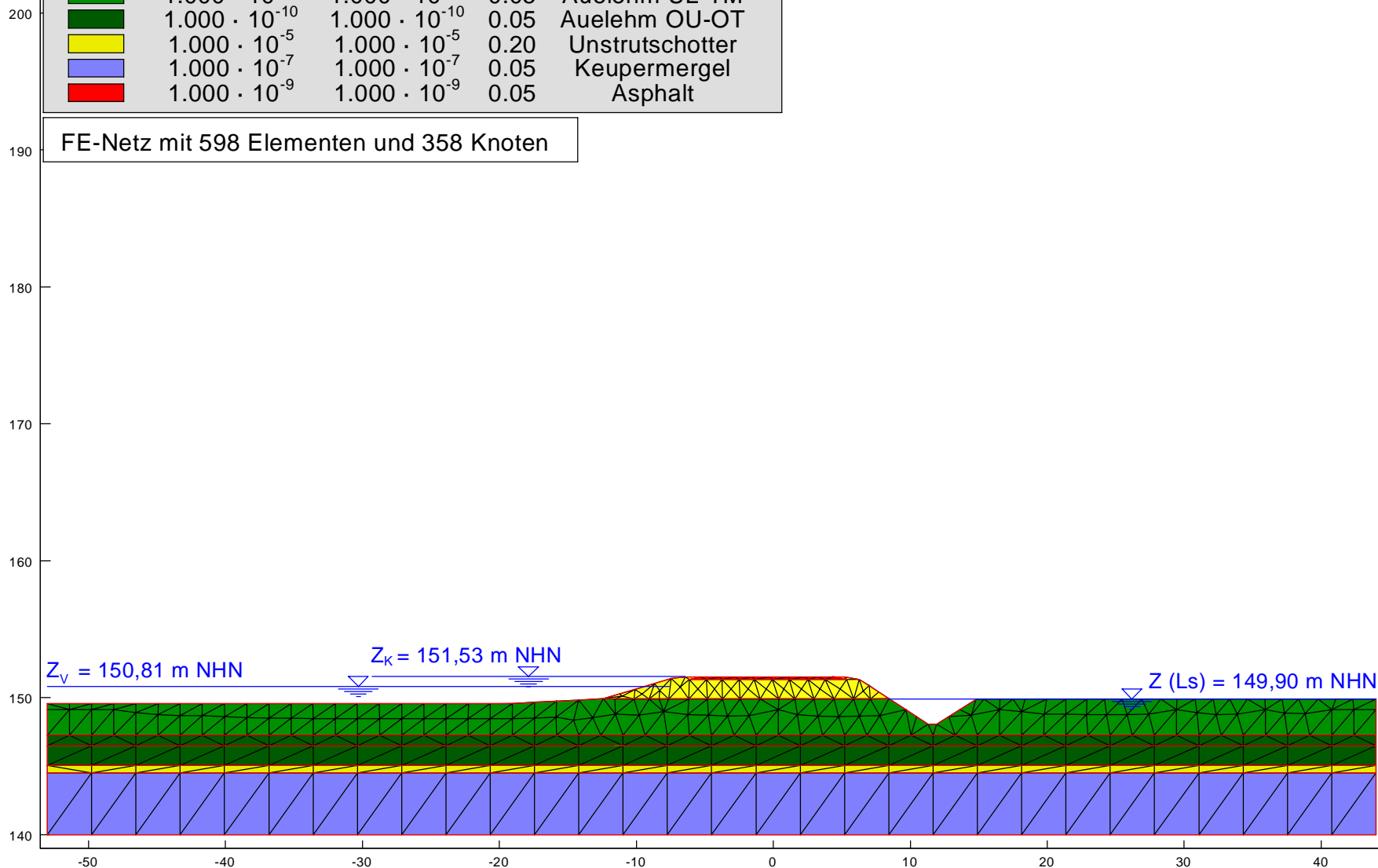
- 2.1 Durchströmungsberechnungen
- 2.2 Berechnungen Böschungsbruchsicherheit
- 2.3 Spreizsicherheit
- 2.4 Sicherheit gegen Auftrieb/hydraulischen Grundbruch

Berechnungsquerschnitt - M10 - 0+120 vernetztes Modell







Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$5.000 \cdot 10^{-4}$	$5.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Straßendamm
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm OU-OT
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keupermergel
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Asphalt

FE-Netz mit 598 Elementen und 358 Knoten

Höhe in m NHN

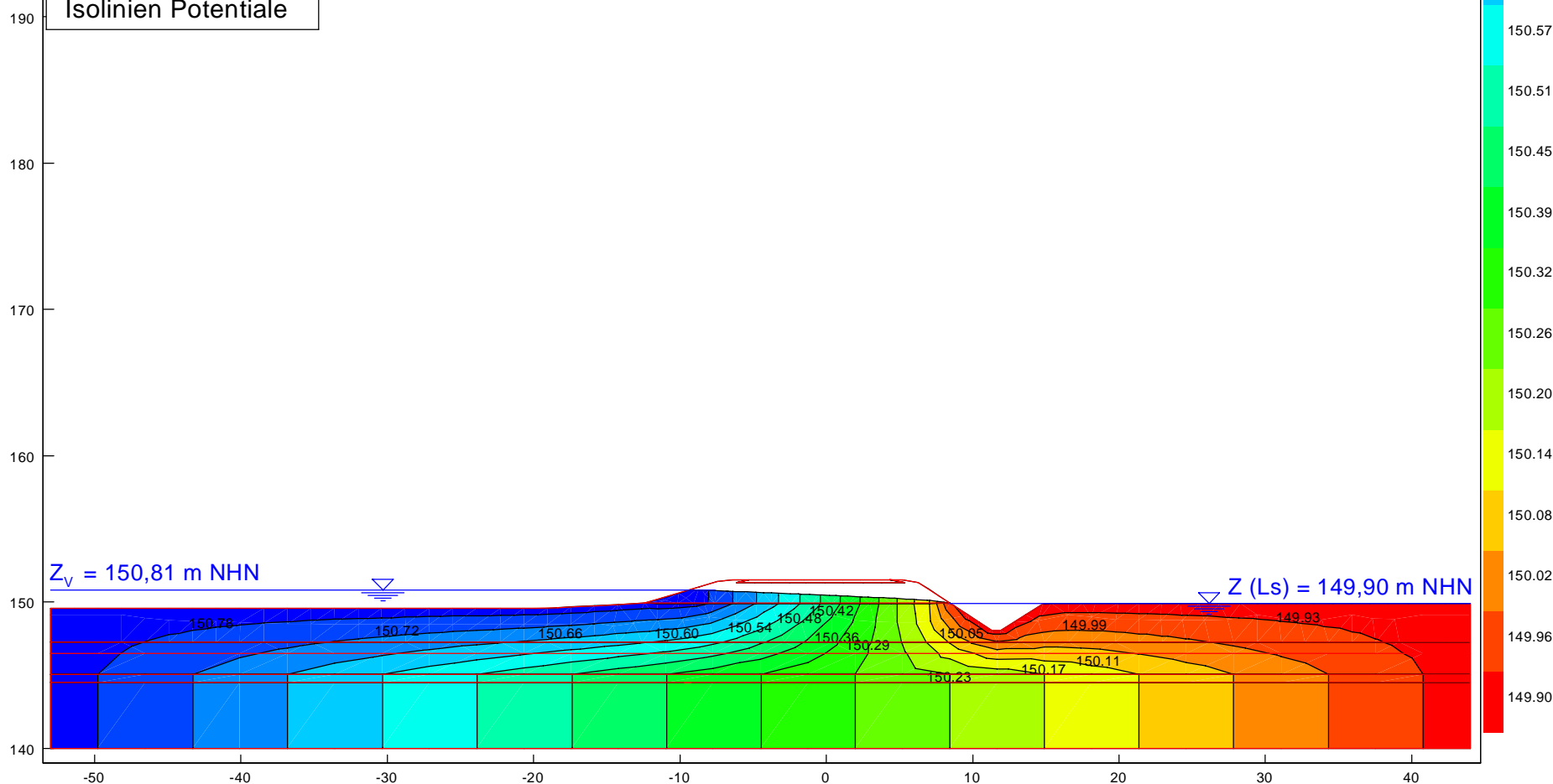


Berechnungsquerschnitt - M10 - km 0+120
BS-P.1 Stauziel Zv
Gradient Auelehm/Damm $i(\max) = 0,2 / < 0,1$
Sickerwassermenge $Q = 2,1E-02$ l/s je m







Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$5.000 \cdot 10^{-4}$	$5.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Straßendamm
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm OU-OT
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keupermergel
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Asphalt

Isolinien Potentiale

Höhe in m NHN

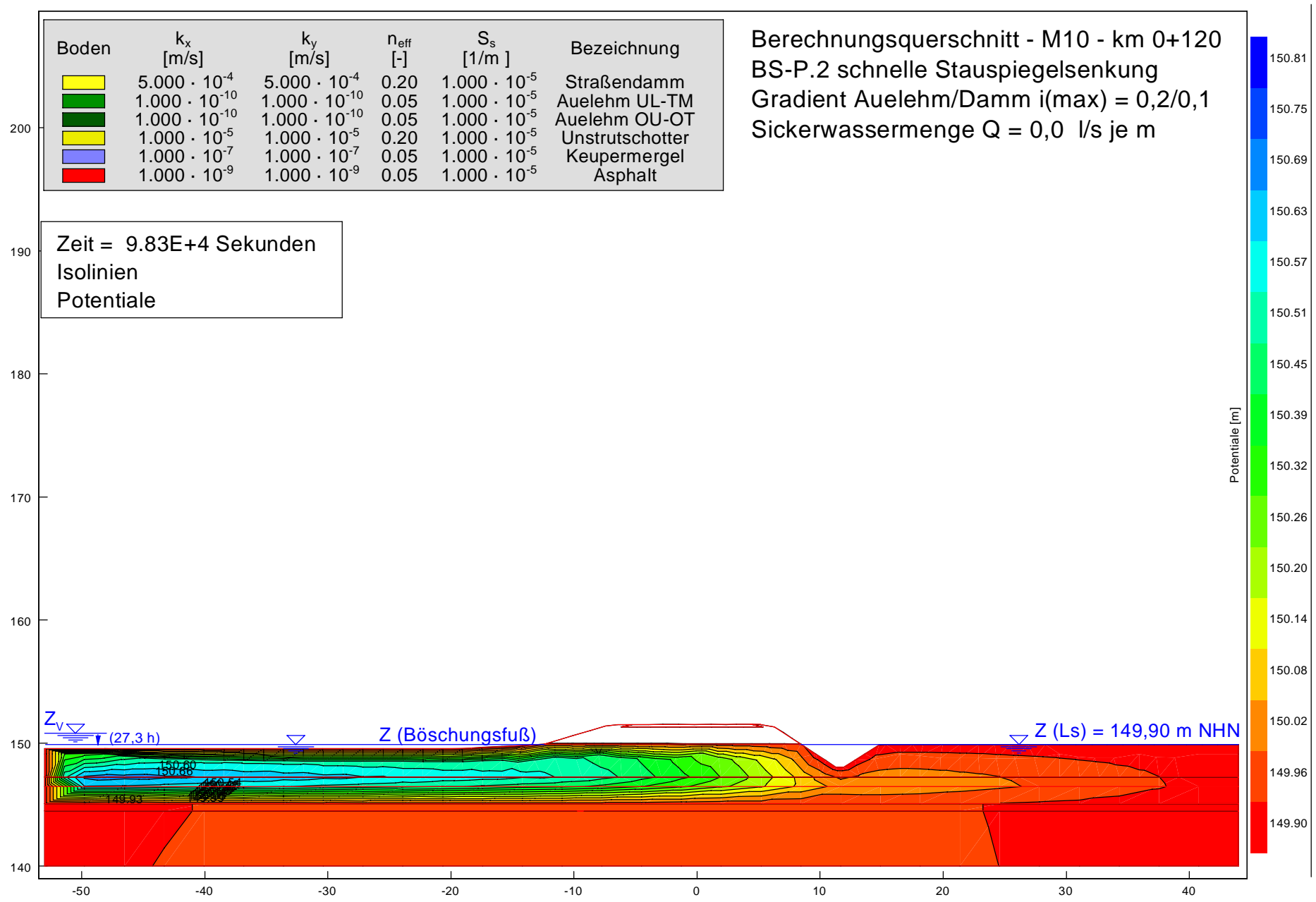


Berechnungsquerschnitt - M10 - km 0+120
BS-P.2 schnelle Stauspiegelsenkung
Gradient Auelehm/Damm $i(\max) = 0,2/0,1$
Sickerwassermenge $Q = 0,0 \text{ l/s je m}$







Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	S_s [1/m]	Bezeichnung
	$5.000 \cdot 10^{-4}$	$5.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Straßendamm
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Auelehm OU-OT
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Keupermergel
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	$1.000 \cdot 10^{-5}$	Asphalt

Zeit = $9.83E+4$ Sekunden
Isolinien
Potentiale

Höhe in m NHN

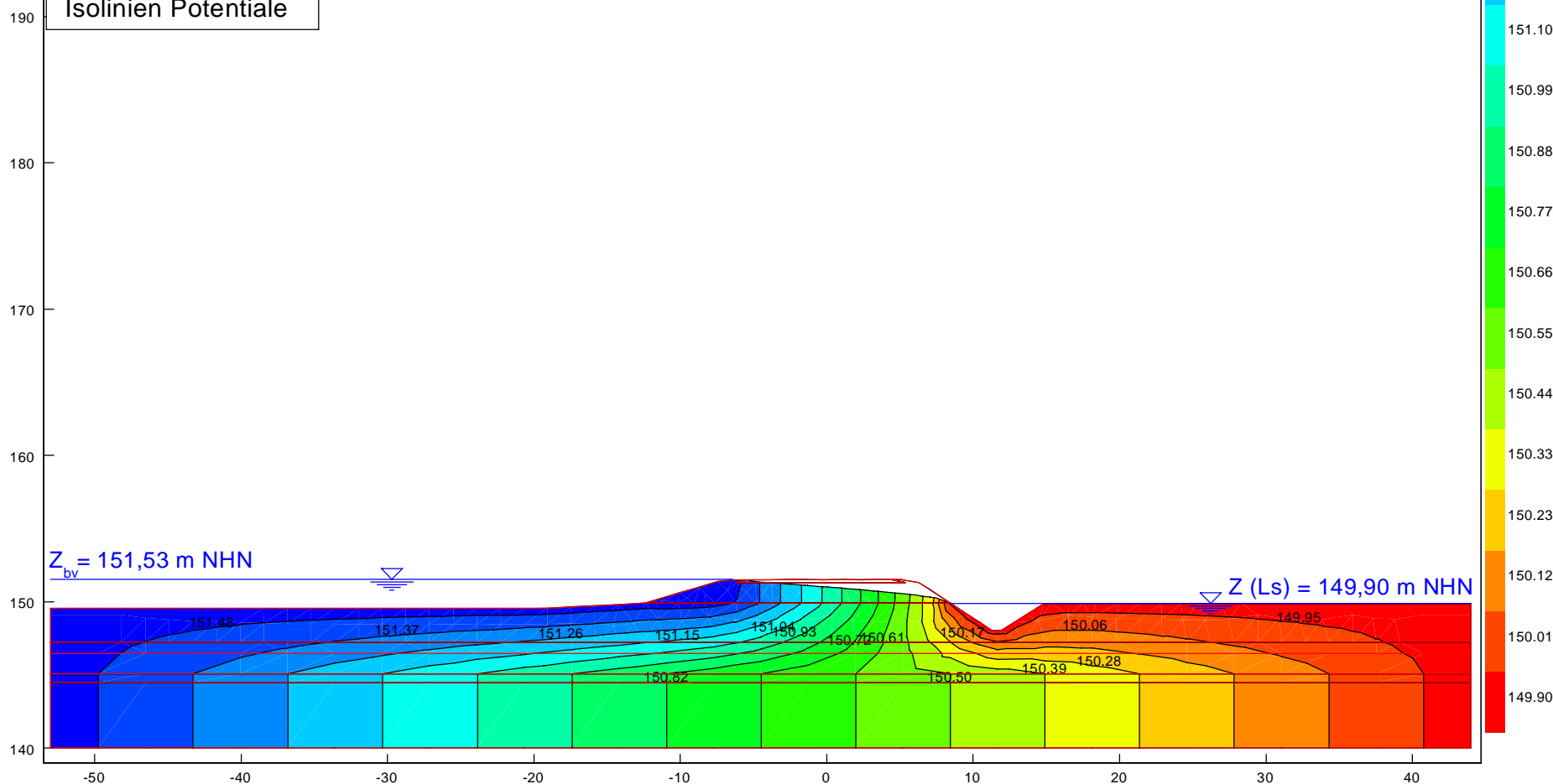


Berechnungsquerschnitt - M10 - km 0+120
BS-bv.1 (P) Einstau bordvoll
Gradient Auelehm/Damm $i(\max) = 0,2/0,1$
Sickerwassermenge $Q = 5,3 \text{ E-02 l/s je m}$





Boden	k_x [m/s]	k_y [m/s]	n_{eff} [-]	Bezeichnung
	$5.000 \cdot 10^{-4}$	$5.000 \cdot 10^{-4}$	0.20	Straßendamm
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm UL-TM
	$1.000 \cdot 10^{-10}$	$1.000 \cdot 10^{-10}$	0.05	Auelehm OU-OT
	$1.000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$	0.20	Unstrutschotter
	$1.000 \cdot 10^{-7}$	$1.000 \cdot 10^{-7}$	0.05	Keupermergel
	$1.000 \cdot 10^{-9}$	$1.000 \cdot 10^{-9}$	0.05	Asphalt

Isolinien Potentiale

Höhe in m NHN

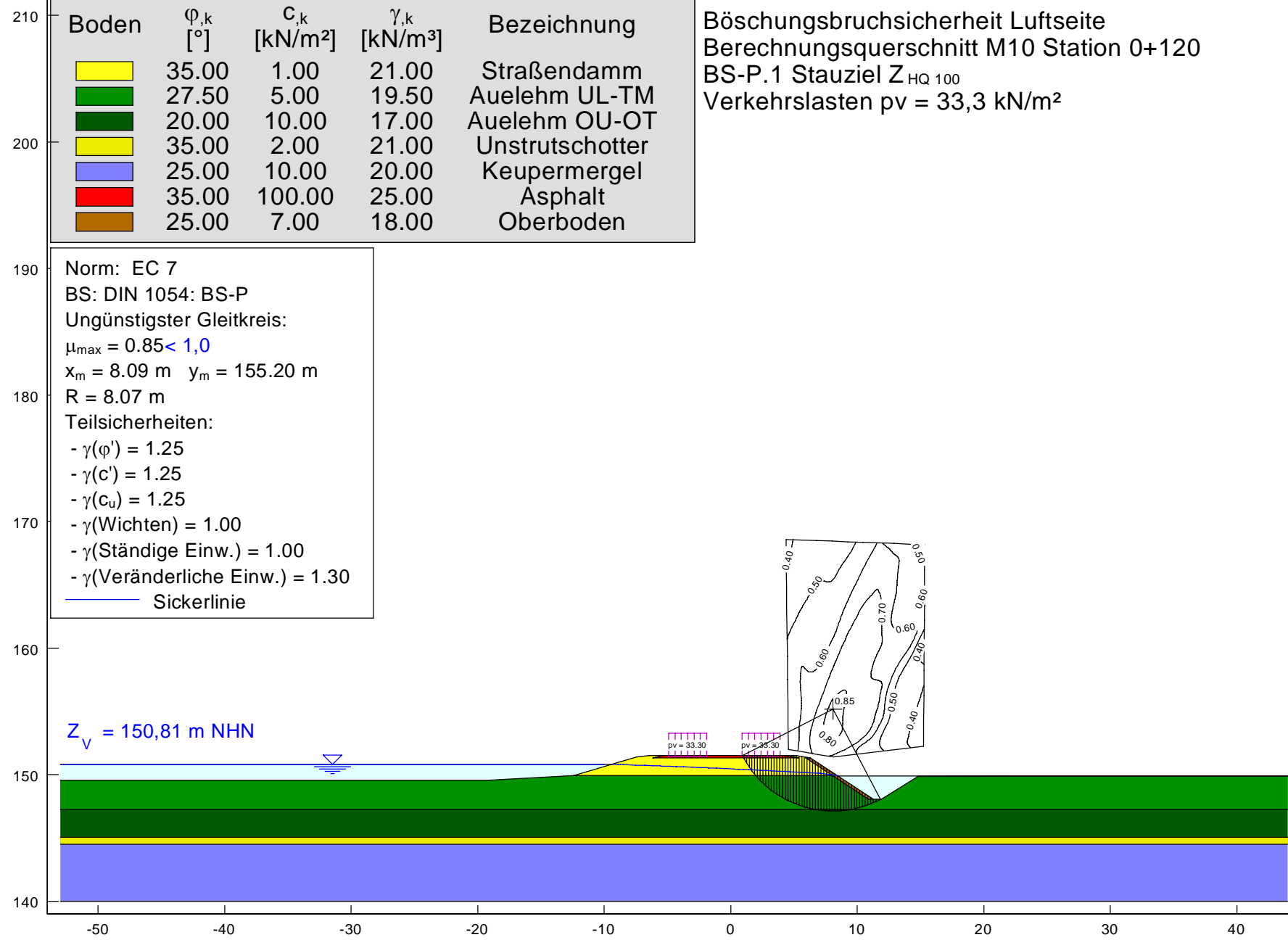


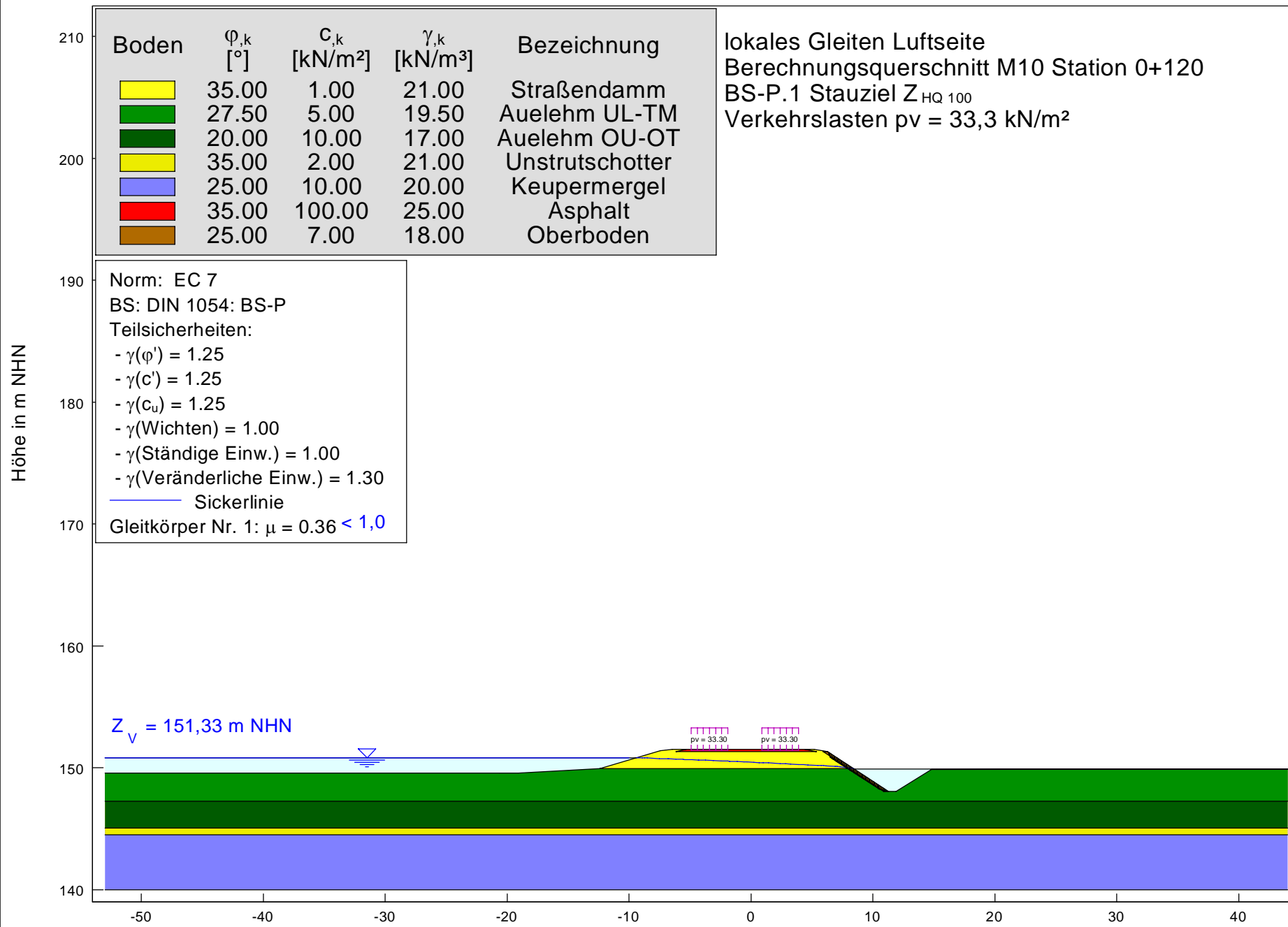
Böschungsbruchsicherheit Luftseite
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-P.1 Stauziel $Z_{HQ\ 100}$
Verkehrslasten $p_v = 33,3\text{ kN/m}^2$

Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Ungünstigster Gleitkreis:
 $\mu_{\max} = 0.85 < 1.0$
 $x_m = 8.09\text{ m}$ $y_m = 155.20\text{ m}$
 $R = 8.07\text{ m}$
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.25$
- $\gamma(c') = 1.25$
- $\gamma(c_u) = 1.25$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$
— Sickerlinie

Höhe in m NHN

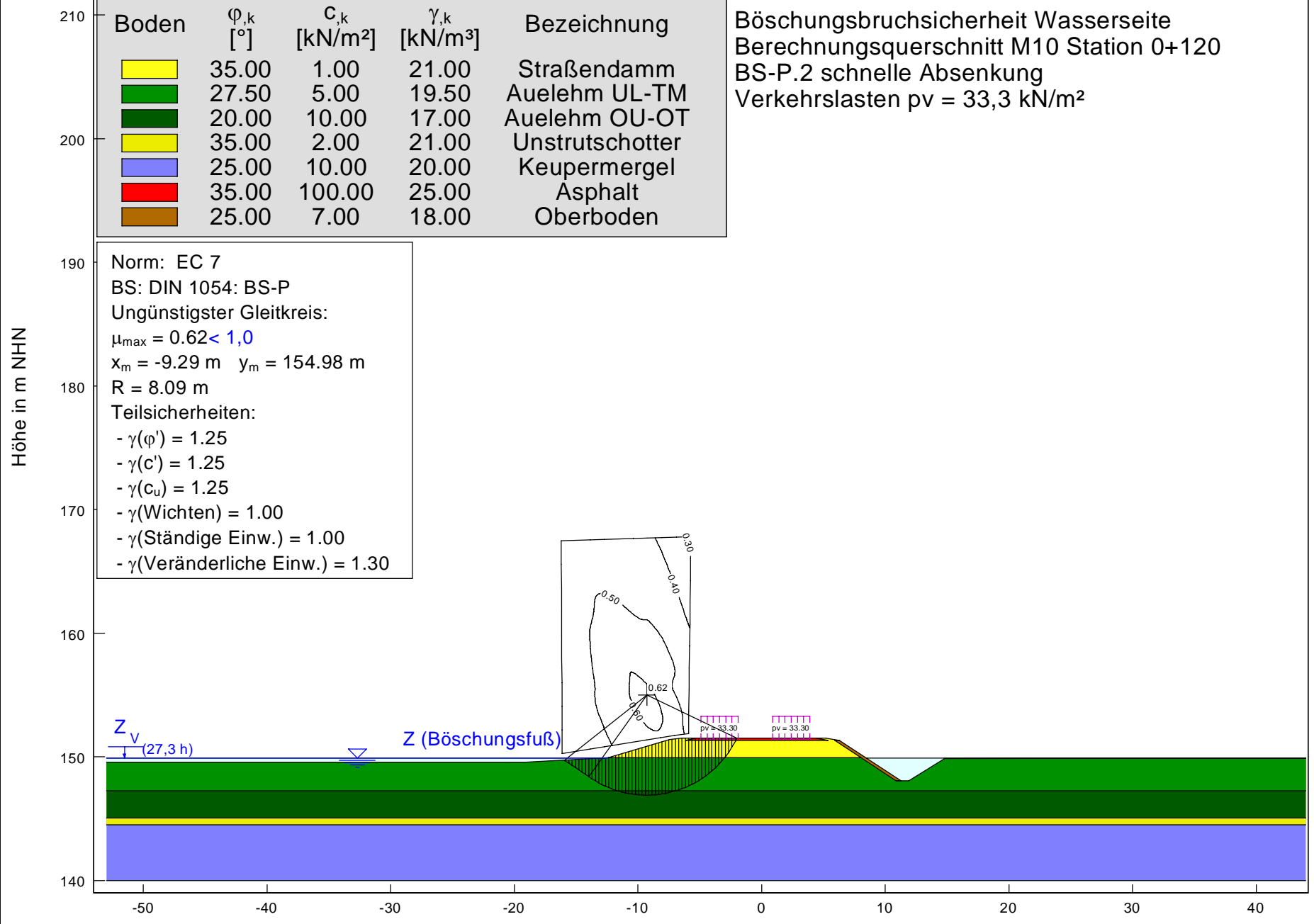









Böschungsbruchsicherheit Wasserseite
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-P.2 schnelle Absenkung
Verkehrslasten $p_v = 33,3 \text{ kN/m}^2$

Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

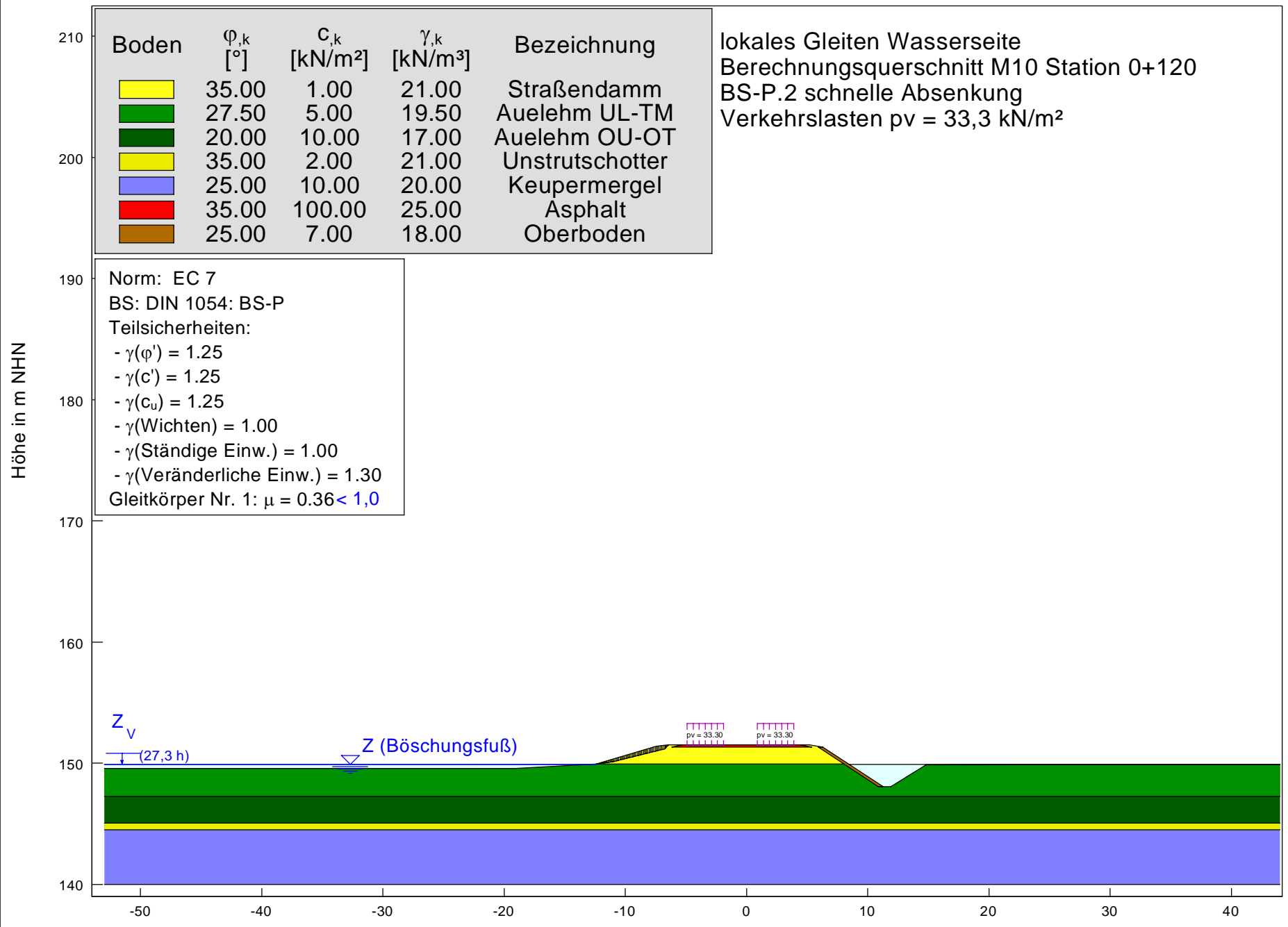
Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Ungünstigster Gleitkreis:
 $\mu_{\max} = 0.62 < 1,0$
 $x_m = -9.29 \text{ m}$ $y_m = 154.98 \text{ m}$
 $R = 8.09 \text{ m}$
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.25$
- $\gamma(c') = 1.25$
- $\gamma(c_u) = 1.25$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$









lokales Gleiten Wasserseite
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-P.2 schnelle Absenkung
Verkehrslasten $p_v = 33,3 \text{ kN/m}^2$

Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

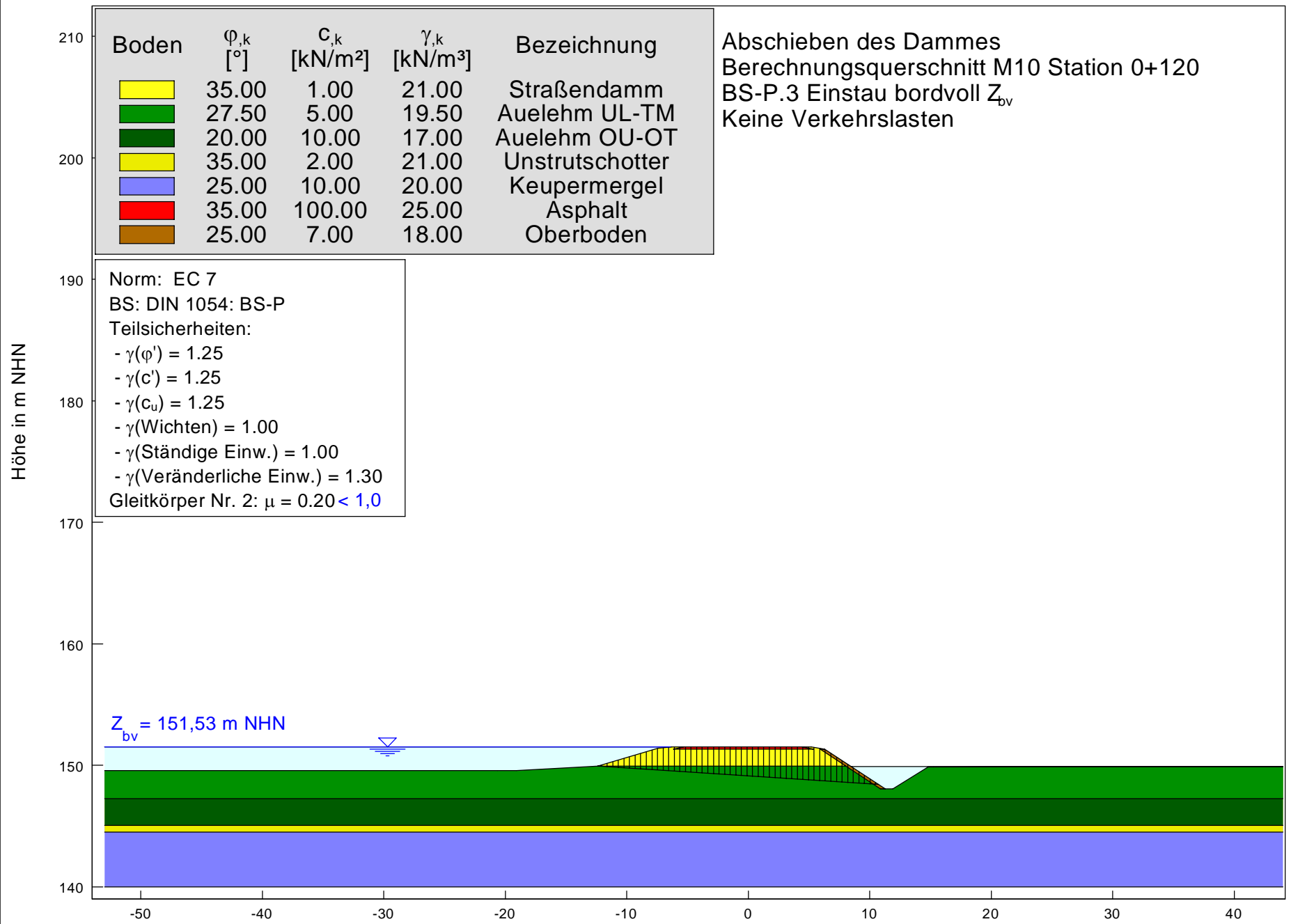
Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.25$
- $\gamma(c') = 1.25$
- $\gamma(c_u) = 1.25$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$
Gleitkörper Nr. 1: $\mu = 0.36 < 1,0$



Abschieben des Dammes
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-P.3 Einstau bordvoll Z_{bv}
Keine Verkehrslasten

Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.25$
- $\gamma(c') = 1.25$
- $\gamma(c_u) = 1.25$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$
Gleitkörper Nr. 2: $\mu = 0.20 < 1,0$

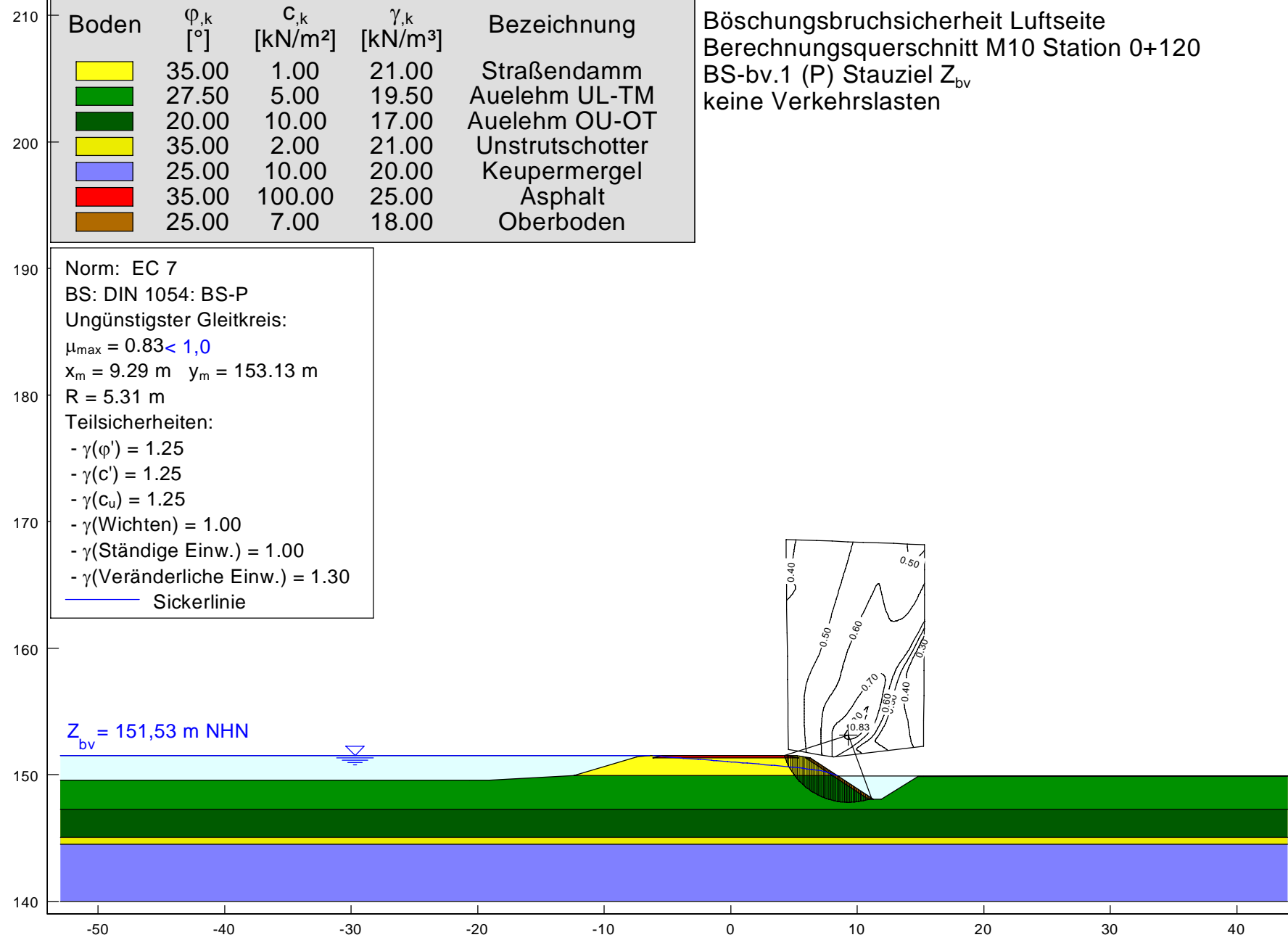


Böschungsbruchsicherheit Luftseite
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-bv.1 (P) Stauziel Z_{bv}
keine Verkehrslasten







Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Ungünstigster Gleitkreis:
 $\mu_{max} = 0.83 < 1.0$
 $x_m = 9.29 \text{ m}$ $y_m = 153.13 \text{ m}$
 $R = 5.31 \text{ m}$
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.25$
- $\gamma(c') = 1.25$
- $\gamma(c_u) = 1.25$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$
— Sickerlinie

Höhe in m NHN



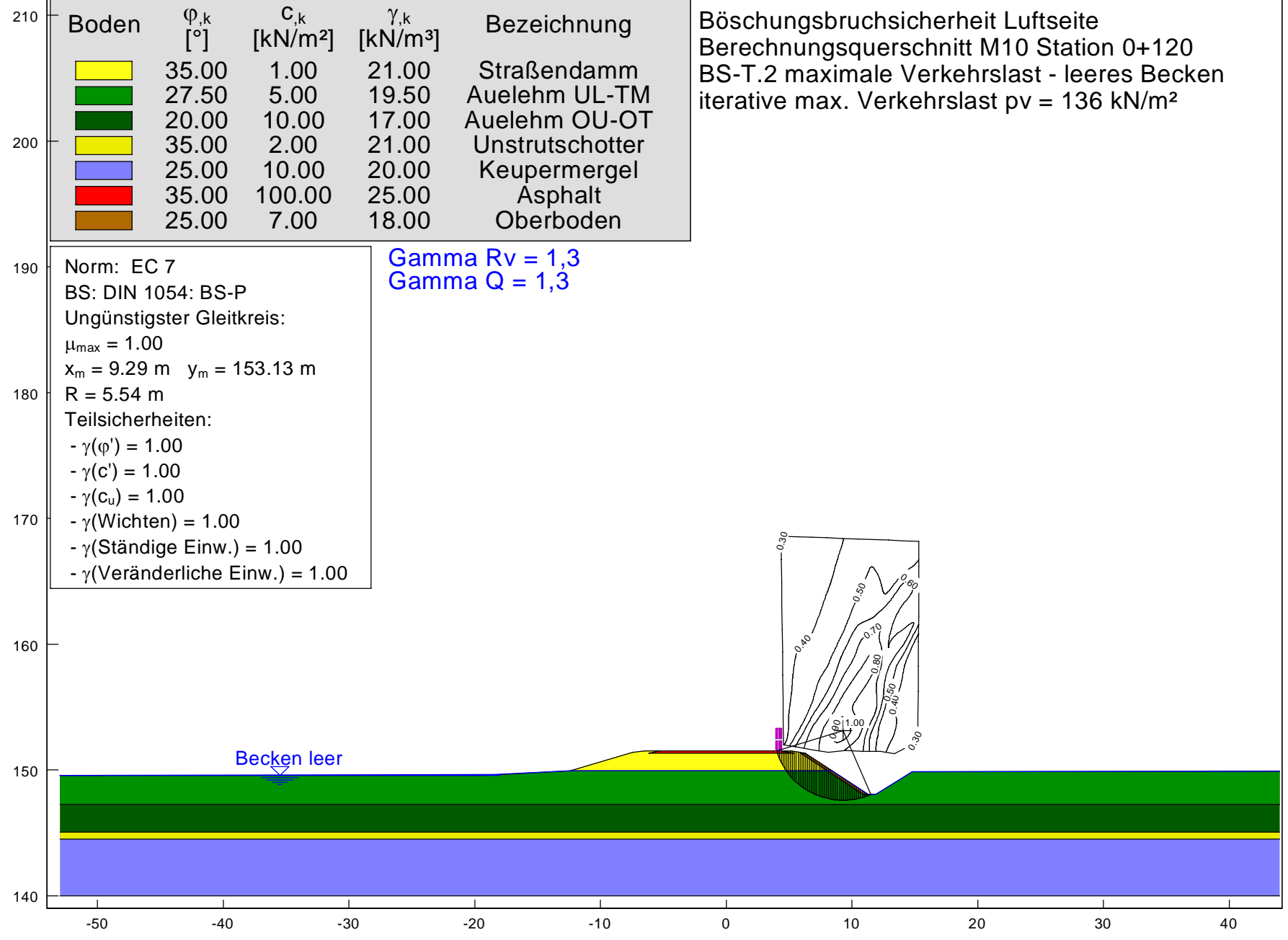
Böschungsbruchsicherheit Luftseite
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-T.2 maximale Verkehrslast - leeres Becken
iterative max. Verkehrslast $p_v = 136 \text{ kN/m}^2$

Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden





Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Ungünstigster Gleitkreis:
 $\mu_{\max} = 1.00$
 $x_m = 9.29 \text{ m}$ $y_m = 153.13 \text{ m}$
 $R = 5.54 \text{ m}$
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.00$
- $\gamma(c') = 1.00$
- $\gamma(c_u) = 1.00$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$

Gamma Rv = 1,3
Gamma Q = 1,3

Höhe in m NHN

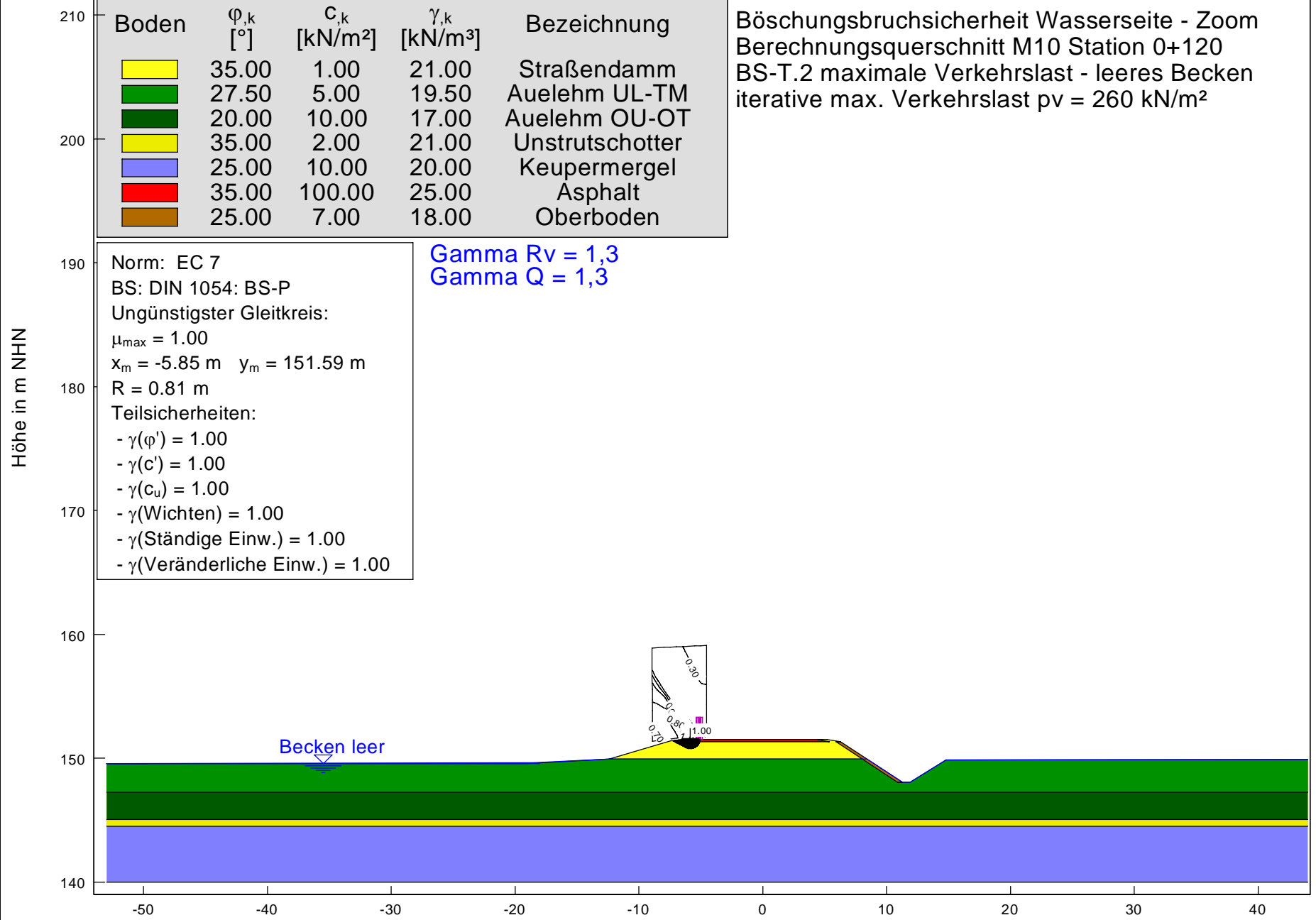


Böschungsbruchsicherheit Wasserseite - Zoom
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-T.2 maximale Verkehrslast - leeres Becken
iterative max. Verkehrslast $p_v = 260 \text{ kN/m}^2$

Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Ungünstigster Gleitkreis:
 $\mu_{\max} = 1.00$
 $x_m = -5.85 \text{ m}$ $y_m = 151.59 \text{ m}$
 $R = 0.81 \text{ m}$
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.00$
- $\gamma(c') = 1.00$
- $\gamma(c_u) = 1.00$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$

Gamma Rv = 1,3
Gamma Q = 1,3



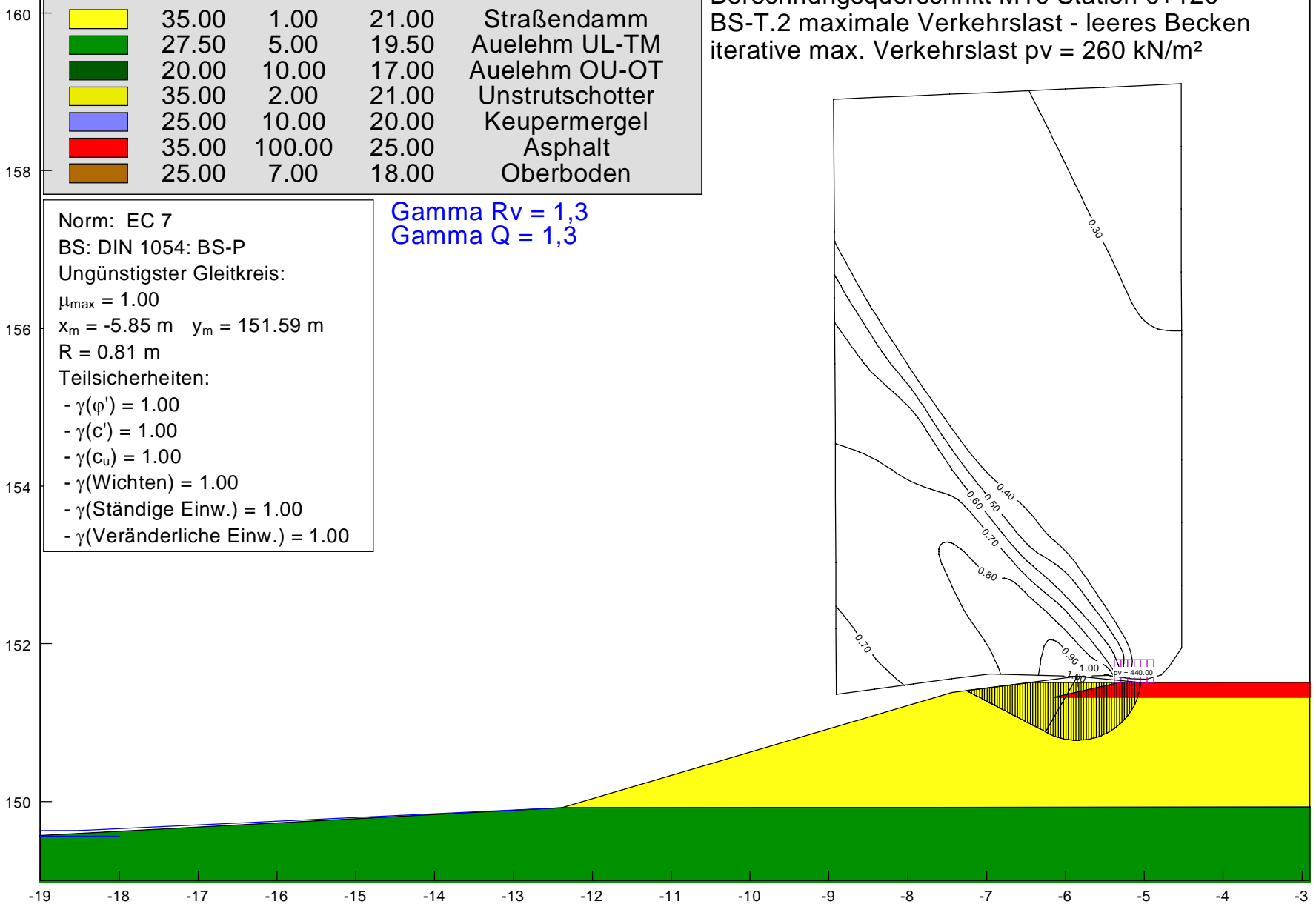
Böschungsbruchsicherheit Wasserseite - Zoom
Berechnungsquerschnitt M10 Station 0+120
BS-T.2 maximale Verkehrslast - leeres Becken
iterative max. Verkehrslast $p_v = 260 \text{ kN/m}^2$

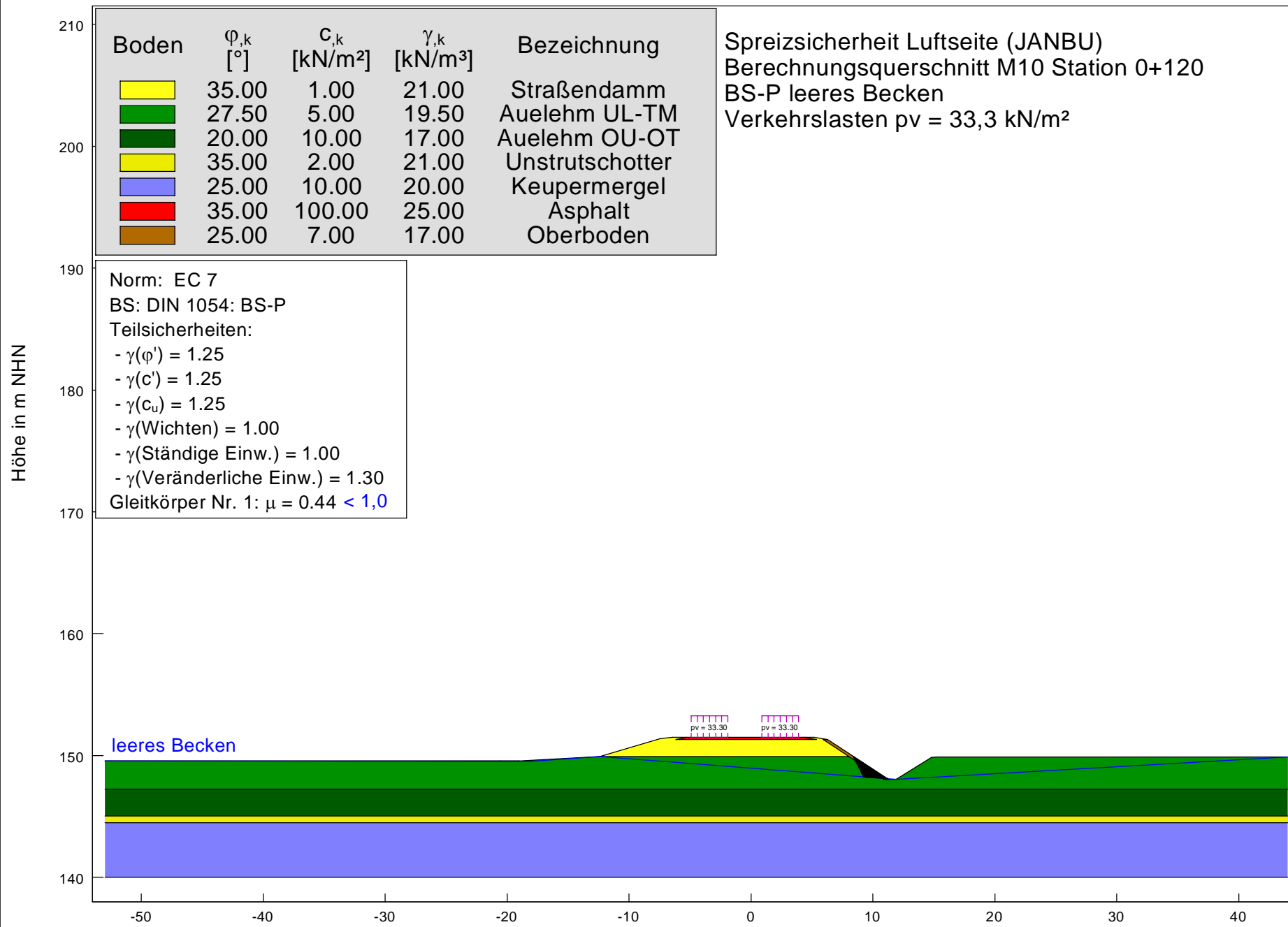
Boden	$\phi_{,k}$ [°]	$c_{,k}$ [kN/m ²]	$\gamma_{,k}$ [kN/m ³]	Bezeichnung
	35.00	1.00	21.00	Straßendamm
	27.50	5.00	19.50	Auelehm UL-TM
	20.00	10.00	17.00	Auelehm OU-OT
	35.00	2.00	21.00	Unstrutschotter
	25.00	10.00	20.00	Keupermergel
	35.00	100.00	25.00	Asphalt
	25.00	7.00	18.00	Oberboden

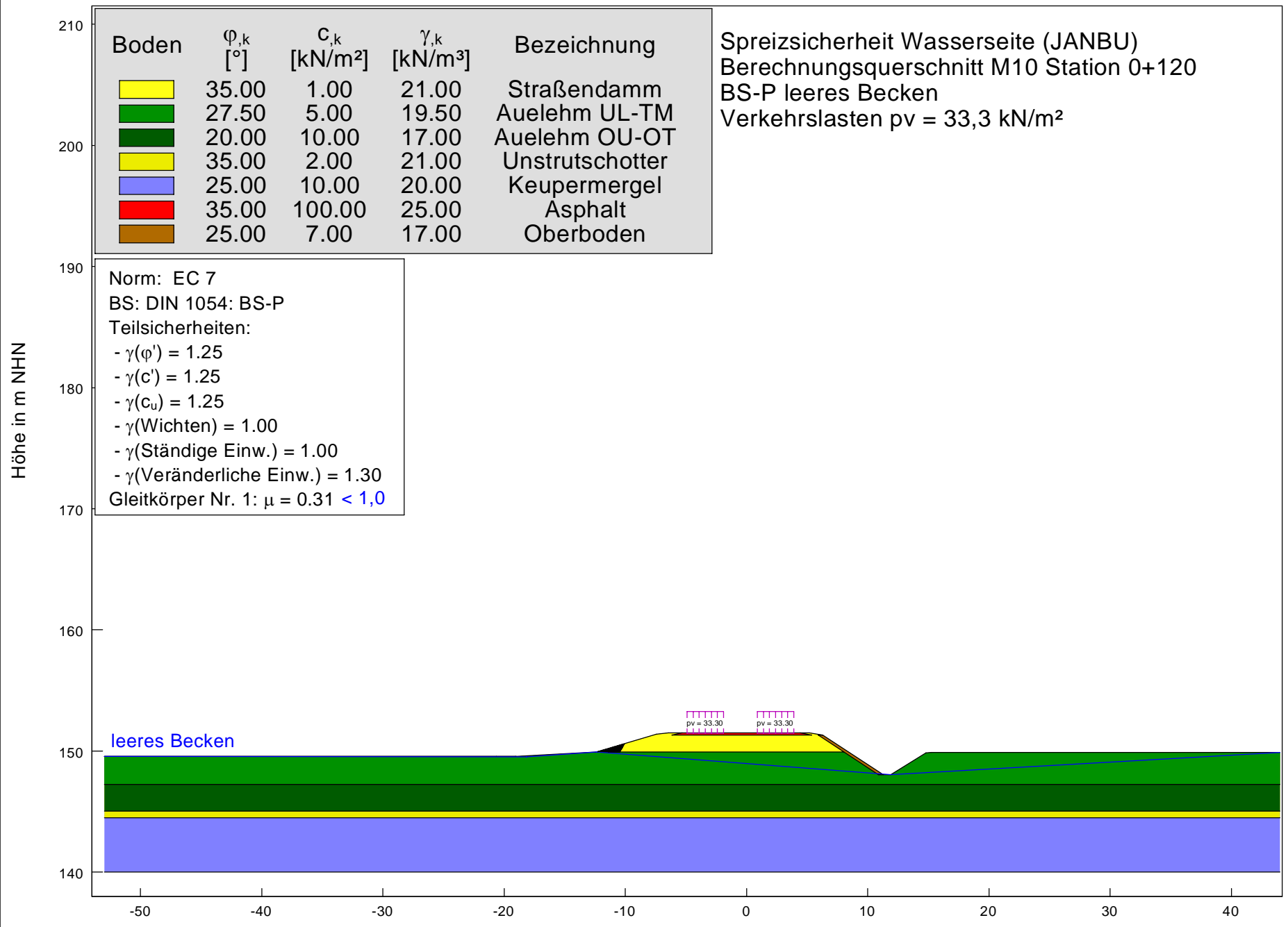
Norm: EC 7
BS: DIN 1054: BS-P
Ungünstigster Gleitkreis:
 $\mu_{\max} = 1.00$
 $x_m = -5.85 \text{ m}$ $y_m = 151.59 \text{ m}$
 $R = 0.81 \text{ m}$
Teilsicherheiten:
- $\gamma(\phi') = 1.00$
- $\gamma(c') = 1.00$
- $\gamma(c_u) = 1.00$
- $\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$
- $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.00$

Gamma Rv = 1,3
Gamma Q = 1,3

Höhe in m NHN






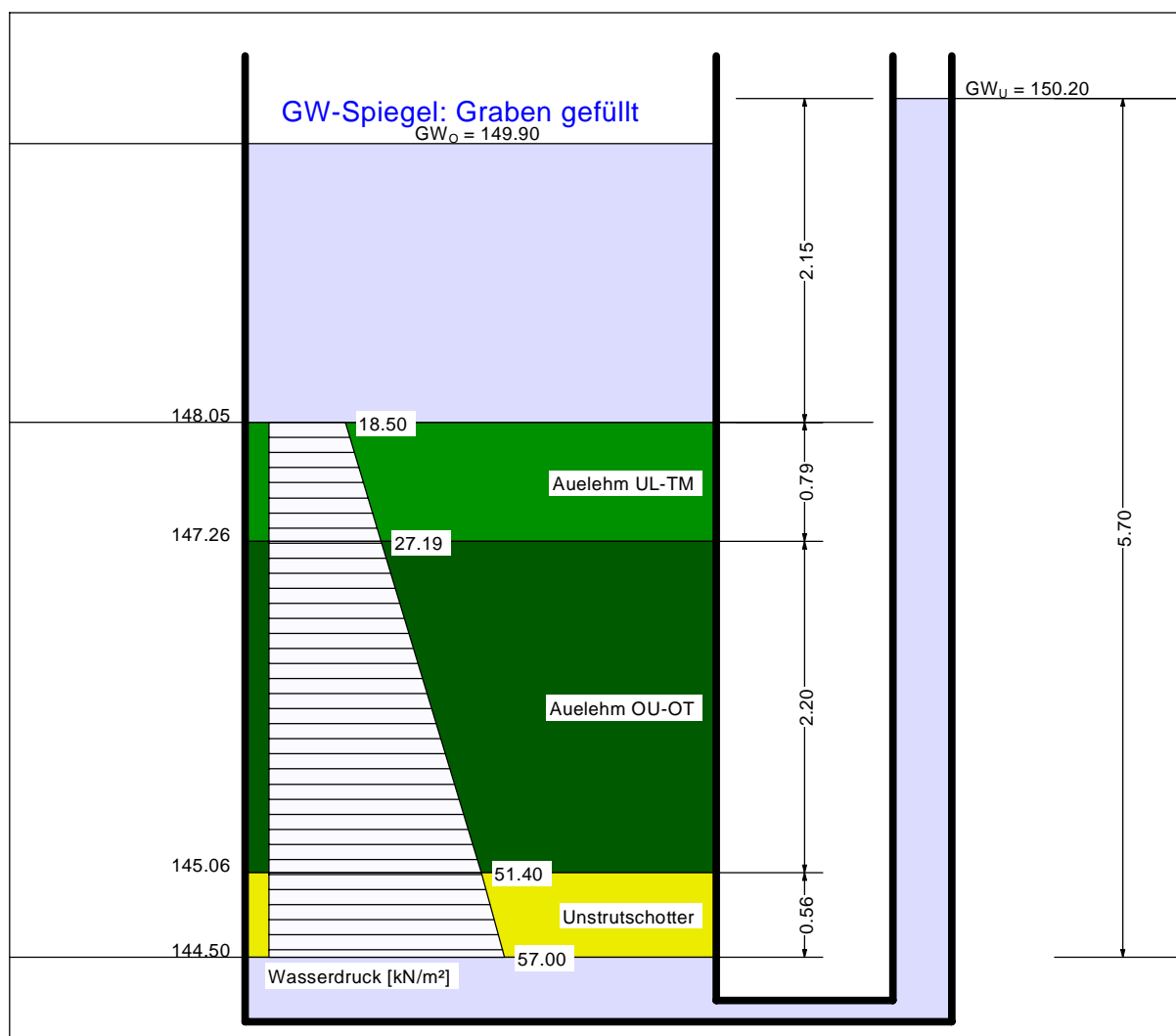




Sicherheit gegen Auftrieb und hydraul. Grundbruch (BS-P.1)

Norm: EC 7
3492_BQ2_Zv
Teilsicherheiten:
 $\gamma_{G,dst} = 1.050$
 $\gamma_{G,stb} = 0.950$
 $\gamma_H = 1.450$

Boden	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	k [m/s]	Bezeichnung
	19.50	10.00	$1.0 \cdot 10^{-10}$	Auelehm UL-TM
	17.00	7.00	$1.0 \cdot 10^{-10}$	Auelehm OU-OT
	21.00	12.00	$1.0 \cdot 10^{-5}$	Unstrutschotter






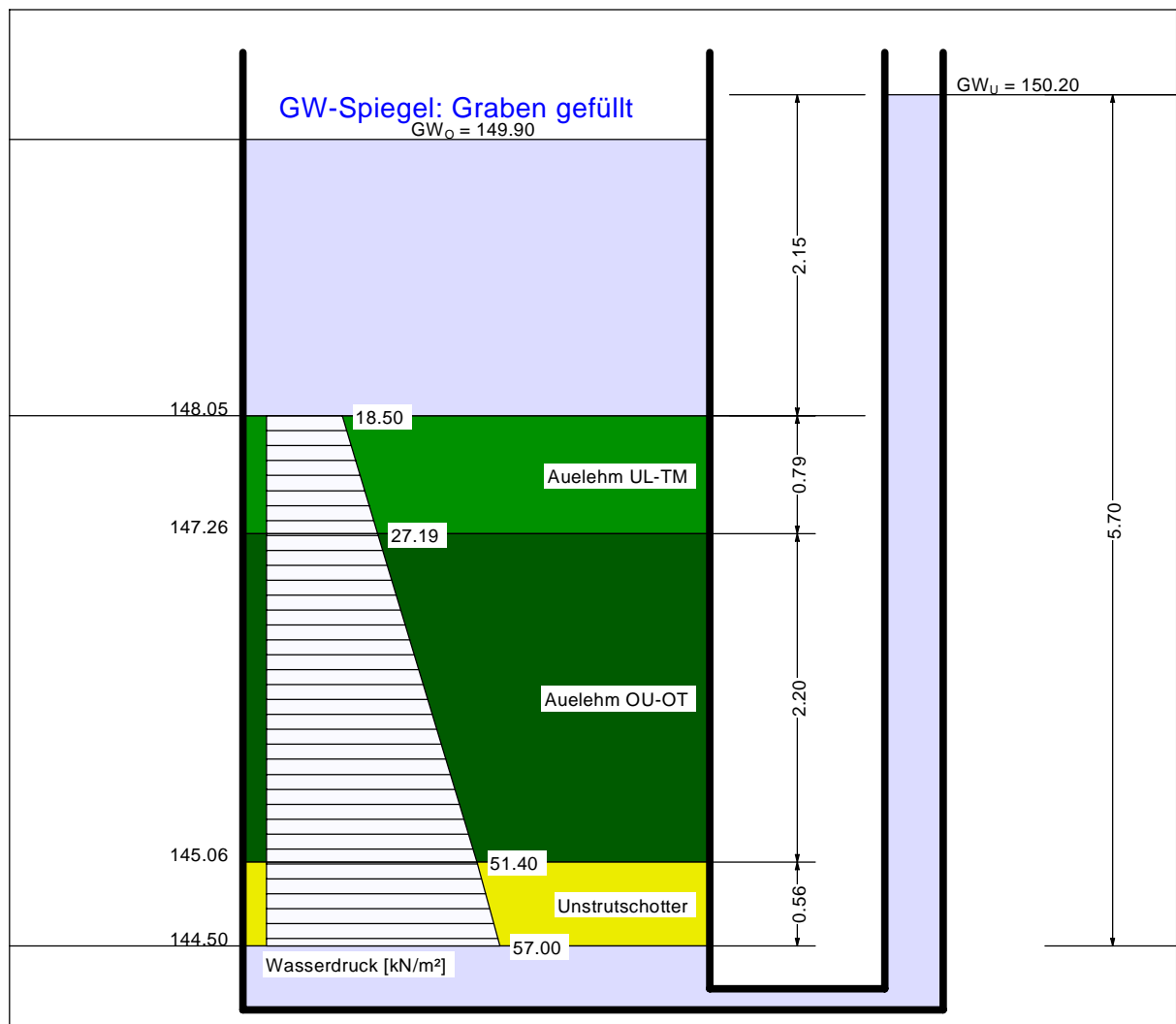
Auftriebssicherheit BS-P
Ausnutzungsgrad $\mu = 0.876$
bei = 147.260 m NHN
Gewicht = 34.300 kN/m²
 $\gamma_{G, \text{stb}} = \gamma$ (Gewicht) = 0.950
PW-Druck = 27.193 kN/m²
 $\gamma_{G, \text{dst}} = \gamma$ (PW-Druck) = 1.050
 $\mu = 1.050 \cdot 27.193 / (0.950 \cdot 34.300)$

Hydraulische Grundbruchsicherheit
Ausnutzungsgrad $\mu = 0.197$
bei = 145.060 m NHN
Gewicht = 23.300 kN/m²
 $\gamma_{G, \text{stb}} = \gamma$ (Gewicht) = 0.950
Strömungskraft = 3.000 kN/m²
 $\gamma_H = \gamma$ (Strömungskraft) = 1.450
 $\mu = 1.450 \cdot 3.000 / (0.950 \cdot 23.300)$

globale Sicherheiten: $ETA = 1,26$ und $ETA = 7,75$

Norm: EC 7
 3492_BQ2_Zv
 Teilsicherheiten:
 $\gamma_{G,dst} = 1.050$
 $\gamma_{G,stb} = 0.950$
 $\gamma_H = 1.450$

Boden	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	k [m/s]	Bezeichnung
	18.50	9.00	$1.0 \cdot 10^{-10}$	Auelehm UL-TM
	16.00	6.00	$1.0 \cdot 10^{-10}$	Auelehm OU-OT
	19.00	11.00	$1.0 \cdot 10^{-5}$	Unstrutschotter



Auftriebssicherheit BS-A
 Ausnutzungsgrad $\mu = 0.897$
 bei = 147.260 m NHN
 Gewicht = 33.510 kN/m²
 $\gamma_{G,stb} = \gamma$ (Gewicht) = 0.950
 PW-Druck = 27.193 kN/m²
 $\gamma_{G,dst} = \gamma$ (PW-Druck) = 1.050
 $\mu = 1.050 \cdot 27.193 / (0.950 \cdot 33.510)$

Hydraulische Grundbruchsicherheit
 Ausnutzungsgrad $\mu = 0.225$
 bei = 145.060 m NHN
 Gewicht = 20.310 kN/m²
 $\gamma_{G,stb} = \gamma$ (Gewicht) = 0.950
 Strömungskraft = 3.000 kN/m²
 $\gamma_H = \gamma$ (Strömungskraft) = 1.450
 $\mu = 1.450 \cdot 3.000 / (0.950 \cdot 20.310)$

globale Sicherheiten: ETA = 1,23 und ETA = 6,76