

Fugro Germany Land GmbH

Wolfener Str. 36 U

12681 Berlin

Fugro Germany Land GmbH • Wolfener Str.36 U • 12681 Berlin

German LNG Terminal GmbH

Elbehafen

25541 Brunsbüttel

Ihr Zeichen, vom
E-Mail, 21.01.2020Unser Zeichen, Name
E-Mail vom 20.01.2020Telefon, E-Mail
+4917611006613
f.ulbricht@fugro.comDatum
23.06.2021**Brunsbüttel LNG Terminal – Fachgutachterliche Stellungnahme zum Setzungsverhalten unter Straßen und Projektflächen**

Mit der E-Mail vom 14.06.2021 [U1] hat die German LNG Terminal GmbH die Fugro Germany Land GmbH mit der Abschätzung der wahrscheinlichen Setzungen unter den geplanten Straßenprofilen und Projektflächen beauftragt. Der Arbeitsumfang wurde auf Grundlage der e-mail vom 03.06.21 in der Bestellung (PO) GLNG-PO-20213035 festgelegt.

Veranlassung und Aufgabenstellung

Die für den Bauantrag notwendigen Unterlagen erfordern neben dem Baugrundgutachten für das geplante LNG Terminal vom 13.09.2019 [U7] eine Setzungsabschätzung für die geplanten Straßen und Projektflächen. Der Fokus des Baugrundgutachtens lag im Wesentlichen auf der Charakterisierung der tragfähigen Bodenschichten unterhalb der weichen, nicht tragfähigen Schicht 1a im Bereich der geplanten LNG-Tanks. Die für die Planung und Konstruktion der Straßen, Gleisanbindung und Projektflächen maßgebliche, sehr gering tragfähige Schicht 1a hat innerhalb der von Fugro erkundeten Projektflächen eine Mächtigkeit von ca. 16,3m bis 19,6m und ist ohne bodenverbessernde Maßnahmen nicht tragfähig und muss dementsprechend verbessert werden. Eine mögliche Verbesserungsmaßnahme ist das Überschüttverfahren nach [U8] in Verbindung mit Horizontal- und Vertikaldräns. Die flächenhafte Aufschüttung von z.B. Sand zur Auffüllung der

Fugro Germany Land GmbH | Handelsregister-Nr.: HRB 51551 B | Ust.-IdNr.: DE 170 294 693 | Geschäftsführer/Director: Dr. Martin Bernhard
Deutsche Bank AG, IBAN: DE83 1007 0000 0960 3002 00, BIC: DEUTDE33XXX | Bank Mendes Gans N.V. IBAN: NL75BKMGG0261342908. BIC: BKMGNL2AXXX
With operating companies throughout the world

Projektflächen sowie die flächen- und linienhafte Aufschüttung von Dämmen für Straßen wird auf Grundlage der sehr geringen Tragfähigkeiten der Schicht 1a zu Setzungen im Dezimeter bis Meterbereich führen. In der vorliegenden Stellungnahme werden die relevanten Bodenkennwerte und ingenieurtechnischen Parameter der Schicht 1a aus unterschiedlichen Projekten aufbereitet, für die Anwendbarkeit innerhalb der Projektflächen des geplanten Brunsbüttel LNG Terminals bewertet bzw. die Bodenparameter verglichen und für ausgewählte Projektbereiche innerhalb der Grenzen des geplanten LNG-Terminals wahrscheinliche Setzungen ermittelt.

Unterlagen

- [U1] E-Mail vom 14.06.2021, 10:07 Uhr, Betreff: GLNG Brunsbüttel – Settlement Analysis – PO;
Anhang: GLNG-PO-20213035_Fugro.pdf

- [U2] E-Mail vom 11.06.2021, 15:38 Uhr, Betreff: GLNG Brunsbüttel – Settlement Analysis
Inhalt: groundwater level and groundwater monitoring

- [U3] E-Mail vom 11.06.2021, 15:28 Uhr, Betreff: GLNG Brunsbüttel – Settlement Analysis
Inhalt: soil conditions along planned railway alignment and possible measures for soil improvement consisting of preloading and drainage during preloading; comment on Prüfhinweis 1024; Anhang: 1024 Klärungspunkt APV (3).docx

- [U4] E-Mail vom 08.06.2021, 09:36 Uhr, Betreff: GLNG Brunsbüttel – Settlement Analysis
Inhalt: Vorhabenplan 1.4; Bauantragsinformation; Detailplanung der BE Flächen mit Schnitten; Topographic Survey; Anhang: GLNG-BRUNS-VHP-Unterlage 1.4.pdf; GLNG-BRUNS-VHP-Unterlage 1.5.pdf; BAUANTRAGSINFORMATIONEN_c_WS070620231.pdf; 2.8.3-koordinierter Leitungsplan_2021-03-05.pdf; 2.8.5-Übersichtsplan_2021-03-05.pdf; 2.8.6-Baustelleneinrichtungsfläche Schnitt A-A_2021-03-05.pdf; GG-OC01-000-CIV-REP-00265_00.pdf

- [U5] E-Mail vom 27.05.2021, 14:32 Uhr, Betreff: German LNG: Setzungsbetrachtung TenneT Link bzw. Anlagen: A100_KON_BRUN_Antrag__8_BImSchG_03_Kap.1-12.pdf; A100_KON_BRUN_Antrag__8_BImSchG_04_Kap.13.pdf

- [U6] E-Mail vom 02.09.2021, 13:57 Uhr, Betreff: Antwort: AW: Antwort: Brunsbüttel LNG: Tanksetzungsberechnungen von Tractebel; Inhalt: Verweis auf die ausgehändigten

Bodenverbesserungsmaßnahmen „Kohlekraftwerk“ – Untersuchungen als auch
Vielzweckhafen MPP; Anlagen: geotechn. Bericht Teil 2 Hinterland_11.12.2014.pdf

[U7] Fugro Germany Land GmbH (19.03.2021): Geotechnisches Baugrundgutachten
Bodenuntersuchung für Brunsbüttel LNG Terminal, Fugro Dokument No.: 362 19
006_DE_rev05

[U8] Merkblatt über Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund (Ausgabe 2010),
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 542, Arbeitsgruppe Erd-
und Grundbau

[U9] Technischer Bericht: Ausführen und Interpretieren von Setzungsberechnungen von
Prof. Dr.-Ing. Otfried Beilke und Dipl.-Ing. Uwe Scheunemann, 2016-02-26

[U10] E-Mail vom 21.06.2021, 10:03 Uhr, Betreff: WG: Eisenbahn der Brunsbüttel Ports –
Unterlagen; Inhalt: Rangiergeschwindigkeit, Verkehrslast nach UIC 71,
Designgeschwindigkeit, Maßnahmen im Bereich vorhandener Gleise

Datengrundlage und Vergleichbarkeit der Bodenparameter

Fugro: Im Rahmen der Baugrunderkundung für das geplante Brunsbüttel LNG-Terminal [U7] wurde die nicht tragfähige **Schicht 1a** als weich bis breiiger, schluffiger Ton mit organischen Beimengungen (Klei) angesprochen und der Bodengruppe TA-OT zugeordnet. Innerhalb der Kleischicht gibt es lokale Torfeinlagerungen. Eine Auswertung der 23 Drucksondierungen im LNG-Projektgebiet ergibt eine Unterkante der Kleischicht von 16,3m bis 19,6m unter GOK. Die Drucksondierungsergebnisse zeigen ebenfalls, dass die, die Kleischicht überlagernde Schicht aus anthropogener Auffüllung mit einer Mächtigkeit von 0,5m bis 3,2m nicht flächendeckend aus rolligem Material besteht, sondern punktuell verteilt ist und in ca. 75% der Drucksondierungen eher als feinkörniges Material interpretiert wird. Es wurden in 4 Bohrungen 9 ungestörte Proben entnommen und über Laborversuche klassifiziert. Insgesamt wurden 9 Sieb-Schlämmungen, 8 Konsistenzgrenzen sowie 2 einaxiale Druckversuche am Klei durchgeführt. Das In-Situ-Spannungs-Dehnungsverhalten im Klei wurde zusätzlich mit in 2 Bohrungen mit jeweils 5 Pressiometerversuchen ermittelt.

BGA: Unmittelbar östlich und westlich der geplanten Projektflächen des LNG-Terminals wurde eine

von der TenneT beauftragte Baugrunderkundung (BGU) zur Errichtung einer Konverterstation durchgeführt. Die Feldarbeiten und die Erstellung des geotechnischen Berichtes vom 04.12.2019 sowie weiterführender Stellungnahmen zum Setzungsverhalten der gering tragfähigen Schicht [U5] erfolgten durch das Ingenieurbüro BGA. Im Rahmen der BGU wurde die nicht tragfähige Schicht mit steifer und weicher bis sehr weicher Konsistenz angesprochen und den Bodengruppen TM, TA und OT zugeordnet. Im Bereich der Konverterstation wurde die Unterkante der Kleischicht über 23 Drucksondierungen bei ca. 13,9m bis 16,2m unter GOK ermittelt. Die Weichschicht wird von einer Aufschüttung bzw. Auffüllung überlagert. Die Aufschüttung hat nach [U5] eine Mächtigkeit von rund 1,2m bis 3,2m. Es wurden in 2 Bohrungen 4 gestörte- und 4 ungestörte Proben entnommen. An den gestörten Proben wurden Klassifikationsversuche und an den ungestörten Bodenproben einaxiale Druckversuche durchgeführt.

IGB: Unmittelbar südöstlich der geplanten Projektflächen des LNG-Terminals wurde eine von der Stadt Brunsbüttel beauftragte Baugrunderkundung (BGU) zur Anbindung eines geplanten Vielzweckhafens (VZH) mit dem Hinterland über eine ebenfalls geplante Brücke mit Zufahrtsrampe und Erschließungsstraßen durchgeführt. Die Erstellung des geotechnischen Berichtes vom 11.12.2014 [U6] erfolgten durch die IGB Ingenieurgesellschaft MBH. Im Rahmen der BGU wurde die nicht tragfähige Schicht in eine obere Kleischicht und eine unter Kleischicht getrennt. Zwischen den beiden Kleischichten befindet sich eine Torfschicht. Die obere Kleischicht hat eine breiig bis weiche Konsistenz und wird der Bodengruppe TM, TA zugeordnet. Die untere Kleischicht hat ebenfalls eine weich-breiige Konsistenz und wird der Bodengruppe UA (OT) zugeordnet. Im Projektbereich der Untersuchung durch IGB kann die Unterkante der Kleischicht auf Grundlage von 10 Drucksondierungen bei ca. 17,2m bis 21,5m unter GOK angegeben werden. Die Weichschicht wird von einer Aufschüttung bzw. Auffüllung überlagert. Die Aufschüttung hat nach [U6] eine Mächtigkeit von rund 0m bis 4,0m, wobei in 9 von 10 Drucksondierprofilen eine vorrangig granulare Schicht mit einer Mächtigkeit von mindestens 1,5m festgestellt werden kann. In 2 Bohrungen wurden 9 ungestörte Proben entnommen und Klassifikationsversuche sowie einaxiale Druckversuche durchgeführt. Insgesamt wurden an jeder Bohrung im Bereich der Weichschicht jeweils 4 Bodenproben im einaxialen Druckversuch untersucht und die spannungsabhängigen Steifemodule (E_s) sowie Konsolidationsbeiwerte (c_v) und Durchlässigkeitsbeiwerte (k) für jede Laststufe abgeleitet.

In Summe wurden aus den drei oben genannten Projektgebieten 20 Klassifikationsergebnisse

bestehend aus Wassergehalten, Sieblinien, Konsistenzgrenzen und Glühverlusten in Verbindung mit den Ergebnissen der Drucksondierung miteinander verglichen und für vergleichbar befunden. Die Eigenschaften der nicht tragfähigen Kleischicht in den drei Projektgebieten unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Die ermittelten Wassergehälter und Konsistenzgrenzen bzw. Konsistenzzahlen liegen alle innerhalb vergleichbarer Bandbreiten. Zum Beispiel liegt der Wassergehalt aus 7 BGA-Proben zwischen 38,5% bis 92,2% (im Mittel 63,5%), aus 8 Fugro-Proben zwischen 35,5% bis 93,5% (im Mittel 63,1%) und aus 8 IGB-Proben zwischen 43,1% bis 108,4% (im Mittel 78,7%). Der aus geotechnischer Sicht unwesentlich höhere mittlere Wassergehalt des Kleis im IGB-Projektgebiet kann damit erklärt werden, dass das Projektgebiet näher an der Elbe liegt.

Um die Homogenität der Kleischicht im LNG-Projektgebiet zu verdeutlichen wurden in Anlage 1 der Stellungnahme alle 22 Drucksondierungsergebnisse der CPT, die innerhalb der LNG-Projektfläche durchgeführt wurden, nach Handbuch EC7 Band 2 in die undrained Scherfestigkeit überführt und in einem Tiefenprofil dargestellt. In Anbetracht der Datenfülle ist die Horizontale Achse des Tiefenprofils im logarithmischen Maßstab dargestellt, um die Überschaubarkeit zu erhöhen. Die CPT-Profilübersicht in Anlage 1 zeigt sehr anschaulich die homogene Verteilung der Konsistenz, die im vorliegenden Fall über die undrained Scherfestigkeit veranschaulicht wird. Das Profil zeigt auf Grundlage der gesamten LNG-Projektfläche eine Schwankungsbreite der undrained Scherfestigkeit von beispielsweise ca. 10 bis 50kN/m² in 6,0m Tiefe und 20kN/m² bis 40kN/m² in 12,0m Tiefe. Unter Annahme eines Koeffizienten $N_k = 15$ liegt die mittlere undrained Scherfestigkeit der Kleischicht zwischen 10kN/m² und 40kN/m², was gut mit den in [U5] und [U6] genannten undrained Scherfestigkeiten übereinstimmt. Zusätzlich wurden in [U5] 8 Laborflügelsondierungen nach DIN 18137 im Klei durchgeführt, um die undrained Scherfestigkeit direkt an der ungestörten Probe zu bestimmen.

Auf Grundlage der Klassifikationsergebnisse und der abgeleiteten Scherfestigkeitsparameter sowie Scherfestigkeitsverteilungen über die Tiefe werden die nicht tragfähigen Weichschichten (Klei) der 3 unterschiedlichen Projektbereiche in ihren baugrundtechnischen Eigenschaften als vergleichbar eingeschätzt.

Steifeprofil

BGA: In [U5] wird der Steifemodul E_s auf Grundlage der Ergebnisse von 3 einaxialen Druckversuchen für weichen Klei zwischen 0,5 MN/m² und 1,0 MN/m² und für steifen Klei zwischen

1,0MN/m² und 2,0 MN/m² angeben. Die angegebenen Bandbreiten gelten für einen Spannungsbereich von 40kN/m² bis 80kN/m². Das mittlere Verhältnis zwischen Steifemodulbandbreite und Bandbreite der undränderten Scherfestigkeit beträgt in [U5] $E_s/c_u = 66$.

IGB: In [U5] wird der Steifemodul E_s auf Grundlage der Ergebnisse von 8 einaxialen Kompressionsversuchen für die obere Kleischicht mit $\sim 1,0 \text{ MN/m}^2$ und für die unteren Kleischichten zwischen 0,5MN/m² und 2,0 MN/m² angeben. Das mittlere Verhältnis zwischen Steifemodulbandbreite und Bandbreite der undränderten Scherfestigkeit beträgt in [U6] $E_s/c_u = 25$ für die obere Kleischicht und $E_s/c_u = 40-50$ für die untere Kleischicht.

Fugro: Die Bandbreite des charakteristischen Steifemoduls im LNG-Projektbereich ist unter Berücksichtigung der Daten aus [U5], [U6] und [U7] und in Verbindung mit den c_u -Profilgrenzen in Anlage A1 in Tabelle 1 zusammengestellt. Der Mittelwert $E_{s,m}$ der unteren und obere Grenze des Steifemodulprofils wird nachfolgend als Grundlage zur Berechnung der wahrscheinlichen Setzungen herangezogen. Die Ergebnisse der wahrscheinlichen Setzungen sind in Anlage B enthalten. Die möglichen Setzungen ergeben sich aus der Verwendung der unteren Werte $E_{s,u}$.

Tabelle 1: Untere, obere Grenze und Mittelwert des Steifemoduls für das LNG-Projektgebiet ($N_k = 15$; $E_s/c_u = 50$ bzw. 25 für Torf)

Tief in m u. GOK	Undränderte Scherfestigkeit c_u (kN/m ²) Untergrenze	Undränderte Scherfestigkeit c_u (kN/m ²) Obergrenze	Steifemodul $E_{s,u}$ (MN/m ²) Untergrenze	Steifemodul $E_{s,o}$ (MN/m ²) Obergrenze	Steifemodul $E_{s,m}$ (MN/m ²) Mittelwert
1,5	30	100	1,5	5,0	3,2
3,5	15	40	0,7	2,0	1,4
6,0	10	25	0,2	0,6	0,4
9,0	15	45	0,7	2,2	1,5
12,0	15	30	0,7	1,5	1,1
15,0	20	35	1,0	1,7	1,4
17,0	30	55	1,5	2,7	2,1

Grundwasser und Topografie

In [U7] wird detailliert auf die Grundwassersituation im LNG-Projektgebiet eingegangen. Während der Feldarbeiten wurden 2 Grundwassermessstellen (GWMS) installiert. In 4 von 5 direkten Aufschlüssen wurde Grundwasser zwischen -0,42m NHN und -0,72m NHN und in den beiden GWMS bei -0,62m NHN eingemessen. Basierend auf den Vermessungsdaten der Erkundungspunkte der Baugrunderkundung (BGU) liegt das Gelände zwischen 0,49m und 2,53m

NHN. Detaillierte Höhen- bzw. Topografiedaten können dem Lage- und Höhenplan [U4] entnommen werden. Wie in [U6] dokumentiert, kann es besonders in den Wintermonaten im LNG-Projektbereich zu höheren Wasserständen im ersten freien Wasserhorizont kommen, der infolge der gering durchlässigen Kleischicht zu gut sichtbaren Wasserflächen führen kann. [U6] empfiehlt aus diesem Grund den Bemessungswasserstand zu +2,2m NHN auszusetzen. Neben den zwei bereits installierten GWMS, in denen Grundwassermonitoring seit 2019 erfolgen kann, sind zur Anpassung bzw. Bestätigung des empfohlenen Bemessungswasserstandes 6 weitere GWMS mit einer Tiefe von 2x20m und 4x6m im LNG-Projektgebiet geplant.

Für die Berechnung der wahrscheinlichen Setzungen wurde der Grundwasserspiegel bei Oberkante Gelände (GOK) angenommen.

Setzungsverhalten Projektflächen

Auf Grundlage der in Tabelle 1 zusammengestellten Steifemodulprofile ($E_{s,u}$ und $E_{s,m}$) wurden mit GGU-Settle (Version 5.02) Setzungsberechnungen nach DIN 4019 ausgeführt. Die Wichte des Schüttmaterials wurde mit $19,0 \text{ kN/m}^3$ angesetzt. Bei den Berechnungen wird nicht zwischen Sand und Schotter unterschieden sowie die Entlastung durch Abtrag des Oberbodens vernachlässigt.

Die Grundlagen bzw. Randbedingungen wie Schütthöhen, mittlere Geländehöhe und die Gesamtabmessungen der Schüttflächen wurden den Bauantragsinformationen [U4] entnommen und sind in Tabelle 2 den wahrscheinlichen Setzungen, basierend auf $E_{s,m}$ und den möglichen Setzungen basierend auf $E_{s,u}$, gegenübergestellt.

Tabelle 2: Projektflächen – wahrscheinliche und mögliche Setzungen

LNG-Projektbereich	Abmessungen Länge x Breite (m)	Mittlere Geländehöhe vor Aufschüttung (m NHN)	Aufschüttung (m)	wahrscheinliche Setzungen (m)	mögliche Setzungen (m)
Bereich Gebäude	240 x 150	1,50	1,20	0,36	0,67
Anlagentechnik	240 x 180	1,40	1,20	0,36	0,67
LNG-Tank T-211	140 x 120	1,00	0,40	0,08	0,15
LNG-Tank T-221	140 x 120	0,70	0,80	0,21	0,40
TKW-Beladung	130 x 120	1,60	1,20	0,36	0,67
EKW-Beladung	340 x 75	1,50	1,50	0,45	0,83

Die in Tabelle 2 zusammengestellten wahrscheinlichen Setzungen können infolge heterogen

verteilter Bodeneigenschaften und Mächtigkeit der Kleischicht mit eingeschlossenen Torflagen stark schwanken. Im verwendeten Steifeprofil mit einer mittlere Gesamtmächtigkeit von 17,0m wurde pauschal eine 2,5m mächtige Torfschicht angesetzt, die nicht flächendeckend vorhanden sein muss und an einigen Stellen durchaus auch dicker als 2,5m sein kann. Die genauere Auskartierung der Torflagen entlang der geplanten Straßen und Eisenbahnanbindung ist ein Grund für weitere Drucksondierungen die ggf. durch Kleinrammbohrungen (KRB) unterstützt werden können.

Die Gesamtmächtigkeit der Klei- bzw. Weichschicht schwankt im LNG-Projektbereich an den CPT-Lokationen zwischen 16,3m bis 19,6m. Neben der Durchlässigkeit k und dem Konsolidationsbeiwert c_v ist die Mächtigkeit der wenig durchlässigen Schicht, der wesentliche Parameter für die Konsolidationszeit bzw. die Zeit, die benötigt wird, bis sich die wahrscheinlichen Setzungen eingestellt haben. Die Auflast, die durch die Aufschüttung auf den Boden aufgebracht wird, erzeugt in der Weichschicht einen Porenwasserüberdruck, der über die Konsolidationszeit abgebaut wird.

Eine ausführlichere Aussage zum Zeit-Setzungsverhalten der Weichschicht mit und ohne Vertikaldrains wird im letzten Abschnitt der Stellungnahme gegeben. In den Übergangsbereichen der Projektflächen kann es zu Erhöhungen der rechnerischen Setzungen kommen, da sich dort die Setzungseinwirkungen gegenseitig beeinflussen. Mitnahmesetzungen unter bereits existierenden Strukturen sind ebenfalls möglich.

Setzungsverhalten Straßen

Laut den Unterlagen von [U4] soll entlang der nördlichen Grenze der Baustelleneinrichtung beginnend von der Otto-Hahn-Straße eine Zufahrtsstraße zum geplanten LNG-Projektgebiet errichtet werden. Die Straße soll eine Asphaltdecke erhalten und nach RStO 12 nach der Belastungsklasse Bk 1,8 dimensioniert bzw. geplant werden. Nach der alten RStO 86 entspricht die Belastungsklasse Bk 1,8 der alten Bauklasse III.

Für eine Straße der Bauklasse III empfiehlt das „Merkblatt über Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund“ [U8] eine verbleibende Schüttkörperdicke (einschließlich Oberbau) $h_p \geq 2,0\text{m}$. Bei einem geplanten Oberbau von 0,65 m Dicke müssen nach Rückbau der Überschüttung mindestens

$2,0 - 0,65 = 1,35\text{m}$ Dammschüttung verbleiben. Zur Vereinfachung wird nachfolgend von einer verbleibenden Mindestschüttkörperhöhe ohne Straßenoberbau von $1,5\text{m}$ ausgegangen. Das Überschüttverfahren wird auf Grundlage von [U8] geführt und die Nomenklatur des Merkblattes [U8] verwendet.

Um die Setzungen aus Verkehr und Oberbau vorwegzunehmen, ist rechnerisch eine Überschüttung $h_{\text{ü}}$ des Schüttkörpers von $\geq 1,5\text{m}$ erforderlich. Die $1,5\text{ m}$ ergeben sich aus $(q+g)/\gamma = (15+14)/19 \approx 1,5\text{m}$, wobei als Aufschüttungs- bzw. Überschüttungsmaterial Sand mit einer Feuchtwichte von $\gamma = 19\text{ kN/m}^3$ angesetzt wurde. Hierbei wird als die setzungswirksame Verkehrslast $q = 15,0\text{kN/m}^2$ angenommen, was in etwa der Ersatzflächenlast eines 40to LKW bzw. ca. 50% der Ersatzflächenlast des SLW 60 entspricht. Die zu 100% setzungswirksame ständige last aus dem Oberbau der Straße wird für den geplanten Gesamtaufbau von $0,65\text{ m}$ zu $g = 14,0\text{kN/m}^2$ angenommen.

Wie in [U8] empfohlen, sollte die Auf- bzw. Überschüttung mindestens bis an den beidseitig vorhanden Böschungsfuß herangeführt werden, um die gewollte Vorwegnahme der Setzungen zu erhöhen. Für die Setzungsberechnungen zusammengestellt in Anlage 3 wurde eine Dammkronenbreite des Schüttkörpers von $5,5\text{m}$ und eine Böschungsneigung beidseitig von $1:1,5$ angenommen. Weiterhin wird eine verbleibende Schüttkörperdicke ohne Straßenoberbau von $1,5\text{m}$ angenommen. Bei der Setzungsberechnung wurde die Straßenlänge auf $200,0\text{m}$ begrenzt.

In Tabelle 3 sind die der Schütthöhe h_s entsprechenden wahrscheinlichen Setzungen des Steifeprofils $E_{s,m}$ gegenübergestellt. Eine Schütthöhe von $3,0\text{m}$ erzeugt beispielsweise eine wahrscheinliche Setzung von ca. $0,62\text{m}$. Nachdem sich die wahrscheinlichen Setzungen von $0,62\text{m}$ eingestellt haben, bzw. mittels baubegleitender Messungen eine Konvergenz der Setzungen zu verzeichnen ist, kann die Mindestüberschüttung $h_{\text{ü}} \geq 1,5\text{m}$ zurückgebaut werden, wobei eine Schütthöhe (ohne Straßenoberbau) $h_p \geq 1,5\text{m}$ verbleibt. Infolge der Setzung von ca. $0,62\text{m}$ befinden sich dann 40% der verbleibenden Schütthöhe h_p unter der ursprünglichen Geländehöhe und 60% über der ursprünglichen Geländehöhe.

Tabelle 3: Straßendamm – wahrscheinliche Setzungen in Abhängigkeit der Schütthöhe

Straßendamm Schütthöhe h_s (m)	Länge x Breite Dammkrone/ Dammfuß (m)	Flächenlast Dammkrone (kN/m ²)	wahrscheinliche Setzungen (m)	verbleibende Schütthöhe h_p (ohne Dicke Oberbau) nach Rückbau der Überschüttung h_u (m)
1,0	200 x 5,5/8,5	19,0	0,13	-
2,0	200 x 5,5/11,5	38,0	0,36	-
3,0	200 x 5,5/14,5	57,0	0,62	1,5
3,5	200 x 5,5/16,0	66,5	0,74	2,0
4,0	200 x 5,5/17,5	76,0	0,87	2,5

Je höher die zeitlich begrenzte Überschüttung h_u gewählt wird, desto geringer wird das Risiko von ungeplanten Setzungen nach Fertigstellung und Freigabe der Straße und desto schneller werden sich die rechnerischen Setzungen einstellen.

Auf Grundlage der vorgenannten Daten erscheint das Überschüttverfahren mit einer Schütthöhe h_s von 3,0 bis 3,5 m als praktikabel, wobei nach der Standzeit und erfolgreicher Konsolidation einer Überschüttung $h_u = 1,5\text{m}$ zurückgebaut werden muss. Die Setzungen sind mit baubegleitenden Messungen zu überwachen. Hinweise zu den baubegleitenden Messungen wird in Abschnitt „Baubegleitende Messungen gegeben. Um das Setzungsverhalten unter dem Damm zu beschleunigen können Vertikaldräns eingesetzt bzw. installiert werden. Beim Einsatz von Vertikaldräns und die damit verbundenen Bedingungen sind z.B. in [U8] enthalten. Hinweise zum Zeit-Setzungsverhalten der Weichschicht werden in einem separaten Abschnitt gegeben. Da die zugrunde gelegten wahrscheinlichen Setzungen geringer sind als die möglichen Setzungen muss nach dem Bau damit gerechnet werden, dass Lageänderungen des Straßenoberbaus ggf. durch Instandsetzungsarbeiten ausgeglichen werden müssen. Zudem muss der Straßenoberbau so hoch liegen, dass immer ein ausreichender Abstand zum oberflächennah anstehenden Grundwasser vorhanden ist. Die Dammschüttung sollte durch ein wasserdurchlässiges Geotextil vom anstehenden Boden getrennt werden. Nach [U8] sollten Grasnarben vor der Schüttung nicht zerstört, sondern lediglich kurzgeschnitten werden.

Setzungsverhalten Eisenbahndamm

Die Eisenbahnanbindung zwischen der vorhandenen Gleis und der geplanten LNG-Projektfläche soll auf Grundlage des technischen Aufklärungsgespräch mit German LNG vom 18.06.21 zweigleisig errichtet und wie in [U10] gefordert nach dem Lastmodell 71 (LM71) bemessen werden.

Die charakteristischen Lasten des LM 71 bestehen aus 4 Einzellasten $Q_{vk} = 250 \text{ kN}$ auf einer Länge von 6,4m beidseitig begrenzt durch eine unbegrenzte Linienlast $q_{vk} = 80 \text{ kN/m}$. Nach RIL 836.2001 bzw. DIN Fachbericht 101 dürfen die Einzellasten des Lastbildes LM 71 für die Ermittlung von Beanspruchungen aus Eisenbahnverkehrslasten in eine Ersatzstreifenlast von 52 kN/m^2 auf einer Breite von 3,0 m pro Gleis umgerechnet werden. Die beiden unbegrenzten Linienlasten $q_{vk} = 80 \text{ kN/m}$ dürfen ebenfalls in eine Streifenlast von $26,7 \text{ kN/m}^2$ auf einer Breite von 3,0m pro Gleis umgerechnet werden.

Die Einwirkzeiten von Verkehrslasten auf Böden sind verhältnismäßig kurz bzw. wesentlich kürzer als die von ständigen Lasten. Somit erzeugen Verkehrslasten zwangsläufig auch eine geringere Konsolidierung in bindigen Böden pro Zeiteinheit. Es wird aus diesem Grund in einen setzungswirksamen Verkehrslastanteil und einen nicht setzungswirksamen Verkehrslastanteil unterschieden [U9]. In der Praxis wird der setzungswirksame Anteil der Verkehrslast häufig zu 30 bis 50% angenommen. Da bei Güterverkehr infolge Standzeiten, Laden und Entladen mit Längeren Einwirkzeiten zu rechnen ist, wird der setzungswirksame Anteil der Ersatzstreifenlast der Einzellasten zu 50% angenommen, was $52 \text{ kN/m}^2 \times 0,5 = 26 \text{ kN/m}^2$ ergibt. Der Setzungswirksame Anteil der beiden unbegrenzten Linienlasten des Lastbildes LM 71 ergibt sich dann zu $26,7 \text{ kN/m}^2 \times 0,5 = 13,3 \text{ kN/m}^2$.

Zur Vereinfachung und auf der sicheren Seite liegend wird die Eisenbahndammaufschüttung mit einer Streifenlast aus Verkehr von $q = 26 \text{ kN/m}^2$ über eine 10,0m breite Dammkrone betrachtet. Die ständige Last des Oberbaus bestehend aus Schiene, Schwellen und 0,5m Schotter wird ebenfalls über eine Ersatzstreifenlast $g = 10,5 \text{ kN/m}^2$ auf einer Dammkronenbreite von 10,0 m erfasst.

Um die Setzungen aus Verkehr und Oberbau vorwegzunehmen, ist rechnerisch eine Überschüttung $h_{\bar{u}}$ des Dammes von $\geq 2,0 \text{ m}$ erforderlich. Die 2,0 m ergeben sich aus $(q+g)/\gamma = (26+10,5)/19 \approx 2,0 \text{ m}$, wobei als Aufschüttungs- bzw. Überschüttungsmaterial Sand mit einer Feuchtwichte von $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ angesetzt wurde.

In Tabelle 4 sind die der Schütthöhe h_s entsprechenden wahrscheinlichen Setzungen des Steifeprofiles $E_{s,m}$ gegenübergestellt. Eine Schütthöhe von 4,0m erzeugt beispielsweise eine wahrscheinliche Setzung von ca. 0,99m. Nachdem sich die wahrscheinlichen Setzungen von 0,99m eingestellt haben, bzw. mittels baubegleitender Messungen eine Konvergenz der Setzungen zu verzeichnen ist, kann die Mindestüberschüttung $h_{\bar{u}} \geq 2,0 \text{ m}$ zurückgebaut werden, wobei eine

Schütthöhe $h_p \geq 2,0\text{m}$ verbleibt. Infolge der Setzung von ca. $1,0\text{m}$ befinden sich dann 50% der verbleibenden Schütthöhe h_p unter der ursprünglichen Geländehöhe und 50% über der ursprünglichen Geländehöhe.

Tabelle 4: Eisenbahndamm – wahrscheinliche Setzungen in Abhängigkeit der Schütthöhe

Eisenbahndamm Schütthöhe h_s (m)	Länge x Breite Dammkrone/ Dammfuß (m)	Flächenlast Dammkrone (kN/m ²)	wahrscheinliche Setzungen (m)	verbleibende Schütthöhe h_p nach Rückbau der Überschüttung h_u (m)
1,0	250 x 10/13,0	19,0	0,18	-
2,0	250 x 10/16,0	38,0	0,46	-
3,0	250 x 10/19,5	57,0	0,73	1,0
4,0	250 x 10/22,0	76,0	0,99	2,0
5,0	250 x 10/25,0	95,0	1,27	3,0

Je höher die zeitlich begrenzte Überschüttung h_u gewählt wird, desto geringer wird das Risiko von ungeplanten Setzungen nach Fertigstellung und Freigabe des Eisenbahndammes und desto schneller werden sich die rechnerischen Setzungen einstellen.

Laut Informationen der Brunsbüttel Ports GmbH [U10] wurde das Kohlegleis der vorhandenen Gleisanlage in der Nachbarschaft des LNG-Projektgebietes auf $3,0\text{m}$ Bodenverbesserung und darüberliegender hydraulisch gebundener Tragschicht (HGT) sowie $0,3\text{m}$ Kies realisiert. Zudem wurde das Schotterbett seit den 70iger Jahren regelmäßig nachgestopft, um den Konsolidationssetzungen entgegenzuwirken. Über die Höhe der Konsolidationssetzungen entlang der vorhandenen Gleisanlage liegen keine Daten vor.

Auf Grundlage der vorgenannten Daten erscheint das Überschüttverfahren mit einer Schütthöhe h_s von $4,0\text{m}$ als praktikabel, wobei nach der Standzeit und erfolgreicher Konsolidation einer Überschüttung $h_u = 2,0\text{m}$ zurückgebaut werden muss. Die Setzungen sind mit baubegleitenden Messungen zu überwachen. Hinweise zu den baubegleitenden Messungen wird in Abschnitt „Baubegleitende Messungen“ gegeben. Um das Setzungsverhalten unter dem Damm zu beschleunigen, können Vertikaldräns eingesetzt werden. Der Einsatz von Vertikaldräns und die damit verbundenen Bedingungen sind z.B. in [U8] beschrieben. Hinweise zum Zeit-Setzungsverhalten der Weichschicht werden im folgenden Abschnitt gegeben. Da die zugrunde gelegten wahrscheinlichen Setzungen geringer sind als die möglichen Setzungen muss nach dem Bau damit gerechnet werden, dass Lageänderungen des Oberbaus durch Nachstopfen des

Schotterbettes ausgeglichen werden müssen. Zudem muss der Oberbau so hoch liegen, dass immer ein ausreichender Abstand zum oberflächennah anstehenden Grundwasser vorhanden ist. Die Dammschüttung sollte durch ein wasserdurchlässiges Geotextil vom anstehenden Boden getrennt werden. Nach [U8] sollten Grasnarben vor der Schüttung nicht zerstört, sondern lediglich kurzgeschnitten werden.

Zeit-Setzungsverhalten

In [U6] wurden durch IGB insgesamt 8 einaxiale Druckversuche an Proben aus der Weichschicht durchgeführt und neben anderen Steifeparametern auch der Konsolidationsbeiwert c_v und der Durchlässigkeitsbeiwert k bestimmt. Die Ergebnisse der einaxialen Druckversuche wurden dann von IGB in ein Modell der Weichschicht überführt und die folgenden Werte für c_v und k angenommen:

- Konsolidationsbeiwert $c_v = 1,0\text{E-}07 \dots 5,0\text{E-}08 \text{ m}^2/\text{s}$
- Durchlässigkeit $k = 1,0\text{E-}8 \dots 5,0\text{E-}10 \text{ m/s}$

In Holtz and Kovacs (1981) wird auf Grundlage der U.S. Navy (1971) eine Korrelation des Konsolidationsbeiwertes c_v mit der Fließgrenze w_L für erstbelastete, wiederbelastete und umgeformte bindige Böden vorgestellt. Wird im Bereich der vorliegenden Weichschicht von einer Erstbelastung ausgegangen, kann die Beziehung $c_v - w_L$ wie folgt angegeben werden:

$$c_v = 1,535 \cdot 10^{-3} \cdot w_L^{-2,356}$$

wobei:

- | | | |
|-------|---|---|
| c_v | = | Konsolidationsbeiwert im Bereich der Erstbelastung, (m^2/s) |
| w_L | = | Fließgrenze im Bereich $w_L = 10 \dots 160$, (%) |

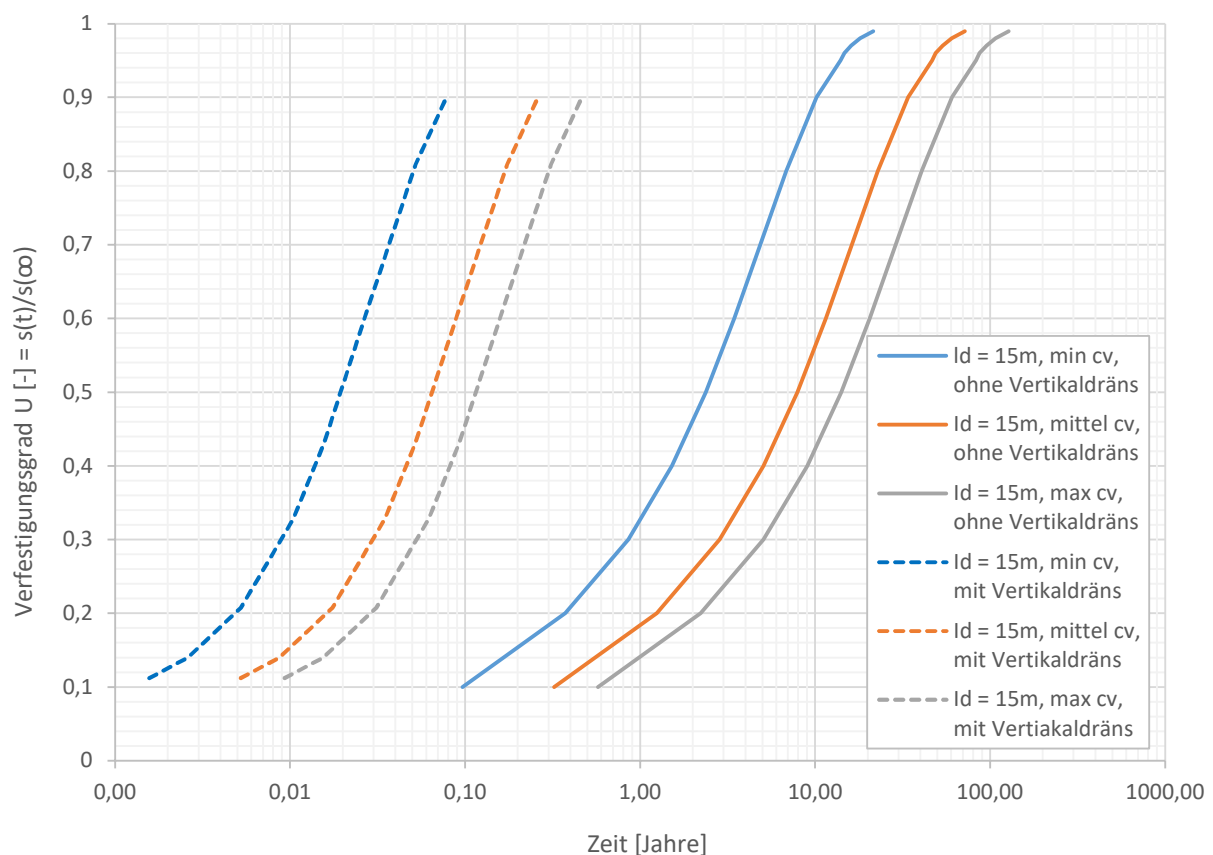
Unter Einsetzung der minimalen, maximalen und mittleren Fließgrenze, die sich aus der statistischen Auswertung von 20 Konsistenzgrenzen (ohne Ausreiser $w_L = 115,9\%$ aus IGB BK1/14 @10,5m bis 10,3m) der drei Projektgebiete ergeben, werden folgende Konsolidationsbeiwerte ermittelt:

- minimale Fließgrenze $w_L = 35,4 \%$: $c_v = 3,4\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{s}$

- maximale Fließgrenze $w_L = 97,6 \%$: $c_v = 3,2E-08 \text{ m}^2/\text{s}$
- mittlere Fließgrenze $w_L = 75,9 \%$: $c_v = 5,7E-08 \text{ m}^2/\text{s}$

Die korrelierte Bandbreite von c_v stimmt gut mit der in [U6] ermittelten und verwendeten Bandbreite überein. Die drei c_v -Werte werden somit orientierend für Zeit-Setzungsbetrachtungen im LNG-Projektgebiet verwendet und ergeben auf Grundlage von [U8] die in Abbildung 1 dargestellten Beziehungen zwischen dem Verfestigungsgrad U und der Zeit.

Abbildung 1: Beziehung zwischen Verfestigungsgrad U und der Zeit in Jahren



Der Verfestigungsgrad U repräsentiert das Verhältnis zwischen der zeitabhängigen Setzung zur maximal möglichen Setzung nach einem unendlich großen Zeitraum. Werden zur Vereinfachung die zeitabhängigen Setzungen mit den wahrscheinlichen Setzungen aus den Tabellen Tabelle 2 bis 4 gleichgesetzt, dann müssen im LNG-Projektbereich für einen Verfestigungsgrad $U = 0,9$ Konsolidationszeiten von >10 bis 60 Jahre eingeplant werden, wenn die Weichschicht im Mittel eine Mächtigkeit von 17,0m hat ($l_d = 8,5\text{m}$ bei beidseitiger Entwässerung) und keine Vertikaldräns zum Einsatz kommen.

Die Konsolidationszeit kann durch den Einsatz von Vertikaldräns mit einem mittleren Dränabstand $d_e = 1,25\text{m}$ von >10 bis 60 Jahren auf einen Zeitraum von ca. 1 bis 6 Monaten verkürzt werden. Der wesentliche Einfluss für die Verkürzung der Konsolidationszeit kommt aus der Verkürzung des vertikalen Entwässerungsweges $l_d = 17,0/2 = 8,5\text{m}$ auf $d_e = 1,25\text{m}$. In Abbildung 1 wird die Wirkung der Vertikaldräns auf den Verfestigungsgrad über die Zeit als gestrichelte Linie dargestellt. In [U8] wurde für die Berechnung von Vertikaldräns nach Barron (1948) für ein d_e/d_w -Verhältnis von rund 10 angenommen, wobei d_e den mittleren Dränabstand darstellt und d_w den wirksamen Drändurchmesser. Eine detaillierte Dimensionierung bzw. Anordnung von Vertikaldräns muss im Rahmen des geotechnischen Entwurfsberichtes nach EC7 erfolgen.

Das effektivste Dränraster in Beziehung auf Konsolidationszeit und Kosten kann auch ein mittlerer Dränabstand $d_e > 1,25\text{m}$ sein. Das muss in einer detaillierten Kosten-Nutzenanalyse ermittelt werden. In [U8] wird zwischen Sanddräns, Kunststoff-Streifendräns und Kunststoff-Runddräns unterscheiden, die alle unterschiedliche wirksame Drändurchmesser d_w haben und unterschiedliche Herstell- und Installationskosten verursachen.

Mitnahmesetzungen

Mit Mitnahmesetzungen muss gerechnet werden. Mitnahmesetzungen können beispielsweise infolge der Aufschüttungsarbeiten an existierenden Strukturen eintreten, die sich im Einflussbereich der Aufschüttungsarbeiten befinden. Die Einflussbereiche der Aufschüttungsarbeiten können aus den Anlagen 2 bis 4 abgelesen werden. Das Projektgebiet der Anlagentechnik (Anlage 2.1.1 und Anlage 2.1.2) grenzt das Projektgebiet Tank-221 (Anlage 2.5.1 und Anlage 2.5.2). Im Bereich der Anlagentechnik werden auf $240\text{m} \times 180\text{m}$ ca. $1,2\text{m}$ Sand aufgeschüttet, die rechnerisch eine Setzungsmulde erzeugen, die auch noch außerhalb des Schüttbereiches Setzungen verursacht. Wie z.B. in Anlage 2.1.1 ersichtlich, muss in 10 bis 15m Entfernung vom Schüttbereich noch mit 2 bis 5 cm Setzungen gerechnet werden. Das gilt auch für den Einflussbereich der Setzungen im Projektgebiet Tank-221. Dort werden, wie in Anlage 2.5.1 ca. 10 bis 15m außerhalb des Schüttbereiches ebenfalls noch 1 bis 4 cm rechnerische Setzungen erzeugt. Somit werden jeweils durch das eine Projektgebiet Mitnahmesetzungen erzeugt, die Einfluss auf das benachbarte Projektgebiet haben und im Grenzbereich beider Projektgebiete nicht 2 bis 5cm bzw. 1 bis 4cm sondern mit 3 bis 9cm Setzungen gerechnet werden muss. Mitnahmesetzungen haben auch Einfluss auf im Untergrund verlegte Kabel und Rohrleitungen und insbesondere Anschlüsse an Strukturen, die über Tiefgründungen gegründet sind.

Baubegleitende Messungen

Hinweise zu baubegleitenden Messungen werden z.B. in [U8] gegeben. Hierbei muss zwischen der messtechnischen Überwachung der Baugrundeigenschaften und der geodätischen Überwachung der Setzungen der Aufschüttung in Bezug auf den Ursprungszustand bzw. den Zustand vor den Überschüttungsarbeiten (Verformungsverlauf).

Die wesentlichen Baugrundeigenschaften der zu verbessernden Weichschicht, sind die undräßierte Scherfestigkeit c_u und der Porenwasserdruck (PWD). Den unbelasteten Ursprungszustand der Weichschicht charakterisierende c_u - und PWD-Daten liegen bereits in Form von CPTU-Ergebnissen vor. Bei den c_u -Daten aus der CPT handelt es sich um korrelierte Daten. Eine Überprüfung der Korrelation der undräßierten Scherfestigkeit aus der CPT kann durch in-situ-Versuche mit der Feldflügelsonde nach EN ISO 22476-9 erfolgen. Die CPT ist ein geeignetes Werkzeug, um den Anstieg der undräßierten Scherfestigkeit im Einflussbereich des Schüttkörpers infolge Konsolidation zu überwachen.

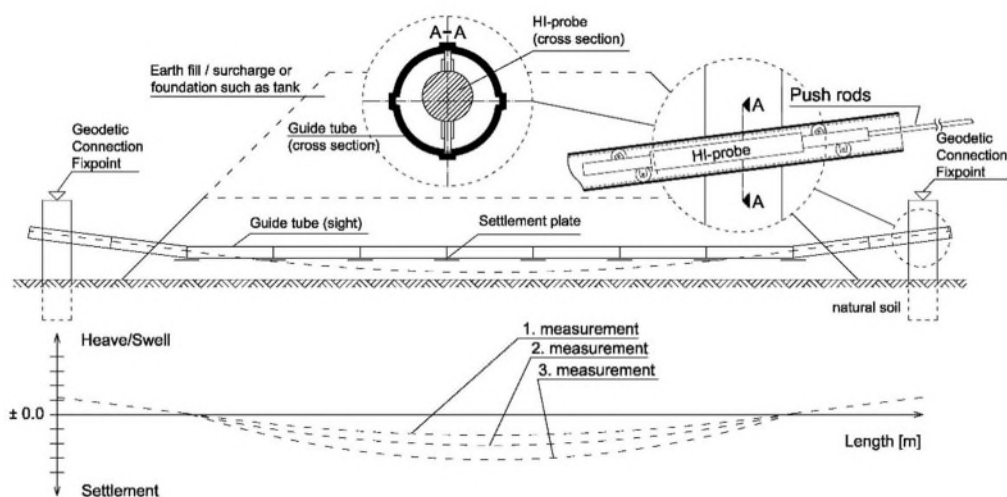
Neben dem Anstieg der undräßierten Scherfestigkeit ist der PWD ein guter Indikator für Belastung der Weichschicht durch die Aufschüttung, da sich in der Weichschicht unmittelbar nach Belastung ein erhöhter, messbarer PWD einstellen sollte, der über die Zeit durch Konsolidation der Weichschicht abnimmt. Über die zeitliche Abnahme des PWD kann in Zusammenhang mit weiteren geodätischen Messmethoden der Endzeitpunkt der Primärsetzung besser abgeschätzt werden. Es empfiehlt sich die PWD-Abnahme durchgängig mit elektrischen Porenwasserdruckgebern (PWDG) zu überwachen, die im vorliegenden Fall einfach mittels CPT auf die gewünschte Teufe gedrückt werden können. Infolge der Mächtigkeit der Weichschicht und der großflächigen Überschüttungsarbeiten empfiehlt es sich pro Messpunkt je 4 PWDG in jeweils 4, 8, 12 und 16 m u. GOK zu installieren. Hierbei kann ein Messpunkt unter der Straßenaufschüttung erfolgen und ein Messpunkt unter der Eisenbahnaufschüttung. Die Datenkabel der PWDG sind an der Geländeoberfläche in einem Schutzkasten am Dammfuß zusammenzuführen. Die Schutzkästen sind kenntlich zu machen und gegen Baustellenverkehr und Erdarbeiten zu sichern.

Die geodätische Überwachung des Verformungsverlaufes längs und quer zur Aufschüttung sollte über Setzungspegel unterstützt durch HI-Messstrecken erfolgen. Hierbei sind die Setzungspegel mit Grundplatte im Bereich der Dammkrone am Übergangspunkt zur Böschung lotrecht direkt auf dem Erdplanum abgestellt werden. [U8] empfiehlt die Setzungspegel in einem Abstand von 20 bis

50m entlang der Dammgradiente zu platzieren. Die Setzungspegel sollten über Stangen verlängerbar sein und mit der Aufschüttungshöhe mitwachsen. Die Überwachung der Setzungen innerhalb der Projektflächen kann ebenfalls durch gleichmäßig verteilte Setzungspegel mit Grundplatte erfolgen.

Neben den Setzungspegeln, die eine punktuelle Überwachung der Verformungen bzw. Setzungen des Dammes und des Untergrundes ermöglichen werden jeweils 2 Horizontalinklinometer (HI)-Messstrecken quer zur Dammschüttung empfohlen, mit HI-Sonden können die Setzungen im gesamten Dammquerschnitt in einer zweidimensionalen Perspektive (2D) vor, während und nach den Aufschüttungsarbeiten überwacht werden. Abbildung 2 zeigt schematisch, wie die Messung mit einer HI-Messstrecke und einer HI-Sonde funktioniert.

Abbildung 2: Schema Horizontalinklinometer (HI)



Für Rückfragen stehen wir gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

F. Ulbricht

Falk Ulbricht

Senior Consultant

Anlage 1 - Profilübersicht der abgeleiteten undrännierten Scherfestigkeit c_u

Anlage 2 - Setzungsberechnung Projektflächen

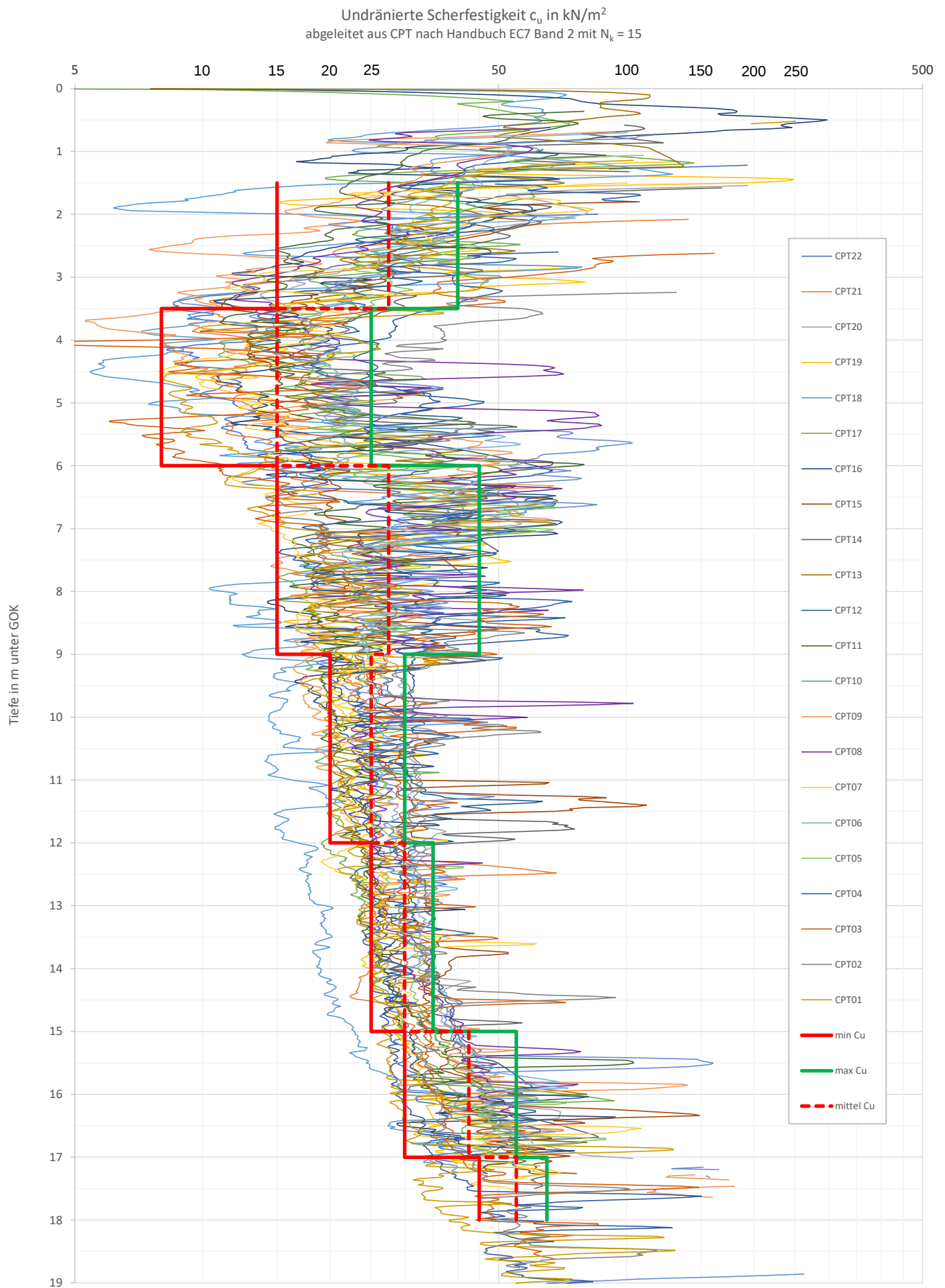
Anlage 3 - Setzungsberechnung Straße

Anlage 4 - Setzungsberechnung Eisenbahndamm

Anlage 1 - Profilübersicht der abgeleiteten undrÄnierten Scherfestigkeit c_u

Anlage 1

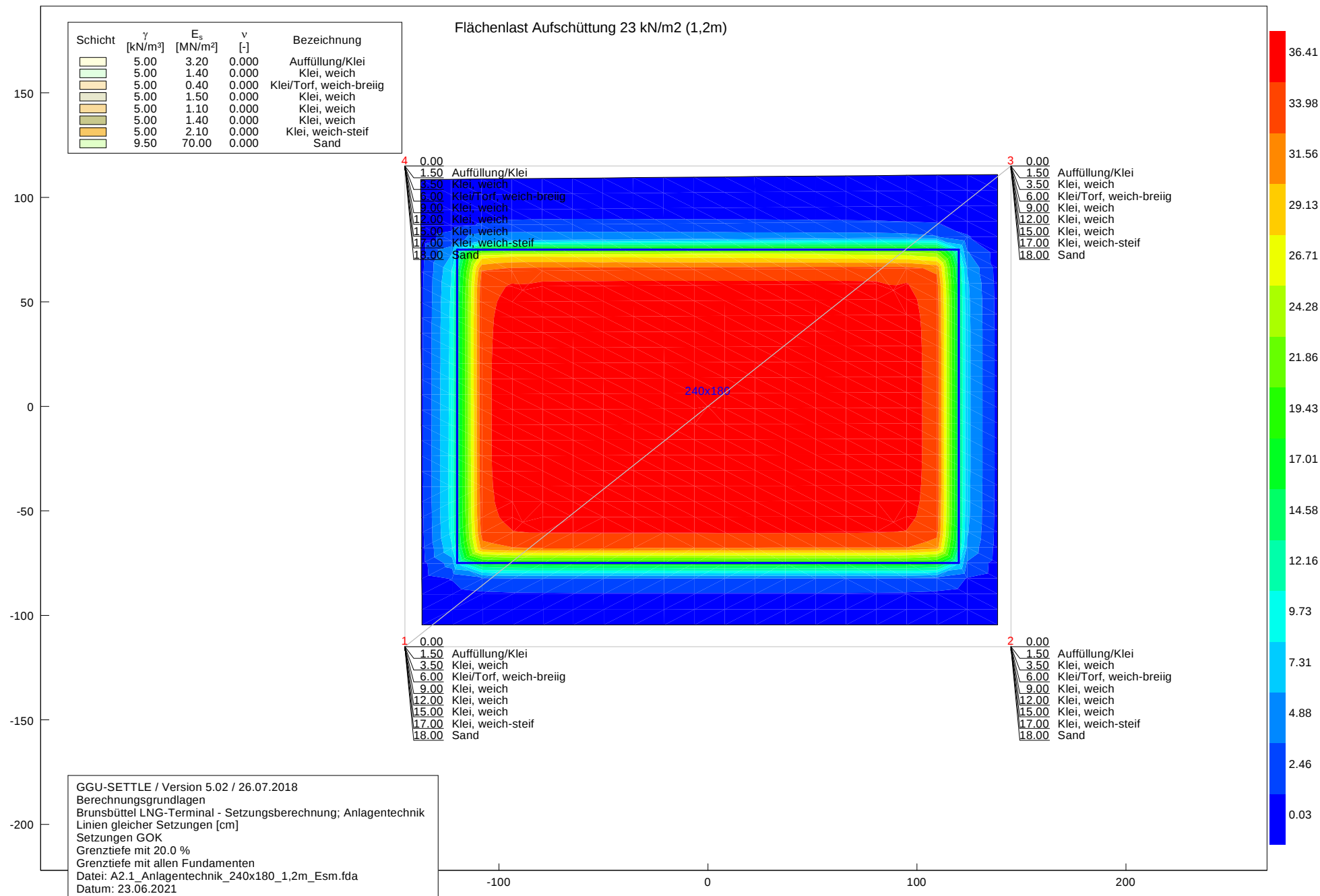
Fachgutachterliche Stellungnahme
Brunsbüttel LNG-Terminal

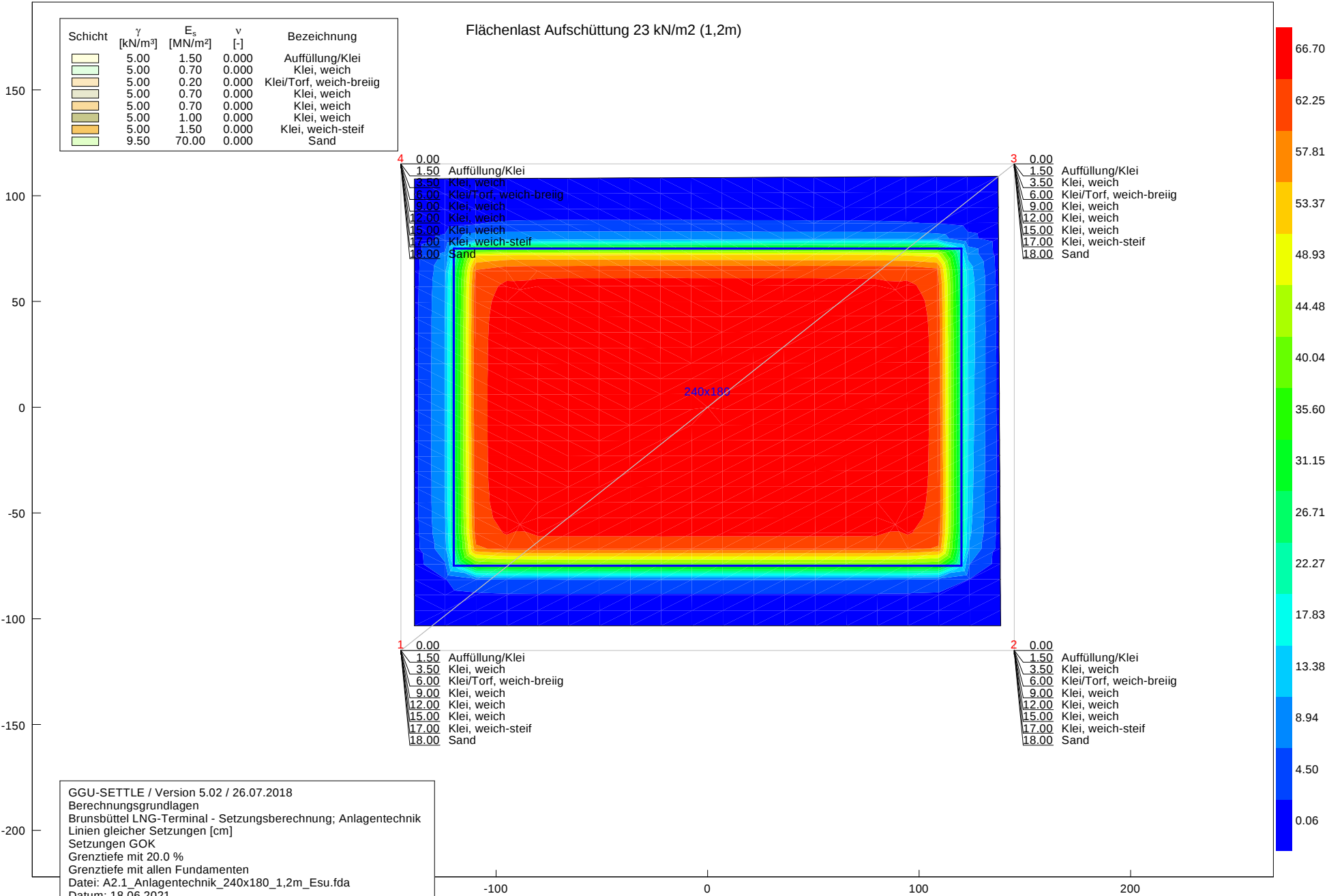




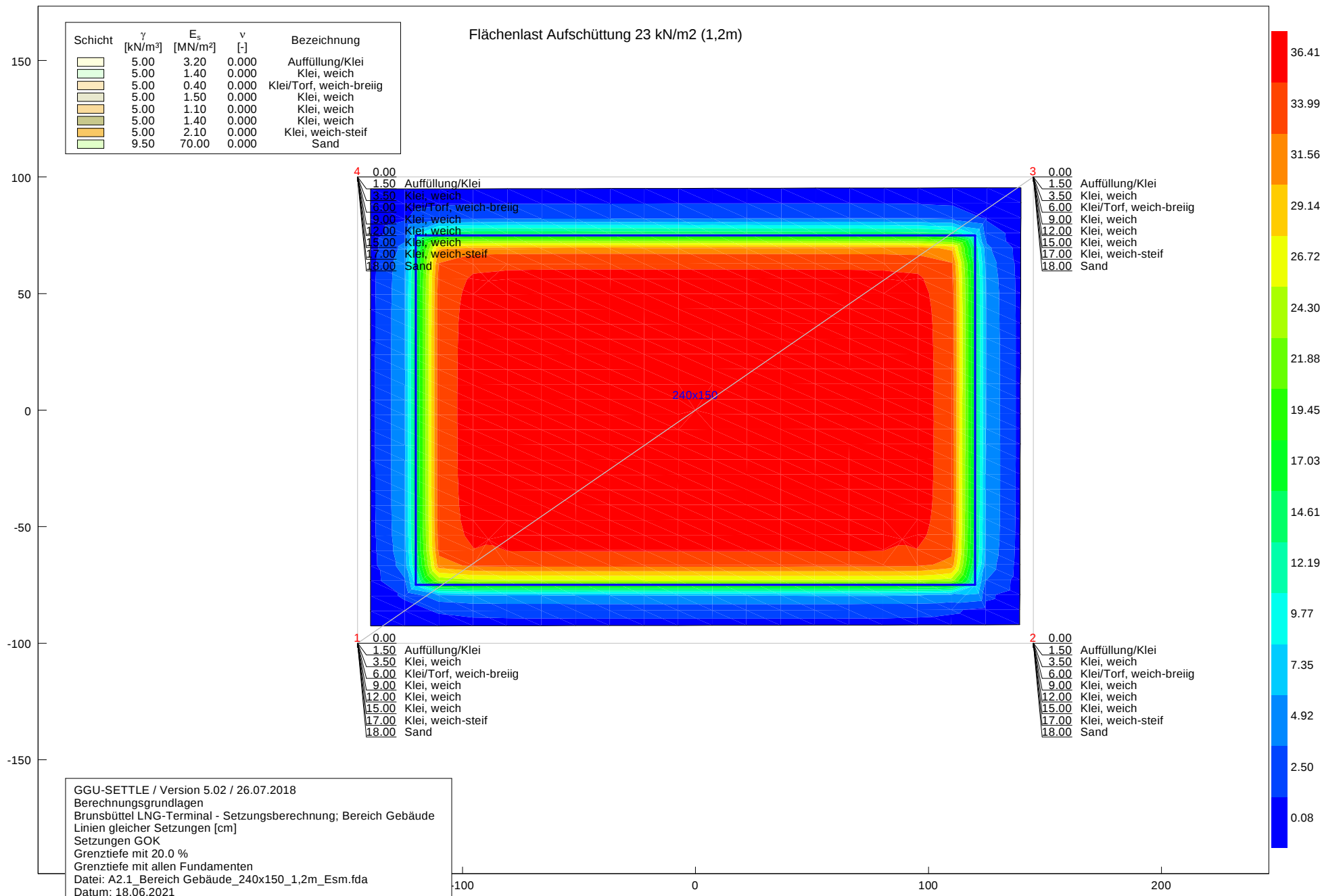
Anlage 2 - Setzungsberechnung Projektflächen

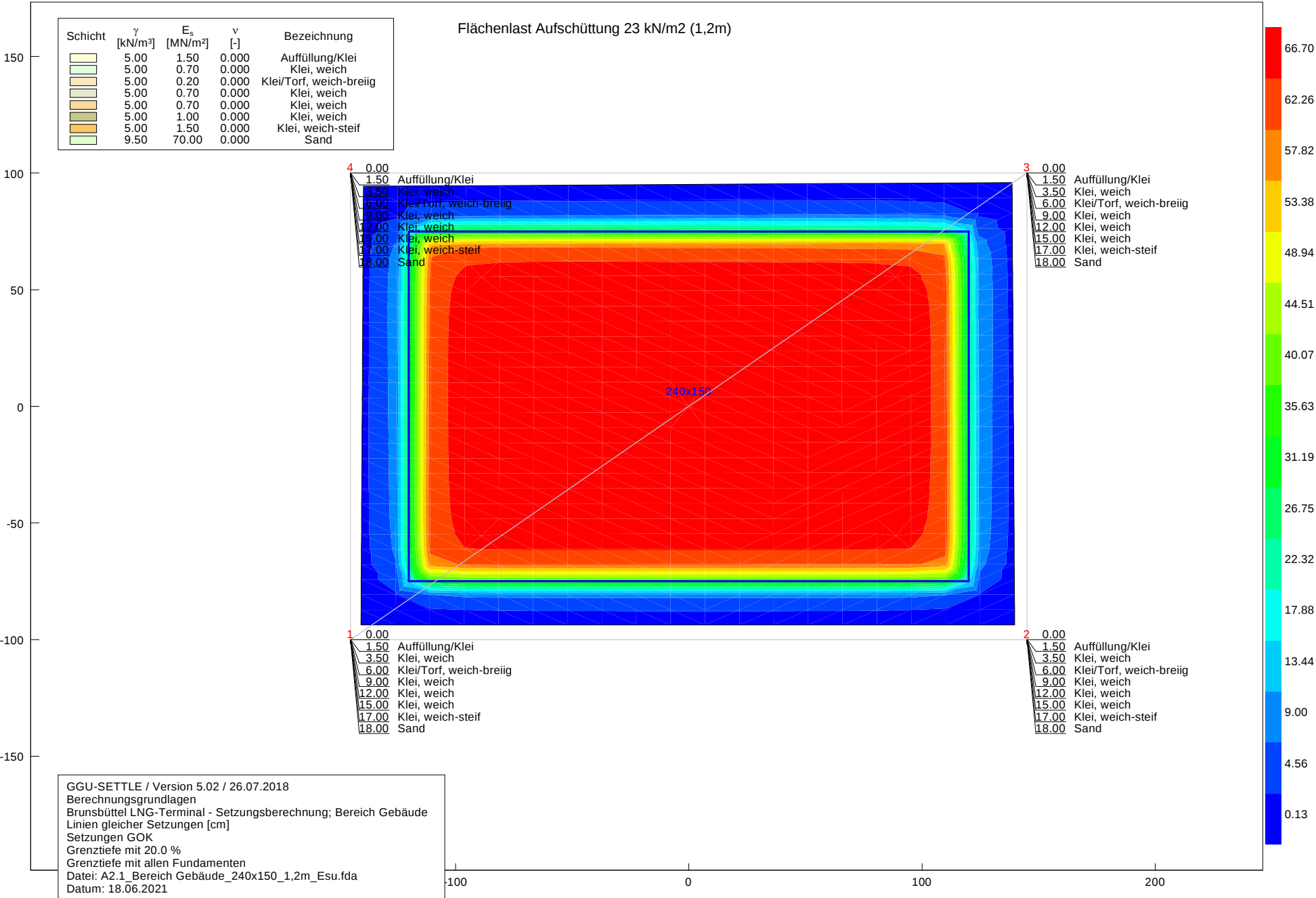
Anlage 2.1.1

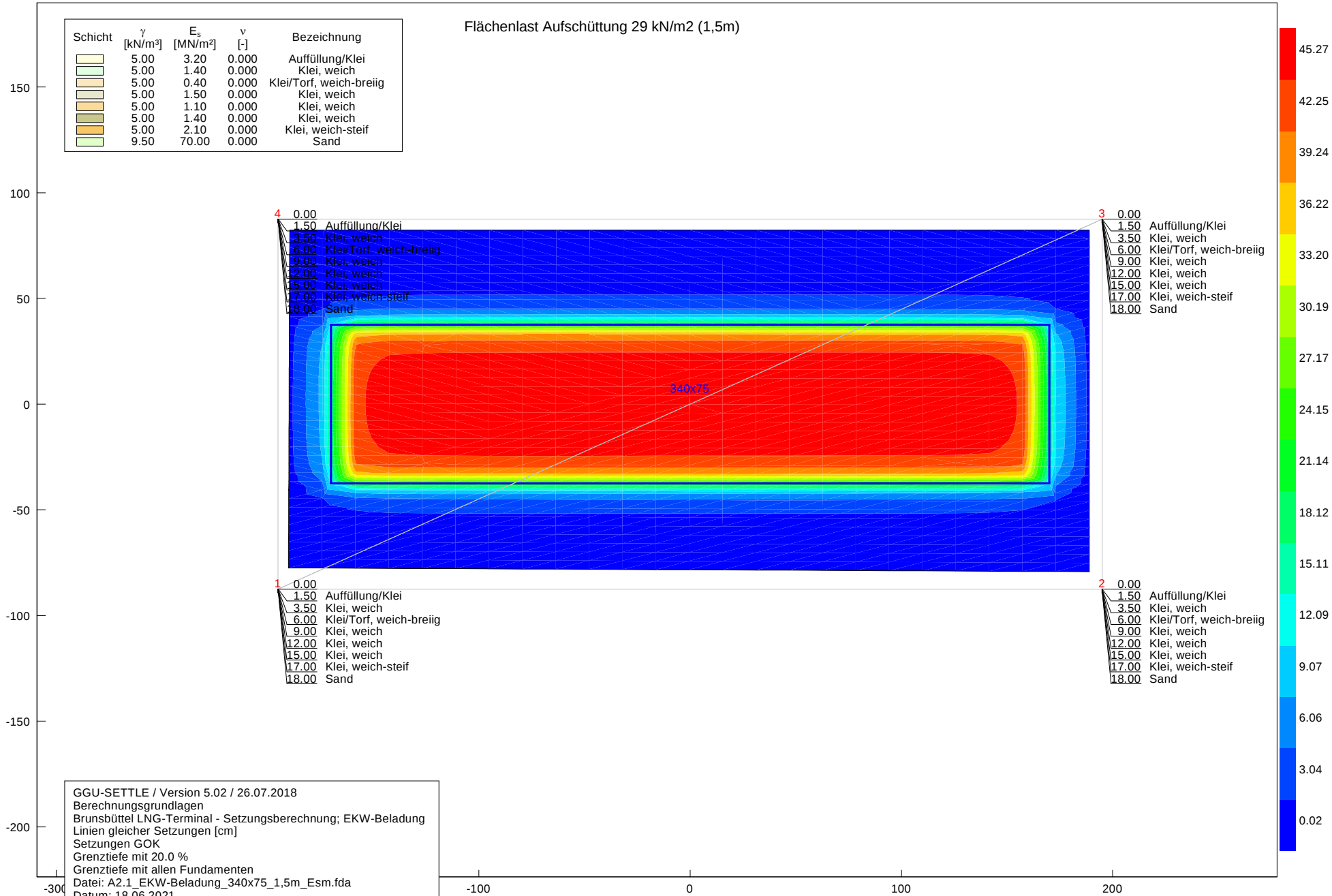


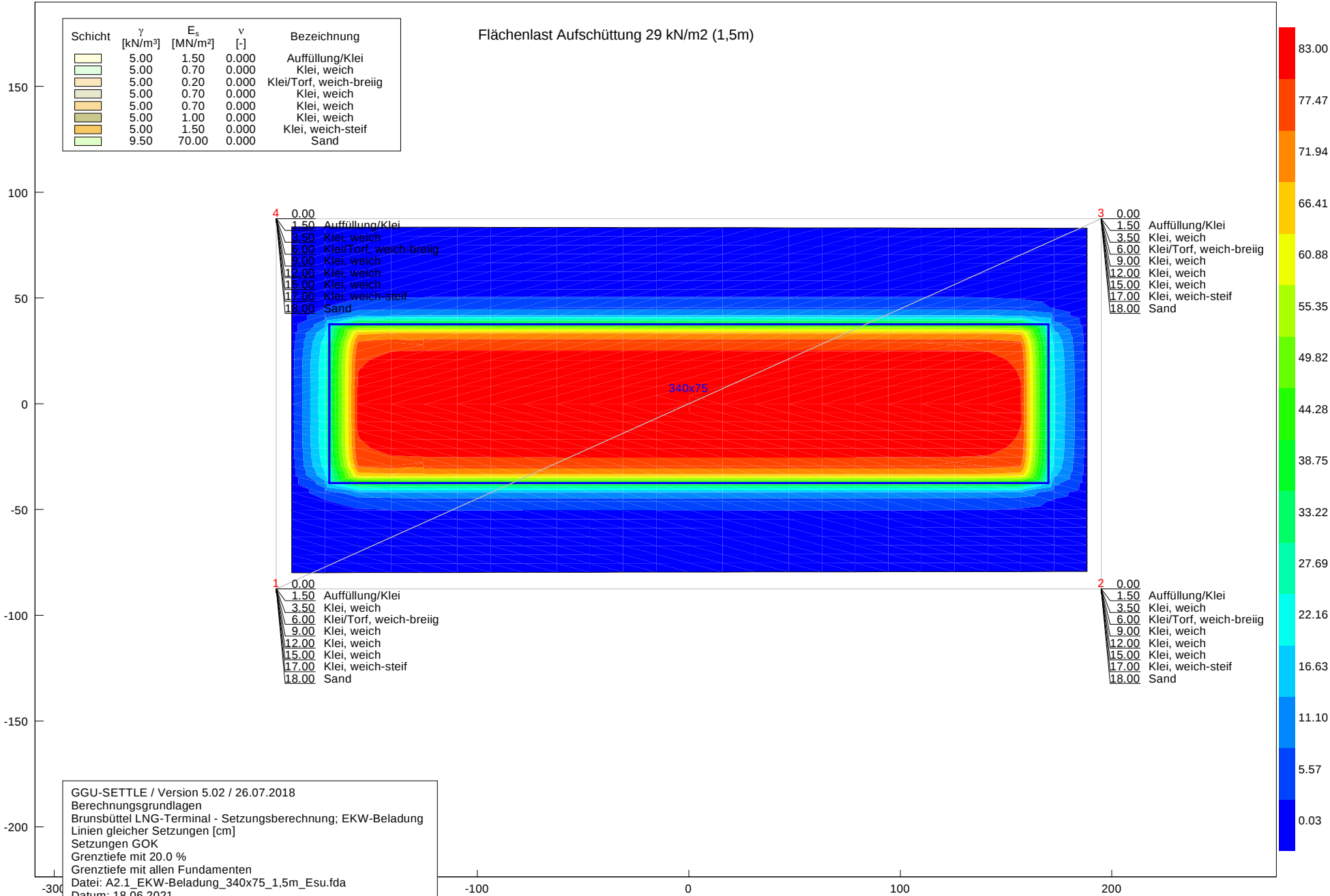


Anlage 2.2.1

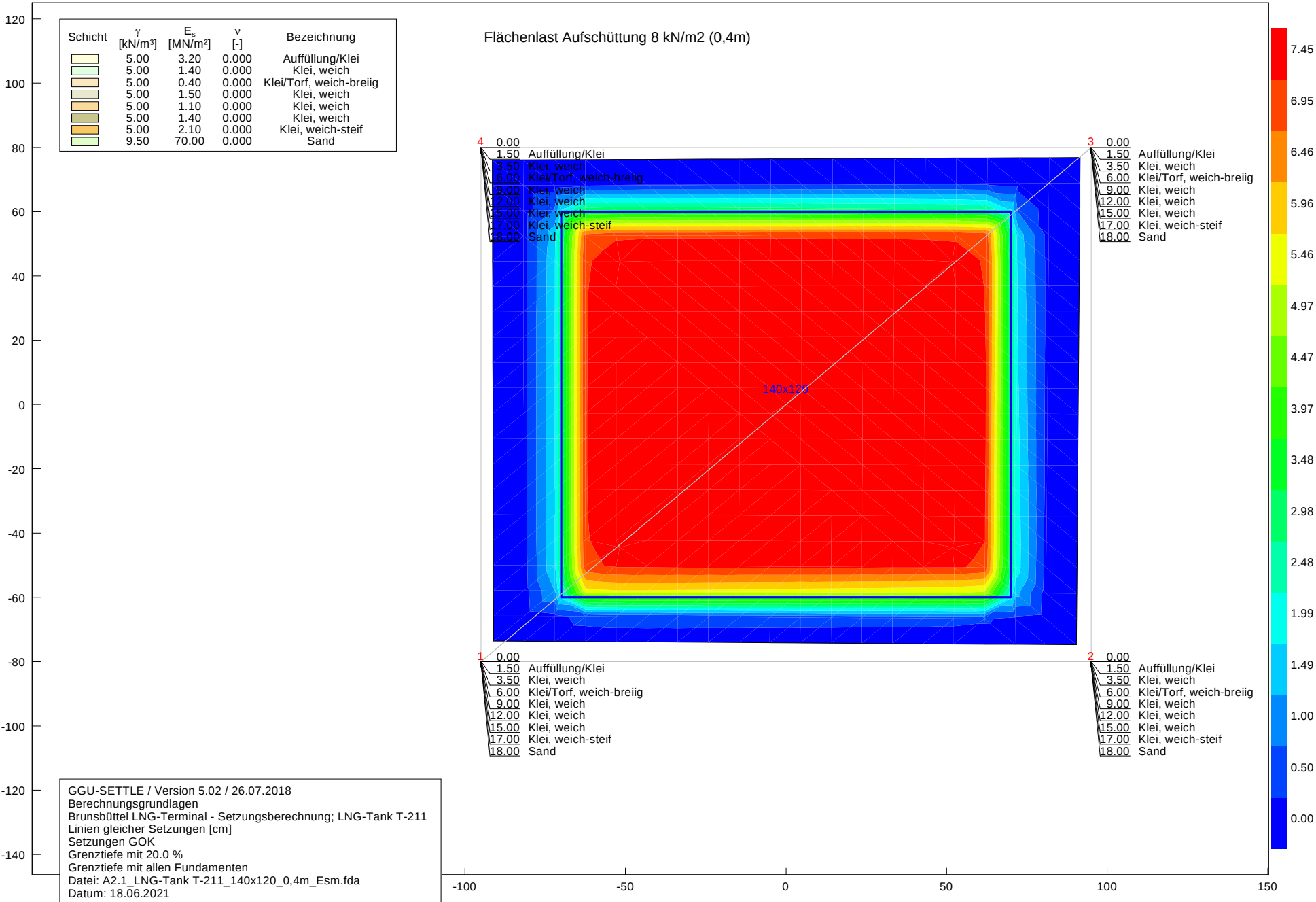


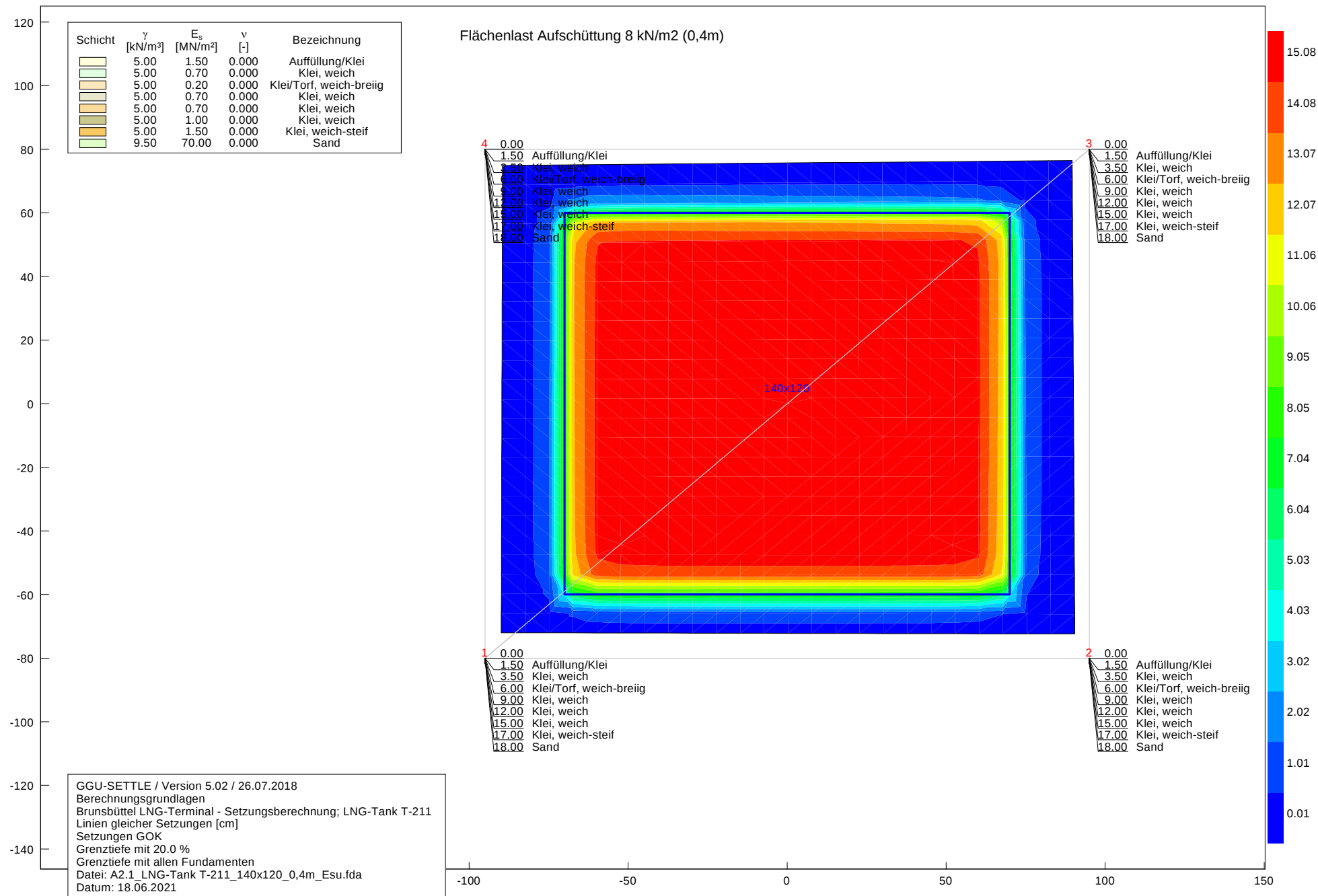




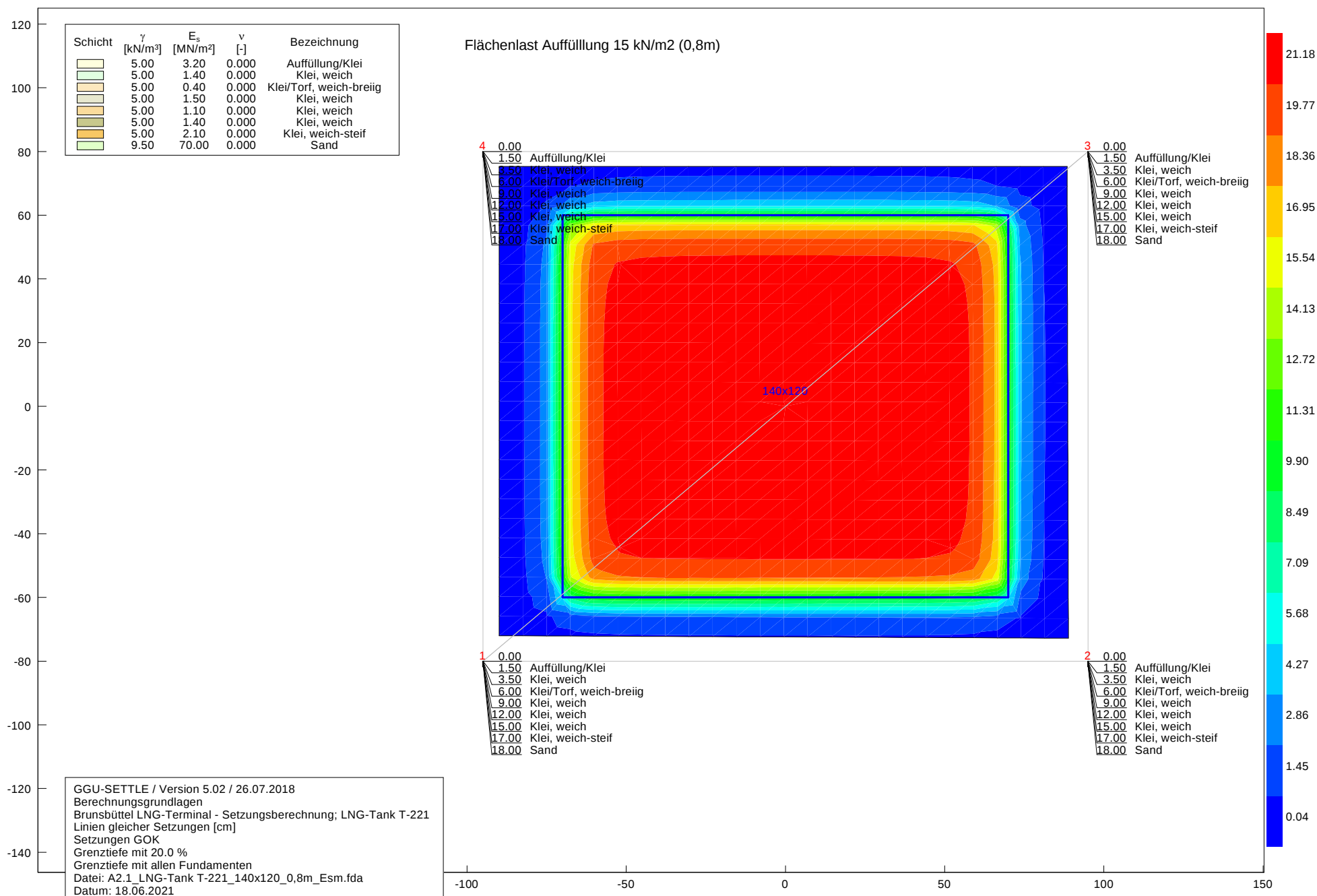


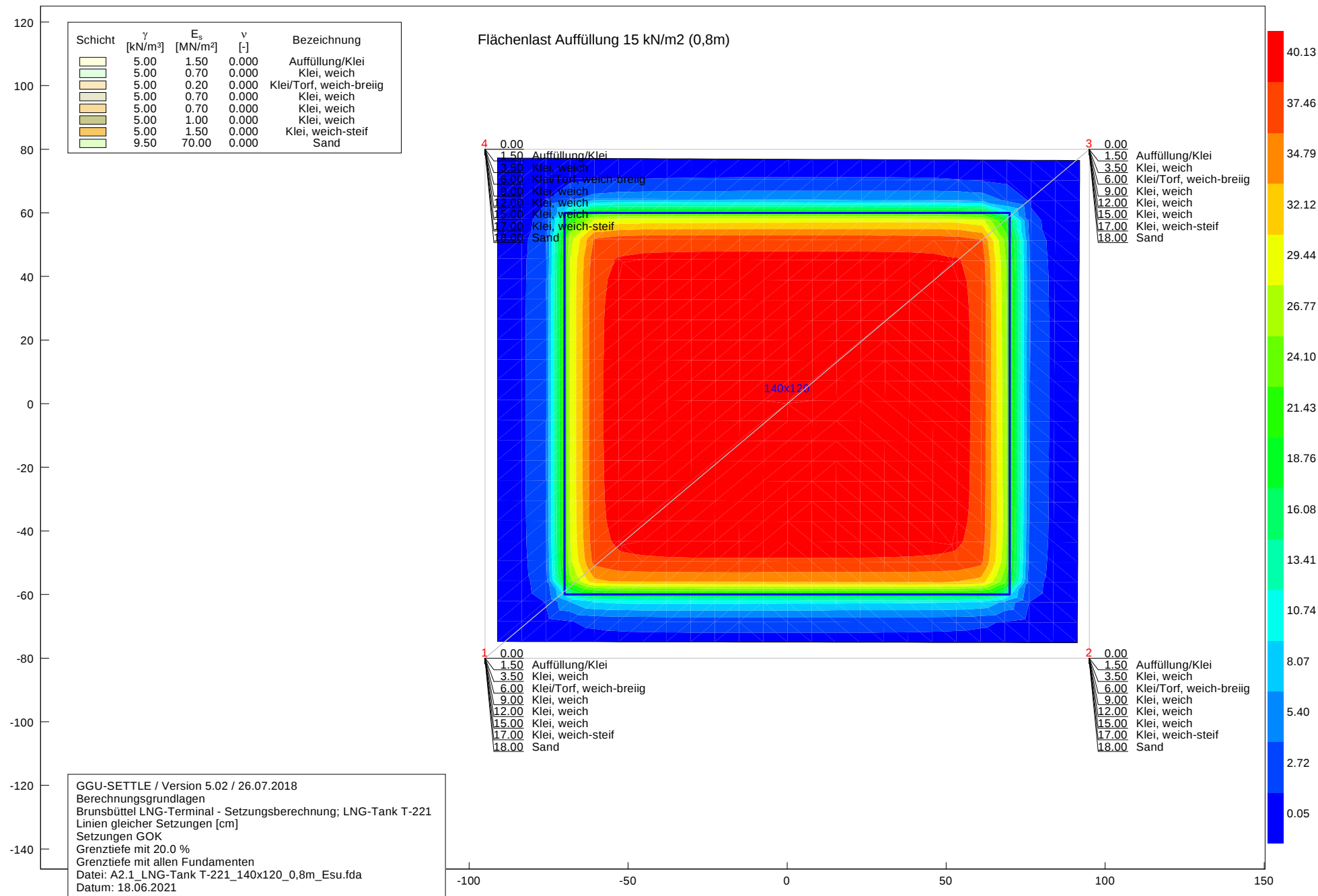
Anlage 2.4.1



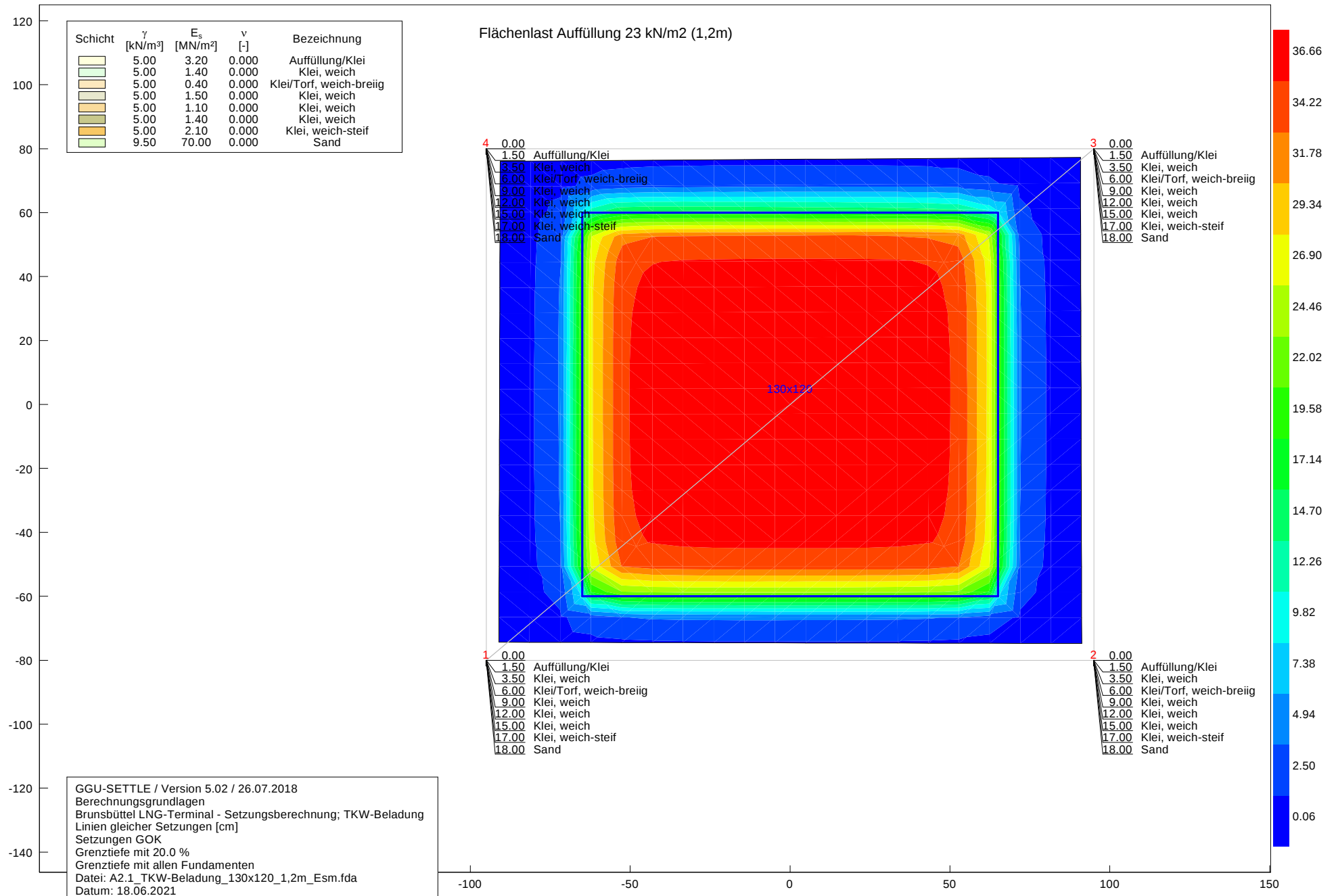


Anlage 2.5.1

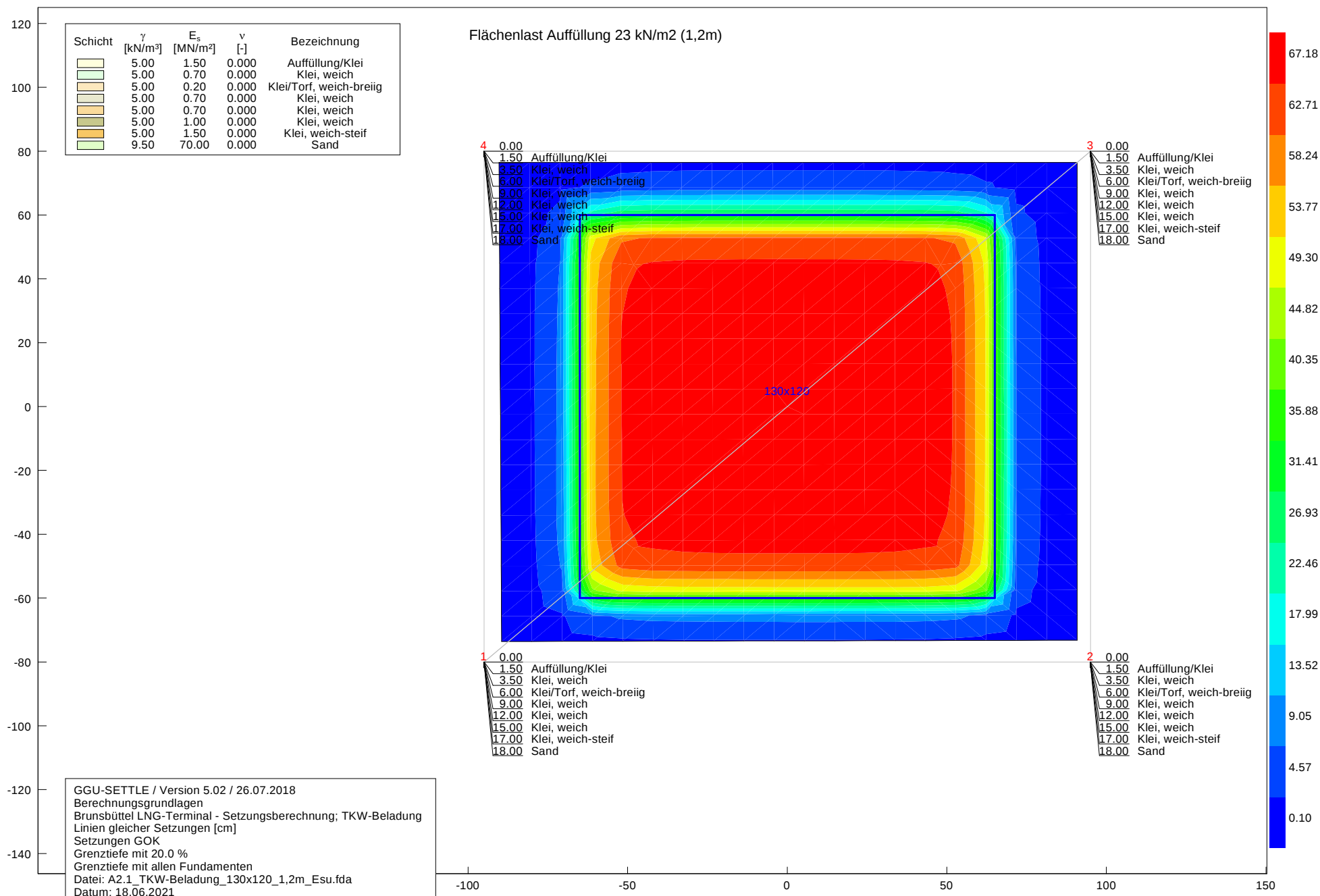




Anlage 2.6.1



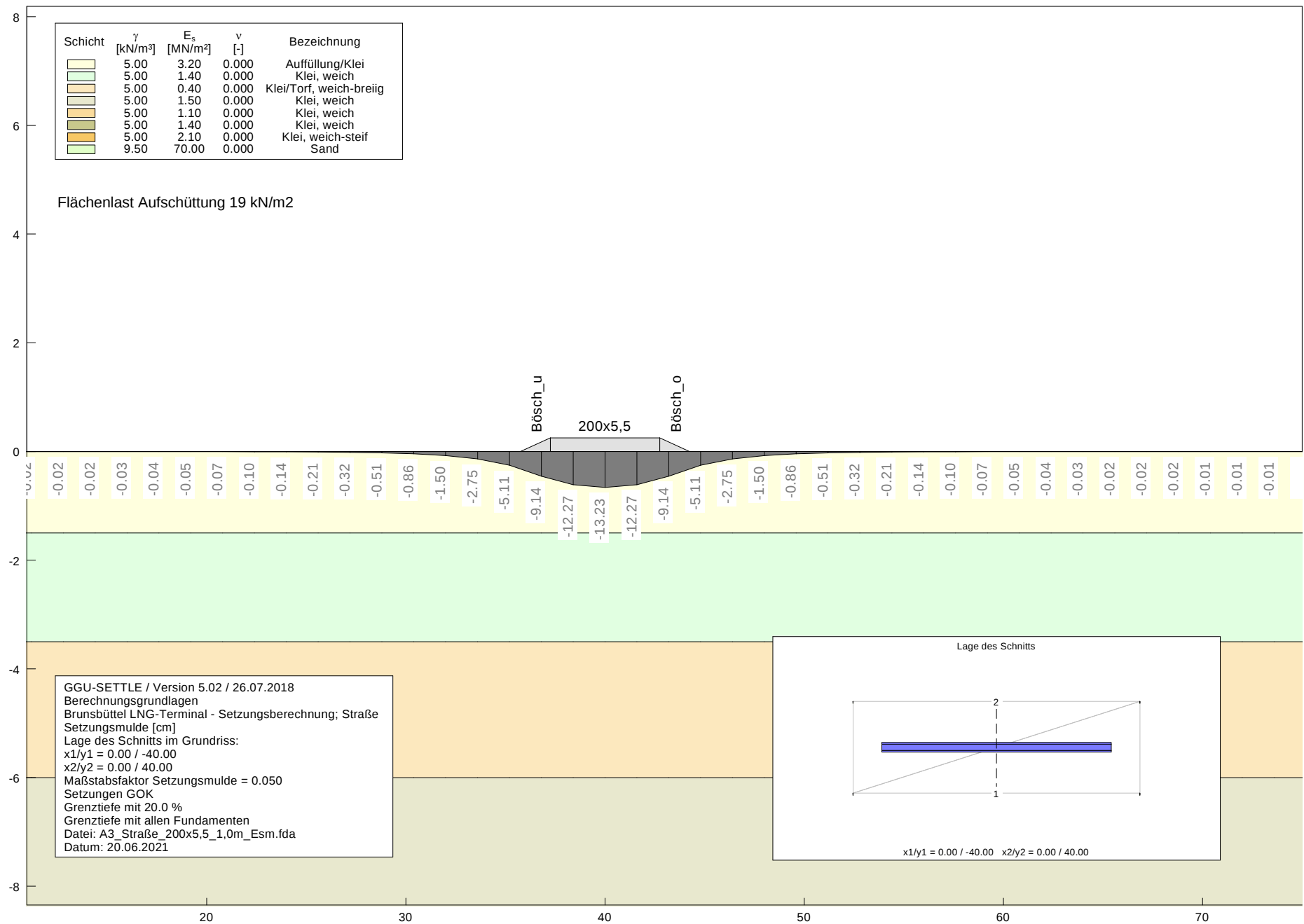
Anlage 2.6.2



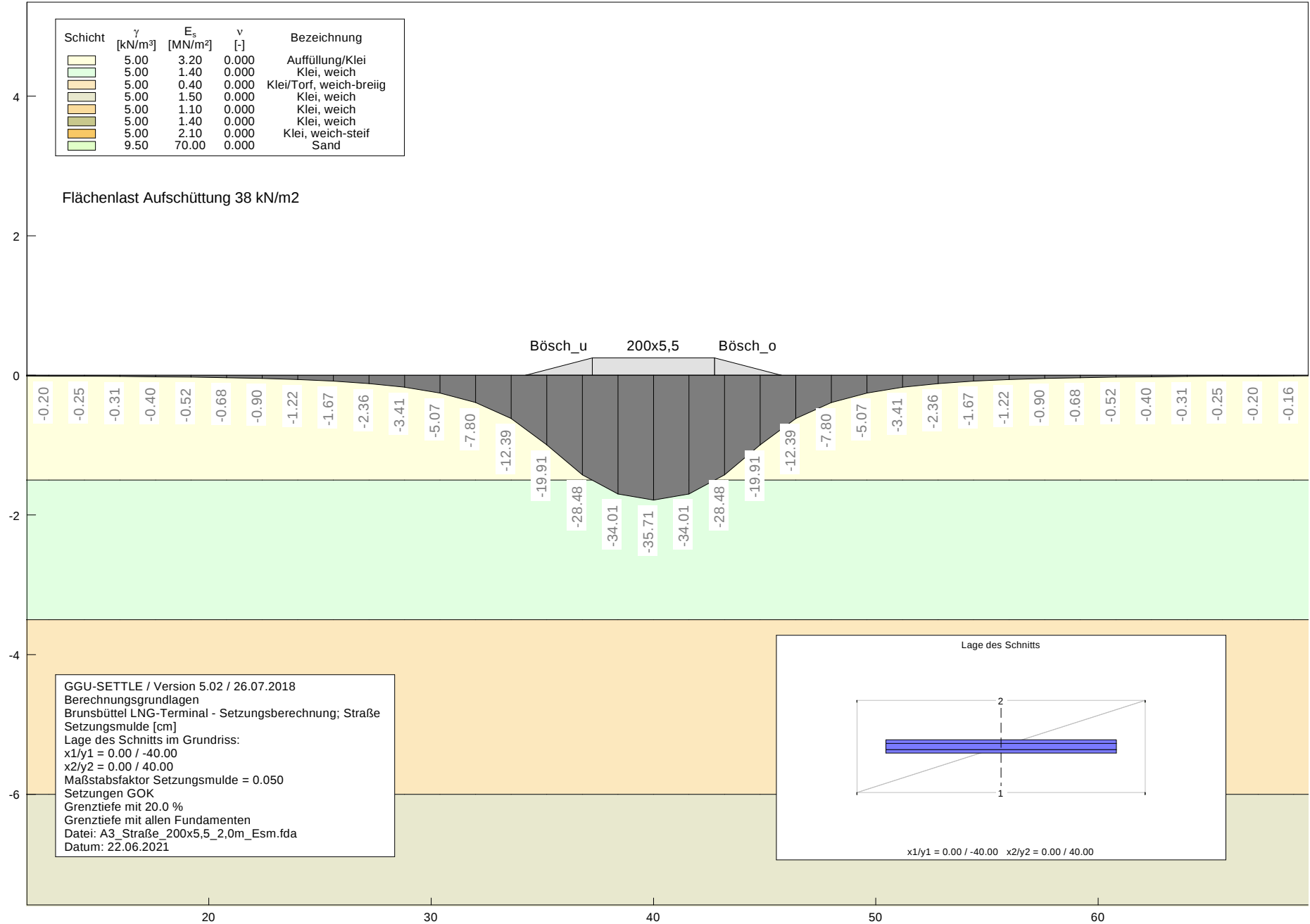


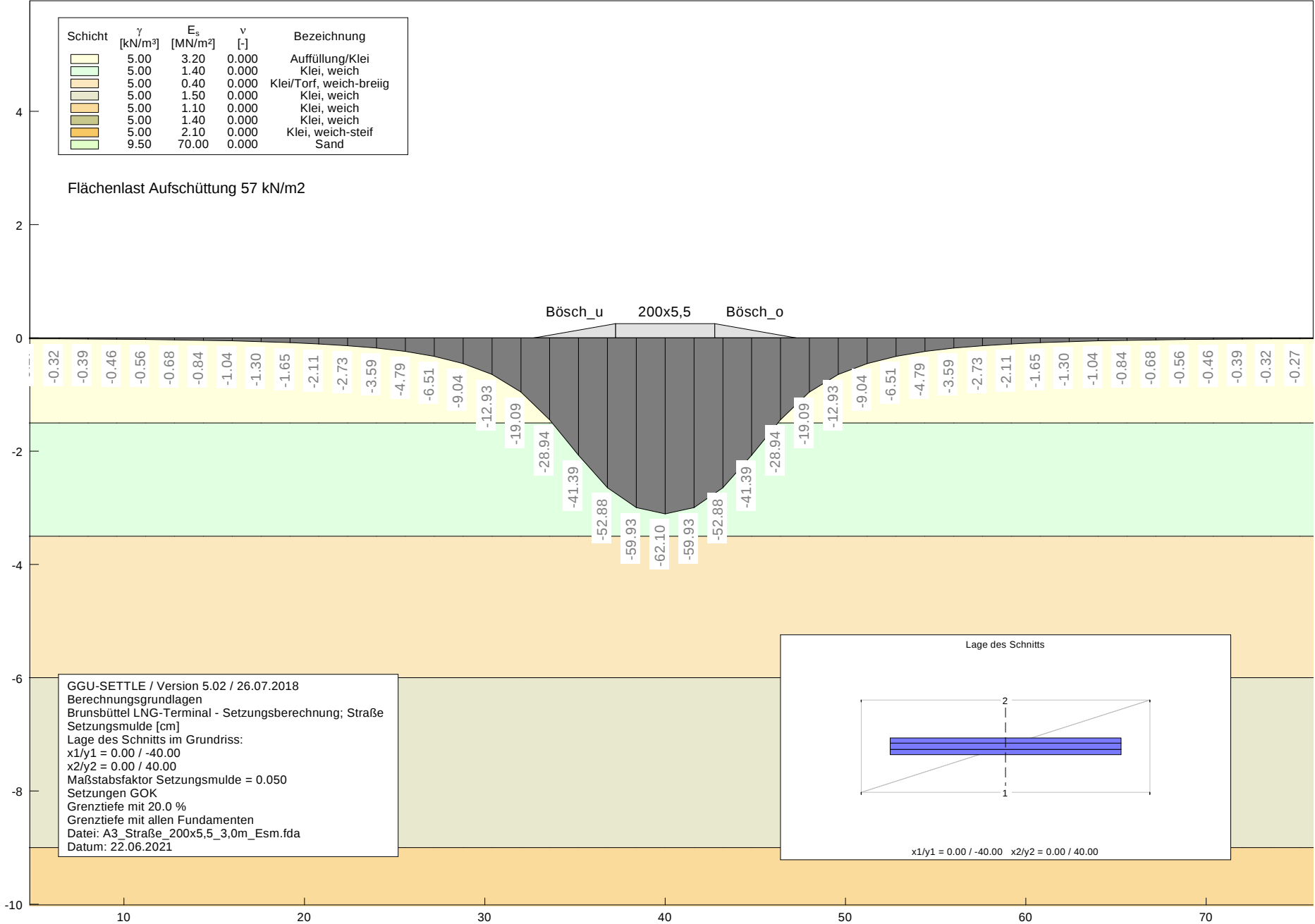
Anlage 3 - Setzungsberechnung Straße

Anlage 3.1

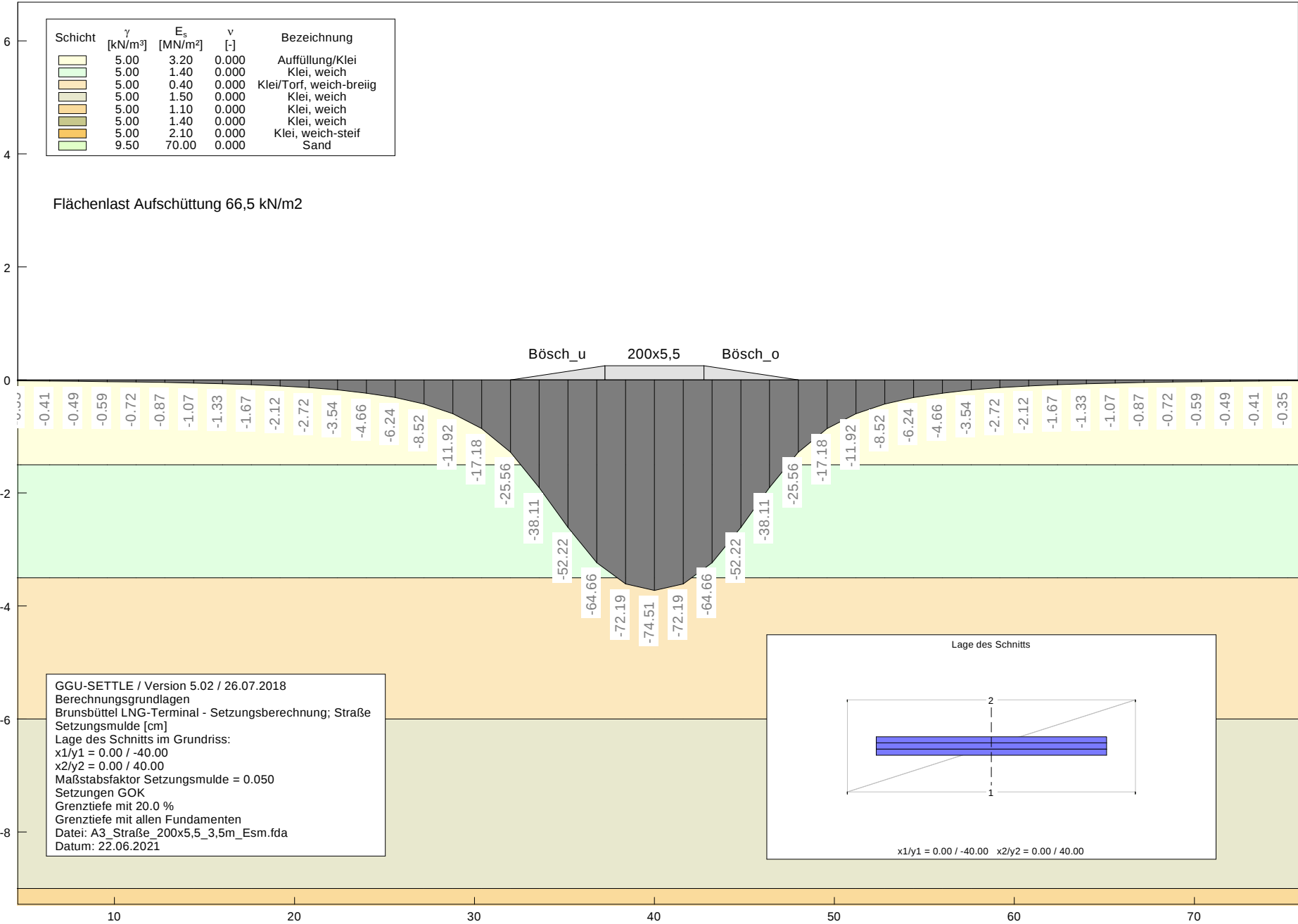


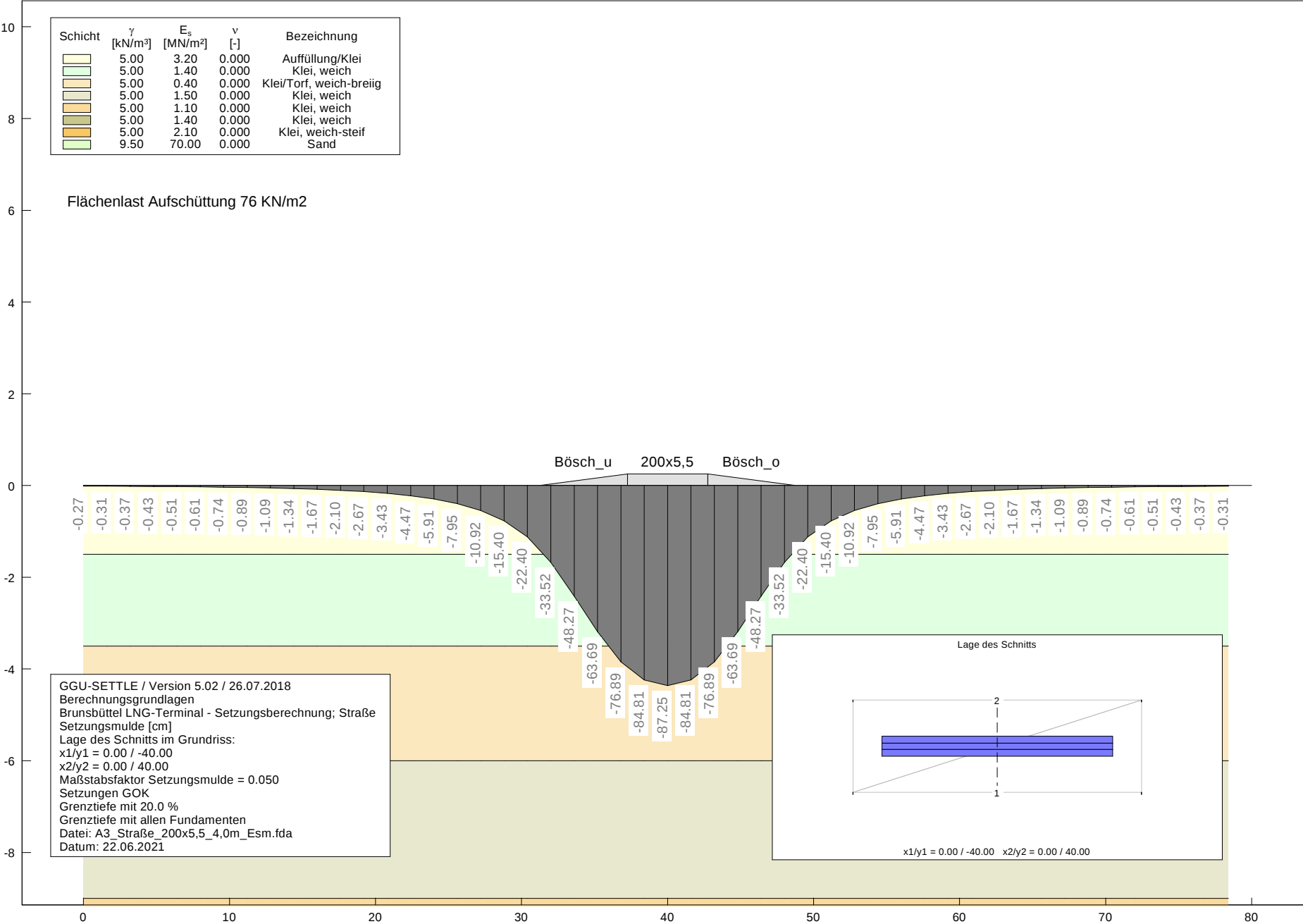
Anlage 3.2





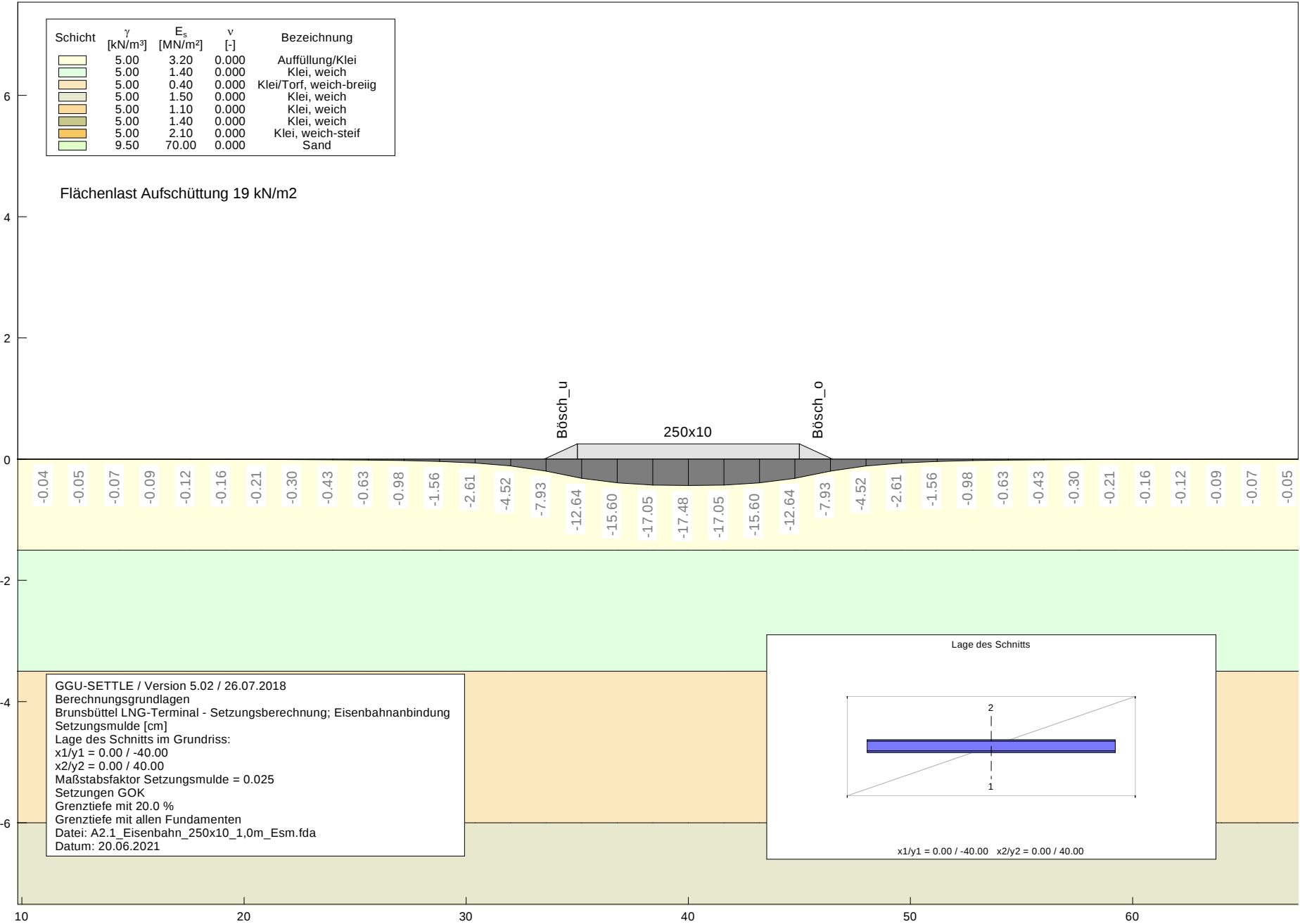
Anlage 3.4

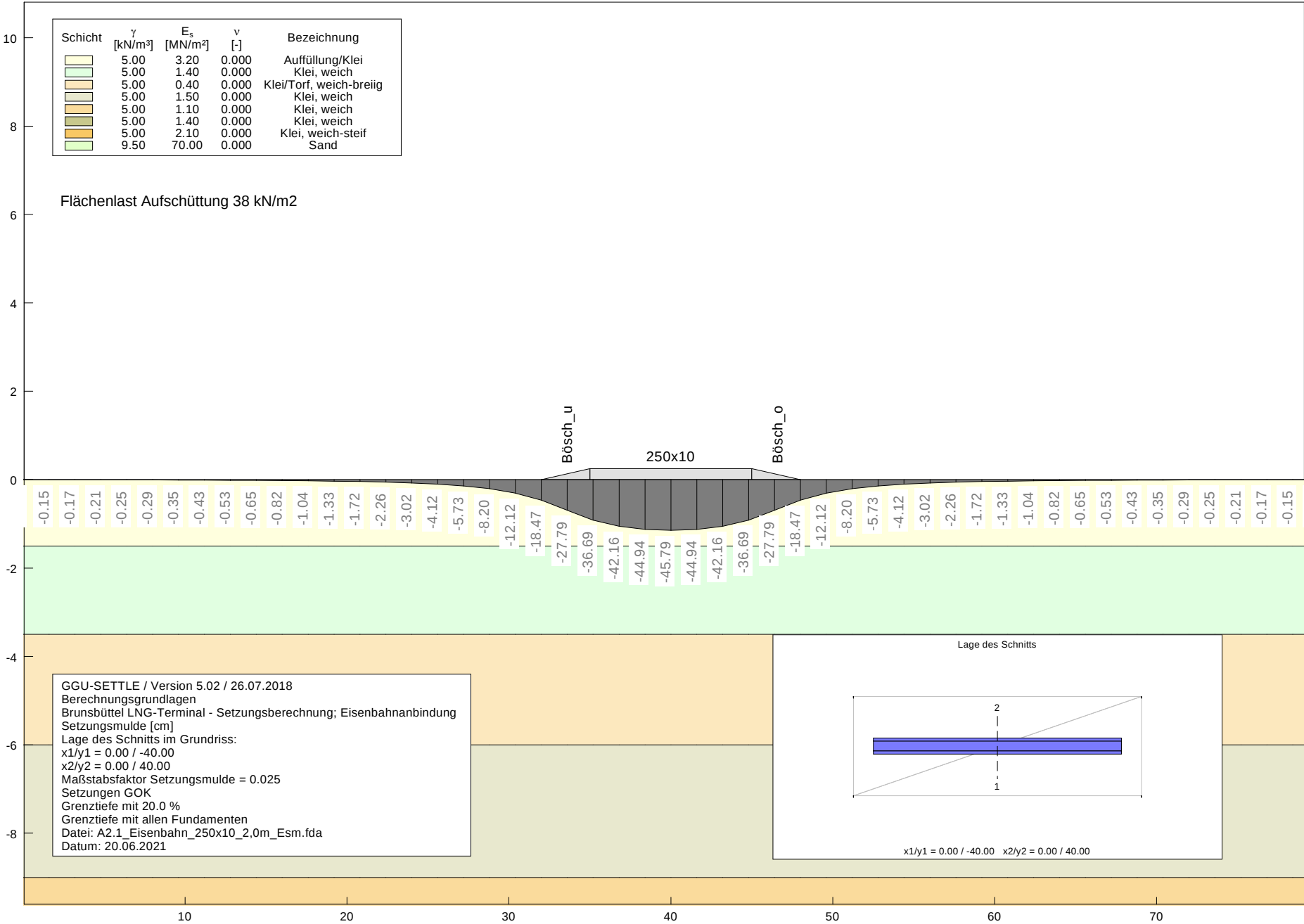




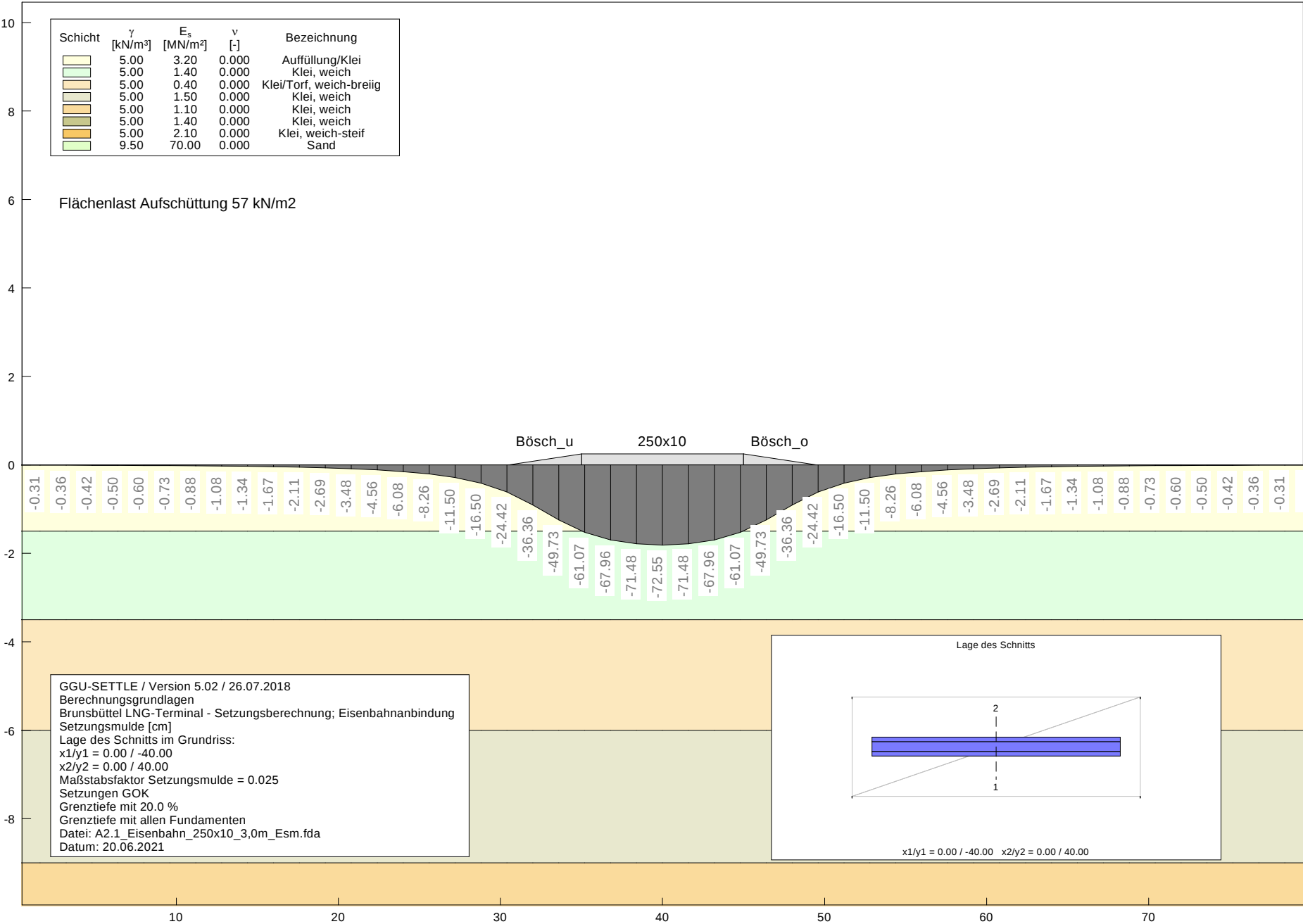
Anlage 4 - Setzungsberechnung Eisenbahndamm

Anlage 4.1

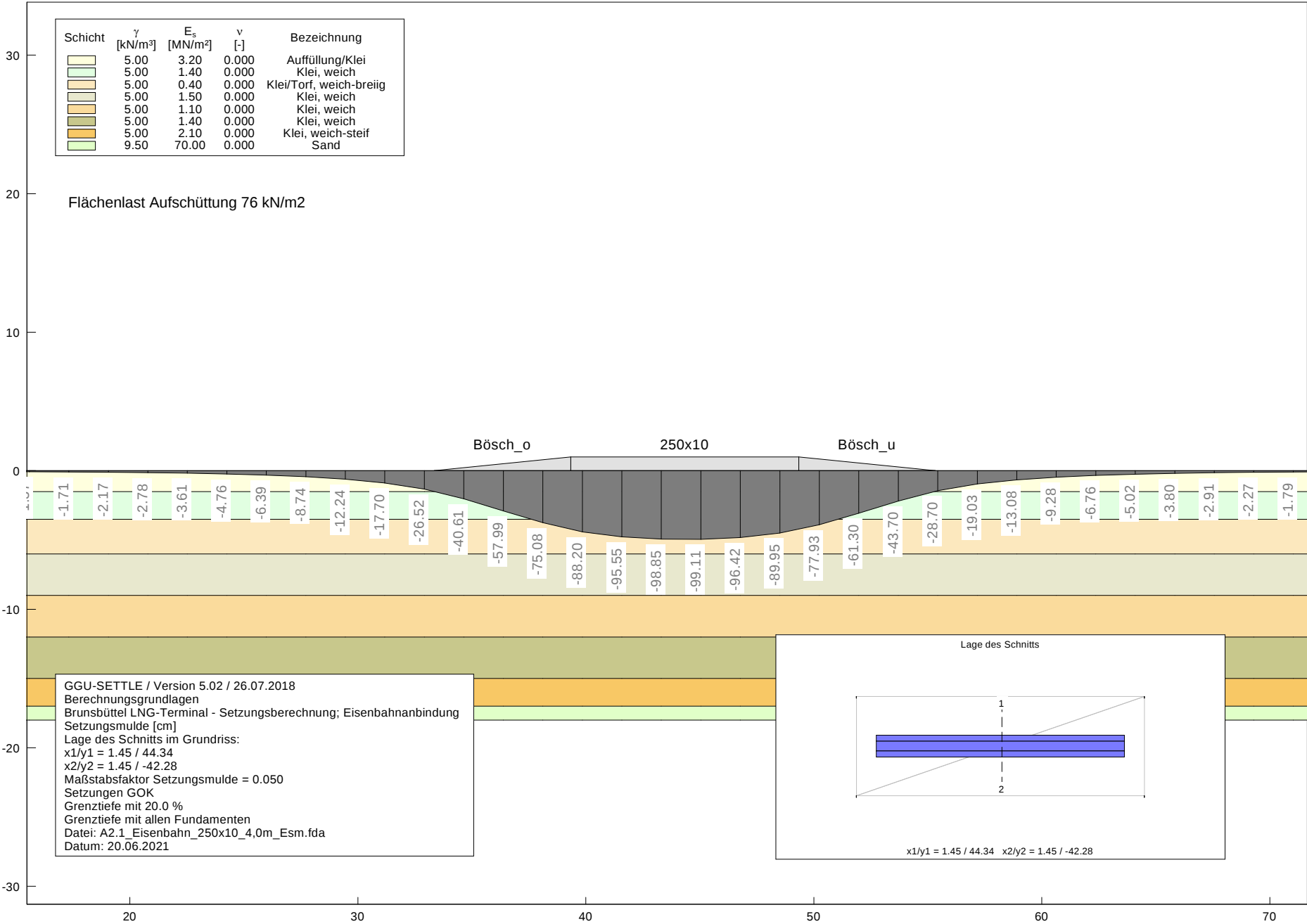




Anlage 4.3



Anlage 4.4



Anlage 4.5

