

130 Jahre 1. Hochbrücke Levensau

Erfassung, Analyse und Nachrechnung des Widerlagergewölbes für Kämpferverschiebungen



Propstei Johannesberg, Fulda
„Bögen, Gewölbe und Strebepfeiler“

27.06.2024

Für lebendige Wasserstraßen

Firmenvorstellung



Veritaskai 8
21079 Hamburg

www.wk-consult.com

Warnowufer 42
18057 Rostock

WK Consultants

- über 150 engagierte Mitarbeiter/Mitarbeiterinnen
- zahlreiche Experten: SFI's, Taucher ...
- Dr. Drude: Prüfsachverständiger KIB EBA



Hochbau



Industriebau



Ingenieurbau/
Infrastruktur



Wasserbau



Baumanagement /
Bauwerksprüfung



Statische Prüfung

für die Hochbrücke Levensau:

Ingenieurgemeinschaft mit



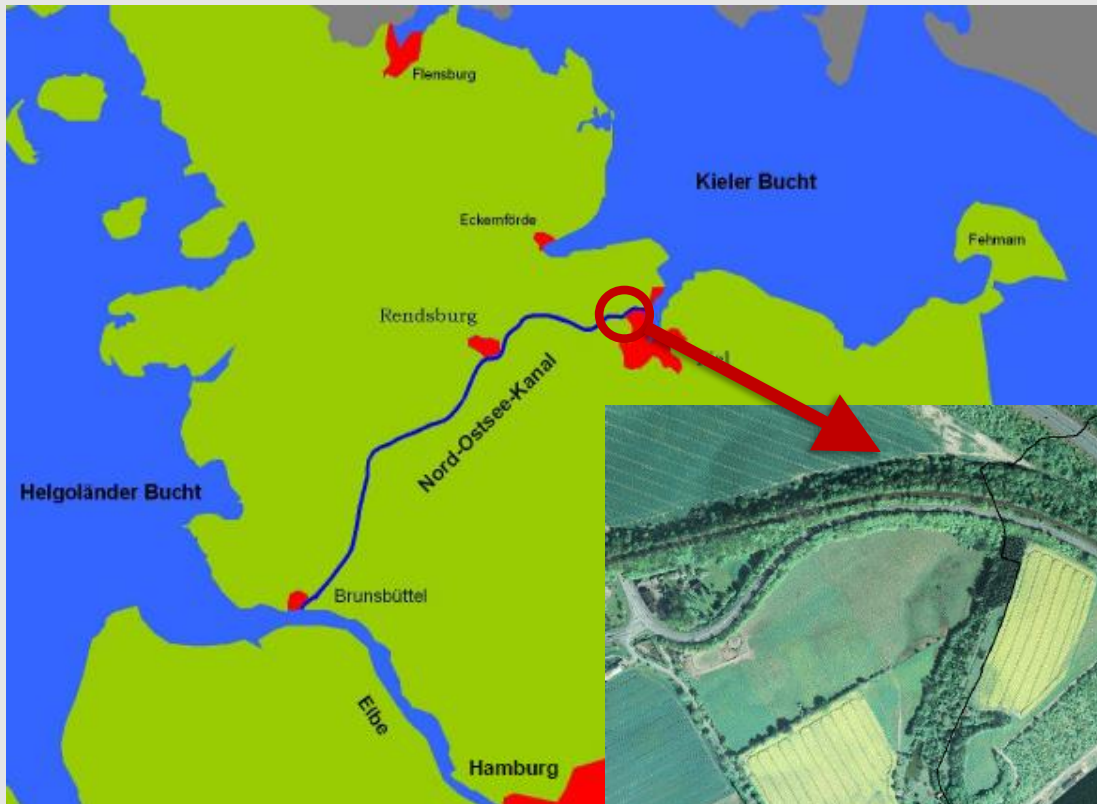
Gliederung

- **allgemeine Projektvorstellung**
- **Ufer Süd**
- **Bestandswiderlager**
- **Modellbildung und Tragsicherheitsnachweise**
- **Stand der Bauausführung**

Gliederung

- **allgemeine Projektvorstellung**
- Ufer Süd
- Bestandswiderlager
- Modellbildung und Tragsicherheitsnachweise
- Stand der Bauausführung

Nord-Ostsee-Kanal



- Eröffnung im Juni 1895 nach ca. 8 Jahren Bauzeit
- Wegersparnis gegenüber Umweg über Skagerrag ca. 800 km
- meistfrequentierte Wasserstraße der Welt



Levensauer Hochbrücke(n)



Quelle: WNA NOK/ Bernot

HB-Lev I + II im Luftbild

Brücke I:

Baujahr 1892- 1894

Kreisstraße K27 / DB-Strecke Kiel –
Flensburg

Fachwerkbogen Stützweite
163,4 Meter

Brücke II:

Baujahr 1982 -1984

Bundesstraße B76

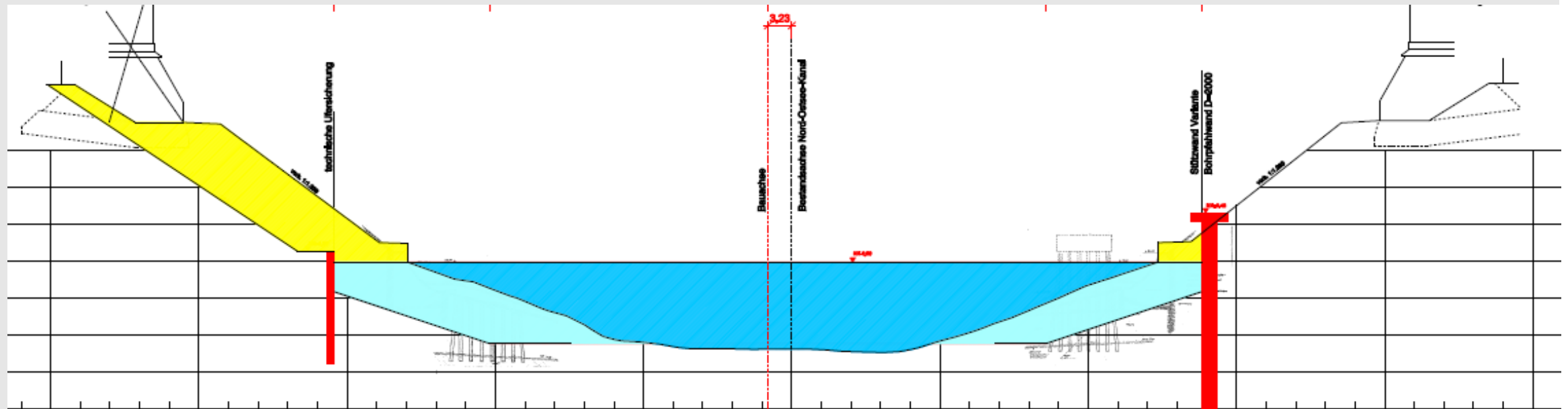
Querschnitt RQ 29

Stahlhohlkasten

Stützweiten 92 – 183 – 92 Meter

Gründe für den Ersatzneubau

- Kanalverbreiterung von 101,2 m auf 117 m



- Vergrößerung des Lichtraumprofils
- Restlebensdauer der Bestandsbrücke endet zeitnah

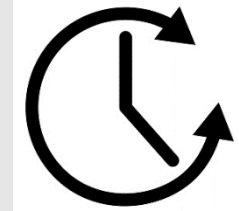
Sperrzeiten NOK und Bahnstrecke



damals



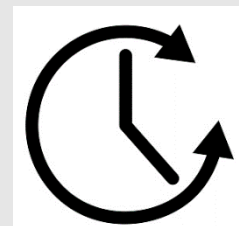
Max.



48 h



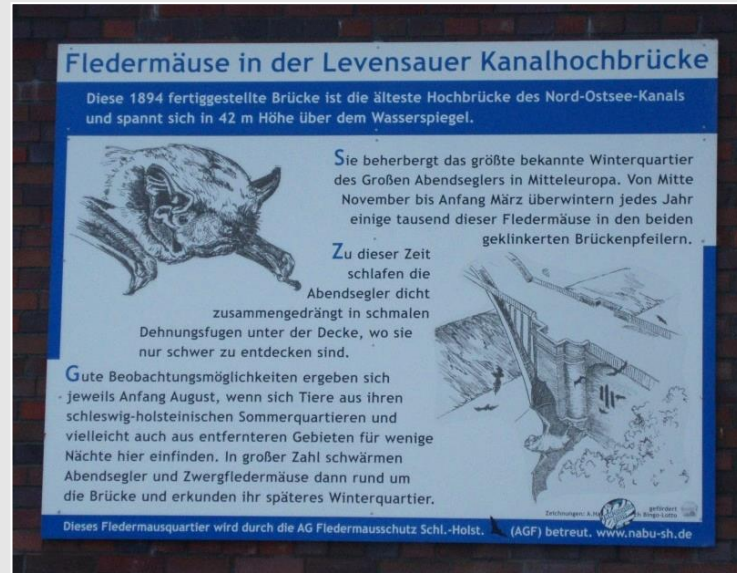
Max.



130 d

heute

Fledermaushabitat

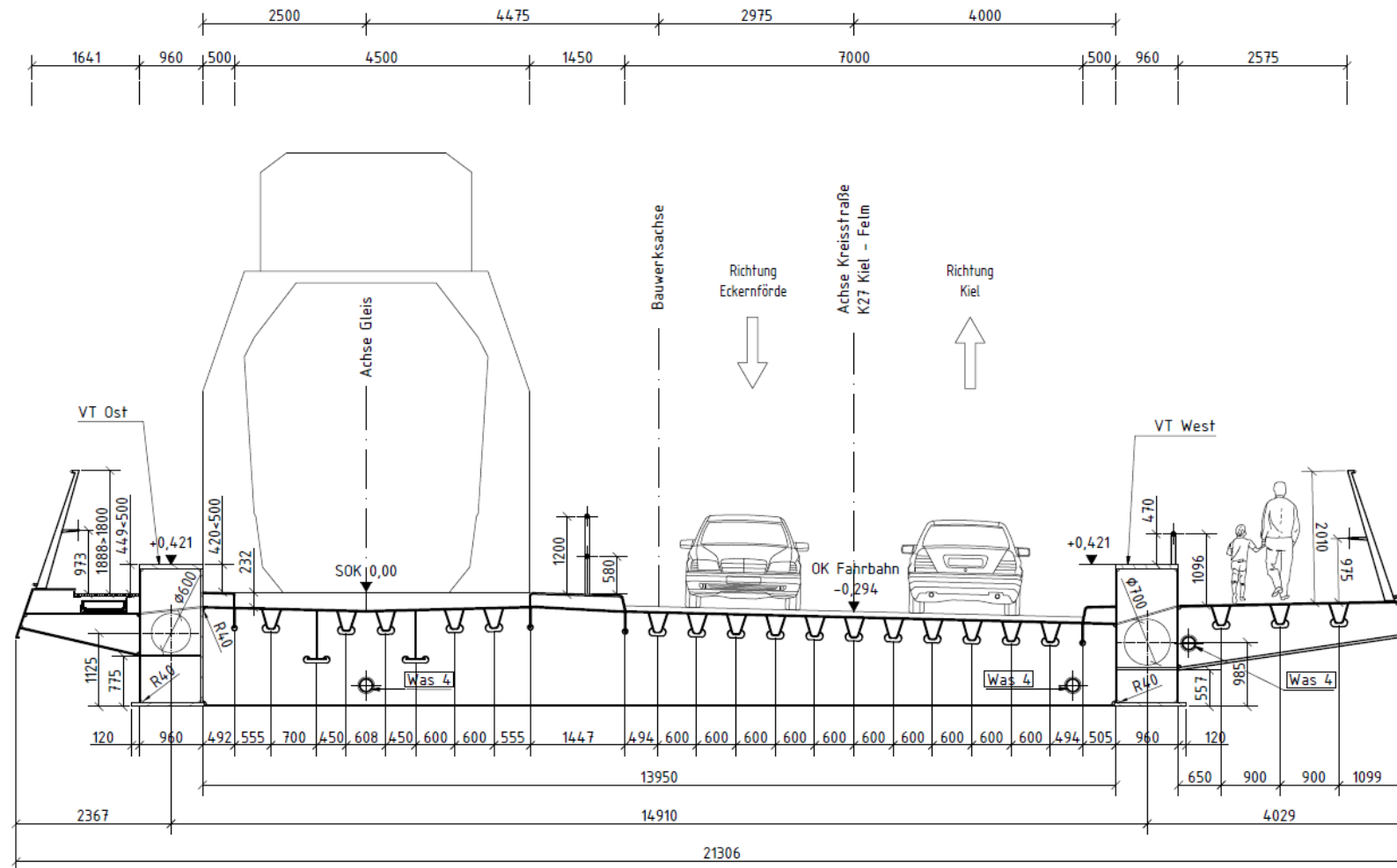


Ständige Begleiter / maßgebende Randbedingung

- Eines der größten Winterlager Europas des unter strengem Schutz stehenden großen Abendseglers und zahlreicher anderer Fledermausarten.
- Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit im Rahmen eines Ausnahmeverfahrens ist die Sicherstellung der Kontinuität der ökologischen Funktion (CEF).
- Der Erhalt und die Aufwertung eines Winterlagers ist als sog. FCS-Maßnahme (favourable conservation status), d.h. eine Maßnahme zur Sicherung des Erhaltungszustandes einzustufen. Sie stellt eine der Ausnahmeveraussetzungen dar.

Brückenplanung Visualisierungen

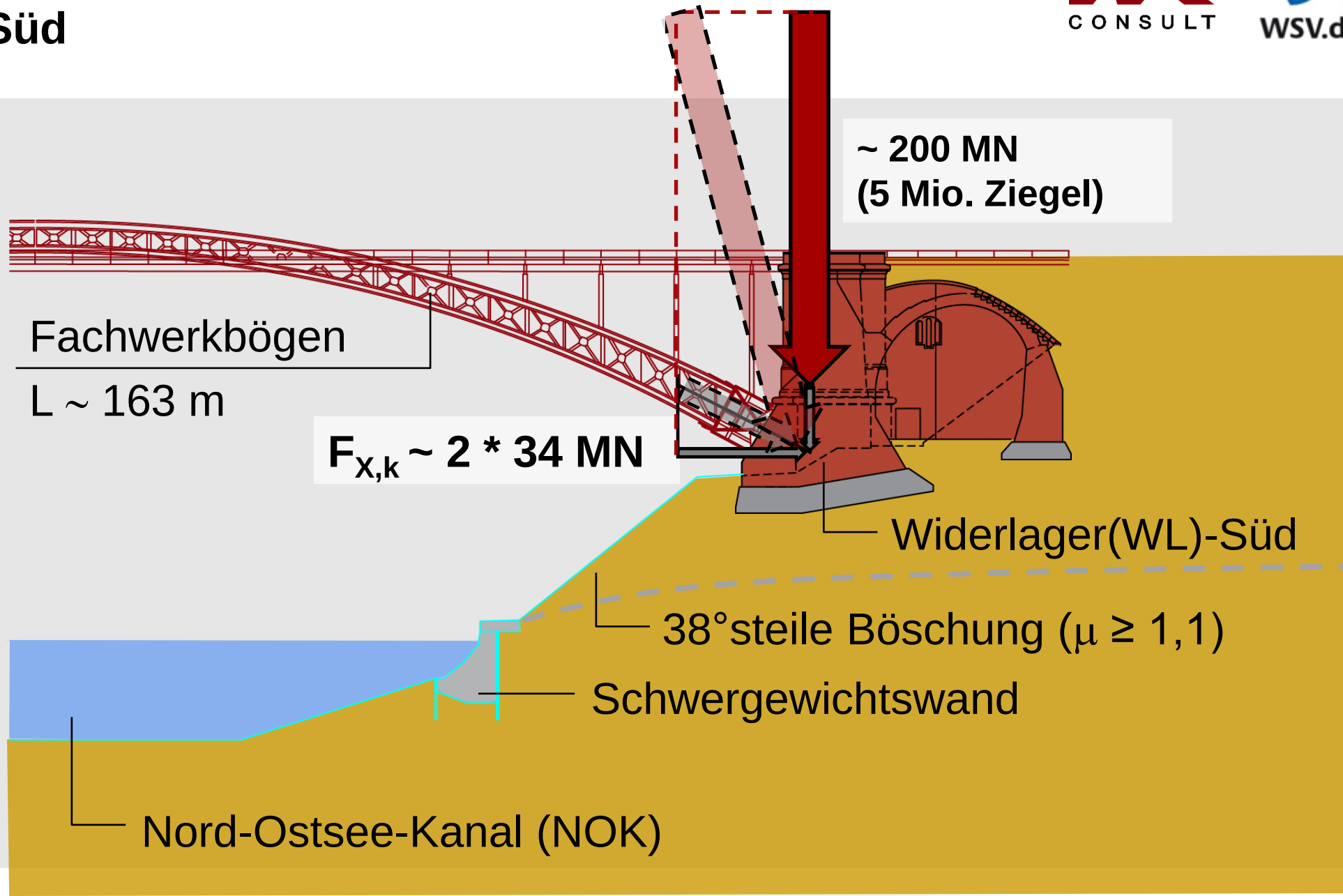




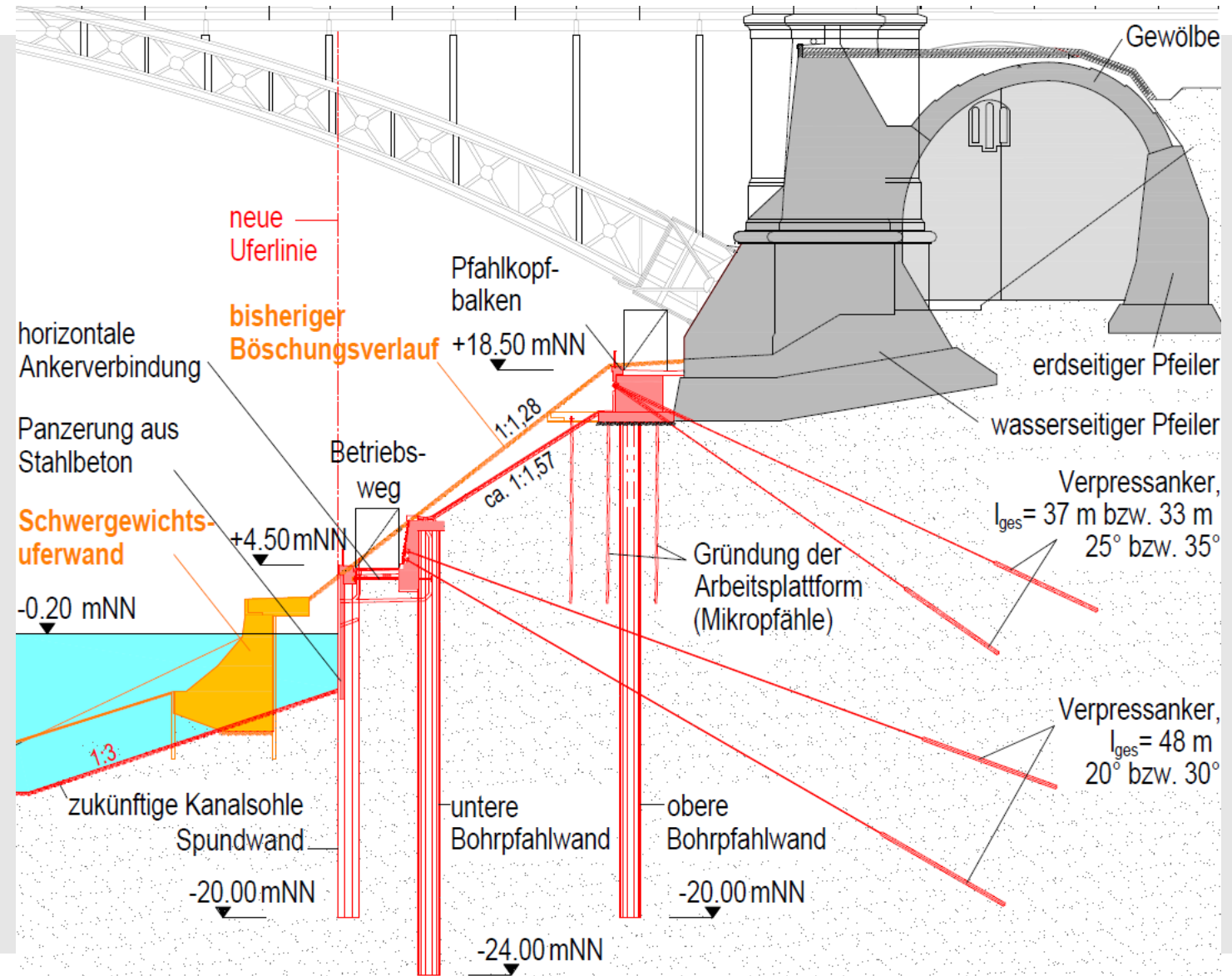
Gliederung

- allgemeine Projektvorstellung
- **Ufer Süd**
- Bestandswiderlager
- Modellbildung und Tragsicherheitsnachweise
- Stand der Bauausführung

Ufer Süd

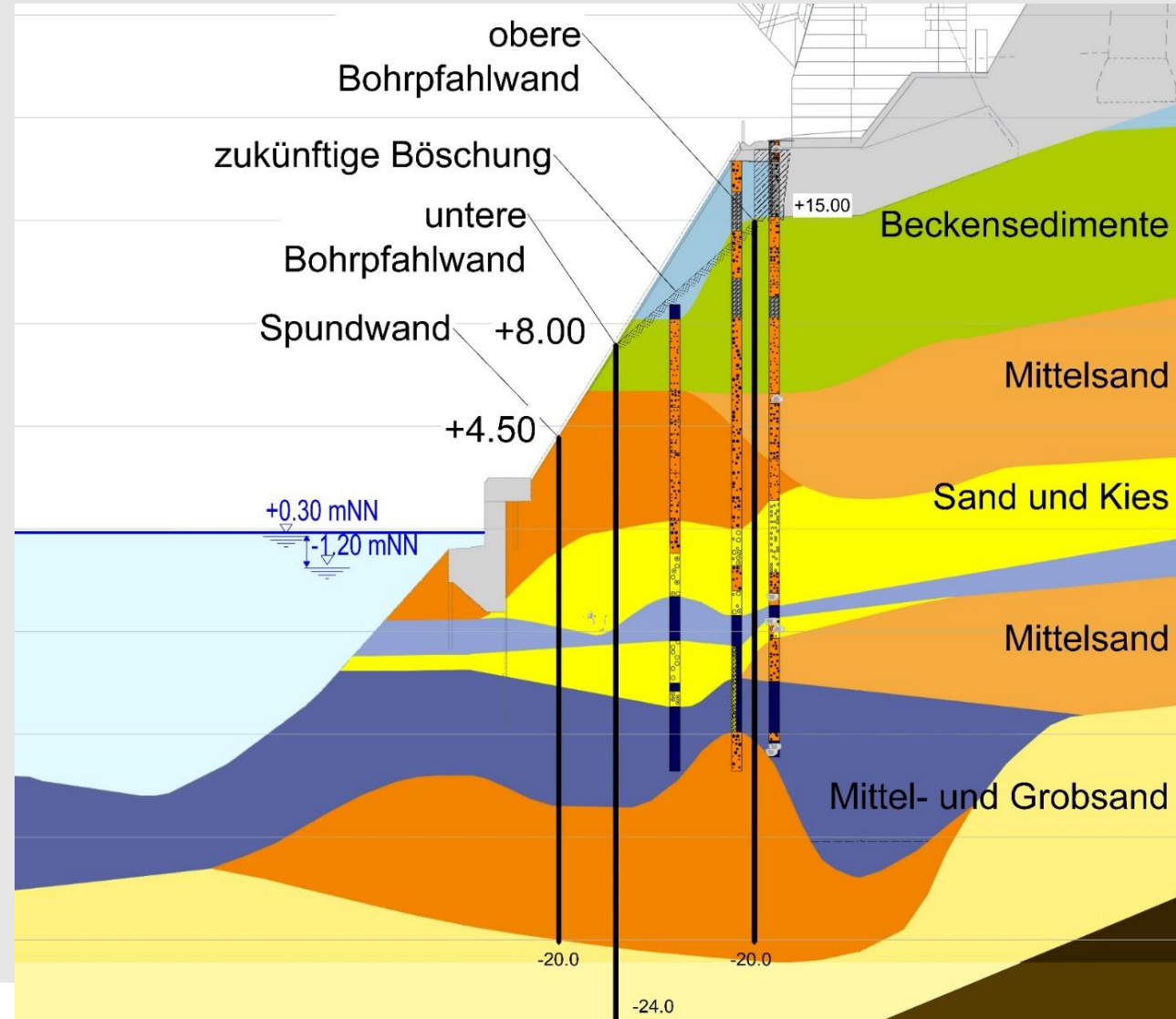


Ufer Süd - Konzeption



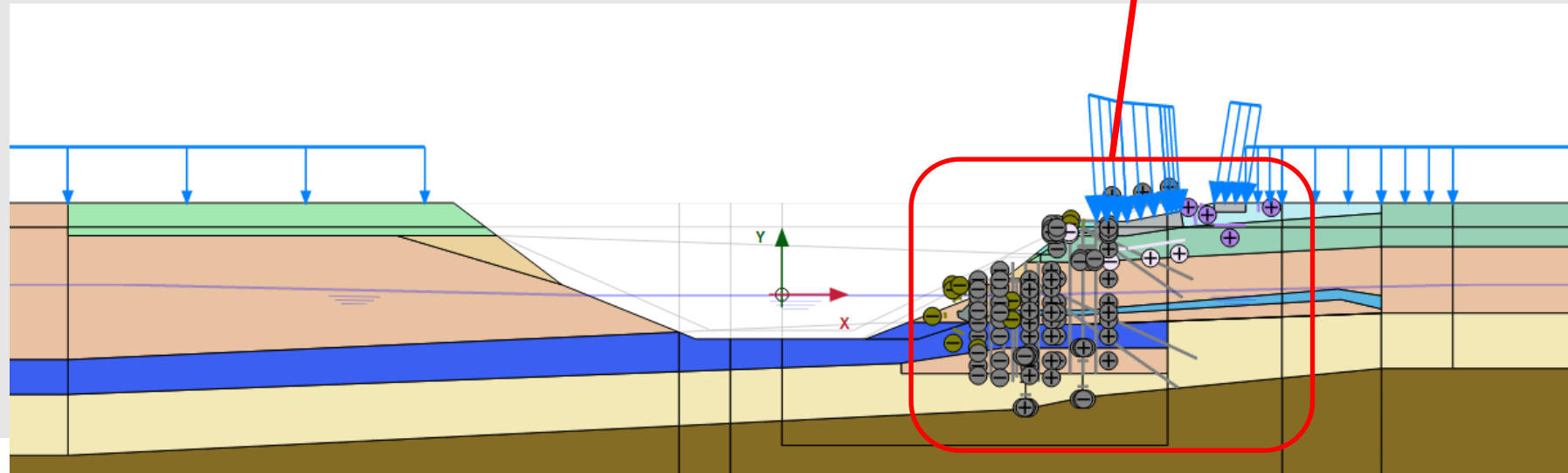
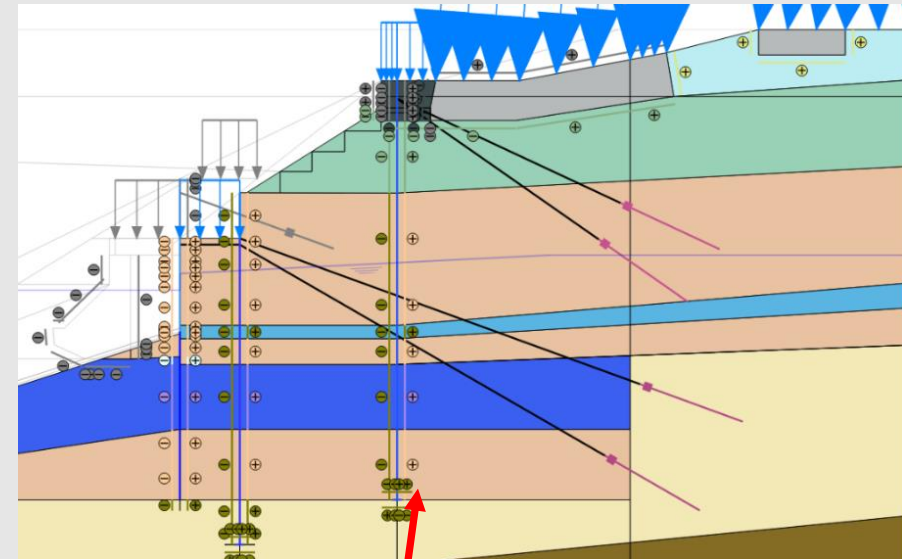
Ufer Süd - Baugrund

Homogenbereiche	γ/γ' [kN/m ³]	φ' [°]	c' [kN/m ²]
Beckensedimente	21/ 11	30,5	0
Feinsande/ Sand + Kies	19/ 11	38	0
Oberer Geschiebemergel	20/ 11	32	3
Mittlerer Geschiebemergel	22/ 12	32	3
Unterer Geschiebemergel	22/ 12	32,5	5



Ufer Süd – FE-gestützte Bemessung

- Interaktion der Wände
- Abbildung der komplexen Bauphasen
- realitätsnahe Verformungsprognosen
- **Plaxis 2D**, Bodenschichtung und Wände
- Hardening Soil Small Strain (MIN/MAX)

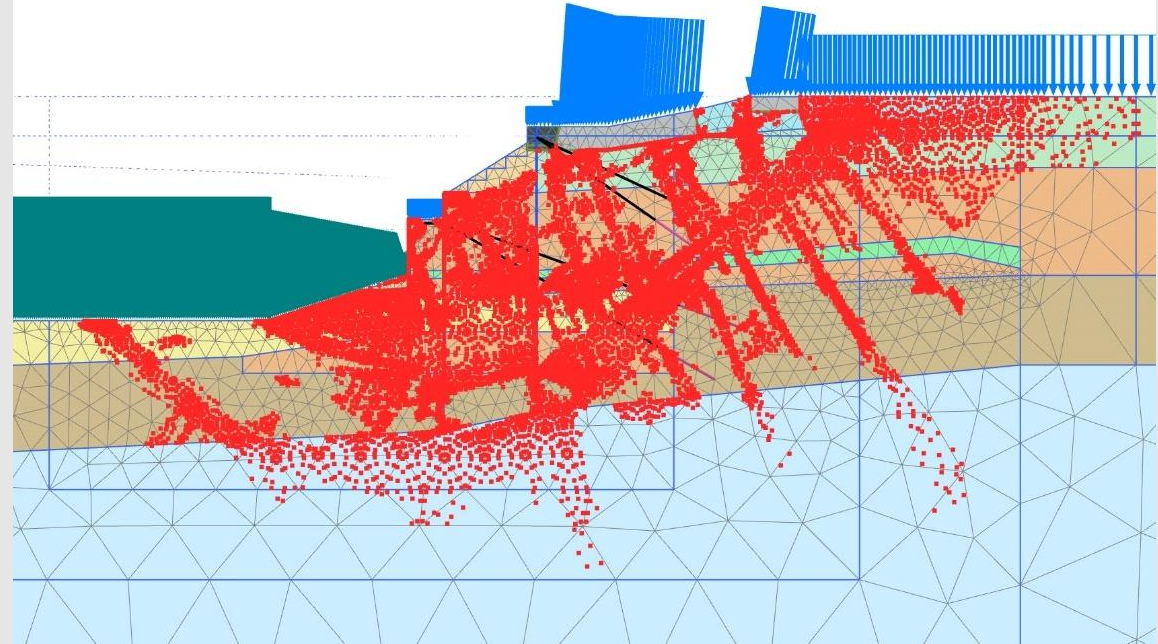


Ufer Süd: Standsicherheit ...

... Gesamtsystem

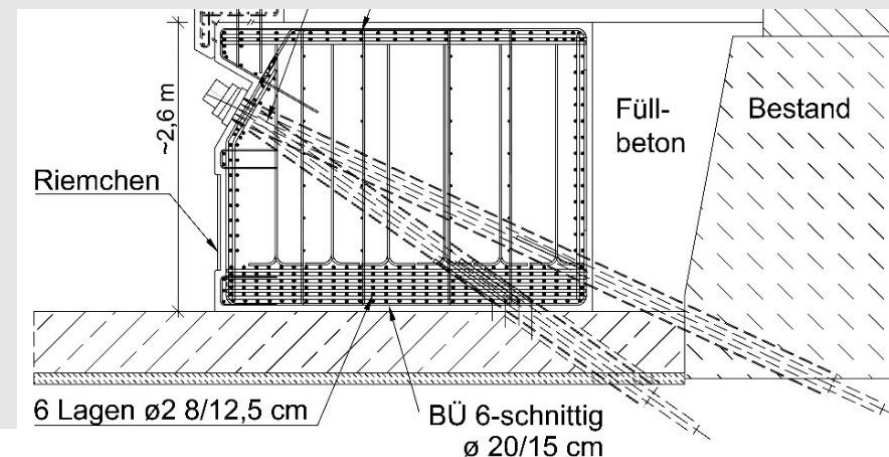
(GEO-3) ϕ -c-Reduktion:

Versagen bei einer
Reduktion der
MIN-Parameter um 1,46



... Bauteile (GEO-2 u. GEO-3)

Spundwand, Bohrpfähle und
Rückverankerungen



Ufer Süd: Verformungsprognose

... lt. Plaxis:

siehe Abbildung

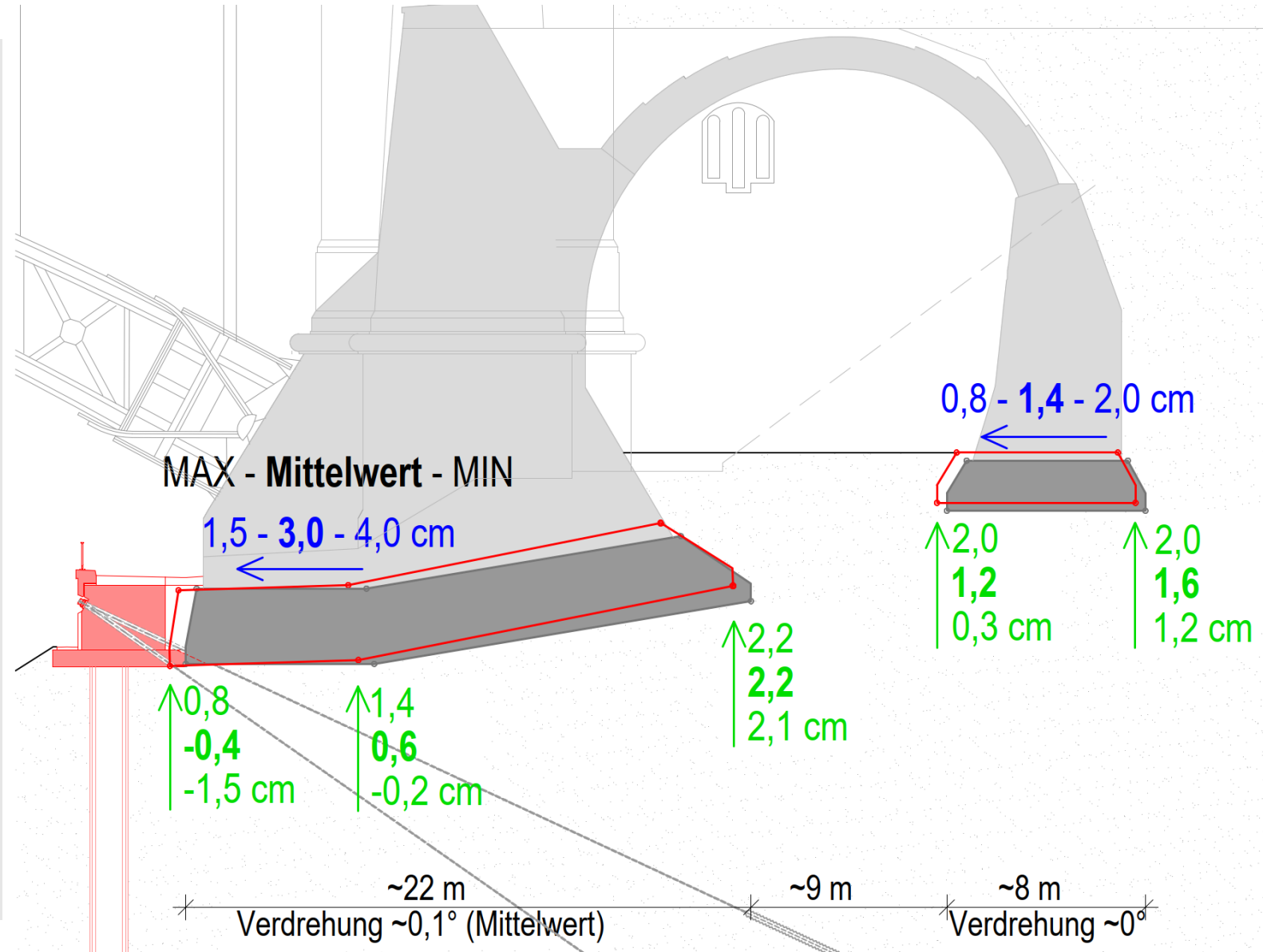
... aber:

Herstellprozess der Bohrpfähle
nicht modellierbar UND
verbleibende Unsicherheiten

... daher:

Ziel: Nachweis führen für

$u_H = 20 \text{ cm}$, $u_V = 10 \text{ cm}$ am Kämpfer

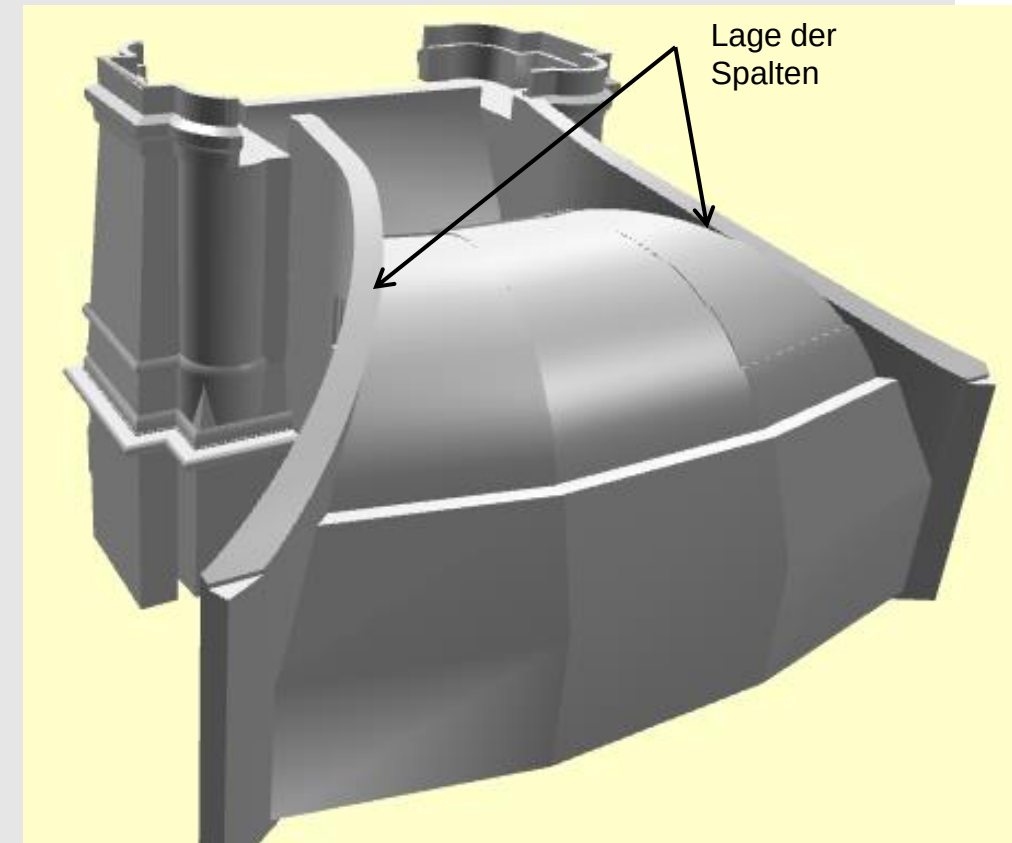
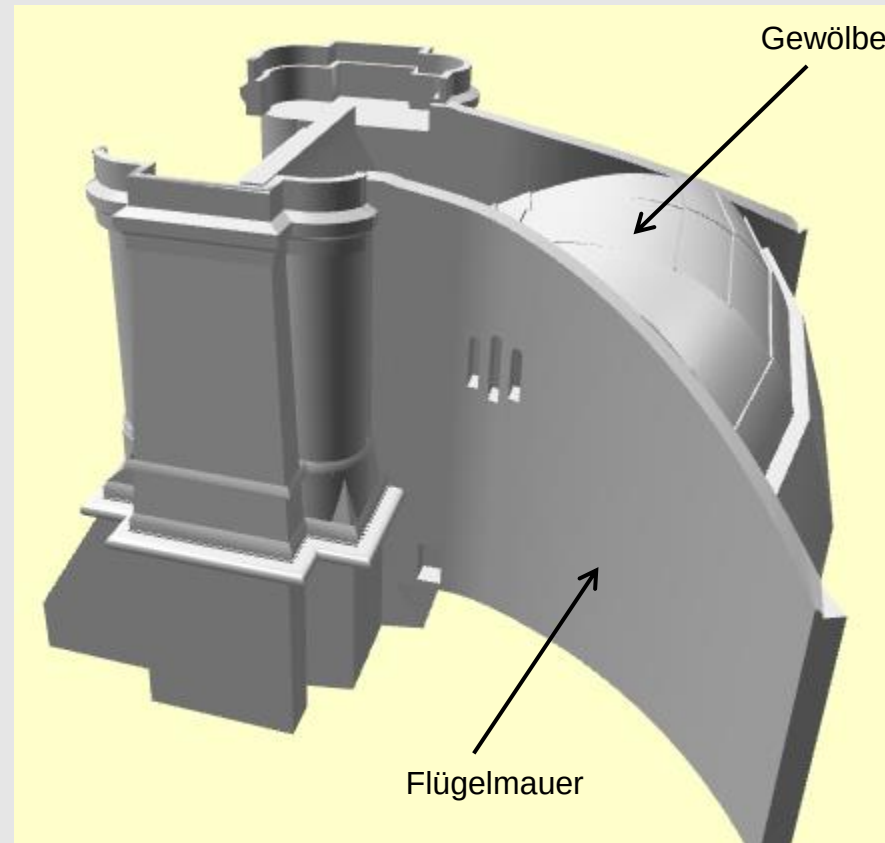
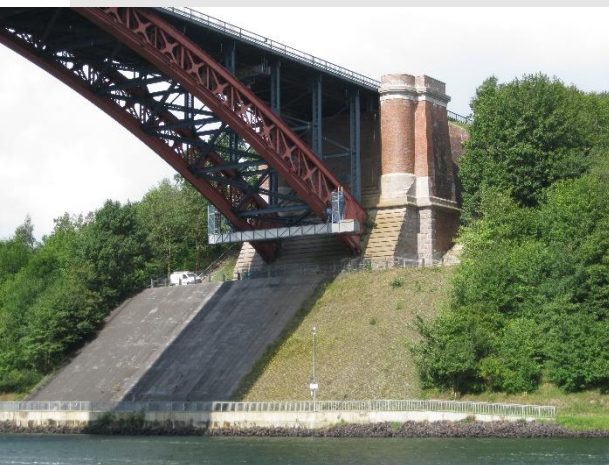


Gliederung

- allgemeine Projektvorstellung
- Ufer Süd
- **Bestandswiderlager**
- Modellbildung und Tragsicherheitsnachweise
- Stand der Bauausführung

Bestandswiderlager

Geometrie (Grundbreite rund 30 m, Tiefe rund 22,5 m, rund 200 MN Eigenlast) und Bezeichnungen



Bestandswiderlager

Geometrie der Spalte (Fledermaushabitat) via Schürfen erkundet

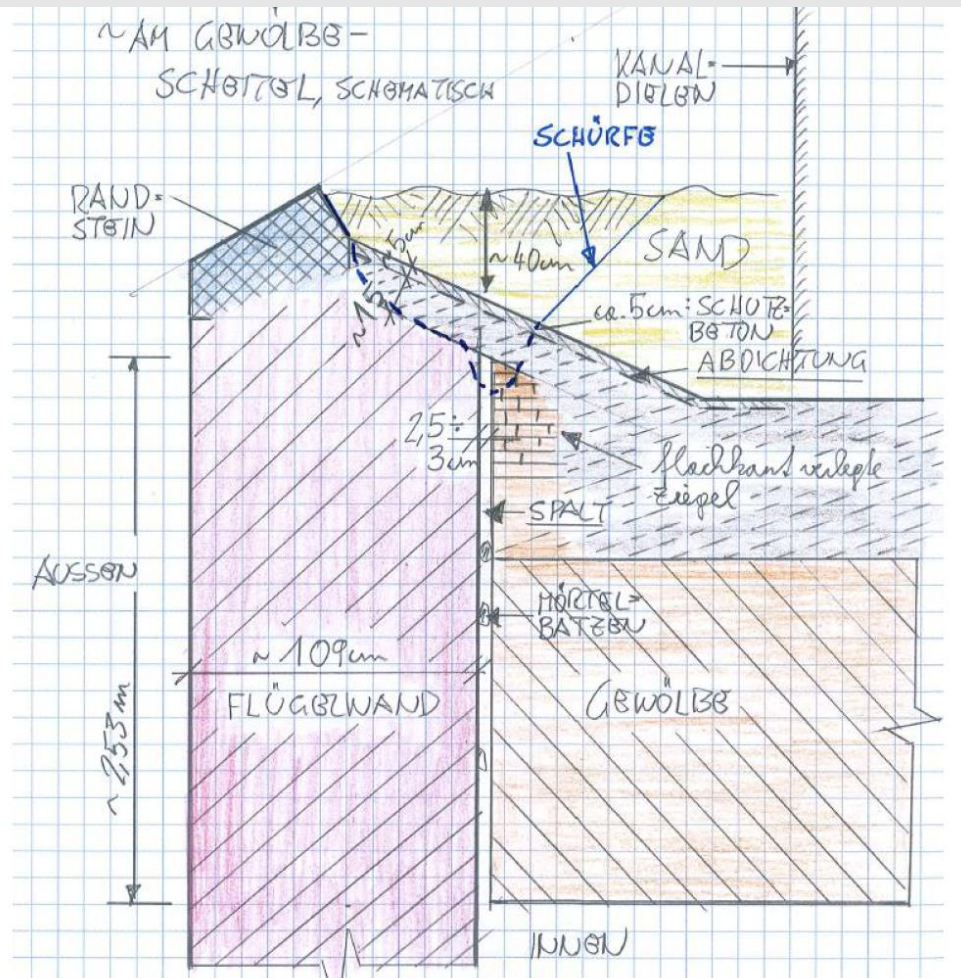


Abb. 5: Schematische Detailskizze der Schürfung.

Bestandswiderlager

Cremonaplan
von 1892

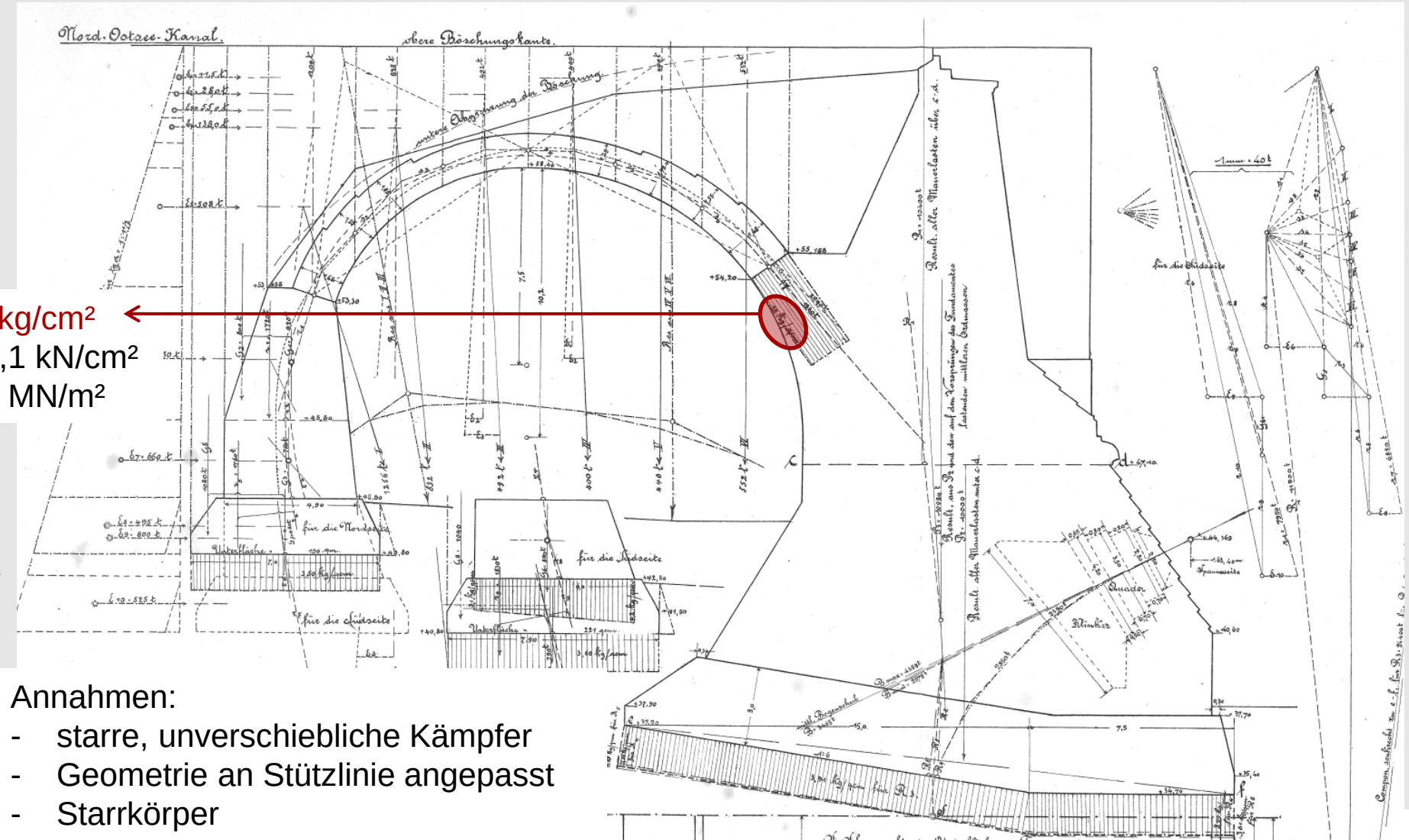
Gewölbedicke:

1,29 bis

1,68 m

Geometrie der
Belastung angepasst

10 kg/cm² ←
= 0,1 kN/cm²
= 1 MN/m²



Annahmen:

- starre, unverschiebliche Kämpfer
- Geometrie an Stützlinie angepasst
- Starrkörper

Bestandswiderlager: Erfassung 2015

Gewölbekammer: im Mittel rund 15 x 15 x 15 m, Ergebnis für das Gewölbe: keine Risse, Setzfugen mangelhaft vermörtelt, Feuchteschäden (Aussinterungen, Schalenbrüche)



Bestandswiderlager: konstruktive Instandsetzung

2016: Setzfugen ausmörteln und verpressen,

Feuchteschäden beheben – durch Mauerwerksersatz (insbesondere an den Flügelwänden)



Bestandswiderlager: Abdichtung und Dämmung

Umsetzung 2019



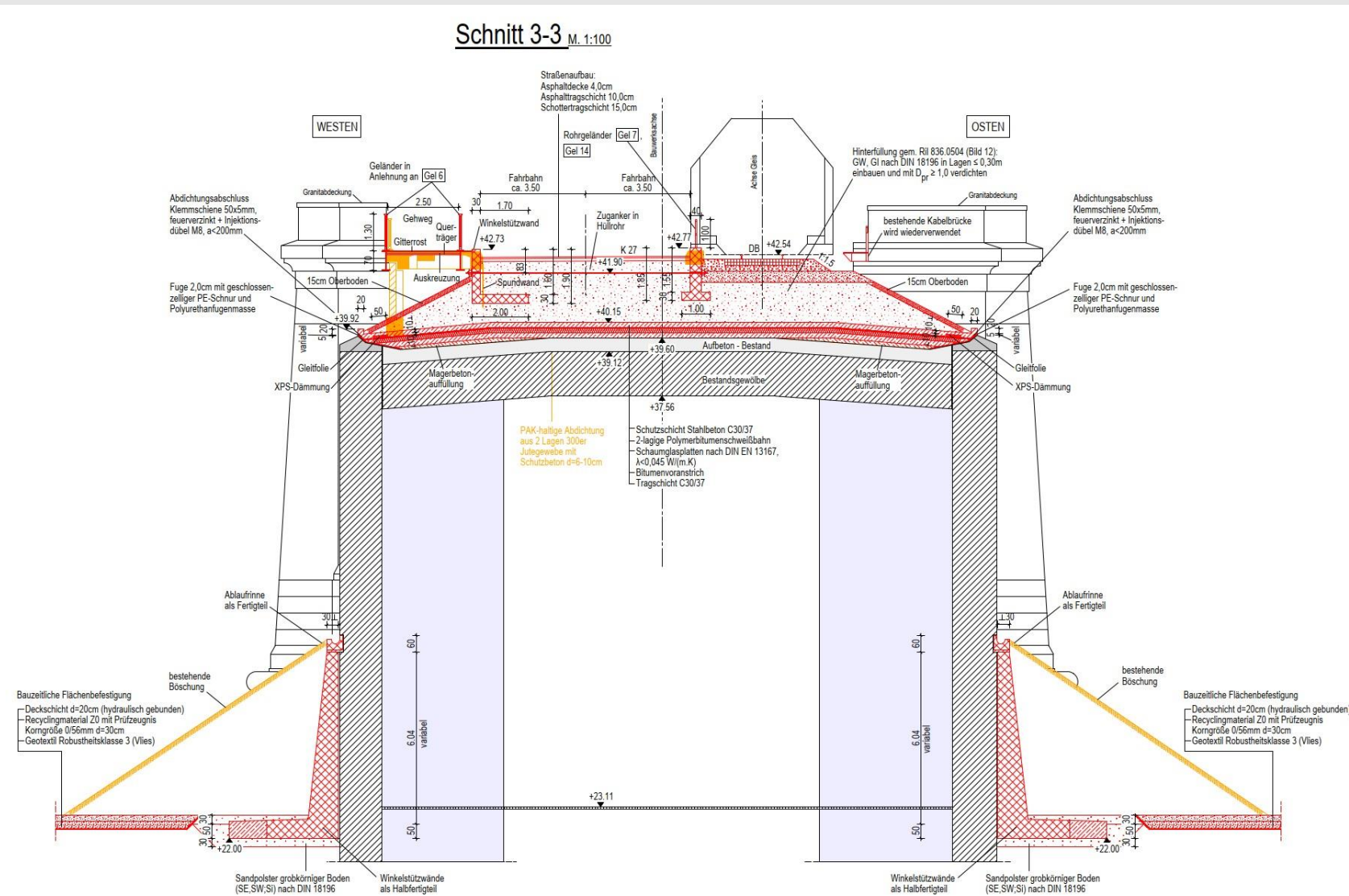
Bestandswiderlager: Abdichtung und Dämmung

Umsetzung 2019



Bestandswiderlager: Abdichtung und Dämmung

Umsetzung 2019



Bestandswiderlager: Mauerwerk

Prüfungen an vier Bohrkernen,
Materialprüfanstalt Schleswig-Holstein
(Prof. Gilga)

Druckfestigkeit der Mauersteine $f_{s,c} = 151,1 \text{ N/mm}^2$

=> sehr hohe Festigkeiten!

→ E-Modul: ca. 24.000 N/mm²



Tab. 10: Auswertung nach Berger [1].

Stein- höhe h	Geometrie- faktor k	Aus- nutzungs- α	Grundwert Mauerwerk- druckfestig- $f_{w,0}$ N/mm ²	Mauerwerk- druck- festigkeit f_w N/mm ²	DIN 1053-1 β_R N/mm ²	DIN 1053-100 f_k N/mm ²
mm	–	–				
60	1,20	0,262	47,7	40,5	27,6	32,4

Bestandswiderlager: Erfassung

Gewölbeaufbau anhand Schürfe im WL Nord: keine „Ringe“, sondern Verband über gesamte Höhe



Bestandswiderlager: Monitoring

3D-Scan, Einbau von Messpunkten und digitalen Wegaufnehmern

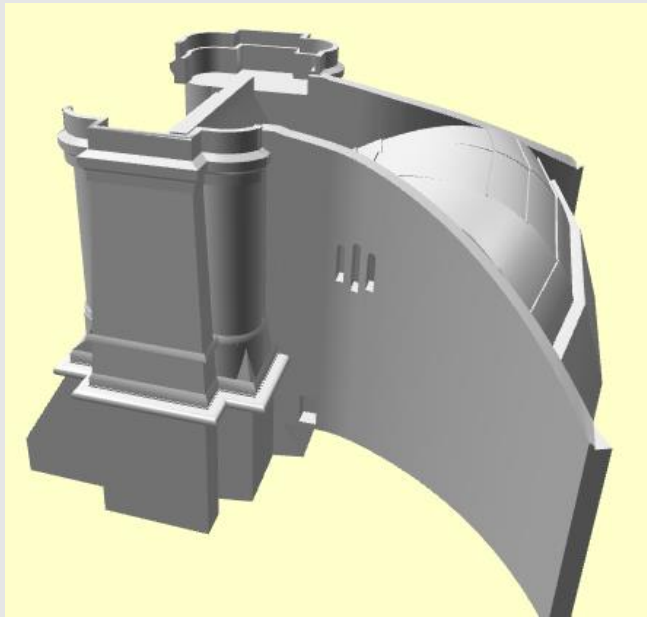


Gliederung

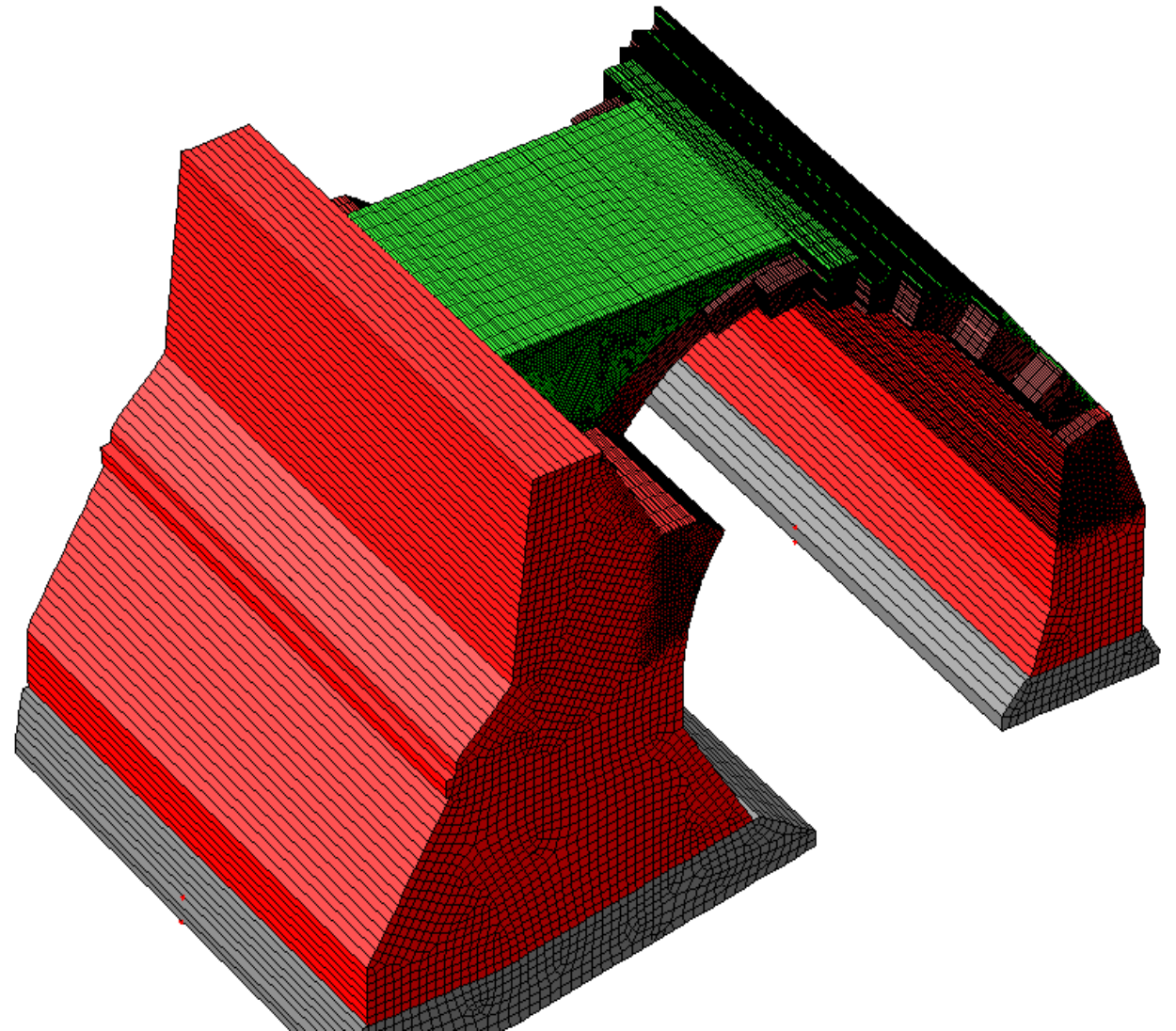
- allgemeine Projektvorstellung
- Ufer Süd
- Bestandswiderlager
- **Modellbildung und Tragsicherheitsnachweise**
- Stand der Bauausführung

Modellbildung WL Süd

in 2D, mit tatsächlichen Breiten,
inkl. Lasten aus dem Damm
Sohlfugen: gebettet



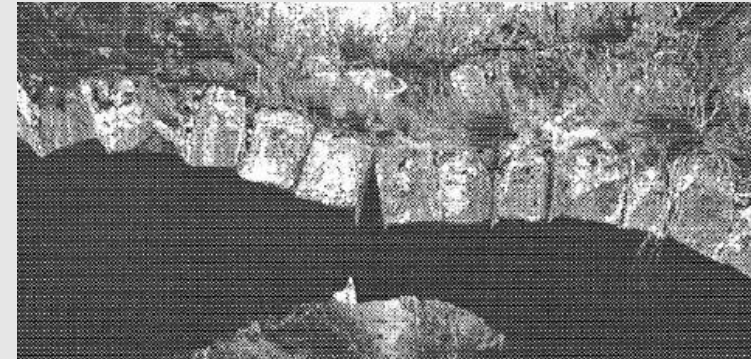
Realität



Lokale und globale Tragsicherheit



[Prof. HOLZER: „Ponte Taro bei Parma“]



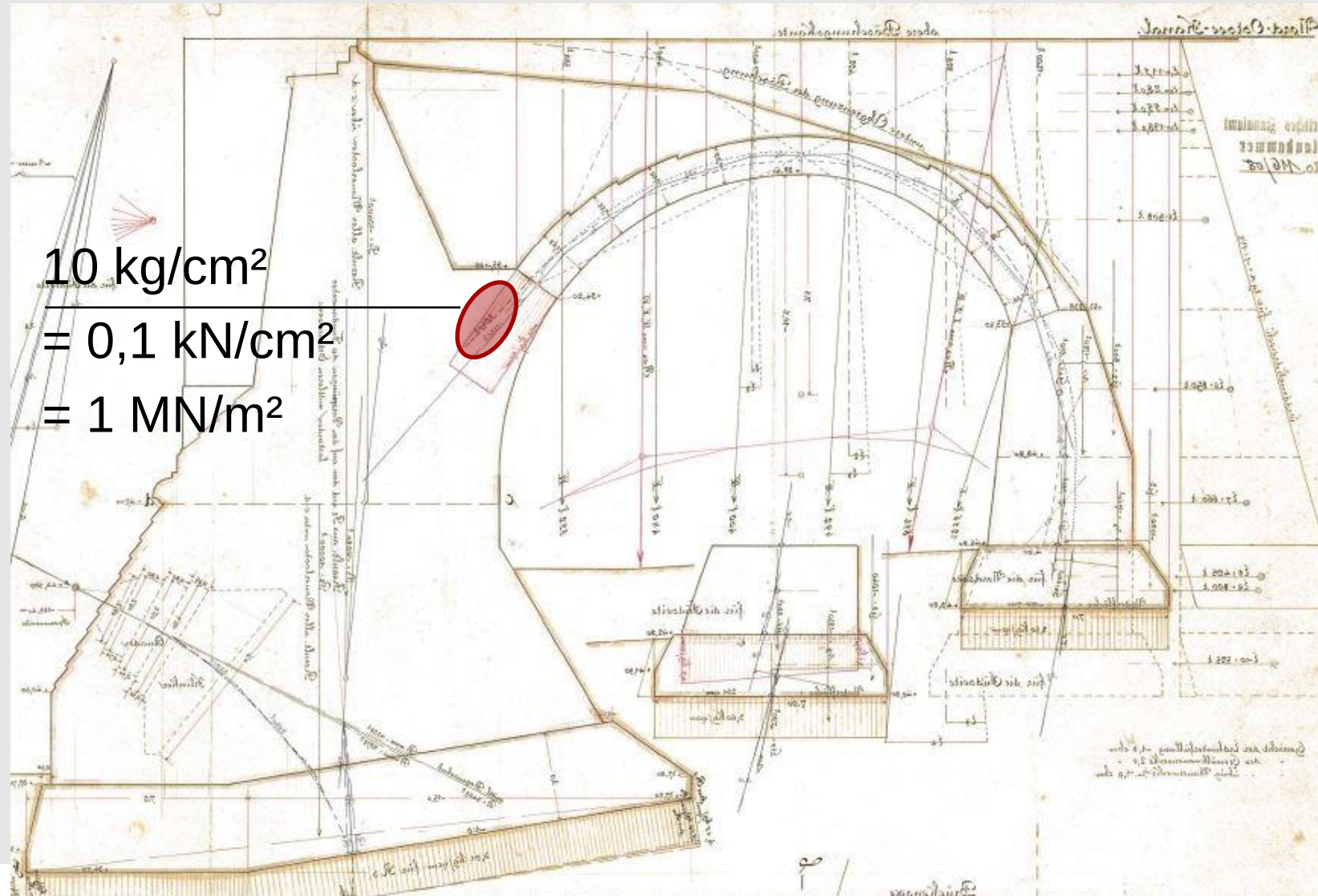
[DISS JAGFELD, 2000]

Nachweis der globale Tragsicherheit

Herausforderungen:

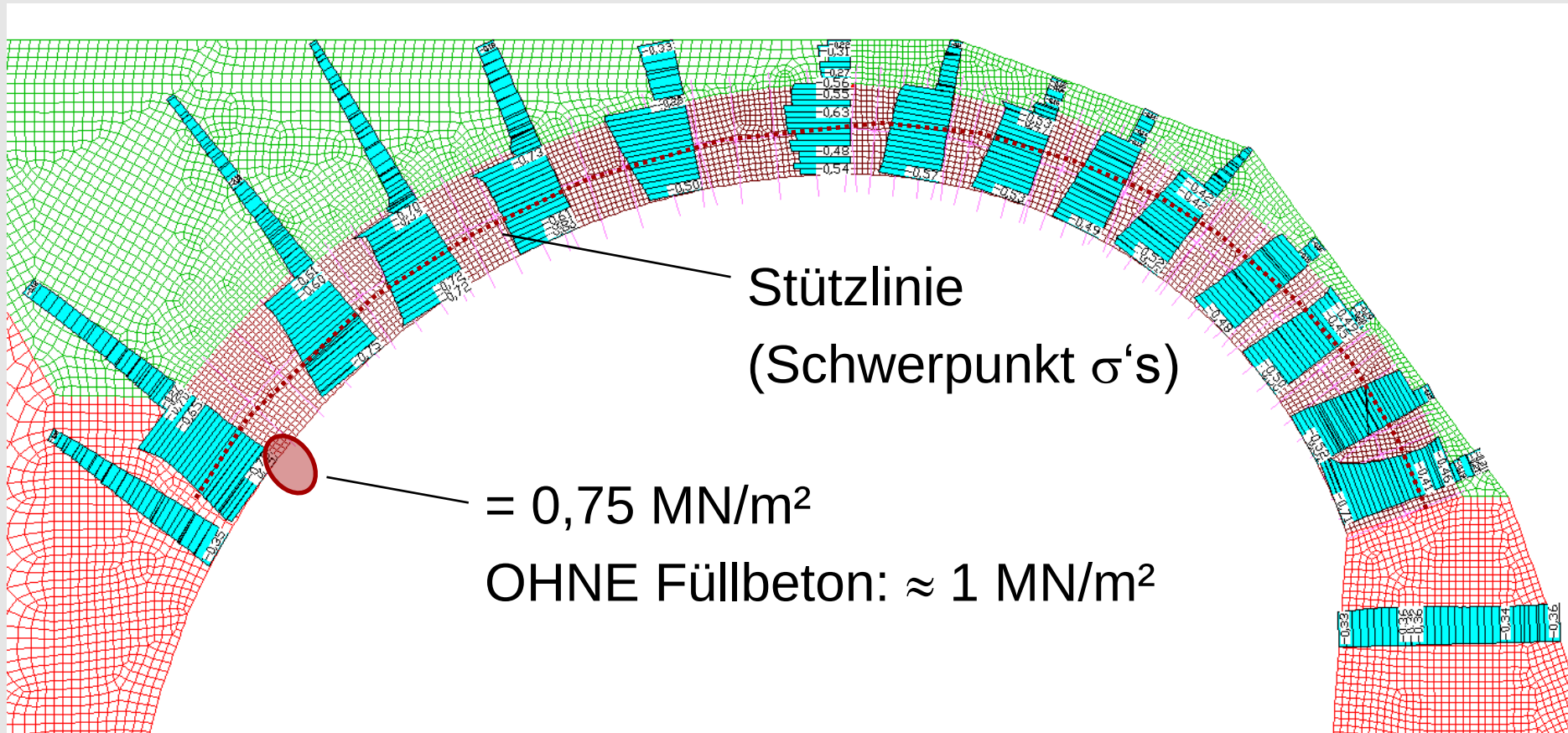
- Cremonaplan: keine Auflagerverschiebungen berücksichtigbar
- „klassische“ Berechnungsverfahren (z. B. Ril 805): Grundannahme, dass die Kämpfer unverschieblich sind
- Kinematische Verfahren: kein Spannungsnachweis
- Praxis FE-Programme: Tendenz zur numerischen Instabilität bei großen Verformungen und materiell nichtlinearer Berechnung

Konstruktion mittels Cremonaplan



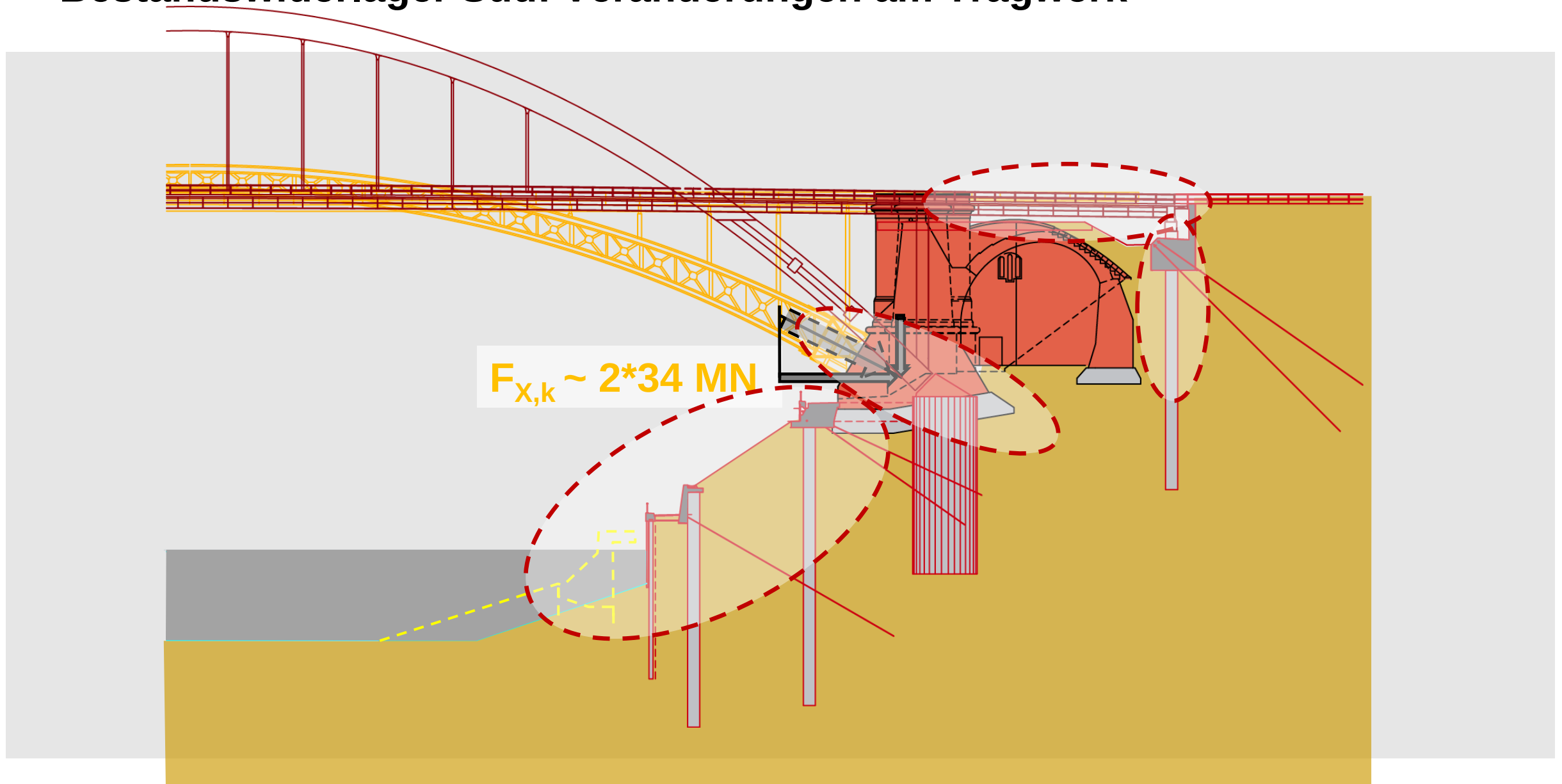
Bestandsnachrechnung

Annahme: starre, unverschiebliche Kämpfer



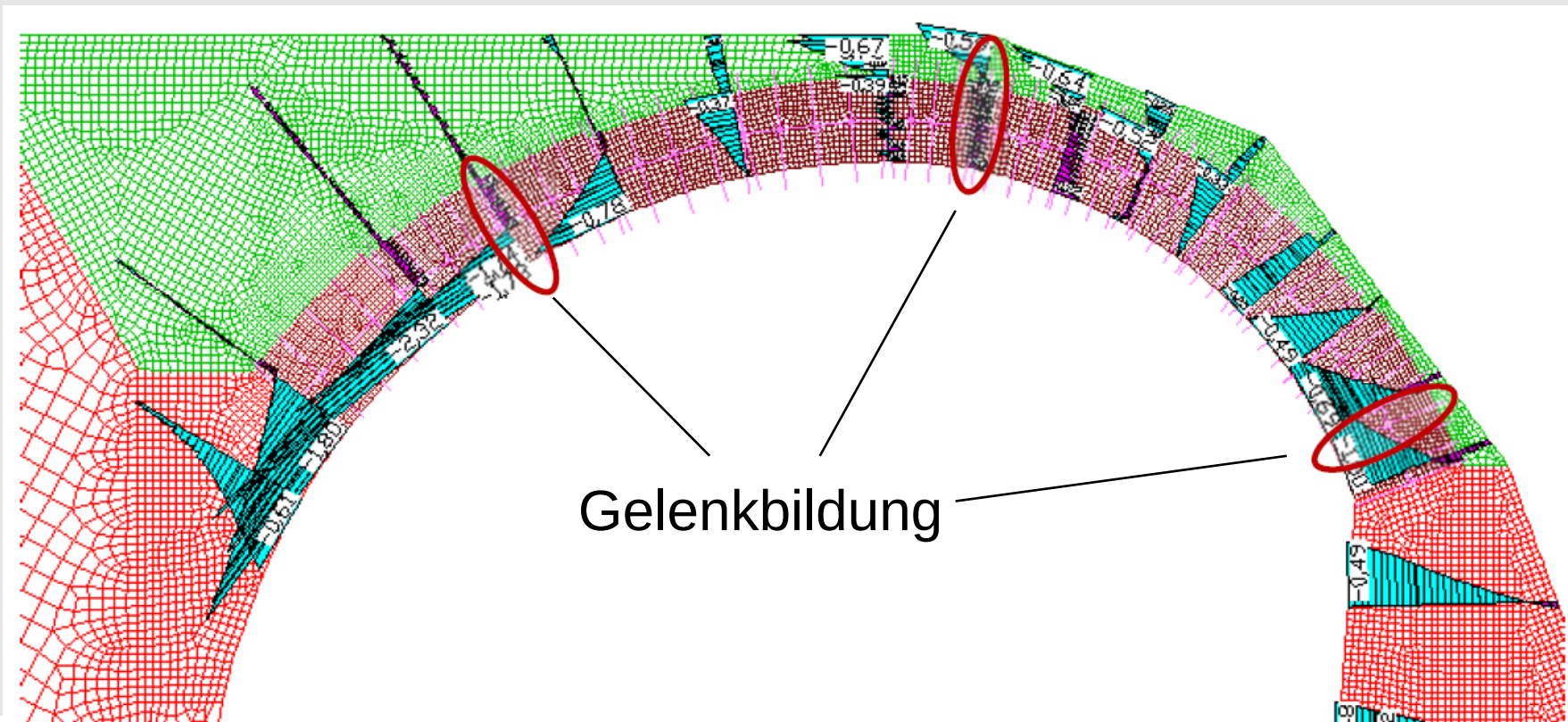
... qualitativ und quantitativ sehr gute Übereinstimmung!

Bestandswiderlager Süd: Veränderungen am Tragwerk

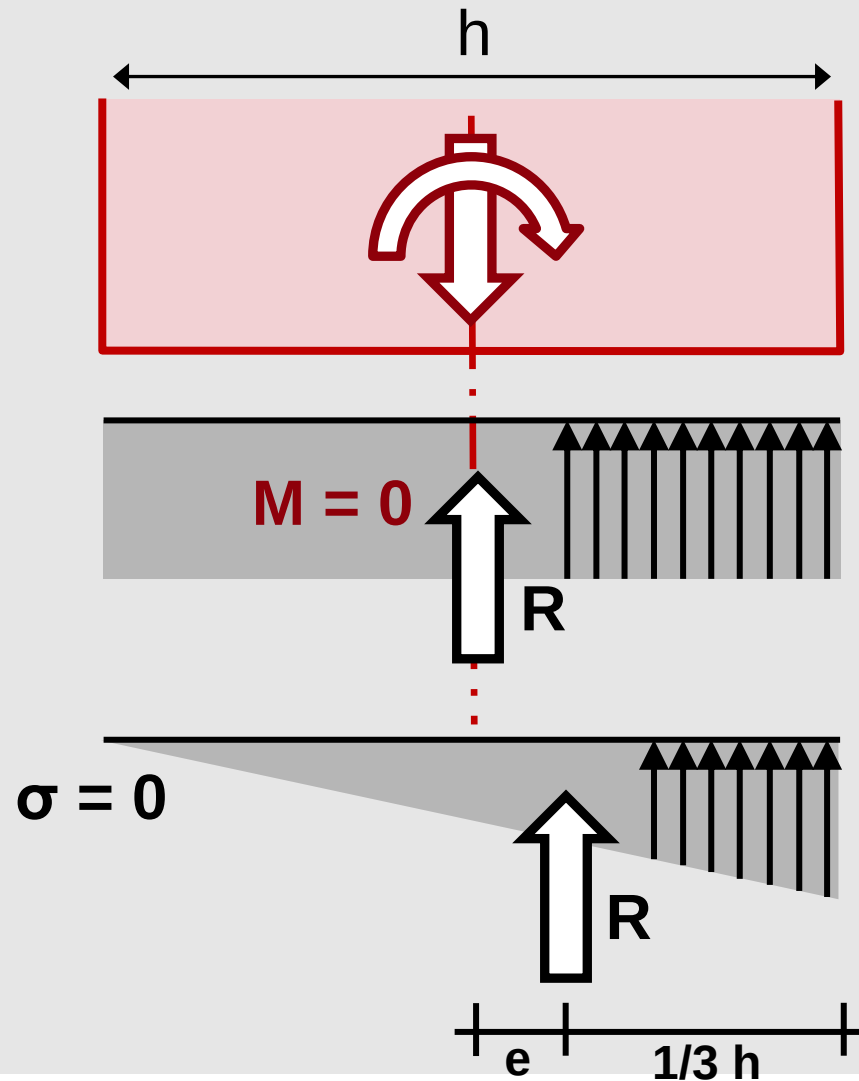


Lage der Gelenke

- skalierte (stark verringerte) Setzungen
- materiell nichtlinear (Zugausfall)



Exkurs: Gelenkbildung



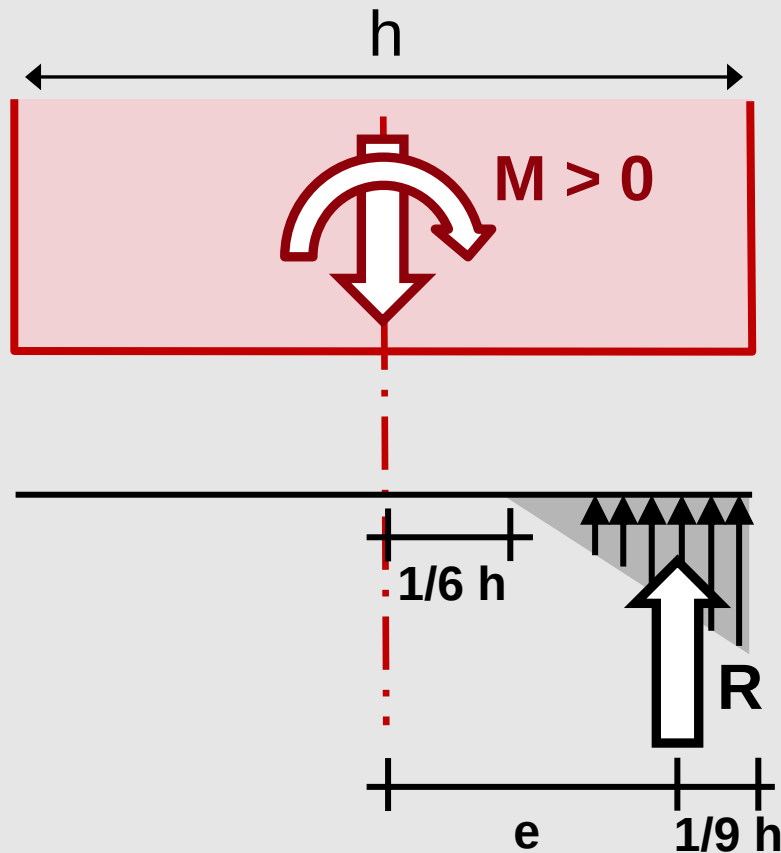
zentrischer Druck

$$e = 0$$

Dekompressionsmoment

$$e \cong 0,17 \cdot h \quad \left(\frac{1}{6}\right)$$

Exkurs: Gelenkbildung

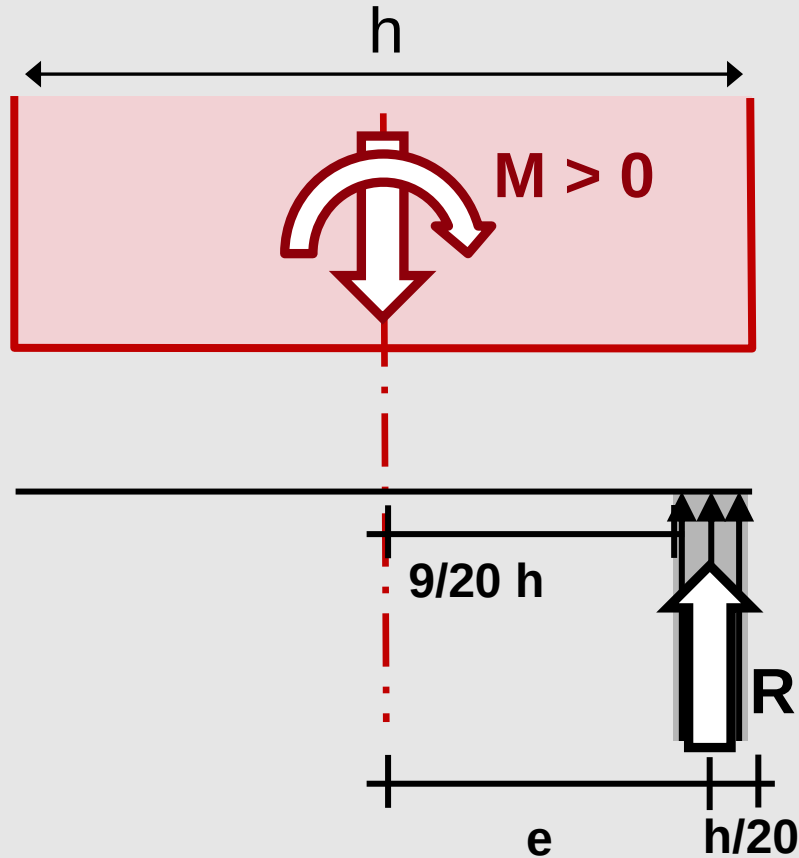


max. Klaffung lt. RIL 805
(805.0203 Seite 7)

$$e = 0,38 \cdot h \quad \left(\frac{7}{18}\right)$$

... Elastizitätstheorie nicht mehr gültig

Exkurs: Gelenkbildung



max. Klaffung lt. DIN EN 1996-1-1
(2010 Seite 64)

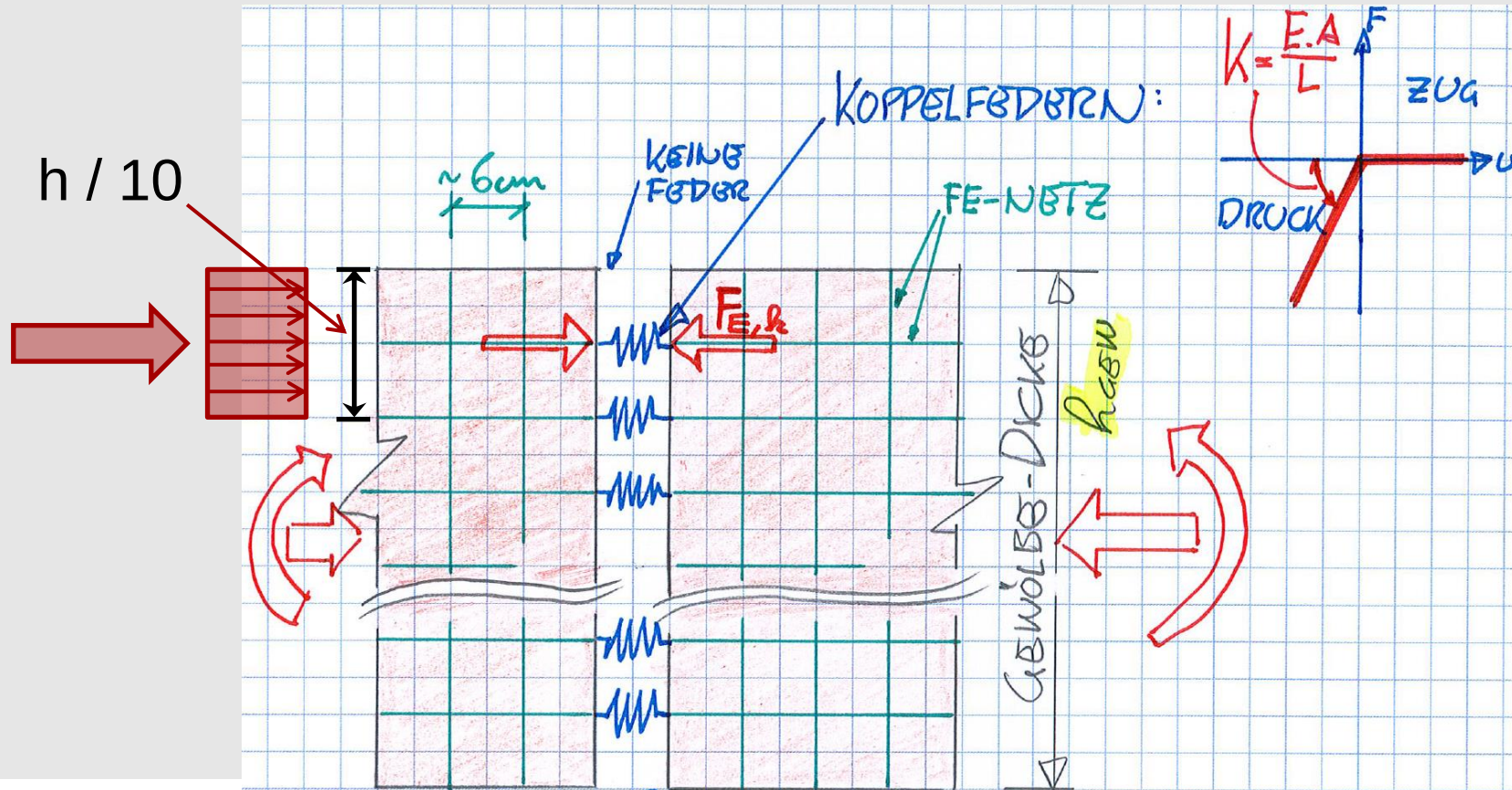
$$e = 0,45 \cdot h$$

...laut Prof. Gigla anwendbar

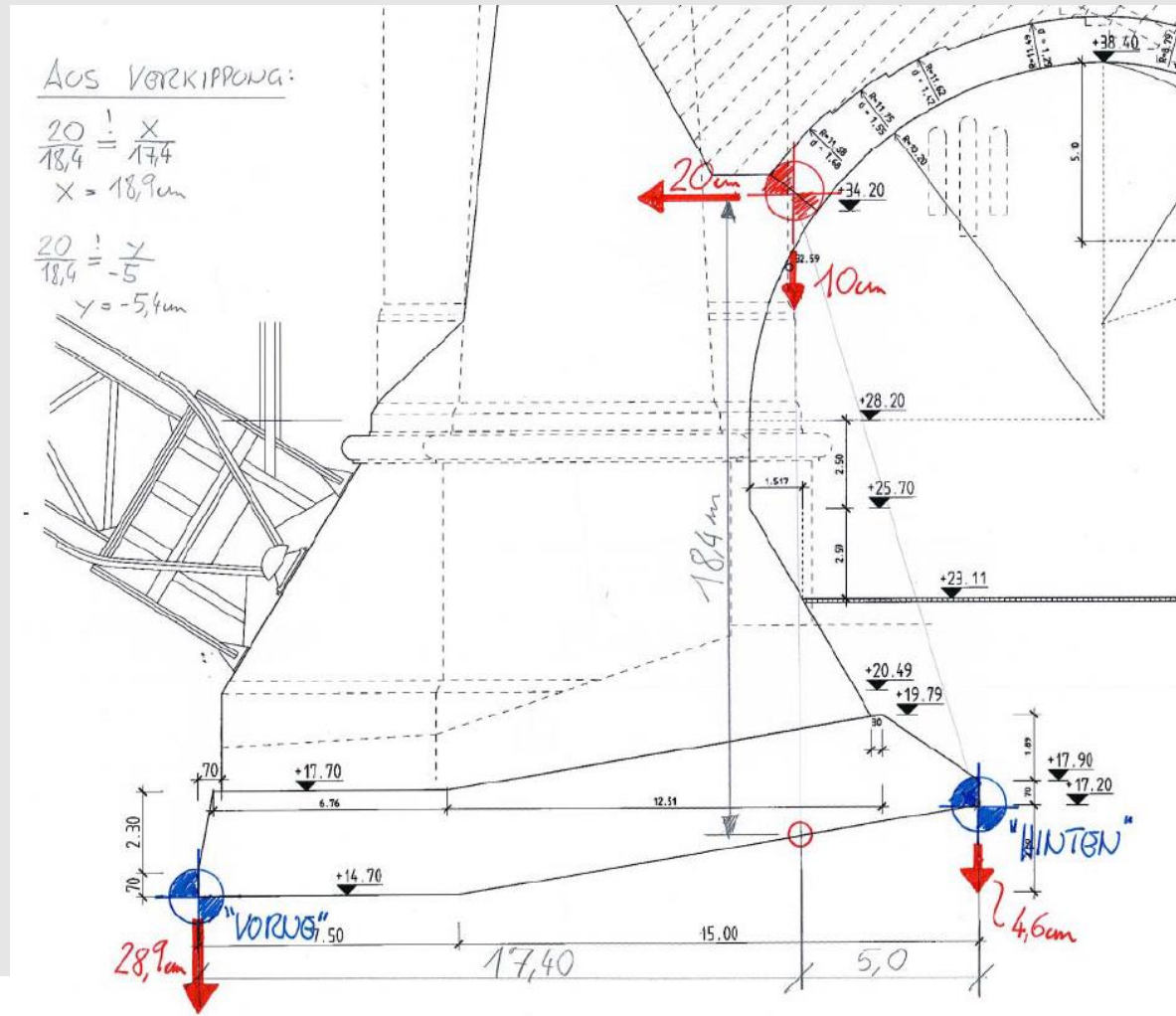
- kein Ingenieurbauwerk, optimaler Verband

Implementierung der Gelenke mittels Koppelfedern

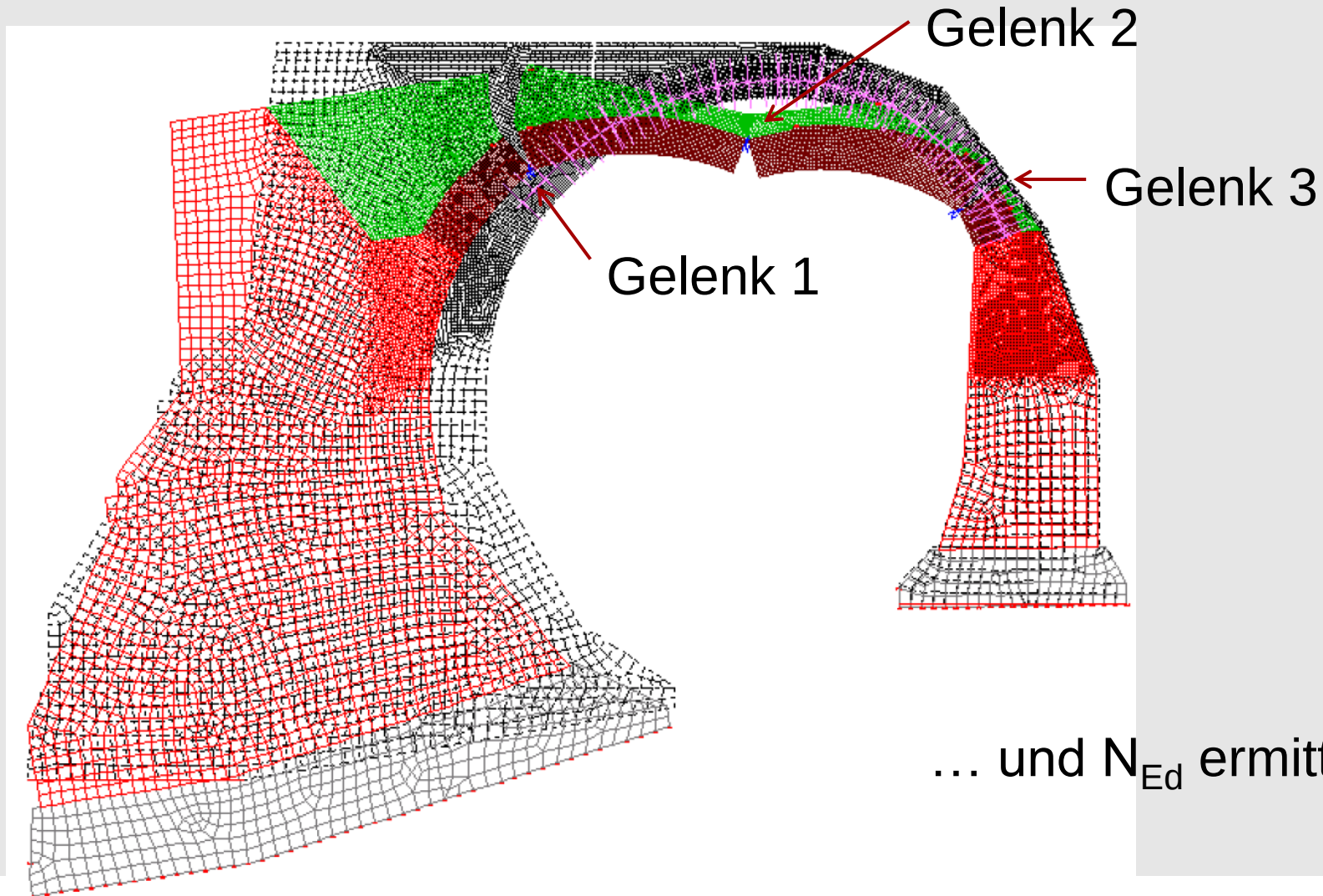
Weglassen der Randfeder:
Stützlinie vom Rand weg „gezwungen“



Berechnung der Normalkräfte unter Berücksichtigung der vereinbarten Grenzverformungen (materiell linear)



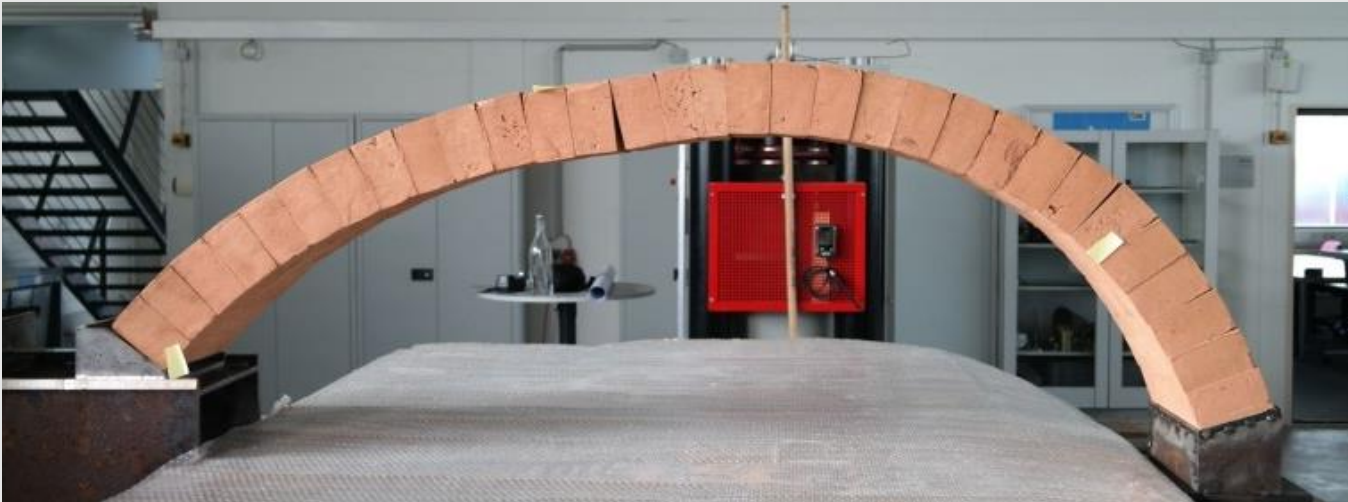
Ergebnis (Verformungen überhöht dargestellt)



Zum Vergleich: Versuche zur Gelenkbildung

FH Lübeck, Prof. Gigla: Versuche im Maßstab 1:10, unter Eigengewicht

=> ausreichende Übereinstimmung



Nachweis

$$N_{R,d} = \frac{f_k}{\gamma_M} \cdot \frac{\text{Gewölbedicke}}{10} \quad * \text{ Gewölbebreite } \gamma_M = 1,5$$

$$N_{Ed} / N_{Rd} =$$

$$5.714 * 1,45 / 12.600 = 0,66 \quad \dots \text{ Gelenk 1}$$

$$4.048 * 1,45 / 15.488 = 0,38 \quad \dots \text{ Gelenk 2}$$

$$11.069 * 1,45 / 27.507 = 0,58 \quad \dots \text{ Gelenk 3}$$

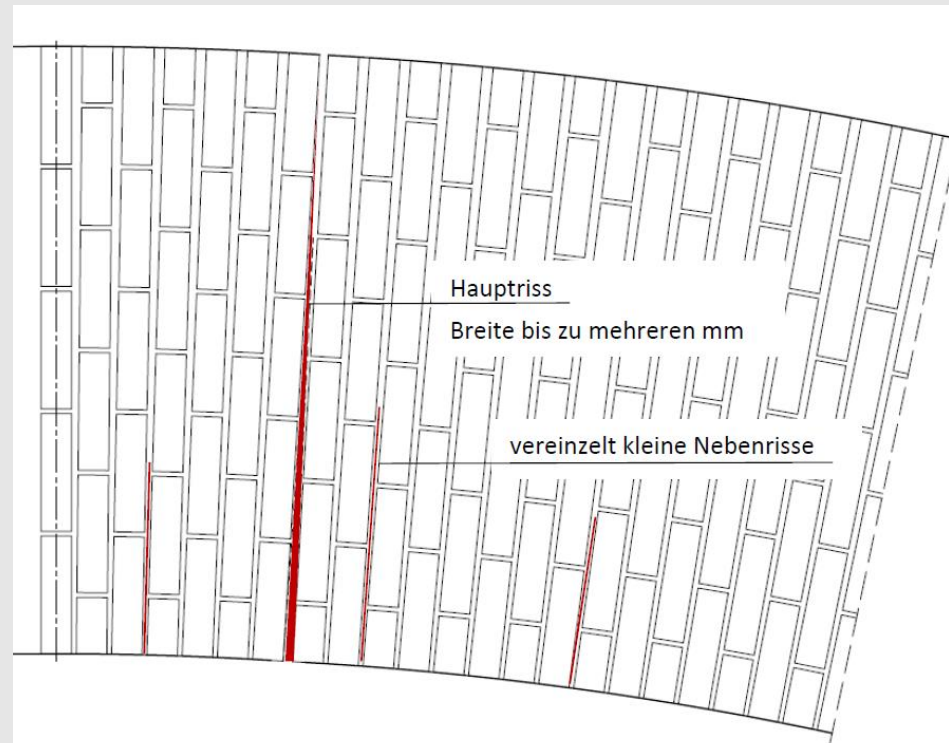
$$\gamma_E \sim 1,45$$

... alle Spannungs-Nachweise sind erfüllt.

Nachweis - Resümee

- Tragsicherheit auch für große Auflagerverschiebungen erfüllt
- Lokale Abplatzungen und Herabfallen einzelner Steine nicht ausschließbar => **Monitoring erforderlich**

- Rissprognose:



Gliederung

- allgemeine Projektvorstellung
- Ufer Süd
- Bestandswiderlager
- Modellbildung und Tragsicherheitsnachweise
- **Stand der Bauausführung**

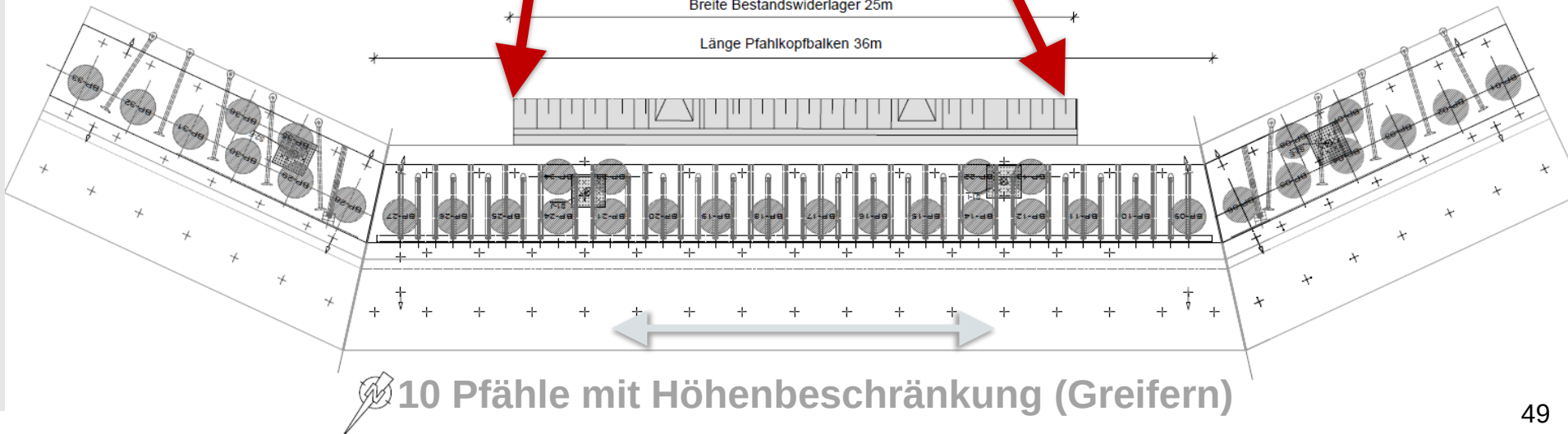
Ø 1,5 m, L = 36 m



26 Pfähle im Kellybohrverfahren

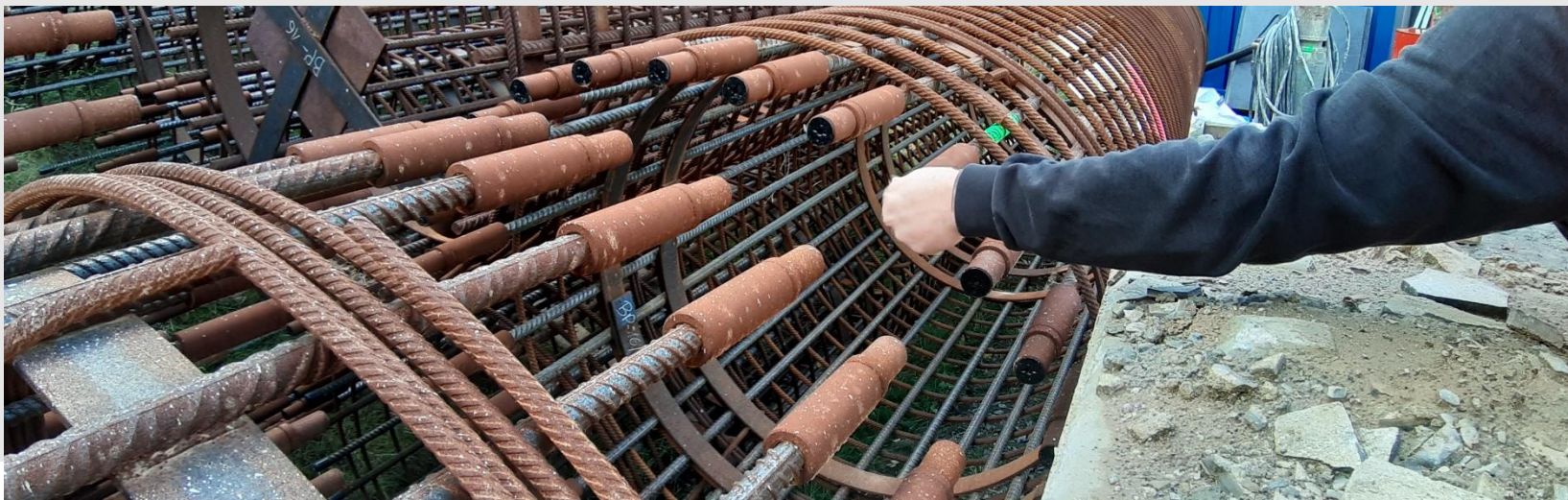
Breite Bestandswiderlager 25m

Länge Pfahlkopfbalken 36m



höhenbeschränkte Pfähle

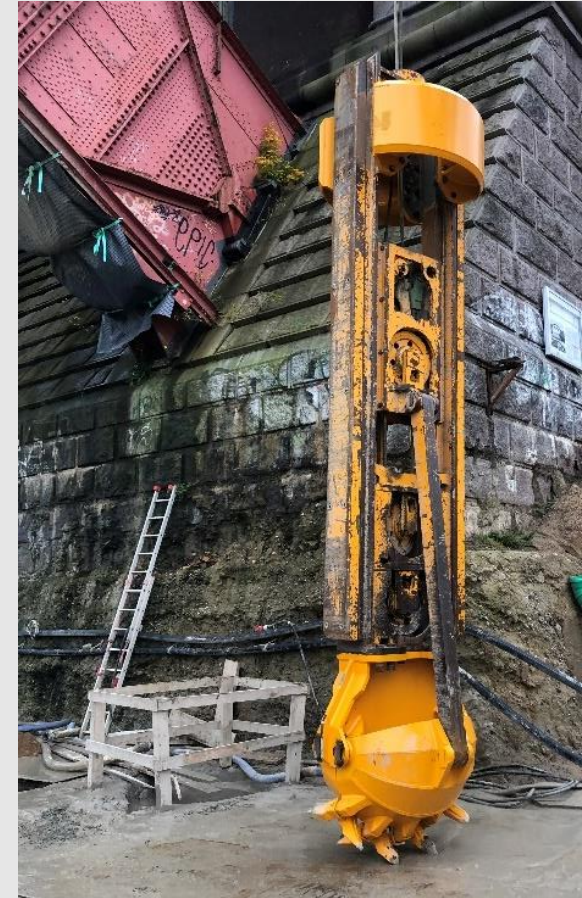
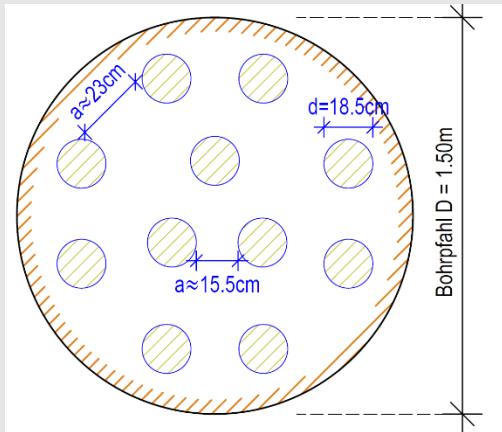
- 2 m verrohrt
- danach Bentonitsuspension
- Aushub mit Rundschalengreifer (6 t)
- SOLL: 3 Tage je Pfahl
- Bewehrung mit Schraubstößen



Start 1. PFAHL: 27.05.2021 Fertigstellung: 10.07.2021

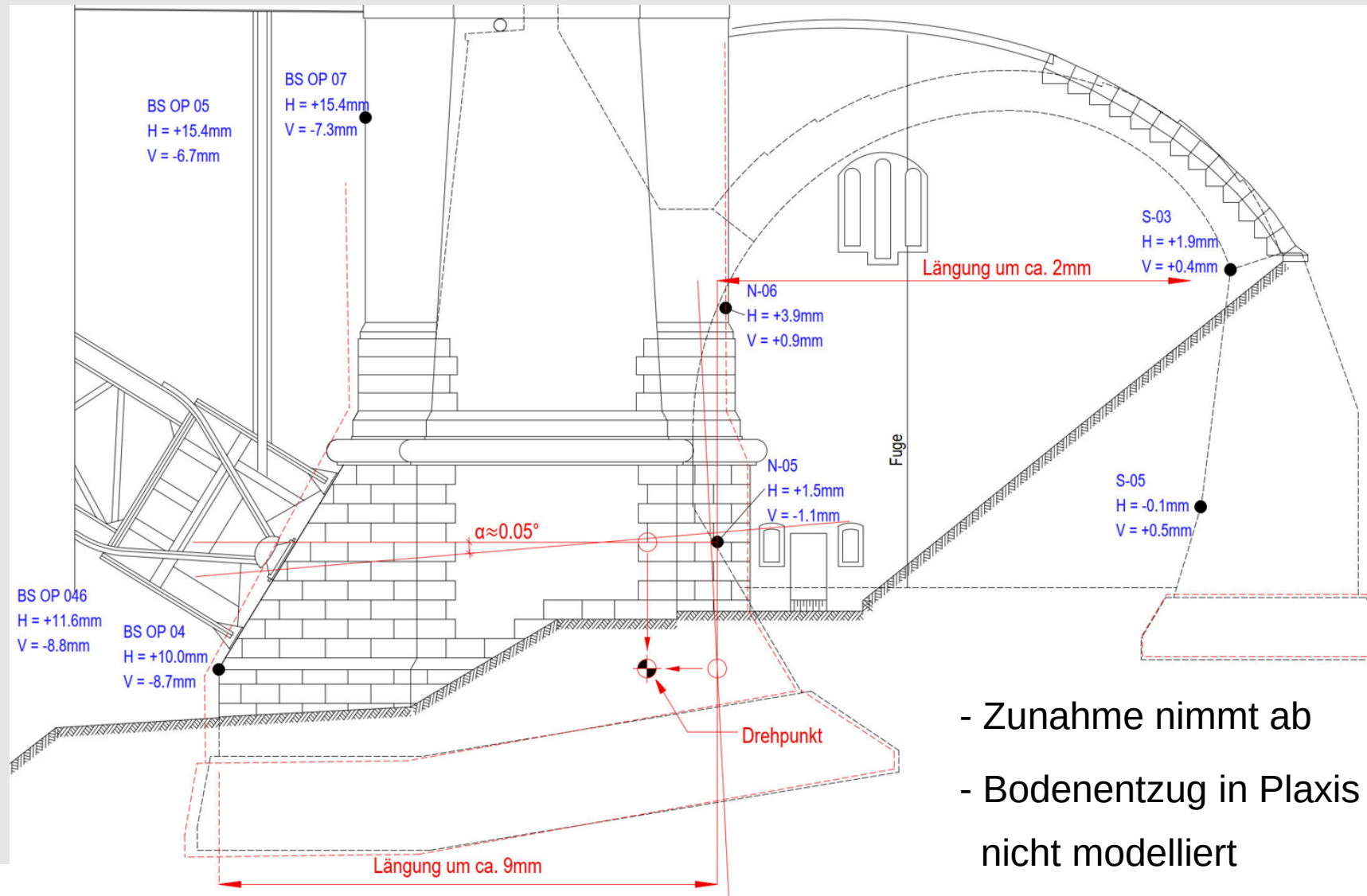
Beschleunigungsmaßnahmen:

- div. Greiferreparaturen (Zähne, usw.)
- Aufballastierung Greifer
- modifizierter Kugelgreifer (12 t, 6 m lang)
- Vorbohren
(ab 2. Pfahl)



- Kosten für die höhenbeschränkten Pfähle (10 STK): $\sim 1,2\text{ Mio.} + > 100\%$

Verformungsmessungen: bislang unkritisch für das Gewölbe



- Zunahme nimmt ab
- Bodenentzug in Plaxis nicht modelliert

Stand der Bauausführung

Bogengründung



Quelle: WNA NOK/ Bernot

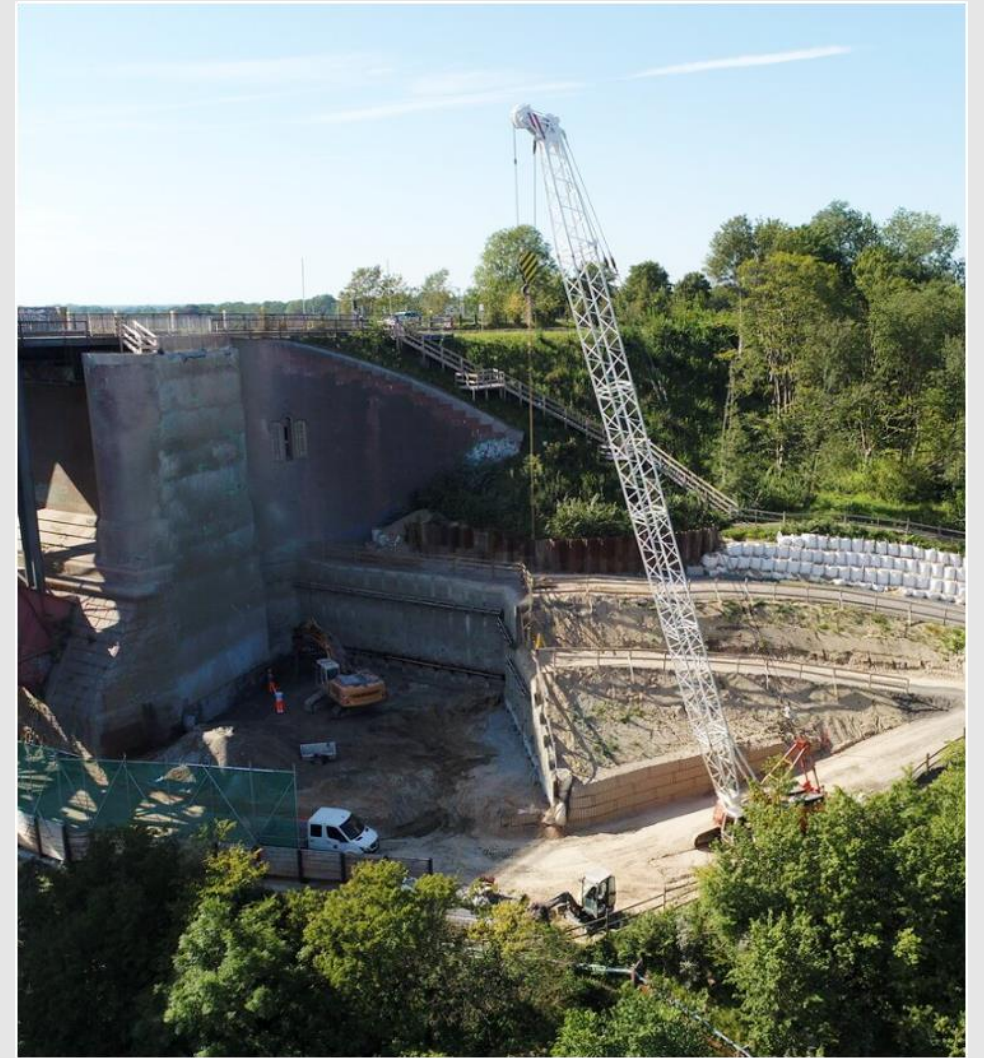
Stand der Bauausführung

Vorbereitungen

Nordwest

Nordost

Quelle: WNA NOK/ Bernot



Stand der Bauausführung

Bogengründung



Quelle: WNA NOK/ Bernot

Resümee

- Gewölbe mit großen Auflagerverschiebungen sind ingenieurmäßig nachweisbar
- außergewöhnliche Herausforderungen bedürfen außergewöhnliche Lösungen

Vielen Dank für Ihr Interesse!



WKC Hamburg GmbH
Planungen im Bauwesen

Veritaskai 8
21079 Hamburg
andreas.meisel@wk-consult.com
www.wk-consult.com

Kontakt bei Fragen zum Ersatzneubau
der ersten Hochbrücke Levensau
Wasserstraßen-Neubauamt
Nord-Ostsee-Kanal
Telefon: 0431/ 3603-371
Telefax: 0431/ 3603-414
wna-nord-ostsee-kanal@wsv.bund.de
www.wna-nord-ostsee-kanal.wsv.de

