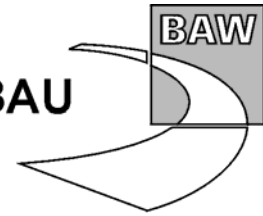




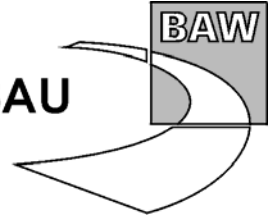
**BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU**  
Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau



**Gefährdungsanalyse Bornheimer  
Hang  
Rhein-km 661,7 - 664,3**

**A39520410252**





**Gefährdungsanalyse Bornheimer Hang**  
**Rhein-km 661,7 - 664,3**  
**Interner Entwurf**

Auftraggeber: WSA Köln

Auftrag vom: 04.07.2008, Az.: IV -2-5030 11/1

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39520410252

Aufgestellt von:           Abteilung:       Geotechnik  
                                  Referat:         G4  
                                  Bearbeiter:     Dipl.-Ing. Jeannine Eisenmann

Karlsruhe, 31.10.2008

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



## Zusammenfassung

Im Rahmen der Gefährdungsanalyse Bornheimer Hang wurde das Rheinufer im Bereich der Rhein-km 661,7 – 664,3 in Abschnitte unterschiedlicher Gefährdungen eingeteilt und priorisiert. Hierbei wurden die globale Böschungsstandsicherheit, die Gefährdung der Bebauung durch einen globalen Böschungsbruch, die lokale Böschungsstandsicherheit sowie die Erosionsgefährdung untersucht.

Nach ersten Abschätzungen ist die globale Standsicherheit in den Abschnitten A und B (Rhein-km 661,70 – 663,70) nicht gegeben. Die lokale Standsicherheit ist nach abschätzenden Berechnungen nicht ausreichend in den Abschnitten A und C (Rhein-km 661,70 – 663,24 und Rhein-km 663,70 – 664,30). Dasselbe gilt für die Erosionssicherheit, auch diese ist in den Abschnitten A und C nicht garantiert.

Die derzeit größte Gefährdung geht von der Erosion durch Wasserströmung aus, da ein entsprechendes Hochwasserereignis jederzeit auftreten kann. Dies betrifft die erosionsgefährdeten Abschnitte A und C (Rhein-km 661,70 – 663,24; Rhein-km 663,70 – 664,30). Innerhalb dieser Abschnitte besteht besondere Gefährdung in Bereichen, in denen keine Grasnarbe vorhanden ist und wo der Boden z. T. ungeschützt freiliegt, was i. w. im Abschnitt A und lokal auch in Abschnitt C der Fall ist. In besonders gefährdeten Bereichen wird eine provisorische Sicherung mit Wasserbausteinen empfohlen.

Im Bereich des oberen Weges können jederzeit weitere Schäden auftreten. Daher ist auch hier Handlungsbedarf vorhanden.

Hinsichtlich der globalen Standsicherheit sollten die Untersuchungen für die Abschnitte A und B zügig begonnen werden. Der konkrete Sanierungsbedarf ergibt sich aus diesen Untersuchungen.

Das Erreichen der lokalen Standsicherheit auf der Böschung durch Sanierungen steht nicht an oberster Priorität, ist aber in den Planungen mit zu berücksichtigen.

---

## Inhaltsverzeichnis

## Seite

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen	1
3	Derzeitiger Zustand des Hochufers	2
4	Vorliegende Untersuchungen	5
5	Systematik zur Untersuchung der Gefährdungspotenziale	7
5.1	Allgemeines	7
5.2	Gefährdungspotenziale	7
5.3	Einteilung des Uferabschnitts	9
6	Untersuchung der globalen Böschungsstandsicherheit	9
6.1	Allgemeines	9
6.2	Abschnitt A: Rhein-km 661,70 – 663,24	9
6.2.1	Geotechnische Modelle	10
6.2.2	Ergebnisse	13
6.3	Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70	14
6.3.1	Geotechnisches Modell	14
6.3.2	Ergebnis	15
6.4	Abschnitt C: Rhein-km 663,70 – 664,30	15
6.4.1	Geotechnisches Modell	16
6.4.2	Ergebnis	17
7	Lokale Standsicherheit	17
7.1	Allgemeines	17
7.2	Abschnitt A: Rhein-km 661,70 – 663,24	18
7.3	Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70	19
7.4	Abschnitt C: Rhein-km 663,70 – 664,30	19
8	Erosion durch Wasserströmung	19
8.1	Allgemeines	19
8.2	Abschnitt A: Rhein-km 661,70 – 663,24	20
8.3	Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70	20
8.4	Abschnitt C: Rhein-km 663,70 – 664,30	20



9	Beurteilung des empfohlenen Sanierungsvorschlags aus dem Gutachten Bieberstein	21
10	Schlussfolgerung	22
10.1	Bewertung der Gefährdungspotentiale	22
10.2	Weiterer Untersuchungsbedarf	23
10.3	Sanierungen	24
10.4	Priorisierung	25
11	Weiteres Vorgehen	26

## Bildverzeichnis

## Seite

Bild 1:	„Säbelbewuchs“ der Bäume am Ufer	2
Bild 2:	Gemähter Bereich und Bewuchsreste	3
Bild 3:	Basaltpflaster mit Grasbewuchs	3
Bild 4:	Gehweg mit Längsrissen und repariertem Randbereich	4
Bild 5:	Erosionsrinnen	5
Bild 6:	Übersicht der Gefährdungspotentiale	8
Bild 7:	Hochwasserschutzmauer im Bereich Rhein-km 663,70 – 664,1	16
Bild 8:	Spundwand am Böschungskopf und Böschungfuß (Quelle: U 5)	22

## Tabellenverzeichnis

## Seite

Tabelle 1:	Verwendete charakteristische Bodenparameter aus Unterlage U 2	11
Tabelle 2:	Parameterkombination im Grenzzustand, Rhein-km 662,7	12
Tabelle 3:	Parametersatz mit ungünstigen Werten Rhein-km 662,7	12
Tabelle 4:	Ausnutzungsgrad der Standsicherheit in Abhängigkeit von der Lage der Bebauung für beide Untergrundaufbauten	13
Tabelle 5:	Auswertung der Querschnitte Rhein-km 663,3 – 663,7	14
Tabelle 6:	Scherparameter aus U 3 für Rhein-km 663,5	15
Tabelle 7:	Ungünstige und günstige Parametersätze für Rhein-km 663,5	15
Tabelle 8:	Auswertung der Querschnitte Rhein-km 663,8 – 664,3	16
Tabelle 9:	Scherparameter aus U 3 für Rhein-km 663,8	17
Tabelle 10:	Ausnutzungsgrade der lokalen Standsicherheit in Abhängigkeit des Reibungswinkels für Rhein-km 662,7	18
Tabelle 11:	Untersuchung der Erosionskriterien für Rhein-km 661,70 – 663,24	20
Tabelle 12:	Untersuchung der Erosionskriterien für Rhein-km 663,70 – 664,30	20

## Liste der verwendeten Normen:

DIN 1054:2005-01	Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
E DIN 4084:2002-11	Baugrund - Geländebruchberechnungen
DIN 18123:1996-11	Bestimmung der Korngrößenverteilung

## Literaturverzeichnis

- [1] BECHTELER, W. et al.: *Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung*, DVWK-Schrift 118-1997



## Anlagenverzeichnis

### Querschnitte

- A 1.1 Übersicht Bornheimer Hang
- A 1.2 Querschnitt Rhein-km 662,7
- A 1.3 Querschnitt Rhein-km 663,8

### Globale Böschungsstandsicherheiten

- A 2.1 Rhein-km 662,7:  
Untergrundaufbau 1, Parametersatz zu Beginn der Rückrechnung
- A 2.2 Rhein-km 662,7:  
Untergrundaufbau 1, Parametersatz aus dem Grenzgleichgewicht
- A 2.3 Rhein-km 662,7:  
Hauskante, Untergrundaufbau 1, Parametersatz aus dem Grenzgleichgewicht,  
Abstand der Bebauung von der Böschungskante: 1,8m
- A 2.4 Rhein-km 662,7:  
Hauskante, Untergrundaufbau 2, ungünstiger Parametersatz, Abstand der  
Bebauung von der Böschungskante: 5,0m
- A 2.5 Rhein-km 662,7:  
Untergrundaufbau 2, ungünstiger Parametersatz, ungünstigster Gleitkreis
- A 2.6 Rhein-km 662,7:  
Untergrundaufbau 2, ungünstiger Parametersatz, tief reichender Gleitkreis
- A 2.7 Rhein-km 663,5:  
Untergrundaufbau 3, ungünstiger Parametersatz, ungünstigster Gleitkreis
- A 2.8 Rhein-km 663,5: Untergrundaufbau 3, günstiger Parametersatz
- A 2.9 Rhein-km 663,8: Untergrundaufbau 4, ungünstiger Parametersatz

### Lokale Böschungsstandsicherheiten

- A 3.1 Rhein-km 662,7: Untergrundaufbau 1, Parametersatz aus dem  
Grenzgleichgewicht

### Erosionsstabilität

- A 4.1 Kriterien nach Shields, Pilarczyk
- A 4.2 Einwirkungen der Strömungsverhältnisse – Oberflächennahe Bodenproben
- A 4.3 Einwirkungen der Strömungsverhältnisse – Annahme tiefer Bodenschicht

## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde vom Wasser- und Schifffahrtsamt Köln (WSA Köln) beauftragt, eine Gefährdungsanalyse für das Rheinufer im Bereich der Stadt Bornheim durchzuführen (Rhein-km 661,7 – 664,3). Hierbei gilt es, das 2,7 km lange Ufer in Abschnitte unterschiedlicher Gefährdung einzuteilen und die Abschnitte ausfindig zu machen, die zuerst einer Sanierung bedürfen. Des Weiteren sollen auf Grundlage der Lösungsvorschläge von Herrn Dr.-Ing. Bieberstein die technischen Lösungsmöglichkeiten geprüft werden.

## 2 Unterlagen

- U 1      *Sanierung Rheinuferböschung zwischen Bonn und Wesseling, Zwettler & Müllen, Ingenieurbüro für Tiefbau, Juni 2004*
- U 2      *Hangstandsicherheitsuntersuchung zum Objekt „Böschung Rheinufer“ in Bornheim-Uedorf, Rheinuferweg 79, Dr. Leischner und Partner, 07.06.2002*
- U 3      *Baugrunduntersuchung der Hochwasserschutzmauer in Widdig, Baugrundlabor Batke GmbH, Bonn 30.10.1995*
- U 4      *Unterlagen zu Bohraufschlüssen (5 Bohrungen), übergeben durch das StUA Köln, Außenstelle Bonn*
- U 5      *Gutachten Rheinböschung Bornheim, Dr.-Ing. Bieberstein, Universität Karlsruhe, November 2005*
- U 6      *Numerisches Modell Hersel, Gutachten zum Ausbau der Rheinstrecke von km 659,3 – 664,3 (Herseler Werth) im Rahmen der Fahrrinnenvertiefung zwischen Köln und Koblenz von 2,1m auf 2,5m unter GLW, BAW Karlsruhe, Februar 2001*
- U 7      *Böschungssicherung am Rheinufer Bornheim, Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhart, Universität Karlsruhe, November 2005*
- U 8      *Prüfung des Gutachtens von Professor Bernhart, Prof. Dr.-Ing. Soehngen, BAW Karlsruhe, 22.08.2006*
- U 9      *Vermerk „Steilufer am Bornheimer Hang“, Dr.-Ing. Kayser, BAW Karlsruhe 04.04.2008*
- U 10     *2D-numerische Simulation von Regelungsvarianten der Rheinstrecke Bonn bis Köln km 660,0 bis 677,0, Diplomarbeit Steffen Corbe. HS Karlsruhe, Betreuung durch BAW Abt. Wasserbau, 2008*
- U 11     *Querprofile Rhein-km 662,8 und Rhein-km 663,8, überreicht durch das WSA Köln, 28.03.2008*



- U 12 *Peilungen und Vermessungen der Querprofile Rhein-km 661,7 – 664,3, überreicht durch das WSA Köln*
- U 13 *Vermerk „Ortsbegehung Bornheimer Hang“, Eisenmann, BAW Karlsruhe, 30.09.2008*
- U 14 *Tagesmittelwerte der Pegel Bonn und Köln der Jahre 1998 – 2008, überreicht durch das WSA Köln*

### **3 Derzeitiger Zustand des Hochufers**

Der Rhein verläuft im Bereich der Ortschaften Hersel und Uedorf (Rhein-km 661,0 – 664,0) in einer lang gezogenen Rechtskurve, so dass sich das linke Ufer zu einem Prallhang ausbildete. Es ist fast ausnahmslos ein Hochufer mit parallel verlaufenden Fußwegen am Kopf und Fuß der Böschung vorhanden. Teilweise grenzt Wohnbebauung unmittelbar an den Fußweg am Kopf der Böschung an. Zwischen Rhein-km 661,0 - 662,5 ist die Insel Herseler Werth dem Ufer vorgelagert.

Die Böschung zeichnet sich nahezu im gesamten Bereich des Hochufers durch übersteile Böschungsneigungen aus. Auf der Böschung befindet sich größtenteils Bewuchs, der von einer Grasnarbe bis hin zu Sträuchern und Bäumen reicht.

An der übersteilen Böschung sind räumlich verteilt lokale Abrutschungen zu erkennen (s. U 9). Bei einigen Bäumen führten diese Rutschungen zum „Säbelbewuchs“ (s. Bild 1). Dies lässt den Rückschluss zu, dass sich die Böschung an dieser Stelle mit ihrer Neigung im bodenmechanischen Sinne im Grenzgleichgewicht befindet (s. U 8).



Bild 1: „Säbelbewuchs“ der Bäume am Ufer

Der Böschungsbewuchs wurde in einzelnen Bereichen unsachgemäß gemäht, so dass sich die Bewuchsreste noch auf der Böschung befinden (s. Bild 2). In anderen Bereichen befinden sich Gartenreste, aber auch aufgebrauchte und mitunter wieder bewachsene Wasserbausteine. Lokale Abbrüche waren teilweise schon wieder bewachsen. Dies lässt darauf schließen, dass die Abbrüche z. T. schon länger zurückliegen.



Bild 2: Gemähter Bereich und Bewuchsreste



Bild 3: Basaltpflaster mit Grasbewuchs

Abschnittsweise liegt auch eine Böschungssicherung mit Basaltpflaster vor, auf dem sich Grasbewuchs befindet (s. Bild 3, ca. Rhein-km 662,4 stromauf blickend). Das Basaltpflaster ist jedoch nicht durchgängig vorhanden. Die Verteilung und der Zustand des Basaltpflasters sind aufgrund des Bewuchses nicht genau zu erkennen.

An der Böschungsoberkante verläuft ein Weg, der an der Böschungsseite häufig mit parallel zur Wegachse verlaufenden Längsrissen und lokalen Abrutschungen durchzogen ist. Diese wurden teilweise mehrfach repariert (s. Bild 4).



Bild 4: Gehweg mit Längsrissen und repariertem Randbereich

Die Entwässerung des Gehwegs erfolgt unkontrolliert über die Böschung, daher bildeten sich auf der Böschung Erosionsrinnen (s. Bild 5). Bei Regenfällen ist hier mit fortschreitenden Ausspülungen zu rechnen.



Bild 5: Erosionsrinnen

#### 4 Vorliegende Untersuchungen

Für den Uferabschnitt liegen bereits einige Untersuchungen zum Sanierungsbedarf vor, deren Ergebnisse nachfolgend kurz dargestellt werden.

Eine abschnittsweise Untersuchung des Ufers auf dessen Gefährdung ist der Unterlage U 1 zu entnehmen. Der betroffene Uferabschnitt wird darin folgendermaßen eingeteilt:

- Rhein-km 661,70 – 662,60 (III. Bauabschnitt):  
Durch die sehr steile Böschungsneigung sind Abrutschungen an der Böschungskante entstanden, die Schäden im Rheinuferweg nach sich ziehen.
- Rhein-km 662,60 – 663,24 (I. Bauabschnitt) :  
Es sind durchgehend starke Auskolkungen vorhanden. Eine zu steile Böschungsneigung hat sich ausgebildet und die Wurzeln des Gehölzbewuchses sind frei gespült. Die Böschung ist nicht standsicher. Eine durchgeführte Hangstandsicherheitsuntersuchung an dem Haus Rheinuferweg 79 ergibt eine nicht ausreichende Standsicherheit (s. U 2).
- Rhein-km 663,24 – 663,88 :  
Das Ufer ist durchgehend mit Basaltpflaster geschützt. Es sind keine Schäden erkennbar.



- Rhein-km 663,88 – 664,12 (II. Bauabschnitt)

Starke Auskolkungen sind anzutreffen, die ohne Bearbeitung die Standsicherheit der vorhandenen Betonmauer langfristig gefährden. Erosionserscheinungen des Mutterbodens liegen vor.

Aus dem Gutachten Bieberstein (s. U 5) geht folgende Beurteilung hervor:

Im derzeitigen vorhandenen Zustand kann „rechnerisch kein Grenzgleichgewicht für den Böschungsbereich nachgewiesen werden“. Weiterhin kann diesem Gutachten zu Folge bei einer realistischen Annahme der geotechnischen Bodenparameter keine ausreichende Sicherheit für das oberflächennahe Böschungselement sowie den tief liegenden Gleitkreis bestimmt werden.

Hinsichtlich einzelner Bereiche wird von Bieberstein wie folgt bewertet:

- Rhein-km 661,70 – 662,60

Es besteht Sanierungsbedarf. Unter Berücksichtigung der Geometrieverhältnisse kann hier mit angepassten Sanierungsvorschlägen gearbeitet werden.

- Rhein-km 662,60 – 663,24

Es besteht dringender Sanierungsbedarf. Auf Grund annähernd gleich bleibender Geometrieverhältnisse kann in diesem Bereich ein weitgehend einheitlicher Entwurf für die Sanierung herangezogen werden.

- Rhein-km 663,88 – 664,12

Die Standsicherheit der Böschung ist in diesem Bereich ebenfalls nicht gegeben.

Aus dem Gutachten Bieberstein gehen verschiedene Sanierungsvarianten zum Erlangen der globalen Standsicherheit hervor. Betrachtet werden: eine Stützwand aus Gabionen, eine tief reichende Spundwand am Böschungskopf und jeweils eine kürzere Spundwand am Böschungskopf und am Böschungsfuß. Unter Berücksichtigung des Wunsches, dass der Sanierungsvorschlag nicht nur zur ausreichenden Standsicherheit, sondern auch zum Erhalt des Landschaftsbildes beiträgt, wird im Gutachten Bieberstein der Sanierungsvorschlag mit zwei kürzeren Spundwänden empfohlen. Hierbei kann die Sicherheit des Bereichs zwischen den beiden Spundwänden jedoch nicht nachgewiesen werden. Etwaige oberflächennahe Schäden sind umgehend zu sanieren.

## 5 Systematik zur Untersuchung der Gefährdungspotenziale

### 5.1 Allgemeines

Die betroffenen Uferabschnitte werden abschnittsweise auf ihre Gefährdung untersucht. Ziel der Untersuchung ist es, verschiedene Gefährdungspotentiale und mögliche Sanierungsbedarfe zu analysieren und ggf. zu priorisieren.

Die Gefährdungsanalyse wird auf der Grundlage vorhandener Untersuchungen durchgeführt. Daher können diese Untersuchungen nach dem derzeitigen Stand nur abschätzenden Charakter haben, da die Kenntnisse insbesondere über den Baugrund (Schichtung und Kennwerte) noch nicht ausreichend verdichtet sind. Später werden hier ggf. im Rahmen von Planungen detaillierte, objektbezogene Untersuchungen erforderlich.

Es wird nur der Lastfall 1 für den Grenzzustand GZ 1C nach DIN 1054: 2005-01 (ständige Bemessungssituation) untersucht. Als regelmäßig auftretender Rheinwasserstand wird die Hochwassermarken I (HW I) angesetzt. Diese wurde in den letzten 20 Jahren an den Pegelmessstellen Bonn und Köln nur zu ca. 5% der gesamten Dauer überschritten (s. U 14).

### 5.2 Gefährdungspotentiale

Grundsätzlich bestehen folgende Gefährdungen für die Böschung:

- Gefährdung der **globalen Standsicherheit** der Böschung und davon betroffener Bebauung,
- Gefährdung der **lokalen Standsicherheit** der Böschung mit kleinen, lokal eng begrenzten Rutschungen (betrifft teilweise auch den Uferweg) und
- **Erosion** der ungesicherten Uferböschung bei Hochwasser

Eine Übersicht der möglichen Gefährdungen ist in Bild 6 gegeben.

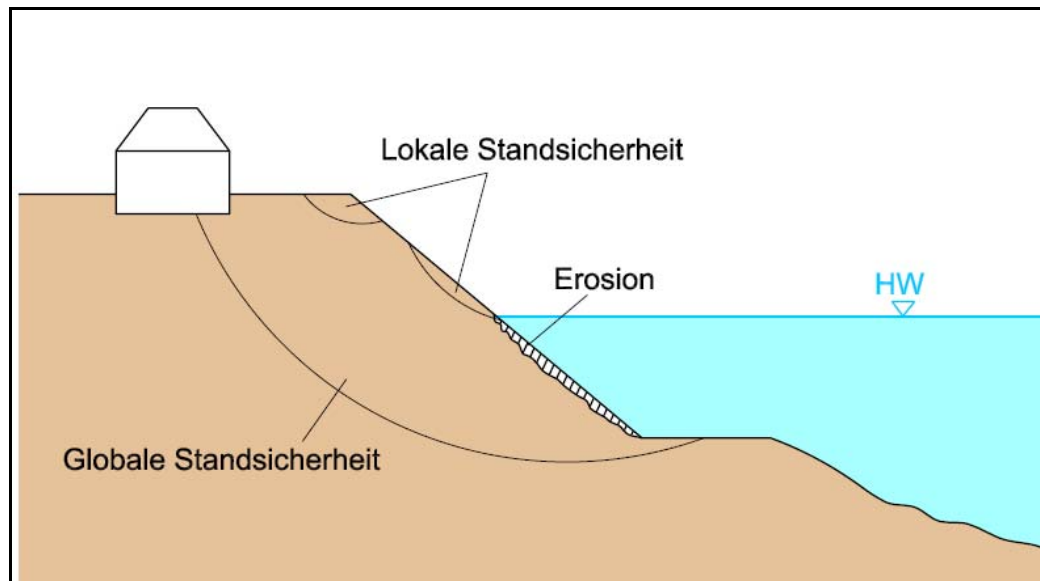


Bild 6: Übersicht der Gefährdungspotentiale

### **Globale Standsicherheit**

Als globale Standsicherheit bezeichnet man die Sicherheit von Bruchkörpern bei tief reichenden Bruchfugen. Diese können die Böschung und ggf. eine vorhandene Bebauung betreffen. Bei Verlust der globalen Standsicherheit ist das Schadenspotential erheblich: Böschungen können gänzlich versagen, größere Schäden an Gebäuden wie z.B. Mauerabbrüche sind denkbar.

### **Lokale Standsicherheit**

Die lokale Standsicherheit ist die Sicherheit gegen oberflächennahe Brüche, die i. d. R. nicht tiefer als 1 m unter die Böschungsoberfläche reichen. Da es sich hier um kleinräumige Schäden handelt, ist das Gefährdungspotential erheblich geringer. Falls es zu Schäden kommt, ist in der Regel eine schnelle Sanierung möglich. Dennoch ist bei Schäden, die nicht saniert werden, mit einer Verschlechterung des Zustands zu rechnen. Nennenswertes Gefährdungspotential auf Grund lokalen Versagens gibt es hier nur für den oberen Weg.

### **Erosion**

Erosion kann in unzureichend geschützten Uferbereichen, die durch Wasserströmungen bei Hochwasser belastet sind, entstehen. Das Schadenpotential ist bei längerer Einwirkung, z. B. bei lang anhaltenden Hochwassern, wegen eines daraus resultierenden Erosionsfortschreitens besonders groß.



### 5.3 Einteilung des Uferabschnitts

Der zu untersuchende Uferabschnitt wird an Hand der vorliegenden Unterlagen, deren Untersuchungsergebnisse und eigenen Ortsbegehungen in folgende Bereiche eingeteilt:

- **Abschnitt A:** Rhein-km 661,70 – 663,24
- **Abschnitt B:** Rhein-km 663,24 – 663,70
- **Abschnitt C:** Rhein-km 663,70 – 664,30

## 6 Untersuchung der globalen Böschungsstandsicherheit

### 6.1 Allgemeines

Ziel ist die Untersuchung, ob die globale Böschungsstandsicherheit gewährleistet ist und wie weit eine Bebauung von der Böschungskante entfernt sein muss, damit sie vor einem möglichen Böschungsbruch sicher ist.

Die Standsicherheit wird mit dem Programm GGU-Stability (Version 8.16) errechnet. Die Berechnung erfolgt nach DIN 4084: 2002-11 nach der Gleitkreistheorie von Bishop. Der Nachweis globaler Standsicherheit wird auf der Grundlage des Teilsicherheitskonzeptes für den Grenzzustand GZ 1C gemäß DIN 1054: 2005-01 durchgeführt. Es gelten die Teilsicherheitsbeiwerte für den nachzuweisenden Lastfall 1. Der Ausnutzungsgrad  $\mu \leq 1$  ist nachzuweisen.

### 6.2 Abschnitt A: Rhein-km 661,70 – 663,24

Schon aus dem Gutachten Bieberstein (s. U 5) geht für diesen Abschnitt eine nicht ausreichende globale Standsicherheit hervor. Gleiches gilt für die Standsicherheitsuntersuchungen am Haus Rheinuferweg 79 (s. U 2).

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, i. w. die Standsicherheit der bestehenden Bebauung bezüglich eines möglichen Böschungsbruchs abzuschätzen und Kriterien für die Veranlassung weiterer Untersuchungen zu formulieren.

Es werden zwei unterschiedliche geotechnische Modelle (verschiedene Untergrundaufbauten und Bodenparametersätzen) untersucht, die sich beide auf die Hangstandsicherheitsuntersuchung U 2 stützen:

1. Scherparameter in der für die Sicherheit relevanten Schicht aus der Annahme eines vorherrschenden Grenzgleichgewichts rückgerechnet.
2. Auf der sicheren Seite liegende Parameter, für die Standsicherheit ungünstigster Ansatz.





Untersucht werden die globale Böschungsstandsicherheit, sowie die Standsicherheit einer vorhandenen unterkellerten Bebauung in Bezug auf einen möglichen Böschungsbruch im Bereich der böschungsnahen Hauskante. Die Standsicherheitsuntersuchung der Bebauung betrachtet den Gleitkreis, der sich bei Versagen der Böschung, unterhalb der Unterkellerung der Bebauung ausbildet (s. Anlage A 2.3). Für die globale Standsicherheit der gesamten Böschung wird sich jedoch ein anderer Gleitkreis mit einem ungünstigeren Ausnutzungsgrad ergeben (s. Kap. 5.2.2). Grundbruch wird nicht untersucht.

## 6.2.1 Geotechnische Modelle

### Maßgeblicher Böschungsquerschnitt

Der maßgebliche Böschungsquerschnitt für diesen Bereich ergibt sich aus einer Voruntersuchung des Gutachtens Bieberstein (s. U 5). Hier wurden Böschungsgeometrien (Rhein-km 661,70 – 663,40) auf Grundlage aufgenommener Querschnitte systematisch ausgewertet. Diese Auswertung kommt zu dem Ergebnis, dass der Rhein-km 662,70 (Querschnitt 21, s. U 5) mit einem nahezu über die gesamte Böschungslänge vorherrschenden Neigungswinkel von  $\beta \approx 42^\circ$  die ungünstigste Geometrie aufweist.

- Maßgeblicher Böschungsquerschnitt ist Querschnitt 21 an Rhein-km 662,70 (s. Anlage A 1.2)

### Grundwasserstand

Der Grundwasserstand im Böschungsbereich korrespondiert wegen der Nähe des Rheins mit einer gewissen Zeitverzögerung mit dessen Wasserstand. Von Einfluss nehmenden Sickerstrecken im Böschungsbereich ist nicht auszugehen (s. U 5). Als zu untersuchender Grundwasserstand wird die Hochwassermarke I (HW I) herangezogen. Die HW I geht aus dem Querschnitt 21 (s. Anlage A 1.2) hervor.

- Der Grundwasserstand wird mit der HW I zu NN+46,70m festgelegt.

### Lastannahmen

Für die Verkehrslast auf der Fahrbahn an der Böschungskante wird eine Verkehrslast von 10 kPa angesetzt. Für die bestehende Bebauung wird eine Last von 80 kPa angesetzt (s. U 2).

### **Bodenparameter aus Unterlage U2**

Die Spannweite der in U 2 ermittelten relevanten Bodenparameter setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 1: Verwendete charakteristische Bodenparameter aus Unterlage U 2

Boden	Bezeichnung	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		$\phi'$ [°]		$c'$ [kPa]	
		von	bis	von	bis	von	bis
Auffüllung	U,s, wch-stf	19	20,5	27,5	27,5	0	2
Hochflut-lehm	U,t,s', stf-hfst	19	20,5	27,5	30	0	5
Terassen-sedimente	G,s + S,g', mitteldicht	19	20	32,5	35	0	0
Terassen-sedimente	G,s, dicht	20	21	35	37,5	0	0

### **Untergrundaufbauten**

Beiden unterschiedlichen Untergrundaufbauten und Parametersätzen liegen die gleichen Annahmen des Böschungsquerschnitts, des Grundwasserstandes sowie der Lastannahmen zugrunde.

#### **Untergrundaufbau 1: Rückrechnung der Bodenparameter aus Grenzgleichgewicht**

Vorhandene Bohraufschlüsse (s. U 2) dienen als Grundlage für die Bestimmung des Untergrundaufbaus im maßgeblichen Querschnitt. Dieser wird um die Schicht eines Mutterbodens ergänzt. Dadurch lässt sich eine im Mutterboden vorhandene Durchwurzelungskohäsion ansetzen, welche zumindest bereichsweise vorhanden ist und sich günstig auf die Standsicherheit auswirkt. Geometrie und Schichtaufbau sind in Anlage A 2.1 dargestellt.

Für die Schicht des Mutterbodens wird ein Reibungswinkel von  $\phi = 30^\circ$  und auf Grund des vorhandenen Bewuchses eine Durchwurzelungskohäsion von 7kPa angesetzt. Diese Kohäsion trägt weniger zur globalen als zur lokalen Standsicherheit der Böschung bei, da der Anteil des Gleitkreises, der durch den Mutterboden geht, im Verhältnis zur Gesamtlänge des Gleitkreises sehr gering ist (s. Anlage A 2.1).

Der für die globale Böschungsstandsicherheit maßgebliche Gleitkreis verläuft größtenteils durch die Auffüllung (s. Anlage A 2.1). Somit spielen die Scherparameter der anderen Schichten für die globale Standsicherheit eine untergeordnete Rolle. Zur Bestimmung desjenigen Reibungswinkels in der Auffüllung, der zur vorhandenen Standsicherheit beiträgt, wird der Reibungswinkel in nachfolgenden Standsicherheitsberech-

nungen sukzessiv erhöht bis ein Ausnutzungsgrad der globalen Standsicherheit von  $\mu \leq 1$  erreicht wird. Alle anderen Scherparameter werden aus U 2 (s. Tabelle 1) für den für die Standsicherheit günstigsten Fall angenommen.

Alle Teilsicherheitsbeiwerte werden auf Grund des bodenmechanischen Grenzzustands zu 1,0 festgesetzt.

Die sukzessive Erhöhung des Reibungswinkels in der Auffüllung ergibt die in Tabelle 2 aufgeführte Parameterkombination im Grenzzustand ( $\mu \approx 1,0$ ).

Tabelle 2: Parameterkombination im Grenzzustand, Rhein-km 662,7

Mutterboden		Auffüllung		Schluff		Kies, Sand		Ausnutzungsgrad
$\varphi'_k$	$c'_k$	$\varphi'_k$	$c'_k$	$\varphi'_k$	$c'_k$	$\varphi'_k$	$c'_k$	$\mu$
[°]	[kPa]	[°]	[kPa]	[°]	[kPa]	[°]	[kPa]	[-]
30	7	<b>34</b>	2	30	5	37,5	0	<b>0,98</b>

- Somit wird für eine erste Standsicherheitsuntersuchung der Bebauung im Untergrundaufbau 1 mit den Parametern nach Tabelle 2 gerechnet.

### Untergrundaufbau 2 mit ungünstigsten Bodenparametern

Es wird der aus den Unterlagen U 2 hervorgehende Untergrundaufbau mit den dort ermittelten Bodenparametern, die sich auf die Standsicherheit am ungünstigsten auswirken, verwendet (s. auch Tabelle 1). Die Scherparameter sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Wichten werden aus dem Untergrundaufbau 1 übernommen. Der Schichtaufbau ist aus Anlage A 2.4 ersichtlich.

Tabelle 3: Parametersatz mit ungünstigen Werten Rhein-km 662,7

Auffüllung		Schluff		Kies, Sand	
$\varphi'_k$	$c'_k$	$\varphi'_k$	$c'_k$	$\varphi'_k$	$c'_k$
[°]	[kPa]	[°]	[kPa]	[°]	[kPa]
27,5	0	27,5	0	32,5	0

## 6.2.2 Ergebnisse

### Untersuchungen zur Bebauung

In Tabelle 4 ist der Ausnutzungsgrad der Standsicherheit in Abhängigkeit des Untergrundaufbaus und des Bebauungsabstandes von der Böschungskante dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass der Ausnutzungsgrad der Standsicherheit bei zunehmendem Abstand der Bebauung von der Böschungskante abnimmt, d.h. die Standsicherheit nimmt mit steigendem Bebauungsabstand zu.

Tabelle 4: Ausnutzungsgrad der Standsicherheit in Abhängigkeit von der Lage der Bebauung für beide Untergrundaufbauten

Abstand der Bebauung von der Böschungskante [m]	Ausnutzungsgrad $\mu$ [-]	
	Untergrundaufbau 1	Untergrundaufbau 2
1,7	1,01	1,28
1,8	<b>0,98</b>	1,27
2,0	0,96	1,12
3,0	-	1,04
4,0	-	1,01
5,0	-	<b>0,98</b>

Ab einer Entfernung von 1,80m bilden sich unter Annahme des Untergrundaufbaus 1 keine versagensgefährdeten Gleitkreise, die die Bebauung schneiden, aus (s. Anlage A 2.3). Für den ungünstigeren Untergrundaufbau ist hierfür ein Abstand von 5,0 m erforderlich (s. Anlage A 2.4).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Standsicherheit der Bebauung wesentlich von den Bodenparametern abhängig ist. Für die Ermittlung eines Sanierungsbedarfs sind hier also objektorientierte Baugrunduntersuchungen erforderlich.

### Globale Böschungsstandsicherheit für Untergrundaufbau 2

Zum Vergleich wurde die globale Böschungsstandsicherheit im Querschnitt bei Rhein-km 662,7 mit dem ungünstigen Untergrundaufbau 2 untersucht.

Der ungünstigste Ausnutzungsgrad der Böschungsstandsicherheit errechnet sich zu  $\mu = 2,08$  (s. Anlage A 2.5). Der sich hierbei ausgebildete Gleitkreis weist für eine globale Standsicherheitsbetrachtung eine relativ geringe Tiefe aus. Betrachtet man in derselben Berechnung tiefer reichende Gleitkreise (s. Anlage A 2.6), wird auch hier mit  $\mu = 1,25$  ein nicht ausreichender Ausnutzungsgrad erreicht.

Die globale Böschungsstandsicherheit des maßgeblichen Querschnitts ist mit dem ungünstigen Untergrundaufbau 2 bei weitem nicht gegeben, was die Analyse aus U2 bestätigt.

## 6.3 Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70

### 6.3.1 Geotechnisches Modell

#### Maßgeblicher Querschnitt

Dieser Abschnitt wird durch das Basaltpflaster charakterisiert (s. U 1).

Die Querschnitte Rhein-km 663,3 – 663,7 wurden an Hand von Vermessungen und Peilungen (s. U 12) ausgewertet und der maßgebliche Querschnitt auf Grund der größten mittleren Böschungsneigung bestimmt. (s. Tabelle 5). Der maßgebliche Böschungsquerschnitt liegt aufgrund der größten mittleren und maximalen Böschungsneigung bei Rhein-km 663,5.

Tabelle 5: Auswertung der Querschnitte Rhein-km 663,3 – 663,7

Rhein-km	$\beta_{\max}$ [°]	$\beta_m$ [°]
663,30	28	17
663,40	29	21
<b>663,50</b>	<b>35</b>	<b>26</b>
663,60	21	18
663,70	29	18

#### Grundwasserstand

Der Grundwasserstand im Böschungsbereich korrespondiert wegen der Nähe des Rheins mit einer gewissen Zeitverzögerung mit dessen Wasserstand. Als zu untersuchender Grundwasserstand wird die Hochwassermarken I (HW I) herangezogen. Diese wurde aus den Angabe bei Rhein-km 663,8, (HW II bei NN+48,55m) sowie bei Rhein-km 662,7 (HW I bei NN+46,70m; HW II bei NN+48,71m) durch lineare Interpolation zu HW I bei Rhein-km 663,5: NN+46,58m ermittelt.

#### Untergrundaufbau und Bodenparameter

Zu Rhein-km 663,5 liegen keine Bodenerkundungen vor. Aus diesem Grund werden zur Abschätzung Untergrundaufbau und Bodenparameter aus Gutachten U 3 herangezogen und um die Schicht eines zu 30cm mächtig angenommen Basaltpflasters entlang der Böschung ergänzt. Der Untergrundaufbau (Untergrundaufbau 3) wird in denen zu Rhein-km 663,5 nächsten Bohrungen wie folgt beschrieben:

Schicht 1: Auffüllung, Mächtigkeit 0,5m, bestehend aus Sand, Kies, Steinen und Schlackkereste, lockere Lagerung

Schicht 2: Sande und Kiese, mitteldicht bis dicht gelagert

Die Spannweite der in U 3 ermittelten Scherparameter setzt sich wie folgt zusammen:

Tabelle 6: Scherparameter aus U 3 für Rhein-km 663,5

Boden	$\phi' [^\circ]$		$c' [kPa]$	
	von	bis	von	bis
Auffüllung	27,5	32,5	0	0
Kies, Sand	35	37,5	0	0

Die Wichten werden entsprechend Kap. 6.2.1 festgelegt. Im Folgenden wird sowohl mit den für die Standsicherheit ungünstigsten als auch günstigsten Scherparametern gerechnet. Diese setzen sich wie folgt zusammensetzen:

Tabelle 7: Ungünstige und günstige Parametersätze für Rhein-km 663,5

Auffüllung		Kies, Sand		Basaltplaster	
$\phi'_k [^\circ]$	$c'_k [kPa]$	$\phi'_k [^\circ]$	$c'_k [kPa]$	$\phi'_k [^\circ]$	$c'_k [kPa]$
27,5	0	35	0	45	0
32,5	0	37,5	0	45	0

### 6.3.2 Ergebnis

Der Ausnutzungsgrad der globalen Böschungsstandsicherheit berechnet sich mit dem ungünstigen Parametersatz zu  $\mu = 1,17$ , für den günstigen Parametersatz zu  $\mu = 1,07$  (s. Anlage A 2.7 und A 2.8). Die globale Böschungsstandsicherheit ist nicht gegeben, wenn auch bei Ansatz der günstigen Bodenparameter relativ knapp.

### 6.4 Abschnitt C: Rhein-km 663,70 – 664,30

Dieser Bereich wird durch die 1998/99 errichtete Hochwasserschutzmauer charakterisiert (s. U 1 und Bild 7).



Bild 7: Hochwasserschutzmauer im Bereich Rhein-km 663,70 – 664,1

#### 6.4.1 Geotechnisches Modell

##### Maßgeblicher Querschnitt

Die Querschnitte Rhein-km 663,7 – 664,3 wurden an Hand von Vermessungen und Peilungen (s. U 12) ausgewertet und der maßgebliche Querschnitt auf Grund der größten mittleren Böschungsneigung bestimmt (s. Tabelle 8). Als maßgeblicher Böschungsquerschnitt ergibt sich Rhein-km 663,8. Die Mauer wird nicht gesondert modelliert.

Tabelle 8: Auswertung der Querschnitte Rhein-km 663,8 – 664,3

Rhein-km	$\beta_{\max}$ [°]	$\beta_m$ [°]
<b>663,8</b>	33	<b>22</b>
663,9	27	14
664,0	21	20
664,1	20	19
664,2	39	13
664,3	28	18

##### Grundwasserstand

Der Grundwasserstand im Böschungsbereich korrespondiert wegen der Nähe des Rheins mit einer gewissen Zeitverzögerung mit dessen Wasserstand. Als zu untersuchender Grundwasserstand wird die Hochwassermarke I (HW I) herangezogen. Diese lässt sich analog Kap. 6.3.1 zu NN+46,54m ermitteln.

## Untergrundaufbau und Bodenparameter

Für Rhein-km 663,8 liegt Bohrung B4 aus Gutachten U 3 vor. Daraus ergibt folgender Untergrundaufbau:

- Schicht 1: Auffüllung, Mächtigkeit 0,5m, bestehend aus Sand, Kies, Steinen und Schlackereeste, lockere Lagerung  
Schicht 2: Schluff, schwach sandig bis sandig, Mächtigkeit 0,7m  
Schicht 2: Sande und Kiese, mitteldicht bis dicht gelagert

Tabelle 9: Scherparameter aus U 3 für Rhein-km 663,8

Boden	$\varphi'$ [°]		$c'$ [kPa]	
	von	bis	von	bis
Auffüllung	27,5	32,5	0	0
Schluff	27,5	32,5	2	8
Kies, Sand	35	37,5	0	0

Die Spannweite der in U 3 ermittelten Scherparameter ist in Tabelle 9 beschrieben. Die Wichten werden entsprechend Kap. 6.2.1 festgelegt. Es wird mit dem für die Standsicherheit ungünstigsten Parametersatz gerechnet.

### 6.4.2 Ergebnis

Der Ausnutzungsgrad der globalen Böschungsstandsicherheit des Querschnitts Rhein-km 663,8 errechnet sich zu  $\mu = 0,95$ , also  $\mu < 1$  (s. Anlage A 2.9). Somit ist im Abschnitt Rhein-km 663,70 – 664,30 die globale Böschungsstandsicherheit erreicht.

## 7 Lokale Standsicherheit

### 7.1 Allgemeines

Lokales Versagen kann sich durch ein böschungparalleles Hangabrutschen in geringer Tiefe (bei fehlender Kohäsion) oder bei kohäsiven Böden durch flache, kreisförmige Bruchkörper äußern (s. auch Kap. 5).

Bereichsweise ist die lokale Standsicherheit derzeit offensichtlich nicht gegeben. Dies belegen lokale Abbrüche im Böschungsbereich (s. Kap. 3). Die lokale Standsicherheit des Weges wird nicht rechnerisch geprüft, denn diese ist augenscheinlich auch nicht gegeben (s. Kap. 3).



Die lokale Standsicherheit wird wie folgt untersucht:

### **Böschungsparalleles Abrutschen ohne Ansatz einer Kohäsion**

Für die lokale Standsicherheit gegen oberflächennahes, böschungsparalleles Hangabrutschen ist die oberste Bodenschicht zu betrachten. Für kohäsionslose Böden berechnet sich der Ausnutzungsgrad  $\mu$  der lokalen Standsicherheit bei einer Böschungsneigung  $\beta$  und dem zu Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_\varphi$  für  $\tan \varphi'$  (LF1:  $\gamma_\varphi = 1,25$ ):

$$\mu = \frac{\tan \beta}{\tan \varphi' / \gamma_\varphi}$$

### **Oberflächennahes Hangabrutschen mit dem Ansatz von Kohäsion**

Flache Gleitkreise, die nicht tiefer als 1m unter die Böschungsoberfläche reichen, werden auf ihre lokale Standsicherheit nach DIN 4084: 2002-11 überprüft. Es wird das Programm GGU-Stability (Version 8.16) verwendet. Die Berechnung erfolgt für den Grenzzustand GZ 1C gemäß DIN 1054: 2005-01 für den Lastfall 1 durchgeführt.

## **7.2 Abschnitt A: Rhein-km 661,70 – 663,24**

### **Ergebnis Böschungsparalleles Hangabrutschen**

Im maßgeblichen Böschungsquerschnitt Rhein-km 662,7 herrscht eine maximale Böschungsneigung von  $\beta = 42^\circ$  (s. U 5). Mit dem in U 2 ermittelten Reibungswinkel von  $\varphi' = 27,5^\circ$  in der Auffüllung und dem in Kap. 6.2.1 errechneten Reibungswinkel von  $\varphi' = 34^\circ$  ergeben sich damit Ausnutzungsgrade  $\mu > 1$  der lokalen Standsicherheit (s. Tabelle 10).

Tabelle 10: Ausnutzungsgrade der lokalen Standsicherheit in Abhängigkeit des Reibungswinkels für Rhein-km 662,7

<b>Max. Böschungsneigung</b> $\beta_{\max} [^\circ]$	<b>Reibungswinkel</b> $\varphi'_k [^\circ]$	<b>Ausnutzungsgrad</b> $\mu [-]$
42	27,5	2,16
42	34	1,67

### **Ergebnis Oberflächennahe Gleitkreise**

Unter der Voraussetzung, dass eine Kohäsion in der Auffüllung bzw. im Mutterboden vorhanden ist, werden Gleitkreise untersucht, die bis ca. 1m unter die Böschungsoberfläche reichen. Angesetzt wird hier der in Kap. 6.2.1 beschriebene Untergrundaufbau 1 mit dem Parametersatz aus dem angenommenen Grenzgleichgewicht.

Aus diesem geht ein Ausnutzungsgrad von  $\mu = 1,09$  hervor (s. Anlage A 3.1), so dass die Böschung selbst mit Ansatz einer Kohäsion nicht gegen das Versagen oberflächennaher Gleitkreise sicher ist.



Somit ist lokales Versagen sowohl durch oberflächennahes Abrutschen als auch durch flache Bruchkörper möglich.

### **7.3 Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70**

Der gesamte Bereich Abschnitt B ist mit Basaltplaster geschützt. Auch wenn dieses nicht durchgängig ist, so waren bei der Ortsbegehung durch die BAW (s. U 13) keine lokale Abbrüche erkennbar. Daher wird dieser Abschnitt als lokal standsicher angesehen.

### **7.4 Abschnitt C: Rhein-km 663,70 – 664,30**

Die maximale Böschungsneigung beträgt hier  $\beta = 39^\circ$  (vgl. Tabelle 8) für Querschnitt Rhein-km 664,2. Der Bodenaufbau in diesem Bereich wird mit den Bohrungen B13 und B14 aus U 3 beschrieben. Hieraus stehen im ersten Meter unterhalb der Böschungsoberfläche Sande an. Der für die Standsicherheit günstigste Scherparameter kann Tabelle 6 entnommen werden. Der Ausnutzungsgrad  $\mu$  der lokalen Standsicherheit beträgt somit im Lastfall 1:

$$\mu = 1,32.$$

Eine ausreichende lokale Standsicherheit ist damit nicht nachgewiesen. Dies bestätigen die Beobachtungen in den Ortsbegehungen durch die BAW.

## **8 Erosion durch Wasserströmung**

### **8.1 Allgemeines**

Untersucht wird, inwieweit bei Hochwasser der anstehende, ungeschützte Boden durch die Wasserströmungen erodieren kann. Für die Ermittlung der Erosionsgefährdung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Hier werden die auf die Fragestellung passenden Verfahren von Pilarczyk und Shields verwendet. (s. Anlage A 4.1).

Als Einwirkung geht bei beiden Verfahren die Fließgeschwindigkeiten des Wassers ein. Die Fließgeschwindigkeiten an den untersuchten Stellen wurden einem numerischen Modell der BAW entnommen. Das Modell basiert auf einer 2D-Simulation der Strömungsverhältnisse (s. U 10) für das MHW 02 (Mittelhochwasser 2002, entspricht etwa der HW I) und dem HW 95 (Hochwasser 1995).

Als Widerstand gegen Erosion gehen in die Berechnung charakteristische Korndurchmesser des anstehenden kohäsionslosen Bodens ein. Hier werden sowohl Bodenproben im oberflä-

chennahen Böschungsbereich als auch abschätzend Korngrößen, wie in U 2 beschrieben, zur Untersuchung herangezogen.

## 8.2 Abschnitt A: Rhein-km 661,70 – 663,24

Zur Abschätzung der Erosionssicherheit wurde in diesem Bereich bei einer Ortsbegehung (U 13) eine oberflächennahe Bodenprobe bei Rhein-km 663,13 entnommen. Durch Laborversuche wurde der Boden als stark schluffiger Sand klassifiziert und die für die Erosionskriterien ausschlaggebenden Korndurchmesser bestimmt. Das Ergebnis der Untersuchung der Erosionskriterien ist in Tabelle 11 aufgeführt (s. Anlage A 4.2).

Tabelle 11: Untersuchung der Erosionskriterien für Rhein-km 661,70 – 663,24

Boden	MHW 02 Kriterium erfüllt?		HW 95 Kriterium erfüllt?	
	Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk
S,u*	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN

Die Auswertung in Tabelle 11 macht deutlich, dass die Erosionsstabilität für den gesamten Abschnitt A nicht gegeben ist.

Auch die nach U2 unter den oberflächennahen sandigen Schluffen anstehenden Sande und Kiese erfüllen die Erosionskriterien größtenteils nicht (s. Anlage A 4.3), d. h. auch die tieferen Bodenschichten sind nicht als erosionssicher zu erachten. Es besteht Sanierungsbedarf.

## 8.3 Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70

In diesem Bereich liegt größtenteils eine Ufersicherung aus Basaltplaster vor und ist somit erosionssicher (s. U 1). Durch die letzte Ortsbegehung (U 13) wird diese Aussage untermauert, da zu diesem Zeitpunkt keine Schäden erkennbar waren.

## 8.4 Abschnitt C: Rhein-km 663,70 – 664,30

In diesem Abschnitt wurden bei der Ortsbegehung (U 13) zwei Bodenproben entnommen. Beide wurden in Laborversuchen zu Sand mit schluffigen, tonigen Anteilen bestimmt. Es folgt Tabelle 12 (s. Anlage A 4.2):

Tabelle 12: Untersuchung der Erosionskriterien für Rhein-km 663,70 – 664,30

Boden	MHW 02 Kriterium erfüllt?		HW 95 Kriterium erfüllt?	
	Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk
S,u,t´	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
S,u*,t´,mg´	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN

Der Boden im betrachteten Uferbereich ist nicht erosionssicher.

Auch die nach U2 unter den oberflächennahen sandigen Schluffen anstehenden Sande und Kiese erfüllen die Erosionskriterien größtenteils nicht (s. Anlage A 4.3), d. h. auch die tieferen Bodenschichten sind nicht als erosionssicher zu erachten. Es besteht Sanierungsbedarf, auch wenn derzeit größtenteils Grasbewuchs vorhanden ist und der Abschnitt damit zumindest temporär gesichert ist.

## **9 Beurteilung des empfohlenen Sanierungsvorschlags aus dem Gutachten Bieberstein**

In dem Gutachten von Bieberstein (s. U 5) werden mehrere Sanierungsvarianten für den maßgeblichen Böschungsquerschnitt der Rhein-km 661,7 - 663,4 betrachtet. Ziel der Sanierungen ist es, die lokale und globale Standsicherheit der Böschungen sowie der betroffenen Gebäude herzustellen. Darüber hinaus sollen Belange des Landschaftsschutzes bzw. der Erhalt des Landschaftsbildes berücksichtigt werden. Zur Sicherung gegen Erosion wird in dem Gutachten von Bieberstein auf ein Gutachten von Prof. Bernhart (s. U 7) verwiesen, das jedoch in diesem Punkt keine Vorschläge macht.

Betrachtet werden im Gutachten Bieberstein eine Stützwand aus Gabionen, eine Spundwand am oberen Böschungsfuß sowie Doppelspundwände, von denen eine am Böschungskopf, die andere am Böschungsfuß eingebracht wird. Die Sanierungsvorschläge der Stützwand aus Gabionen und der Spundwand am oberen Böschungsfuß sorgen für eine ausreichende globale und lokale Standsicherheit. Um sowohl eine ausreichende globale Standsicherheit als auch den Erhalt des Landschaftsbildes zu gewährleisten wird in diesem Gutachten eine Sanierung mit Doppelspundwänden empfohlen.

Es handelt sich hierbei um zwei kürzere Spundwände, bei der die eine am Böschungskopf, die andere am Böschungsfuß eingebracht wird (s. Bild 8). Die globale Standsicherheit wird am Böschungskopf im Hinblick auf einen die Bebauung betreffenden Böschungsbruch und am Böschungsfuß unter Berücksichtigung eines sich möglicherweise ausbildenden tief liegenden Gleitkreises erlangt. Durch die Spundwände wird die Gleitfläche eines sich ausbildenden Gleitkreises (dieser umschließt beide Spundwände, s. Bild 8) so weit vergrößert, dass die globale Standsicherheit gewährleistet ist.

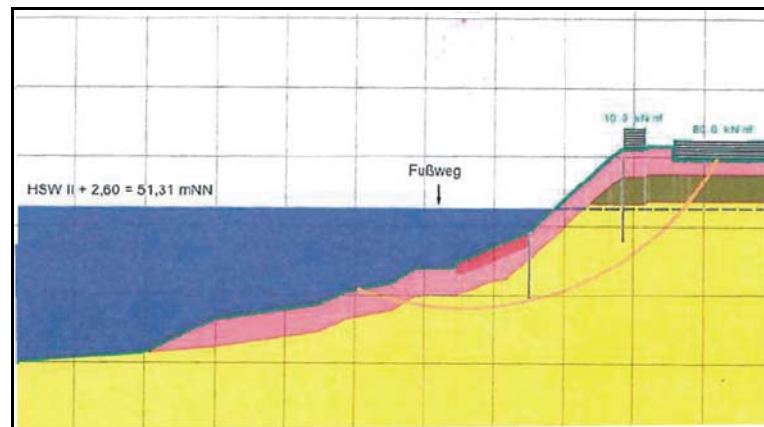


Bild 8: Spundwand am Böschungskopf und Böschungsfuß (Quelle: U 5)

In der Zone zwischen den beiden Spundwänden kann die lokale Standsicherheit nicht nachgewiesen werden. Dort kann es zu örtlichen Schäden kommen, die jedoch die Standsicherheit der gesamten Böschung nicht beeinträchtigen.

Dieser Vorschlag erfüllt das Kriterium der globalen Standsicherheit. Die Vegetation und das Erscheinungsbild der Landschaft bleiben weitestgehend erhalten. Die lokale Standsicherheit wird insofern verbessert, als dass der obere Weg gesichert ist und auch ein teilweiser Verlust von Boden in der Böschung durch die obere Spundwand abgefangen werden kann. Nicht verbessert wird die Erosionssicherheit bei Hochwasser. Der Sanierungsvorschlag ist grundsätzlich durchführbar, er ist jedoch noch um eine oberflächige Sicherung der Böschung gegen Erosion zu ergänzen.

Weiterhin ist noch die Dübelwirkung der Spundwände nachzuweisen, ggf. wäre der Einsatz von Bohrpfehlwänden an Stelle der Spundwände aufgrund des größeren Widerstandsmomentes technisch sinnvoller.

## 10 Schlussfolgerung

### 10.1 Bewertung der Gefährdungspotentiale

Aus der durchgeführten Gefährdungsanalyse lässt sich folgende abschnittbezogene Bewertung vornehmen:

- **Abschnitt A: Rhein-km 661,7 – 663,24**

Die Untersuchung des für diesen Bereich maßgeblichen Querschnitts Rhein-km 662,7 (s. U 5) lässt abschätzend folgenden Rückschluss zu:

- Die globale Standsicherheit der Böschung ist deutlich nicht gegeben. Möglicherweise kann sogar eine nah an der Böschungskante liegende Bebauung davon be-



troffen sein (s. Kap. 6.2.2). Eine unterkellerte Bebauung ist nach ersten Abschätzungen erst ab einem Abstand von 5 m von der Böschungskante als standsicher zu erachten.

- Die lokale Standsicherheit ist nicht gegeben.
- Die Erosionssicherheit ist nicht gegeben.

- **Abschnitt B: Rhein-km 663,24 – 663,70**

Die Untersuchung des für diesen Bereich maßgeblichen Querschnitts bei Rhein-km 663,5 lässt abschätzend folgenden Rückschluss zu:

- Die globale Standsicherheit ist nicht gegeben.
- Die lokale Standsicherheit ist nach einer Ortsbegehung augenscheinlich gegeben. Eine genaue Bestandsaufnahme des Basaltpflasters hat zu erfolgen.
- Die Erosionssicherheit des Uferbereiches ist durch das vorhandene Basaltpflaster vermutlich gegeben.

- **Abschnitt C : Rhein-km 663,70 – 664,30**

Die Untersuchung des für diesen Abschnitt maßgeblichen Querschnitt Rhein-km 663,8 lässt abschätzend folgenden Rückschluss zu:

- Die globale Standsicherheit ist gegeben.
- Die lokale Standsicherheit ist nicht gegeben.
- Die Erosionssicherheit ist nicht dauerhaft gegeben.

## 10.2 Weiterer Untersuchungsbedarf

Eine genauere Betrachtung der globalen Standsicherheit, insbesondere der Standsicherheit, welche die Bebauung betrifft, steht noch aus. Dies erfordert eine detaillierte Baugrunduntersuchungen und erdstatische Berechnungen.

### Bestandsaufnahme

Der derzeitige Bestand muss genau aufgenommen werden. Hierzu gehören sowohl ausreichend detaillierte Vermessungen des Uferbereichs, als auch die Lageaufnahme von vorhandenen Bauwerken wie z.B. Mauern aber auch Bepflasterungen. Dies kann nach derzeitigem Zustand erst nach einer Entfernung des Böschungsbewuchses erfolgen.

### Baugrunduntersuchungen

Als Grundlage für eine detaillierte Untersuchung der erforderlichen Sanierungen sind umfangreiche Baugrunduntersuchungen erforderlich. Die Baugrunduntersuchungen dienen sowohl den weiteren statischen Untersuchungen als auch als Basis für die Planung und Ausführung ggf. notwendiger Sanierungsmaßnahmen.

Abschnitt A: Hier liegt der größte Untersuchungsbedarf vor. Die Baugrunduntersuchungen sind insbesondere an kritischen Stellen (böschungsnaher Bebauung) zu verdichten (Auf-



schlussabstand 50 bis 100 m). Untersuchungen sind sowohl im tieferen Untergrund (Tiefe 10 bis 15 m unter GOK) als auch oberflächennah in der Böschung erforderlich

Abschnitt B: Es sind stichprobenartige Untersuchungen (Aufschlussabstand ca. 200 m) im tieferen Untergrund (10 bis 15 m unter GOK) erforderlich.

Abschnitt C: Die Untersuchungen sind stichprobenartig im tieferen Untergrund (Aufschlussabstand ca. 200 m) und verdichtet oberflächennah auf der Böschung erforderlich.

### **Erdstatische Berechnungen**

Mit Hilfe von erdstatischen Berechnungen sind die tatsächlich vorhandenen Standsicherheiten zu ermitteln. Als Grundlage sind noch die Geländegeometrien verdichtet aufzunehmen, wobei auch die anstehende Bebauung und deren Gründungssituation (i. W. Gründungstiefe) zu erfassen ist. Dies gilt in besonderem Maß wieder für den Abschnitt A.

Für alle Querschnitte sind in Standsicherheitsberechnungen weitere Lastfälle (z. B. HHW im Lastfall 3, schnell ablaufende Hochwasserwelle, etc.) zu untersuchen.

## **10.3 Sanierungen**

### **Globale Standsicherheit**

Über den Sanierungsbedarf globaler Standsicherheiten kann erst nach einer detaillierten Untersuchung entschieden werden. Um die globale Standsicherheit zu gewährleisten und das bestehende Landschaftsbild weitestgehend zu erhalten, eignet sich der im Gutachten Bieberstein empfohlene Sanierungsvorschlag „Spundwände am Böschungskopf und Böschungsfuß“ (s. Kap. 9). Die lokale Standsicherheit sowie die Erosionssicherheit kann hierbei jedoch ohne Eingriff in den am Hang vorhandenen Bewuchs nicht sichergestellt werden.

Bei der Bewertung der globalen Standsicherheit ist zu beachten, dass es derzeit keine offensichtlichen Schäden gibt, die auf ein Versagen des gesamten Hangs zurückzuführen sind. Das bedeutet, dass sich der Hang hinsichtlich der globalen Standsicherheit zwar in der Nähe des Grenzzustands befindet, z. Zt. jedoch stabil ist. Sollten die Ergebnisse der Standsicherheitsanalyse diese Vermutung bestätigen, sollte alternativ zu baulichen Maßnahmen auch die Beobachtungsmethode in Betracht gezogen werden. Hierbei kann ein für die globale Standsicherheit ein geringeres als durch die DIN 1054 vorgegebenes Sicherheitsniveau akzeptiert werden, wenn die Verformungen des Hanges oberflächennah und bis in den tieferen Untergrund (ca. 20 m) ständig beobachtet werden. Dies kann mittels periodischer geodätischer Vermessungen und mit Inklinometermessung erfolgen. Bauliche Sicherungsmaßnahmen wären nur dann erforderlich, wenn sich im Laufe der Zeit außergewöhnliche Verformungen (noch festzulegende Grenzverformungen) abzeichnen, die sich dann aber wahrscheinlich auf kleinere Bereiche eingrenzen lassen. Durch die Beobachtungsmethode könn-



ten ggf. erhebliche Kosten für Sanierungsmaßnahmen eingespart werden, denen ein vergleichsweise geringer Aufwand für regelmäßige Vermessungsarbeiten gegenübersteht.

### **Lokale Standsicherheit**

Sanierungsbedarf besteht für den oberen Weg, sofern er unmittelbar an der Böschungsoberkante verläuft. Um weitere Schäden des landseitigen Gehwegs zu verhindern, ist dieser gegen ein mögliches Abrutschen zu sichern. Diese Sicherung lässt sich z. B. mit einer kurzen Spundwand oder einer Stützmauer realisieren.

Des Weiteren ist Regenwasser von dem Gehweg geordnet abzuleiten, um Ausspülungen auf der darunter liegenden Böschung zu vermeiden. Hierfür ist das Regenwasser auf dem Gehweg über entsprechende Neigung zu sammeln und in gesicherten (z. B. gepflasterte) Rinnen über die Böschung abzuleiten.

Die lokale Standsicherheit auf der Böschung wird durch Maßnahmen zur Erosionssicherung mit verbessert (s. u.). Insbesondere in den steileren Bereichen ist dies ggf. nicht ausreichend. Hier wären umfangreiche Baumaßnahmen erforderlich, z. B. eine Hangvernagelung. Wahrscheinlich ist es hier jedoch angebracht, auf die vollumfängliche Herstellung der lokalen Sicherheit zu verzichten und geringfügige, seltene lokale Schäden im Rahmen der Bauwerksunterhaltung zu sanieren.

### **Erosion**

Die Erosionssicherheit ist durch Sanierungen zu gewährleisten. Dies kann durch die in U 9 erwähnte Baumaßnahme erlangt werden. Diese sieht folgende Arbeitsschritte vor:

- Fachgerechte Entfernung des vorhandenen Bewuchses inkl. der Wurzeln
- Abflachen der Böschung auf eine Neigung von 1: 1,5 oder flacher (in steileren Bereichen sind gesonderte Überlegungen anzustellen)
- Sicherung der Böschung durch einen Steinsatz (System-Betonsteine) mit filtergerechtem Aufbau bis ca. 0,5m über HHW
- Oberhalb HHW+0,5m Aufbringen von Mutterboden und Herstellung einer geschlossenen Grasnarbe

## **10.4 Priorisierung**

Die derzeit größte Gefährdung geht von der Erosion durch Wasserströmung aus, da ein entsprechendes Hochwasserereignis jederzeit auftreten kann. Dies betrifft besonders den Abschnitt A (Rhein-km 661,70 – 663,24). Grundsätzlich betrifft dies auch und C (Rhein-km 663,70 – 664,30), jedoch ist hier in großen Bereichen durch Grasbewuchs eine zumindest temporäre Sicherung vorhanden. Innerhalb dieser Abschnitte besteht besondere Gefährdung in Bereichen, in denen keine Grasnarbe vorhanden ist und wo der Boden z. T. ungeschützt freiliegt, was i. w. im Abschnitt A der Fall ist. Eine genauere Einteilung muss vor Ort erfolgen. Da bis zur Ausführung von Sanierungsarbeiten noch einige Zeit vergehen wird, empfehlen





wir, besonders gefährdete Bereiche provisorisch mit Wasserbausteinen der Klasse  $CP_{90/250}$  bzw.  $LMB_{5/40}$  zu sichern. Besonders gefährdet sind Stellen, in denen der Boden ungesichert auf der Böschung frei liegt, z. B. um Bäume.

Derselben Dringlichkeit ist die Sanierung des Fußwegs. Hier ist sowohl die lokale Standsicherheit als auch eine kontrollierte Entwässerung zu herzustellen, um weitere Schäden langfristig zu verhindern.

Hinsichtlich der globalen Standsicherheit sollten die Untersuchungen für die Abschnitte A und B zügig begonnen werden. Der konkrete Sanierungsbedarf ist danach abzuarbeiten.

Das Erreichen der lokalen Standsicherheit auf der Böschung durch Sanierungen steht nicht an oberster Priorität, ist aber in den Planungen mit zu berücksichtigen.

## **11 Weiteres Vorgehen**

Die verschiedenen Gefährdungspotenziale sind in der Ursache und der möglichen Sanierung miteinander gekoppelt. Insofern ist eine getrennte Bearbeitung nicht zielführend. Es ist ein ganzheitliches Konzept sowohl in der Planungsphase als auch in der Bauphase erforderlich. Daher sollten die nächsten Planungsschritte alle vorab genannte Maßnahmen behandeln. Die isolierte Bearbeitung eines kurzen Teilstücks ist technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll.

Im Einzelnen sind folgende Planungsschritte erforderlich:

1. Erstellung eines Baugrundgutachtens
2. Verdichtung der Vermessung
3. Bestandsaufnahme der Böschung (Mauern, Pflaster, etc.)
4. Standsicherheitsanalysen mit Darstellung des vorhandenen Sicherheitsniveaus
5. Ausarbeitung verschiedener Sanierungsvarianten mit Kostenschätzung

Diese Arbeiten sollten im Ganzen an ein kompetentes geotechnisches Planungsbüro vergeben werden.

Auf der Grundlage dieser Planungen ist die Sanierungsvariante in Abstimmung mit den Grundstückseigentümern und den beteiligten Behörden auszuwählen und durchzuplanen.

Für Rückfragen und zur fachtechnischen Begleitung der Arbeiten steht die BAW zur Verfügung.



Karlsruhe, 31.10.2008

Im Auftrag

Bearbeiterin

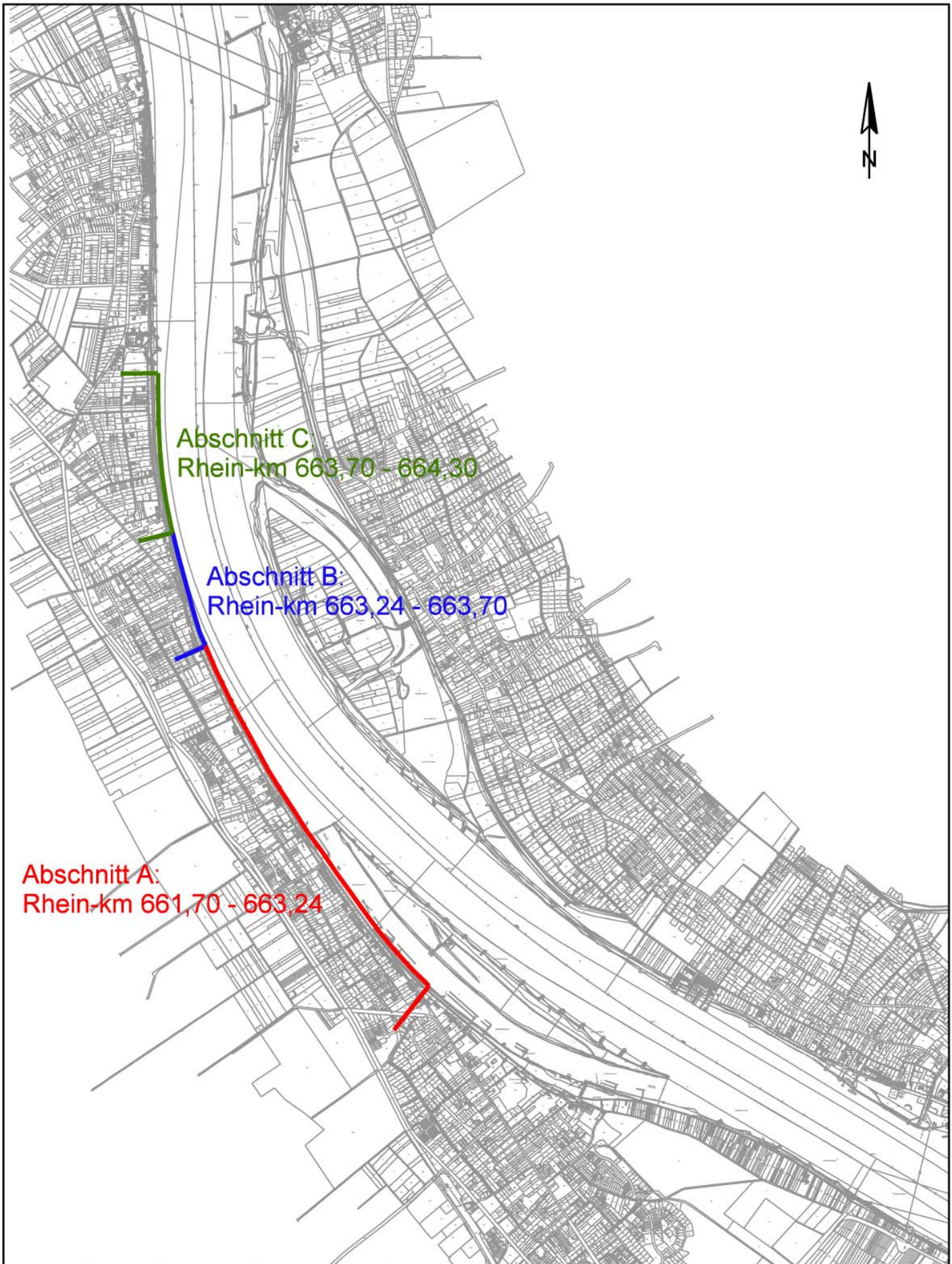
(Dr.-Ing. Kayser)

(Dipl.-Ing. Eisenmann)

# Anlagen

zur

Gefährdungsanalyse Bornheimer Hang



Abschnitt C  
Rhein-km 663,70 - 664,30

Abschnitt B:  
Rhein-km 663,24 - 663,70

Abschnitt A:  
Rhein-km 661,70 - 663,24

Geändert	Datum	Bearbeiter	Eisenmann	Datum
		Geprüft		
		Gezeichnet	Brossart	10.10.08
		Datei	A39520410252-CB-004.dgn	

Bornheimer Hang  
Rhein-km 660 bis Rhein-km 667

Maßstab  
1:20.000



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU  
Abteilung Geotechnik

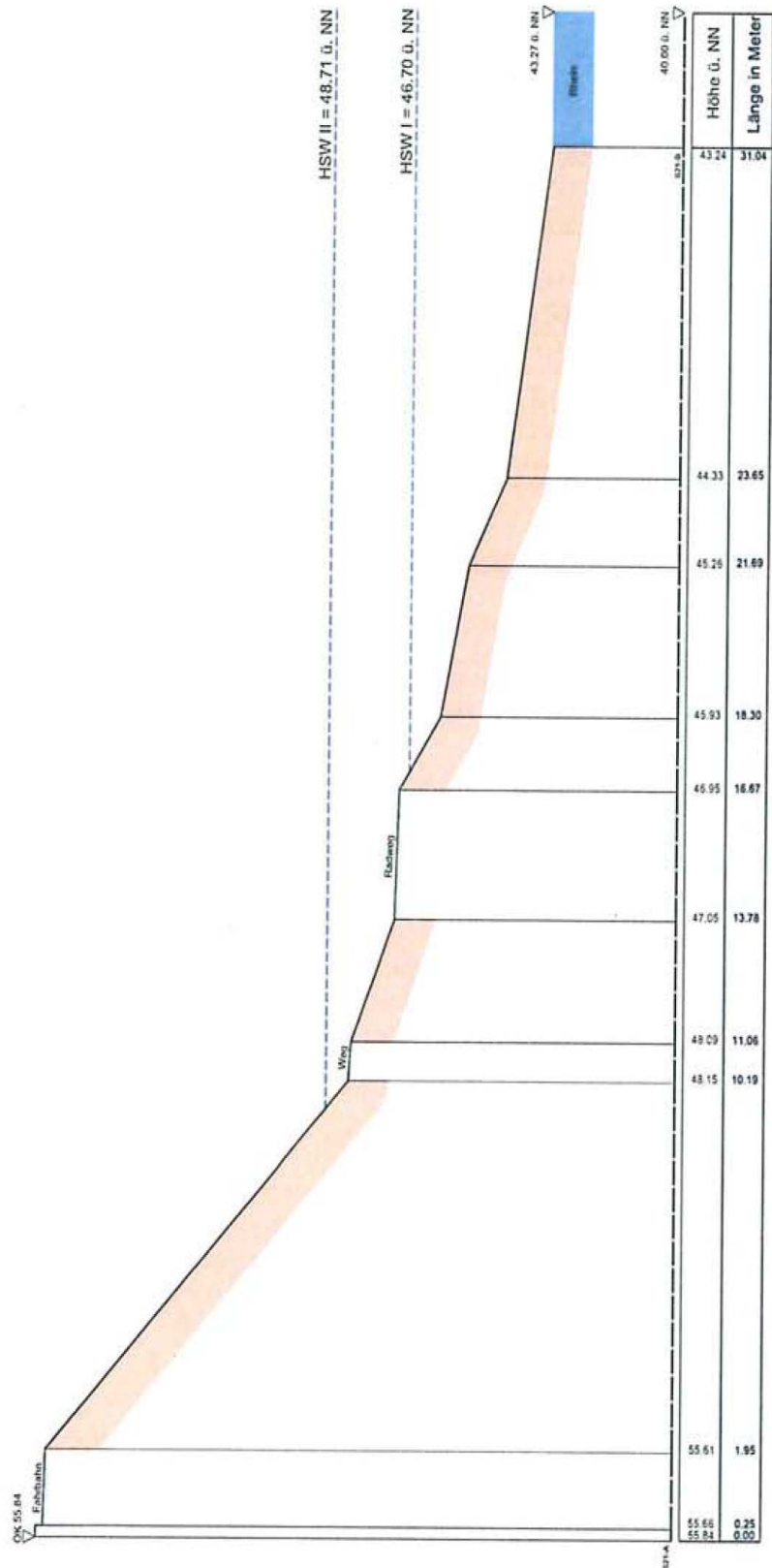


Auftrags-Nr.

A39520410252

Anlagen-Nr.

A 1.1



Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	07.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	

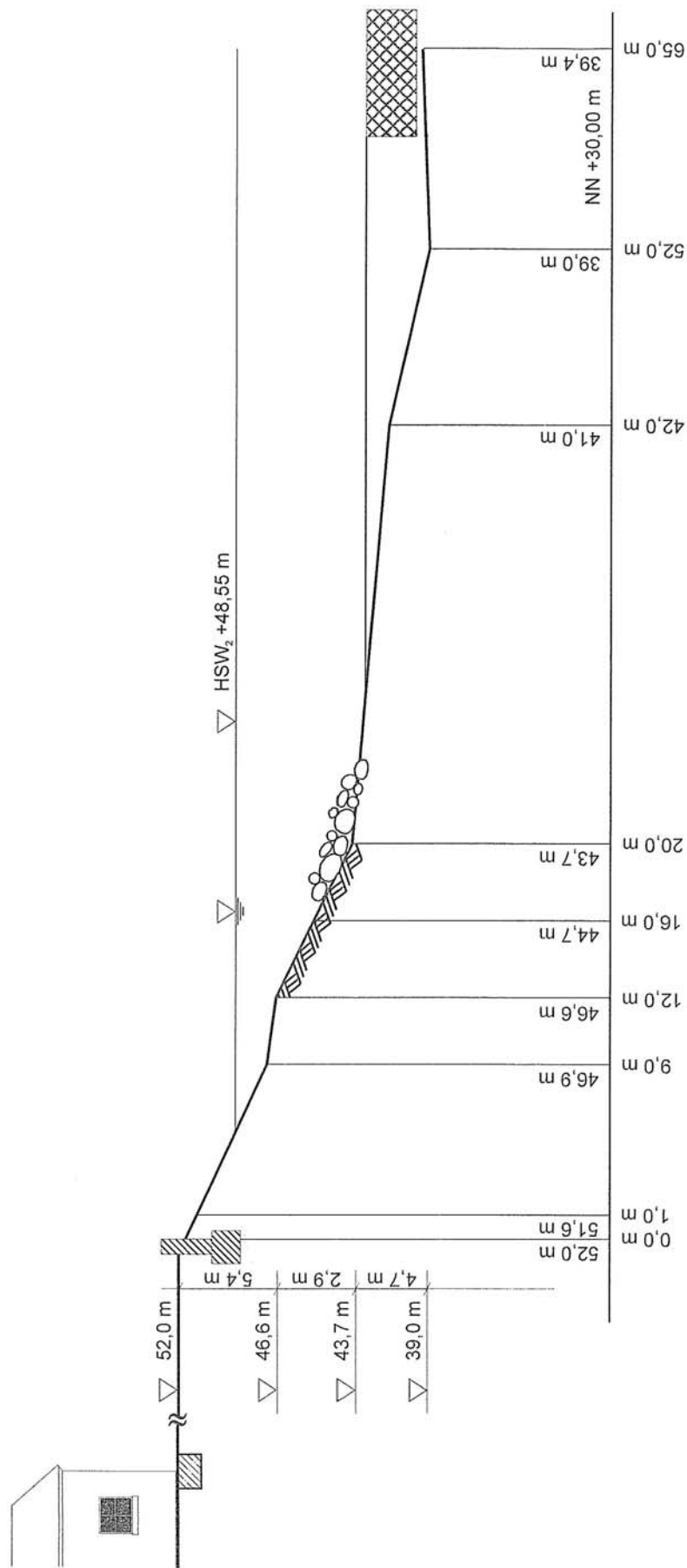


BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU  
Abteilung Geotechnik



Maßstab  
-

Bornheimer Hang Rhein-km 662,7 Querschnitt 21 (vgl. U7)	
Auftrags-Nr. A39520410252	Anlagen-Nr. A 1.2



Geändert	Datum	Bearbeiter	Eisenmann	Datum
		Geprüft		
		Gezeichnet	Brossart	18.08.08
		Datei	A39520410252-CB-002.cdr	

Bornheimer Hang  
Rhein - km 663,8

Maßstab



BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU  
Abteilung Geotechnik

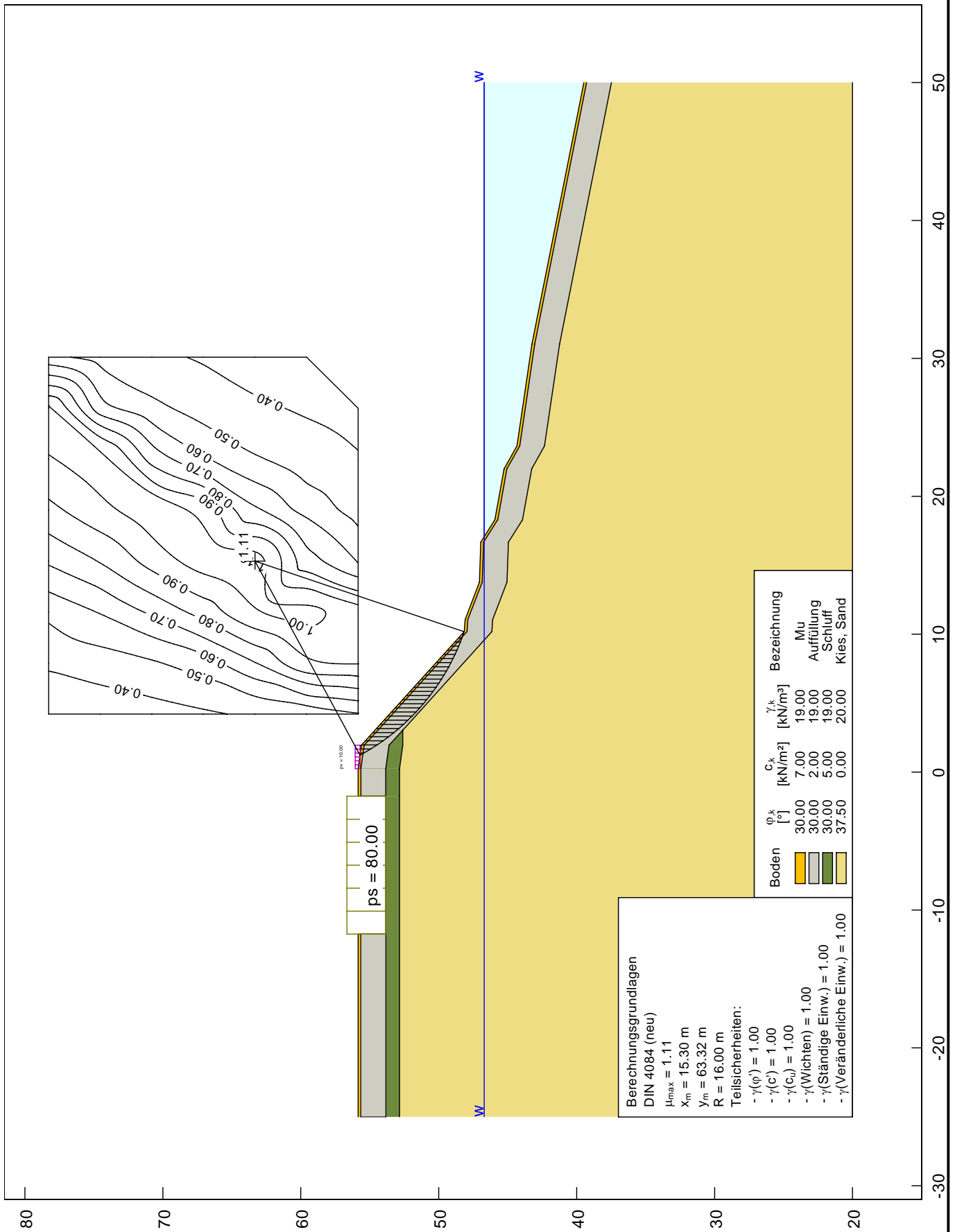


Auftrags-Nr.

A39520410252

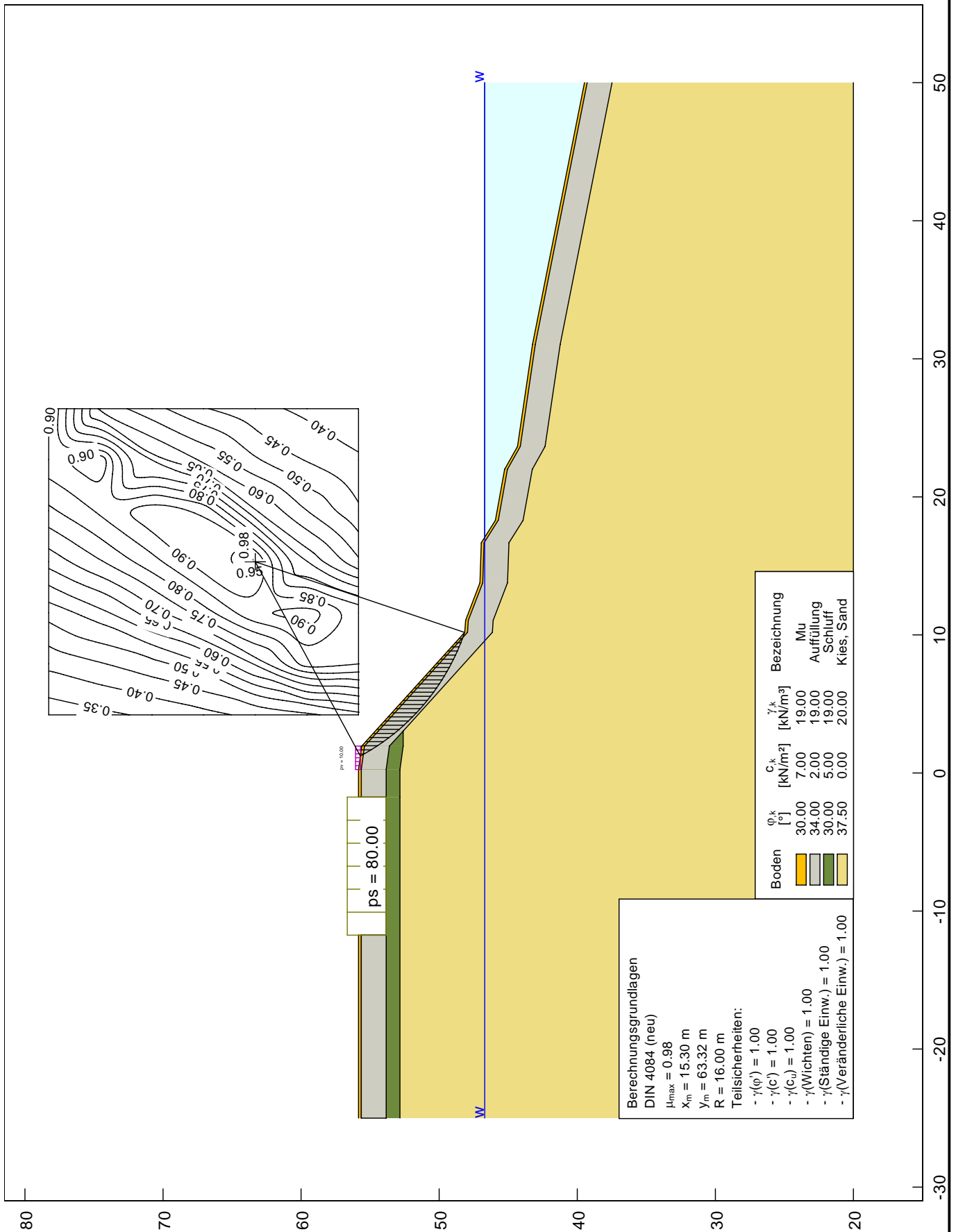
Anlagen-Nr.

A 1.3



Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab			
1:400			

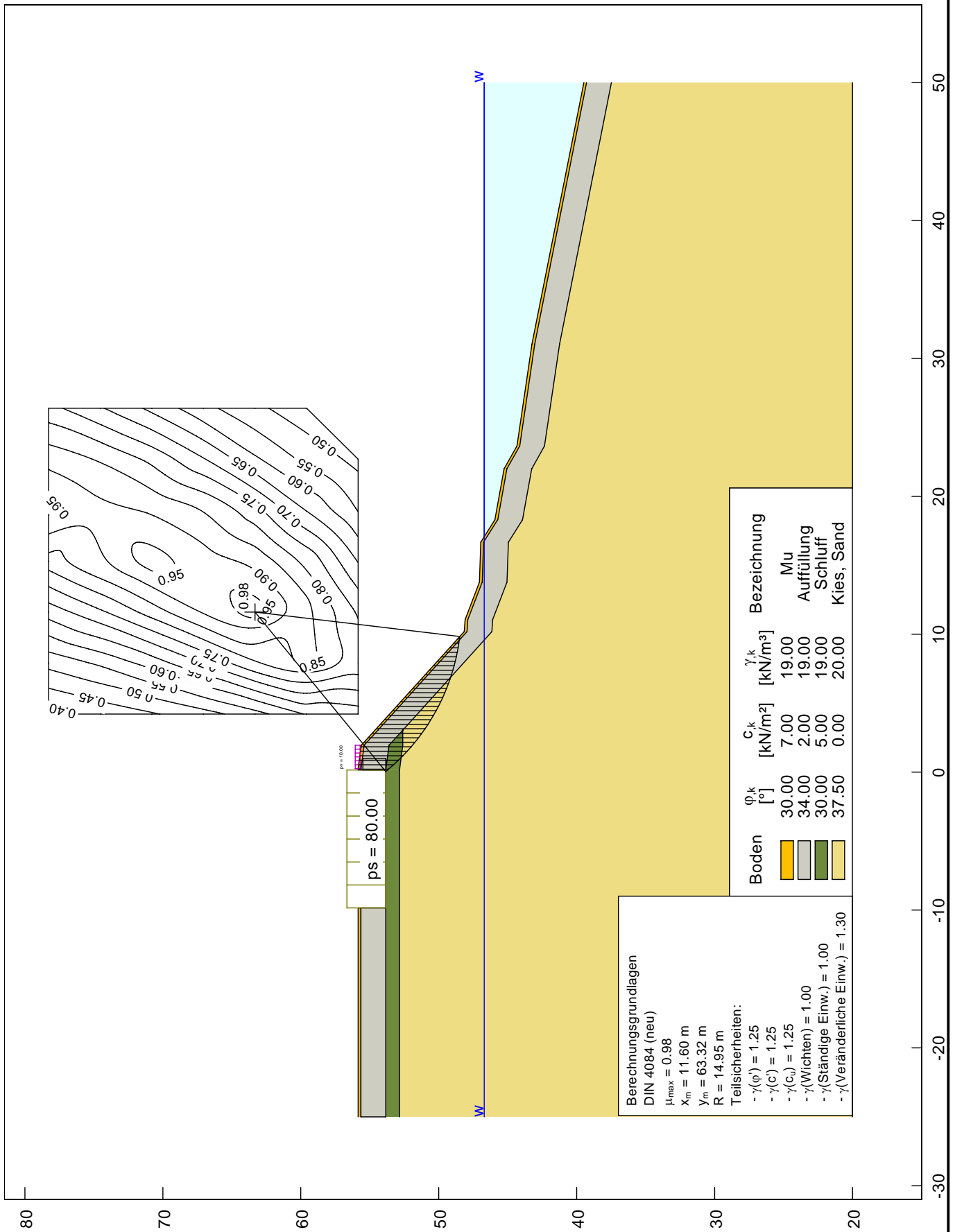
<b>Bornheimer Hang</b> <b>Rhein-km 662,7</b> <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 1, Parametersatz zu Beginn der Rückrechnung	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.1



Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab			
1:400			

<b>Bornheimer Hang</b> Rhein-km 662,7 <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 1, Parametersatz aus dem Grenzgleichgewicht	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.2



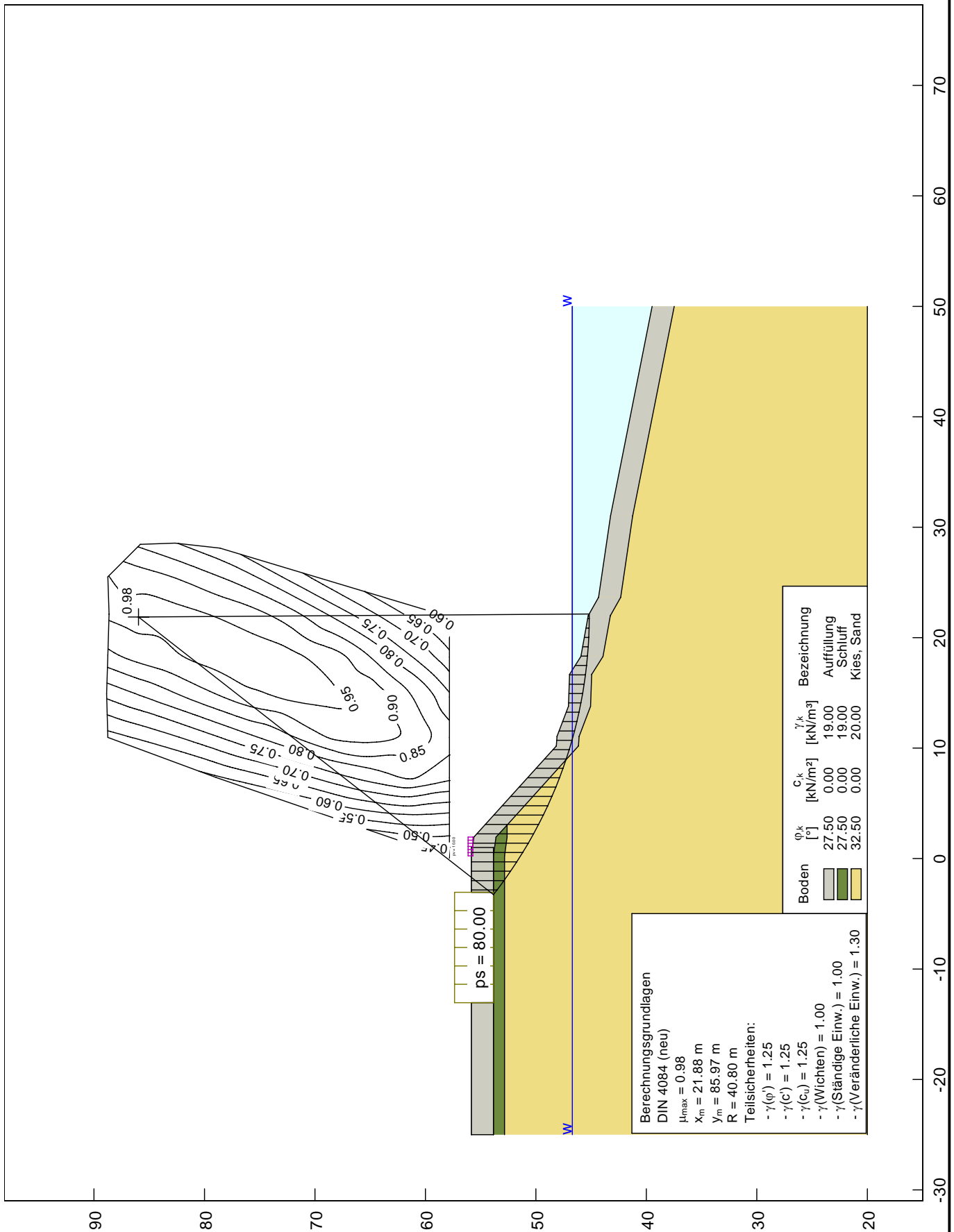


Berechnungsgrundlagen  
 DIN 4084 (neu)  
 $\mu_{max} = 0.98$   
 $x_m = 11.60$  m  
 $y_m = 63.32$  m  
 $R = 14.95$  m  
 Teilsicherheiten:  
 $-\gamma(\varphi') = 1.25$   
 $-\gamma(c') = 1.25$   
 $-\gamma(c_u) = 1.25$   
 $-\gamma(Wichten) = 1.00$   
 $-\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 $-\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$

Boden	$\varphi_k$ [°]	$c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Bezeichnung
	30.00	7.00	19.00	Mu
	34.00	2.00	19.00	Auffüllung
	30.00	5.00	19.00	Schluff
	37.50	0.00	20.00	Kies, Sand

Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab		 <b>BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU</b> Abteilung Geotechnik	
1:400			

<b>Bornheimer Hang</b> <b>Rhein-km 662,7</b> <b>Globale Böschungsstandsicherheit - Hauskante</b> Untergrundaufbau 1, Par.satz aus Grenzgleichgewicht, Abstand 1,8m	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.3

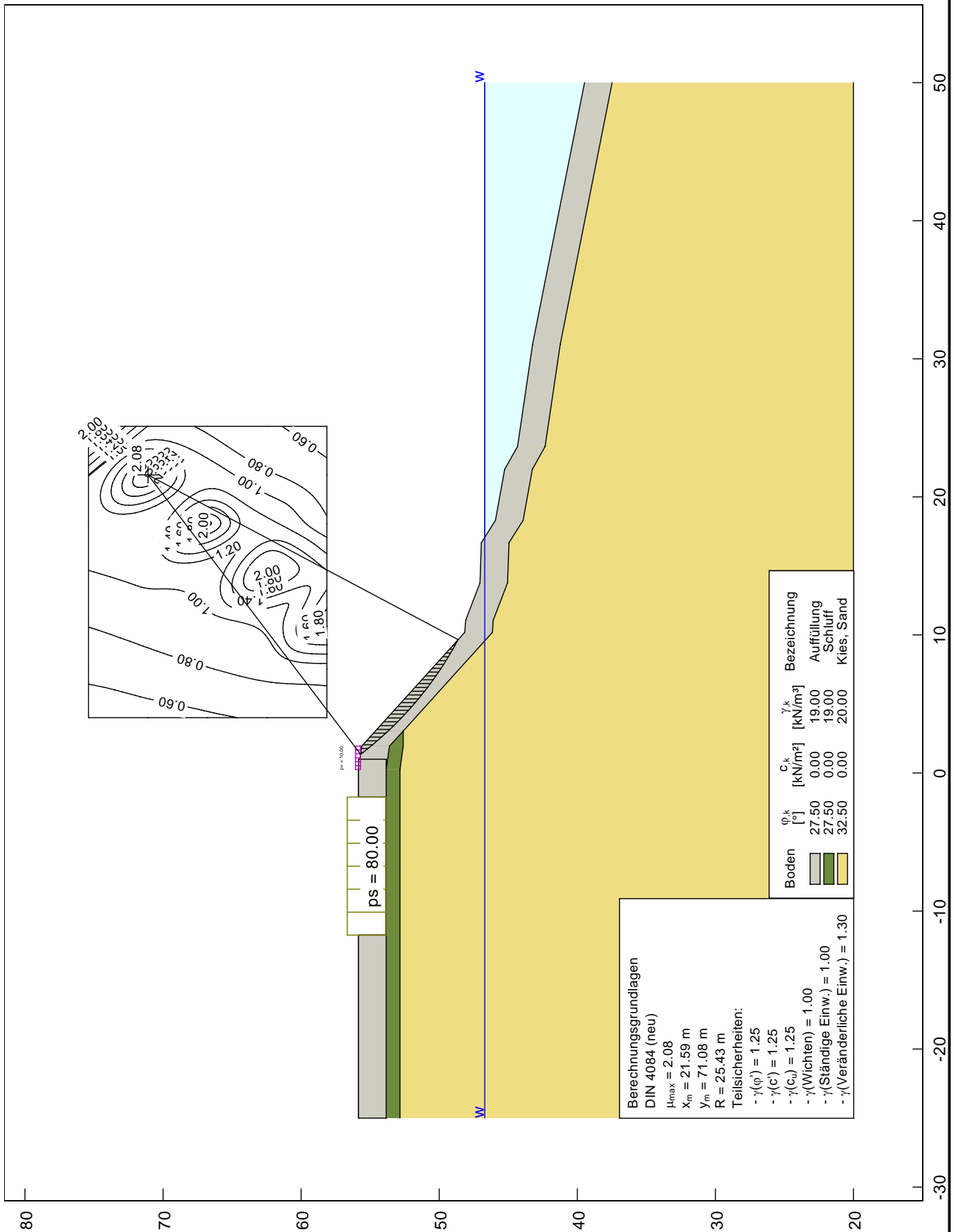



**Berechnungsgrundlagen**  
 DIN 4084 (neu)  
 $\mu_{max} = 0.98$   
 $x_m = 21.88$  m  
 $y_m = 85.97$  m  
 $R = 40.80$  m  
**Teilsicherheiten:**  
 $-\gamma(\varphi) = 1.25$   
 $-\gamma(c) = 1.25$   
 $-\gamma(c_u) = 1.25$   
 $-\gamma(\text{Wichten}) = 1.00$   
 $-\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1.00$   
 $-\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1.30$

Boden	$\varphi^k$ [°]	$c^k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma^k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Bezeichnung
	27.50	0.00	19.00	Auffüllung
	27.50	0.00	19.00	Schluff
	32.50	0.00	20.00	Kies, Sand

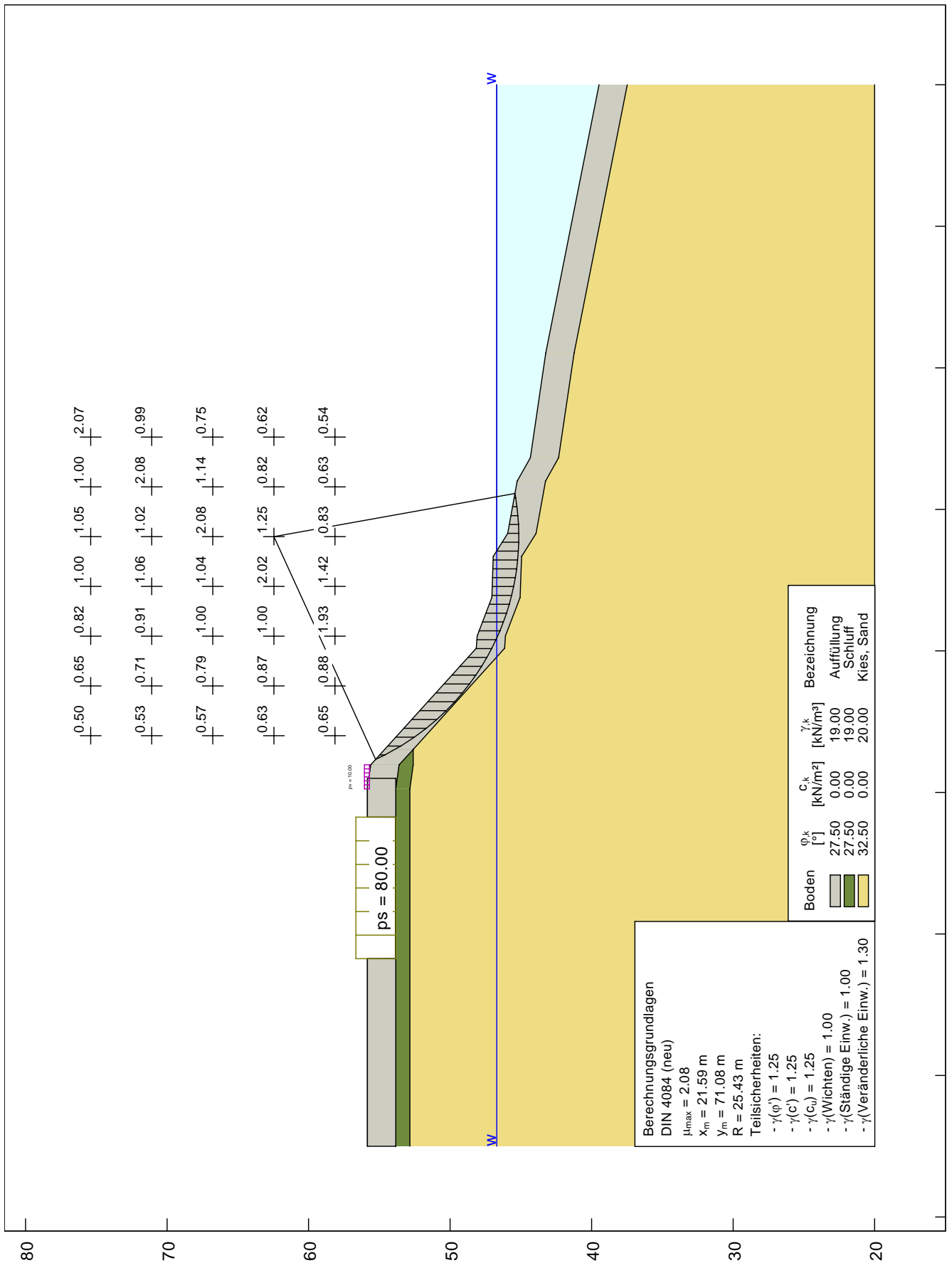
Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
 <b>BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU</b> Abteilung Geotechnik			
Maßstab		1:500	

<b>Bornheimer Hang</b> Rhein-km 662,7 <b>Globale Böschungsstandsicherheit - Hauskante</b> Untergrundaufbau 2, ungünstiger Parametersatz, Abstand 5,0m	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.4



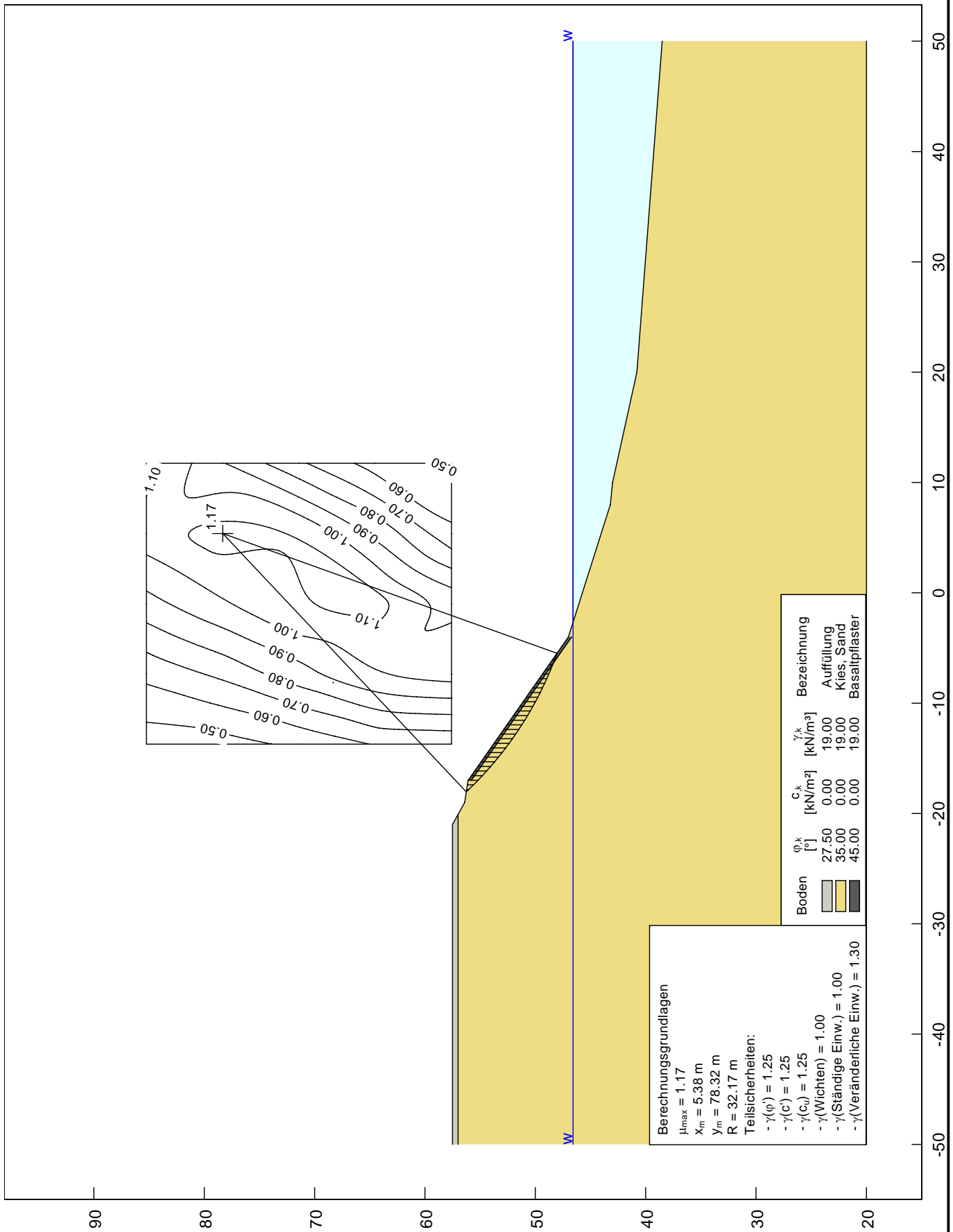
Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab			
1:400			

<b>Bornheimer Hang</b> Rhein-km 662,7 <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 2, ungünstiger Par.satz, ungünstigster Gleitkreis	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.5



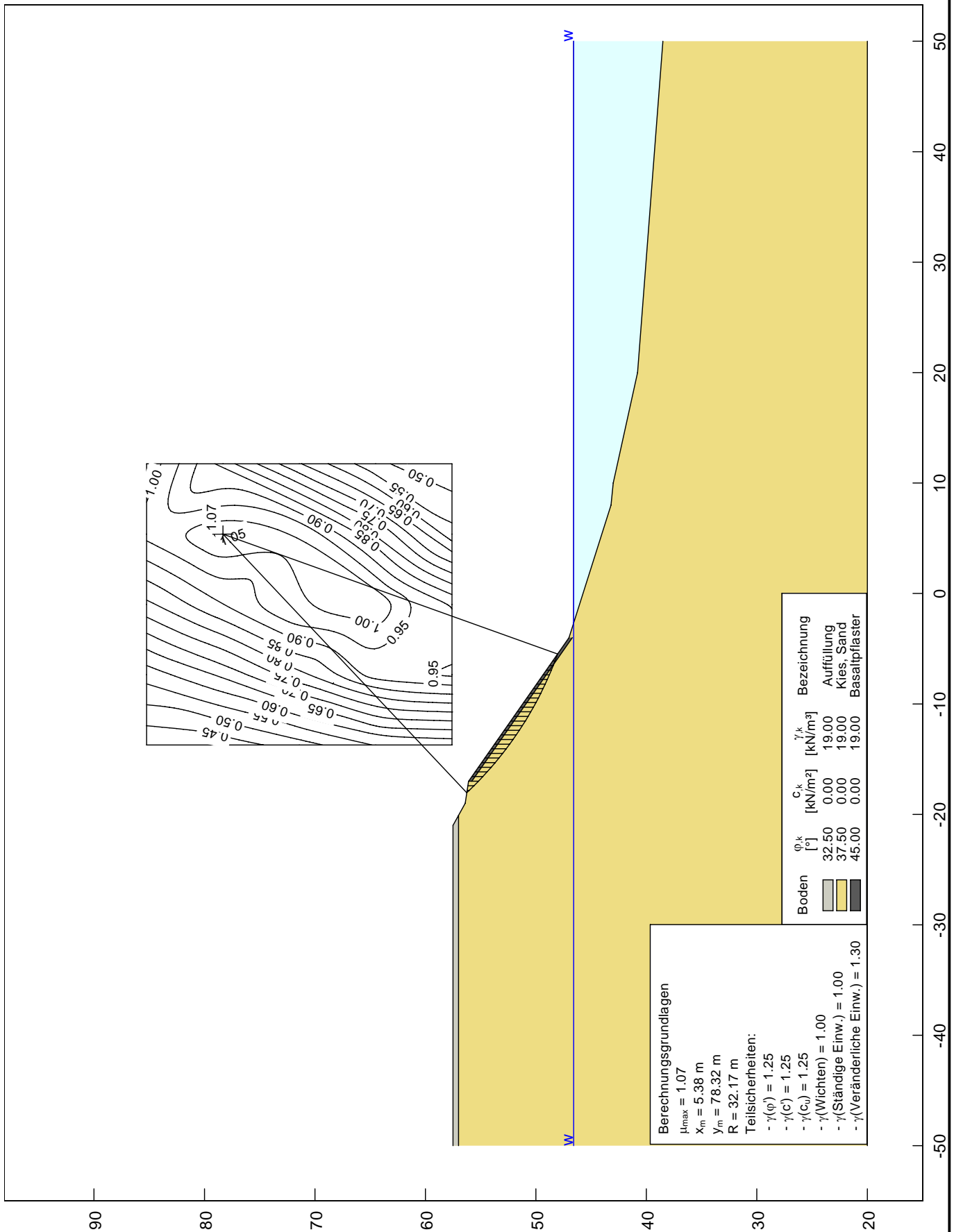
Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab	1:400		


<b>Bornheimer Hang</b> <b>Rhein-km 662,7</b> <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 2, ungünstiger Par.satz, tief reichender Gleitkreis	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.6



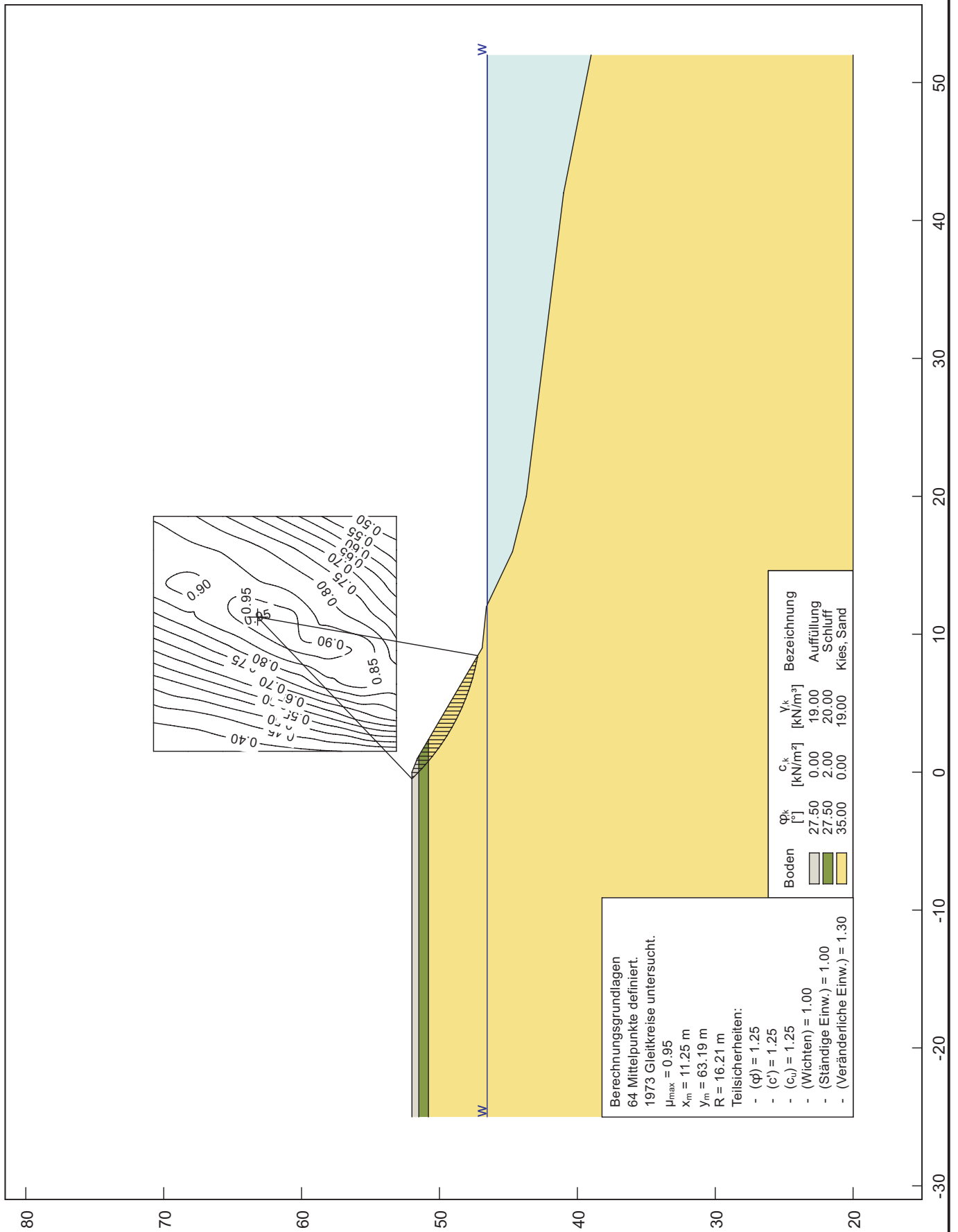
Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	04.09.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab		 <b>BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU</b> Abteilung Geotechnik	
1:500			

<b>Bornheimer Hang</b> Rhein-km 663,5 <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 3, ungünstiger Par.satz, ungünstigster Gleitkreis	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.7



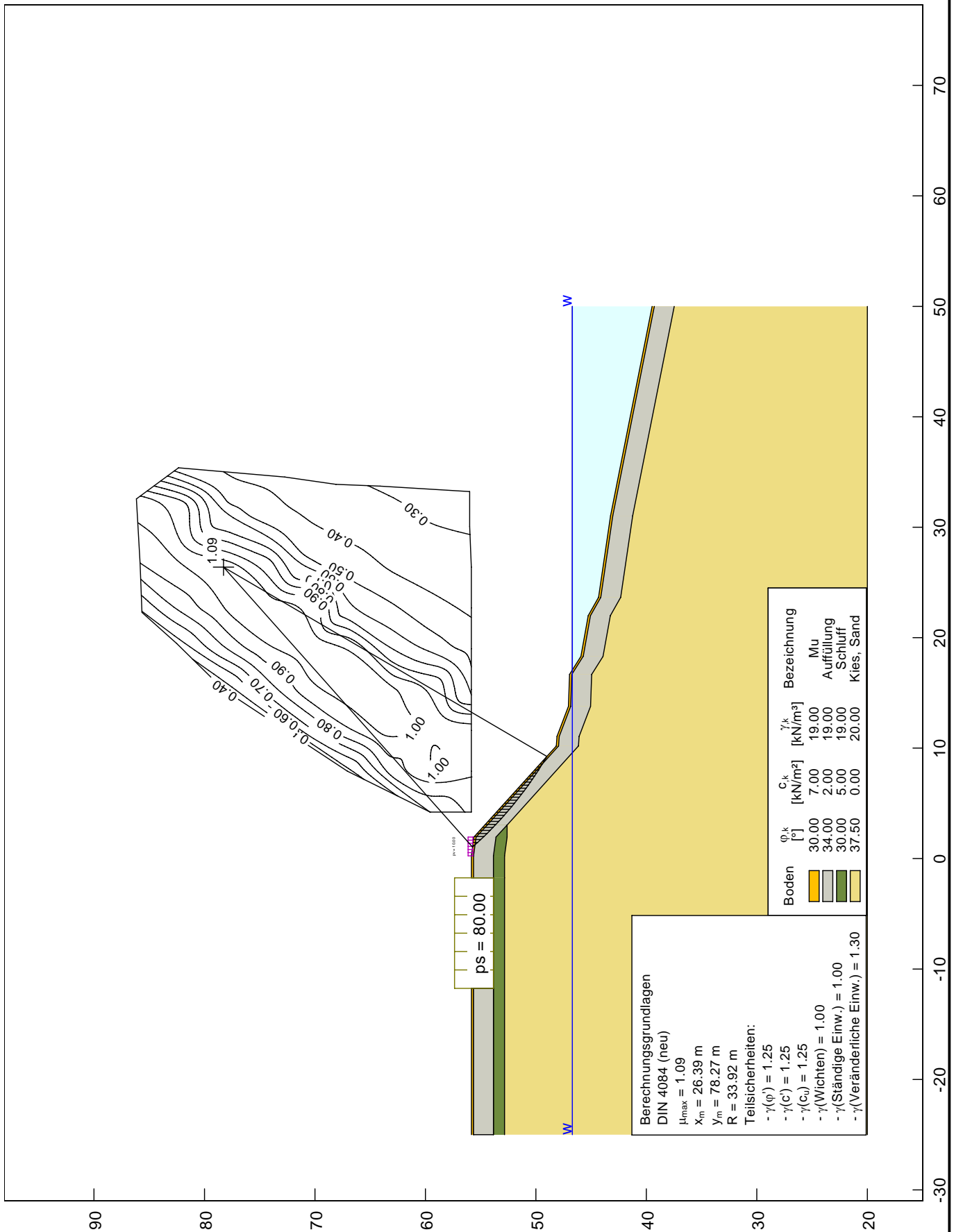
Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	04.09.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab		 <b>BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU</b> Abteilung Geotechnik	
1:500			

<b>Bornheimer Hang</b> Rhein-km 663,5 <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergroundaufbau 3, günstiger Parametersatz	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.8



Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	1.10.08
		Gezeichnet	
		Datei	
 <b>BUNDESANSTALT FÜR WASSER</b> Abteilung Geotechnik			
Maßstab			
1:400			

<b>Bornheimer Hang</b> <b>Rhein-km 663,8</b> <b>Globale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 4, ungünstigster Parametersatz	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 2.9



Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	05.08.08
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab		 BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU Abteilung Geotechnik	
1:500			

<b>Bornheimer Hang</b> Rhein-km 662,7 <b>Lokale Böschungsstandsicherheit</b> Untergrundaufbau 1, Parametersatz aus Grenzgleichgewicht	
Auftragsnummer	Anlagennummer
A39520410252	A 3.1



### Kriterium nach Pilarczyk:

PILARCZYK 1985	$d_{50} > h \cdot \left( \frac{v}{B_1 \cdot \sqrt{Fr^* \cdot g' \cdot h}} \right)^{2,5}$	$B_1 = \begin{cases} 5 - 6 & \rightarrow \text{Abflu\ss im Hauptgerinne ausufernder Fl\ssse} \\ 7 - 8 & \rightarrow \text{normale Turbulenz} \\ 9 - 10 & \rightarrow \text{uniformer Abflu\ss, Laborgerinne} \end{cases}$ $Fr^* = \begin{cases} 0,03 & \rightarrow \text{abs. Ruhe} \\ 0,04 & \rightarrow \text{Bewegungsbeginn} \\ 0,06 & \rightarrow \text{abs. Bewegung} \end{cases}$
-------------------	--	--

Mit:

$$g' = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g$$

gewählt wurden:

$$B_1 = 6$$

$$Fr^* = 0,03$$

### Kriterium nach Shields

$$\theta = \frac{v_0^{*2}}{g' \cdot d_k} < 0,03$$

Mit:

$$g' = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g$$

$$v_0^{*2} = \frac{\tau}{\rho_w}$$

$$\tau = \frac{\lambda}{4} \cdot \rho_w \cdot \frac{v^2}{2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{k}{3,71 \cdot 4 \cdot h} \right)$$

Mit:

$\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>]

Dichte des Kornmaterials

$\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>]

Dichte des Wassers

$g$ : [m/s<sup>2</sup>]

Erdbeschleunigung (=9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\tau$  [N/m<sup>2</sup>]

Schubspannung

$\lambda$  [-]

Widerstandsbeiwert

$h$ : [m]

Flie\stiefe

$v$ : [m/s]


Flie\ssgeschwindigkeit

$d_k = d_{50}$  [m]

Korndurchmesser bei 50% des Siebdurchgangs

$k = d_{90}$  [m]

Korndurchmesser bei 90% des Siebdurchgangs

Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum	Bornheimer Hang Erosionskriterien nach Pilarczyk und Shields
		Geprüft		
		Gezeichnet		
		Datei		
Ma\sstab				Auftrags-Nr. A39520410252
				Anlagen-Nr. A 4.1

Rhein-km	Boden	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>90</sub> [mm]
663,13	S,u*	0,12	1,00
663,80	S,u,t'	0,21	0,80
663,85	S,u*,t',mg'	0,18	1,64

### MHW 02 (Mittelhochwasser 2002)

Rhein-km	Tiefe h [m]	Fließ-v [m/s]	Rhein-km 663,13		Rhein-km 663,80		Rhein-km 663,85	
			Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk
661,7	0,05	0,33	NEIN	NEIN	-	-	-	-
662,0	2,45	0,57	NEIN	NEIN	-	-	-	-
662,5	0,21	0,25	NEIN	NEIN	-	-	-	-
662,7	0,60	0,63	NEIN	NEIN	-	-	-	-
663,0	0,23	0,40	NEIN	NEIN	-	-	-	-
663,2	0,47	0,46	NEIN	NEIN	-	-	-	-
663,8	2,57	0,76	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
663,9	0,25	0,46	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,0	0,22	0,39	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,1	1,60	0,62	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,2	0,06	0,35	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,3	0,54	0,51	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN

Abschnitt A

Abschnitt C

### HW 95 (Hochwasser 1995)

Rhein-km	Tiefe h [m]	Fließ-v [m/s]	Rhein-km 663,13		Rhein-km 663,80		Rhein-km 663,85	
			Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk
661,7	3,43	0,61	NEIN	NEIN	-	-	-	-
662,0	5,99	0,97	NEIN	NEIN	-	-	-	-
662,5	3,76	0,73	NEIN	NEIN	-	-	-	-
662,7	3,64	0,95	NEIN	NEIN	-	-	-	-
663,0	3,81	1,00	NEIN	NEIN	-	-	-	-
663,2	4,05	1,09	NEIN	NEIN	-	-	-	-
663,8	6,15	1,33	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
663,9	3,85	1,20	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,0	3,81	1,00	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,1	5,81	1,43	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,2	3,66	1,41	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
664,3	4,09	1,40	-	-	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN

Abschnitt A

Abschnitt C

Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	
		Gezeichnet	
		Datei	
Maßstab			

Bornheimer Hang  
Einwirkungen der Strömungsverhältnisse  
Oberflächennahe Bodenproben

Auftrags-Nr.

A39520410252

Anlagen-Nr.

A 4.2

Boden	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>90</sub> [mm]
G,s	8	33
S,g'	0,5	2,5

### MHW 02 (Mittelhochwasser 2002)

	Rhein-km	Tiefe h [m]	Fließ-v [m/s]	G,s		S,g'	
				Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk
Abschnitt A	661,7	0,05	0,33	ja	ja	NEIN	NEIN
	662,0	2,45	0,57	ja	ja	NEIN	NEIN
	662,5	0,21	0,25	ja	ja	ja	NEIN
	662,7	0,60	0,63	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	663,0	0,23	0,40	ja	ja	NEIN	NEIN
	663,2	0,47	0,46	ja	ja	NEIN	NEIN
Abschnitt C	663,8	2,57	0,76	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	663,9	0,25	0,46	ja	ja	NEIN	NEIN
	664,0	0,22	0,39	ja	ja	NEIN	NEIN
	664,1	1,60	0,62	ja	ja	NEIN	NEIN
	664,2	0,06	0,35	ja	ja	NEIN	NEIN
	664,3	0,54	0,51	ja	ja	NEIN	NEIN

### HW 95 (Hochwasser 1995)

	Rhein-km	Tiefe h [m]	Fließ-v [m/s]	G,s		S,g'	
				Shields	Pilarczyk	Shields	Pilarczyk
Abschnitt A	661,7	3,43	0,61	ja	ja	NEIN	NEIN
	662,0	5,99	0,97	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	662,5	3,76	0,73	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	662,7	3,64	0,95	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	663,0	3,81	1,00	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	663,2	4,05	1,09	ja	NEIN	NEIN	NEIN
Abschnitt C	663,8	6,15	1,33	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
	663,9	3,85	1,20	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
	664,0	3,81	1,00	ja	NEIN	NEIN	NEIN
	664,1	5,81	1,43	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
	664,2	3,66	1,41	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
	664,3	4,09	1,40	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN

Geändert	Datum	Bearbeiter	Datum
		Geprüft	
		Gezeichnet	
		Datei	
			
Maßstab			

Bornheimer Hang  
 Einwirkungen der Strömungsverhältnisse  
 Annahme tiefer Bodenschicht

Auftrags-Nr. A39520410252	Anlagen-Nr. A 4.3
------------------------------	----------------------