

Geotechnischer Bericht

Projekt: Zukunft Landwehrkanal Numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Bodenkenngrößen für die Uferböschungen



Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsamt Berlin
Mehringdamm 129, 10965 Berlin

Aufsteller:



KREBS UND KIEFER

Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH

Rudi-Dutschke-Straße 9 • 10969 Berlin • kuk@b.kuk.de
Tel. 030/21 73 42-0 • Fax 030/21 73 42-11 • www.kuk.de

Berlin, den 23.01.2012



Dr.-Ing. Hans-Gerd Lindlar
Geschäftsführer



Dipl.-Ing. Christian Schmidt
Prokurist

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngößen für die Uferböschungen

Geotechnischer Bericht:

Projekt: Zukunft Landwehrkanal (LWK)
Numerische Untersuchungen zur Ermittlung der
Bodenkenngößen für die Uferböschungen am Landwehrkanal

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	7
2	Unterlagen	7
3	Vorschriften, Richtlinien, Literatur	8
4	Konstruktion Regelquerschnitt Ufersicherung	9
4.1	Bauwerksschäden und Sanierungsmaßnahmen	11
5	Baugrund- und Grundwasserverhältnisse	13
6	Berechnungsmodell	17
6.1	Stoffgesetze	17
6.2	Finites-Elemente-Modell	19
6.3	Lastansätze	21
6.4	Berechnungsphasen	28
6.5	Berechnungsquerschnitte	29
7	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse und Interpretation	30
7.1	Statisches System allgemein	30
7.2	Randbedingungen	32
7.3	QS 1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN	33
7.4	QS 2 Uferhöhe 36,0 mNN	40
7.5	QS 3 Probelastung	47
7.6	QS 4 Regelquerschnitt mit Baumlast, Uferhöhe 33,7	53

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngößen für die Uferböschungen

7.7	QS 5 Erhöhtes Ufer mit Baumlast, Uferhöhe 36,0 mNN	58
7.8	QS 6 Uferhöhe 35,0 und geneigtes Gelände	62
7.9	Übersicht der berechneten Sicherheiten	65
8	Analytische Vergleichsberechnungen nach DIN 4084	67
9	Bewertungen und Schlussfolgerungen	76
9.1	Gesamtsystem	76
9.2	Obere Ufersicherung (Quadermauerwerk)	77
9.3	Baumlasten	78
10	Empfehlungen für die weitere Planung	81

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Bildverzeichnis

Bild 1	Prinzipskizze Regelquerschnitt	10
Bild 2	Überlagertes allgemeines Schadensbild aus 2007 nach Unterlage [U 1]	11
Bild 3	Bauweise Sicherungsspundwand gemäß Angabe des WSA Berlin	12
Bild 4	Berechnungsmodell Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN, oben: Gesamtmodell, unten: Ausschnitt (1 = Auffüllung, 2 = Talsande, 5 = Beton, 6 = Kies, 9 = Sandsteinquader).....	20
Bild 5	Lastverteilung Modellbaum C.....	22
Bild 6	Geländebruchberechnungen ohne und mit Moment aus Baumlast	24
Bild 7	Herzwurzelsystem nach [U 17]	25
Bild 8	Wurzeltiefen von Laubbäumen in Abhängigkeit von Stamm- und Kronendimension [U 17].....	26
Bild 9	Simulation der Baumlast, 8 = verwurzelter Boden, 1,5 m tief.....	27
Bild 10	Randbedingungen für die FEM-Berechnungen.....	32
Bild 11	QS 1, Vertikalspannungen Regelquerschnitt Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN	33
Bild 12	QS 1, Horizontalspannungen Regelquerschnitt Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN	34
Bild 13	QS1 Regelquerschnitt, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Gesamtstandsicherheit (tiefer Gleitkreis nach [U 2]): $\eta = 1,4$ ohne Wasserdruckdifferenz und $\eta = 1,3$ mit Wasserdruckdifferenz Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN	35
Bild 14	QS1 Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion mit verfeinertem FE-Netz Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	37
Bild 15	QS1 Verformungen nach Phi-c-Reduktion unter Berücksichtigung der Sanierung der unteren Ufersicherung, globale Sicherheit der oberen Uferböschung $\eta = 1,8$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	38

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngößen für die Uferböschungen

Bild 16 QS 2 Berechnungsmodell, Uferhöhe 36,0 mNN	40
Bild 17 QS 2 Vertikalspannungen, Uferhöhe 36,0 mNN Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Kanalwasser = GW = 32,1 mNN.....	41
Bild 18 QS 2 Horizontalspannungen, Uferhöhe 36,0 mNN Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Kanalwasser = GW = 32,1 mNN.....	42
Bild 19 QS 2 Uferhöhe 36,0 mNN, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten, globale Gesamtstandsicherheit $\eta = 1,0$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Kanalwasser = GW = 32,1 mNN.....	43
Bild 20 QS 2 nach Sanierung, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten, globale Gesamtstandsicherheit $\eta = 1,0$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Kanalwasser = GW = 32,1 mNN	45
Bild 21 QS 3 Probelastung, Verformungen nach Phi-c-Reduktion mit erhöhten Scherfestigkeiten, globale Sicherheit $\eta > 1,0$ Lasten: Probelast A = 130 kN/m ² , Kanalwasser = GW = 32,1 mNN	49
Bild 22 QS 2, Uferhöhe 36 mNN, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, Bodenkenngößen gemäß Versuch erhöht, globale Gesamtstandsicherheit $\eta = 1,25$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN	51
Bild 23 QS 4 Regelquerschnitt mit Baumlast, Uferhöhe 33,7 mNN, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Standsicherheit des Gesamtsystems $\eta = 1,25$ (tiefer Gleitkreis nach [U 2]) Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN	54
Bild 24 QS 4 Regelquerschnitt mit Baumlast, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Standsicherheit der oberen Ufersicherung $\eta = 1,8$ Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	56
Bild 25 QS 4, Uferhöhe 36mNN mit Baumlast und Bodenkenngößen gemäß Probelastung, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Standsicherheit der oberen Ufersicherung $\eta = 1,25$ Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	59

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngößen für die Uferböschungen

Bild 26 QS 6, Uferhöhe 35,0 mNN, Geländeneigung 1:3, Phi-c-Reduktion mit Bodenkenngößen gemäß [U 1], Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Standsicherheit der oberen Ufersicherung $\eta = 1,15$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN	62
Bild 27 QS 1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN, Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,43$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN	68
Bild 28 QS 3 Probelastung, Uferhöhe 33,7 mNN, verbesserte Bodenkenngößen φ' = 32,5° und $c' = 4$ kN/m ² , globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 0,96$ Lasten: Probelast A = 130 kN/m ² , Kanalwasser 32,1 mNN.....	69
Bild 29 QS 2, Uferhöhe 36 mNN, verbesserte Bodenkenngößen gemäß Probelastung, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,20$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	70
Bild 30 QS 4, Regelquerschnitt mit Baum, Uferhöhe 33,7 mNN, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,5$ Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	71
Bild 31 QS 5, Uferhöhe 36 mNN mit Baum, verbesserte Bodenkenngößen gemäß Probelastung, globale Standsicherheit obere Ufersicherung: $\eta = 1,2$	72
Bild 32 QS 6, Uferhöhe 35 mNN, 1:3 geneigtes Gelände, verbesserte Bodenkenngößen gemäß Probelastung, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,25$ Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m ² , Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN.....	73
Bild 33 Statisches Modell für Modellbaum C.....	79
Bild 34 Mindestbreite der Gleitkreise	82

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngößen für die Uferböschungen

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht Berechnungsquerschnitte	29
Tabelle 2:	Ergebnisse der Rückrechnung der Probelastung	48
Tabelle 3:	Globale Sicherheiten η der oberen Ufersicherung nach Sanierung der unteren Ufersicherung gemäß numerischer Berechnung	65
Tabelle 4:	Sicherheiten der oberen Ufersicherung, Vergleich zwischen FEM-Berechnung (Globalsicherheit η), DIN 4084:1981 (Globalsicherheit η) und DIN 4084:2009 (Teilsicherheiten*), *Angabe von Ausnutzungsgrad μ im Lastfall 1	74

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

1 Aufgabenstellung

Das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Berlin plant die Sanierung der Ufersicherungen des Landwehrkanals (LWK). Der Kanal hat eine Länge von ca. 10 km und wurde um das Jahr 1890 gebaut. Zu der Standsicherheit der Ufersicherungen wurden bereits statische Untersuchungen durchgeführt, die teilweise unzureichende Standsicherheiten ergeben haben. In besonders kritischen Bereichen wurden bereits Sanierungsmaßnahmen durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes „Zukunft Landwehrkanal“ hat das WSA Berlin Krebs und Kiefer beauftragt, numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Bodenkenngößen der Uferböschungen oberhalb des Kanalwasserspiegels durchzuführen. Die Untersuchungen sollen für den Regelquerschnitt mit verschiedenen Uferhöhen durchgeführt werden. Ziel ist, anhand der bisherigen Baugrunduntersuchungen und der vorhandenen Randbedingungen die bodenmechanischen Berechnungsgrundlagen für die Entwurfs- und Ausführungsplanung festzulegen. Die numerischen Ergebnisse sollen analytisch mit den Berechnungsverfahren der DIN 4084 überprüft werden.

2 Unterlagen

Für die Bearbeitung des Gutachtens standen neben den einschlägigen Vorschriften, Richtlinien und Normen die nachfolgenden Unterlagen zur Verfügung:

- [U 1] Baugrundgutachten für die Ufermauern am Landwehrkanal, erstellt von der Bundesanstalt für Wasserbau vom 24.06.2008
- [U 2] Geotechnische Stellungnahme zu den Uferstandsicherheiten nach DIN 4084 für verschiedene Berechnungsannahmen, erstellt von der Bundesanstalt für Wasserbau vom 27.06.2007
- [U 3] Berichte über die Ergebnisse von Standsicherheitsuntersuchungen an verschiedenen Ufermauerhöhen beim Bauvorhaben Zukunft Landwehrkanal, erstellt von der Geotechnik und Dynamik GmbH (GuD) Berlin vom 08.04.2011 und 16.11.2011.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngößen für die Uferböschungen

- [U 4] Gutachterliche Stellungnahme zu den von GuD gewählten Lastansätzen der Bäume Corneliusstraße, erstellt von Sachverständigenbüro Dipl.-Forstwirt Prof. Dr. Ulrich Weihs, Bovenden vom 16.03.2011.
- [U 5] Erläuterungen zum Ausbau des Landwehrkanals, erstellt vom Senator für Stadtentwicklung und Umweltschutz am 14.02.1989
- [U 6] Großversuch zur experimentellen Bestimmung der Tragfähigkeit einer Uferwand am Landwehrkanal in Berlin, erstellt von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz
- [U 7] Diverse Bestandsunterlagen des WSA Berlin
- [U 8] Geländebruchberechnungen des WNA Berlin von 2011

3 Vorschriften, Richtlinien, Literatur

- [U 9] DIN 1054:2005 Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau.
- [U 10] DIN 4084:1981 Geländebruchberechnungen (Globalsicherheitskonzept)
- [U 11] DIN 4084:2009 Geländebruchberechnungen (Teilsicherheitskonzept)
- [U 12] Empfehlungen der Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ - EAU 2004 von der HGT und der DGGT
- [U 13] Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ – EAB 2006 von der DGGT
- [U 14] Merkblatt zur Standsicherheit von Dämmen (MSD) 2011 von der BAW
- [U 15] Plaxis 2D Manuals 2010
- [U 16] Einführung in die Ingenieurbiologie, Skriptum der ETH Zürich, Institut für Kulturtechnik, Dr. Silvia Tobias vom Januar 2000
- [U 17] Die Wurzeln der Waldbäume, Köstler, Brückner, Bibelriether, Verlag Paul Parey, 1968
- [U 18] Einsatz von Pflanzen zur Befestigung von Böschungen, Schuppener BAW, Beiträge zum PIANC-Schiffahrtskongress 2002

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

4 Konstruktion Regelquerschnitt Ufersicherung

Untere Ufersicherung

Die Ufersicherung besteht im Regelbereich unterhalb des Kanalwasserspiegels aus einem Betonstützkörper, der in Holzspundwände eingefasst ist. Dieser Teil der Ufersicherung wird in diesem Bericht als „**untere Ufersicherung**“ bezeichnet. Der Regelquerschnitt ist auf Bild 1 dargestellt.

Obere Ufersicherung

Oberhalb des Kanalwasserspiegels wurde eine Uferböschung mit einer Neigung 1:0,56 hergestellt und mit einem Quadermauerwerk aus Natursteinen abgedeckt. Dieser Teil wird im Weiteren als „**obere Ufersicherung**“ bezeichnet. Zwischen Betonkörper und Quadermauerwerk wurde eine Ziegelflachsicht eingebaut.

Gemäß Aufgabenstellung konzentrieren sich die Untersuchungen auf den Bereich der oberen Uferböschung.

Die Höhe der Uferböschungen liegt im Regelbereich bei 33,7 mNN und steigt im Bereich von Brücken regelmäßig bis ca. 36 mNN an. Die Bauweise ist bei den unterschiedlichen Uferhöhen nach dem gleichen Prinzip: die obere Ufersicherung wird systematisch fortgesetzt mit entsprechend angepasster Anzahl von Sandsteinquadern. Die Neigung des Mauerwerkes bleibt dabei unverändert.

Das anschließende Gelände ist horizontal oder leicht geneigt. Die örtliche Geländeneigung beträgt bis zu ca. 1:3.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

4.1 Bauwerksschäden und Sanierungsmaßnahmen

Im Bodengutachten [U 1] werden Angaben zu örtlichen Schäden gemacht, z. B. am Maybachufer und bei km 5,172. Bei den Taucheruntersuchungen des WSA Berlin wurden Schäden im Bereich der unteren Ufersicherung festgestellt. Die Überlagerung der festgestellten Schäden ergab das Schadensbild auf Bild 2. Aus den festgestellten Auskolkungen lässt sich schließen, dass die Schadensursache im Bereich der unteren Ufersicherung liegt. Hieraus haben sich Folgeschäden im Bereich der oberen Ufersicherung ergeben.

Zur Sicherung des unteren Uferbereiches wurden örtlich Stahlspundwände vorgesezt, u. a. an der Corneliusstraße. Der Raum zwischen vorgesezter Spundwand und bestehender Ufersicherung wurde mit Kiessand verfüllt (siehe Bild 3). Bereichsweise erfolgte eine temporäre Sicherung durch eine Vorschüttung mit Sandsäcken, z. B. an der Brücke Prinzenstraße.

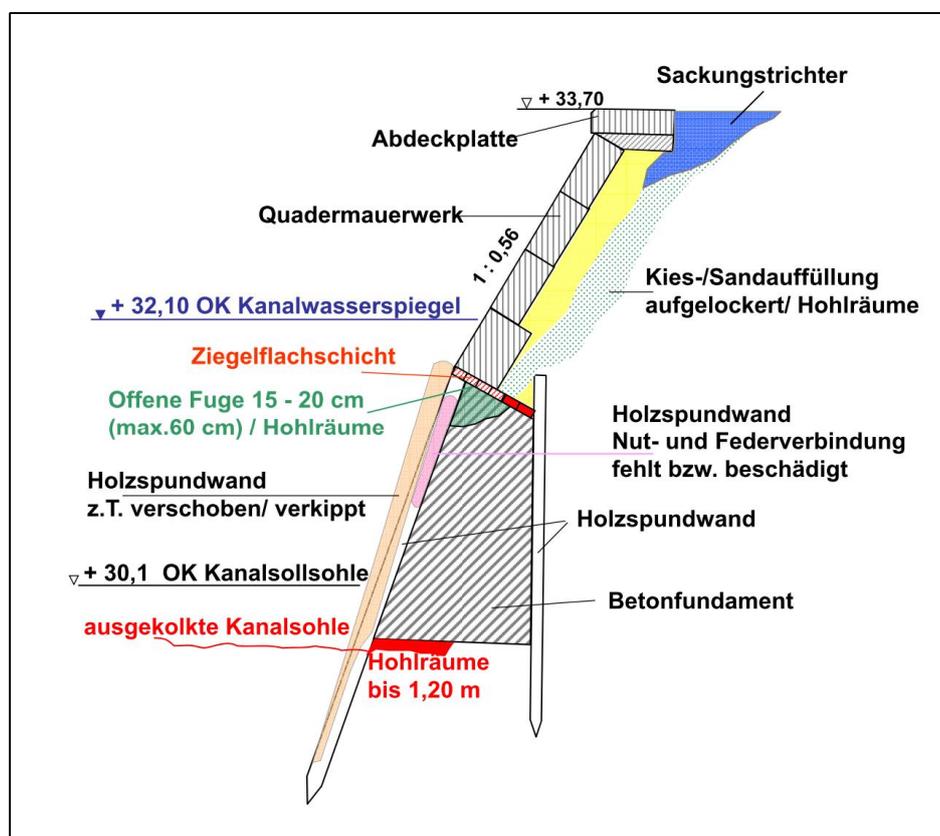


Bild 2 Überlagertes allgemeines Schadensbild aus 2007 nach Unterlage [U 1]

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

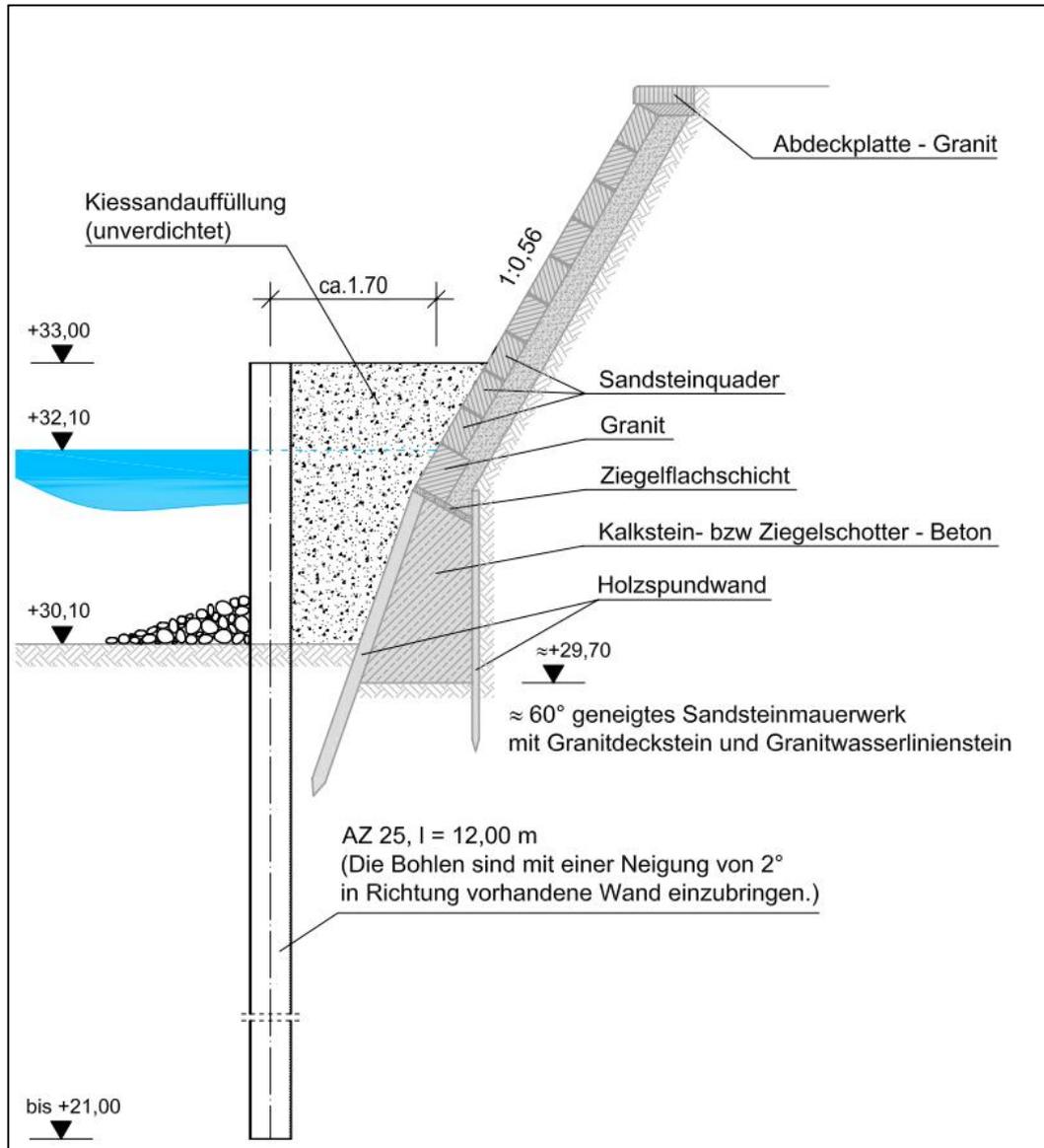


Bild 3 Bauweise Sicherungspundwand gemäß Angabe des WSA Berlin

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

5 Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Im Rahmen der Erstellung des Bodengutachtens der BAW [U 1] wurden zahlreiche Baugrundaufschlüsse in Form von Bohrungen, Ramm- und Drucksondierungen ausgewertet. Danach und aus den Bestandsunterlagen [U 7] ergibt sich zusammengefasst folgender Baugrundaufbau:

Mutterboden

Außerhalb der versiegelten Flächen wurde eine geringmächtige, ca. 0,2 bis 0,4 m dicke Mutterbodenschicht mit Grasnarbe angetroffen.

Auffüllung

Anhand der Bestandsunterlagen lässt sich erkennen, dass die landseitige Auffüllung bis zur Oberkante des Betonkörpers reicht und somit die maßgebliche Schicht für die Standsicherheit der oberen Ufersicherung ist. Die Auffüllung besteht laut Unterlage [U 1] überwiegend aus enggestuften Fein- bis Mittelsanden, die Schluff, Grobsand und Feinkies enthalten. Teilweise sind schwach organische Beimengungen enthalten. In unregelmäßiger Verteilung sind Steine, Schotter und Bauschuttreste enthalten.

Die Spitzenwiderstände der Drucksonde (CPT nach DIN 4094-01) liegen zwischen 2 bis 5 MN/m² und die Schlagzahlen der schweren Rammsonde (DPH nach DIN 4094-03) zwischen 1 bis 4 Schläge pro 10 cm. Daraus lässt sich eine vorwiegend geringe bis reichsweise mittlere Festigkeit ableiten.

Torf/Faulschlamm, sandig

Laut Bodengutachten haben die Torf- und Faulschlammschichten nur eine untergeordnete Bedeutung für die Ufersicherung und werden daher bei den Untersuchungen zu den Regelbereichen nicht näher betrachtet. Sollten sich zukünftig Bereiche zeigen, in denen diese Schichten eine Bedeutung haben, so sind diese gesondert zu betrachten.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Talsande

Die Talsande bestehen überwiegend aus enggestuften Mittelsanden mit unterschiedlichen feinsandigen und grobsandigen Anteilen. Teilweise sind auch Kiese enthalten. Mit zunehmender Tiefe gehen die Sande häufig in ein Sand-Kies-Gemisch über. Vereinzelt können Steine eingelagert sein. Die Sondierungen zeigen eine mit der Tiefe zunehmende Festigkeit der Talsande.

Geschiebemergel

Bereichsweise wurde eine nicht durchgängige Schicht aus Geschiebemergel erbohrt, die in die Talsande eingelagert ist. Die Lage der Geschiebemergel ist so tief, dass diese keinen direkten Einfluss auf die vorhandene Ufersicherung hat. Daher wird diese Bodenschicht hier nicht weiter betrachtet.

Genauere Angaben zu den Baugrundverhältnissen können dem Bodengutachten [U 1] entnommen werden. Die Bodenkenngößen aus dem Bodengutachten sind auf den folgenden beiden Seiten angegeben.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Mutterboden / Auffüllung/ Sande mit sehr geringer Festigkeit	
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
Steifemodul (Zusammendrückbarkeit)	$E_s = 5 \text{ MN/m}^2$
Effektiver Reibungswinkel	$\varphi' = 30^\circ$
Effektive Kohäsion	$c' = 0$
Kapillarkohäsion	$c_K = 2 \text{ kN/m}^2$
Durchlässigkeitsbeiwert	$k = 1 \times 10^{-4} \text{ bis } 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
Bodenklassifikation	A, OH; [SE]; [SU]
gemäß DIN 18 196	1; 3; (4)
gemäß DIN 18 300	NB 1 bis NB 3; (BOB 2)
gemäß DIN 18 311	leicht
Rammbarkeit gemäß EAU 2004 (E154)	
Torf und Faulschlamm, sandig	
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 4 \text{ kN/m}^3$
Steifemodul (Zusammendrückbarkeit)	$E_s = 2 \text{ MN/m}^2$
Anfangsscherfestigkeit:	
Totaler Reibungswinkel des undränierten Bodens	$\varphi_u = 0^\circ$
Kohäsion des undränierten Bodens	$c_u = 30 \text{ kN/m}^2$
Endscherfestigkeit:	
Effektiver Reibungswinkel	$\varphi' = 20^\circ$
Effektive Kohäsion	$c' = 4 \text{ kN/m}^2$
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
Bodenklassifikation	HN, F (OU, OT)
gemäß DIN 18 196	3
gemäß DIN 18 300	BOB 2
gemäß DIN 18 311	leicht
Rammbarkeit gemäß EAU 2004 (E154)	
Sande, z. T. kiesig mit geringer bis mittlerer Festigkeit	
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$
Steifemodul (Zusammendrückbarkeit)	$E_s = 30 \text{ MN/m}^2$
Endscherfestigkeit:	
Effektiver Reibungswinkel	$\varphi' = 32,5^\circ$
Effektive Kohäsion	$c' = 0$
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Bodenklassifikation	SE; (GE)
gemäß DIN 18 196	3
gemäß DIN 18 300	NB 1; NB 3
gemäß DIN 18 311	leicht bis mittelschwer
Rammbarkeit gemäß EAU 2004 (E154)	

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Sande, z. T. kiesig mit mittlerer bis großer Festigkeit	
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 10,5 \text{ kN/m}^3$
Steifemodul (Zusammendrückbarkeit)	$E_s = 70 \text{ MN/m}^2$
Endscherfestigkeit:	
Effektiver Reibungswinkel	$\varphi' = 35^\circ$
Effektive Kohäsion	$c' = 0$
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Bodenklassifikation	
gemäß DIN 18 196	SE; GE
gemäß DIN 18 300	3
gemäß DIN 18 311	NB 1; NB 3
Rammpbarkeit gemäß EAU 2004 (E154)	schwer
Sand + Kies + Steine mit großer bis sehr großer Festigkeit	
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 11 \text{ kN/m}^3$
Steifemodul (Zusammendrückbarkeit)	$E_s = 100 \text{ MN/m}^2$
Endscherfestigkeit:	
Effektiver Reibungswinkel	$\varphi' = 37,5^\circ$
Effektive Kohäsion	$c' = 0$
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
Bodenklassifikation	
gemäß DIN 18 196	SE; SW; GE; GW
gemäß DIN 18 300	3
gemäß DIN 18 311	NB 1; NB 3
Rammpbarkeit gemäß EAU 2004 (E154)	schwerst
Geschiebemergel steifer bis halbfester, z. T. fester Konsistenz	
Wichte des feuchten Bodens	$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$
Wichte des Bodens unter Auftrieb	$\gamma' = 12 \text{ kN/m}^3$
Steifemodul (Zusammendrückbarkeit)	$E_s = 50 \text{ MN/m}^2$
Anfangsscherfestigkeit:	
Totaler Reibungswinkel des undrännierten Bodens	$\varphi_u = 0^\circ$
Kohäsion des undrännierten Bodens	$c_u \geq 200 \text{ (bis } 600) \text{ kN/m}^2$
Endscherfestigkeit:	
Effektiver Reibungswinkel	$\varphi' = 27,5^\circ$
Effektive Kohäsion	$c' = 30 \text{ kN/m}^2$
Durchlässigkeitsbeiwert	$k \leq 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$
Bodenklassifikation	
gemäß DIN 18 196	TL
gemäß DIN 18 300	5 - 6
gemäß DIN 18 311	BOB 2; BOB3; (BOB 4)
Rammpbarkeit gemäß EAU 2004 (E154)	schwer bis schwerst

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Hydrologische Verhältnisse

Der Kanalwasserstand liegt bei 32,1 mNN. In Abstimmung mit dem WSA Berlin und der BAW (Abstimmungsgespräch am 5.12.2011 beim WSA Berlin) kann für die numerischen Untersuchungen von einem Sunk infolge Schifffahrt von 40 cm und von einem maximalen Grundwasserstand von 32,4 mNN ausgegangen werden.

6 Berechnungsmodell

Zur Durchführung der numerischen Untersuchungen wurde die Ufersicherung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit dem Programm Plaxis 2D Version 2010.01 modelliert.

6.1 Stoffgesetze

Die Bodeneigenschaften werden mit dem Hardening-Soil Modell simuliert. Dieses elasto-plastische Modell geht auf einen hyperbolischen Ansatz zurück und ist in Verbindung mit einer Reibungs-Verfestigung formuliert. Zusätzlich kann das Modell eine Kompressionsverfestigung (Kappe) zur Erfassung irreversibler Zusammendrückung unter Erstbelastung einbeziehen [U 15]. Die Bodenkenngößen werden im ersten Berechnungsschritt entsprechend den oben beschriebenen Baugrundeigenschaften angesetzt (siehe vorherige Seiten).

Für die Natursteine des Quadermauerwerkes wurde das Mohr-Coulomb Modell verwendet. Damit kann gegenüber einem linear-elastischen Stoffgesetz ausgeschlossen werden, dass unrealistisch hohe Zugspannungen in der Mauer auftreten. Die Fugen zwischen den Steinen werden mit Interface-Elementen abgebildet. Damit kann die Scherfestigkeit in den Fugen reduziert werden.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Für den Betonkörper wird das linear-elastische Stoffgesetz verwendet. Die Spundwände werden mit Plattenelementen simuliert. Die Untersuchung von möglichen Schwachstellen im Betonkörper und in den Holzspundwänden ist nicht Gegenstand der Untersuchungen in diesem Bericht.

Die Bauteileigenschaften wurden wie folgt angesetzt:

- Beton: $E = 10\,000 \text{ MN/m}^2$ (entspricht 50 % der heutigen Mindestbetonsteifigkeit nach DIN 1045)
Untersuchungen mit möglicherweise deutlich schlechteren Betoneigenschaften werden im Rahmen dieses Berichtes nicht durchgeführt, weil die Standsicherheit der unteren Ufersicherung nicht Gegenstand der Aufgabenstellung ist.
- Holzspundwand: Dicke $d = 0,12 \text{ m}$
 $E = 600 \text{ MN/m}^2$ (für Eiche nach DIN 1052)
 $EA = 72 \text{ MN/m}$
 $EI = 86,4 \text{ MN m}^2/\text{m}$
- Stahlspundwand AZ 25: $E = 210\,000 \text{ MN/m}^2$
 $EA = 3885 \text{ MN/m}$
 $EI = 109,7 \text{ MN/m}$
(Grundlage: Arcelor Produkthandbuch)
- Steine Quadermauerwerk: $E = 500 \text{ MN/m}^2$ (unterer Wert)
 $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$
 $\varphi' = 45^\circ$
 $c' = 40 \text{ kN/m}^2$
(Erfahrungswerte für Sandstein)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

- Fugen zwischen Steinen: $\varphi' = 35^\circ$
 $c' = 1 \text{ bis } 5 \text{ kN/m}^2$

Mit der geringen Kohäsion werden mögliche Mängel und Schäden an den Fugen berücksichtigt, die aufgrund des Alters vorhanden sein können.

- Kieshinterfüllung

Quadermauer: $\varphi' = 35^\circ$
 $c' = 1 \text{ kN/m}^2$ (aus rechentechnischen Gründen
nicht 0)
 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

6.2 Finites-Elemente-Modell

Als Finites-Elemente-Modell wurden maßgebliche Uferquerschnitte abgebildet. Die Ergebnisse sind repräsentativ für den Regelbereich des Landwehrkanals. Die anderen Ufersicherungen sowie örtliche Besonderheiten sind nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Diese sind im Zuge der weiteren Planung zu betrachten.

Die Bemaßung auf den Bestandsplänen ist nicht vollständig. Daher wurde die Geometrie teilweise herausgemessen. Die für das Berechnungsmodell angesetzte Geometrie ist auf Bild 1 dargestellt. Sollten vor Ort wesentliche Abweichungen davon festgestellt werden, sind ergänzende Betrachtungen notwendig.

Bild 4 zeigt das verwendete Berechnungsmodell für den Regelquerschnitt gemäß Aufgabenstellung. Hierbei wurde bereits eine Sanierungsmaßnahme berücksichtigt, die während den Untersuchungen bei Bedarf aktiviert werden kann.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

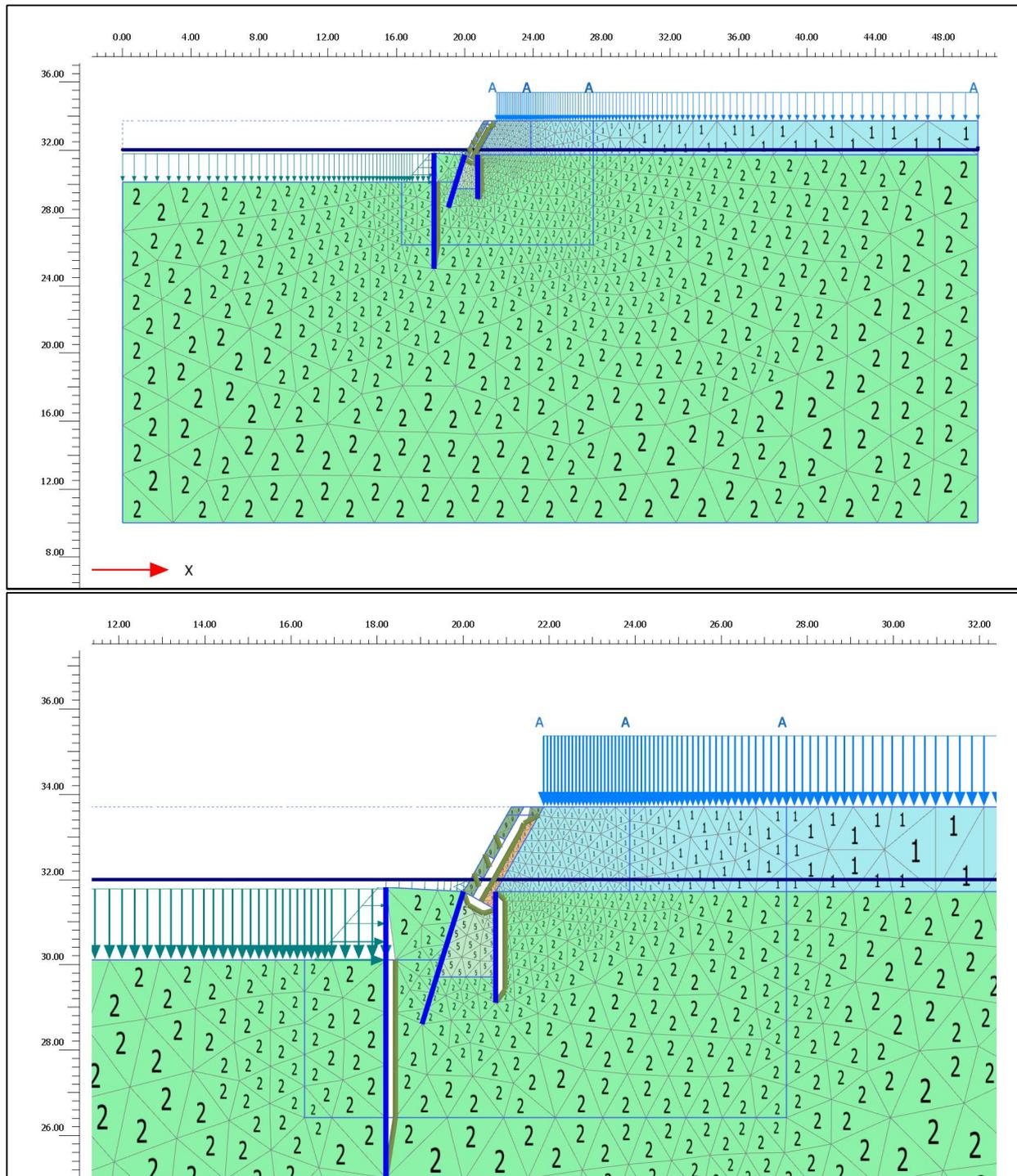


Bild 4 Berechnungsmodell Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN,
oben: Gesamtmodell, unten: Ausschnitt
(1 = Auffüllung, 2 = Talsande, 5 = Beton, 6 = Kies, 9 = Sandsteinquader)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

6.3 Lastansätze

Nutzlasten

Auf der Geländeoberkante wird eine gleichmäßige Flächenlast von 5 kN/m^2 angesetzt. Damit werden mögliche Verkehrslasten berücksichtigt, die nach Angabe der BAW überwiegend aus Fußgängern bestehen. Kleinere Fahrzeuge wie Autos sind damit ebenfalls abgedeckt.

Baumlast

Im Einflussbereich der Ufersicherung befinden sich zahlreiche Bäume. Diese erzeugen Vertikallasten infolge Eigengewicht und Horizontallasten infolge Wind. Gleichzeitig bewirken die Wurzeln eine statische und konstruktive Verbesserung der örtlichen Bodeneigenschaften. In den Unterlagen [U 3] und [U 4] wird auf diese Thematik eingegangen und es werden Ersatzlasten für die Bäume ermittelt. Die dort gewählten und abgestimmten Ansätze sind aus unserer Sicht plausibel und die Lasten werden in das FEM-Modell übernommen. Angesetzt wird die in Unterlage [U 3] größte ermittelte Baumlast (Modellbaum C) direkt hinter dem Quadermauerwerk. Mit diesem ungünstigen Ansatz soll eine Aussage für die überwiegende Anzahl der ufernahen Bäume getroffen werden. Sollten einzelne ungünstigere Bäume im Zuge der weiteren Planung gefunden werden, sind diese gesondert zu betrachten.

Die angesetzte Baumlast für Modellbaum C setzt sich aus einer Vertikallast von $96,3 \text{ kN}$ und einer horizontallast von 80 kN zusammen. Da die Last räumlich wirkt, erfolgt eine Lastverteilung in dem zweidimensionalen Berechnungsmodell gemäß EAB [U 13]. Die räumliche Lastverteilung ist auf Bild 5 dargestellt.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

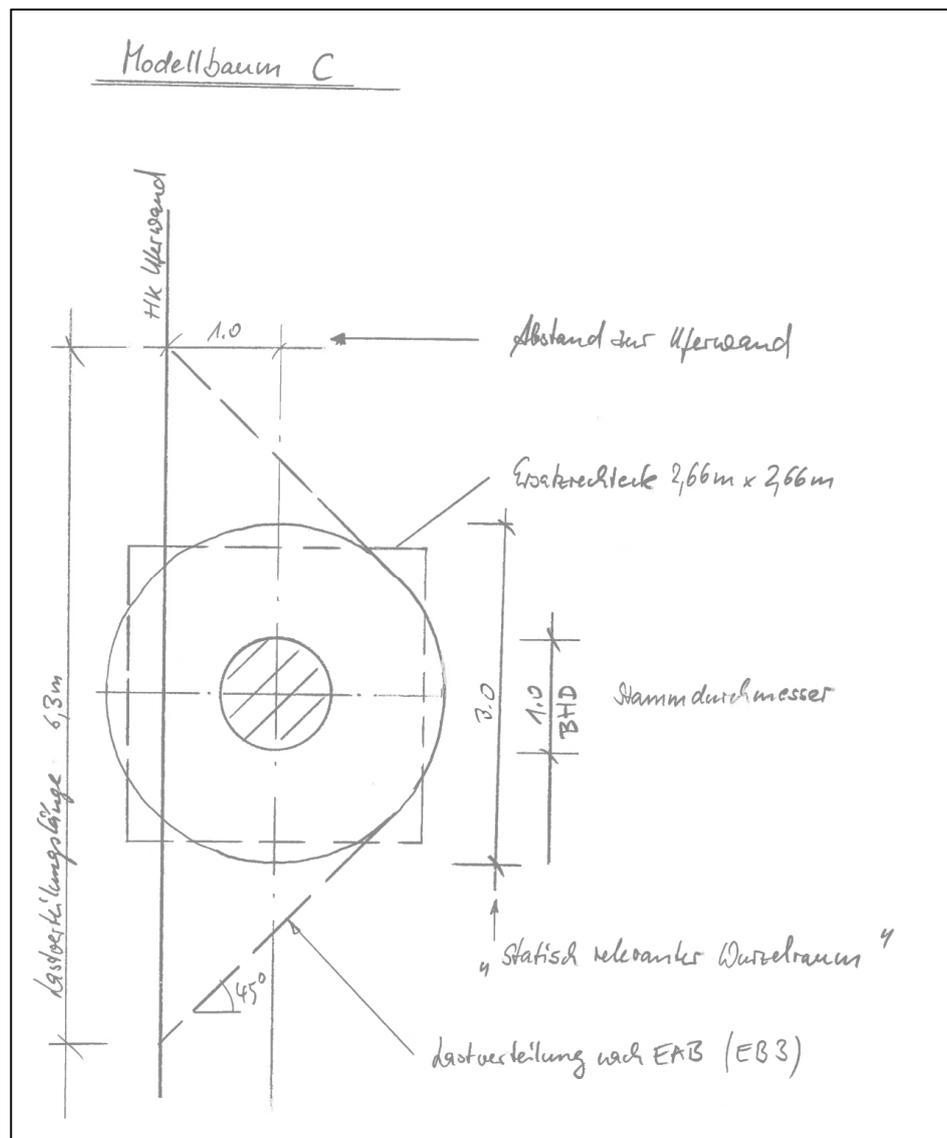


Bild 5 Lastverteilung Modellbaum C

Daraus ergibt sich ein Ersatzlaststreifen von 2,66 m mit einer Vertikallast von 6 kN/m² und einer Horizontallast von 5 kN/m². Die Baumlasten werden mit der oben genannten Verkehrslast von 5 kN/m² überlagert.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Infolge der Windbeanspruchung in Richtung Kanal wird ein Moment im Wurzelbereich abgetragen. Der Abtrag erfolgt durch den verwurzelten Bodenkörper, in dem die Wurzeln wie Druck- und Zugverankerungen wirken (siehe [U 16] und [U 17]). Das Moment wirkt im Berechnungsquerschnitt gegen den Uhrzeigersinn. Bei den späteren Geländebruchberechnungen wird ein Momentengleichgewicht um einen Punkt gebildet, der links oberhalb der betrachteten Böschung liegt (siehe Bild 6). Ungünstig wirkende Kräfte wie Erddruck, Baumgewicht und Wind bewirken ein Moment, das im Uhrzeigersinn dreht. Das Moment aus Baumlast wirkt diesen Einwirkungen entgegen und ist folglich günstig. Voraussetzung dafür ist, dass der Baum als Ganzes versagt. Dieser Sachverhalt wird durch die Vergleichsberechnung auf den folgenden Seite verdeutlicht. Hier wurde das Moment aus programmtechnischen Gründen in ein Kräftepaar im Wurzelbereich umgerechnet.

Das Moment wird aus den genannten Gründen in dem vereinfachten statischen Ersatzmodell für die Baumlasten nicht angesetzt.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

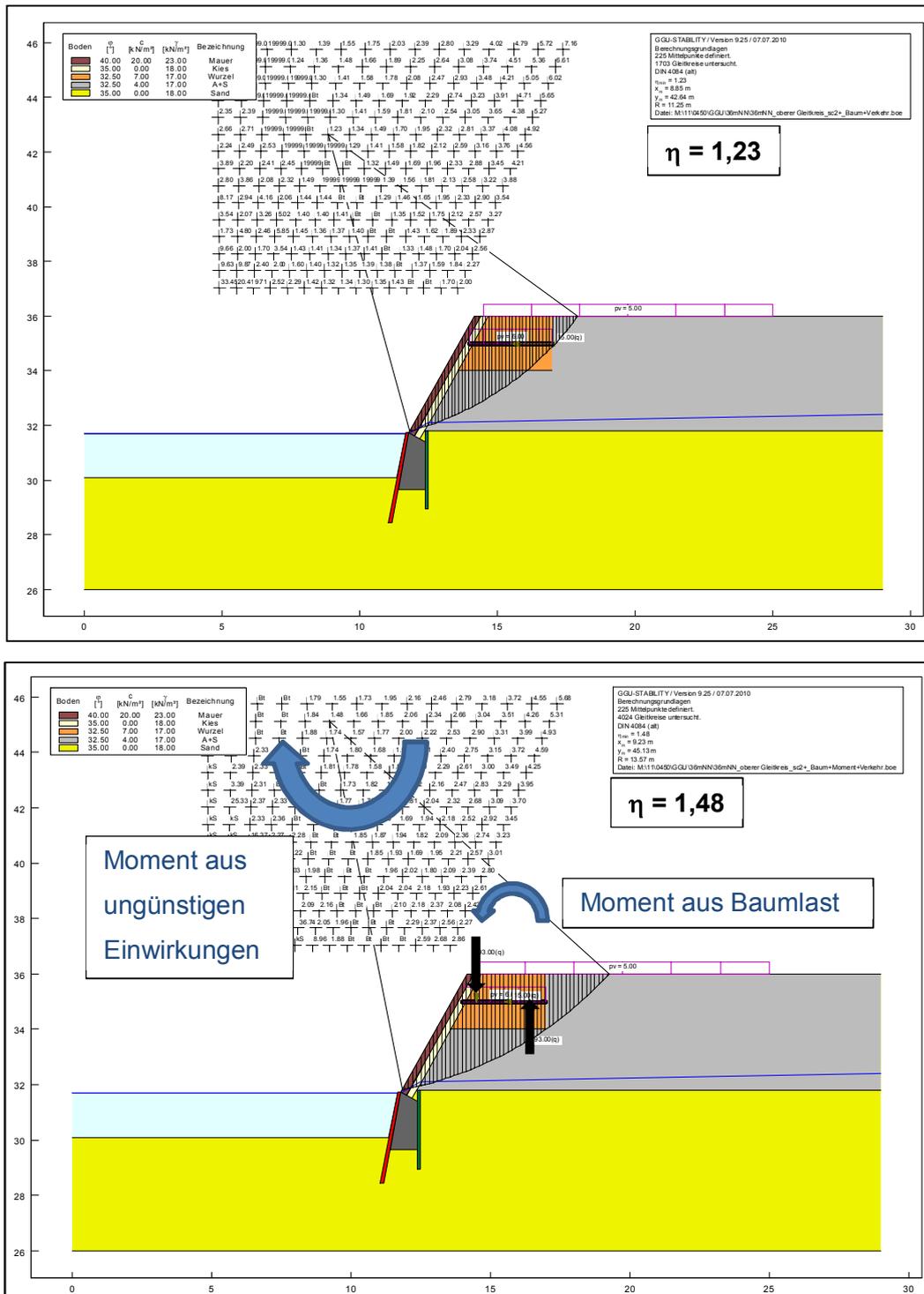


Bild 6 Geländebruchberechnungen ohne und mit Moment aus Baumlast

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Nach Unterlage [U 4] kann aufgrund der Boden- und Grundwasserverhältnisse davon ausgegangen werden, dass sich ein „tiefer in den Untergrund reichendes Wurzelwerk ausgebildet hat“. Damit der Baum sich mit Wasser versorgen kann, wachsen die Wurzeln höchstwahrscheinlich in Richtung des Grundwassers. Die Beschreibungen entsprechen einem Herzwurzelsystem (siehe Bild 7). Da für die Berechnungen der größte Baum mit den maximalen Lasten gewählt wurde, kann auch von einem ausgeprägten Wurzelwerk ausgegangen werden. Bild 8 zeigt Wurzelbildungen für Laubbäume in Abhängigkeit von Stamm- und Kronendimension [U17]. Danach entspricht Modellbaum C dem vierten Baum von links. Unter Anbetracht der vorliegenden Informationen wird für das Berechnungsmodell eine Wurzeltiefe von 1,5 m gewählt. Diese Annahme liegt unseres Erachtens auf der sicheren Seite. Die Lage der Lastfläche nach Bild 5 wird entsprechend der Wurzelbildung 1,0 m unter Geländeoberkante (GOK) angesetzt.

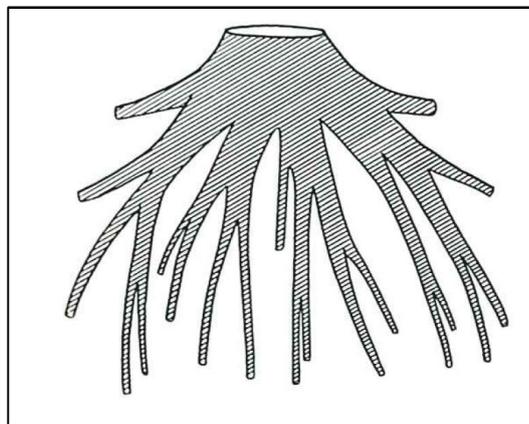


Bild 7 Herzwurzelsystem nach [U 17]

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

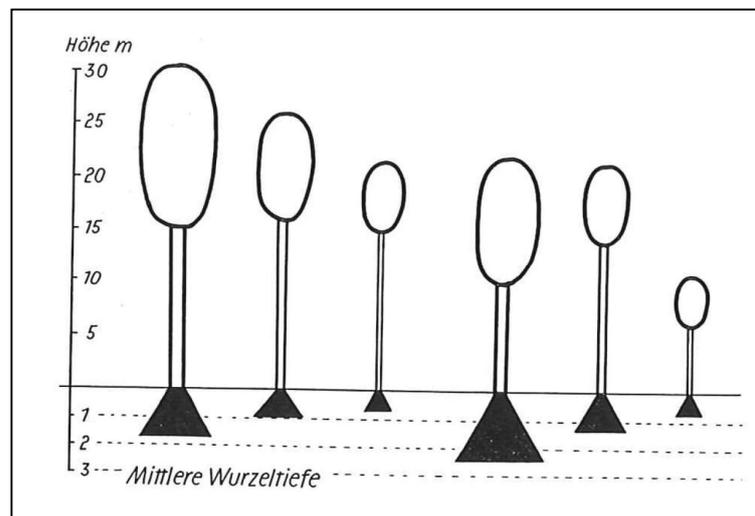


Bild 8 Wurzeliefen von Laubbäumen in Abhängigkeit von Stamm- und Kronendimension [U 17]

Die Eigenschaften des verwurzelten Bodens werden im Rahmen der Parameterstudie untersucht. Auf diese wird daher später eingegangen. Das Berechnungsmodell mit Baum ist auf Bild 9 dargestellt.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngößen für die Uferböschungen

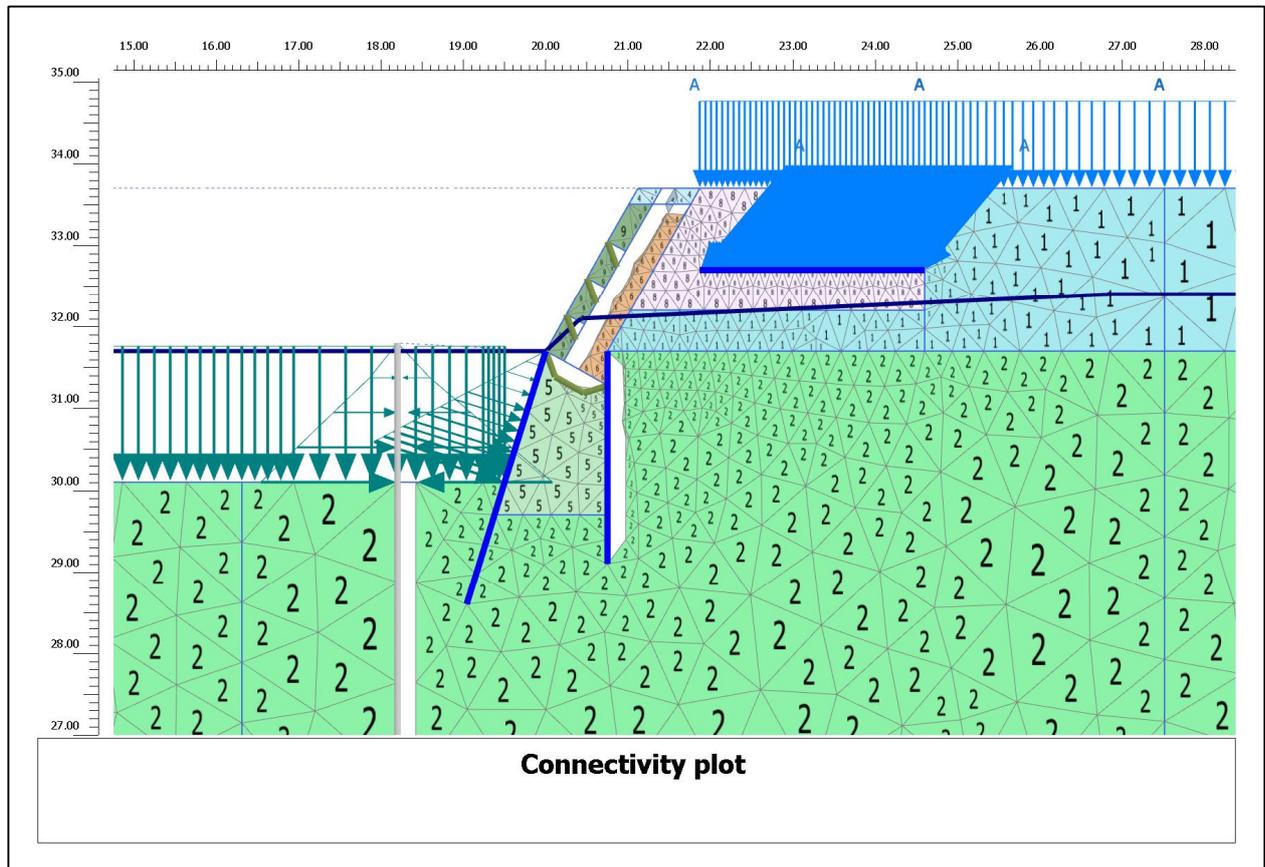


Bild 9 Simulation der Baumlast, 8 = verwurzelter Boden, 1,5 m tief

Wasserdruck

Bei den Berechnungen werden die oben beschriebenen hydrologischen Verhältnisse berücksichtigt:

Kanalwasser 32,1 mNN

Grundwasser 32,4 mNN

Sunk: 0,4 m

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

6.4 Berechnungsphasen

Zur Berücksichtigung von Initialspannungen und der maßgeblichen Spannungsentwicklung im Baugrund, werden die Berechnungen in die folgenden Phasen unterteilt:

1. Initialspannungszustand
2. Aushub des Kanals und Herstellung der Ufersicherung
3. Aufbringen der jeweiligen Belastung (Verkehrslast, Wasserdruck, Baumlast)
4. Phi-c-Reduktion

In der letzten Phase erfolgt eine Phi-c-Reduktion. Dabei werden die Scherfestigkeiten der Böden sukzessive reduziert, bis ein Bruch eintritt [U 15]. Mit diesem Rechengang lassen sich die Bodenkenngößen effektiv zurückrechnen und die vorhandenen Sicherheiten rechnerisch abschätzen.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngößen für die Uferböschungen

6.5 Berechnungsquerschnitte

Alle Berechnungsquerschnitte werden auf Grundlage des Regelquerschnittes festgelegt. Größere Uferhöhen werden durch systematisches Fortsetzen der Quadermauer gesichert. Folgende Berechnungsquerschnitte werden untersucht:

Nummer	Bezeichnung	Zielsetzung
QS 1	Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN	Ausgangsquerschnitt
QS 2	Erhöhtes Ufer, Uferhöhe 36,0 mNN	Typische erhöhte Uferböschung im Bereich von Brücken
QS 3	Probebelastung, Uferhöhe 33,7 mNN	Nachrechnung der durchgeführten Probebelastung
QS 4	Regelquerschnitt mit Baum, Uferhöhe 33,7 mNN	Einfluss der Baumlasten im Regelbereich
QS 5	Erhöhtes Ufer mit Baum, Uferhöhe 36,0 mNN	Einfluss der Baumlasten bei erhöhtem Ufer
QS 6	Mittlere Uferböschung mit anschließender Geländeneigung, Uferhöhe 35,0 mNN, Geländeneigung 1:3	Ergänzende Abschätzung der Sicherheiten

Tabelle 1: Übersicht Berechnungsquerschnitte

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

7 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse und Interpretation

7.1 Statisches System allgemein

In Unterlage [U 3] wird das Quadermauerwerk als Schwergewichtswand betrachtet, die durch Erddruck belastet ist. Bei dem Nachweis wird festgestellt, dass die Standsicherheit unterschritten wird. Der Kippnachweis ist nicht annähernd erfüllt.

Die Schlussfolgerung aus diesen Berechnungen ist aus unserer Sicht, dass die Wirkung der Quadermauerwerks als Schwergewichtswand nicht zutreffend ist.

Der hierfür angesetzte Erddruck kann nicht auftreten, da das horizontale Gleichgewicht hinter dem Mauerwerk nicht erfüllt wäre. Solange die Geländebruchsicherheit erfüllt ist, wirkt kein wesentlicher Erddruck auf das oberflächige Mauerwerk. Dies gilt bereits bei einer Geländebruchsicherheit $> 1,0$. Hohe Erddrucklast würde erst bei einem Bruch der Böschung entstehen. Dieser wäre dann so groß, dass das Mauerwerk den Bruch nicht verhindern kann.

Die Standsicherheit der Böschung wird folglich aufgrund der Bodeneigenschaften erreicht. Maßgeblich für die Standsicherheit der oberen Ufersicherung ist daher allein der Geländebruchnachweis.

Das Quadermauerwerk wirkt nur als Oberflächensicherung und als Verwitterungsschutz. Für diese Funktion sind die Nachweise einer Schwergewichtswand wie Kippen und Gleiten nicht notwendig und können entfallen.

Dieses Verhalten lässt sich durch die FEM-Berechnung und die sich infolge Phi-c-Reduktion einstellenden Bruchkörper nachvollziehen.

Außerdem zeigen die Berechnungsergebnisse, dass die Gesamtstandsicherheit der Böschung von der unteren Konstruktion aus Betonkörper und Holzspundwänden abhängt. Hier treten die maximalen Beanspruchungen bzw. Spannungen auf. Eine Schwächung in diesem Teil der Konstruktion führt zum vollständigen Versagen der Konstruktion, während Schäden im Bereich des Quadermauerwerkes nur zu lokalem Versagen führen können.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Diese Schäden oberhalb des Kanalwasserspiegels lassen sich leichter erkennen und beheben.

Daher empfehlen wir bei der Sicherheitsphilosophie zwischen der Standsicherheit des Gesamtsystems (tiefer Gleitkreis nach [U 2]) und der lokalen Standsicherheit der Quadermauerwerkes (oberer Gleitkreis nach [U 2]) zu unterscheiden.

In den folgenden Abschnitten wird auf die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschnitte eingegangen.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

7.2 Randbedingungen

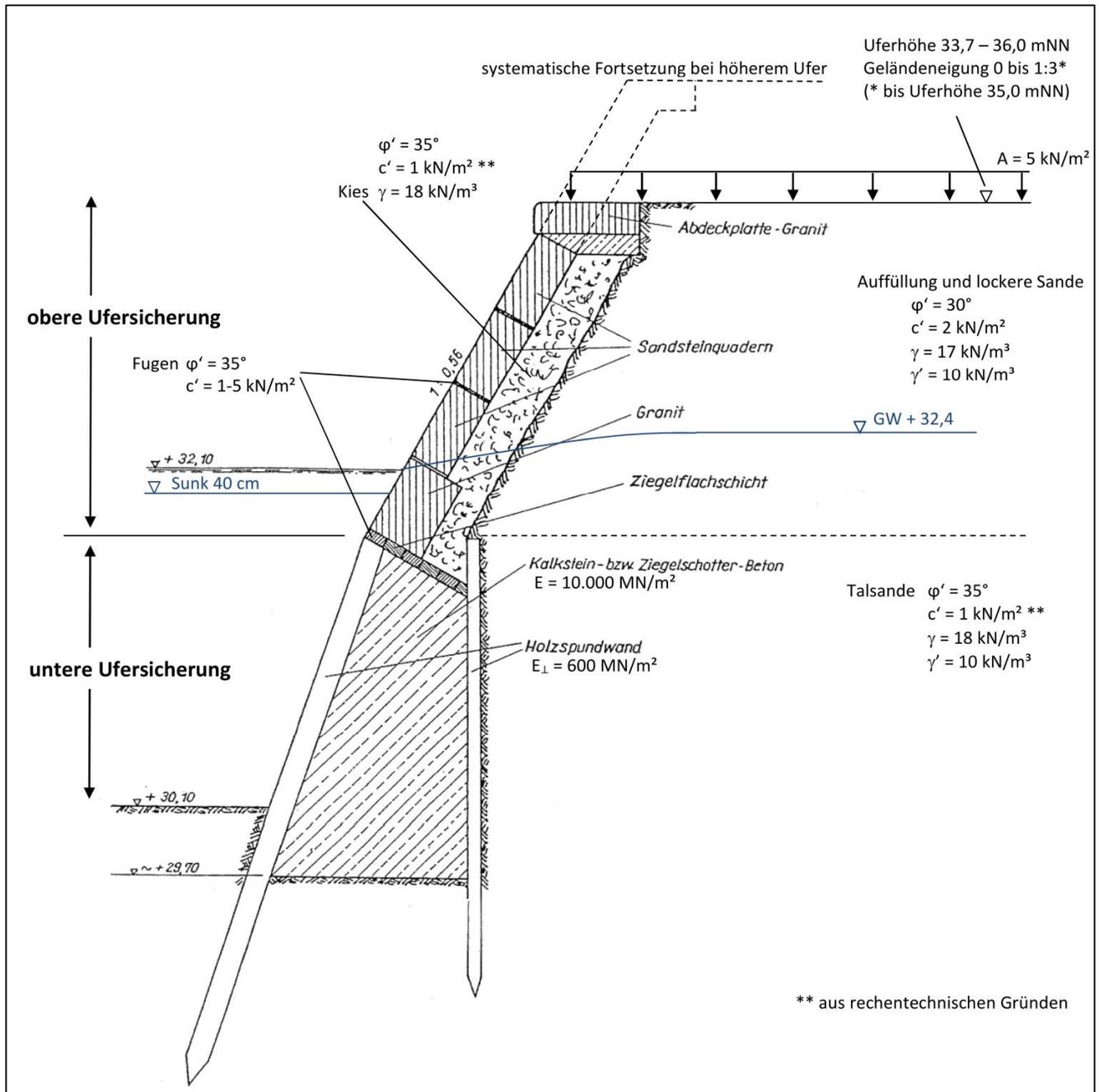


Bild 10 Randbedingungen für die FEM-Berechnungen

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Bei allen Berechnungen wird vorausgesetzt, dass die untere Ufersicherung intakt bzw. saniert ist.

7.3 QS 1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN

Im ersten Berechnungsschnitt wird der Regelquerschnitt gemäß Aufgabenstellung in der jetzigen Situation nachgerechnet und mit den bisherigen Geländebruchberechnungen nach DIN 4084 verglichen [U 1], [U 2] und [U 8]. Auf den Bildern 11 und 12 sind die vertikalen und horizontalen Spannungen dargestellt.

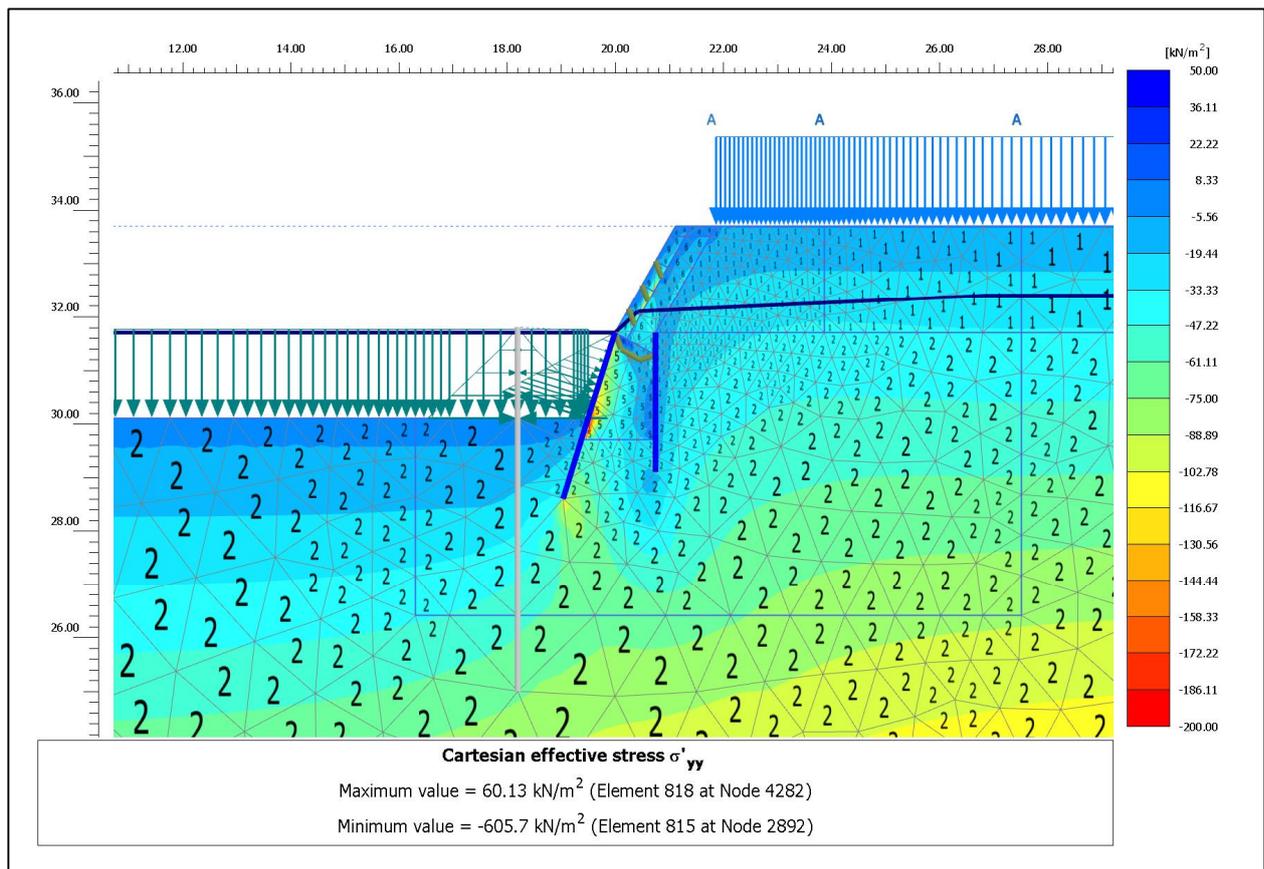


Bild 11 QS 1, Vertikalspannungen Regelquerschnitt
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m^2 , Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

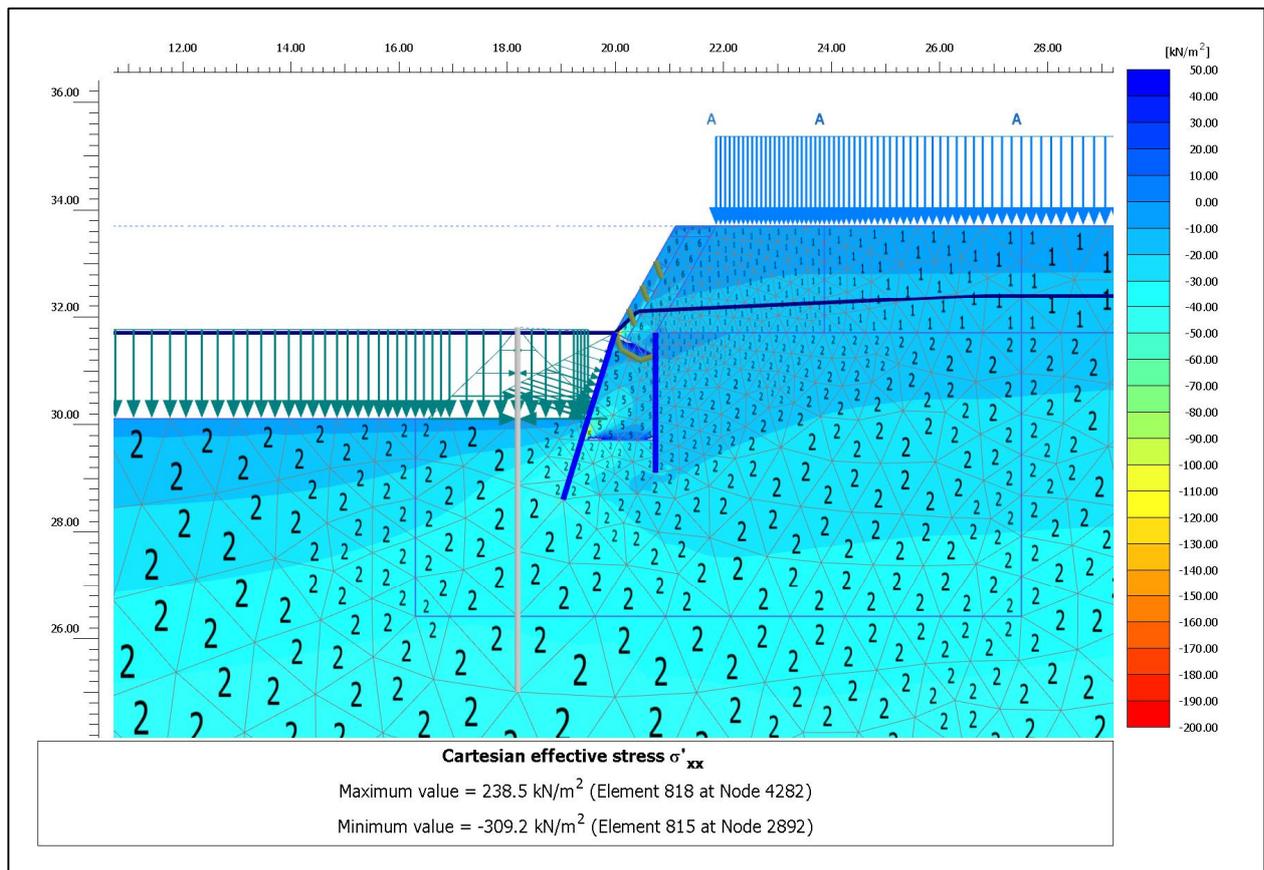


Bild 12 QS 1, Horizontalspannungen Regelquerschnitt
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN

Zur Ermittlung der vorhandenen Gesamtstandsicherheit wurde eine Phi-c-Reduktion durchgeführt. Auf Bild 13 ist der maßgebliche Bruchmechanismus zu sehen. Das Bild 13a zeigt ergänzend die inkrementellen Scherdehnungen und ein Diagramm mit den Verformungen in Abhängigkeit vom Gesamtmultiplikator ΣMsf , der der globalen Sicherheit η entspricht (genauere Erläuterung siehe [U 15]).

Das Versagen tritt in einem großen Gleitkörper auf, der unterhalb der unteren Ufersicherung verläuft. Dies bedeutet, dass die Standsicherheit der oberen Böschung höher

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

ist als die Gesamtstandsicherheit und zeigt, dass zur Verbesserung der Gesamtstandsicherheit die Sanierungsmaßnahmen im Bereich der unteren Ufersicherung entscheidend sind. Die globale Standsicherheit beträgt nach dieser Berechnung $\eta = 1,4$ ohne Wasserdruckdifferenz und $\eta = 1,3$ mit Wasserdruckdifferenz. Voraussetzung für diese Sicherheiten ist eine intakte bzw. sanierte untere Ufersicherung.

Im Vergleich zu den bisherigen Betrachtungen und Berechnungen mit Kreisgleitflächen nach DIN 4084 gibt es gute Übereinstimmungen, folglich sind die angesetzten Randbedingungen und Versagensmechanismen plausibel.

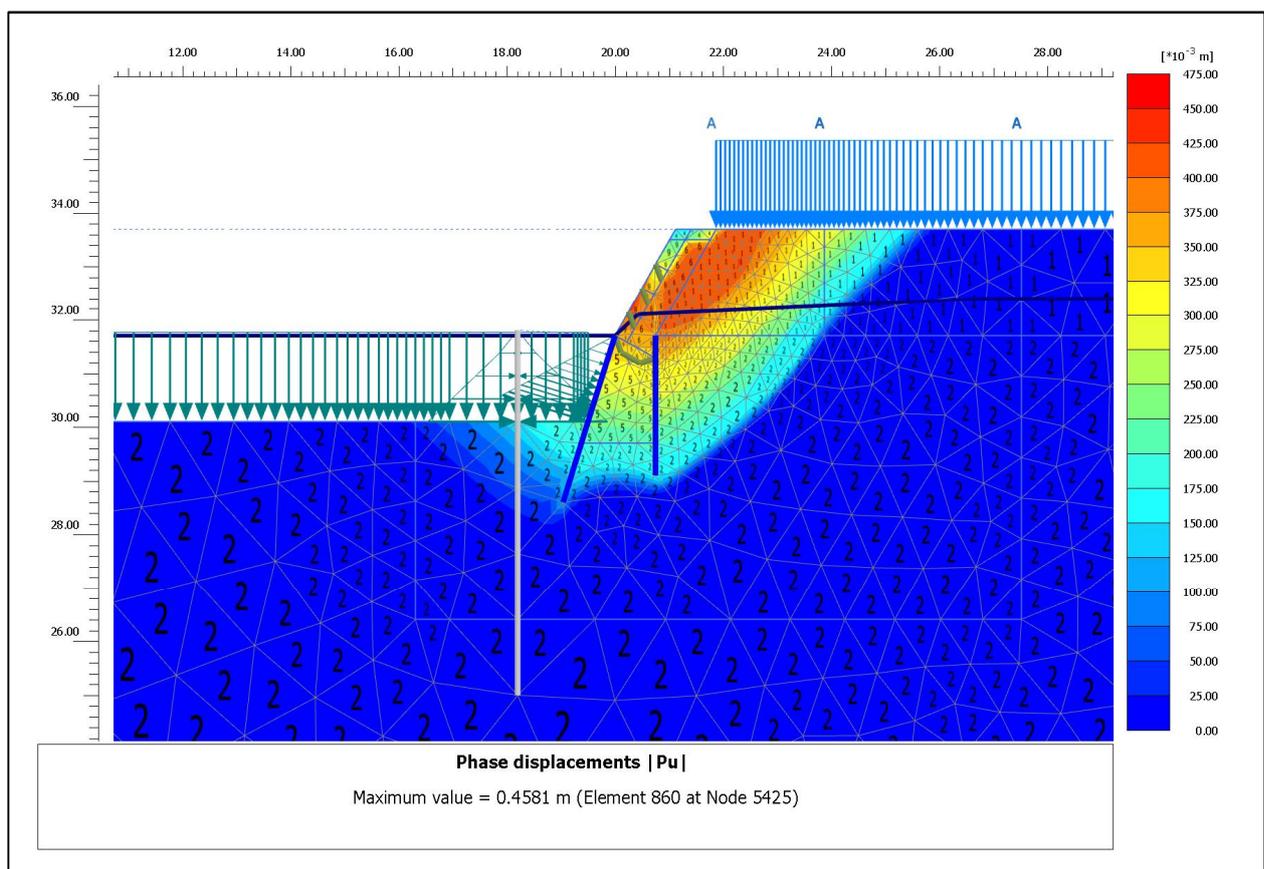


Bild 13 QS1 Regelquerschnitt, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Gesamtstandsicherheit (tiefer Gleitkreis nach [U 2]): $\eta = 1,4$ ohne Wasserdruckdifferenz und $\eta = 1,3$ mit Wasserdruckdifferenz
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

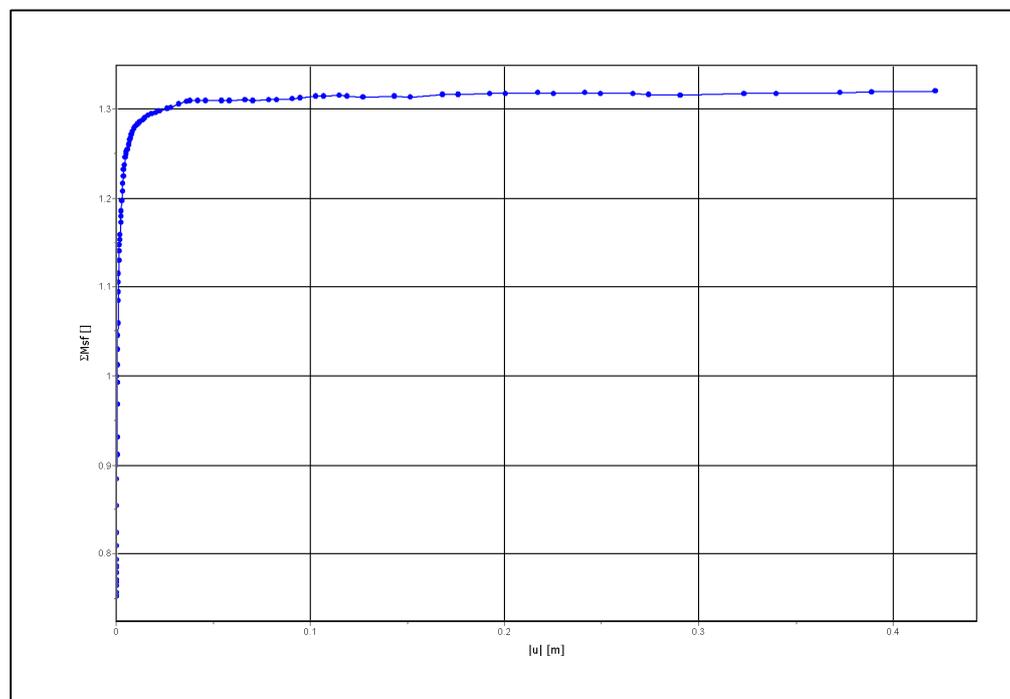
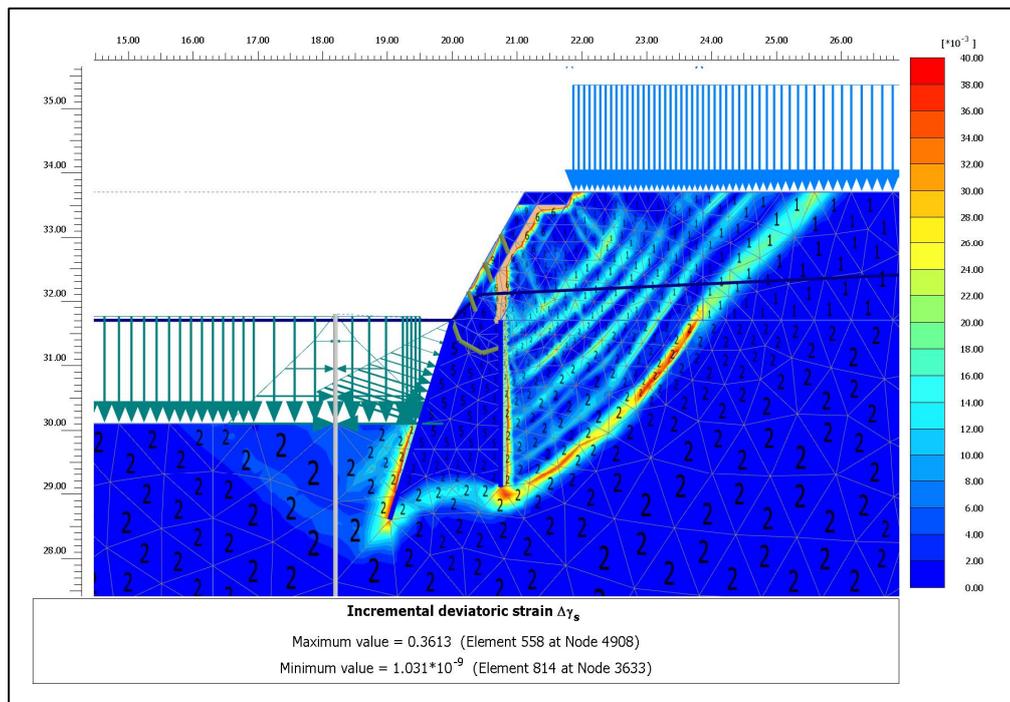


Bild 13a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Die Berechnung wurde mit einem verfeinerten Netz wiederholt, um den Einfluss der Netzfeinheit zu überprüfen. Dabei wurden keine relevanten Abweichungen zu den bisherigen Ergebnissen festgestellt. Auf Bild 14 sind die inkrementellen Scherdehnungen im Bruchzustand für das verfeinerte Netz dargestellt.

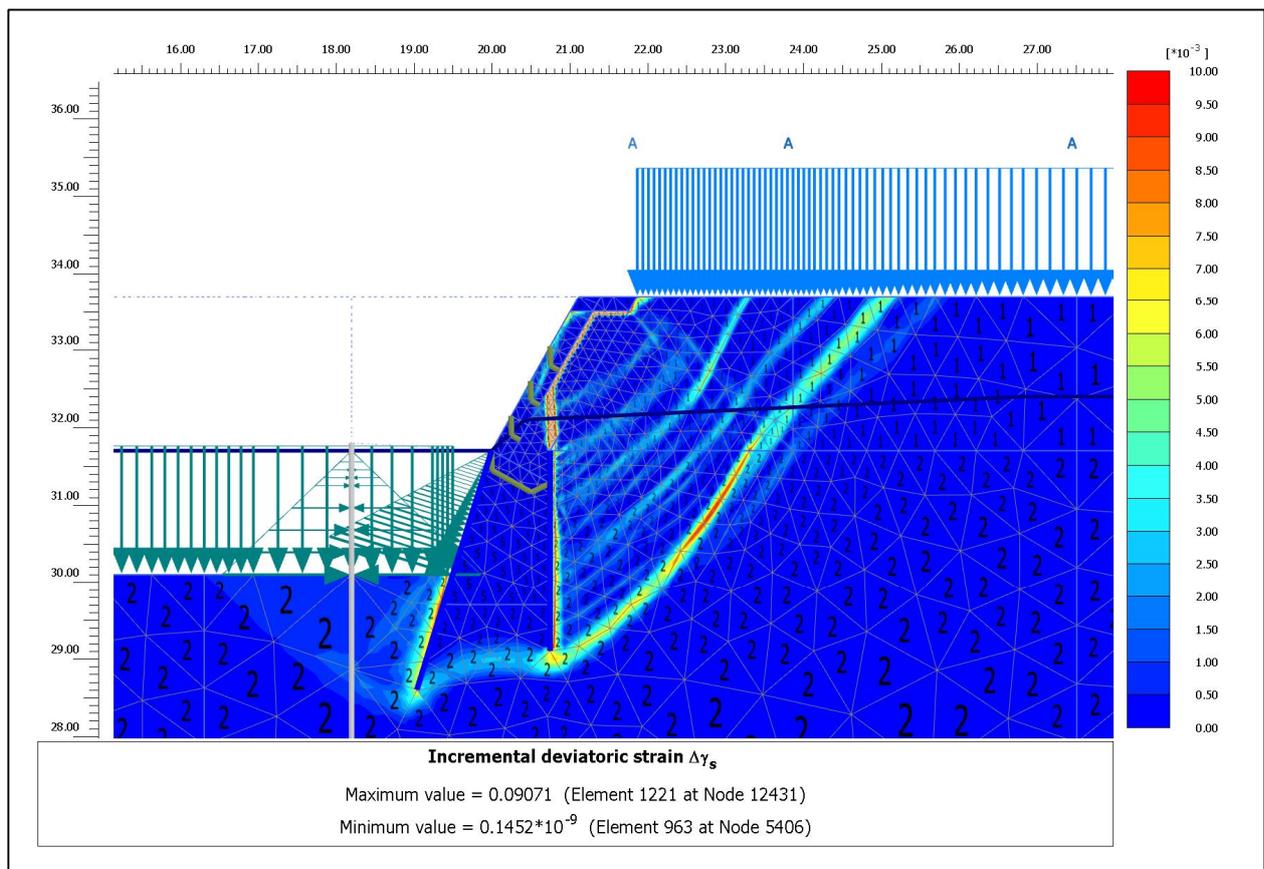


Bild 14 QS1 Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion mit verfeinertem FE-Netz
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Um die Standsicherheit der oberen Ufersicherung beurteilen zu können, wird im nächsten Schritt eine Sanierungsmaßnahme simuliert. Dabei wird die Variante mit vorgestellter und hinterfüllter Spundwand gewählt. Für diesen Fall zeigt die Phi-c-Reduktion ein Versagen der oberen Uferböschung (siehe Bild 15). Ursache ist, dass die Standsicherheit des Gesamtsystems nach der Sanierung größer ist, als die der oberen Ufersiche-

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Die Berechnung mit den Bodenkenngrößen nach [U 1] ergibt eine globale Stand-
sicherheit der oberen Uferböschung von $\eta = 1,8$ (oberer Gleitkörper nach [U 2]). Diese
liegt über der nach DIN 4084:1981 erforderlichen Sicherheit von $\eta = 1,4$.

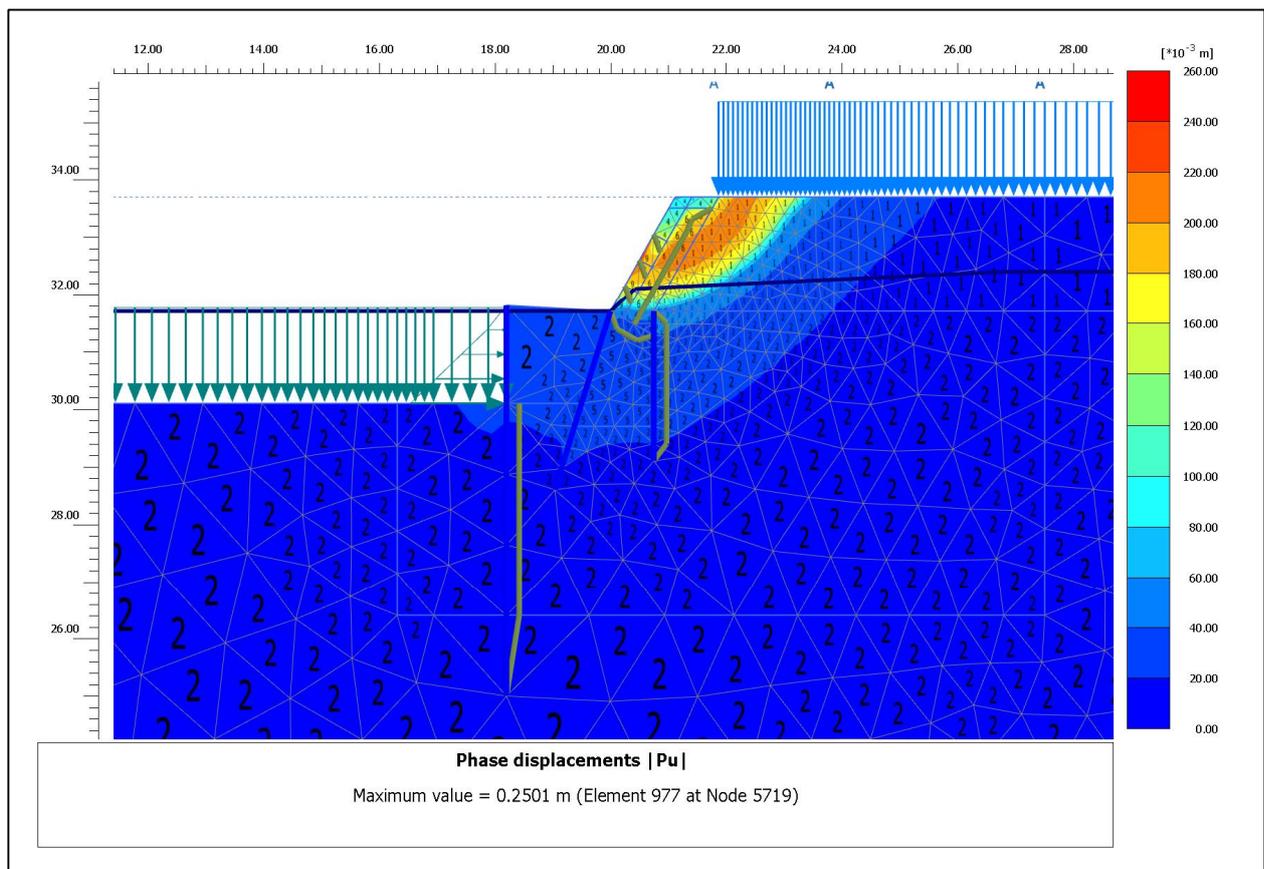


Bild 15 QS1 Verformungen nach Phi-c-Reduktion unter Berücksichtigung der
Sanierung der unteren Ufersicherung, globale Sicherheit der oberen
Uferböschung $\eta = 1,8$
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

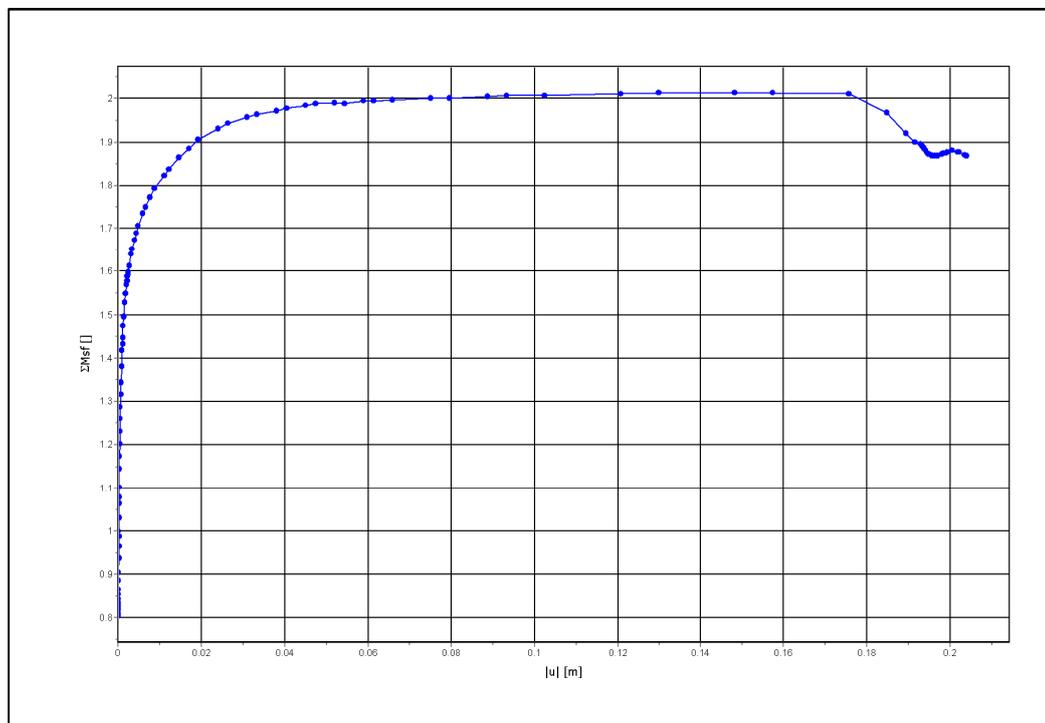
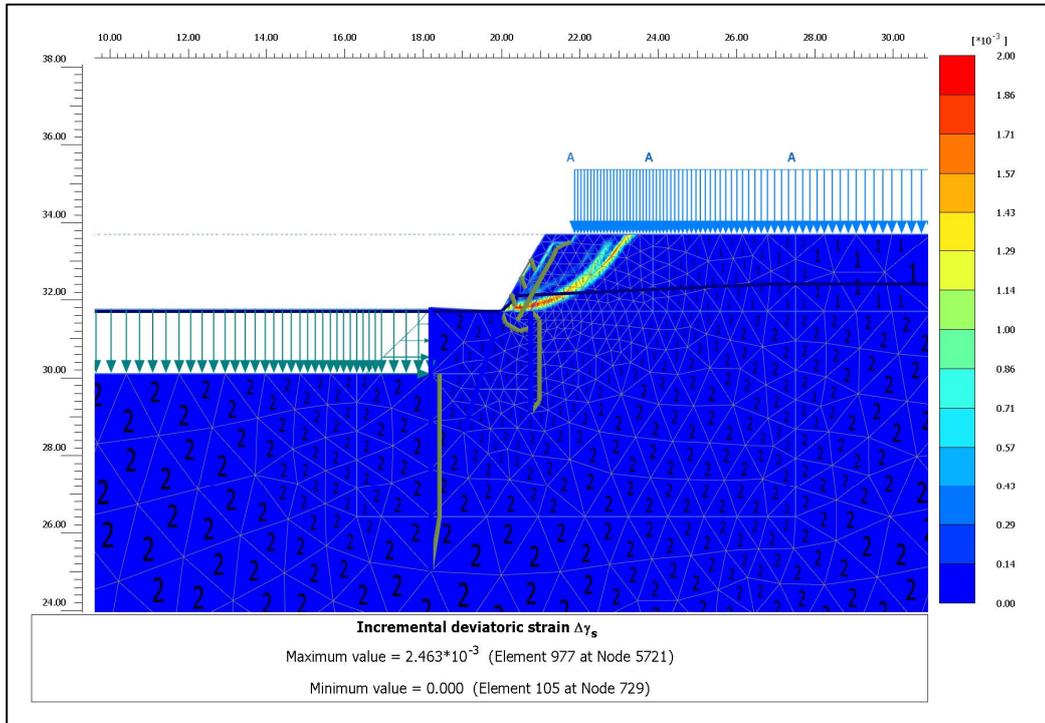


Bild 15a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma Msf = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

7.4 QS 2 Uferhöhe 36,0 mNN

Im folgenden Berechnungsquerschnitt QS 2 wird ein 36,0 mNN hohes Ufer simuliert, wie es im Bereich von Brücken regelmäßig vorkommt. Hier soll ebenfalls die Plausibilität der gewählten Randbedingungen und des Berechnungsmodells überprüft und das vorhandene Sicherheitsniveau abgeschätzt werden. Das Modell ist auf Bild 16 zu sehen.

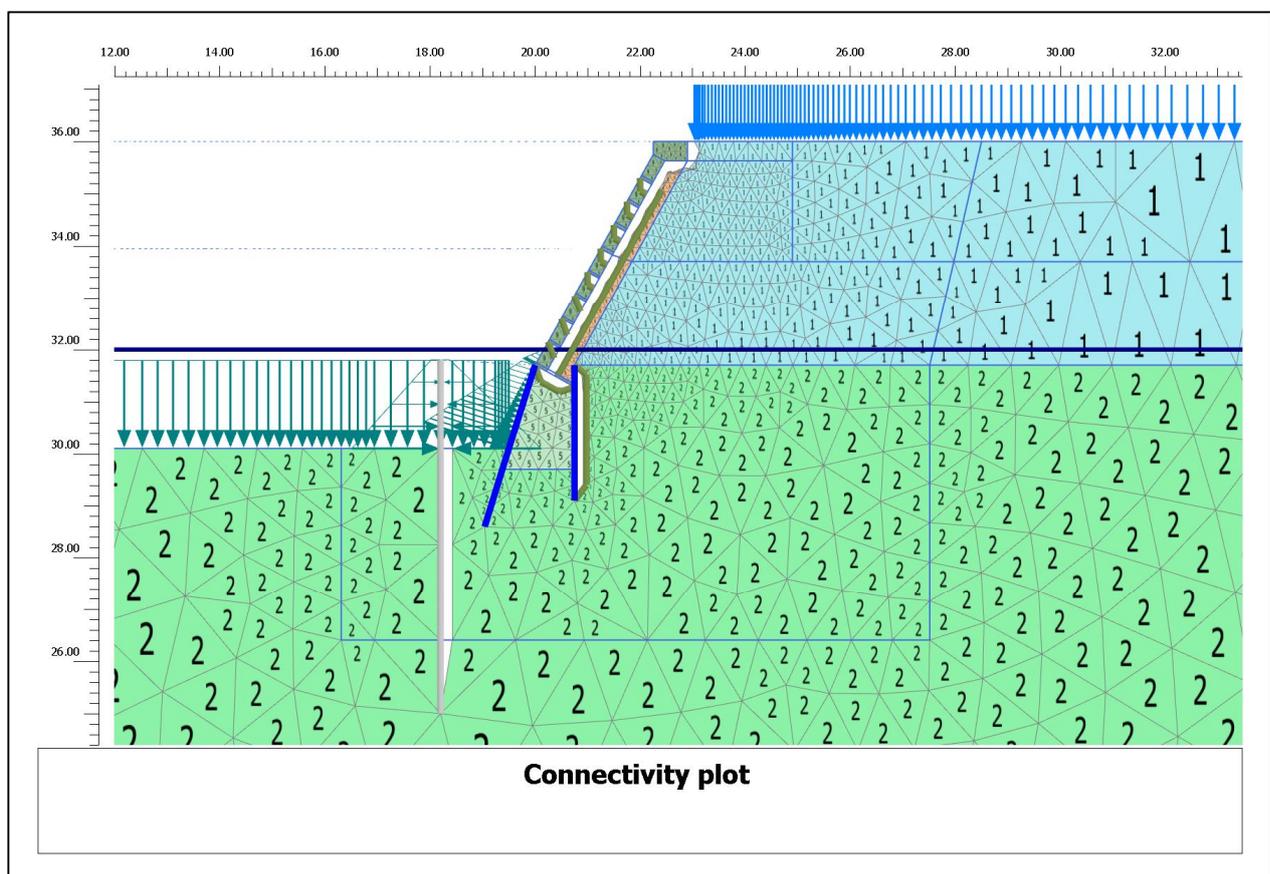


Bild 16 QS 2 Berechnungsmodell, Uferhöhe 36,0 mNN

Die Berechnung wird mit den bisherigen Annahmen durchgeführt werden. Die Spannungsverteilung ist auf den Bildern 17 und 18 dargestellt. Die anschließende Phi-c-Reduktion ergibt eine globale Sicherheit sowohl für den oberen wie auch für den unteren Gleitkörper nur knapp über $\eta = 1,0$ (siehe Bild 19). Aus den Berechnungen erkennt

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

man, dass die im Bodengutachten angesetzten Bodenkenngößen groß genug sind, um die vorhandene Situation widerzuspiegeln. Eine Erhöhung aufgrund der Rückrechnung ist daher nicht gerechtfertigt. Die lange Standzeit und die vergleichsweise geringen Schäden deuten dennoch auf günstigere Baugrundeigenschaften hin.

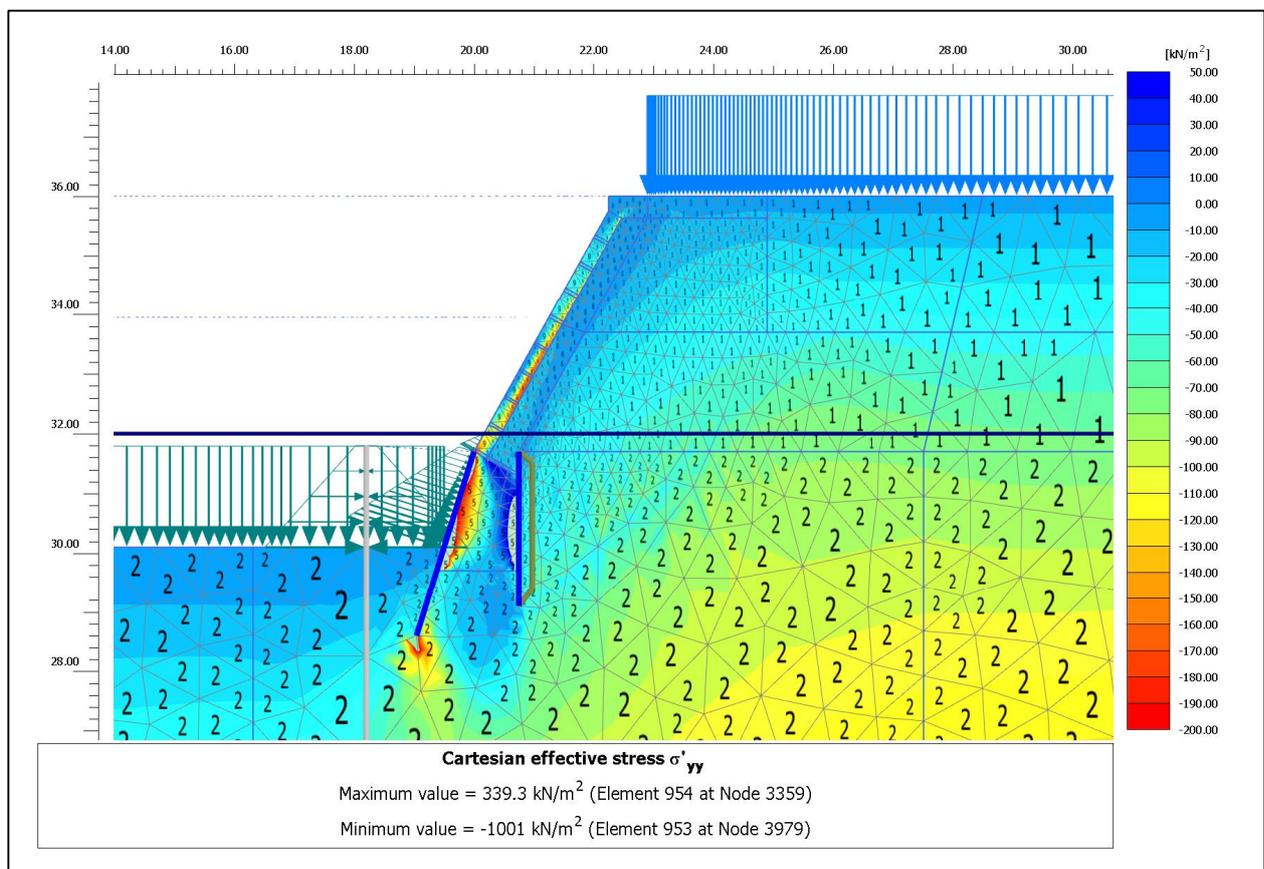


Bild 17 QS 2 Vertikalspannungen, Uferhöhe 36,0 mNN
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Kanalwasser = GW = 32,1 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

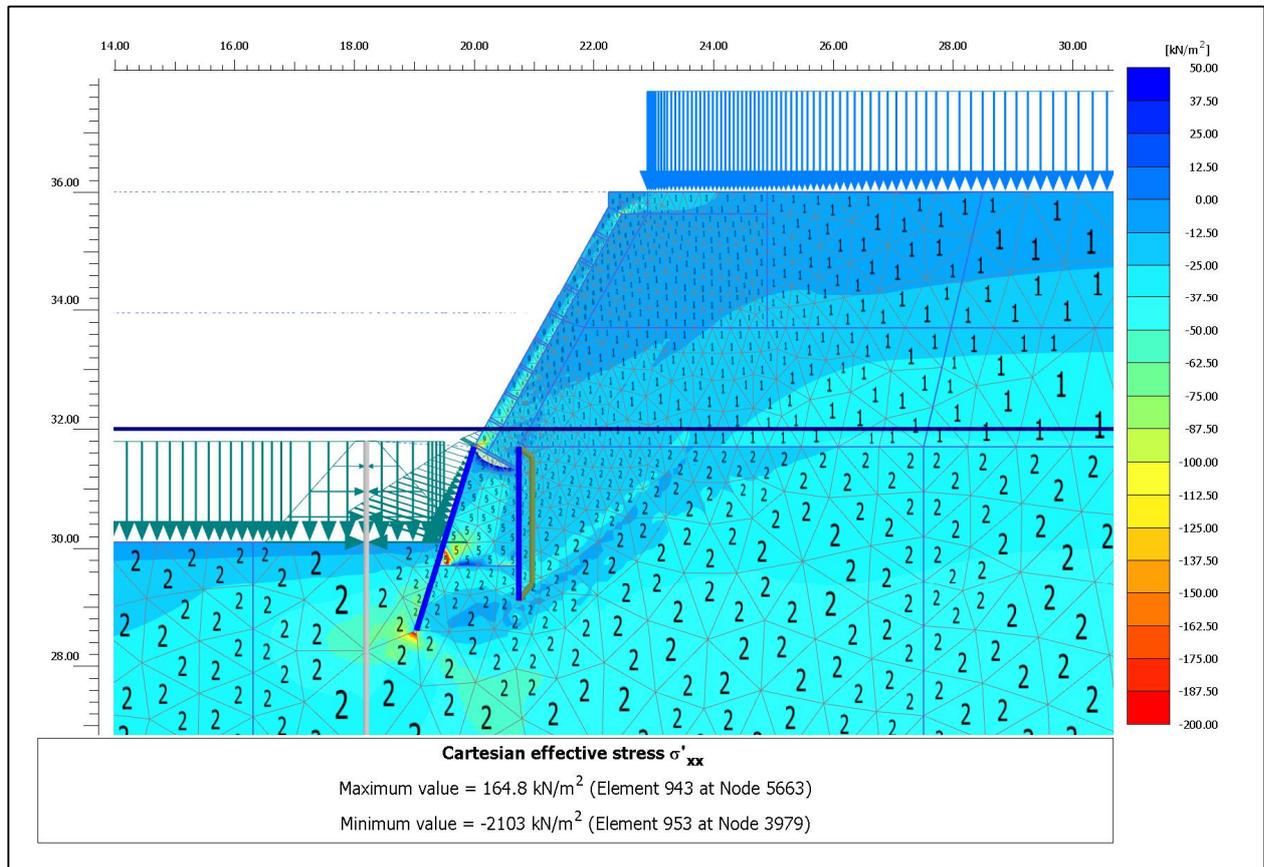


Bild 18 QS 2 Horizontalspannungen, Uferhöhe 36,0 mNN
 Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Kanalwasser = GW = 32,1 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

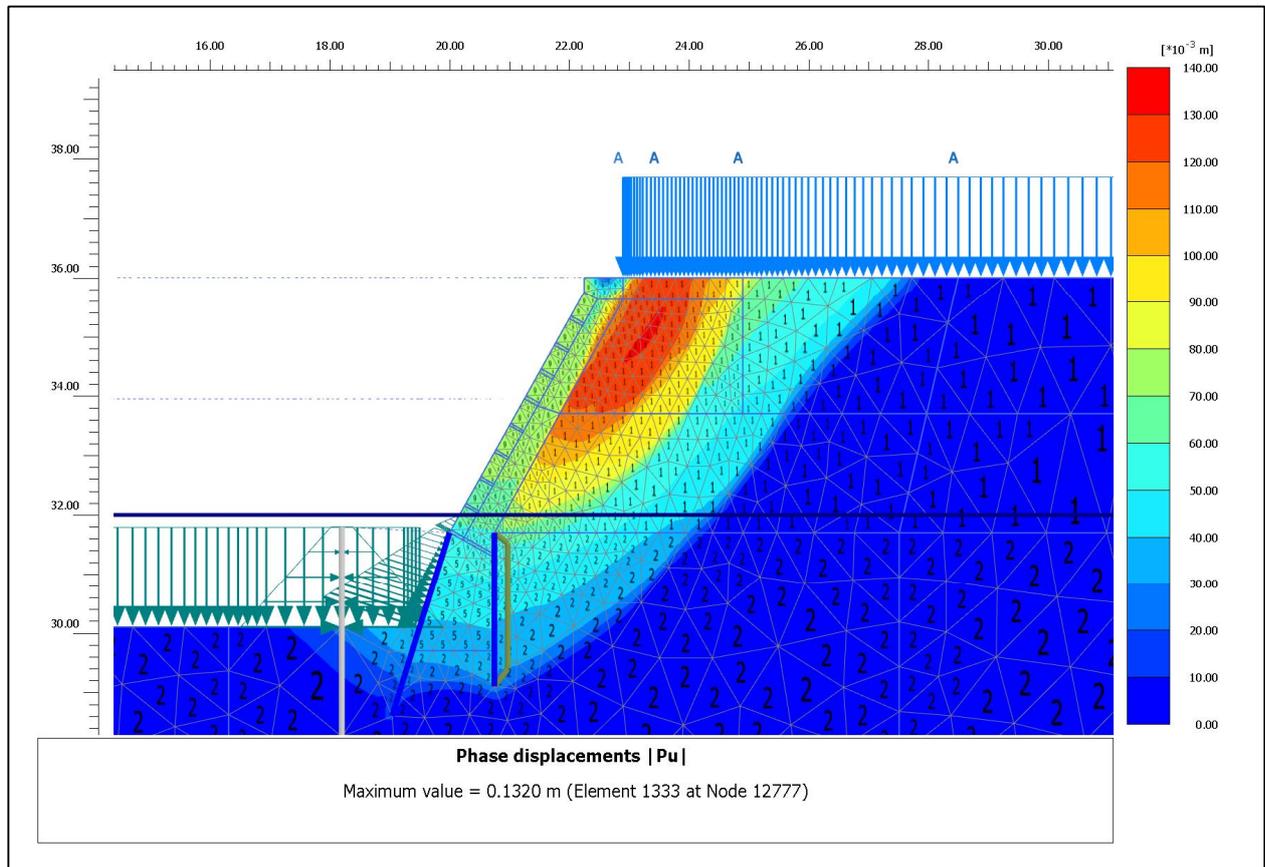


Bild 19 QS 2 Uferhöhe 36,0 mNN, Verformungen nach Phi-c-Reduktion,
 Bodenkenngrößen gemäß Bodengutachten,
 globale Gesamtstandsicherheit $\eta = 1,0$
 Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Kanalwasser = GW = 32,1 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

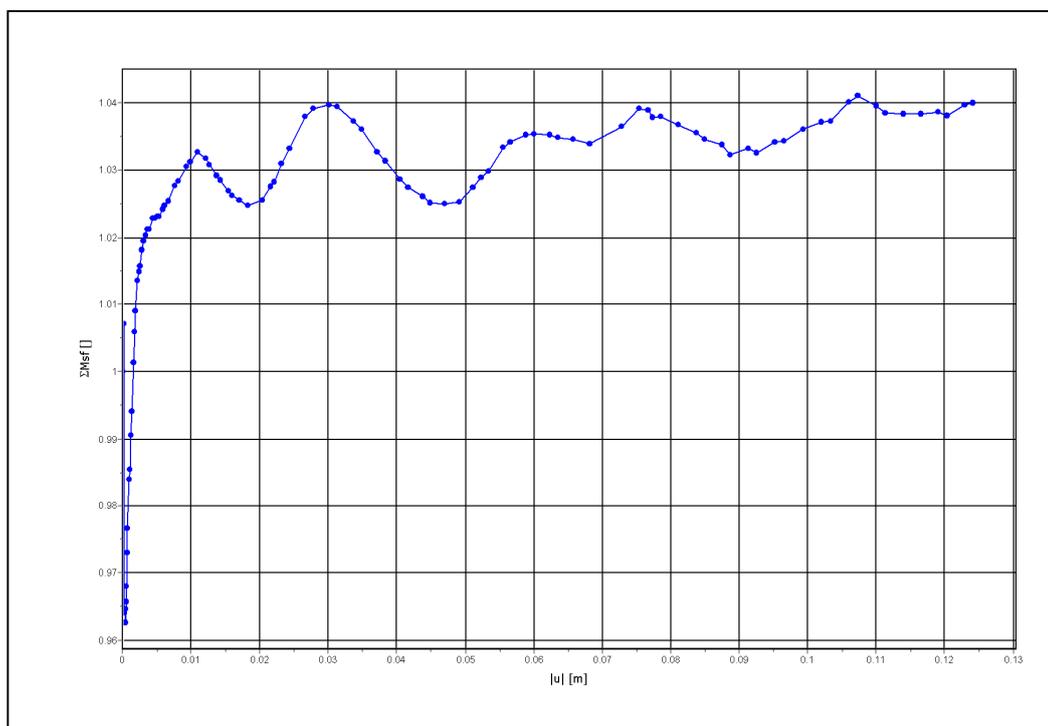
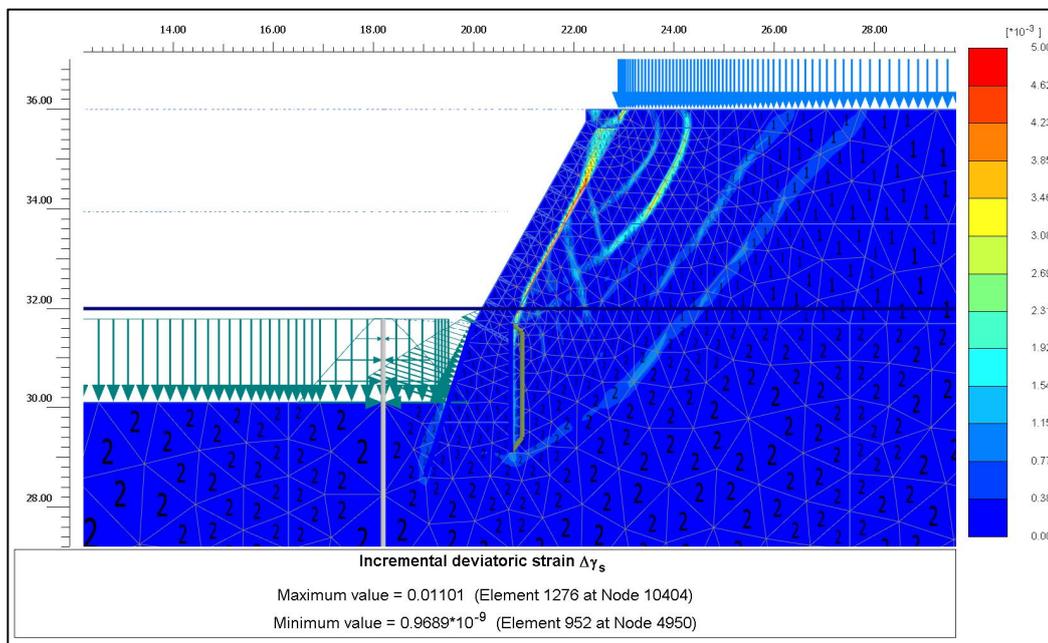


Bild 19a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma Msf = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

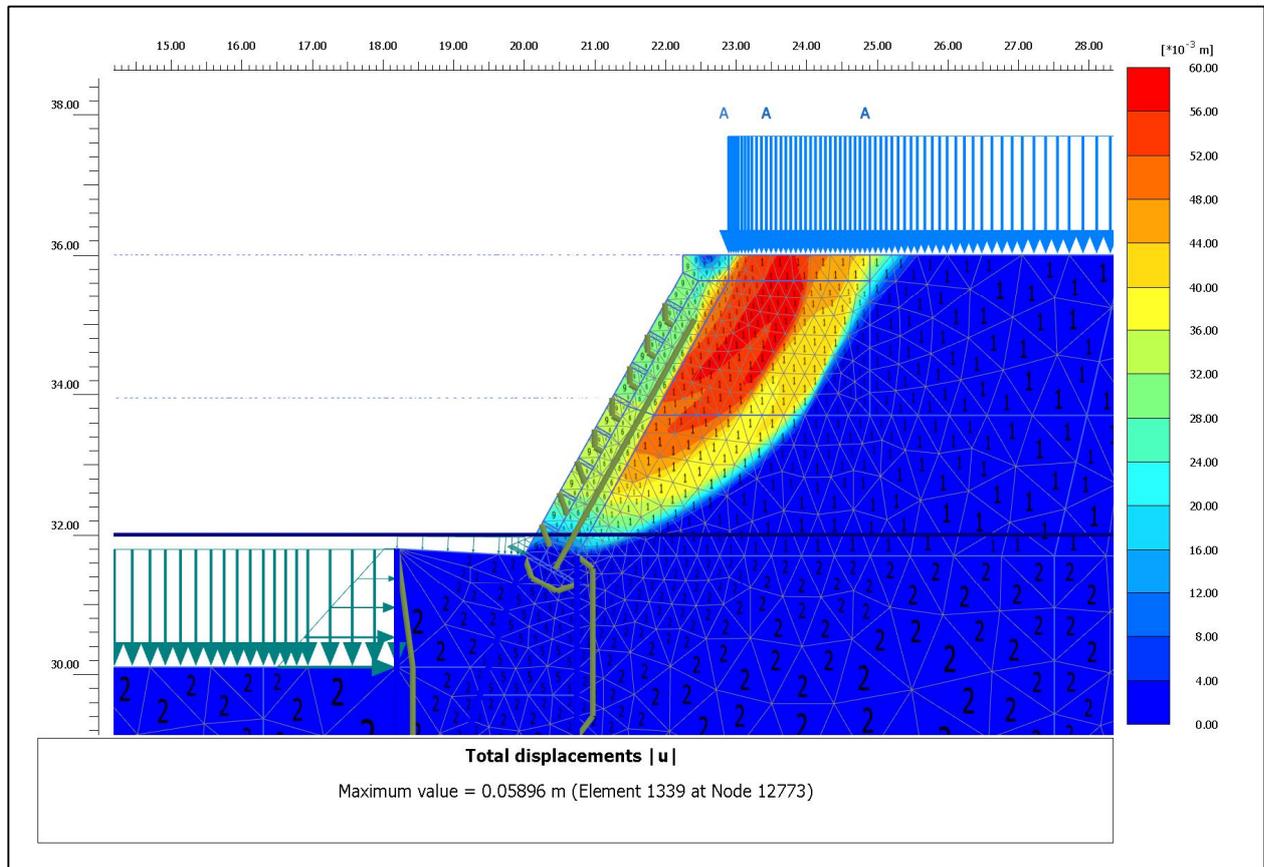


Bild 20 QS 2 nach Sanierung, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten, globale Gesamtstandsicherheit $\eta = 1,0$
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Kanalwasser = GW = 32,1 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

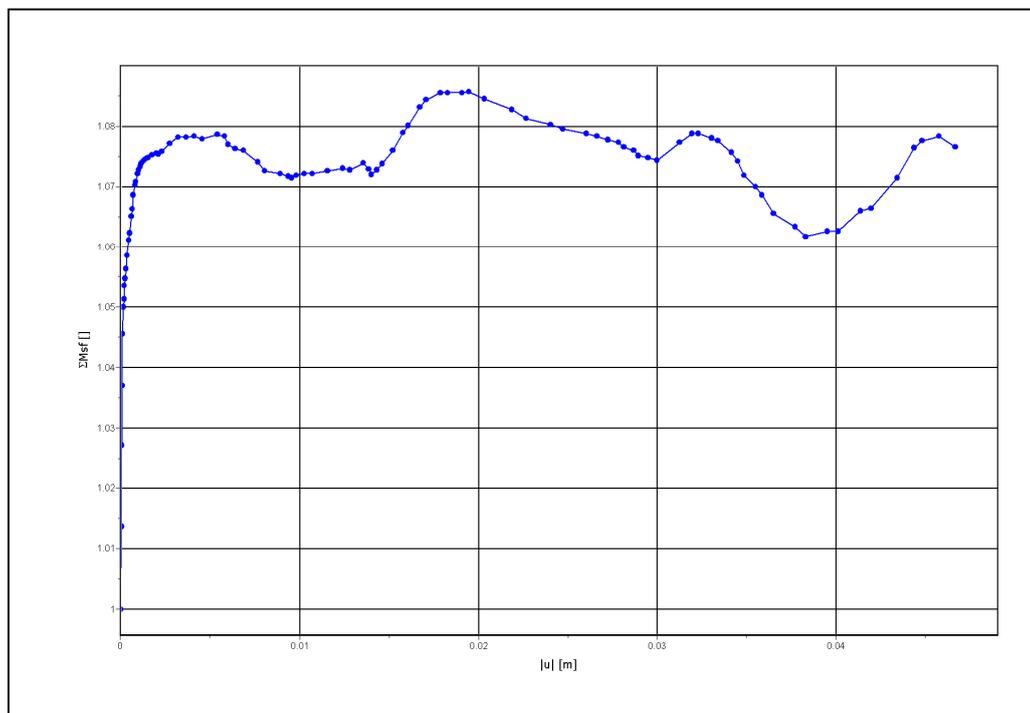
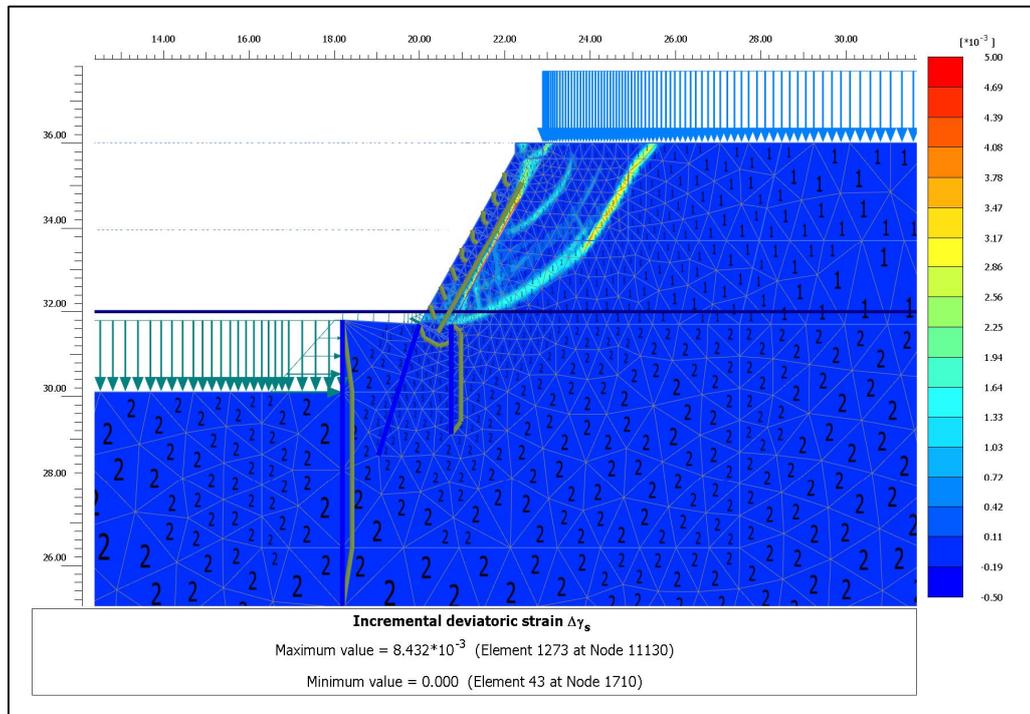


Bild 20a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

7.5 QS 3 Probelastung

Mit dem Berechnungsquerschnitt QS 3 wird die in den Unterlagen [U 5] und [U 6] dokumentiert Probelastung nachgerechnet. Die Belastungseinrichtung wurde so ufernah angeordnet, dass die Probelast konzentriert auf die Ufersicherung wirkt. Die beprobte Uferböschung entspricht dem oben beschriebenen Regelquerschnitt. Aufgebracht wurde stufenweise eine Last von 1300 kN auf einer Fläche von 2 m x 3 m. Unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung auf 5 m Länge, ergibt sich im 2D-System eine 2 m breite Streifenlast mit 130 kN/m². Detaillierte Messungen während der Probelastung haben auch bei maximaler Last kein Versagen oder übermäßig großen Verformungen gezeigt [U 6]. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Probelast problemlos von der Uferböschung aufgenommen werden kann.

Die Berechnung hat gezeigt, dass sich mit den gewählten Randbedingungen kein stabiles System einstellt. Daher wurden sukzessive die Scherfestigkeiten des Baugrundes verbessert, bis das System rechnerisch stabil ist. Die Scherfestigkeit der Talsande wird aus rechentechnischen Gründen ebenfalls erhöht. Die Steifigkeit des Baugrundes wurde aufgrund des hohen Lastniveaus und angesichts der geringen gemessenen Verformungen um ca. 30 % erhöht. Die Ergebnisse der Rückrechnung sind in Tabelle 2 dargestellt.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Berechnungsstufe	Scherfestigkeiten	Ergebnis
1	Auffüllung $\varphi' = 30,0^\circ$, $c' = 2 \text{ kN/m}^2$, Talsande $\varphi' = 35,0^\circ$, $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ (Ausgangswerte gemäß Bodengutachten)	System instabil, $\eta < 1,0$
2	Auffüllung $\varphi' = 32,5^\circ$, $c' = 4 \text{ kN/m}^2$, Talsande $\varphi' = 37,5^\circ$, $c' = 0 \text{ kN/m}^2$	System im Grenzzustand
3	Auffüllung $\varphi' = 35,0^\circ$, $c' = 4 \text{ kN/m}^2$, Talsande $\varphi' = 40,0^\circ$, $c' = 0 \text{ kN/m}^2$	System stabil, Sicherheit $\eta > 1,0$

Tabelle 2: Ergebnisse der Rückrechnung der Probelastung

Die nach Berechnungsstufe 3 durchgeführte Phi-c-Reduktion zeigt eine globale Sicherheit η über 1,0 (siehe Bild 21). Aus den Berechnungen lässt sich ableiten, dass die Scherfestigkeiten mindestens der Berechnungsstufe 2 entsprechen müssen. Somit ergibt sich aus der Probelastung eine Grundlage für eine Erhöhung der Scherfestigkeiten im Hinterfüllbereich der oberen Ufersicherung auf:

$$\varphi' = 32,5^\circ \text{ und } c' = 4 \text{ kN/m}^2.$$

Vergleicht man die erhöhten Scherfestigkeiten der Berechnungsstufe 2 mit den Angaben in der EAU [U 12] für vergleichbare Böden, so zeigt sich, dass die Scherfestigkeiten weiterhin innerhalb der möglichen Bandbreite der Erfahrungswerte liegen. Dies wurde auch in Abstimmungsgesprächen mit dem Bodengutachter der BAW bestätigt.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

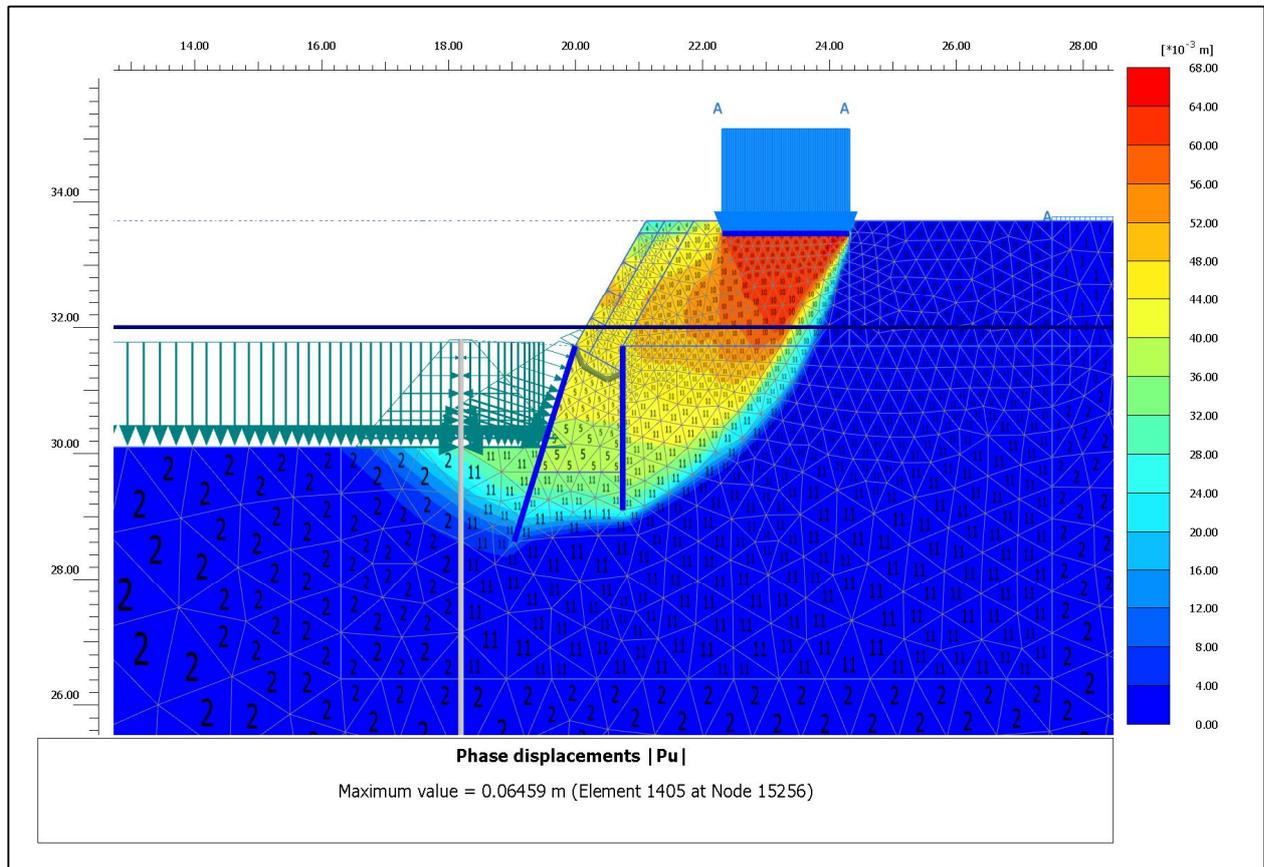


Bild 21 QS 3 Probelastung, Verformungen nach Phi-c-Reduktion mit erhöhten Scherfestigkeiten, globale Sicherheit $\eta > 1,0$
 Lasten: Probelast A = 130 kN/m², Kanalwasser = GW = 32,1 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

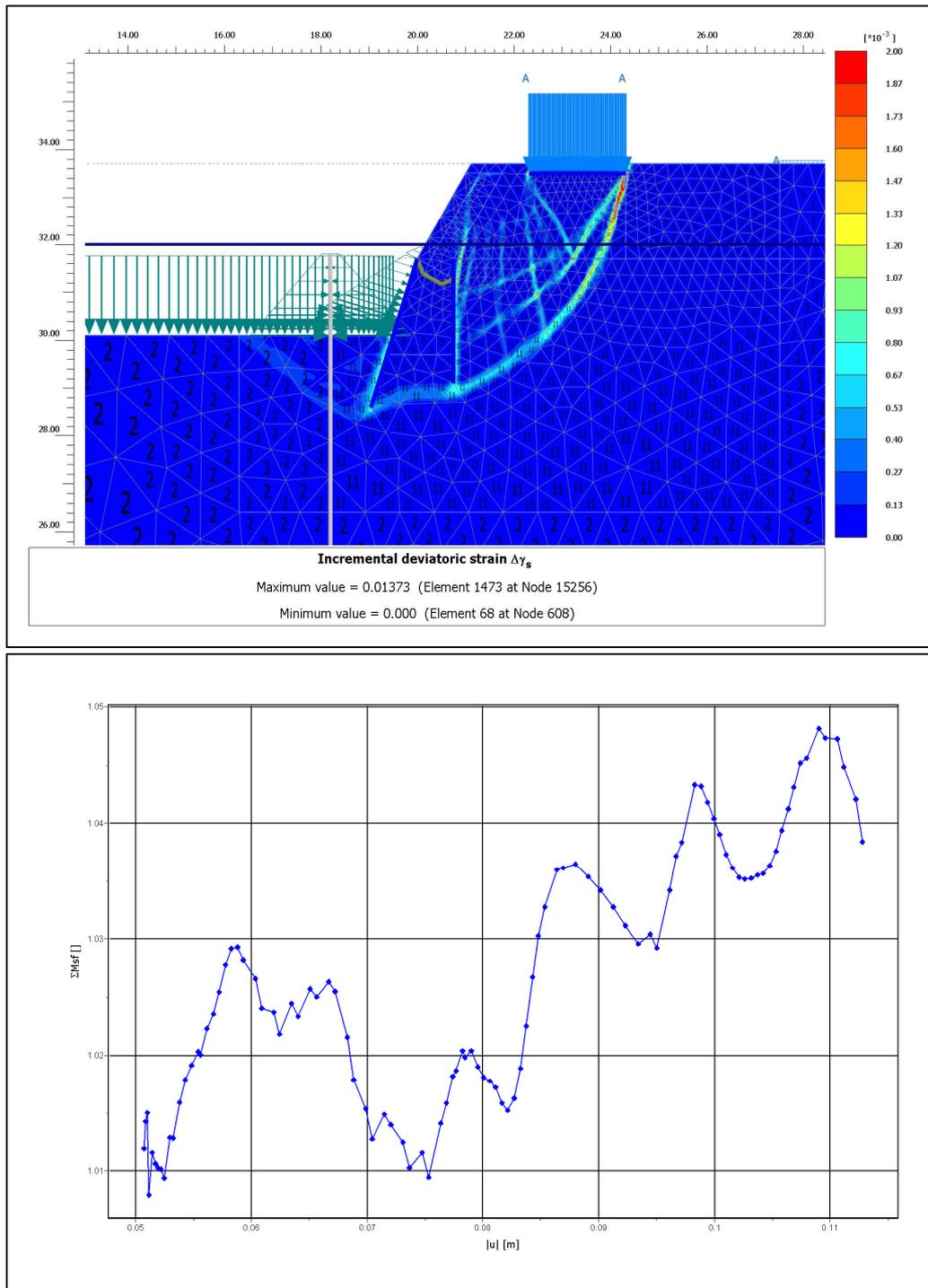


Bild 21a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und
 Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Berücksichtigt man die verbesserten Bodenkenngößen bei der erhöhten Uferböschung im Berechnungsquerschnitt QS 2, ergibt sich eine Standsicherheit für die obere Uferböschung von 1,25 (siehe Bild 22). Hierbei wurde analog zum Regelquerschnitt QS 1 von einer Sanierung der unteren Ufersicherung ausgegangen. Angesichts der über hundertjährigen Standzeit ist dieses Sicherheitsniveau plausibel.

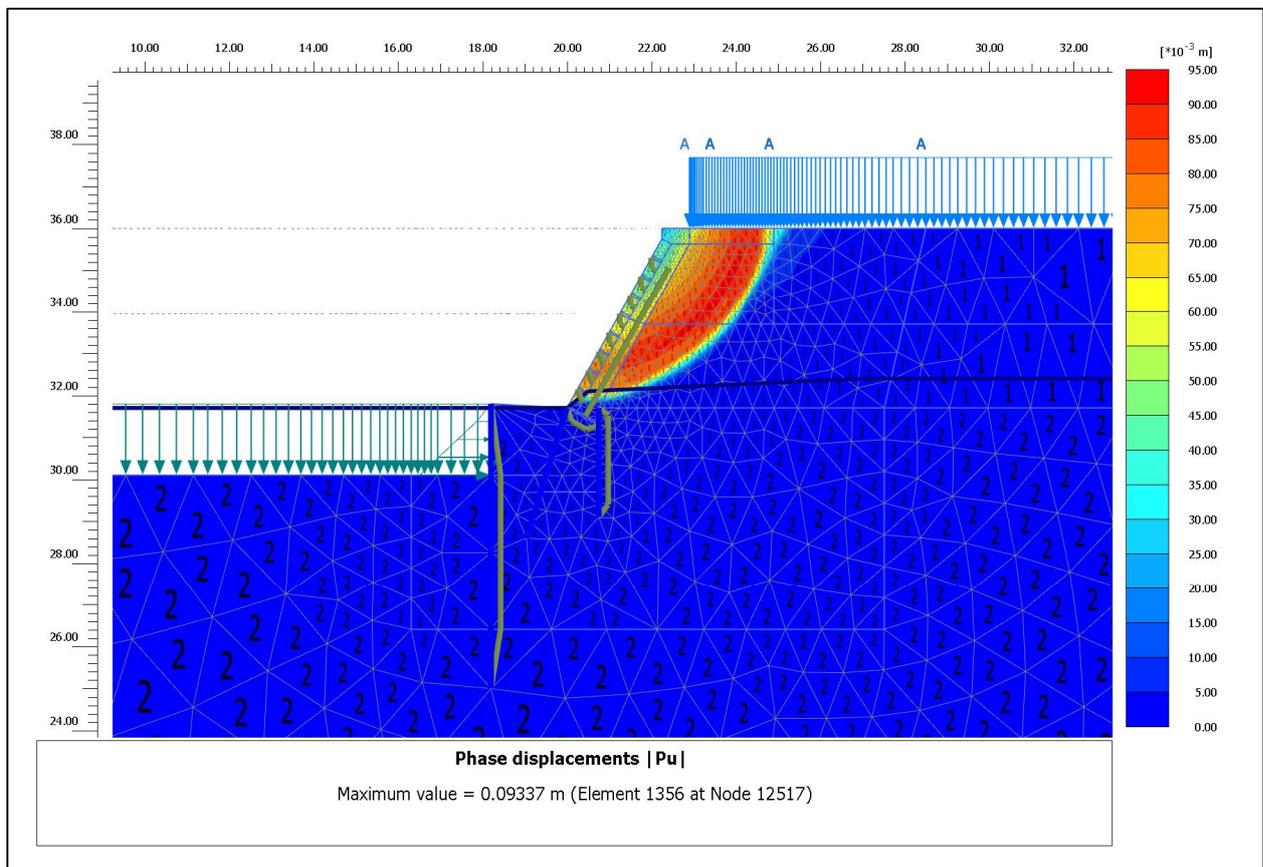


Bild 22 QS 2, Uferhöhe 36 mNN, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, Bodenkenngößen gemäß Versuch erhöht, globale Gesamtstandsicherheit $\eta = 1,25$
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

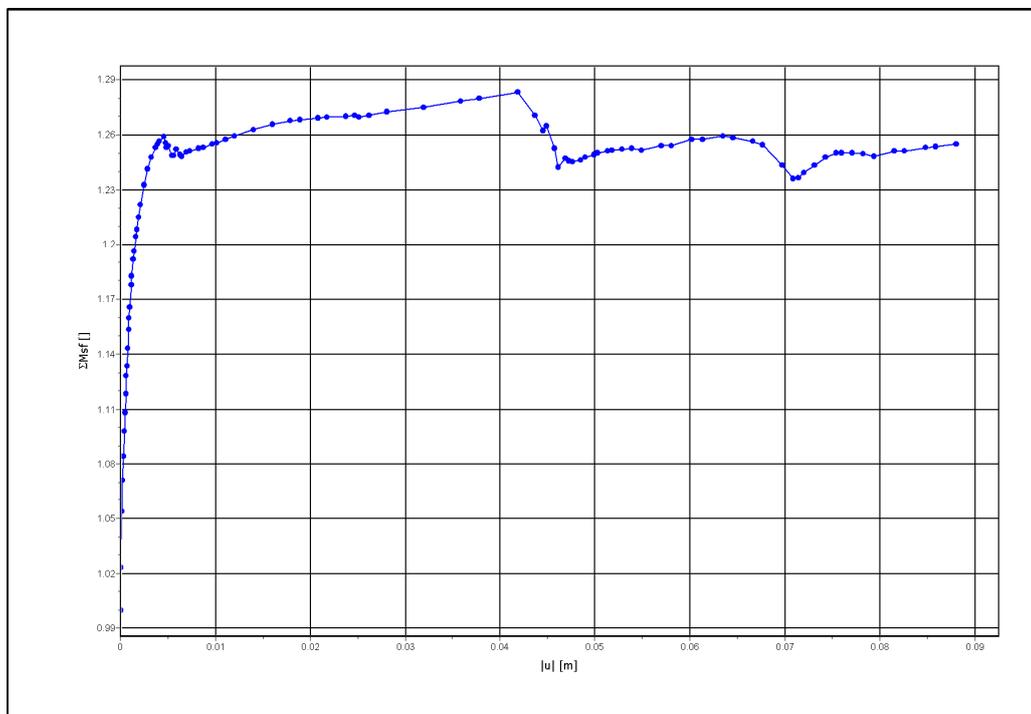
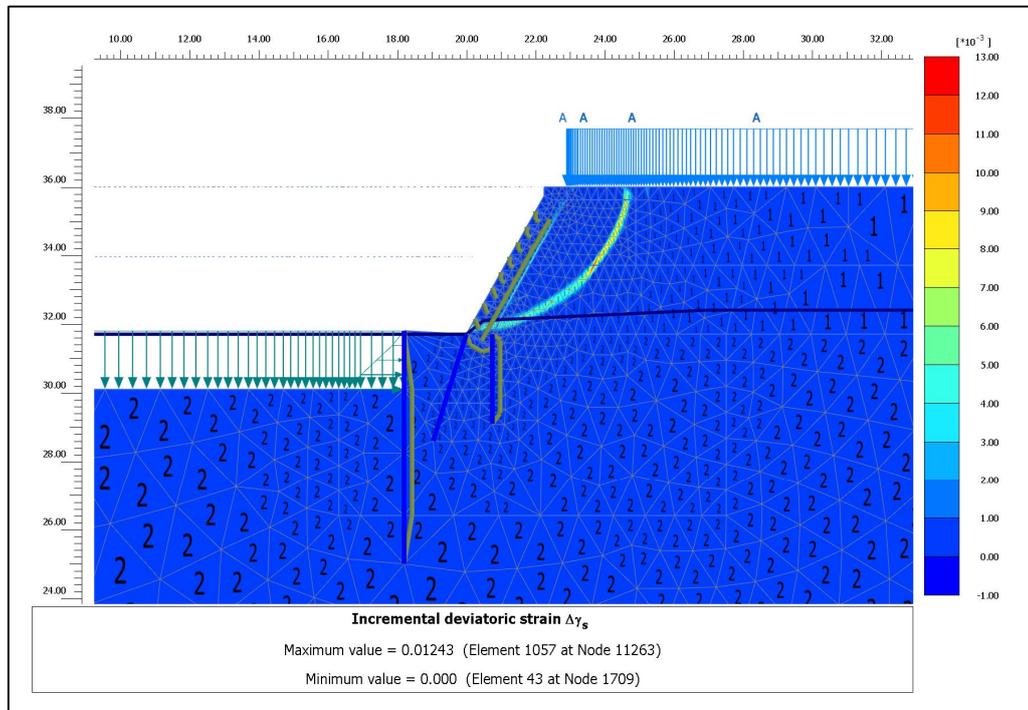


Bild 22a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

7.6 QS 4 Regelquerschnitt mit Baumlast, Uferhöhe 33,7

Bei dem Berechnungsquerschnitt QS 4 wird der Regelquerschnitt mit einer Uferhöhe von 33,7 mNN und einer Baumlast untersucht. Die Baumlast wird wie oben beschrieben relativ ungünstig angesetzt. Der verwurzelte Boden wird mit einer auf $c'_{c,k} = 7 \text{ kN/m}^2$ erhöhten Kohäsion berücksichtigt. Diese entspricht den bisherigen Betrachtungen und ist unseres Erachtens im Hinblick auf die oben beschriebenen positiven Eigenschaften der Verwurzelung ein vorsichtiger Wert. Nach EAU [U 12] sind charakteristische Scheinkohäsionen für feuchte Feinsande bis 8 kN/m^2 und für Mittelsande bis 6 kN/m^2 jeweils ohne Verwurzelung möglich. In Unterlage [U 18] werden Untersuchungen zur Verbundfestigkeit zwischen Boden und Pflanze durchgeführt. Gemäß MSD [U 14] entspricht $c'_{c,k} = 7 \text{ kN/m}^2$ lediglich einer Verwurzelungskohäsion von Gras. Somit liegt der Ansatz unseres Erachtens auf der sicheren Seite.

Bild 23 zeigt, dass auch bei einer Baumlast die Standsicherheit des Gesamtsystems (tiefer Gleitkreis nach [U 2]) maßgeblich wird. Die Sicherheit der oberen Ufersicherung ist höher als die des großen Gleitkreises, der unterhalb der unteren Ufersicherung verläuft, obwohl die Baumlast ufernah angesetzt wurde. Die errechnete globale Gesamtstandsicherheit liegt bei $\eta = 1,25$ und damit fast genauso hoch wie in dem Querschnitt ohne Baum. Dies bedeutet, dass die Bäume bereits bei einer moderaten Erhöhung der Kohäsion im Wurzelbereich keinen negativen Einfluss auf die Gesamtstandsicherheit der Ufersicherung haben. Voraussetzung hierfür ist eine intakte oder sanierte untere Ufersicherung. Da die Gesamtsicherheit maßgebend ist, bringt auch hier eine Sanierung der unteren Uferböschung eine wesentliche Verbesserung für das gesamte System.

Bei Berechnung mit Berücksichtigung der Sanierung ergibt sich für die obere Ufersicherung eine globale Sicherheit von $\eta = 1,8$, die der Berechnung ohne Baum entspricht (siehe Bild 24).

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

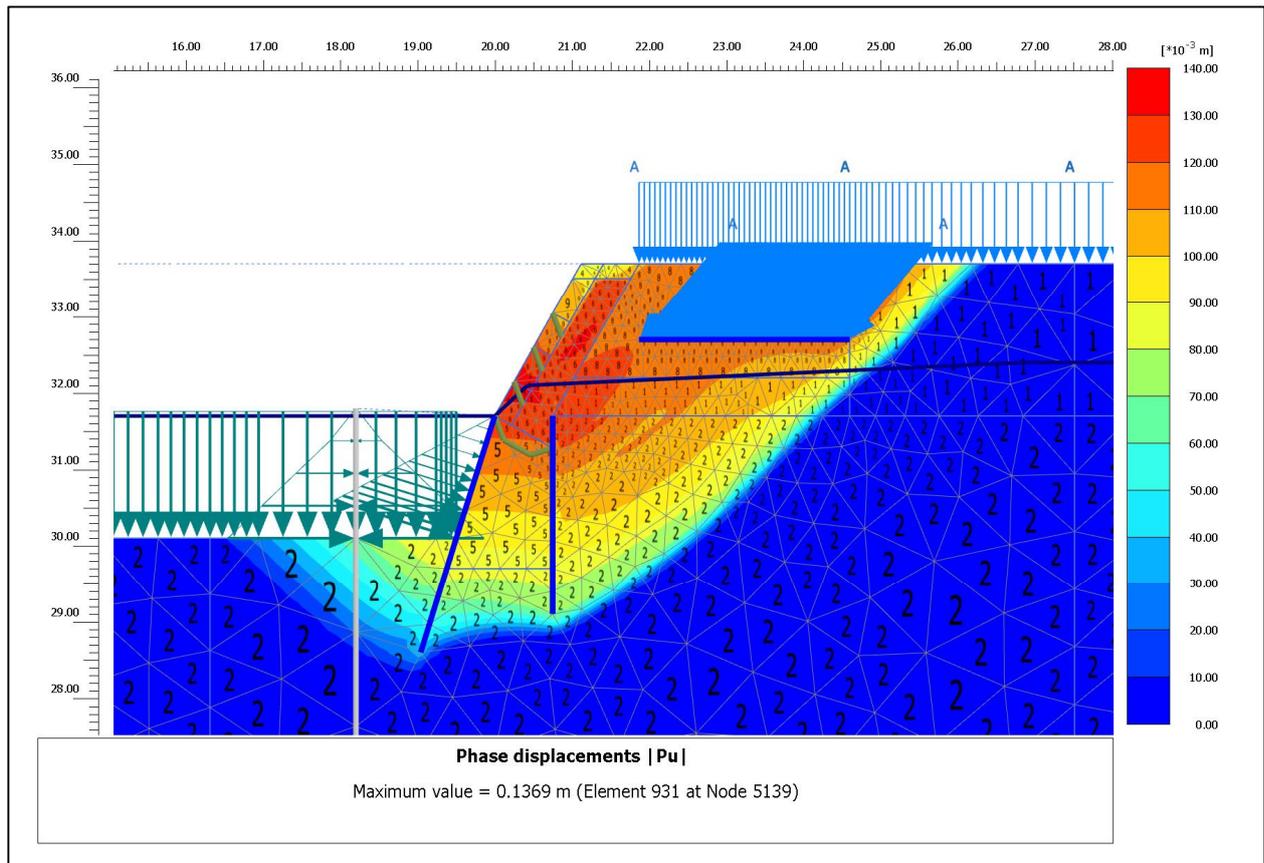


Bild 23 QS 4 Regelquerschnitt mit Baumlast, Uferhöhe 33,7 mNN, Verformungen nach Φ -c-Reduktion, globale Standsicherheit des Gesamtsystems $\eta = 1,25$ (tiefer Gleitkreis nach [U 2])
 Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

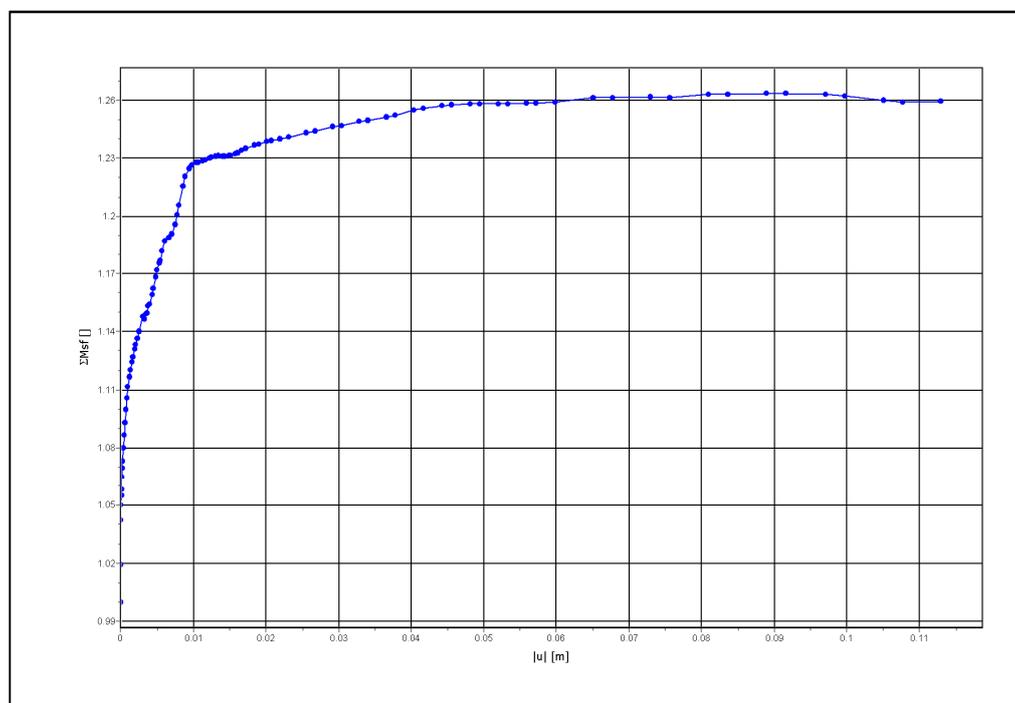
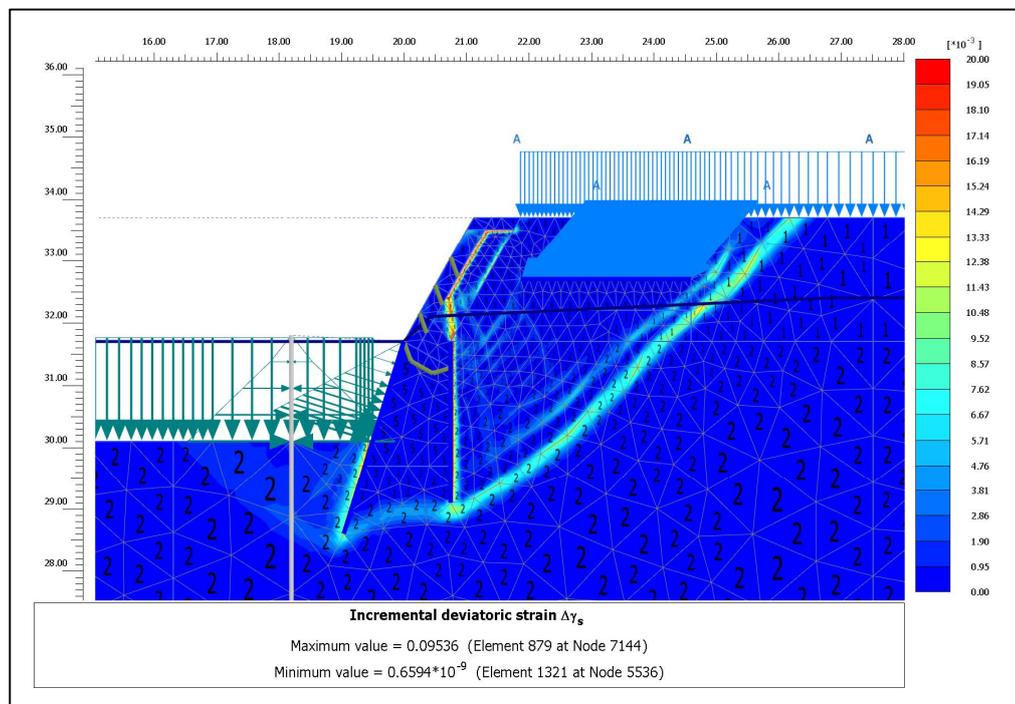


Bild 23a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

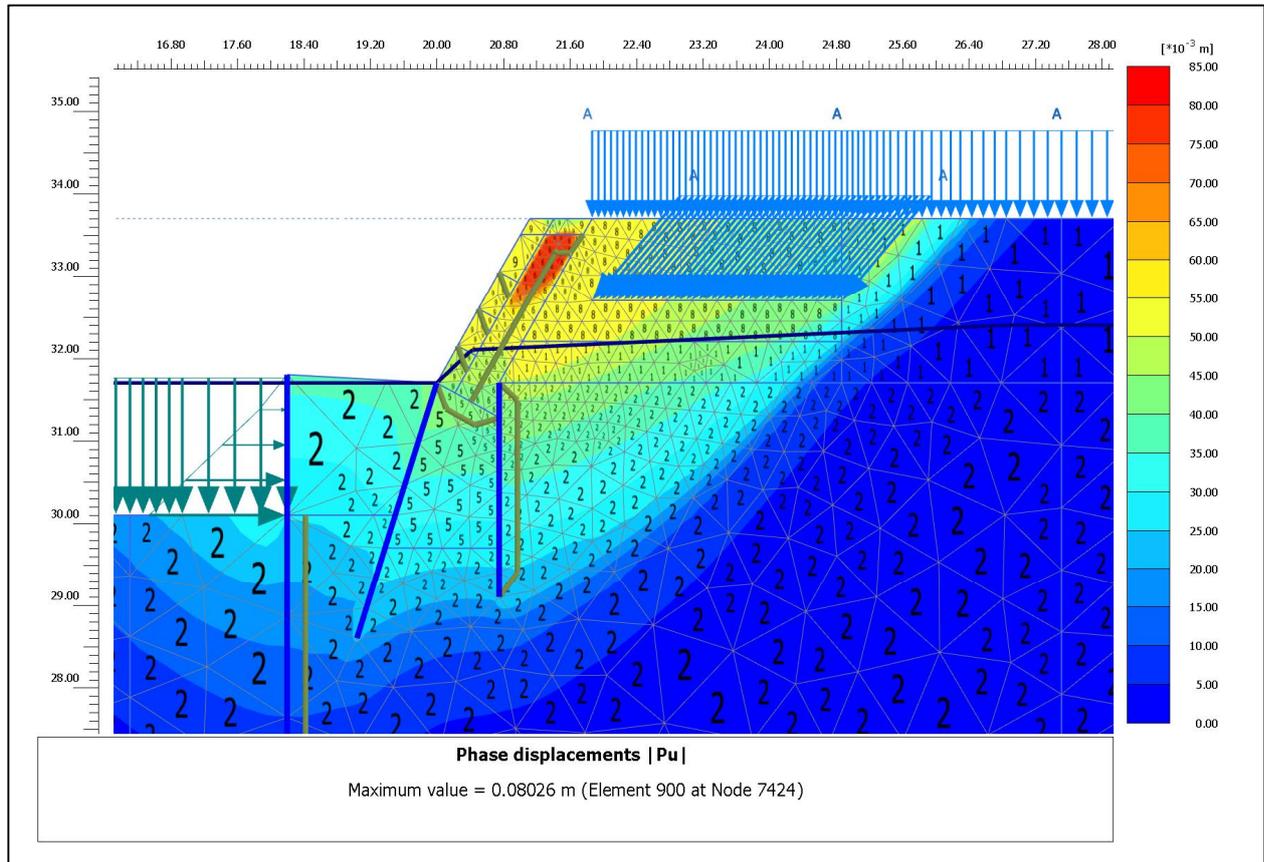
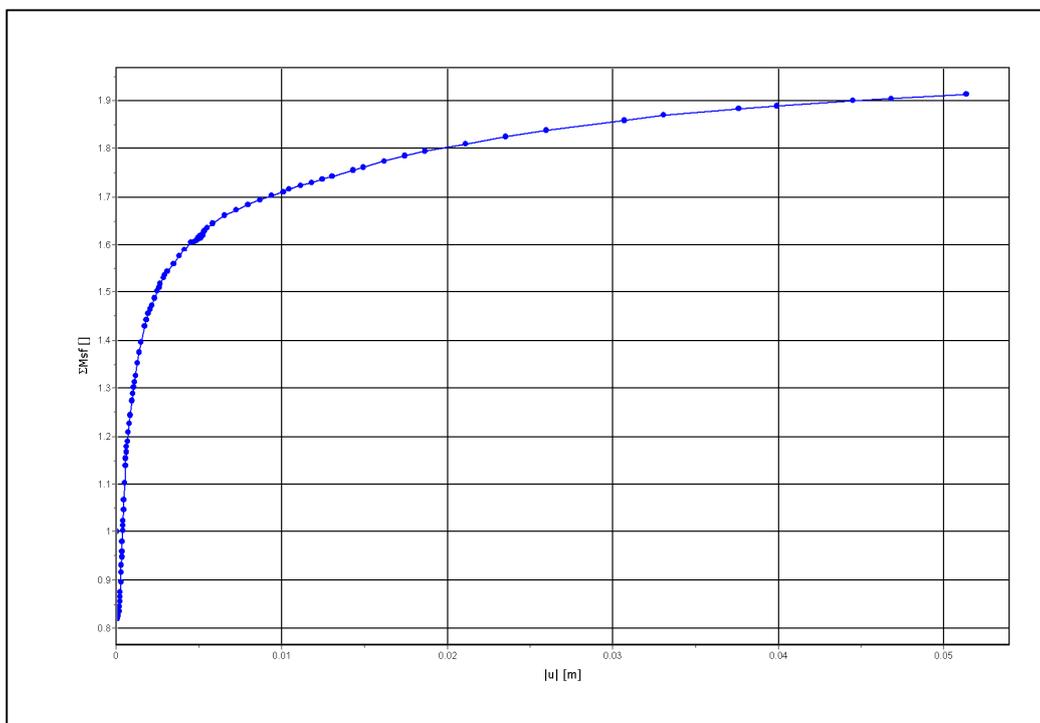
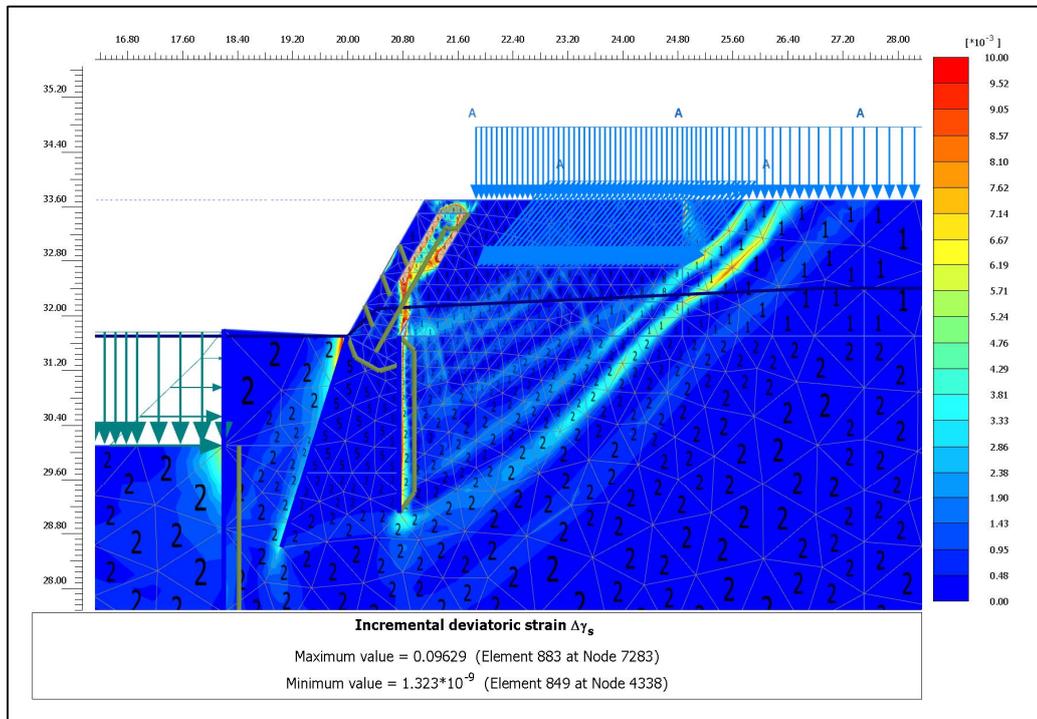


Bild 24 QS 4 Regelquerschnitt mit Baumlast, Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Standsicherheit der oberen Ufersicherung $\eta = 1,8$
Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen



Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

Bild 24a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und
Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

7.7 QS 5 Erhöhtes Ufer mit Baumlast, Uferhöhe 36,0 mNN

Im folgenden Berechnungsschritt QS 5 wird die Baumlast auch bei dem auf 36,0 mNN erhöhten Ufer angesetzt. Der Baum wird analog zum Regelquerschnitt angesetzt. Außerdem wird die Sanierung der unteren Ufersicherung angesetzt, um eine Aussage speziell zur oberen Böschung treffen zu können.

Die Berechnungen werden für die Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten und die verbesserten Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten und Probebelastung variiert.

Die Berechnung auf Bild 25 zeigt das Ergebnis der Phi-c-Reduktion für die verbesserten Bodenkenngößen. Die globale Sicherheit der oberen Uferböschung beträgt $\eta = 1,25$ und ist damit gleich der Berechnung ohne Baum.

Die Berechnung mit den Bodenkenngößen nach Bodengutachten ergibt eine globale Sicherheit von $\eta = 1,1$ und liegt damit über der Vergleichsberechnung ohne Baum (QS 2). Ursache hierfür ist die von 2 auf 7 kN/m² erhöhte Kohäsion im Wurzelbereich.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

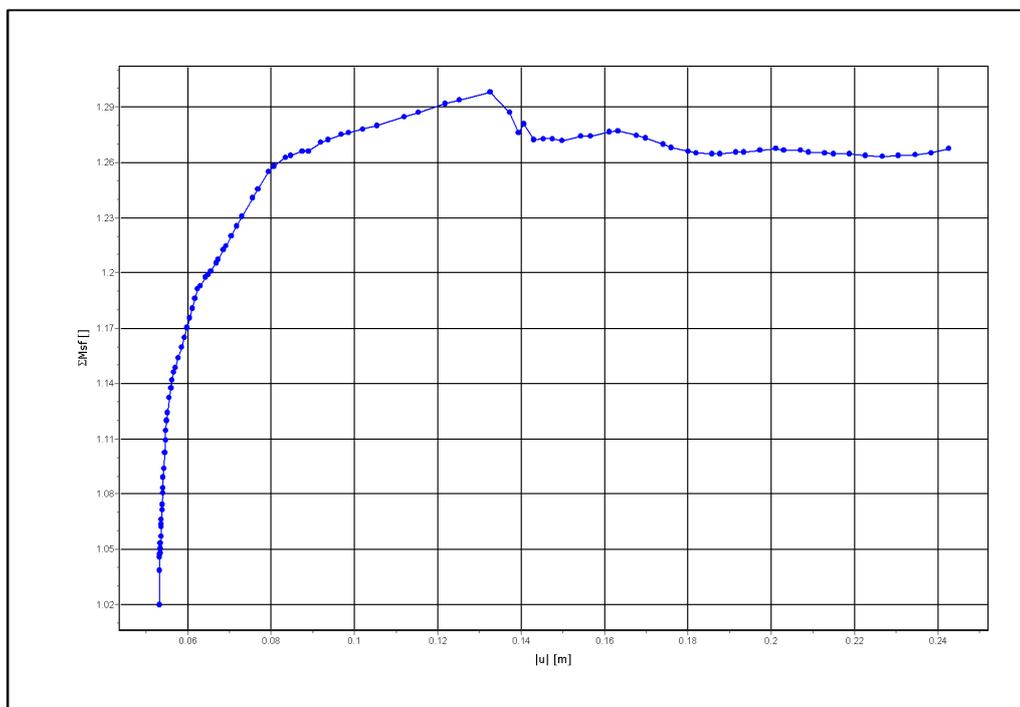
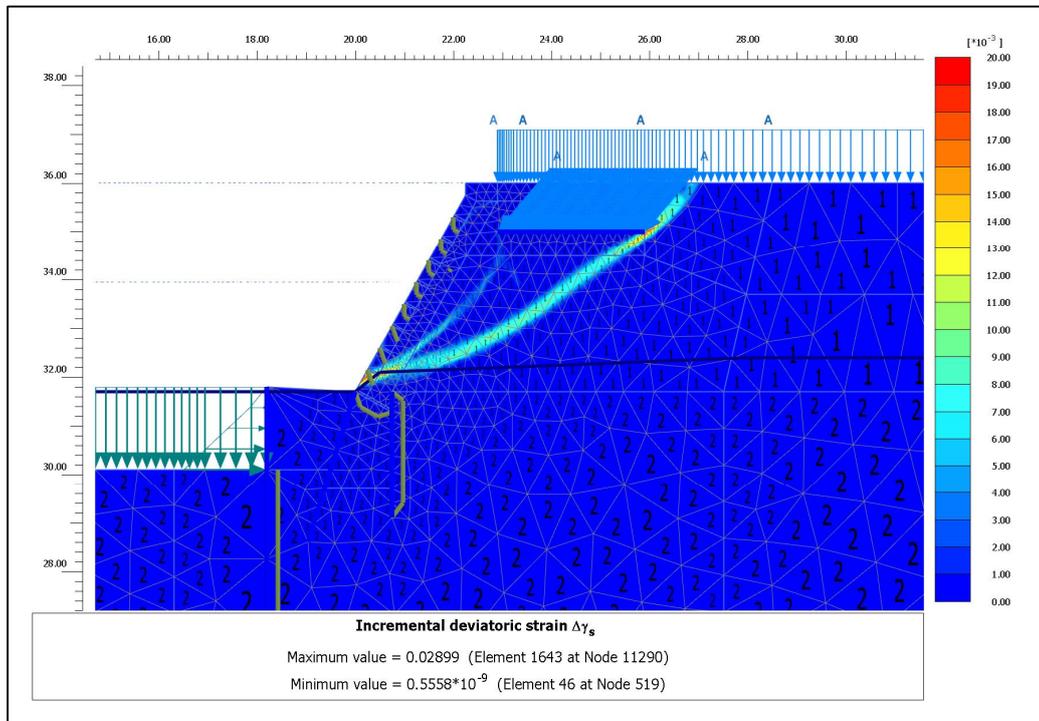


Bild 25a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Zusammengefasst zeigt sich auch bei dem erhöhten Ufer, dass die Bäume rechnerisch keinen wesentlichen negativen Einfluss auf die Standsicherheit haben, obwohl die Kohäsion des verwurzelten Bodens mit $c' = 7 \text{ kN/m}^2$ nur relativ gering erhöht wurde. Damit werden die Ergebnisse der vorangegangenen Berechnungen im Querschnitt QS 4 bestätigt.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngößen für die Uferböschungen

7.8 QS 6 Uferhöhe 35,0 und geneigtes Gelände

Zur weiteren Beurteilung der Standsicherheit und um den Einfluss von geneigtem Gelände hinter der Quadermauer zu untersuchen, wird mit QS 6 eine ergänzende Berechnung mit mittlerer Uferhöhe (35,0 mNN) und einer Geländeneigung 1:3 durchgeführt. Bild 26 zeigt das Ergebnis der Phi-c Reduktion für die Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten.

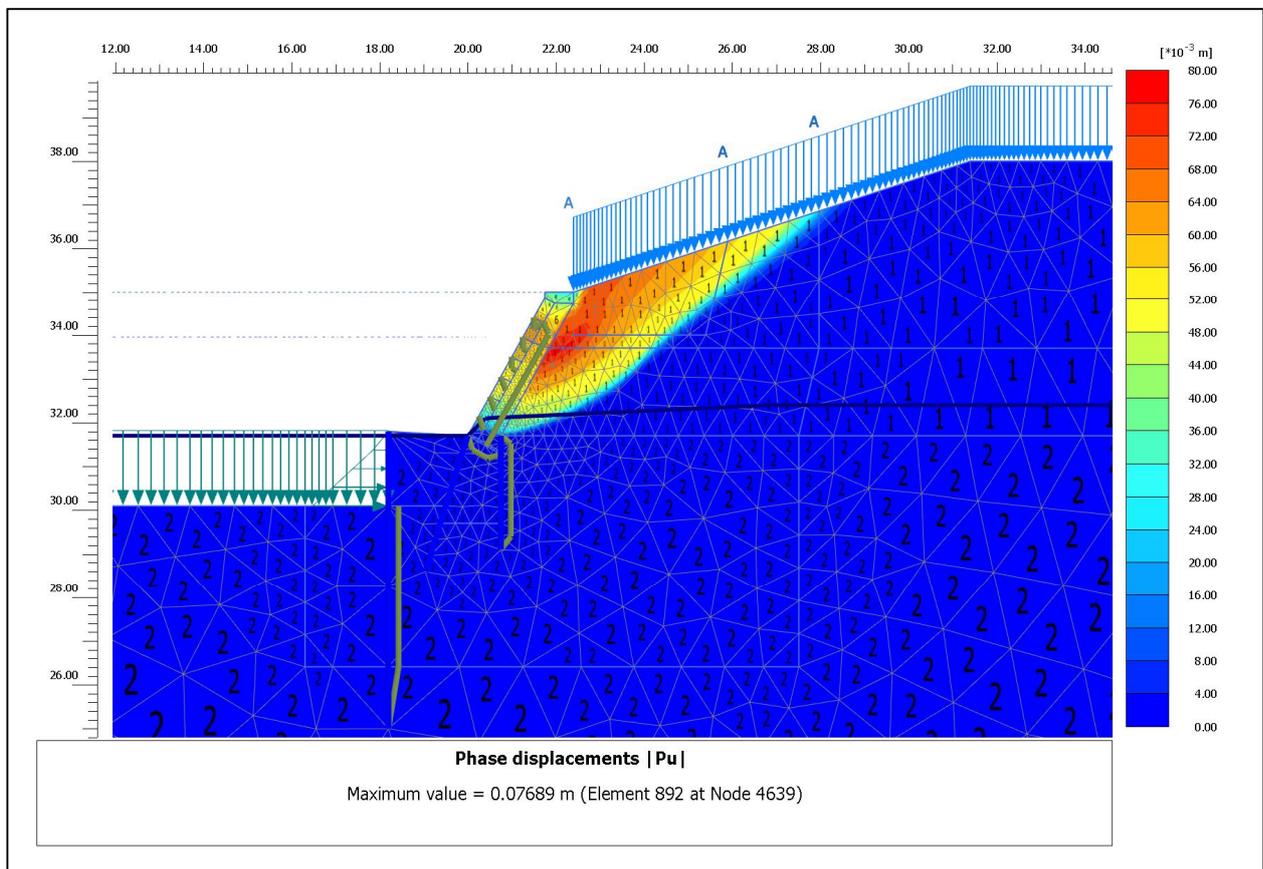


Bild 26 QS 6, Uferhöhe 35,0 mNN, Geländeneigung 1:3, Phi-c-Reduktion mit Bodenkenngößen gemäß [U 1], Verformungen nach Phi-c-Reduktion, globale Standsicherheit der oberen Ufersicherung $\eta = 1,15$
 Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

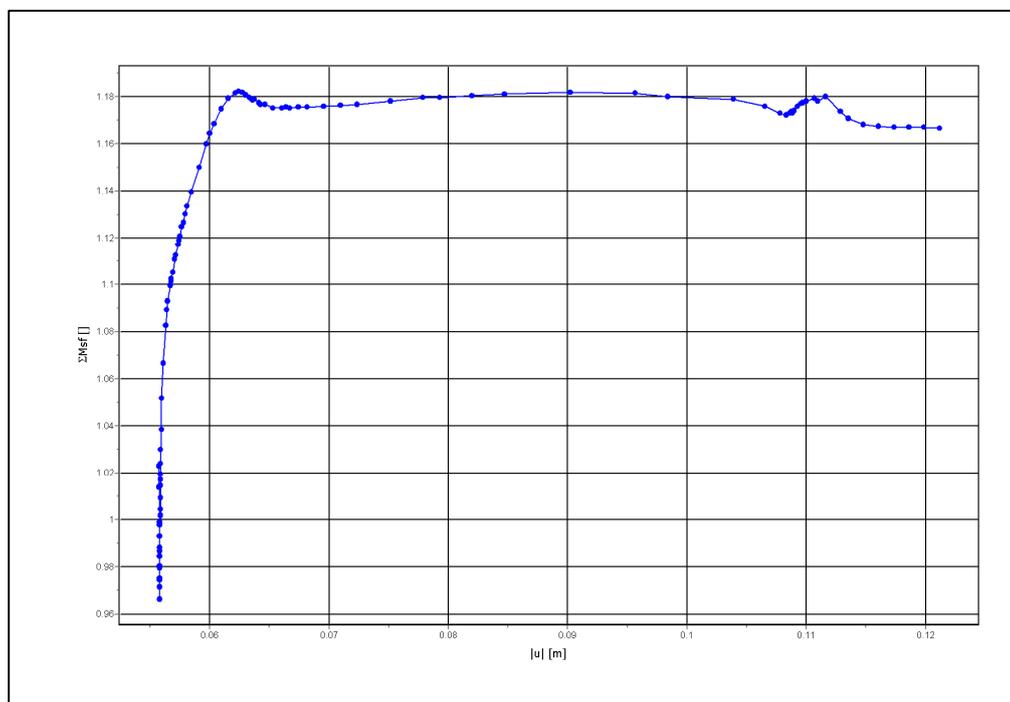
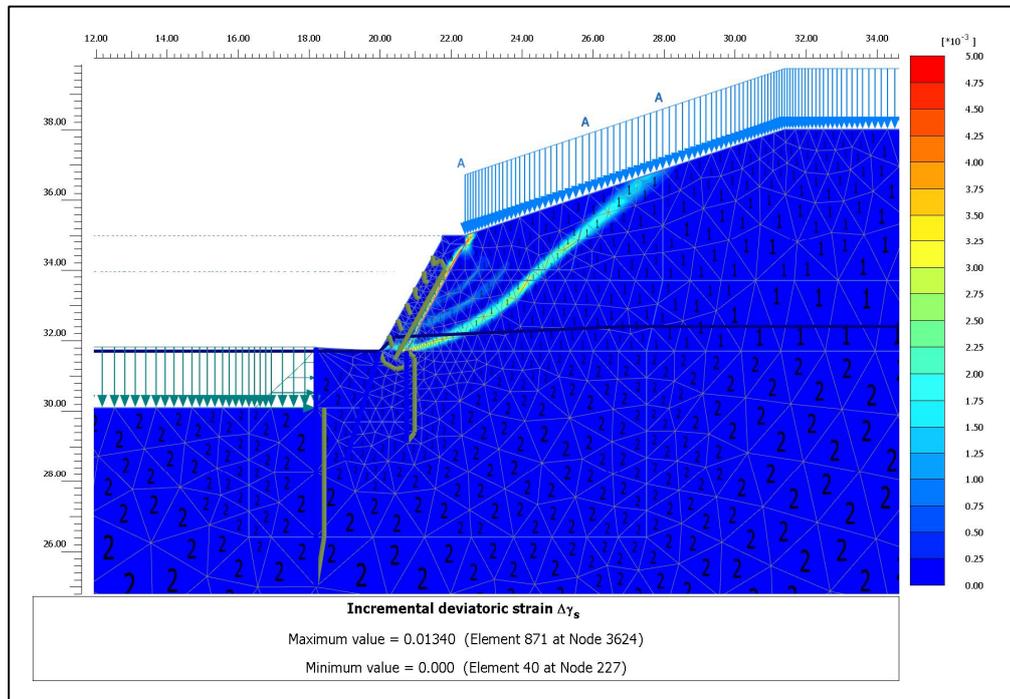


Bild 26a Inkrementelle Scherdehnungen nach Phi-c-Reduktion (oben) und Verformungen in Abhängigkeit des Gesamtmultiplikators $\Sigma M_{sf} = \eta$ (unten)

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Die globale Standsicherheit der oberen Uferböschung beträgt $\eta = 1,15$ bei Ansatz der Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten und $\eta = 1,4$ bei Ansatz der Bodenkenngößen gemäß Rückrechnung der Probelastung. Damit liegt die im FE-Modell berechnete Sicherheit für diesen Querschnitt mit den verbesserten Bodenkenngößen im Bereich der nach DIN 4084:1981 erforderlichen.

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngößen für die Uferböschungen

7.9 Übersicht der berechneten Sicherheiten

Zusammenfassend ergeben sich aus den numerischen Berechnungen die globalen Sicherheiten für die obere Ufersicherung nach Tabelle 3.

Berechnungsquerschnitt	Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten [U 1]	Erhöhten Bodenkenngößen gemäß Probebelastung
QS 1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN	1,8	unkritisch
QS 2 Erhöhtes Ufer, Uferhöhe 36 mNN	1,0	1,25
QS 3 Probebelastung, Uferhöhe 33,7 mNN	<< 1,0	1,0
QS 4 Regelquerschnitt mit Baum, Uferhöhe 33,7 mNN	1,8	unkritisch
QS 5 Erhöhtes Ufer mit Baum, Uferhöhe 36 mNN	1,1	1,25
QS 6 Mittlere Uferhöhe 35 mNN mit anschließender Geländeneigung 1:3	1,15	1,4

Tabelle 3: Globale Sicherheiten η der oberen Ufersicherung nach Sanierung der unteren Ufersicherung gemäß numerischer Berechnung

Hieraus lässt sich ableiten, dass die im Bodengutachten angesetzten Bodenkenngößen plausibel sind und auf der sicheren Seite liegen. Damit spiegeln diese den unteren Wert der möglichen Bandbreite wieder. Die über 100-jährige Standzeit und die Ergebnisse der Probebelastung deuten auf bessere Scherfestigkeiten hin. Legt man die aus der Probebelastung rückgerechneten Bodenkenngößen zu Grunde, ergibt sich ein aus

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

unserer Sicht für die obere Ufersicherung ein vertretbares Sicherheitsniveau. Dieses setzt voraus, dass die untere Ufersicherung gut erhalten oder saniert ist und dass Mängel oder Schäden frühzeitig erkannt und behoben werden.

Die Berechnungen mit den modellierten Baumlasten haben gezeigt, dass die Bäume keinen negativen Einfluss auf die Standsicherheit der Uferböschung haben. Da sich die Bäume selbst tragen müssen, werden die Lasten über die Verwurzelung ausreichend im Boden verteilt und örtliche negative Lastkonzentrationen werden verhindert. Dies lässt sich auch vor Ort nachvollziehen, da Bereiche mit Bäumen nach Angabe des WSA Berlin keine größeren oder häufigeren Mängel oder Schäden aufweisen, als Bereiche ohne Bäume.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

8 Analytische Vergleichsberechnungen nach DIN 4084

Ergänzend zu den durchgeführten FEM-Berechnungen wurden auftragsgemäß Vergleichsberechnungen mit den analytischen Verfahren nach DIN 4084 durchgeführt. Dabei wurde analog zum Kapitel 7 die Standsicherheit der oberen Ufersicherung für die Querschnitte QS 1 bis QS 6 untersucht. Berechnet wurden Kreisgleitflächen, da diese für die vorhandenen Baugrundverhältnisse maßgeblich sind. Zuerst wurde die globale Sicherheit nach alter DIN 4084:1981 ermittelt. Anschließend wurde eine Vergleichsberechnung nach dem Teilsicherheitskonzept nach neuer DIN 4084:2009 durchgeführt. Die Bodenkenngößen wurden wie oben variiert (Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten und verbesserte Bodenkenngößen gemäß Probelastung).

Das Mauerwerk wurde als Bodenschicht mit zwischen Stein und Fuge gemittelten Scherfestigkeiten angesetzt (Ersatzscherfestigkeit: $\varphi' = 40^\circ$ und $c' = 20 \text{ kN/m}^2$). Die Ersatzscherfestigkeit wurde gegenüber den bisherigen Berechnungen in [U 1] und [U 2] reduziert. Die gewählten Werte ergeben sich aus der vorhandenen Geometrie, den Erkenntnissen der FEM-Berechnungen und der ansetzbaren Schubfestigkeiten für Mauerwerk nach DIN 1053:1996.

Oberflächenrutschungen (flache Gleitkörper direkt hinter der Mauer) wurden nicht berücksichtigt, weil die numerischen Untersuchungen gezeigt haben, dass die maßgeblichen Gleitkörper eine Dicke von ca. 2 m im Bereich der Geländeoberkante haben.

Auf den folgenden Seiten sind die wesentlichen Gleitkörper aus den Berechnungen nach globalem Sicherheitskonzept für den jeweiligen Querschnitt dargestellt (Bilder 27 bis 32).

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

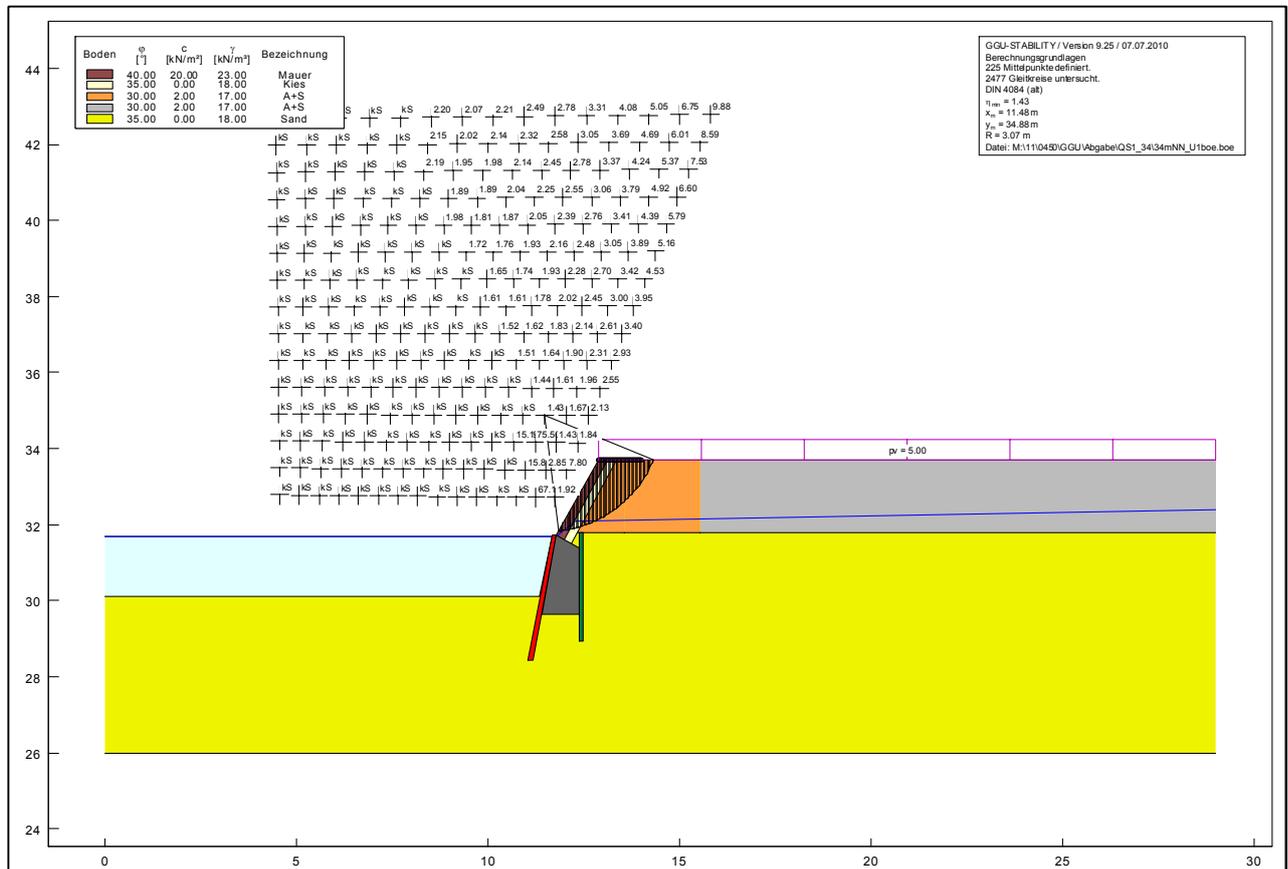


Bild 27 QS 1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN, Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,43$
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Bild 28

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

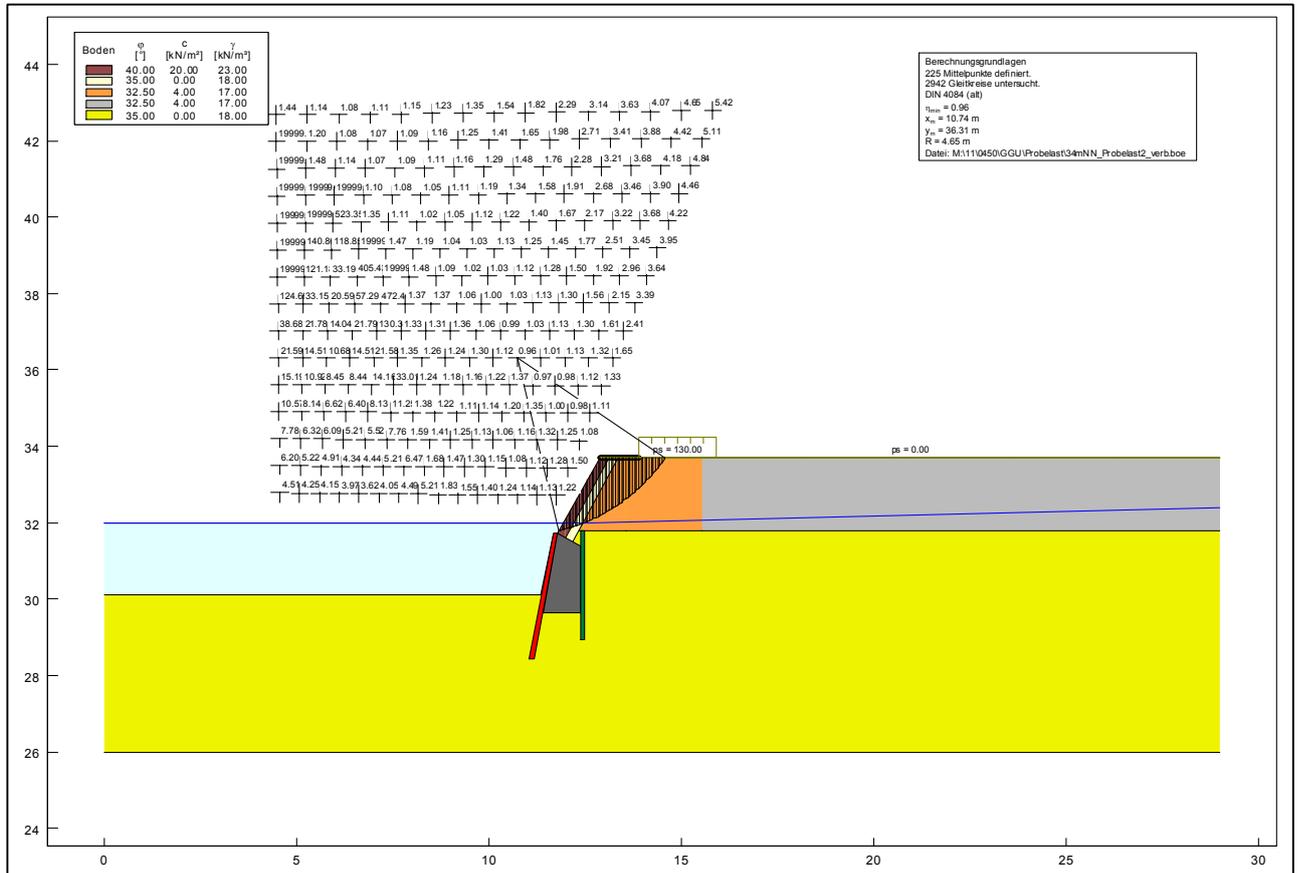


Bild 29 QS 3 Probelastung, Uferhöhe 33,7 mNN, verbesserte Bodenkenngößen $\phi' = 32,5^\circ$ und $c' = 4 \text{ kN/m}^2$, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 0,96$
 Lasten: Probelast A = 130 kN/m², Kanalwasser 32,1 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

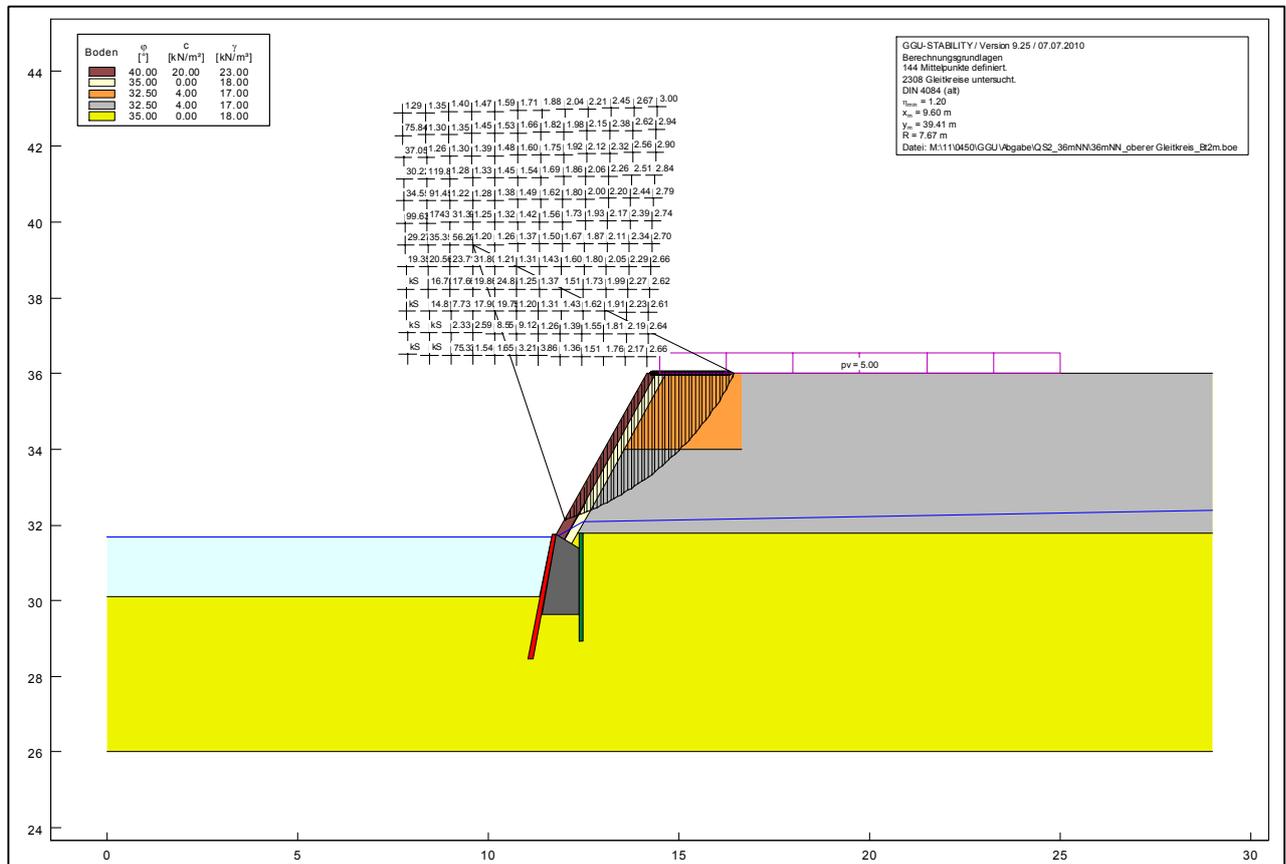


Bild 30 QS 2, Uferhöhe 36 mNN, verbesserte Bodenkenngößen gemäß Probelastung, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,20$
 Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

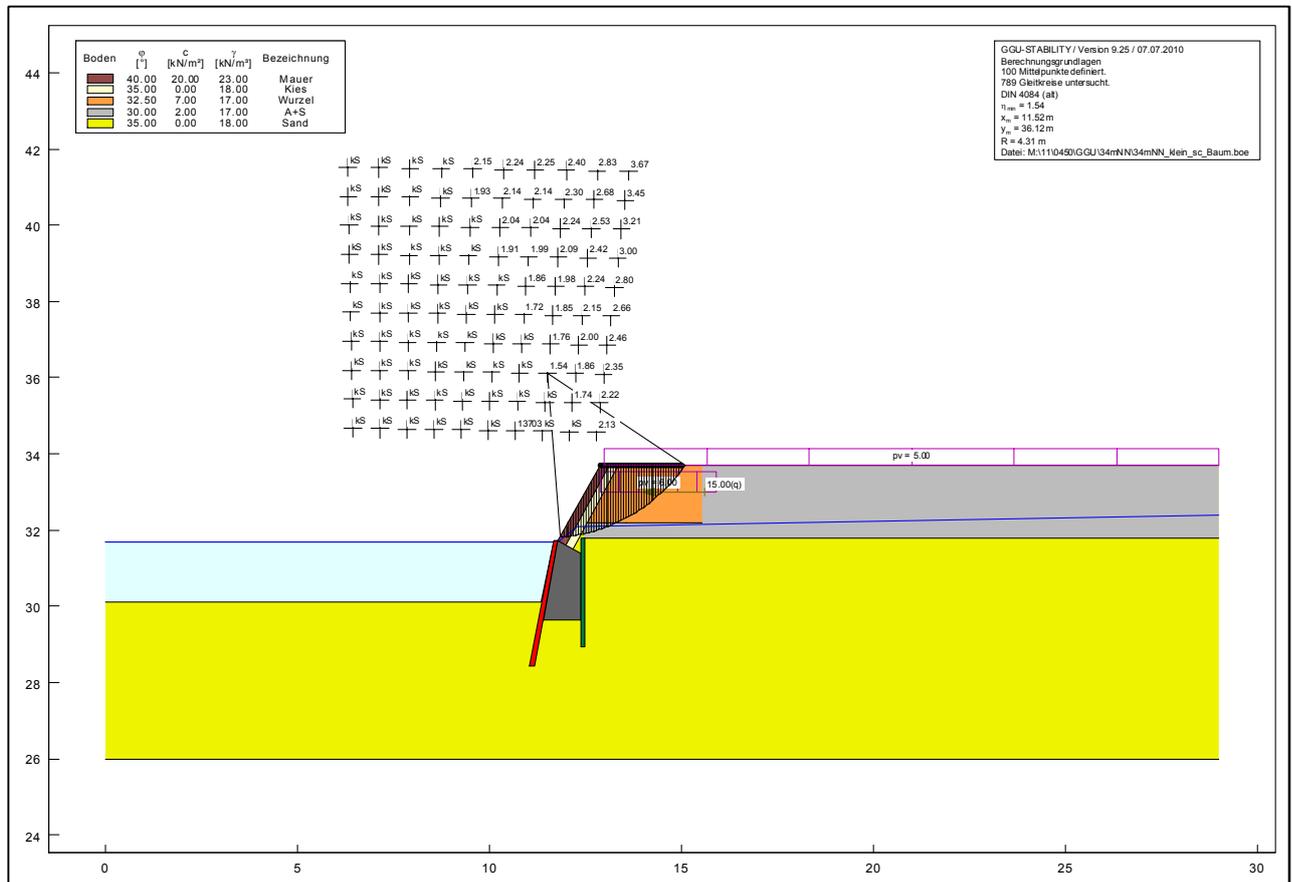


Bild 31 QS 4, Regelquerschnitt mit Baum, Uferhöhe 33,7 mNN, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,5$
 Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngößen für die Uferböschungen

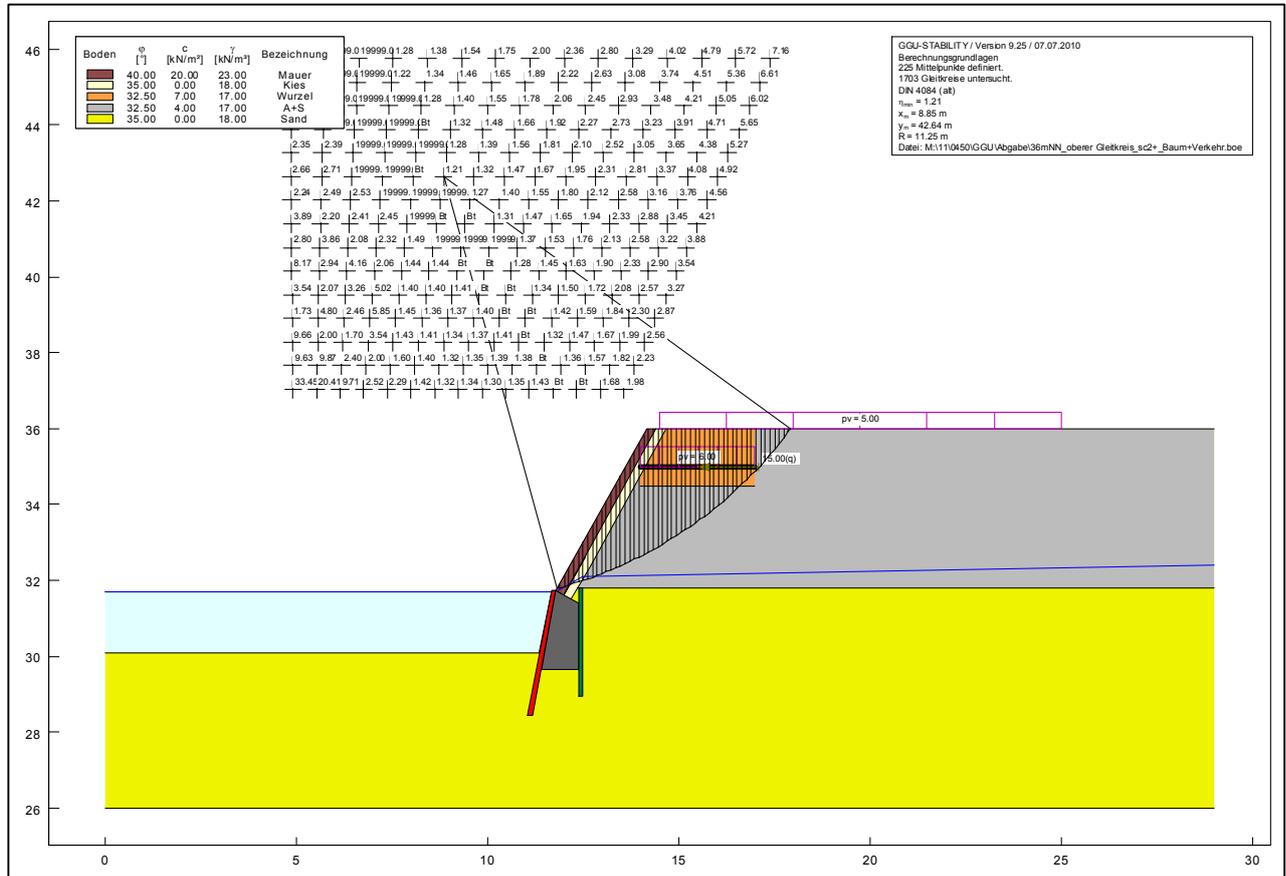


Bild 32 QS 5, Uferhöhe 36 mNN mit Baum, verbesserte Bodenkenngößen gemäß Probelastung, globale Standsicherheit obere Ufersicherung: $\eta = 1,2$

Anmerkung: Aufgrund der Verwurzelung ist ein Teilversagen des Baums nicht denkbar. Daher wurden hier nur Gleitkörper berücksichtigt, die die Baumlast vollständig einschließen. Die Baumlast wurde analog der oben beschriebenen und dargestellten Verteilung angesetzt.

Lasten: Baumlast gemäß Bild 33, Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

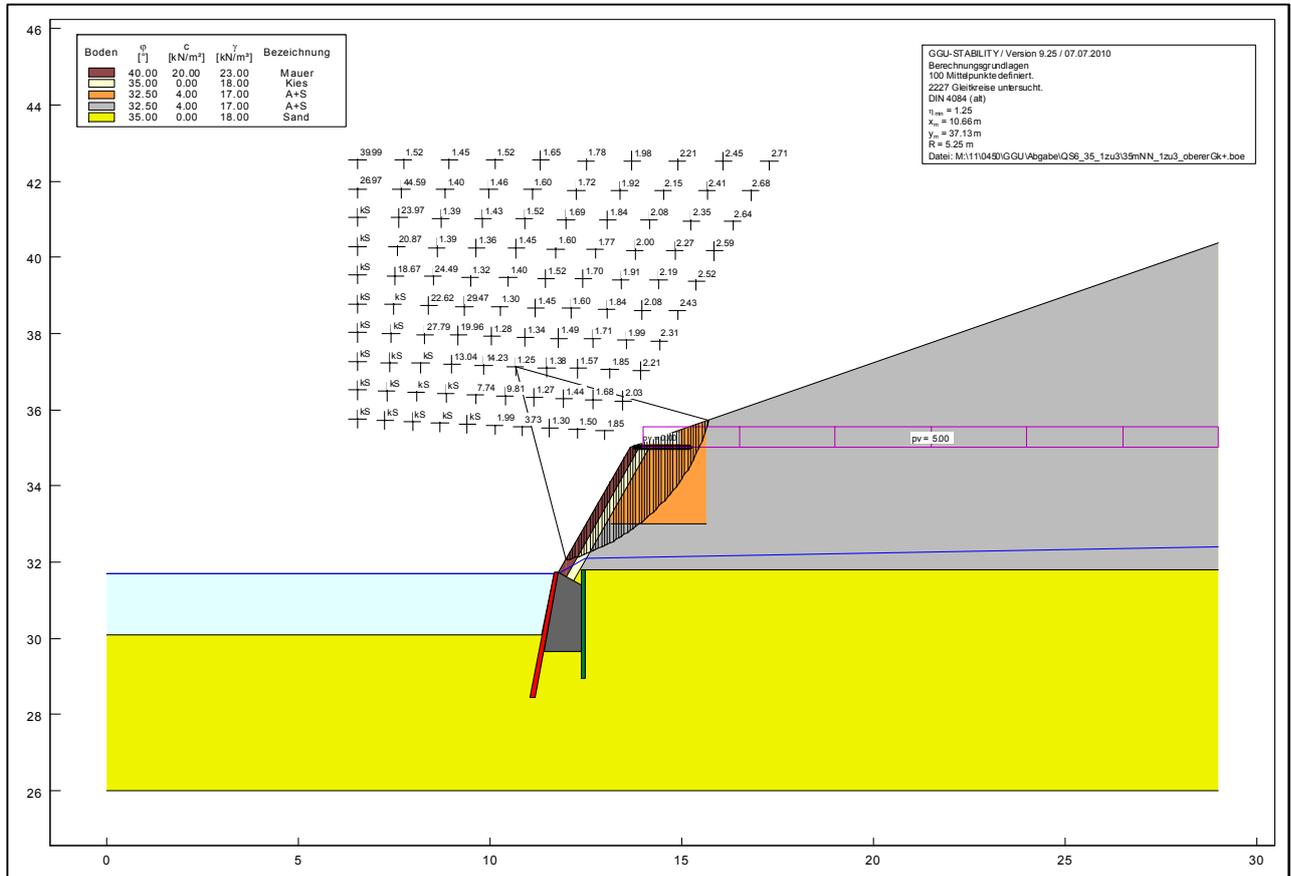


Bild 33 QS 6, Uferhöhe 35 mNN, 1:3 geneigtes Gelände, verbesserte Bodenkenngrößen gemäß Probelastung, globale Standsicherheit obere Ufersicherung $\eta = 1,25$
 Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Die berechneten Sicherheiten wurden zum Vergleich den Ergebnissen der FEM-Berechnungen aus Tabelle 3 gegenübergestellt. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4 zusammengestellten Sicherheiten und Ausnutzungsgrade für die obere Ufersicherung.

Berechnungsquerschnitt	Sicherheit mit Bodenkenngrößen gemäß Bodengutachten			Sicherheit mit erhöhten Bodenkenngrößen gemäß Probelastung		
	FEM $\eta =$	DIN 4084:1981 $\eta =$	DIN 4084:2009 LF 1, $\mu =*$	FEM $\eta =$	DIN 4084:1981 $\eta =$	DIN 4084:2009 LF 1, $\mu =*$
QS 1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN	1,8	1,43	$\mu = 89\%$	unkritisch		
QS 2 Erhöhtes Ufer, Uferhöhe 36 mNN	1,0	0,90	$\mu = 127\%$	1,25	1,2	$\mu = 106\%$
QS 3 Probelastung, Uferhöhe 33,7 mNN	$\ll 1$	0,84	-	1,0	0,96	-
QS 4 Regelquerschnitt mit Baum, Uferhöhe 33,7 mNN	1,8	1,50	$\mu = 103\%$	unkritisch		$\mu = 100\%$
QS 5 Erhöhtes Ufer mit Baum, Uferhöhe 36 mNN	1,1	1,07	$\mu = 128\%$	1,25	1,23	$\mu = 110\%$
QS 6 Mittlere Uferhöhe 35 mNN mit anschließender Geländeneigung 1:3	1,15	1,04	$\mu = 122\%$	1,4	1,25	$\mu = 101\%$ (98 % mit Baum)

Tabelle 4: Sicherheiten der oberen Ufersicherung, Vergleich zwischen FEM-Berechnung (Globalsicherheit η), DIN 4084:1981 (Globalsicherheit η) und DIN 4084:2009 (Teilsicherheiten*), *Angabe von Ausnutzungsgrad μ im Lastfall 1

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Die Gegenüberstellung in Tabelle 4 zeigt eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den FEM-Berechnungen und den Berechnungen nach DIN 4084:1981. Auch die Ausnutzungsgrade entsprechen ungefähr dem Sicherheitsniveau der beiden anderen Verfahren.

Auffällig ist die vergleichsweise hohe Ausnutzung nach dem Teilsicherheitskonzept bei QS 4, Regelquerschnitt mit Baum. Ursache hierfür ist, dass die Baumlasten als Verkehrslasten angesetzt wurden und somit im Gegensatz zu den anderen Verfahren mit einer hohen Teilsicherheit multipliziert werden. Aufgrund der geringen Uferhöhe ist der Anteil der Verkehrslast groß. Die erforderliche Sicherheit wird nur bei Ansatz der Bodenkenngrößen gemäß Rückrechnung der Probelastung eingehalten.

Bei QS 6 kann nach DIN 4084:2009 nahezu die Sicherheit des Lastfalls 1 nachgewiesen werden. Dagegen entspricht die globale Sicherheit nur knapp Lastfall 2. Ursache ist, dass bei dem Teilsicherheitskonzept wegen der großen Uferhöhe die ständige Last überwiegt, die hier günstiger angesetzt wird als bei dem Globalsicherheitskonzept.

Insgesamt werden die Ergebnisse der FEM-Berechnung durch die Vergleichsberechnungen nach DIN 4084 bestätigt. Die geringen Abweichungen lassen sich auf die unterschiedlichen Berechnungsverfahren zurückführen.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

9 Bewertungen und Schlussfolgerungen

9.1 Gesamtsystem

Die Berechnungen haben bestätigt, dass das statische Modell der Ufersicherung dem Geländebruchmodell entspricht. Das Quadermauerwerk wirkt lediglich als Oberflächen-sicherung. Auf den Nachweis der Gleit- und Kippsicherheit analog zu einer Schwerege-wichtswand kann daher - wie oben erläutert - verzichtet werden.

Außerdem haben die Berechnungen gezeigt, dass sich zwischen der Gesamtstandsicherheit und der lokalen Standsicherheit des Quadermauerwerkes unterscheiden lässt. In zahlreichen vorherigen Untersuchungen wurde bereits festgestellt, dass der untere Teil der Uferkonstruktion (Betonkörper in Holzspundwände eingefasst) nach der über hundertjährigen Standzeit infolge Schäden Standsicherheitsdefizite hat. Folglich sind hierfür Sanierungsmaßnahmen geplant. Die Standsicherheitsdefizite können zu Verformungen führen, die wiederum negative Auswirkungen auf den oberen Teil der Uferböschung haben (Quadermauerwerk). Verformungen im Bereich der unteren Ufersicherung übertragen sich auf die obere Ufersicherung und führen dort zu Bodenauflocke-rungen und Rissen. Durch die Auflockerungen reduziert sich die Festigkeit des Bodens. In die Risse kann Wasser eindringen und Boden ausgetragen werden. Dies führt zu einer weiteren Zunahme der Verformungen und zur Reduktion der Scherfestigkeiten des Bodens und damit des Sicherheitsniveaus.

Aus diesen Gründen ist die Grundvoraussetzung für die Standsicherheit des Gesamt-systems, dass eine ausreichende Standsicherheit der unteren Konstruktion erhalten bleibt bzw. durch Sanierungsmaßnahmen wiederhergestellt wird. Die vorgesehenen Varianten der vorgestellten Spundwand mit Hinterfüllung oder einer Vorschüttung er-scheinen plausibel. Um eine Fortsetzung und Ausweitung von Schäden zu vermeiden, müssen notwendige Sanierungsmaßnahmen umgesetzt werden. Durch eine schnelle Reaktion auf sich andeutende Mängel oder Schäden lassen sich die Kosten insgesamt reduzieren.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den

Bodenkenngößen für die Uferböschungen

9.2 Obere Ufersicherung (Quadermauerwerk)

Unter der Voraussetzung, dass die Standsicherheit der unteren Ufersicherung und damit des Gesamtsystems gewährleistet ist, erfolgt gemäß Aufgabenstellung die Bewertung der oberen Ufersicherung.

Das Quadermauerwerk dient als Oberflächensicherung, Verwitterungs- und Erosionsschutz. Diese Funktion muss auch zukünftig erhalten bleiben, um eine Reduktion der Standsicherheit der oberen Ufersicherung auszuschließen.

Da die Flächen sichtbar sind, lassen sich Schäden zeitnah erkennen und beheben. Eine Ausweitung von Schäden kann somit durch Beobachtung und einen entsprechenden Wartungsplan verhindert werden.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass unter den genannten Voraussetzungen im Regelbereich (Uferhöhe 33,7 mNN) eine ausreichende Standsicherheit vorhanden ist. Für die Uferhöhe 36,0 mNN ergab sich bei Ansatz der Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten noch eine globale Standsicherheit $\eta > 1,0$.

Die numerische Rückrechnung der ufernahen Probelastung hat bei der maximalen Probelast von 1300 kN ein Versagen ergeben. Dies bedeutet, dass die Bodeneigenschaften hier besser sind, als die im Bodengutachten angegeben. Um ein stabiles System zu erzeugen, wurden die charakteristischen Scherfestigkeiten in den folgenden Berechnungsschritten erhöht. Bei Erhöhung des Reibungswinkels von $\varphi' = 30,0^\circ$ auf $32,5^\circ$ und der Kohäsion von $c' = 2 \text{ kN/m}^2$ auf 4 kN/m^2 kann im Versuch vom Grenzgleichgewicht ausgegangen werden. Die erhöhten Scherfestigkeiten liegen noch im Rahmen der in der EAU angegebenen Bandbreite für vergleichbare Böden. Nach Aussage der BAW liegen die im Bodengutachten angegebenen Bodenkenngößen auf der sicheren Seite. Dass bisher keine Schäden infolge Bodenschwächen erkennbar oder bekannt sind, spricht ebenfalls für eine entsprechend gute Bodenfestigkeit.

Überträgt man die erhöhten Bodenkenngößen auf die übrigen Bereiche, so ergibt sich insgesamt ein Sicherheitsniveau, das im Hinblick auf den Bestandsschutz aus unserer Sicht vertretbar ist. Für die auf 36,0 mNN erhöhten Ufer ergeben die Berechnungen z. B. noch ein globales Sicherheitsniveau von $\eta = 1,25$ nach der FEM-Berechnung.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

9.3 Baumlasten

Die Berechnungen mit Baumlast haben gezeigt, dass die Bäume nicht ausschlaggebend für die Standsicherheit sind. Aufgrund der räumlichen Lastausbreitung und der Lastverteilung durch die Wurzeln treten keine hohen konzentrierten Lasten auf. Um die Baumlasten möglichst umfassend zu berücksichtigen, wurde der Modellbaum C gemäß Unterlage [U 3] angesetzt. Der erhöhten Belastung durch die Bäume steht ein erhöhter Widerstand aufgrund der Verwurzelung entgegen. Die Wurzeln wirken ähnlich wie eine Bodenverankerung bzw. -verdübelung. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich der Baum selbst tragen muss, können die Wurzeln als eine Art Bodenverbesserung im Rechenmodell berücksichtigt werden. Die stabilisierende Wirkung der Wurzeln lässt sich am besten durch eine Erhöhung der Kohäsion infolge der Zugfestigkeit der Wurzeln berücksichtigen. Zur Berücksichtigung der Bäume schlagen wir den auf Bild 33 dargestellten Ansatz vor. Die Lasten entsprechen den Angaben in Kapitel 6.3. Da ein teilweises Versagen bzw. Durchbrechen der Bäume nicht möglich ist, müssen unseres Erachtens nur Gleitkreise berücksichtigt werden, die die gesamte Baumlast einschließen.

Neben der Erhöhung der Bodentragfähigkeit durch die Wurzeln haben gesunde Bäume weitere positive Eigenschaften, die konstruktiv zur Böschungsstandsicherheit beitragen, jedoch im Berechnungsmodell nicht erfasst werden, wie z. B. die Verhinderung von Bodenerosion und Bodenaufweichung (siehe [U 16]).

Negativ wirkt sich eine Verschiebung von Mauersteinen durch zunehmende Verwurzelung aus. Dies zeigt sich vor Ort bei einigen sehr ufernahen Bäumen. Durch die Verschiebungen können sich Fugen öffnen und somit der Oberflächen- und Verwitterungsschutz reduziert werden. In solchen Fällen sollten durch eine zeitnahe Sanierung der Fugen Folgeschäden verhindert werden.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

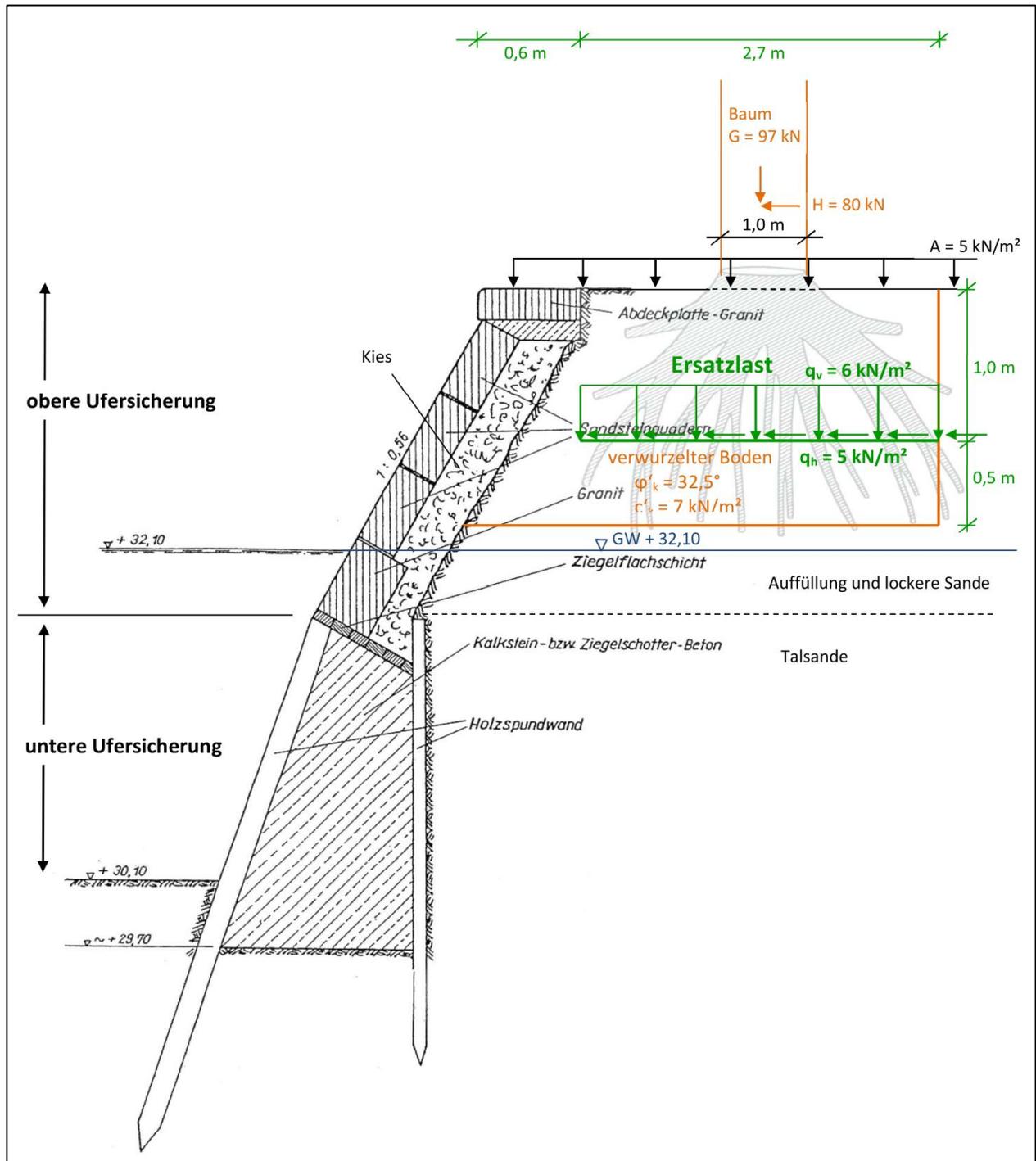


Bild 34 Statisches Modell für Modellbaum C

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Zusammenfassend verhalten sich die Bäume unseres Erachtens hinsichtlich der Böschungsstandsicherheit weitgehend neutral. Voraussetzung dafür ist, dass die Bäume gesund sind und im Rahmen der Verkehrssicherung kontrolliert und geschnitten werden. Kranke oder abgestorbene Bäume sollten umgehend entfernt werden. Nicht auszuschließen ist, dass bei Stürmen Bäume umfallen. Eine örtliche Sanierung von Windbruchschäden ist problemlos möglich und sollte zeitnah umgesetzt werden.

Um die Betrachtungen zu den Bäumen und mögliche Reserven genauer zu belegen, sind Probelastungen an Bäumen denkbar. Die ungünstigste Beanspruchung entsteht bei Wind, der in Richtung Kanal wirkt. Diese Belastungssituation kann durch entsprechende horizontale Versuchslast simuliert werden.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

10 Empfehlungen für die weitere Planung

In der weiteren Sanierungsplanung kann die Bemessung mit Gleitkreisberechnungen nach DIN 4084:2009 durchgeführt werden. Entscheidend für die Gesamtstandsicherheit ist der Erhalt bzw. die Wiederherstellung der ausreichenden Standsicherheit der unteren Uferböschung. Maßgeblich für die Bemessung sind daher die tiefen Gleitkreise, die die Gesamtstandsicherheit der Ufersicherung widerspiegeln. Hierbei können die Baumlasten und die bodenverbessernden Eigenschaften der Wurzeln nach den Vorgaben in Kapitel 9.3, Bild 33 angesetzt werden.

Die Standsicherheit der oberen Ufersicherung sollte gesondert betrachtet werden. Hierbei ist ein Nachweis der Geländebruchsicherheit ausreichend. Als Ergebnis der Rückrechnungen schlagen wir vor, die Scherfestigkeit der Auffüllung für den Nachweis der oberen Ufersicherung wie folgt anzusetzen:

$$\varphi'_{k} = 32,5^{\circ} \text{ und}$$
$$c'_{c,k} = 4 \text{ kN/m}^2.$$

Voraussetzung für diesen Ansatz ist eine gut erhaltene Uferböschungen.

Für die Gesamtstandsicherheit (tiefe Gleitkreise) sind weiterhin die Werte nach Unterlage [U 1] zu berücksichtigen ($\varphi'_{k} = 30^{\circ}$ und $c'_{k} = 2 \text{ kN/m}^2$).

Die positive Tragwirkung des Quadermauerwerkes kann mit folgender Ersatzscherfestigkeit gemäß Seite 63 berücksichtigt werden:

$$\varphi'_{k} = 40,0^{\circ} \text{ und } c'_{k} = 20 \text{ kN/m}^2.$$

Im Übrigen gelten die Bodenkenngößen gemäß Bodengutachten [U 1].

Zukunft Landwehrkanal
Numerische Untersuchungen zu den
Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Gleitkreise, die weniger als 2 m im Bereich der Geländeoberkante in die Böschung einschneiden (siehe Bild 34), sind nach den Erkenntnissen aus den numerischen Untersuchungen nicht maßgebend. Solche Oberflächenrutschungen werden durch die Oberflächensicherung verhindert.

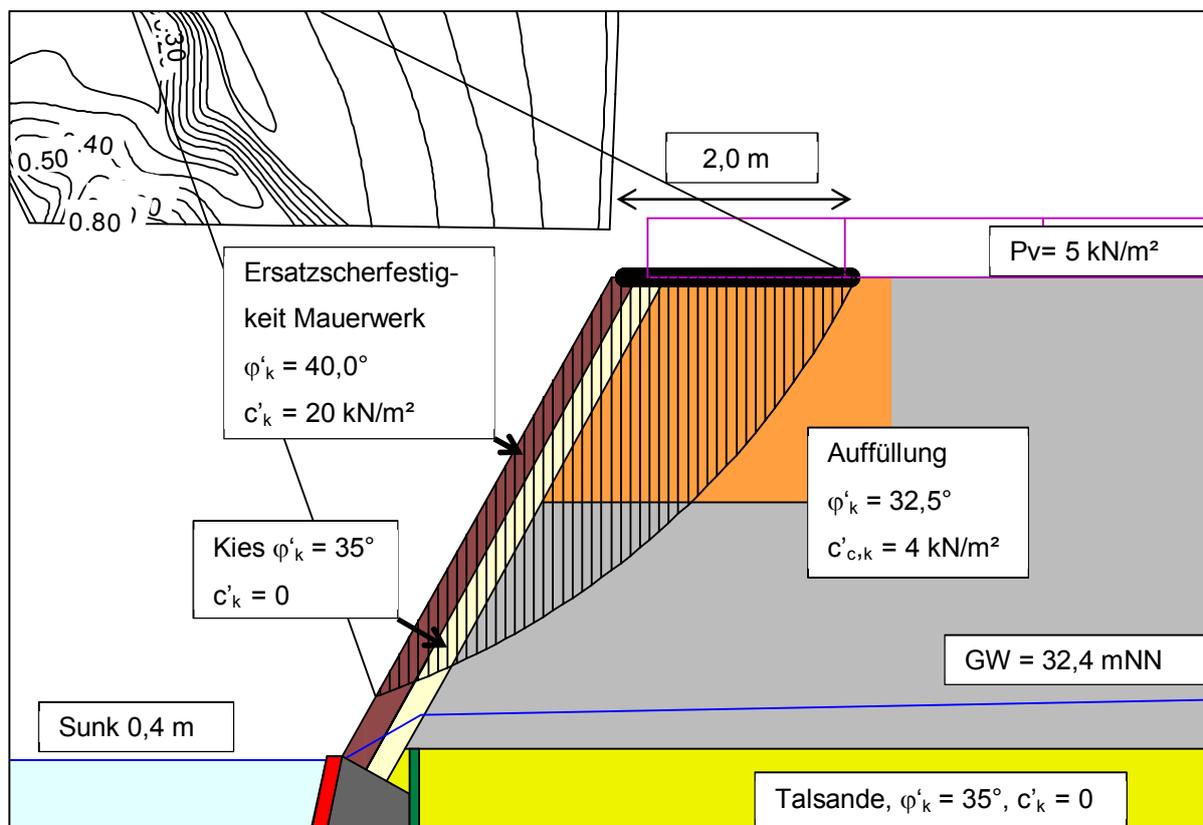


Bild 35 Mindestbreite der Gleitkreise

Nach den Untersuchungen in diesem Gutachten ist für die obere Ufersicherung zu erwarten, dass im Zuge der weiteren Planung bis zu einer Uferhöhe von 35,0 mNN im Regelbereich eine normgerechte Sicherheit nachgewiesen werden kann, wenn die untere Ufersicherung intakt bzw. saniert ist. Für höhere Uferböschungen ist ein geringeres Sicherheitsniveau zu erwarten.

Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zu den Bodenkenngrößen für die Uferböschungen

Bei der Festlegung des notwendigen Sicherheitsniveaus für Uferhöhen größer 35,0 mNN sollten die bisherige Standzeit und die Aspekte des Bestandschutzes sowie Maßnahmen zur Beobachtung und Wartung einfließen. Aus unserer Sicht ist damit ein reduziertes Sicherheitsniveau für die obere Ufersicherung vertretbar.

Voraussetzung hierfür ist die Gewährleistung bzw. die rechtzeitige Wiederherstellung einer ausreichenden Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der unteren Konstruktion. Wenn diese Voraussetzung erfüllt ist, kann auf umfangreiche Sanierungsmaßnahmen bei der oberen Ufersicherung verzichtet werden. Hier sollte sich die Sanierung auf örtliche Schwachstellen und Mängel konzentrieren, wie die Ausbesserung und Erneuerung von Fugen und das Verhindern von Bodenaufweichungen durch unzureichende Oberflächenentwässerung. Dies kann aus unserer Sicht im Rahmen der Beobachtungsmethode erfolgen. Hierzu sollte ein entsprechender Wartungsplan aufgestellt werden. Ziel der Maßnahmen ist der Erhalt des Quadermauerwerks als Oberflächensicherung zum Schutz der vorhandenen Bodenfestigkeiten.

Für örtliche Besonderheiten oder Ufersicherungen, die nicht den beschriebenen Regelquerschnitten entsprechen, sind gesonderte Untersuchungen notwendig.

Aufgestellt: Berlin, 23.01.2012



Dipl.-Ing. Christian Schmidt

Prokurist