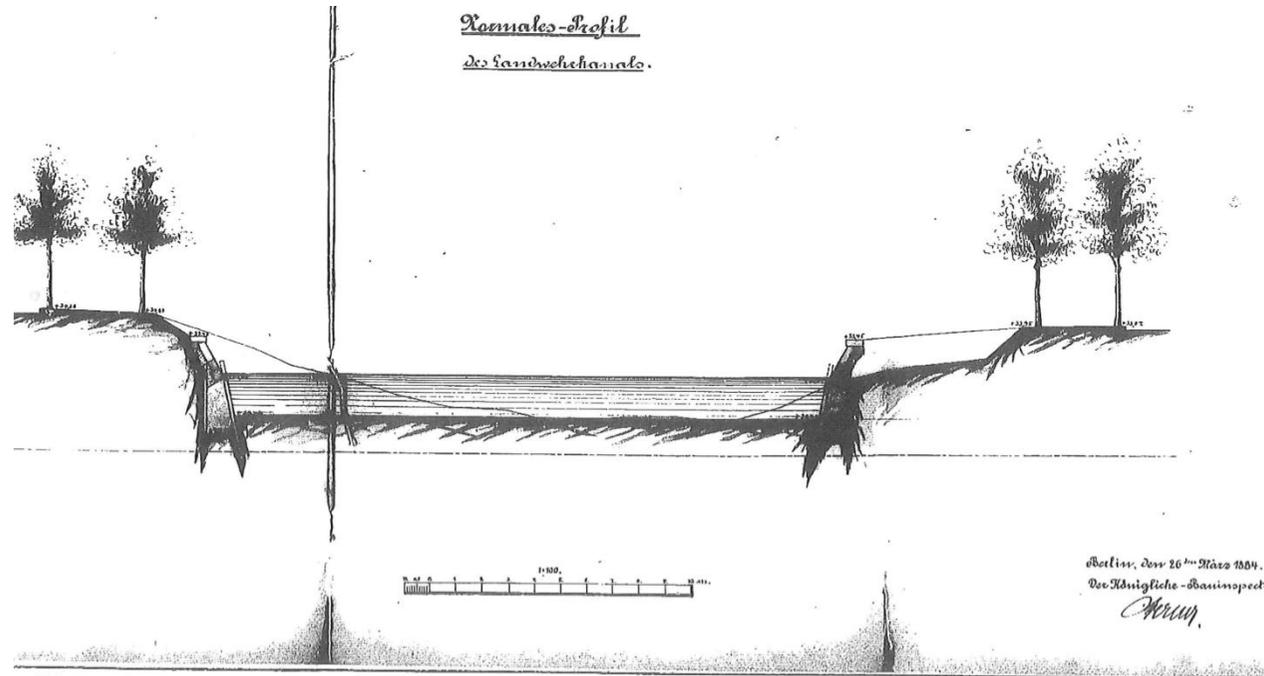


Zukunft Landwehrkanal

Numerische Untersuchungen zur Ermittlung der Bodenkenngrößen für die Uferböschungen



D. 167: "Normalprofil des Landwehrkanals": Schemazeichnung des Königl. Bauinspektors zum Einbau von Sandsteinquadermauerwerk vom 26. März 1884

Quelle: Denkmalgutachten

Dipl.-Ing. Christian Schmidt Krebs und Kiefer GmbH

Rudi-Dutschke-Straße 9 · 10969 Berlin
tel. +49 30 217342-0 · fax +49 30 217342-11
email kuk@b.kuk.de · www.kuk.de

KUK
KREBS UND KIEFER

Gliederung

1. Kurze Vorstellung des Unternehmens Krebs und Kiefer
2. Einführung
3. Berechnungsmodell
4. Ergebnisse ausgewählter Berechnungsquerschnitte
5. Schlussfolgerungen
6. Fragen



1. Kurze Vorstellung des Unternehmens

Rudi-Dutschke-Straße 9 · 10969 Berlin
tel. +49 30 217342-0 · fax +49 30 217342-11
email kuk@b.kuk.de · www.kuk.de



Krebs und Kiefer Beratende Ingenieure

- Gründung 1950
- Unabhängige inhabergeführte Ingenieurgesellschaft
- 10 Standorte in Deutschland
- Ca. 350 fest angestellte Mitarbeiter, davon ca. 60 in Berlin

Fachliche Qualifikationen

- Bauingenieure aller Fachrichtungen
- Prüfsachverständige für Baustatik (alle Fachrichtungen)
- Sachverständige für vers. Sondergebiete
- Energieberater, Schweißfachingenieure
- Lehrbeauftragte an vers. Hochschulen
- Gutachter



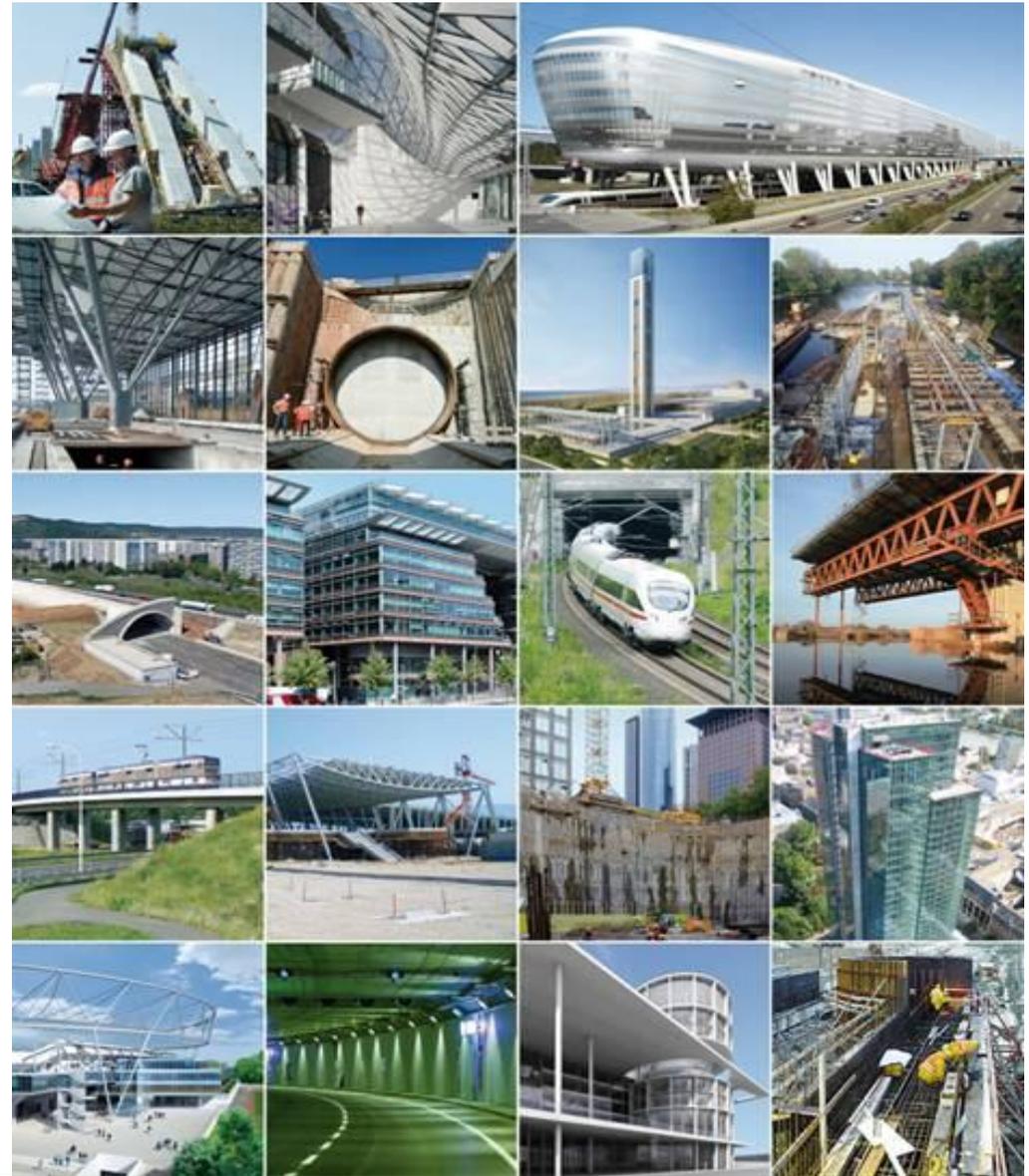
Leistungsspektrum

Fachbereiche

- Ingenieurbau
- Hochbau
- Wasserbau
- Verkehrsanlagen
- Geotechnik

Leistungen

- Gesamtplanung
- Objektplanung
- Tragwerksplanung
- Bautechnische Prüfung
- Gutachten
- Bau- und Vertragsmanagement
- Bauüberwachung und SiGeKo
- Wärme-, Schall- und Brandschutz
- Sanierung



Vorstellung des Unternehmens

Kurzvorstellung Unternehmen

■ Mitarbeiter

– Unser Kapital sind die Erfahrung, das Wissen und das Engagement unserer Mitarbeiter. Unsere Leistungen werden von vielen Schultern getragen.

– Betriebszugehörigkeit:

- über 30 Jahre: 15 %
- über 10 Jahre: 37 %
- über 05 Jahre: 15 %
- unter 05 Jahre: 33 %



Vorstellung des Unternehmens

Qualitätsmanagement

Zuverlässigkeit bei der Planungsqualität

- Strukturierte Abläufe
- Vier-Augen Prinzip
- Checklisten
- Redundanz
- Kostenkontrolle
- Kostenoptimierung
- Termineinhaltung
- Beschleunigungsmaßnahmen



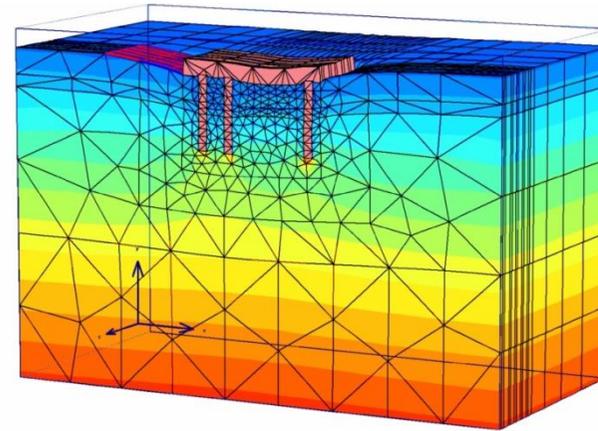
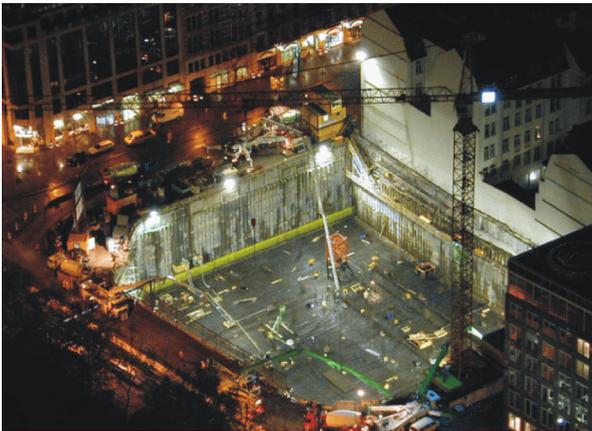
Darstellung der Methoden zur Steuerung komplexer und komplizierter Vorgänge

Dipl.-Ing. Christian Schmidt



- 1999 Diplom TU-Darmstadt, Vertiefungsfächer: Statik, Massivbau und Geotechnik (Hauptfach)
- seit 1999 angestellt bei Krebs und Kiefer, Abteilung Geotechnik
- seit 2010 Anerkennung als Gutachter und Prüfenieur für Geotechnik durch das Eisenbahn-Bundesamt
- seit 2011 Prokurist bei Krebs und Kiefer

Tätigkeiten: Entwurfs-, Ausführungsplanung, Prüfung, Erstellung von Gutachten, Finite-Elemente Berechnungen, Fachtechnische Bauüberwachung



Kurzvorstellung Projektbearbeiter



www.kuk.de

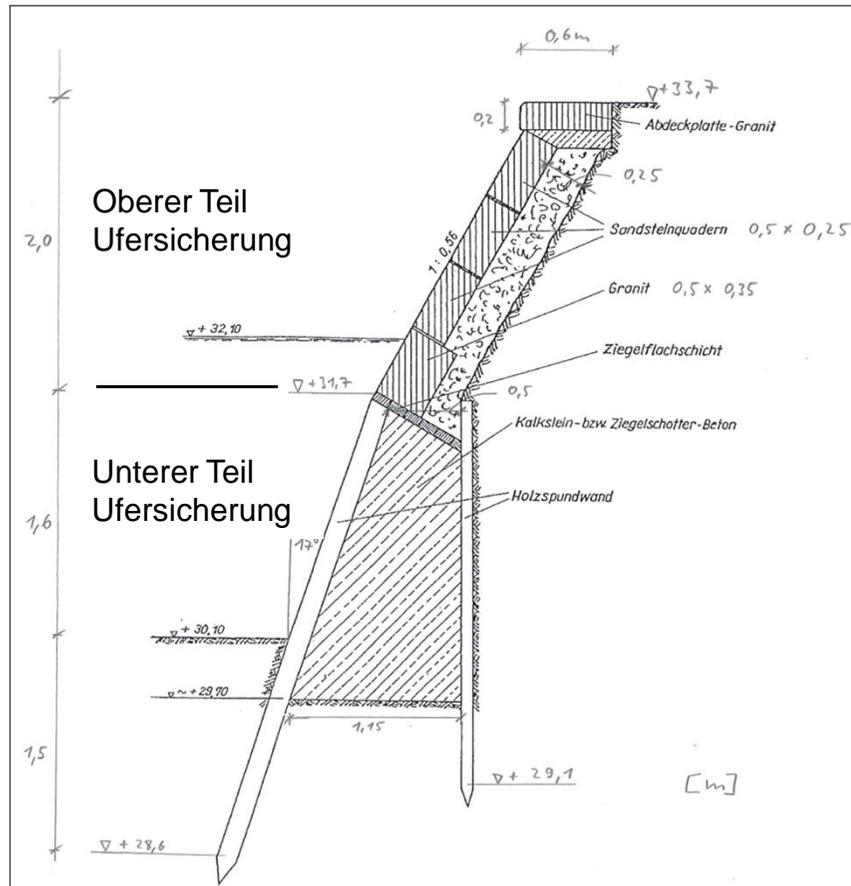
Kontakt:

Dipl.-Ing. Christian Schmidt

Tel. 06151/885-345

sc@da.kuk.de

2. Einführung



Regelquerschnitt

- Länge LWK 10,74 km, Anteil Regelbauweise ca. 60 %.
- Standzeit über 100 Jahre.
- Standsicherheitsdefizite durch Schäden.
- Standsicherheit der oberen Ufersicherung ließ sich mit den bisherigen statischen Modellen nicht nachweisen (Widerspruch zur Standzeit).

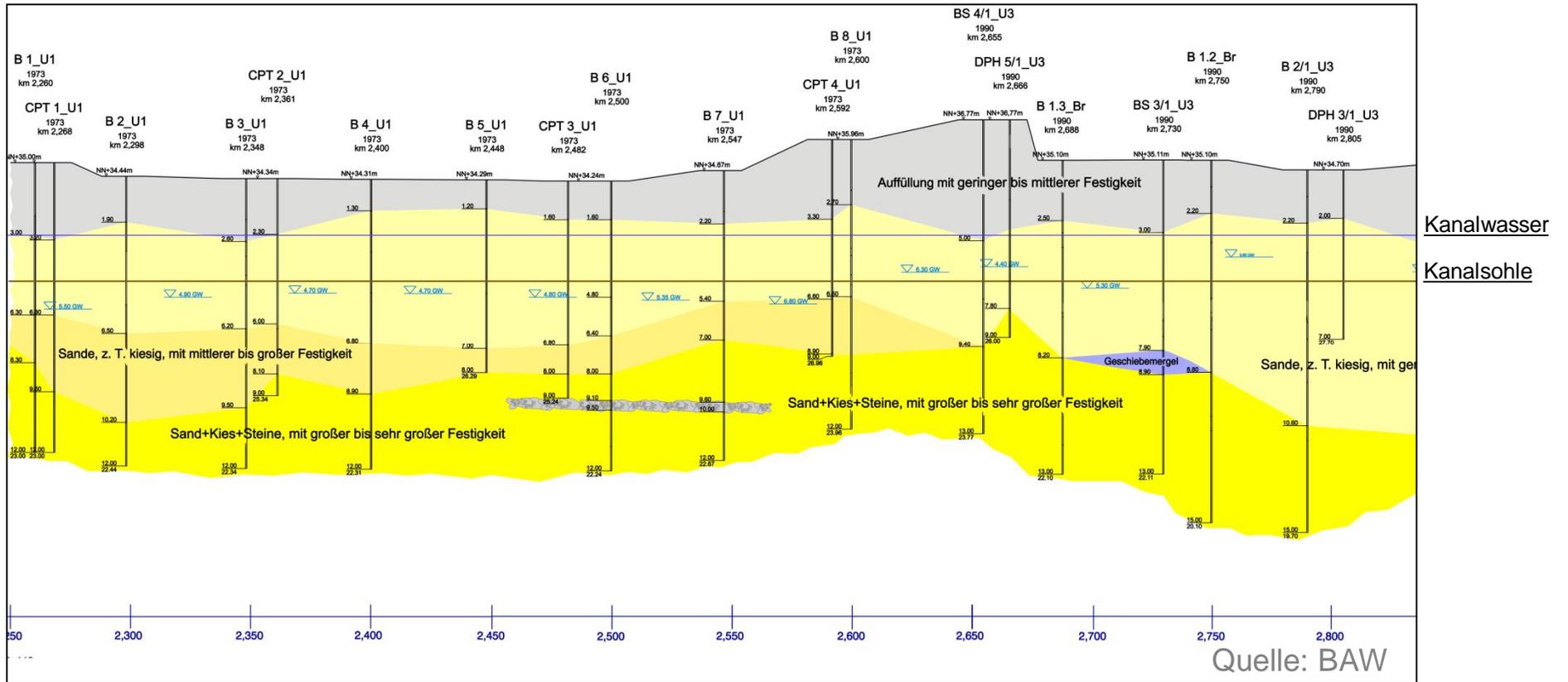
→ Aufgaben:

1. Genaue Untersuchung des statischen Systems und der Bodeneigenschaften mit der Finite-Elemente-Methode (FEM).
2. Vorgabe eines einfachen Berechnungsmodells für die weitere Sanierungsplanung.

Vorgehensweise

1. Auswertung der vorhandenen Unterlagen und Gutachten.
2. Erstellung eines Berechnungsmodells mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM).
3. Parameterstudie zur Bestimmung der maßgeblichen Einflussfaktoren (z.B. Bodenkenngrößen, Lasten) und Plausibilitätsprüfung.
4. Rückrechnung der Bodenkenngrößen anhand vorhandener Situationen (hohe Uferböschungen, Probelastungen) → Sicherheit $\geq 1,0$.
5. Vergleichsberechnungen mit konventionellen Methoden (Geländebruchberechnungen nach DIN 4084)
→ Einfaches Berechnungsmodell für die weitere Sanierungsplanung.
6. Empfehlungen für die Sanierung.

Baugrundverhältnisse



Ausschnitt geologisches Längsprofil (Bereich Corneliusstr.)

Die Baugrundverhältnisse sind im Bereich der Ufersicherung relativ homogen.

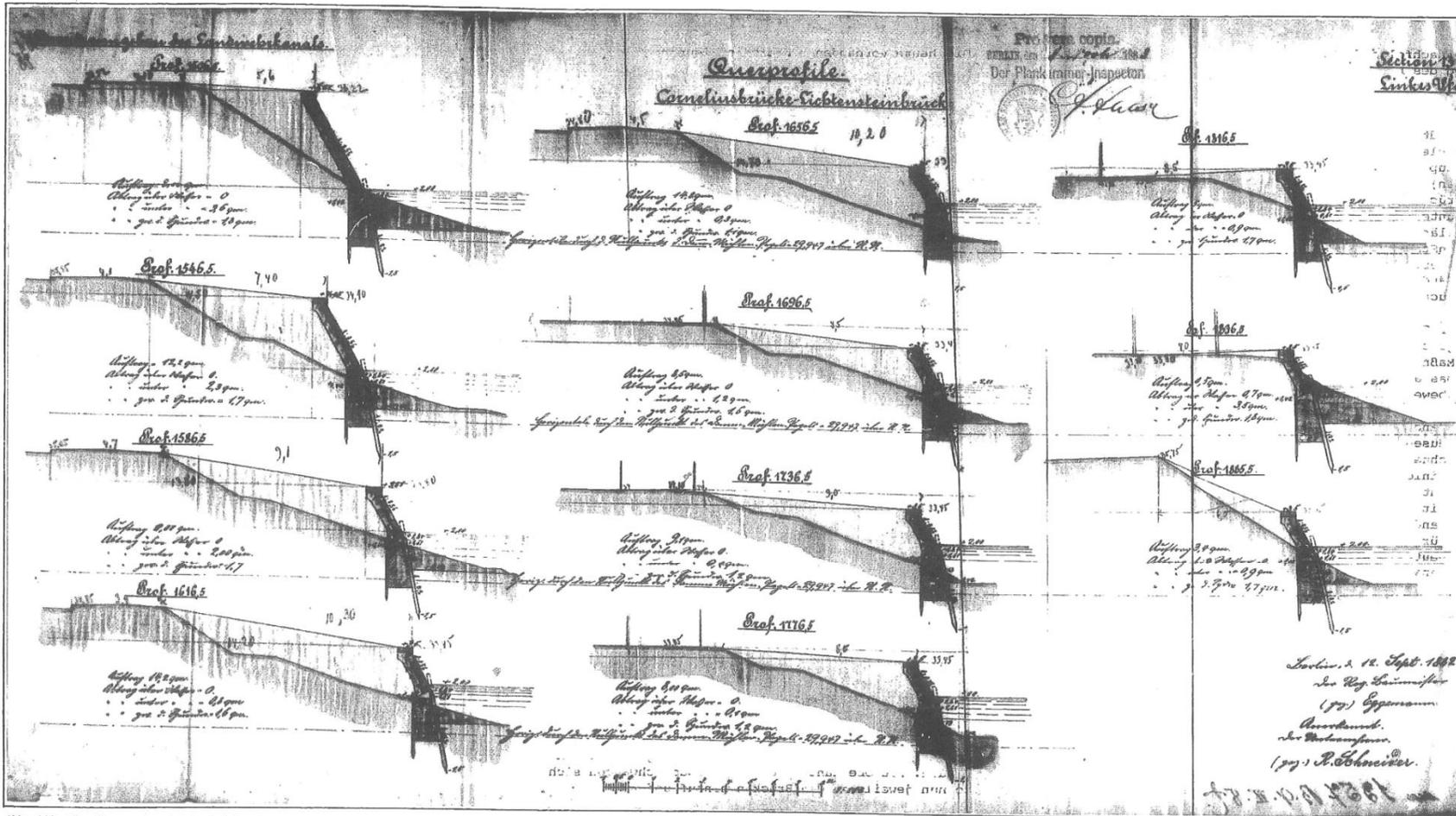


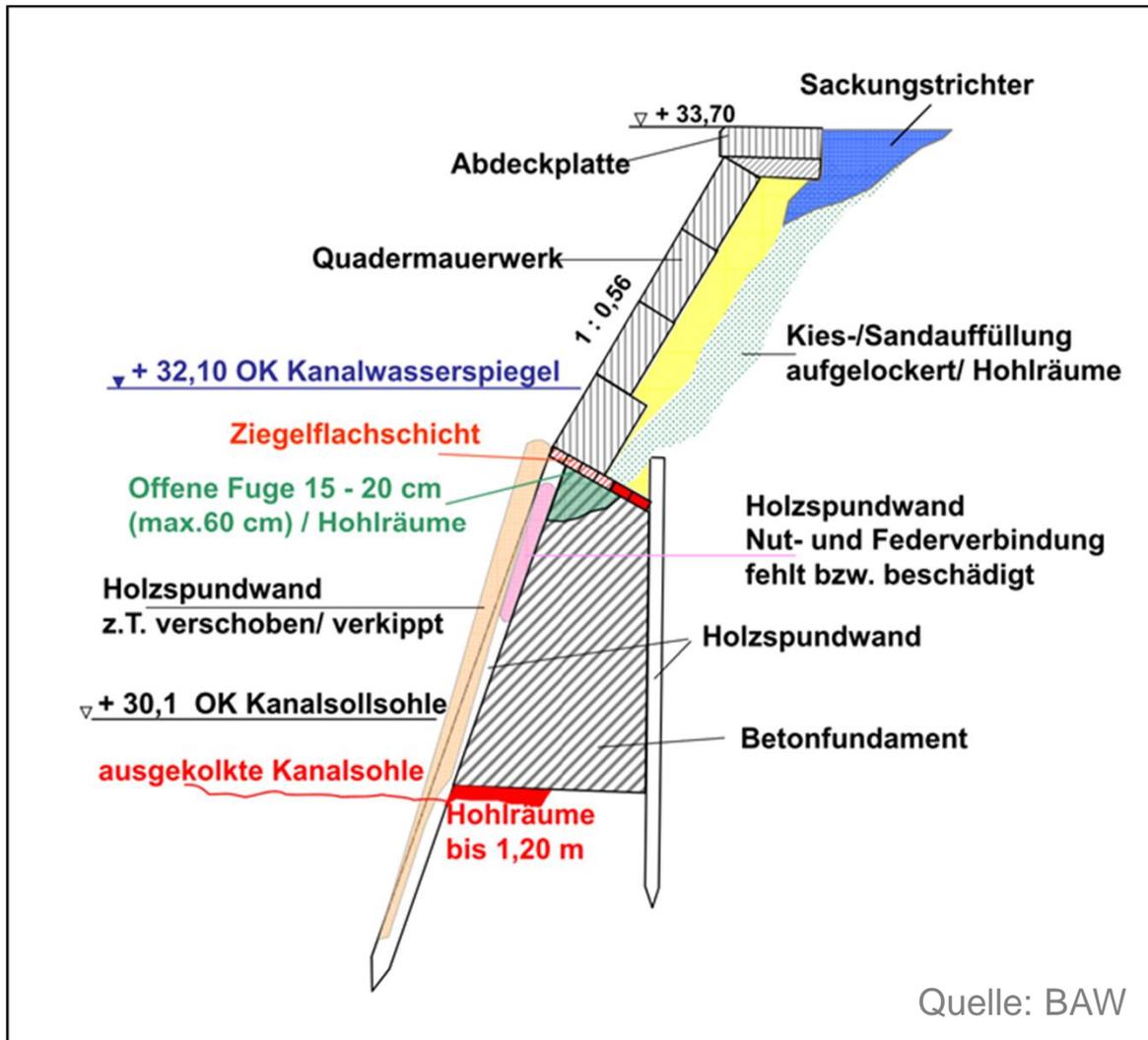
Abb. 166: "Erweiterungsbau des Landwehrkanals", Profile 1862

Bestandsquerschnitte (1883)

Quelle: Denkmalgutachten 1990

→ Auffüllung ist maßgebend für die obere Ufersicherung.

Baugrundverhältnisse

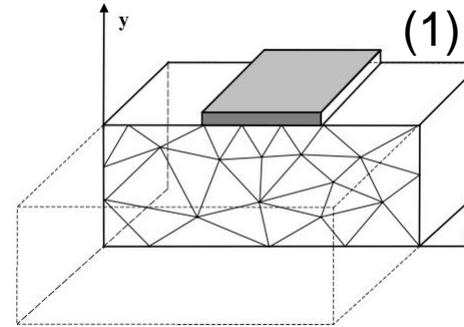


Verformungen im unteren Bereich bewirken Verformungen und Schäden im oberen Bereich.

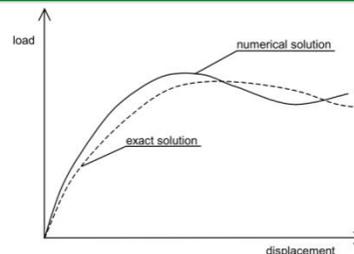
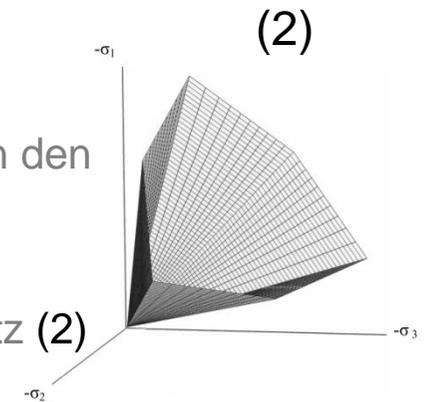
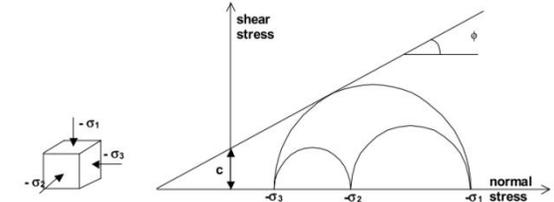
Überlagertes allgemeines Schadensbild aus 2007

3. Berechnungsmodell

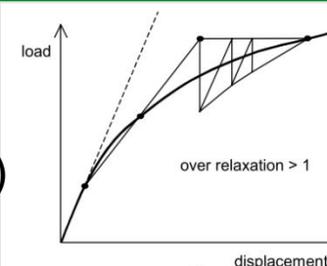
Finite – Elemente – Methode (FEM)

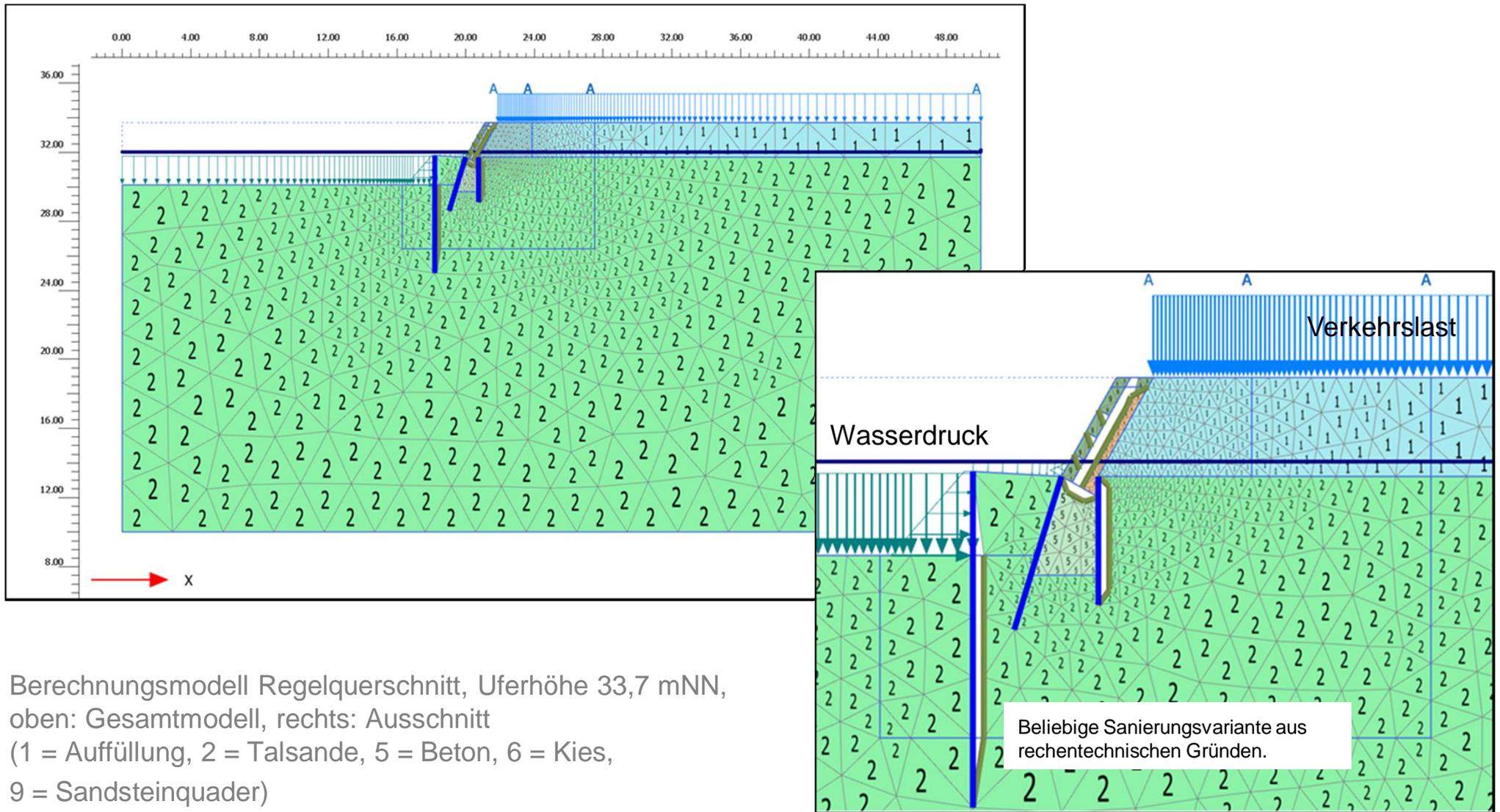


- Numerisches Verfahren zur Lösung eines Gleichungssystems.
- Der Berechnungsausschnitt wird in viele kleine Elemente unterteilt (1).
- Für den Ausschnitt werden Randbedingungen definiert, z.B. Festhaltungen an den Rändern des Berechnungsausschnittes.
- Den Elementen werden bestimmte Eigenschaften zugewiesen z.B. Stoffgesetz (2) zur Simulation von Bodeneigenschaften.
- Mit dem System können unterschiedliche Lastsituationen berechnet werden, z.B. Einwirken einer Verkehrslast.
- Spannungen und Verformungen werden in Iterationsschritten (3) ermittelt.



(3)





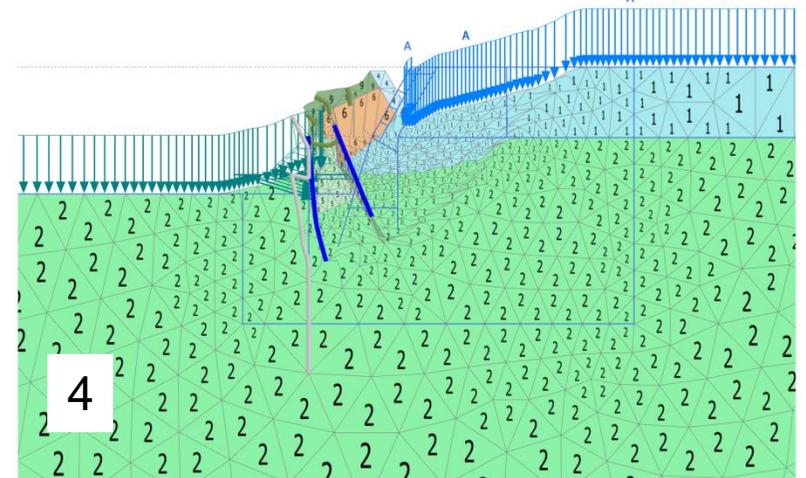
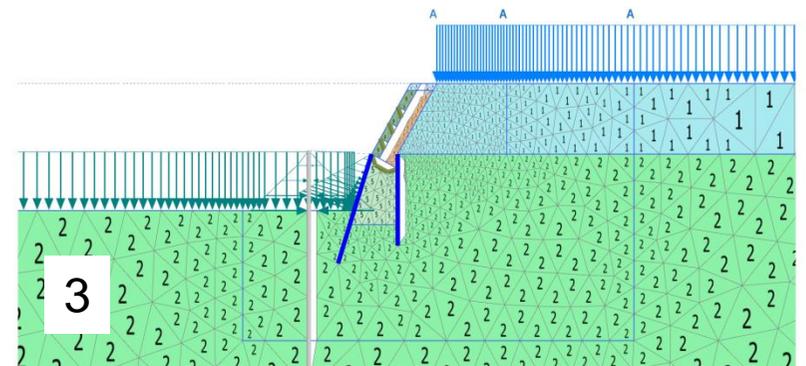
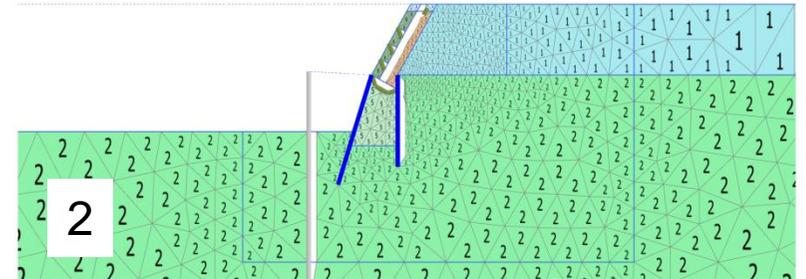
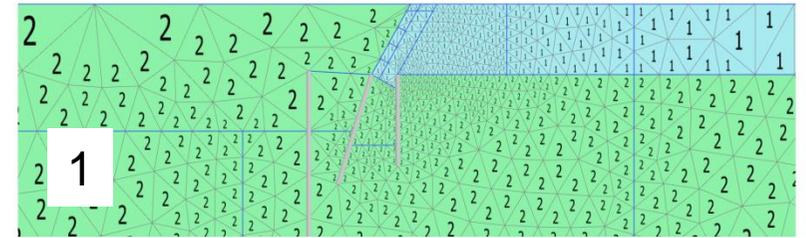
Berechnungsmodell Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN,
 oben: Gesamtmodell, rechts: Ausschnitt
 (1 = Auffüllung, 2 = Talsande, 5 = Beton, 6 = Kies,
 9 = Sandsteinquader)

Finite – Elemente – Methode

Berücksichtigung der in den Baugrund eingepprägten Spannungen (z.B. Vorbelastung)

Berechnungsschritte:

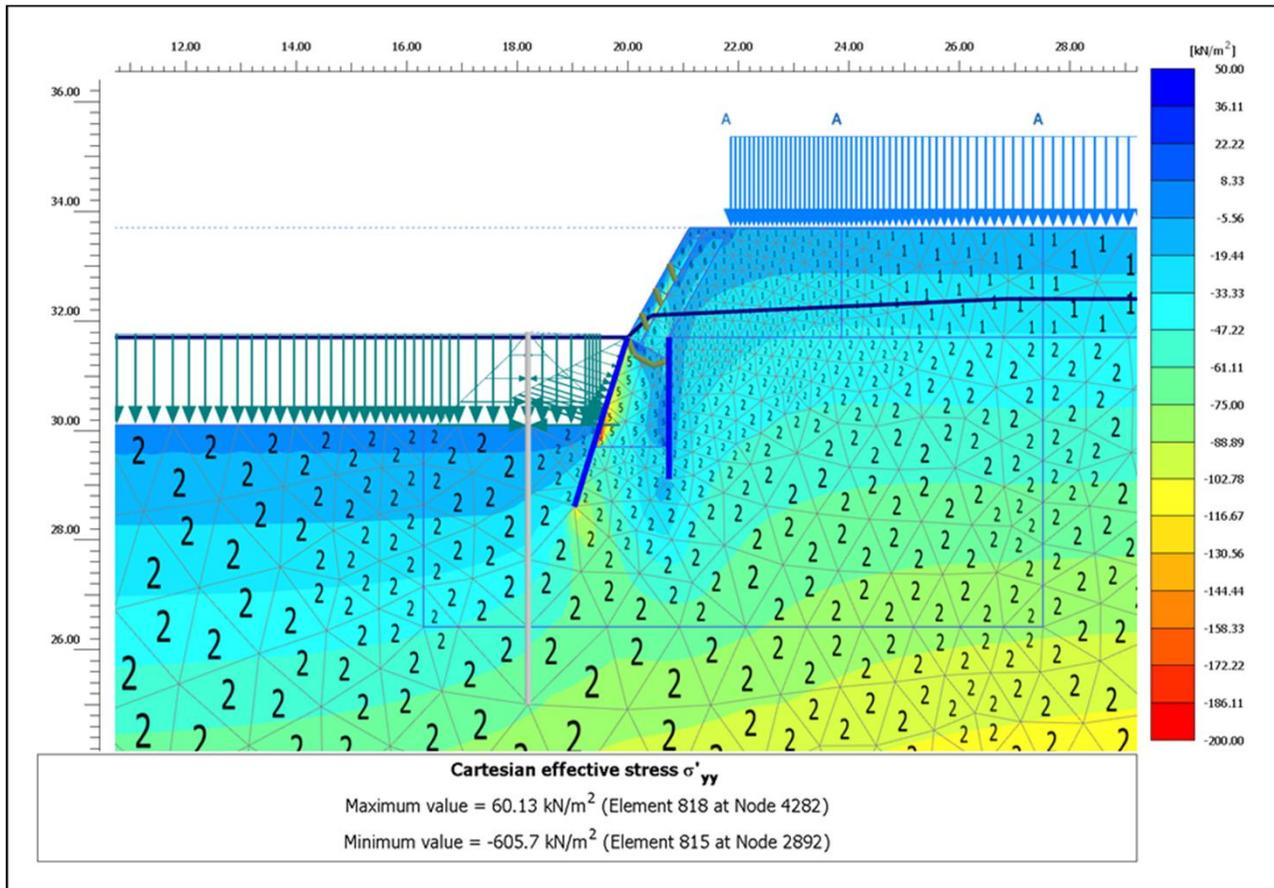
1. Initialspannungszustand (Urzustand)
2. Kanalherstellung
3. Belastungen
4. Simulation des Bruchzustandes ($\varphi - c$ - Reduktion)



Berechnungsquerschnitte 1 bis 6

Querschnitt	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, Rückrechnung Bodenkenngrößen
QS 3	Probelastung 1989, Uferhöhe 33,7 mNN	Nachrechnung der durchgeführten Probelastung, Rückrechnung Bodenkenngrößen
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 Uferhöhe mit anschließender Geländeneigung, Uferhöhe 35,0 mNN, Geländeneigung 1:3	Ergänzende Abschätzung der Sicherheiten

Ist-Zustand Regelquerschnitt

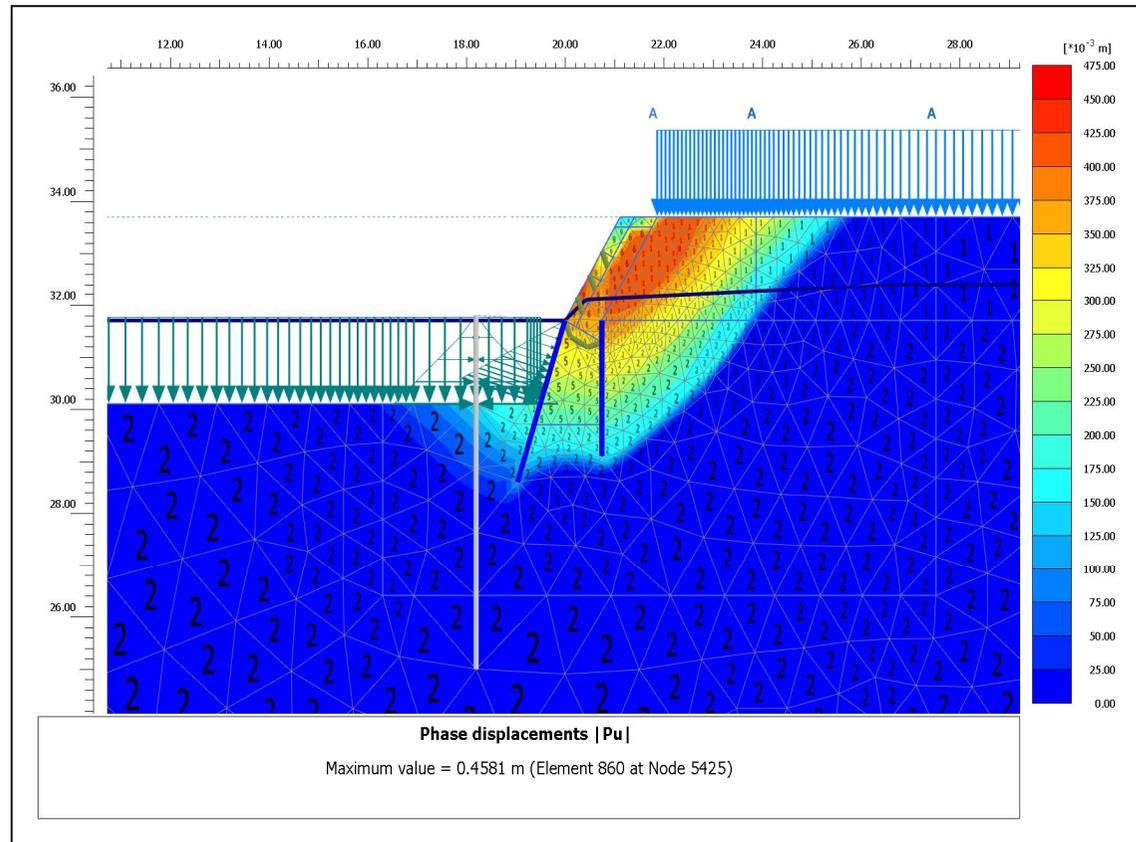


Vertikalspannungen
farblich dargestellt

QS 1, Vertikalspannungen Regelquerschnitt

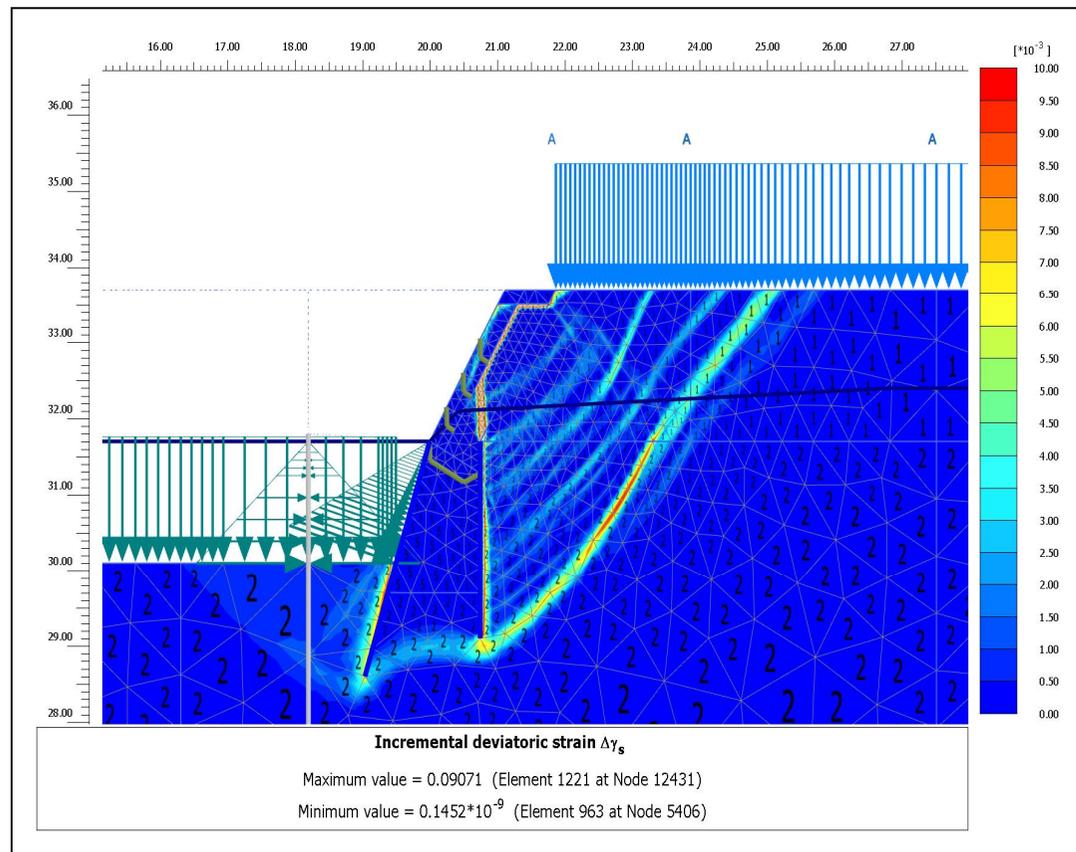
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, Grundwasser (GW) 32,4 mNN

Simulation Bruchzustand, Darstellung 1: Verformungen



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

Simulation Bruchzustand, Darstellung 2: Bruchfugen



QS1 Inkrementelle Scherdehnungen nach φ -c-Reduktion
Lasten: Verkehrslast A = 5 kN/m², Sunk 0,4 m, GW = 32,4 mNN

Methode zur Ermittlung von Bodenkenngrößen durch Rückrechnung

Definition Globale Standsicherheit:

$\eta < 1,0 \rightarrow$ Versagen / Bruch

$\eta = 1,0 \rightarrow$ Grenzzustand (Einwirkungen = Widerstände)

$\eta > 1,0 \rightarrow$ Sicherheitsreserven (werden nach Norm gefordert)

1. Bodenkenngrößen werden anhand von Versuchen und Erfahrungen (\rightarrow Bodengutachten) bestimmt und dabei möglicherweise unterschätzt (sichere Seite).
2. Zusätzliche Möglichkeit bei bestehenden Bauwerken: Auswahl einer maximalen vorhandenen Lastsituation (entspricht großmaßstäblichen Versuchen).
3. Nachrechnung dieser Situation mit den Bodenkenngrößen nach Bodengutachten. Ein bestehender Berechnungsquerschnitt muss mindestens die Sicherheit 1,0 haben.

$\eta < 1,0 \rightarrow$ **Widerspruch**,
d. h. die Bodenkenngrößen
wurden unterschätzt.

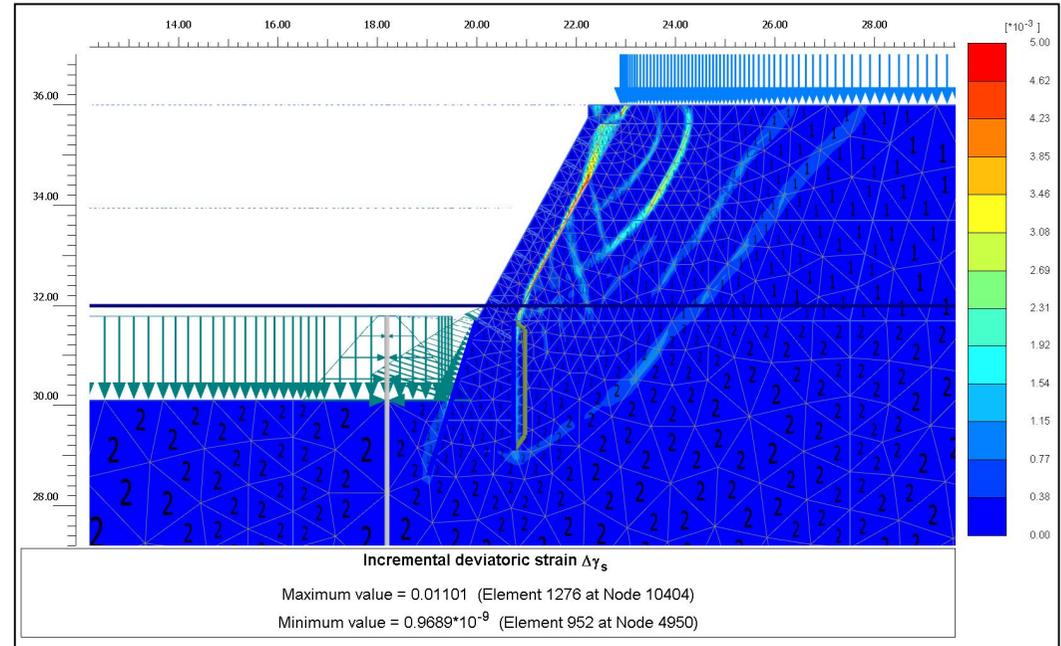
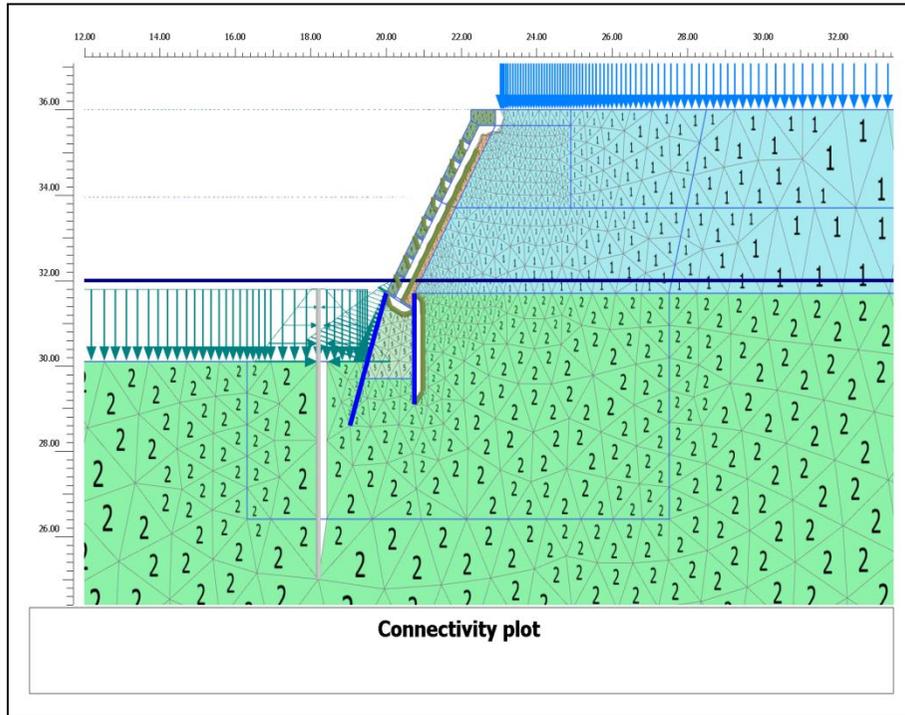
$\eta \geq 1,0 \rightarrow$ **Bodenkenngrößen zutreffend**

\rightarrow Rückrechnung:

Ermittlung der Bodenkenngrößen aus vorhandener Situationen. Zulässig ist eine Erhöhung bis die Sicherheit 1,0 erreicht wird.

4. Ausgewählte Berechnungsergebnisse

QS2 Erhöhtes Ufer, 36,0mNN (maximale Lastsituation bzgl. Böschungsgeometrie)



Inkrementelle Scherdehnungen nach φ -c-Reduktion

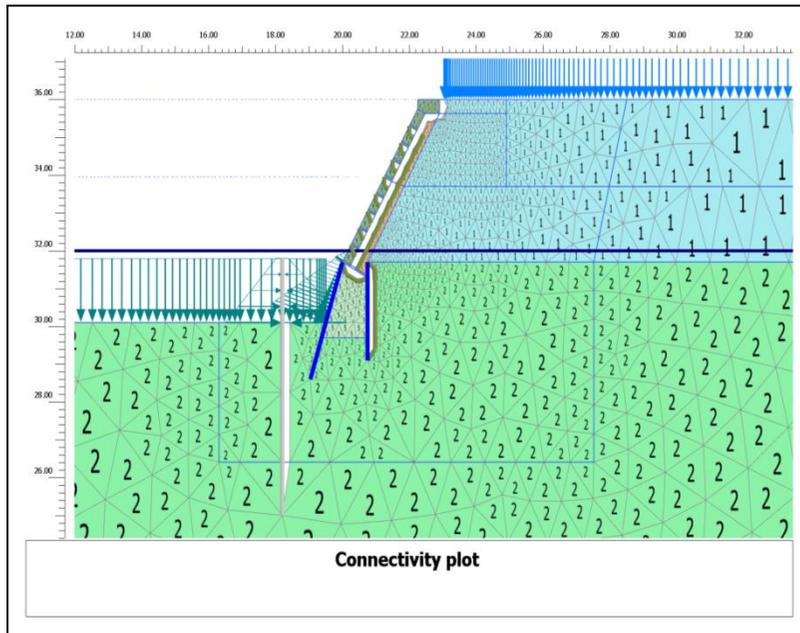
QS2 Erhöhtes Ufer, 36,0mNN (4 m über Kanalwasser)

Globale Sicherheit $\cong 1,0$ bei Ansatz der Bodenkenngrößen gemäß Bodengutachten
→ Hieraus keine Grundlage für Erhöhung der Bodenkenngrößen

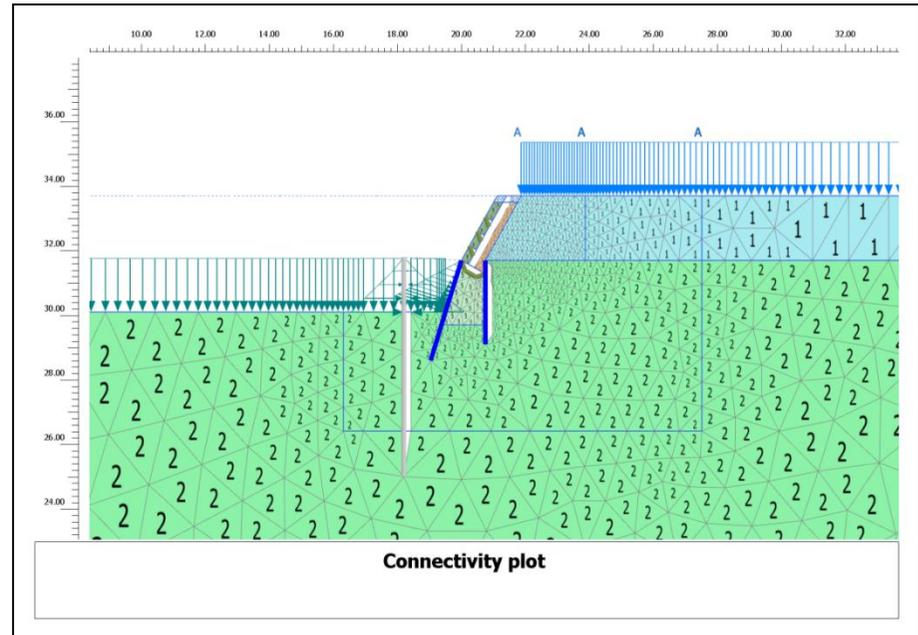
Vergleich QS2 erhöhtes Ufer (36,0 mNN) mit Ausgangsquerschnitt (33,7 mNN)

Erkenntnisse:

1. Wenn die Böschungen im Grenzzustand wären, würde man deutliche Verformungen sehen.
2. Wenn die hohen Böschungen halten, dann haben die niedrigen ein relativ hohes Sicherheitsniveau, bei vergleichbaren Bodeneigenschaften.



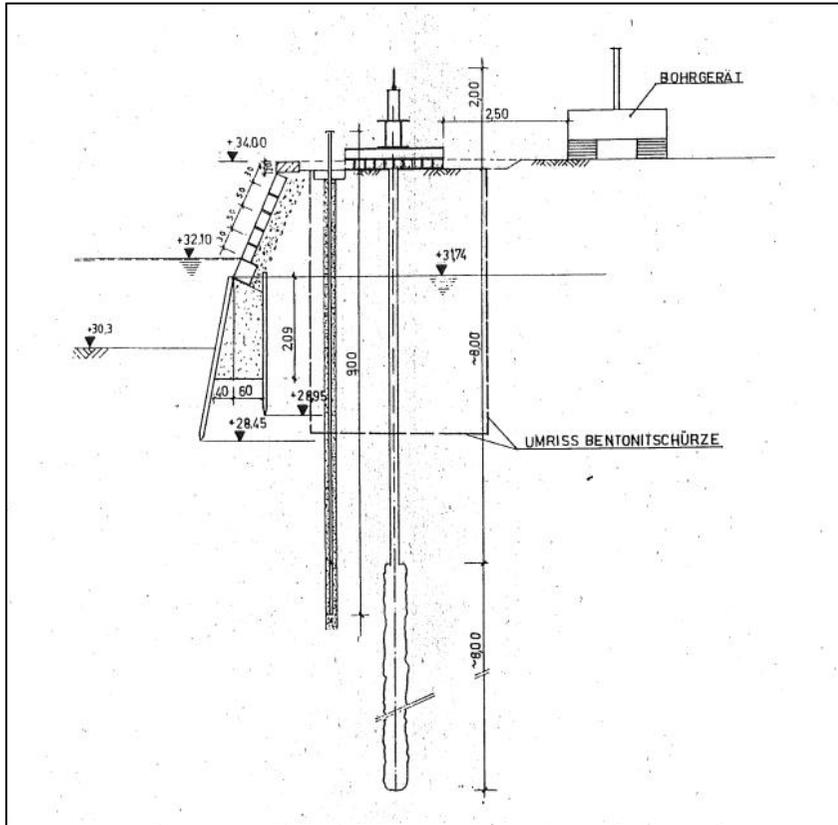
QS2 Erhöhtes Ufer, 36,0 mNN,
Sicherheit $\eta = 1,0$



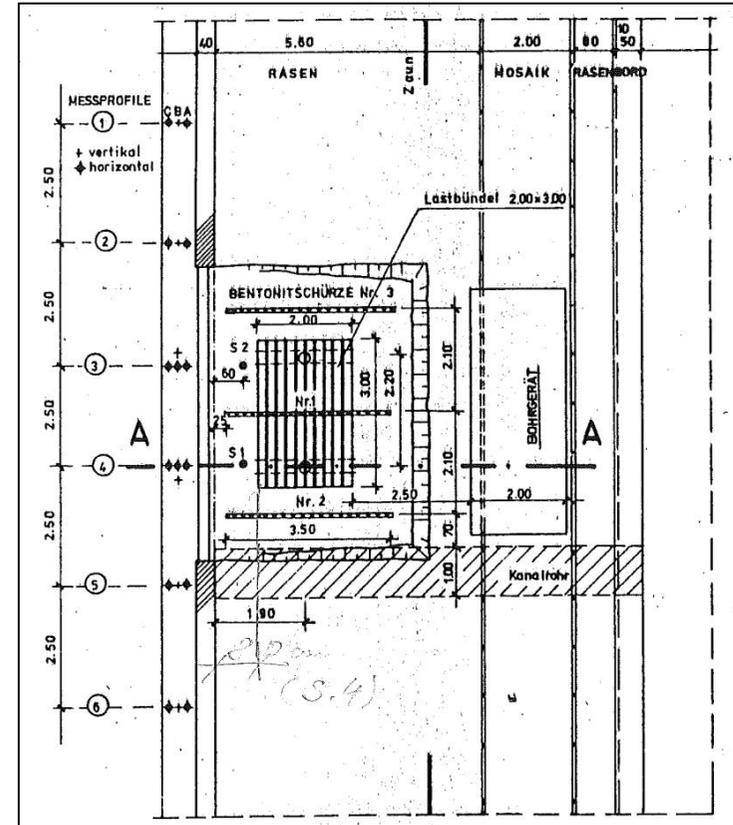
QS1 Regelquerschnitt, Uferhöhe 33,7 mNN,
Sicherheit: $\eta = 1,4$

QS3 Probelastung (1989)

Versuchsaufbau

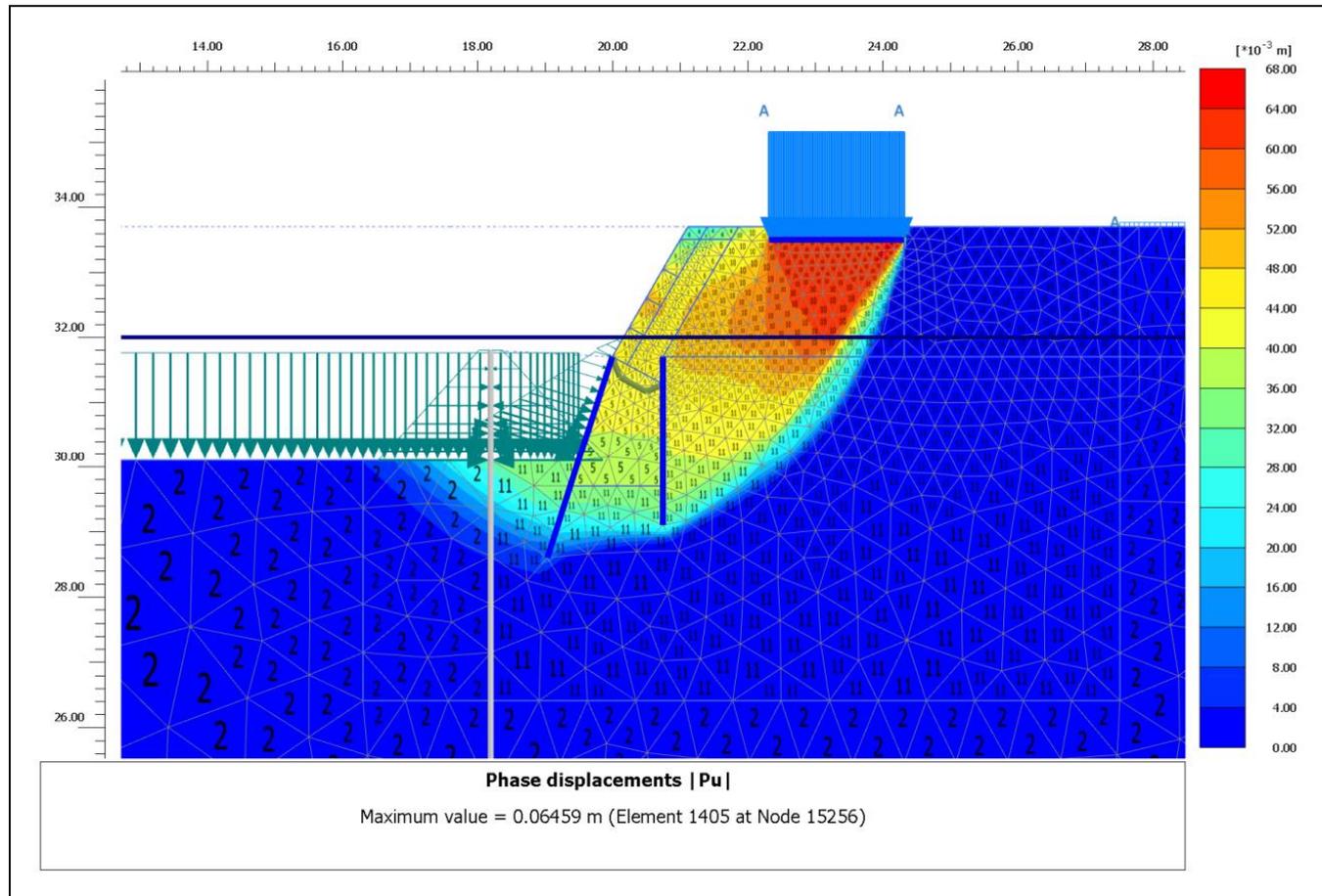


Querschnitt



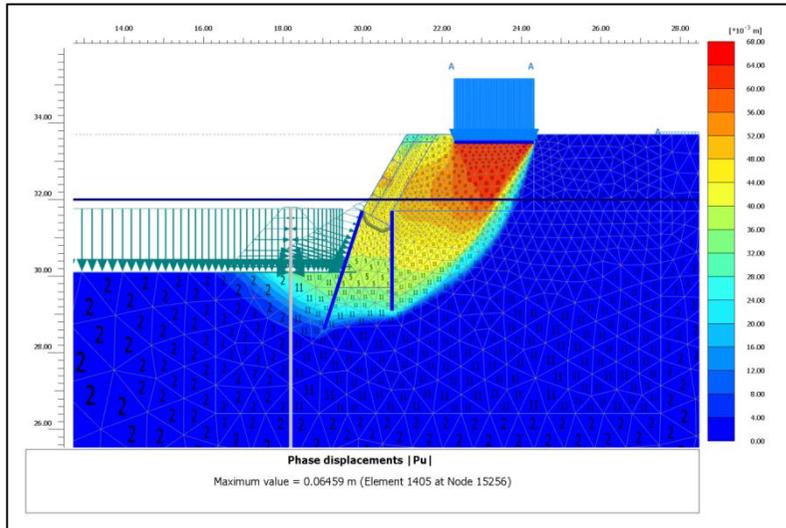
Draufsicht

QS3 Probelastung (1989)



QS 3 Rückrechnung Probelastung (1300 kN), Verformungen nach φ -c-Reduktion

Ergebnis der Rückrechnung der Probelbelastung



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 $\eta > 1,0$

→ Erhöhung der Scherfestigkeit für Auffüllung:

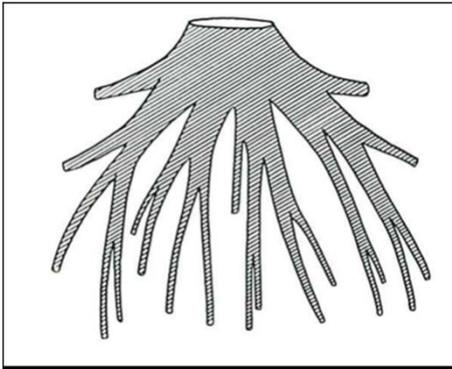
Reibungswinkel: $\varphi' = 30,0^\circ \rightarrow 32,5^\circ$
Kapillarkohäsion: $c'_{c,k} = 2 \text{ kN/m}^2 \rightarrow 4 \text{ kN/m}^2$

Bandbreite nach EAU für
lockere feinkörnige Mittelsande:

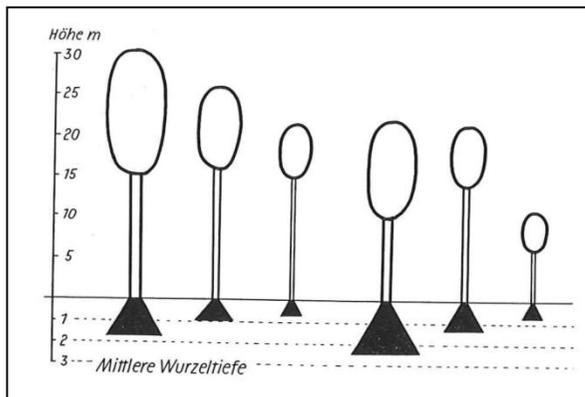
$30,0^\circ - 32,5^\circ$,
 $2 - 6 \text{ kN/m}^2$

Werte liegen noch innerhalb der Bandbreite der Erfahrungswerte nach EAU für vergleichbare Böden.

QS4 Baumlast Uferhöhe 33,7 mNN



Herzwurzelsystem

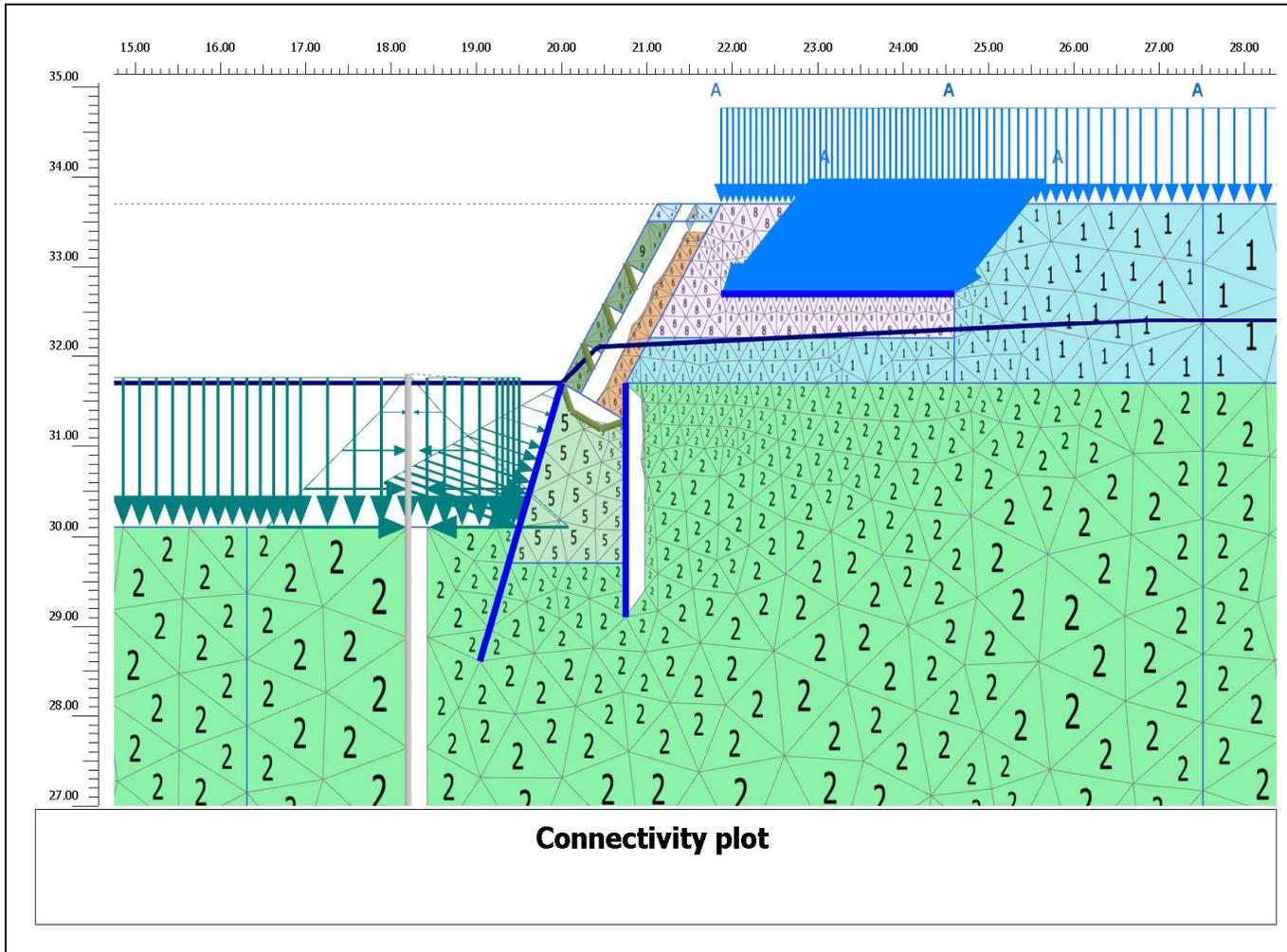


Wurzeltiefen
(Köstler et al. 1968)

Grundlagen: Gutachten von Prof. Weihs und GuD sowie Literaturrecherche.

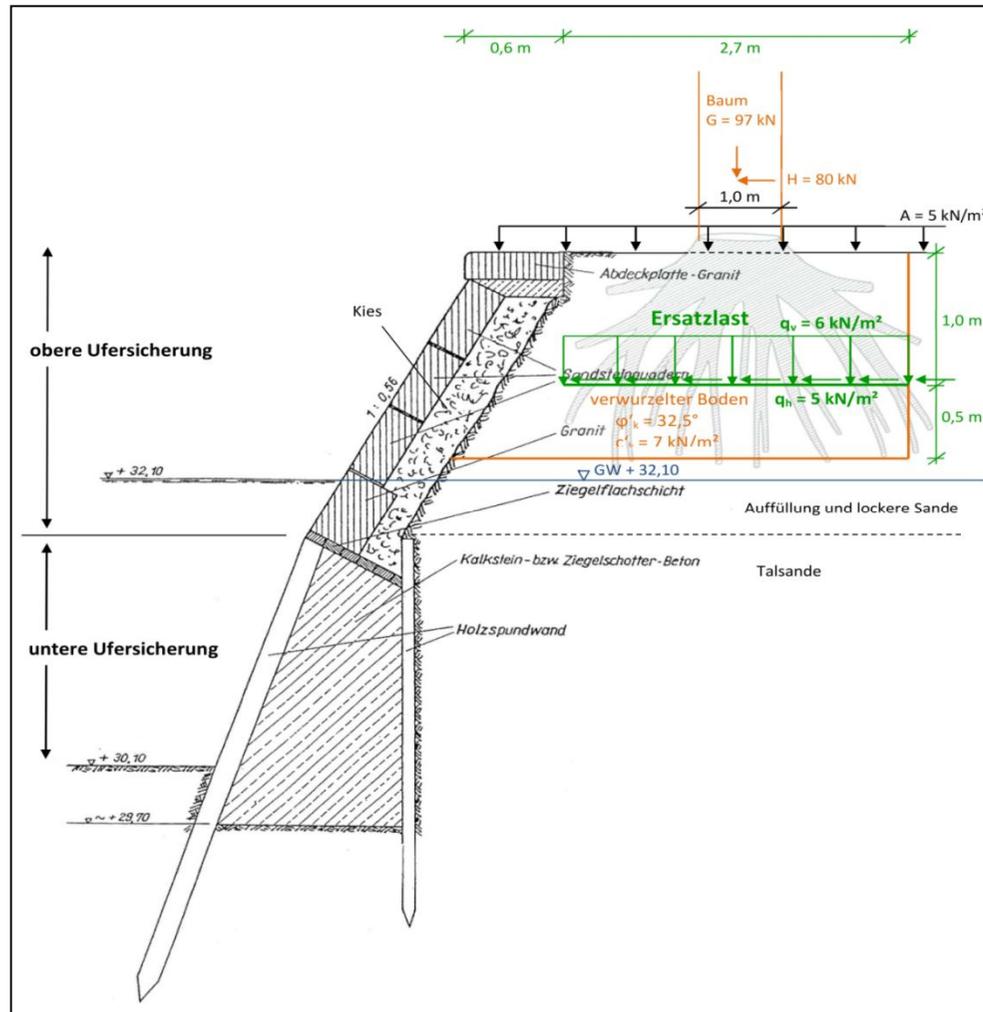
Feststellungen:

- Baum muss sich selbst tragen können, sonst wären vermehrt Schäden im Baumbereich vorhanden.
- Die Baumlast (Gewicht + Wind) wird durch die Wurzeln im Boden verteilt.
- Die Wurzeln wirken wie Anker bzw. Dübel im Boden und können durch eine verbesserte Bodenschicht simuliert werden.
- Der Baum kann nur als Ganzes versagen.
- Ein großer Baum wurde angesetzt → maximale Belastung.



FEM Modell mit Baumlast
(8 = verwurzelter Boden)

QS4 Baumlast, Uferhöhe 33,7 mNN

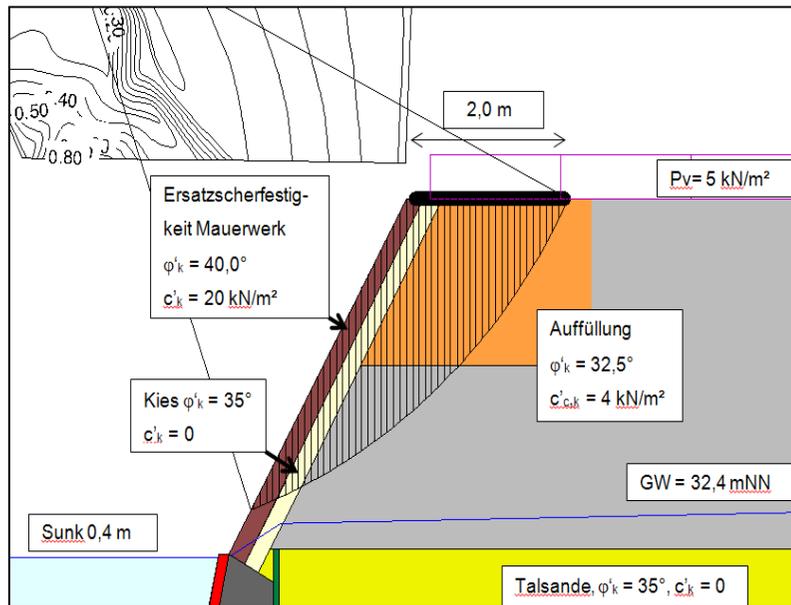


Statisches Modell für die Bäume

QS4 Baumlast, Uferhöhe 33,7 mNN

5. Schlussfolgerungen für die weitere bautechnische Planung

- Das statische System der oberen Ufersicherung entspricht dem Geländebruchmodell (DIN 4084).
- Das Quadermauerwerk wirkt nicht als Schwergewichtswand wie in früheren Nachrechnungen angenommen, sondern lediglich als Oberflächensicherung und Verwitterungsschutz.
- → Die Standsicherheit wird durch die Scherfestigkeit des Bodens erreicht.



Konventionelles Berechnungsmodell für die weitere Planung

- Mindestbreite für Gleitkreise 2 m
→ Oberflächenrutschungen nicht maßgebend, diese werden durch das Mauerwerk verhindert.
- Ersatzscherfestigkeit für Mauerwerk.
- Erhöhung der Bodenkenngrößen der Auffüllung im Uferbereich auf Grund der Probelastung.
- Statisches Modell für Bäume.

5. Schlussfolgerungen für die Sanierungsmaßnahmen

- Die untere Ufersicherung ist für die gesamte Standsicherheit entscheidend. Bisherige Schäden lassen sich auf die untere Ufersicherung zurückführen. Hier besteht Sanierungsbedarf (z.B. Vorschüttung oder vorgestellte Spundwand).
- Wenn die untere Ufersicherung intakt bzw. saniert ist, kann bis zu einer Uferhöhe von 35,0 mNN (3 m über Kanalwasser) eine normgerechte Standsicherheit für die obere Ufersicherung nachgewiesen werden.
- Bei Uferböschungen $> 35,0$ mNN ergibt sich ein reduziertes Sicherheitsniveau. Auch hier ist entscheidend, dass zunächst die untere Ufersicherung saniert wird. Unter Berücksichtigung der langen Standzeit und eines Bestandsschutzes ist dieses Sicherheitsniveau ausreichend, wenn:
 - die obere Ufersicherung beobachtet und gewartet wird und
 - lokale Schwachstellen, Mängel oder Schäden saniert werden, um die Oberflächensicherung zu erhalten (z.B. Erneuerung von schadhafte Fugen, Beseitigung unzureichender Oberflächenentwässerung).
- Bäume haben keinen negativen Einfluss auf die Standsicherheit der Ufersicherung.
- Zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen (z.B. Bodennägel) an der oberen Ufersicherung sind nicht notwendig.
- Wesentliche Abweichungen von den betrachteten Querschnitten müssen ggf. noch untersucht werden, z. B. angrenzende Gebäudelasten.



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!
Fragen

www.kuk.de

Kontakt:

Dipl.-Ing. Christian Schmidt

Tel.: 06151/885-345

sc@da.kuk.de

KUK
KREBS UND KIEFER