



Bezirksregierung Köln
Zeughausstraße 2 - 10
50667 Köln

ICG Düsseldorf GmbH & Co. KG
Ingenieur Consult Geotechnik

Beratende Ingenieure für Baugrund, Grundbau,
Hydrogeologie und Altlasten
Baugrundlaboratorium

Düsseldorf, 29.01.2014
La-Br-Mü
Projekt-Nr.: 60142
Auftrag-Nr.: 11656

**Sanierung des Bornheimer Rheinufer
Rhein-km 661,3 bis 664,4, linkes Ufer**

Geotechnischer Entwurfsbericht

Gutachterliche Beurteilung der Standicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Uferböschung

Bearbeiter: Dr.-Ing. Patrick Lammertz
Dipl.-Ing. Barbara Bredt
Dipl.-Ing. Roland Haarer

Borbecker Straße 22
40472 Düsseldorf

Tel.: 0211/ 4 72 01-0
Fax: 0211/ 4 72 01-33

mail@icg-duesseldorf.de
www.icg-duesseldorf.de

Geschäftsführende Gesellschafter:

Dipl.-Ing. Roland Haarer
Dipl.-Ing. Reinhard Kirschner
Dr.-Ing. Patrick Lammertz
Dr.-Ing. Norbert Veith

Kommanditgesellschaft in Düsseldorf
AG Düsseldorf HRA 14683

Persönlich haftende Gesellschafterin:
ICG Verwaltungsgesellschaft mbH
AG Düsseldorf HRB 40138

(Tel.: -25)
(Tel.: -13)
(Tel.: -44)

Bankverbindungen:

Kto: 10 190 411
BLZ: 300 501 10
Stadtsparkasse Düsseldorf
Kto: 144 932
BLZ: 360 200 30
National-Bank Essen

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung
2	Unterlagen
3	Untersuchungsgebiet
3.1	Allgemeines
3.2	Geometrie der Uferböschung
3.3	Uferabschnitte
3.4	Zustand der Uferböschung
4	Standsicherheit von Böschungen – Grundlagen
4.1	Böschungsbruch
4.2	Sicherheitskonzept
4.3	Standsicherheitsnachweise
5	Baugrundmodelle und charakteristische Bodenkennwerte
6	Einwirkungen und Bemessungssituationen
6.1	Statische Lastannahmen
6.2	Charakteristische Wasserstände / Strömungskräfte
6.3	Seismische Trägheitskräfte
6.4	Einwirkungskombinationen / Bemessungssituationen
6.5	Teilsicherheitsbeiwerte (TSB)
7	Standsicherheitsberechnungen
7.1	Allgemeines
7.2	Fallstudien
7.3	Vergleichsberechnungen
7.4	Nachweis der Standsicherheit der Uferböschung
7.4.1	Globale Standsicherheit
7.4.2	Lokale Standsicherheit
7.4.3	Erosionssicherheit
8	Beurteilung der Standsicherheit der Uferböschung

Verzeichnis der Bilder

	Seite
Bild 3-1: Geometrische Kenndaten der Uferböschung	11
Bild 3-2: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt I	12
Bild 3-3: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt II	13
Bild 3-4: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt III	14
Bild 3-5: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt IV	14
Bild 3-6: Gras- und Gehölzbewuchs, links: Rhein-km ~662,1, rechts: Rhein-km ~662,9 (März 2013)	15
Bild 3-7: Gartennutzung, Rhein-km ~661,6 (Januar 2012)	16
Bild 3-8: Stützmauer, Rhein-km ~663,6 (Januar 2012)	16
Bild 3-9: links: Stützmauer, Rhein-km ~662,7 rechts: Altes Gebäude, Rhein-km ~661,9 (März 2013)	17
Bild 3-10: Basaltsteine unter dichtem Grasbewuchs, Rhein-km ~663,3 (Januar 2012)	18
Bild 3-11: Lokale aufgebrachte Steinschüttung, Rhein-km ~662,6 (Januar 2012)	18
Bild 3-12: Wasserbausteine unter Grasdecke, im oberen Bereich Gehölzbewuchs, Rhein-km ~662,8 (Januar 2012)	19
Bild 3-13: Wasserbausteine, Rhein-km ~633,1 (Januar 2012)	19
Bild 3-14: Uferböschung im Abschnitt IV, Rhein-km ~633,8 (Januar 2012)	20
Bild 3-15: Basaltsteine, Rhein-km ~663,9 (Januar 2012)	20
Bild 3-16: links: übersteile Böschung, Rhein-km ~663,3 rechts: Anrisse, Rhein-km ~662,1 (März 2013)	21
Bild 3-17: Säbelwuchs, links: Rhein-km ~662,5, rechts: Rhein-km ~663,1 (März 2013)	22
Bild 3-18: Längsrisse im Asphalt, links: Rhein-km ~662,6, rechts: Rhein-km ~662,0 (März 2013)	23
Bild 3-19: Auswaschungen und Erosionsrinne, Rhein-km ~662,2 (Januar 213)	23
Bild 4-1: Böschungsbruch (li), Versagensmechanismus (re) [12]	24
Bild 4-2: Globale und lokale Standsicherheit	27
Bild 7-1: Querprofil 30, Gleitkreise mit $\mu > 1,0$ für BS-P	45
Bild 7-2: Querprofil 59, Gleitkreise mit $\mu > 1,0$ für BS-P	45
Bild 7-3: Böschungsparellele Gleitlinie [5]	51

Verzeichnis der Tabellen

	Seite
Tab. 5-1: Bodenmechanische Kennwerte (charakteristische Werte)	29
Tab. 6-1: Teilsicherheitsbeiwerte (TSB) für geotechnische Kenngrößen	35
Tab. 6-2: Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen	35
Tab. 7-1: Fallstudie „Wasserstand“, Ausnutzungsgrade μ für TSB=1 (Anlagen 4.1 bis 4.5)	41
Tab. 7-2: Fallstudie „Verkehr“, Ausnutzungsgrade μ für TSB = 1,0 Rheinwasserstand: HSW und W (HQ200)	42
Tab. 7-3: Ausnutzungsgrade μ für Fallstudie „Standsicherheit“	43

Anlagenverzeichnis

	Anlage
Lageplan	1
Querprofile /Böschungsabmessungen	2.1.1 bis 2.1.5
Rhein- /Grundwasserverhältnisse	2.2.1 bis 2.2.4

Fallstudien

Baugrundmodelle, Querprofile QP 10, 30, 41, 43 und 59	3.1 bis 3.5
Fallstudie „Rheinwasserstand“	4.1 bis 4.5
Fallstudie „Verkehrslasten“	5.1 bis 5.5
Fallstudie „Standsicherheitsnachweise“	6.1 bis 6.5
Fallstudie „Gleitkreise mit $\mu > 1$ “	7.1 bis 7.5

Vergleichsberechnungen

Querprofile QP 30	8.1
Querprofile QP 43	8.2

Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen

Nachweis der Gesamtstandsicherheit	9.1 bis 9.39
Tabellarische Übersicht der geometrischen Kenndaten und der Berechnungsergebnisse	10
Nachweis der Erosionssicherheit	11.1 und 11.2

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Auf einer Länge von ca. 3,1 km verläuft der Rhein zwischen Rhein-km 661,3 und 664,4 in einer lang gezogenen Rechtskurve, so dass sich das linke Ufer im Bereich der Ortschaften Hersel, Uedorf und Widdig der Stadt Bornheim zu einem Prallhang ausgebildet hat.

Der Hang bzw. die Böschung des linken Hochufers weist nahezu im gesamten Abschnitt eine ausgeprägte Steilheit mit Neigungen von etwa $n = 1:2$ bis $n = 1:1$ auf. Die Höhendifferenz zwischen den beiden parallel zum Hochufer verlaufenden Fußwegen am Kopf und am Fuß der Böschung beträgt bis zu 9 m.

Nicht nur wegen der Steilheit der Uferböschung, sondern auch aufgrund sichtbarer Deformationen an Böschungsfuß und Böschungskopf, die auf eine Hangbewegung hindeuten, ist davon auszugehen, dass die Uferböschung sich bereichsweise im Grenzgleichgewicht befindet und deshalb eine nicht ausreichende Gesamtstandsicherheit aufweist.

Im Rahmen des Projektes „Sanierung des Bornheimer Rheinufers, Rhein-km 661,3 bis 664,4-linkes Ufer“ erhielt die ICG Düsseldorf von der Bezirksregierung Köln mit Schreiben vom 30.11.2011, 19.11.2012 und 15.04.2012 (12.4 ZV-108/11-124/12-124/12) den Auftrag, ein Sanierungskonzept für die Uferböschung im vorgenannten Rheinabschnitt zu erarbeiten.

In einem ersten Schritt wurden hierzu die vorliegenden und recherchierten bzw. verfügbaren Unterlagen, Daten und Informationen gesichtet, zusammengestellt und bewertet sowie digitalisiert und thematisch aufbereitet (ArcGis-Projekt). Die Ergebnisse sind im Rahmen einer Vorstudie vom 15.03.2012 [1] synoptisch zusammengestellt und bildeten die Grundlage für die Festlegung des weiteren Erkundungsumfangs sowie die Planung und Ausarbeitung des vermessungs- und geotechnischen Untersuchungsprogramms.

Die Umsetzung des vermessungs- und geotechnischen Untersuchungsprogramm erfolgte nach öffentlicher Ausschreibung und Vergabe der Leistungen im Zeitraum von November 2012 bis März 2013.

Im Geotechnischen Untersuchungsbericht vom 30.07.2013 [2] sind neben den Ergebnissen der vermessungstechnischen Aufnahme der Uferböschung Art und Umfang der Baugrunderkundungen und der bodenmechanischen Laborversuche beschrieben, die Ergebnisse der Baugrunduntersuchung zusammenfassend dargestellt sowie die geotechnischen Informationen dokumentiert und bewertet. Abschließend wurden den einzelnen bautechnisch relevanten Bodenschichten charakteristische Werte für die Bodenkenngrößen zugeordnet. Die Ergebnisse der vermessungstechnischen Aufnahme der Uferböschung sind ebenfalls im Geotechnischen Untersuchungsbericht aufgeführt.

Der vorliegende Geotechnische Entwurfsbericht befasst sich nunmehr mit den gemäß den einschlägigen Normen und Regelwerken zu führenden Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweisen für die Uferböschung. Abschließend erfolgt eine Beurteilung der Gesamtstandsicherheit des betrachteten Uferabschnittes sowie eine Abschätzung des Gefährdungspotentials der angrenzenden Bebauung und des Straßenraumes.

Der Geotechnische Entwurfsbericht stellt die Grundlage für die Ausarbeitung des Sanierungskonzeptes für die Uferböschung dar.

2 Unterlagen

Projektbezogene Unterlagen

- [1] Sanierung des Bornheimer Rheinufers, Rhein-km 661,3 bis 664,4:
*Zusammenfassende Darstellung und Bewertung der vorhandenen
Unterlagen und Daten - Vorstudie vom 15.03.2012* – ICG Düsseldorf
GmbH & Co. KG
- [2] Sanierung des Bornheimer Rheinufers, Rhein-km 661,3 bis 664,4:
Geotechnischer Untersuchungsbericht vom 30.07.2013 – ICG Düs-
seldorf GmbH & Co. KG

Normen und Regelwerke

- [3] Handbuch Eurocode 7: Geotechnische Bemessung, Band 1: Allge-
meine Regeln, 1. Auflage 2011
DIN EN 1997-1: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung
in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln, September 2009
DIN EN 1997-1/NA Nationaler Anhang, Dezember 2010
DIN 1054 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Er- und Grundbau-
Ergänzend Regelungen zu DIN EN 1997-1, Dezember 2010
- [4] Handbuch Eurocode 8: Erdbeben, Band 1: Allgemeine Regeln, Auf-
lage 2012
- [5] DIN 4084: Baugrund – Geländebruchberechnungen, Januar 2006
- [6] DIN 19712: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern, Januar
2013
- [7] Merkblatt DWA-M 507-1: Deich an Fließgewässern, Teil 1: Planung,
Bau und Betrieb, Dezember 2011

- [8] Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Ausgabe 2011, Bundesanstalt für Wasserbau
- [9] Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“, Abschnitt 4: Aktuelle Entwicklungen bei Standsicherheits- und Verformungsberechnungen in der Geotechnik. In: Geotechnik 29 (2006) Nr. 1
- [10] Schuppener, B. (2012): Kommentar zum Handbuch Eurocode 7 – Geotechnische Bemessung, Allgemeine Regeln; Ernst & Sohn
- [11] Ziegler, M. (2012): Geotechnische Nachweise nach EC 7 und DIN 1054, Einführung mit Beispielen, 3. Auflage; Ernst & Sohn
- [12] Grundbau-Taschenbuch, Teil1: Geotechnische Grundlagen, Hrsg. Karl Josef Witt, 2008, 7. Auflage; Ernst & Sohn
- [13] Programm GGU-STABILITY, Version 10.58 vom 07.09.2013; ggu-software, civilserve GmbH EDV für das Bauwesen, Braunschweig www.ggu-software.com
- [14] Programm PLAXIS 2D, Version 2012; plaxis bv, Delft www.plaxis.nl
- [15] Gefährdungsanalyse Bornheimer Hang, Rhein-km 661,7 – 664,3 von der Bundesanstalt für Wasserbau vom 31.10.2008

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Allgemeines

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich auf einer Länge von ca. 3,1 km zwischen Rhein-km 661,3 und 664,4 (linkes Ufer) über die Ortschaften Hersel, Uedorf und Widdig der Stadt Bornheim (siehe Anlage 1). Der Rhein verläuft hier in einer langgezogenen Rechtskurve, so dass sich das linke Ufer zu einem Prallhang ausgebildet hat.

Die durch geomorphologische Vorgänge entstandene Böschung (Hang) des Hochufers weist im Untersuchungsgebiet Höhen von etwa $h_B = 4$ bis 9 m und mittlere Böschungswinkel von $\beta_{\text{mittel}} = 23$ bis 41° (Neigungen $n \approx 1:2,4$ bis $1:1,2$ mit $\tan \beta_{\text{mittel}} = 1:n$) auf.

Beginnend von Rhein-km 661,3 verläuft entlang des **Böschungsfußes** parallel zum Rhein bis etwa zum Rhein-km 663,75 auf einer Länge von ca. 2,5 km der asphaltierte ca. 3 m breite Leinpfad. Ab km 663,75 schwenkt dieser Weg die Uferböschung hinauf und verläuft dann parallel zur Böschungsschulter bzw. parallel zu der in diesem Abschnitt vorhandenen Hochwasserschutzwand (HSW) bis zum Rhein-km 664,4. Am Böschungsfuß führt ab Rhein-km 663,75 weiter der unbefestigte Leinpfad (Trampelpfad) bis zum Ende des Untersuchungsgebietes (siehe Anlage 1).

An der **Böschungsschulter** grenzen beginnend von Rhein-km 661,3 zunächst unmittelbar bebaute und nichtbebaute Grundstücke an. Nach rd. 500 m, etwa ab Rhein-km 661,8 verläuft die Rheinstraße parallel zur Böschungsschulter, die später in den Rheinuferweg übergeht. Der Rheinuferweg schwenkt etwa ab km 663,4 landeinwärts, so dass ab diesem Kilometer bis zum Rhein-km 663,75 wiederum unmittelbar bebaute und nichtbebaute Grundstücke an die Böschungsschulter anschließen (siehe Anlage 1).

3.2 Geometrie der Uferböschung

Im Zuge der tachymetrischen Neuvermessung der Uferböschung und der angrenzenden Bebauung wurden für den 3,1 km langen Uferbereich insgesamt 76 Querprofile aufgenommen und in [2] hinsichtlich der Böschungsgeometrie (Höhe und Neigungswinkel) tabellarisch ausgewertet und dargestellt. Grundsätzlich wurde bei der Neuvermessung der Uferböschung ein Profilabstand von 50 m eingehalten. Zwischen Rhein-km 661,8 und 663,5 erfolgte zusätzlich eine vermessungstechnische Aufnahme bei jedem Gebäude, das weniger als 15 m von der Uferböschung entfernt steht.

Hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeits- und Standsicherheitsberechnungen erfolgte aufbauend und ergänzend zu [2] eine weiterführende Auswertung der 76 Querprofile. Die Vorgehensweise ist in Bild 3-1 dargestellt. Hieraus lassen sich folgende geometrische Kenndaten ableiten:

- Böschungshöhe: h_B [m]
- Böschungswinkel
maximaler Winkel: β_{\max} [°]
mittlerer Winkel: β_{mittel} [°]
- Abstände
Bebauung – Böschungsschulter: e_1 [m]
Straße – Böschungsschulter: e_2 [m]
- Straßenbreite
Rheinstraße/Rheinuferweg: b_1 [m]
Leinpfad: b_2 [m]

Die Ergebnisse der Auswertung sind den Diagrammen der Anlagen 2.1.1 (Böschungshöhe) und 2.1.2 (Böschungswinkel) sowie 2.1.3 (Abstände) und 2.1.4 bzw. 2.1.5 (Straßenbreite) zu entnehmen.

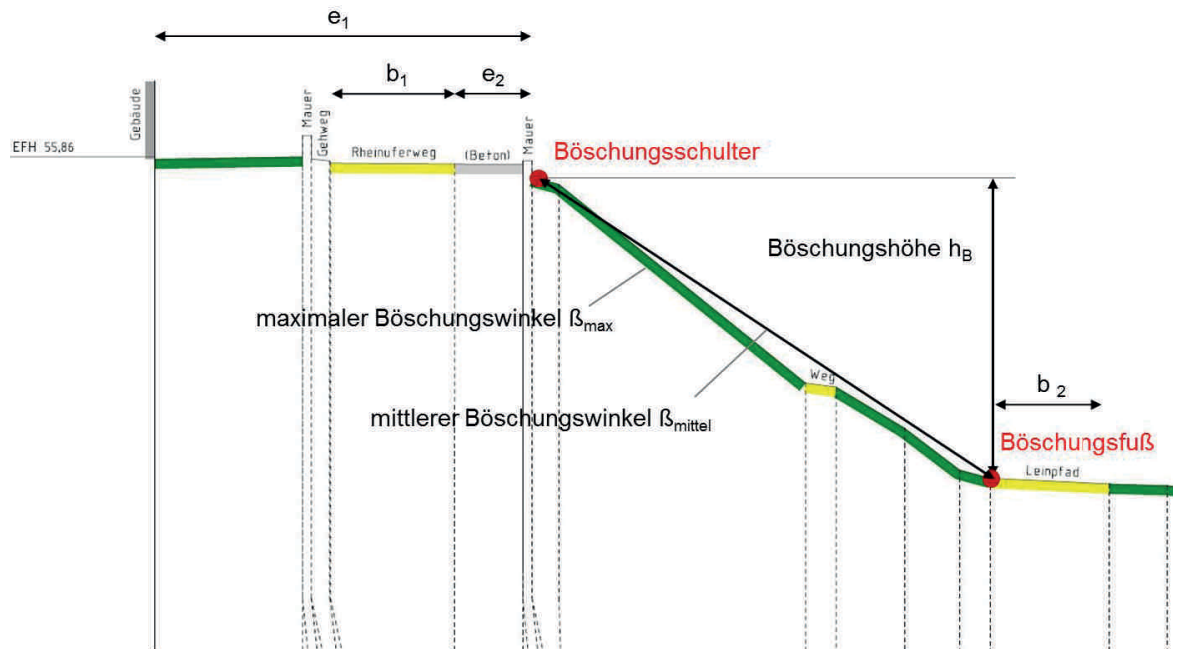


Bild 3-1: Geometrische Kenndaten der Uferböschung

Zudem sind die geometrischen Kenndaten in der Anlage 10 tabellarisch aufgeführt. Hinsichtlich der Böschungshöhe und der Böschungswinkel lässt sich zunächst Folgendes festhalten:

- Die Böschungshöhen liegen meist zwischen $h_B \approx 6$ und 9 m.
- Bereichsweise geringere Böschungshöhen sind Folge von konstruktiven Sicherungselementen, wie bspw. Mauern etc. (vgl. zum Beispiel Profil 3, 8, 60, 61).
- Zwischen Profil 66 und 76 beträgt die Böschungshöhe nur etwa 4 bis 5 m.
- Die mittleren Böschungswinkel liegen zwischen $\beta_{\text{mittel}} = 20,8^\circ$ (Profil 3) und $41,2^\circ$ (Profil 41), die maximalen Böschungswinkel zwischen $\beta_{\text{max}} = 26,4^\circ$ (Profil 76) und $61,2^\circ$ (Profil 59).
- Der mittlere Böschungswinkel ist bei folgenden Querprofilen kleiner als 30° : Profil 2, 3, 4 und 6, 7, 8, 9, sowie 63 und 66 bis 76.

- Bei den Profilen 34, 35, 36, 40, 41 sowie 58, 59, 65 und 67, 68, 70, 73 werden maximale Böschungswinkel β_{\max} von mehr als 40° erreicht.

3.3 Uferabschnitte

Auf Grundlage der Ergebnisse der Bestandsaufnahme sowie der Auswertung der geometrischen Kenndaten wird die Uferböschung wie nachstehend aufgeführt in insgesamt vier Abschnitte (vgl. Anlage 1) unterteilt, die folgende Querprofile und Merkmale umfassen bzw. aufweisen:

Abschnitt I (Rhein-km 661,3 bis 661,8)

Länge ca. 500 m, Profil 1 bis 5

Bereich: „Ursulinen Kloster bis Rheinstraße (Parkplatz)“

Bebauung - Uferböschung - Leinpfad



Bild 3-2: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt I

Böschungshöhe	$h_B = 5,3 \text{ bis } 8,9 \text{ m}$
Böschungswinkel	$\beta_{\text{mittel}} = 21 \text{ bis } 33^\circ (\beta_{\max} = 28 \text{ bis } 36^\circ)$
Abstand Bebauung	$e_1 = 2,7 \text{ bis } 11,2 \text{ m}$

- **Abschnitt II** (Rhein-km 661,8 bis 663,4)
Länge ca. 1.600 m, Profil 6 bis 59
Bereich: „Rheinstraße (Parkplatz) bis Rheinterrassen“
Bebauung – Rheinstraße bzw.-uferweg - Uferböschung - Leinpfad

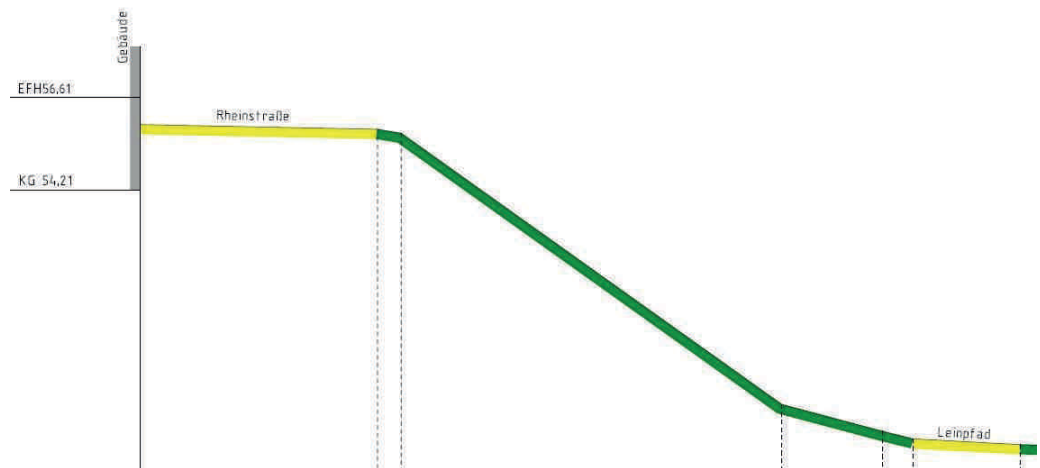


Bild 3-3: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt II

Böschungshöhe	$h_B = 5,4 \text{ bis } 9,1 \text{ m}$
Böschungswinkel:	$\beta_{\text{mittel}} = 24 \text{ bis } 41^\circ$ ($\beta_{\text{max}} = 30 \text{ bis } 61^\circ$)
Abstand Bebauung:	$e_1 = 4 \text{ bis } 20 \text{ m}$
Abstand Straße	$e_2 = 0 \text{ bis } 4 \text{ m}$
Breite Straße/Weg:	$b_1 = 2 \text{ bis } 8 \text{ m}$

- **Abschnitt III** (Rhein-km 663,4 bis 663,7)
Länge ca. 300 m, Profil 60 bis 65
Bereich „Rheinterrassen bis Schweizstraße“
Bebauung – Uferböschung/Mauer - Leinpfad

Böschungshöhe	$h_B = 2,0 \text{ bis } 8,1 \text{ m}$
Böschungswinkel	$\beta_{\text{mittel}} = 30 \text{ bis } 36^\circ$ ($\beta_{\text{max}} = 34 \text{ bis } 42^\circ$)
Abstand Bebauung	$e_1 = 4,7 \text{ bis } 10,3 \text{ m}$

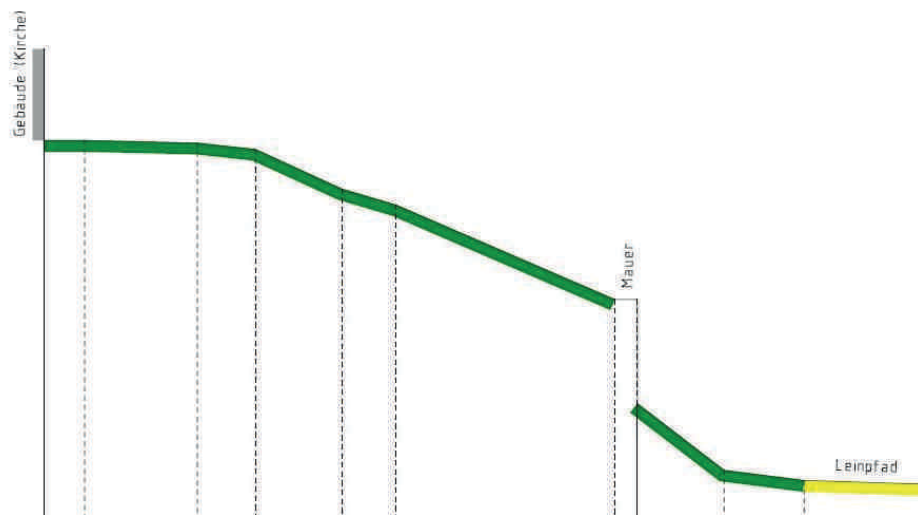


Bild 3-4: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt III

- **Abschnitt IV** (Rhein-km 663,7 bis 664,4)
Länge ca. 700 m, Profil 66 bis 76
Bereich: „Schweizstraße bis Lichtweg“
Bebauung – Weg – HSW - Uferböschung – Trampelpfad (Leinpfad)

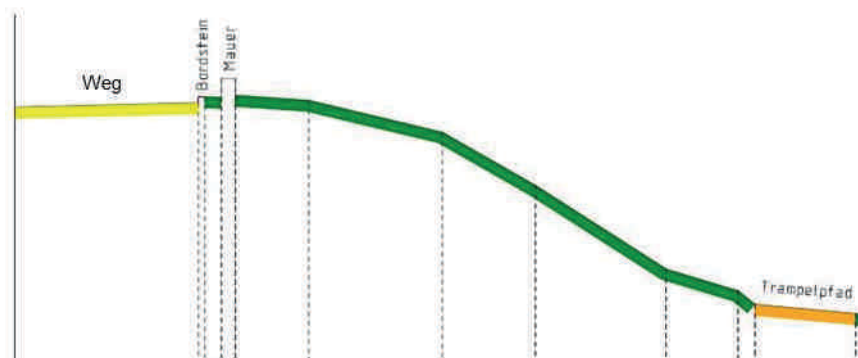


Bild 3-5: Charakteristisches Querprofil, Abschnitt IV

Böschungshöhe:	$h_B = 4,3 \text{ bis } 5,1 \text{ m}$
Böschungswinkel:	$\beta_{\text{mittel}} = 21 \text{ bis } 25^\circ$ ($\beta_{\text{max}} = 26 \text{ bis } 46^\circ$)
Abstand Straße:	$e_2 = 0,4 \text{ bis } 2,6 \text{ m}$
Breite Weg:	$b_1 = 2,6 \text{ bis } 4 \text{ m}$

3.4 Zustand der Uferböschung

Die Oberfläche der Uferböschung ist im gesamten Untersuchungsbereich sehr heterogen bewachsen. Neben einer vorwiegend geschlossenen und dichten Grasnarbe, teils mit überständigem Gras, sind auch Bereiche mit dichtem Strauchwerk sowie vereinzelt Bäumen und Baumgruppen vorhanden.

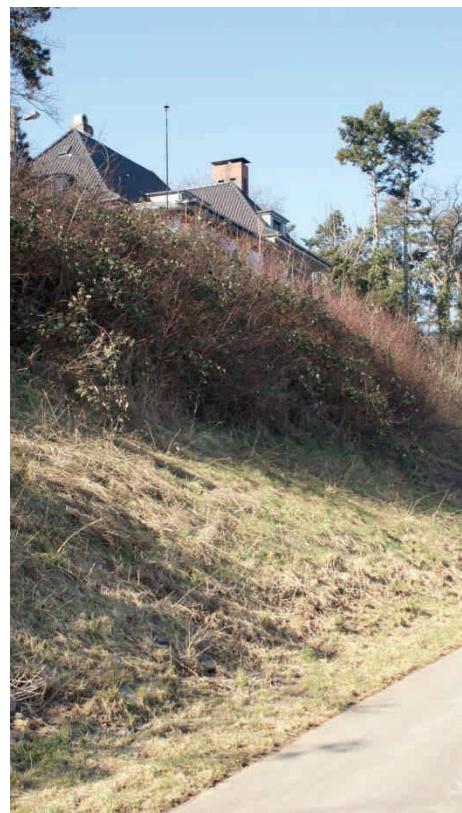
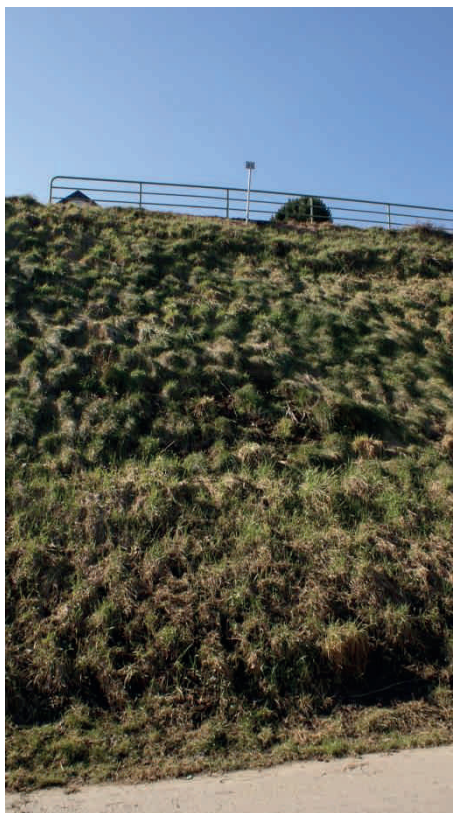


Bild 3-6: Gras- und Gehölzbewuchs, links: Rhein-km ~662,1, rechts: Rhein-km ~662,9 (März 2013)

Des Weiteren sind Teilbereiche der Uferböschung, vor allem in den Abschnitten I und III, bis an den Leinpfad eingezäunt und die Böschung wird größtenteils in die Gestaltung und Pflege des Gartens der jeweiligen Anleger mit einbezogen.



Bild 3-7: Gartennutzung, Rhein-km ~661,6 (Januar 2012)

Innerhalb der Uferböschung sind zudem in Teilbereichen kleinere Stützbauwerke aus Mauerwerk und Stahlbeton unterschiedlicher Abmessungen vorhanden, die sowohl im oberen und mittleren Drittel der Uferböschung als auch am Böschungsfuß (siehe Bild 3-7) angeordnet sind. Insbesondere der Abschnitt III ist geprägt durch die am Böschungsfuß vorhandene Stützmauer (siehe Bild 3-8).



Bild 3-8: Stützmauer, Rhein-km ~663,6 (Januar 2012)

Auch befinden sich etwa bei Rhein-km 661,9 noch Reste eines alten Gebäudes im oberen Bereich der Uferböschung (Bild 3-9, rechts), dessen Ausmaß sich aufgrund des dichten Bewuchses nicht eindeutig eingrenzen lässt.

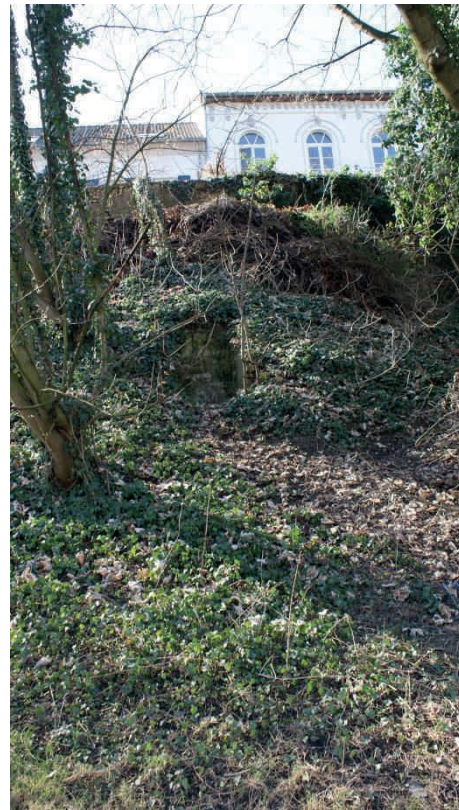
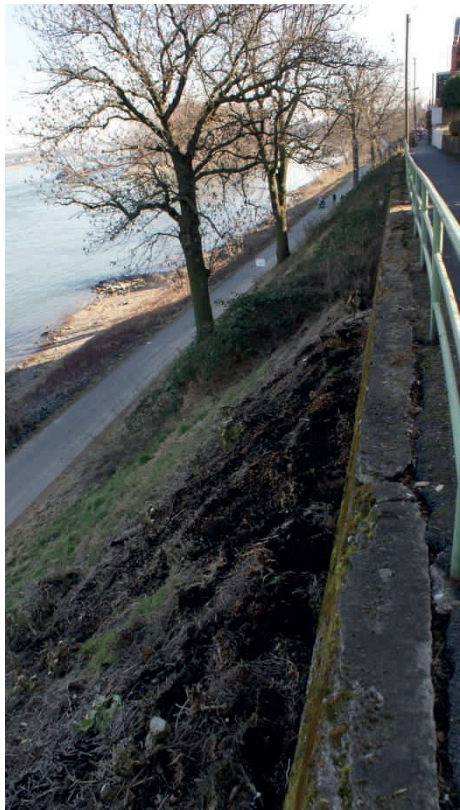


Bild 3-9: links: Stützmauer, Rhein-km ~662,7
rechts: Altes Gebäude, Rhein-km ~661,9 (März 2013)

Etwa ab Rhein-km 663,25 bis 663,45 ist die Uferböschung im unteren Bereich fast durchgehend mit Basaltsteinen befestigt. Die Oberfläche ist mit festem und weitestgehend geschlossenem und dichtem Grasbewuchs bedeckt. Wegen des Bewuchses ist die Verteilung und der Zustand des Basaltpflasters jedoch nicht immer zu erkennen (Bild 3-10).



Bild 3-10: Basaltsteine unter dichtem Grasbewuchs, Rhein-km ~663,3 (Januar 2012)

Zudem sind über den gesamten Untersuchungsbereich verteilt, am Böschungsfuß immer wieder Stellen sichtbar, an denen Steinschüttungen aufgebracht worden sind (Bild 3-11).



Bild 3-11: Lokale aufgebrachte Steinschüttung, Rhein-km ~662,6 (Januar 2012)

Etwa ab Rhein-km 662,05 bis 663,25 (Abschnitt II) wurde der untere Bereich der Uferböschung im Zuge einer temporären Ufersicherung im Herbst/Winter 2010/2011 durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Köln

mithilfe von Wasserbausteine gesichert (vgl. Anlage 1, Details siehe [2]). Der Einbau der Wasserbausteine erfolgte bis 1 m über HSW (Höchster Schiffbarer Wasserstand). Der höchste schiffbare Wasserstand liegt ca. 1,5 m oberhalb des Leinpfads. Die Wasserbausteine sind mittlerweile meist durch einen flächendeckenden Grasbewuchs überwachsen. Lediglich lokal sind noch vereinzelt Wasserbausteine sichtbar.



Bild 3-12: Wasserbausteine unter Grasdecke, im oberen Bereich Gehölzbewuchs, Rhein-km ~662,8 (Januar 2012)



Bild 3-13: Wasserbausteine, Rhein-km ~633,1 (Januar 2012)

Der Abschnitt IV ist gekennzeichnet durch die im Jahre 1998/1999 errichtete Hochwasserschutzwand. Die 3 m hohe und 1 m breite Stahlbetonwand ist ca. 400 m lang und ragt bis ca. 0,7 m über GOK. Im Zuge der seinerzeit durchgeführten Hochwassersicherung wurde die Böschungsoberfläche weitestgehend mit einer Basaltsteinschüttung beschwert und die Fläche mit Mutterboden abgedeckt [1]. Derzeit ist die Uferböschung mit Sträuchern und Gras bewachsen und nur lokal sind Basaltsteine noch zu erkennen.



Bild 3-14: Uferböschung im Abschnitt IV, Rhein-km ~633,8 (Januar 2012)

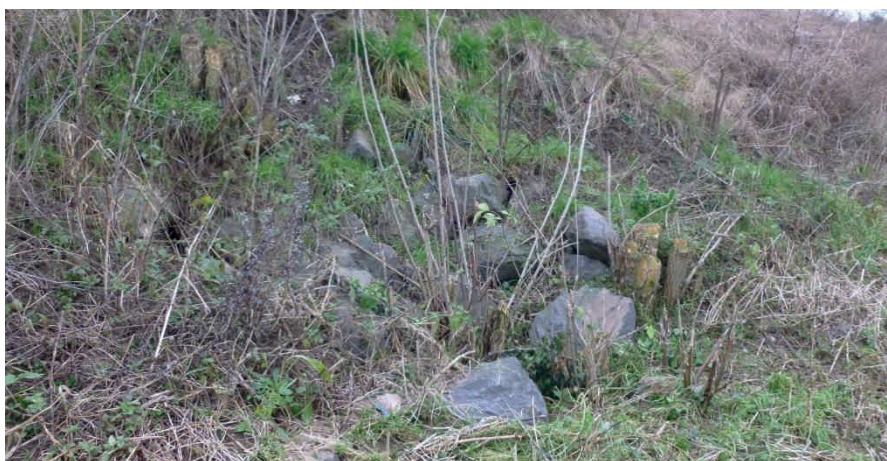


Bild 3-15: Basaltsteine, Rhein-km ~663,9 (Januar 2012)

Die Uferböschung zeichnet sich nahezu im gesamten Untersuchungsbe-
reich durch steile ($\beta \geq 25^\circ$) bis übersteile ($\beta \geq 30^\circ$) Böschungsneigungen
aus. Insbesondere an den augenscheinlich übersteilen Böschungsstellen
sind räumlich verteilt lokale Abrutschungen erkennbar. So führen die nach
unten abgerutschten Schollen an den Schadstellen häufig zu einem Bö-
schungsverlauf mit nach oben hin steileren Böschungswinkeln (Bild 3-16,
links).



Bild 3-16: links: übersteile Böschung, Rhein-km ~663,3
rechts: Anrisse, Rhein-km ~662,1 (März 2013)

Durch die Rutschungen treten an der Böschungsschulter Zugspannungen
auf, die Anrisse verursachen (Bild 3-16, rechts).

Zudem deuten insbesondere leicht abgekipptes Gehölz (Bäume, Sträucher) und Bäume mit ausgeprägtem „Säbelwuchs“ darauf hin, dass der Hang bereits über einen längeren Zeitraum in Bewegung ist.



Bild 3-17: Säbelwuchs, links: Rhein-km ~662,5, rechts: Rhein-km ~663,1 (März 2013)

Die Hangbewegungen führten dazu, dass die teilweise unmittelbar an der Böschungsschulter angrenzende Rheinstraße bzw. der Rheinuferweg stellenweise parallel zur Wegachse verlaufende Längsrisse aufweisen, die augenscheinlich mehrfach durch neue Bitumenlagen nachgebessert worden sind (Bild 3-18).

Die Entwässerung der parallel zur Böschungsschulter verlaufenden Rheinstraße bzw. des Rheinuferwegs erfolgt zudem unkontrolliert über die Uferböschung, so dass mit der Zeit mehr oder weniger stark ausgeprägte Erosionsrinnen und Auswaschungen auf der Böschung entstanden sind (Bild 3-19).



Bild 3-18: Längsrisse im Asphalt, links: Rhein-km ~662,6, rechts: Rhein-km ~662,0 (März 2013)



Bild 3-19: Auswaschungen und Erosionsrinne, Rhein-km ~662,2 (Januar 213)

4 Standsicherheit von Böschungen – Grundlagen

4.1 Böschungsbruch

Als Böschungsbruch bezeichnet man das Abrutschen eines Gleitkörpers auf einer Gleitfläche (Bild 4-1). So hat jede unterhalb einer geböschten Geländeoberfläche anstehende Bodenmasse die Tendenz sich infolge ihres Eigengewichtes G nach unten und nach vorne zu bewegen.

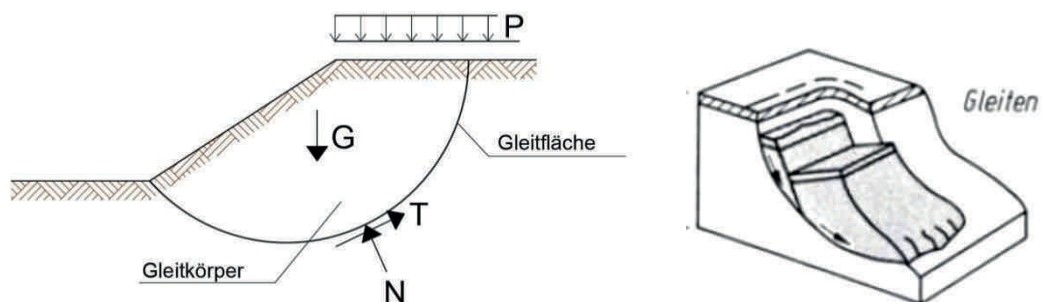


Bild 4-1: Böschungsbruch (li), Versagensmechanismus (re) [12]

Der klassische Fall des Böschungsbruchs wird dadurch ausgelöst, dass die einwirkenden Größen E_k (Eigenlast des jeweils zu untersuchenden Gleitkörpers G , Lasten P in oder auf dem Gleitkörper und Wasserdrucklasten W), die widerstehenden Größen R_k (Scherwiderstand T bzw. Scherfestigkeit des Bodens infolge Reibung und Kohäsion) übersteigen. Der Böschungsbruch tritt demnach **nicht** ein, wenn folgende Grenzzustandsbedingungen erfüllt ist:

- $R_k \geq E_k$

R_k charakteristischer Widerstand

E_k charakteristische Einwirkung

Die Scherfestigkeit des Bodens als widerstehende Größe spielt demnach eine entscheidende Rolle für die Standfestigkeit einer Böschung. Die Scherfestigkeit wird durch die beiden Scherfestigkeitsparameter Reibungswinkel φ'_k und Kohäsion c'_k beschrieben. Die Parameter werden auf Grundlage der Ergebnisse der Baugrunderkundung (siehe [2]) bestimmt.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die beim Böschungsbruch eintretenden Versagensformen in der Regel sehr komplex sind. Da die wirkliche Form einer Bruchfläche nur bei sehr einfachen Randbedingungen und Baugrundverhältnissen vorhergesagt werden kann bzw. sich sowohl theoretisch als auch messtechnisch nur mit beträchtlichem Aufwand ermitteln lässt, sind für praktische Nachweise meist einfache geometrische Formen ausreichend. Da der Rutschkörper eine Form aufweisen muss, für die Bewegungen kinematisch möglich sind, geht man bevorzugt von einem Kreis in der Spur der Bruchfläche aus. Wichtig hierbei ist, dass der maßgebende (d.h. „gefährlichste“) Gleitkreis (bzw. Bruchmechanismus) nicht von vornherein feststeht, sondern erst „gefunden“ bzw. iterativ bestimmt werden muss.

4.2 Sicherheitskonzept

Die Sicherheit des Gleitkörpers gegen Abrutschen (Gleiten) wird als Standsicherheit der Böschung bezeichnet. Ist die widerstehende Kraft R_k genauso groß wie die einwirkende Kraft E_k , d.h. es gilt $R_k = E_k$, steht die Böschung im Kräftegleichgewicht, ein Böschungsbruch tritt demnach gerade noch nicht ein, die Sicherheit beträgt allerdings „nur 1,0“.

Gemäß der Sicherheitsphilosophie des EC 7 als maßgebende Norm für die geotechnische Bemessung wird jedoch ein bestimmtes Sicherheitsniveau gefordert, d.h. die Sicherheit muss größer als 1 sein.

Der Nachweis der **Sicherheit gegen Böschungsbruch** ist dann gegeben, wenn für den maßgebenden Gleitkreis (bzw. Bruchmechanismus) die Grenzzustandsbedingung auch dann erfüllt ist, wenn die Einwirkungen E_k erhöht und die Widerstände R_k verringert werden. Die Erhöhung bzw. die Verringerung wird durch Multiplikation bzw. Division der Einwirkungen und Widerstände mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten (TSB) erreicht.

- $$\frac{R_k}{\gamma_R} = R_d \geq E_d = E_k \cdot \gamma_F$$

γ_R Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand

R_d Bemessungswert des Widerstands

γ_F Teilsicherheitsbeiwert für eine Einwirkung

E_d Bemessungswert der Einwirkung

Die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte ist abhängig von der Bemessungssituation. Mit den Bemessungssituationen soll bestimmt werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit und über welchen Zeitraum eine bestimmte Einwirkung auftritt und/oder in welcher Größenordnung bestimmte Widerstände vorhanden sind.

Der Quotient aus den Bemessungswerten der Einwirkungen E_d und den Bemessungswerten der Widerständen R_d wird als Ausnutzungsgrad μ definiert.

- $$\mu = E_d / R_d$$

Ist der Ausnutzungsgrad für alle Bemessungssituationen kleiner $\mu \leq 1$, ist eine ausreichende Standsicherheit der Böschung vorhanden.

4.3 Standsicherheitsnachweise

Der Nachweis der Böschungsstandsicherheit ist gemäß DIN 4084 zu führen, die zwischen der globalen und der lokalen Standsicherheit unterscheidet.

Bei der globalen Standsicherheit sind Gleitkörper mit tief reichenden Bruchfugen zu untersuchen (siehe Bild 4-2). In der Regel werden wie im Kapitel 4.1 beschrieben kreisförmige Gleitkörper betrachtet, jedoch können in Abhängigkeit vom Aufbau und der Schichtung des Untergrundes auch nichtkreisförmige Gleitflächen maßgebend werden.

Bei Verlust der globalen Standsicherheit ist das Schadenspotential auf Grund der meist großen Rückgriffsweite erheblich, so dass Schäden an Gebäuden und Straßen möglich sind.

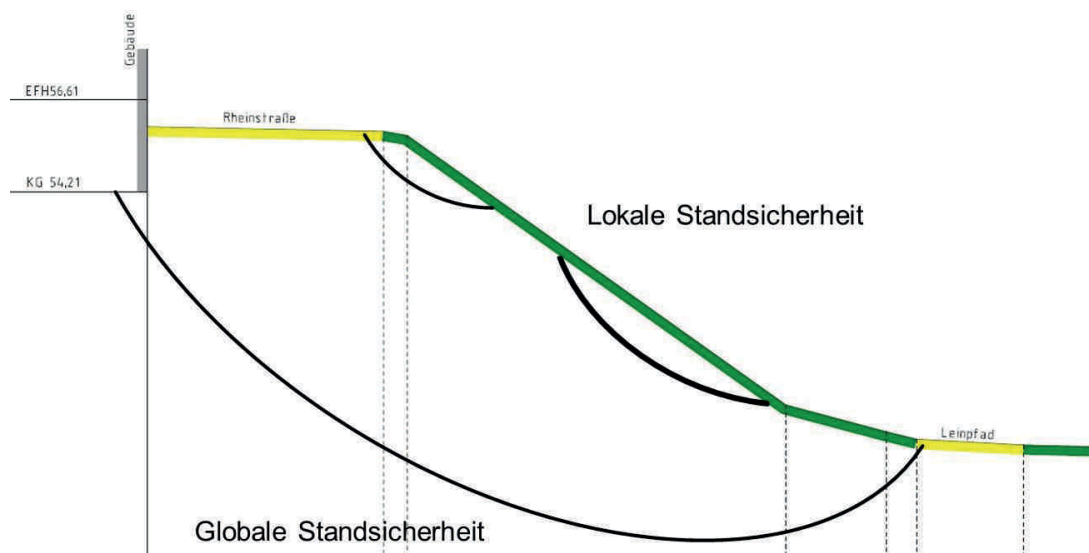


Bild 4-2: Globale und lokale Standsicherheit

Demgegenüber werden bei der lokale Standsicherheit oberflächennahe Bruchkörper untersucht, die in der Regel nicht tiefer als 1 m unter die Böschungsoberfläche reichen. Da es sich hier um kleinräumige Schäden handelt, ist das Gefährdungspotential erheblich geringer als bei einem globalen Versagen.

Grundsätzlich ist für Böschungen, die aus nicht bindigem Boden bestehen, der Nachweis der lokalen Böschungsstandsicherheit maßgebend. Bei bindigem Boden wird mit zunehmender Kohäsion die lokale Standsicherheit größer, so dass die allgemeine bzw. globale Standsicherheit maßgebend wird.

5 Baugrundmodelle und charakteristische Bodenkennwerte

Zur Erkundung der im Untersuchungsgebiet anstehenden Bodenarten und der Schichtenfolge sowie zur Ermittlung der für die Standsicherheit der Uferböschung relevanten bodenmechanischen Eigenschaften der Böden wurden im Zuge der geotechnischen Untersuchungen direkte (Bohrungen und Schürfe) und indirekte (Sondierungen) Baugrundaufschlüsse sowie bodenmechanische Laborversuche durchgeführt (siehe [2]). Auf Grundlage der Ergebnisse der vorgenannten Untersuchungen wurde aus bautechnischer Sicht folgendes 3-schichtiges Baugrundmodell abgeleitet:

- Schicht 1: Anschüttungen / Auffüllungen
- Schicht 2: Hochflutablagerungen (sandige, tonige Schluffe)
- Schicht 3: Terrassenablagerungen (Sande und Kiese)

Die einzelnen Schichtenglieder sind in [2] eingehend beschrieben. Zudem werden für die Standsicherheitsberechnungen die Schicht 4: Vegetationsdeckschicht in Anlehnung an [8], die Schicht 5: Asphaltdeckschicht sowie die Schicht 6: Wasserbausteine (vgl. [2]) eingeführt.

Die für die Schichten 1 bis 6 angesetzten bodenmechanischen Kennwerte sind der Tab. 5-1 zu entnehmen. Die hier aufgeführten charakteristischen Werte der geotechnischen Kenngrößen wurden auf Grundlage der aus den Feld- und Laborversuchen abgeleiteten Werten (vgl. [2]) festgelegt und sind gemäß EC 7 als vorsichtige Schätzwerte des Mittelwertes anzusehen.

Tab. 5-1: Bodenmechanische Kennwerte (charakteristische Werte)

Schicht		γ_k [kN/m³]	γ'_k [kN/m³]	ϕ'_k [°]	c'_k [kN/m²]	$E_{s,k}$ [MN/m²]
1a	Anschüttung; fein- und ge- mischtkörnig; Ø steif	18,5	10	28	2	6
1b	Anschüttung; grobkörnig locker bis mittel- dicht	18	10,5	32	0	15
2	Hochluftlehm; Ø steif	20	10	26	3,5	10
3a	Terrasse; mitteldicht	20	11	33	0	40
3b	Terrasse; dicht	21	12	36	0	80
4	Pflanzendecke	17,5	9	27,5	4	-
5	Asphalt	24	14	30	20	-
6	Wasserbausteine	23	13	37,5	0	-

γ = Wichte des feuchten Bodens, γ' = Wichte des Bodens unter Auftrieb
 ϕ' = Reibungswinkel, c' = Kohäsion, E_s = Steifemodul

Den Standsicherheitsnachweisen werden generell standortspezifische geometrische Baugrundmodelle (vgl. [2]) unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Baugrunderkundung zugrunde gelegt.

6 Einwirkungen und Bemessungssituationen

6.1 Statische Lastannahmen

Die Größe der ständigen und veränderlichen Einwirkungen aus angrenzender Bebauung und Verkehr werden gemäß der DIN EN 1991 (EC 1: Einwirkungen) wie folgt festgesetzt

- Ständige Einwirkungen
Auflast: Wohnbebauung $g_k + p_k = 20 \text{ kN/m}^2$ pro Geschoss
Terrasse etc. $p_k = 3 \text{ kN/m}^2$
- Veränderliche Einwirkungen
Verkehr: (Schwerlast, 60 t) $q_{k,SLW60} = 33,3 \text{ kN/m}^2$
(Schwerlast 30 t) $q_{k,SLW30} = 16,7 \text{ kN/m}^2$
(Lkw/Pkw $\leq 16 \text{ t}$) $q_{k,Lkw} = 10 \text{ kN/m}^2$
(Rad-/Gehweg etc.) $q_{k,so} = 5 \text{ kN/m}^2$

Die Anzahl der Geschosse der jeweiligen Gebäude und deren Abstand zur Böschungsschulter sowie die in Abhängigkeit der Straßenbreite angesetzte Verkehrslast wurden gemäß den Ergebnissen der Neuvermessung [2] für die einzelnen Berechnungsprofile entsprechend festgelegt.

6.2 Charakteristische Wasserstände / Strömungskräfte

Die im Bereich des Uferböschung vorhandenen Grundwasserstände werden wegen der großen Durchlässigkeit der Kies- und Sandschichten unmittelbar von den Rheinwasserständen bestimmt.

Im Geotechnischen Untersuchungsbericht [2] wurden anhand der vorliegenden Grund- und Rheinwasserstände die Strömungsverhältnisse im Bereich der Uferböschung eingehend untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind diesem Bericht als Anlagen 2.2.1 bis 2.2.4 beigelegt, wobei diese gegenüber [2] um die aktuellen Mess- und Loggerdaten ergänzt worden sind. Im Ergebnis ist auch weiterhin festzuhalten, dass im Bereich der Uferböschung weder bei niedrigen (effluente Abflussverhältnisse) noch bei hohen Rheinwasserständen (influente Abflussverhältnisse) nennenswerte hydraulische Gefälle (i) auftreten. Somit können relevante, die Standsicherheit der Böschung beeinflussende Strömungskräfte vernachlässigt werden.

Die für die Standsicherheitsberechnungen zugrunde gelegten charakteristischen Rheinwasserständen einschließlich der Spannbreite der im Untersuchungsbereich (Rhein-km 661,3 bis 664,4) auftretenden Wasserstände sind nachstehend aufgeführt:

- Wasserstand bei niedrigem Abfluss (NQ):
W (NQ) = 42,81 bis 42,13 mNN
- Wasserstand bei mittlerem Abfluss (MQ):
W (MQ) = 44,48 bis 43,87 mNN
- Höchster Schifffahrtswasserstand:
HSW = 49,06 bis 48,43 mNN
- hundertjähriger Abfluss (HQ_{100}):
W (HQ_{100}) = 52,04 bis 51,42 mNN

- zweihundertjähriger Abfluss (QH₂₀₀):
W (HQ₂₀₀) = 52,55 bis 51,93 mNN

Die Festlegung des Bemessungshochwasserstands (BHW) erfolgt in Anlehnung an die DIN 19712 [6] sowie das DWA-Merkblatt 507-1 [7] für die Überschreitungswahrscheinlichkeit des Abflusses HQ₁₀₀, so dass gilt:

- BHW = W (HQ₁₀₀)

6.3 Seismische Trägheitskräfte

Hinsichtlich des Nachweises der Standsicherheit der Uferböschung infolge von Erdbeben werden folgende seismische Trägheitskräfte F_H (horizontal) und F_V (vertikal) in Anlehnung an EC 8 [4] berücksichtigt:

- $$F_H = k_h \cdot G = 0,5 \cdot \frac{S \cdot \gamma_I \cdot a_{gR}}{g} \cdot G$$

mit

k_h horizontaler Erdbebenbeiwert [-]

G Gewicht der gleitenden Masse [kN]

S Bodenparameter [-]

hier: Baugrundklasse C $\Rightarrow S = 1,5$

γ_I Bedeutungsbeiwert [-]

hier: Bedeutungskategorie II $\Rightarrow \gamma_I = 1,0$

a_{gR} Referenz-Spitzenwert der Bodenbeschleunigung [m/s²]

hier: Erdbebenzone 1 $\Rightarrow a_{gR} = 0,4 \text{ m/s}^2$

g Erdbeschleunigung [m/s²]

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

- $F_v = k_v \cdot G$
mit
 k_v vertikaler Erdbebenbeiwert [-]
hier: $k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$

Somit sind den Standsicherheitsberechnungen folgende Erdbebenbeiwerte zugrunde zulegen:

- $k_h = 0,031$
- $k_v = 0,015$

6.4 Einwirkungskombinationen / Bemessungssituationen

Die in Kapitel 6.1, 6.2 und 6.3 aufgeführten Einwirkungen, Wasserstände und seismischen Trägheitskräfte werden gemäß EC 7 [3] und in Anlehnung an DIN 19712 [6] und dem DWA-Merkblatt 507-1 [7] als Einwirkungskombinationen zusammengefasst und den folgenden Bemessungssituationen zugeordnet.

- Ständige Bemessungssituation BS-P (Persistent situations), „Hochwasserzustand“
Diese Situation berücksichtigt folgende Einwirkungskombinationen:
ständige Einwirkungen, Auflast Wohnbebauung: $g_k + p_k$
veränderliche Einwirkungen, Verkehrslast: q_k
Bemessungswasserstand: BHW = W (HQ100)
- Außergewöhnliche Bemessungssituation BS-A (Accidental situations), „Besondere Belastung und Situation“
Hierzu gehören die Einwirkungen der ständigen Bemessungssituation zusammen mit einer außergewöhnlichen Einwirkung, hier W (HQ200):
ständige Einwirkungen, Auflast Wohnbebauung: $g_k + p_k$

veränderliche Einwirkungen, Verkehrslast:	q_k
Wasserstand:	W (HQ200)

- Bemessungssituation Erdbeben BS-E
 Hierzu gehören die Einwirkungen der ständigen Bemessungssituation zusammen mit den seismischen Trägheitskräften:
 ständige Einwirkungen, Auflast Wohnbebauung: $g_k + p_k$
 veränderliche Einwirkungen, Verkehrslast: q_k
 Wasserstand: HSW
 seismische Trägheitskräfte: F_H, F_V

6.5 Teilsicherheitsbeiwerte (TSB)

Die für den Nachweis der Sicherheit gegen Böschungsbruch anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte (TSB) sind abhängig von der jeweiligen Bemessungssituation (Kapitel 6.4) sowie dem betrachteten Grenzzustand.

Der Grenzzustand legt die Vorgehensweise für die Bildung der Bemessungswerte fest und führt somit die Grenzzustandsgleichung ein, wobei zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS = ultimate limit states) und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS = serviceability limit states) unterschieden wird.

Der für die Böschungsbruchberechnungen maßgebende Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) nach EC 7 [3] ist hier der Grenzzustand des Versagens durch Verlusts der Gesamtstandsicherheit GEO-3 (Baugrundversagen). Beim Nachweis im Grenzzustand GEO-3 werden vor Beginn der Berechnung die charakteristischen Scherfestigkeitsparameter $\tan \varphi_k$ und c_k (vgl. Tabelle 5-1) mit den Teilsicherheitsbeiwerten (TSB) auf die Bemessungswerte $\tan \varphi_d$ und c_d abgemindert (Tabelle 6-1). Analog werden die charakteristischen Einwirkungen mit den Teilsicherheitsbeiwerten (Tabelle 6-2) auf die Bemessungseinwirkungen erhöht.

Tab. 6-1: Teilsicherheitsbeiwerte (TSB) für geotechnische Kenngrößen

Einwirkungen	Zeichen	BS-P	BS-A	BS-E
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$	$\gamma_{\varphi'}$	1,25	1,15	1,00
Kohäsion c'	$\gamma_{c'}$	1,25	1,15	1,00
BS-P: ständige Bemessungssituation BS-A: außergewöhnliche Bemessungssituation BS-E: Bemessungssituation Erdbeben				

Tab. 6-2: Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen

Einwirkungen	Zeichen	BS-P	BS-A	BS-E
Ständige Einwirkungen ^{*)}	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstig veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
^{*)} einschließlich Wasserdruck BS-P: ständige Bemessungssituation BS-A: außergewöhnliche Bemessungssituation BS-E: Bemessungssituation Erdbeben				

Beim Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) werden die Teilsicherheitsbeiwerte zu $TSB = 1,0$ gesetzt.

7 Standsicherheitsberechnungen

Unter Berücksichtigung der in den Kapiteln 5 und 6 definierten Randbedingungen und Berechnungsgrundlagen werden nunmehr in diesem Kapitel die Böschungsberechnungen durchgeführt, beschrieben und bewertet.

Nachdem im Kapitel 7.1 die Grundsätze zur Durchführung der Böschungsbruchberechnungen diskutiert werden, werden im Kapitel 7.2 zunächst im Rahmen von Fallstudien an repräsentativen Querschnitten die Auswirkung von unterschiedlichen Rheinwasserständen und Verkehrslasten auf die Standsicherheit der Böschung untersucht sowie für die jeweiligen Bemessungssituationen die Nachweise der Sicherheit gegen Böschungsbruch geführt. Zudem wird das Gefährdungspotential von möglichen Böschungsrutschungen auf die angrenzende Bebauung und des Straßenraums untersucht. Die Böschungsbruchberechnungen erfolgen auf Grundlage von klassischen Ansätzen der Erdstatik, wobei das Lamellenverfahren nach BISHOP für kreisförmige Gleitlinien gemäß DIN 4084 [5] zur Anwendung kommt.

Im Kapitel 7.3 werden ebenfalls an repräsentativen Querschnitten Vergleichsberechnungen mithilfe der Finite-Elemente-Methode durchgeführt, um den Spannungszustand in der Böschung unter Berücksichtigung der Entstehungsgeschichte sowie der Eigenschaften der beteiligten Böden auf den Bruchmechanismus zu untersuchen und zu überprüfen, ob und inwieweit die Annahme kreisförmiger Gleitlinien bzw. Bruchkörper realitätsnah ist.

Unter Zugrundelegung der Ergebnisse der Fallstudien und der Vergleichsberechnungen werden im Kapitel 7.4 in Abhängigkeit der geometrischen Kenndaten, des Baugrundaufbaus sowie der Verkehrsbelastung aus den insgesamt 76 vorhandenen Querprofilen 39 charakteristische Querprofile ausgewählt, die Standsicherheitsberechnungen an diesen durchgeführt

und die Ergebnisse auf die restlichen 37 Querprofile übertragen, um so die Standsicherheit der Uferböschung zu beurteilen und das Gefährdungspotentials für die angrenzende Bebauung und den Straßenraum abzuschätzen.

7.1 Allgemeines

Die Nachweise zur Standsicherheit der Uferböschung werden im Folgenden auf Basis der **klassischen Ansätze der Erdstatik** geführt. Die Gleitkreisberechnungen erfolgen gemäß DIN 4084 [5] nach dem Lamellenverfahren nach BISHOP für kreisförmige Gleitlinien.

Zur Untersuchung der Standsicherheit sind nach DIN 4084 grundsätzlich verschiedenartige Bruchmechanismen zu untersuchen. Dazu werden starre Bruchkörper durch gerade, gebrochene, gekrümmte oder kreisförmige Gleitflächen begrenzt und in der Art und Abmessung variiert. Maßgeblich wird bei dieser Untersuchung der Bruchmechanismus, der zum größten Ausnutzungsgrad führt.

Für alle möglichen relevanten Situationen aus der Kombination der Bemessungssituationen, externen Belastungen und Grundwassersituationen sind aus der Variation von Art und Geometrie des Bruchmechanismus (j) rechnerisch die Ausnutzungsgrade (μ_j) zu bestimmen. Der maßgebliche Ausnutzungsgrad μ ergibt sich als Maximalwert aller durch Variation der Bruchmechanismen ermittelten Ausnutzungsgrade.

- $$\mu = \max \left(\mu_j = \frac{E_j}{R_j} \right) \leq 1$$

E_j Einwirkung aus dem Bruchmechanismus j

R_j Widerstand aus dem Bruchmechanismus j

Der maßgebliche Ausnutzungsgrad darf für alle Bemessungssituationen den Wert "1" nicht übersteigen. Wenn das erfüllt ist, gilt die Böschung als ausreichend standsicher.

Um zu überprüfen, ob und inwieweit die Annahme kreisförmiger Gleitkörper zutreffend ist, werden Vergleichsberechnungen mithilfe **kontinuumsmechanischer Verfahren** (Finite-Elemente-Methode) durchgeführt. Die FE-Methode erfolgt nicht unter Zugrundelegung von Starrkörpermechanismen, sondern über die Interaktion von verformbaren, miteinander verknüpften Elementen.

Anders als bei den klassischen Verfahren sind bei den kontinuumsmechanischen Verfahren somit Annahmen zum Bruchmechanismus nicht erforderlich. Bei der Berechnung wird ein Spannungs- und Verschiebungszustand ermittelt, der als relevantes Ergebnis die Information liefert, dass für die gegebene Situation ein statisches Gleichgewicht in der Böschung existiert.

Die bei der FE-Modellierung angesetzten Scherparameter $\tan \varphi$ und c werden vom FE-Programm rechnerisch soweit reduziert (sog. φ - c -Reduktion) bis kein Gleichgewichtszustand mehr erreicht werden kann und das System versagt. Aus den dabei ermittelten rechnerischen Scherparametern $\tan \varphi_{bruch}$ und c_{bruch} , bei denen also das Versagen des Systems eintreten würde, lässt sich ein Wert für die Sicherheit ableiten:

- $$\eta_{FEM} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{bruch}} = \frac{c}{c_{bruch}}$$

Der zugehörige Versagensmechanismus wird über die Felder der Verschiebungen und der inkrementellen Dehnungen zudem grafisch dargestellt. Der Ausnutzungsgrad kann wie folgt bestimmt werden:

- $$\mu = \frac{\gamma_{\varphi}}{\eta_{FEM}} = \frac{\gamma_c}{\eta_{FEM}}$$

$\gamma_{\varphi}, \gamma_c$ Teilsicherheitsbeiwerte

7.2 Fallstudien

In einem ersten Schritt werden zunächst zur Beurteilung der Auswirkung von maßgebenden Einwirkungsfaktoren wie Rheinwasserstand und Verkehrslasten auf die Standsicherheit der Uferböschung im Rahmen von Fallstudien an den repräsentativen Berechnungsprofilen QP10, QP30, QP41, QP43 und QP59 Böschungsbruchberechnungen durchgeführt.

- Die Teilsicherheitsbeiwerte wurden für diese Berechnungen auf $TSB = 1,0$ gesetzt (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit), um ein Maß für das Kräftegleichgewicht innerhalb der Uferböschung zu erhalten.
- Daran anschließend erfolgt der Nachweis der Sicherheit gegen Böschungsbruch (Grenzzustand der Tragfähigkeit) für die einzelnen Bemessungssituationen sowie eine Beurteilung der Gefährdung der angrenzenden Wohnbebauung.

Maßgebend für die Auswahl der vorgenannten Querprofile waren die Faktoren Böschungsgeometrie (mittlere und maximale Böschungswinkel), variierende Verkehrslasten bzw. Abstände zwischen bestehender Bebauung und Böschungsschulter sowie unterschiedliche Baugrundsichtungen bzw. Baugrundmodelle.

Die geometrischen Abmessungen der Querprofile QP10, QP30, QP41, QP43 und QP59 einschließlich der entsprechenden geometrischen Baugrundmodelle können den Anlagen 3.1 bis 3.5 entnommen werden.

Die Gleitkreisberechnungen erfolgen gemäß DIN 4084 [5] nach dem Lammellenverfahren nach BISHOP für kreisförmige Gleitlinien mit dem Programm GGU-STABILITY [13]. Die Ergebnisse der Berechnungen sind im Einzelnen den entsprechenden Anlagen der jeweiligen Fallstudie zu entnehmen. Hierbei ist in den Anlagen der durch Variation der Gleitkreismittelpunkte und Gleitkreisradien ermittelte ungünstigste Gleitkreis mit Ansatz des Porenwasserdrucks dargestellt.

Fallstudie „Wasserstand“

In der Fallstudie „Wasserstand“ wurden Böschungsbruchberechnungen für die Rheinwasserstände W (NQ, MQ), HSW und W (HQ100, HQ200) sowie für „bordvoll“ durchgeführt. Der Berechnungslauf „max μ “ bezeichnet den theoretischen Rheinwasserstand, der den maximalen Ausnutzungsgrad liefert. Die Verkehrslast wurde standortspezifisch in Abhängigkeit der Straßenbreite festgelegt. Die Ergebnisse der Fallstudie „Wasserstand“ sind im Einzelnen den Anlagen 4.1 bis 4.5 zu entnehmen.

Die für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Teilsicherheitsbeiwerte $TSB = 1$) ermittelten Ausnutzungsgrade μ sind der Übersicht halber in Tabelle 7-1 aufgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der maßgebende Rheinwasserstand, d.h. der Wasserstand, der für den ungünstigsten Gleitkreis den max. Ausnutzungsgrad liefert, liegt je nach Lage des Bruchkörpers bei HSW bzw. W (HQ 200).
- Der Einfluss von Rheinwasserständen zwischen W (HQ 100) und W (HQ 200) auf den Ausnutzungsgrad ist marginal.

- Der Einfluss des Wasserstandes W (NQ) bis W (HQ200) auf den Ausnutzungsgrad beträgt ca. 3 bis 11 %, $\Delta\mu = 0,03$ bis $0,11$

Tab. 7-1: Fallstudie „Wasserstand“, Ausnutzungsgrade μ für TSB=1 (Anlagen 4.1 bis 4.5)

Rheinwasserstand [mNN]	QP 10 Anlage 4.1	QP 30 Anlage 4.2	QP 41 Anlage 4.3	QP 43 Anlage 4.4	QP 59 Anlage 4.5
W (NQ)	0,96 W=42,65	0,89 W=42,54	1,23 W=42,48	0,89 W=42,42	0,99 W=42,31
W (MQ)	0,96 W=44,34	0,89 W=44,25	1,23 W=44,19	0,89 W=44,14	0,99 W=44,03
HSW	0,97 W=48,96	0,92 W=48,86	1,26 W=48,80	0,91 W=48,74	0,99 W=48,61
W (HQ100)	1,06 W=51,97	0,91 W=51,85	1,28 W=51,79	0,97 W=51,73	1,06 W=51,60
W (HQ 200)	1,07 W=52,48	0,91 W=52,35	1,28 W=52,29	0,97 W=52,23	1,06 W=52,10
„bordvoll“	0,96 W=55,68	0,79 W=54,13	1,11 W=56,51	0,84 W=56,05	0,97 W=54,57
„max μ “	1,07 W = 52,60	0,93 W=50,50	1,28 W=52,43	0,97 W=52,10	1,06 W=52,30
Verkehrslasten: QP 10, 59: $p_k = 33,3$ kPa QP 30, 41; $p_k = 16,7$ kPa QP 43: $p_k = 10,0$ kPa					

Fallstudie „Verkehr“

In der Fallstudie „Verkehr“, deren Ergebnisse den Anlagen 5.1 bis 5.5 zu entnehmen und in Tabelle 7-2 zusammenfassend dargestellt sind, wurden die Ausnutzungsgrade (TSB = 1,0) für unterschiedliche Verkehrslasten ($p_k = 0,0; 10,0; 16,7$ und $33,3$ kN/m²) ermittelt. Die Berechnungen wurden für die Rheinwasserstände HSW und W (HQ200) durchgeführt. Aus den Berechnungsergebnissen ist Folgendes abzuleiten:

- Grundsätzlich gilt, dass je größer die Verkehrslast, desto größer ist der Einfluss auf den Gleitkreis, desto tiefer greift der Bruchkörper in die Uferböschung ein, desto größer wird der Ausnutzungsgrad.

- Beim Querprofil 41 beeinflusst die Verkehrslast den Ausnutzungsgrad nicht, weil die Uferböschung derart steil ist, dass der maßgebende Gleitkreis mehr oder weniger unmittelbar an der Böschungsschulter beginnt.
- Der Einfluss der Verkehrslast auf den Ausnutzungsgrad liegt bei dem Rheinwasserstand HSW zwischen 3 und 10 % und beim W (HQ200) zwischen 6 und 16 %.

Tab. 7-2: Fallstudie „Verkehr“, Ausnutzungsgrade μ für TSB = 1,0
Rheinwasserstand: HSW und W (HQ200)

p_k [kPa]	QP 10 Anlage 5.1		QP 30 Anlage 5.2		QP 41 Anlage 5.3		QP 43 Anlage 5.4		QP 59 Anlage 5.5	
	HSW	HQ 200	HSW	HQ 200	HSW	HQ 200	HSW	HQ 200	HSW	HQ 200
0,0	0,91	0,98	0,91	0,83	1,23	1,23	0,90	0,96	0,96	0,98
10,0	0,91	1,01	0,91	0,87	1,25	1,26	0,91	0,97	0,97	0,99
16,7	0,93	1,02	0,92	0,91	1,26	1,28	0,92	0,99	0,97	1,01
33,3	0,97	1,07	0,96	0,99	1,29	1,33	0,94	1,02	0,99	1,06

Fallstudie „Standsicherheitsnachweise“

Die Ergebnisse der Nachweise der Sicherheit gegen Böschungsbruch gemäß EC 7 sind im Einzelnen den Anlagen 6.1 bis 6.5 zu entnehmen und in Tabelle 7-3 der Übersicht halber zusammengestellt. Bei den Berechnungen wurde die Verkehrslast standortspezifisch in Abhängigkeit der Straßenbreite angesetzt. In der Tabelle 7-3 ist darüber hinaus zum Vergleich der Ausnutzungsgrad für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (TSB = 1,0) angegeben.

Tab. 7-3: Ausnutzungsgrade μ für Fallstudie „Standicherheit“

Bemessungssituation	QP 10	QP 30	QP 41	QP 43	QP 59
TSB = 1 (HQ ₁₀₀)	1,06	0,91	1,28	0,97	1,06
BS-P	1,36	1,17	1,62	1,23	1,36
BS-A	1,17	1,00	1,41	1,07	1,16
BS-E	1,02	0,98	1,33	0,97	1,05
Verkehrslasten: QP 10, 59: $p_k = 33,3$ kPa QP 30, 41: $p_k = 16,7$ kPa QP 43: $p_k = 10,0$ kPa					

Im Ergebnis lassen sich nachstehend aufgeführte Punkte festhalten:

- Die Bemessungssituation BS-P ist maßgebend, weil hier die höchsten Ausnutzungsgrade erreicht werden.
- Die Bemessungssituation BS-A liefert geringere Ausnutzungsgrade, weil die Teilsicherheitsbeiwerte im Vergleich zu BS-P kleiner sind und der Einfluss des höheren Wasserstandes W (HQ200) auf μ gering ist (siehe Fallstudie „Wasserstand“).
- Die Bemessungssituation BS-E ist hier nicht maßgebend.
- Die Ausnutzungsgrade im BS-P liegen ca. 26 bis 34% (Sicherheit) über den Ausnutzungsgraden im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (TSB=1,0).
- Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Ausnutzungsgrade μ für die Bemessungssituation BS-P alle über 1 liegen. Eine ausreichende Standicherheit gemäß EC 7 ist somit für keines der betrachteten Querprofile gegeben.

Fallstudie „Gleitkreise mit Ausnutzungsgraden $\mu > 1$ “

Die Gleitkreisberechnungen der vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass der maßgebende Bruchkörper (μ_{\max}) zwar meist die gesamte Uferböschung erfasst, jedoch relativ oberflächennah verläuft, so dass voraussichtlich nur ein geringes Gefährdungspotential hinsichtlich der angrenzenden Bebauung besteht.

Zur Beurteilung des Gefährdungspotentials für die bestehende Bebauung wurden für die Bemessungssituation BS-P in den Anlagen 7.1 bis 7.5 die Gleitkreise herausgesucht, die einen Ausnutzungsgrad von $\mu > 1,0$ aufweisen. Exemplarisch hierfür ist das Ergebnis dieser Untersuchung für die Querprofile 30 und 59 in den Bildern 7-1 und 7-2 dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Gleitkreise mit $\mu > 1,0$ den gesamten Straßenraum bis zur Hinterkante der einwirkenden Verkehrslast erfassen und dass die angrenzenden Gebäude außerhalb des Einflussbereiches von Gleitkreisen mit $\mu > 1,0$ liegen. Somit bestehen für die angrenzenden Gebäude kein unmittelbares Gefährdungspotential.

Zudem ist anhand der Berechnungsergebnisse abzuleiten, dass der Einfluss der Verkehrslast auf die „Rückgriffsweite“ des Bruchkörpers in den Straßenraum groß ist und dass somit das Maß der Gefährdung für die Standsicherheit der Wohnbebauung neben dem Wasserstand auch von der Größe und der Laststellung der Verkehrseinwirkung abhängt.

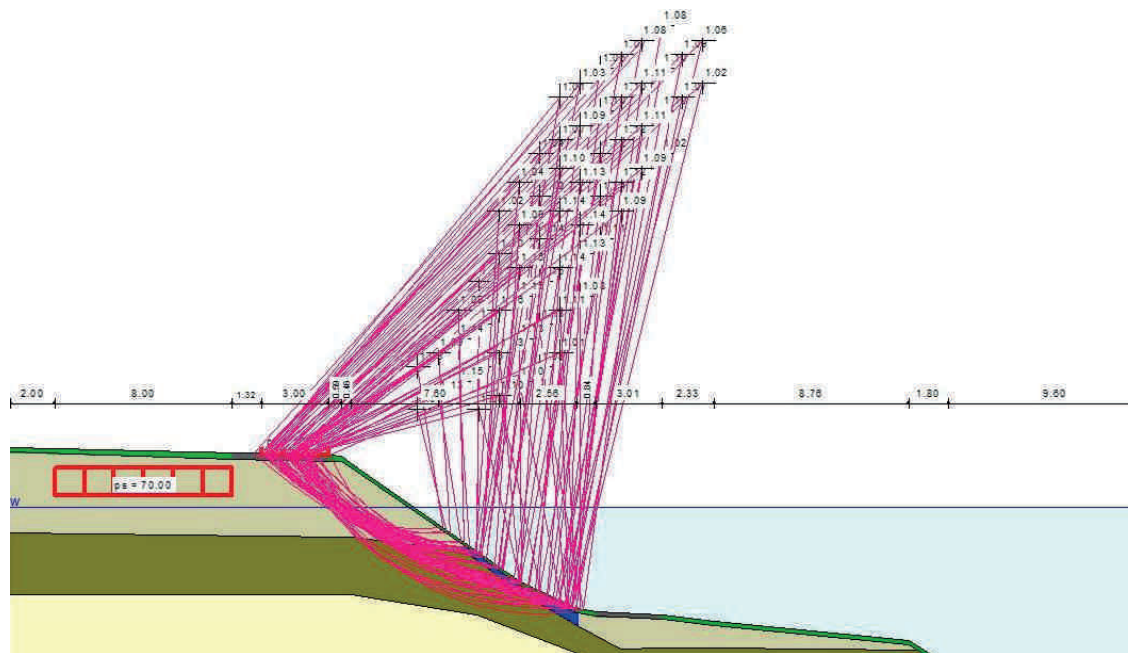


Bild 7-1: Querprofil 30, Gleitkreise mit $\mu > 1,0$ für BS-P

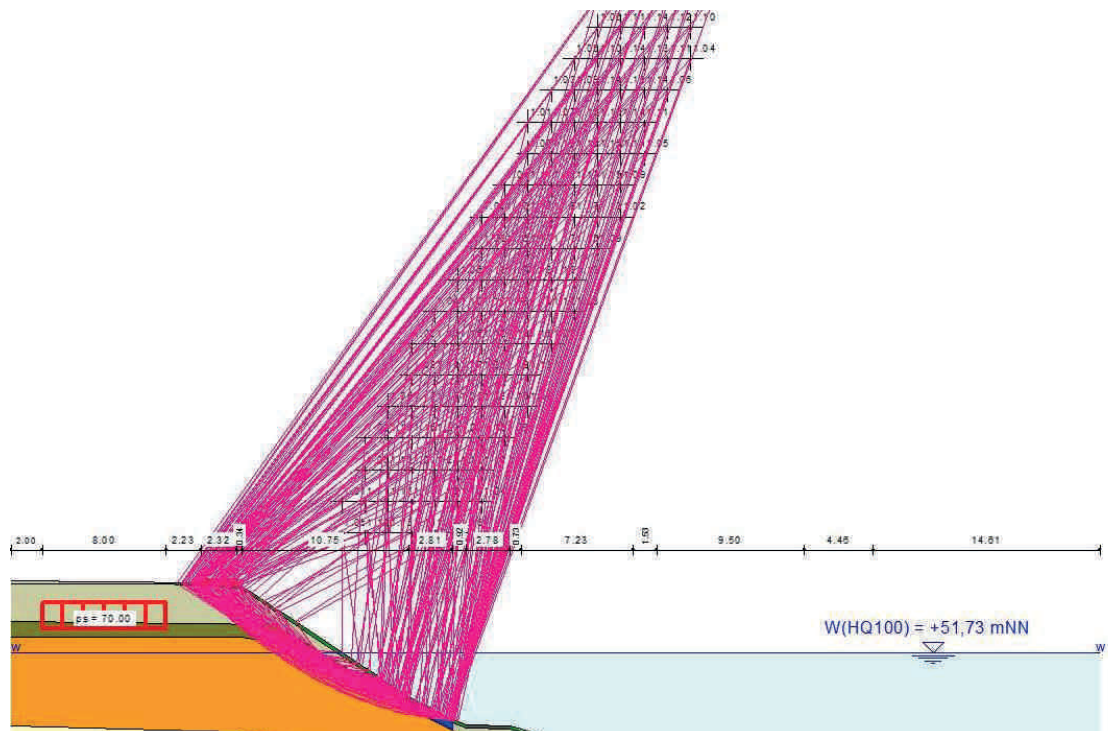


Bild 7-2: Querprofil 59, Gleitkreise mit $\mu > 1,0$ für BS-P

7.3 Vergleichsberechnungen

Die Vergleichsberechnungen werden exemplarisch an den Querschnitten QP30 und QP43 mithilfe der Finite-Elemente Methode durchgeführt. Ziel ist es, den Spannungszustand in der Böschung unter Berücksichtigung der Entstehungsgeschichte sowie der Eigenschaften der beteiligten Böden auf den Bruchmechanismus zu untersuchen.

Die Festlegung der jeweiligen Berechnungsausschnitte erfolgt gemäß den Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik [10]. Der Berechnungsausschnitt, die geometrischen Randbedingungen sowie die Diskretisierung (Finite Elemente) sind in den Anlagen 8.1 (QP30) und 8.2 (QP43) dargestellt.

Das Baugrundmodell (vgl. Anlage 3.2 und 3.4) und die Baugrundsichtung werden gemäß den Angaben in Kapitel 6.5 festgelegt. Da die Untersuchung des plastischen Grenzzustandes im Vordergrund steht, wird für den Baugrund ein linear-elastisches, starr-plastisches Stoffgesetz (Mohr-Coulomb) verwendet.

Der Berechnungsablauf setzt sich aus den folgenden Berechnungsschritten zusammen:

- B1: Ausgangsspannungszustand, nach Jaky mit $k_0 = 1 - \sin \varphi$, ebenes System, Wasserstand: HSW bzw. W (HQ100)
- B2: Ausbildung der Uferböschung
- B3: Aktivierung der Verkehrslast
- B4: Reduktion der Scherfestigkeitsparameter bis zum Bruchzustand, Ermittlung des Ausnutzungsgrads μ

Der sich nach dem Berechnungsschritt B 4 (nach der φ -c-Reduktion) einstellende Versagensmechanismus (Bruchzustand) ist für die jeweiligen Berechnungsprofile ebenfalls in den Anlagen 8.1 und 8.2 dargestellt. Die Berechnungsergebnissen lassen nachstehend aufgeführte Schlussfolgerungen zu:

- Die Form der Bruchkörper bzw. der Scherfugen ist annähernd kreisförmig und weicht von der mit erdstatischen Ansätzen ermittelten Form nur geringfügig ab (vgl. Anlage 4.2.3 und 4.4.4).
- Die Breite der Bruchkörper (an der GOK) betragen rd. 2 m, die Tiefe bis ca. 2,4 m.
- Die Bruchkörper erfassen nicht die gesamte Uferböschung. Der Austritt der Scherfuge liegt etwa in Mitte der Wasserbausteine, unterhalb W (HQ100) bzw. HSW
- Die Ausnutzungsgrade nach erfolgter φ -c-Reduktion errechnen sich zu:
Querprofil QP 30
 $\mu = 0,957$ (SLS mit TSB = 1,0), vgl. Anlage 4.2.3 $\mu = 0,92$
Querprofil QP 43
 $\mu = 0,950$ (SLS mit TSB = 1,0), vgl. Anlage 4.4.4 $\mu = 0,97$
- Berücksichtigt man, dass sich die beiden Berechnungsverfahren, FE-Methode und erdstatische Ansätze, vom Grundsatz her stark unterscheiden, zeigen die Berechnungsergebnisse jedoch eine relativ gute Übereinstimmung hinsichtlich der Bruchform und des Bruchkörpers sowie letztendlich auch in den ermittelten Ausnutzungsgraden.

7.4 Nachweis der Standsicherheit der Uferböschung

7.4.1 Globale Standsicherheit

Auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Fallstudien und Vergleichsberechnungen erfolgen in diesem Kapitel die Nachweise der Sicherheit gegen Böschungsbruch gemäß EC 7 für die im Rahmen der Neuvermessung der Uferböschung aufgenommenen Querprofile. Insgesamt wurden für 39 Querprofile folgende Standsicherheitsnachweise geführt:

- Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS), d.h. $TSB = 1,0$
- Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)
BS-P: ständige Bemessungssituation
BS-A: außergewöhnliche Bemessungssituation
BS-E: Bemessungssituation Erdbeben

Darüber hinaus sind für die jeweiligen Querprofile die Gleitkreise $\mu > 1$ für die Bemessungssituation BS-P darstellt, um unter Zugrundelegung der Lage der Gleitkörper auf das unmittelbare Gefährdungspotential der angrenzende Bebauung und des Straßenraumes zu schließen.

Die Berechnungsergebnisse sind im Einzelnen den Anlagen 9.1 bis 9.39 sowie in tabellarischer Form zusammengefasst der Anlage 10 zu entnehmen. Vom Grundsatz her lassen sich hieraus hinsichtlich der globalen Standsicherheit folgende Schlussfolgerungen ableiten:

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ($TSB = 1,0$)

- In den Abschnitten I und II liegt der Ausnutzungsgrad meist etwa bei $\mu = 1$ mit Abweichungen von ca. $\pm 10\%$, d.h. die Uferböschung befindet sich im Grenzgleichgewicht.

- Dies hat zur Folge, dass in diesen Bereichen eine Vergrößerung der einwirkenden Kräfte und/oder eine Verminderung der widerstehenden Kräfte unmittelbar zu Störungen des Gleichgewichts führen und mithin Verformungen innerhalb der Uferböschung und Böschungsbrüche auftreten können.
- Bei den Querprofilen 37 bis 41 wird der Ausnutzungsgrad μ im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit um ca. 11 bis 21% überschritten. Ein auftretender Böschungsbruch ist für den vorgenannten Bereich wahrscheinlich.

Grenzzustand der Tragfähigkeit

- In den Abschnitte I und II liegen die Ausnutzungsgrade für die maßgebende Bemessungssituation (BS-P) generell über 1,0 ($\mu > 1,0$). Somit ist eine ausreichende Standsicherheit der Uferböschung hier nicht gegeben. Lediglich für das Profil 3 konnte eine ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden.
- Der Abschnitt III wird durch die im oberen und unteren Bereich der Böschung vorhandenen Stützmauern charakterisiert. Hierdurch werden die Böschungshöhen und die Böschungswinkel stark reduziert. Obwohl für die Querprofile 62 und 65 die Ausnutzungsgrade um 14 bzw. 27 % überschritten werden, kann unter Berücksichtigung der baulichen Elemente von einer insgesamt ausreichenden globalen Standsicherheit der Uferböschung des Abschnitts III ausgegangen werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die Stützmauern als Tragelement eine ausreichende innere und äußere Standsicherheit aufweisen.
- Für die Profile des Abschnitts IV konnte eine ausreichende globale Standsicherheit nachgewiesen werden.

Gefährdung der angrenzenden Bebauung und des Straßenraums

- Die Böschungsbruchberechnungen zeigen, dass die Gleitkreise mit $\mu > 1,0$ für die Bemessungssituation BS-P meist den gesamten Straßenraum bis zur Hinterkante der wirkenden Verkehrslast umfassen. Hieraus ist abzuleiten, dass die Standsicherheit des Straßenraumes (Rheinstraße/Rheinuferweg) nicht gegeben ist.
- Die angrenzenden Gebäude liegen meist außerhalb des Einflussbereiches von Gleitkreisen mit $\mu > 1,0$ (ständige Bemessungssituation). Somit bestehen für die angrenzenden Gebäude grundsätzlich kein unmittelbares Gefährdungspotential.
- Wie die Anlagen 9.1.5 und 9.3.5 zeigen, schneiden bei den Querprofile 2 und 4 einige potentielle Bruchkörper die Gebäudekanten. Für diese Bruchkörper werden die Ausnutzungsgrade in der ständigen Bemessungssituation um ca. 1 bis 5 % überschritten. Aufgrund der nur geringen Überschreitung und des Umstandes, dass für das Querprofil 3 eine ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden konnte, lässt sich unter Berücksichtigung räumlicher Effekte auch für die Gebäude dieser beiden Querprofile ein unmittelbares Gefährdungspotential ausschließen.

7.4.2 Lokale Standsicherheit

Gemäß DIN 4084 sind für die Beurteilung der Gesamtstandsicherheit der Böschung neben globalen auch lokale Bruchkörper zu untersuchen (vgl. Kapitel 4.3). Die lokale Standsicherheit ist hierbei für böschungsparallele Gleitlinien nachzuweisen, wobei die Gleitlinie in der Regel bis etwa 1 m unter die Böschungsoberfläche reicht.

Nach den Ergebnissen der Baugrunderkundung stehen nahe der Böschungsoberfläche bis in Tiefenbereich von 1 m hauptsächlich kohäsive bzw. bindige Böden an (Anschüttung: Schicht 1a, Hochflutlehm: Schicht 2 und Pflanzendecke: Schicht 4, siehe Kapitel 5). Aufgrund der Kohäsion im

oberflächennahen Bereich wird der Bruchkörper bzw. die Gleitlinien nach „unten gezogen“, so dass die Übergänge in diesem Fall zwischen globaler und lokaler Standsicherheit fließend sind. Dies führt dazu, dass die im Kapitel 7.4.1 durchgeführten Böschungsbruchberechnungen zur globalen Standsicherheit auch oberflächennahe Gleitkörper und somit den Nachweis der lokalen Standsicherheit einschließen.

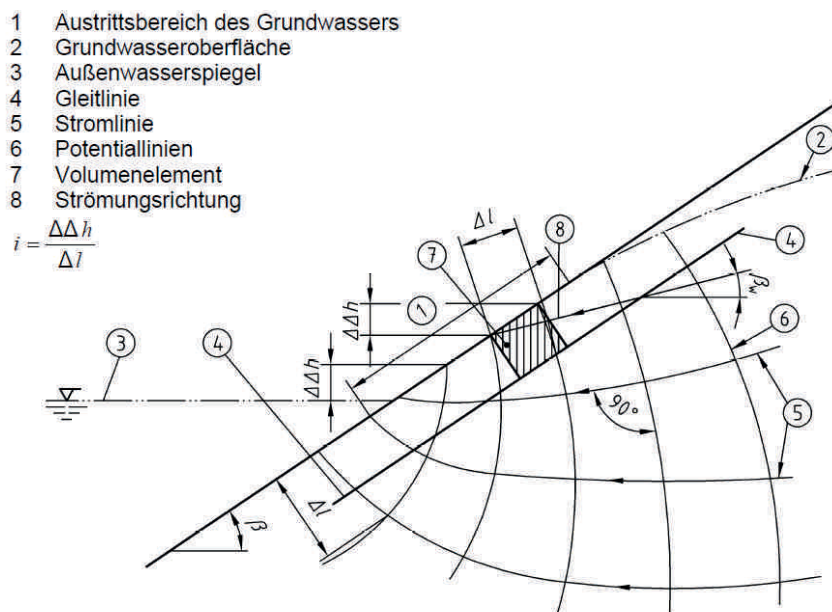


Bild 7-3: Böschungsparallele Gleitlinie [5]

Um aber dennoch ein Maß für das Gefährdungspotential lokaler Rutschungen im betrachteten Böschungsbereich zu bekommen, werden im Folgenden für die maximal geneigten Böschungsbereiche der Nachweis der lokalen Standsicherheit für oberflächennahe Bruchkörper geführt. Unter Annahme kohäsiven Materials (Hochflutlehm, Schicht 1a) und einer Dicke des Bruchkörpers von $m = 1,0 \text{ m}$ ergibt sich der Ausnutzungsgrad zu:

$$\bullet \quad \mu_{lokal} = \frac{E_d}{R_d} = \frac{h \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \gamma_k}{c'_k / \gamma_\phi + h \cdot \cos^2 \beta \cdot \gamma_k \cdot \tan \varphi'_k / \gamma_\phi}$$

- mit
 - γ_k : Wichte des erdfeuchten Bodens (= 20 kN/m³)
 - β : Böschungswinkel β_{\max}
 - φ'_k : Charakteristischer Wert des Reibungswinkels (= 26°)
 - c'_k : Charakteristischer Wert der Kohäsion (= 3,5 kN/m²)
 - m : Dicke des Bruchkörpers ($m = 1$) bzw. $h = m/(\cos\beta)$
 - $\gamma_{c,\varphi}$: Teilsicherheitsbeiwert (= 1,25 für BS-P)

Mithilfe der oben aufgeführten Gleichung wurde jeweils für die im Rahmen der Auswertung der geometrischen Kenndaten ermittelten maximalen Böschungswinkel der lokale Ausnutzungsgrad μ_{lokal} berechnet. Die Ergebnisse sind für die einzelnen Querprofile in der Tabelle der Anlage 10 aufgeführt. Die Berechnungen erfolgten sowohl für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (TSB=1,0) als auch für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (BS-P).

Wie den Spalten 38 und 39 der Tabelle der Anlage 10 zu entnehmen ist, liegen die Ausnutzungsgrade μ_{lokal} für die ständige Bemessungssituation in der Regel über 1, so dass grundsätzlich die lokale Standsicherheit der Uferböschung nicht gegeben ist. Lediglich für die Profile 3, 75 und 76 konnte eine ausreichende lokale Standsicherheit nachgewiesen werden. Die Berechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zeigen zudem, dass etwa für Böschungswinkel von $\beta_{\max} = 35^\circ$ ein Gleichgewichtszustand vorliegt.

7.4.3 Erosionssicherheit

Aufgrund der Strömung des Rheins und der hierdurch verursachten Schubspannung des vorbeifließenden Wassers ist die Oberfläche der Uferböschung bei hohen Rheinwasserständen der Erosion ausgesetzt.

Die Sicherheit der Uferböschung gegenüber Oberflächenerosion durch die Schubspannung bzw. Schleppkraft des vorbeifließenden Wassers wird in der Regel durch Vergleich mit zulässigen Fließgeschwindigkeiten für das jeweilige Böschungsmaterial nachgewiesen [7].

In Anlehnung an [15] werden zum Nachweis der Erosionssicherheit die Verfahren nach PILARCZYK und SHIELDS verwendet. Die bei diesen Verfahren als Einwirkung maßgebende Fließgeschwindigkeit des Wassers wird ebenfalls aus [15] übernommen. Hinsichtlich der maßgebenden Kenngrößen des Bodenmaterials wird auf die in [2] durchgeführten bodenmechanischen Laborversuche zurückgegriffen.

Die maßgebenden Gleichungen, die Eingangsparameter sowie die Nachweisführung sind der Anlage 11 zu entnehmen. Im Ergebnis der Berechnungen ist festzuhalten, dass die untersuchten Böden im betrachteten Uferbereich nicht erosionssicher sind.

Grundsätzlich sind von dieser fachtechnischen Bewertung die Bereiche ausgenommen, die mit einem Basaltplaster befestigt sind bzw. im Zuge der Sofortmaßnahme seinerzeit mit Wasserbausteinen gesichert worden sind (vgl. Anlage 1). Die Bereiche bzw. Querprofile sind in der Tabelle der Anlage 10 (Spalte 40) aufgeführt.

8 Beurteilung der Standsicherheit der Uferböschung

Zur Beurteilung der Auswirkung von maßgebenden Einwirkungsfaktoren wie Rheinwasserstand und Verkehrslasten auf die Standsicherheit der Uferböschung erfolgten in einem ersten Schritt im Rahmen von Fallstudien Böschungsbruchberechnungen an fünf repräsentativen Berechnungsprofilen. Maßgebend für die Auswahl der vorgenannten Querprofile waren die

Faktoren Böschungsgeometrie (mittlere und maximale Böschungswinkel), variierende Verkehrslasten bzw. Abstände zwischen bestehender Bebauung und Böschungsschulter sowie unterschiedliche Baugrundsichtungen bzw. Baugrundmodelle.

Unter Zugrundelegung der Ergebnisse der Fallstudien wurden in Abhängigkeit der geometrischen Kenndaten, des Baugrundaufbaus sowie der Verkehrsbelastung aus den insgesamt 76 vorhandenen Querprofilen 39 charakteristische Querprofile ausgewählt, die Standsicherheitsberechnungen durchgeführt und die Ergebnisse auf die restlichen 37 Querprofile übertragen, um so die Standsicherheit der Uferböschung zu beurteilen und das Gefährdungspotential für die angrenzende Bebauung und den Straßenraum abzuschätzen.

Die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen können demnach zunächst wie folgt zusammengefasst werden:

- Für die **Abschnitte I und II** ist sowohl die globale als auch lokale Standsicherheit der Uferböschung nicht gegeben. Die Erosionssicherheit ist aufgrund der in diesen Abschnitten teilweise vorhandenen Wasserbausteine (vgl. Anlage 1) sowie der befestigten Uferbereiche meist gegeben.
- Der **Abschnitt III** wird durch die im oberen und unteren Bereich der Böschung vorhandenen Stützmauern charakterisiert. Hierdurch werden die Böschungshöhen und die Böschungswinkel verringert. Obwohl für zwei Querprofile die Ausnutzungsgrade überschritten werden, kann unter Berücksichtigung der vorhandenen baulichen Elemente von einer insgesamt ausreichenden globalen Standsicherheit der Uferböschung im Abschnitt III ausgegangen werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die Stützmauern als Tragelement eine ausreichende innere und äußere Standsicherheit aufweisen. Zur

- Beurteilung der inneren und äußeren Standsicherheit der Stützmauern sind grundsätzlich weiterführende Untersuchungen (Baustoffproben, Kernbohrungen etc.) erforderlich.
Die lokale Standsicherheit ist für die geböschten Bereiche im Abschnitt III teilweise (vgl. Anlage 10) nicht vorhanden.
- Für den **Abschnitt IV** liegt eine ausreichende globale Standsicherheit der Böschung vor. Auch hier ist die lokale Standsicherheit teilweise nicht gegeben.
- Hinsichtlich der Erosionssicherheit der Uferböschung in den **Abschnitten III und IV** ist grundsätzlich festzuhalten, dass die untersuchten Böden generell als nicht erosionssicher einzustufen sind. Jedoch sind die innerhalb der vorgenannten Abschnitte teilweise mit Basaltsteinpflaster und/oder Stützmauern befestigten Bereich als erosionssicher zu beurteilen.

Für die **Abschnitte I und II** haben die Böschungsbruchberechnungen gezeigt, dass die Uferböschung sich nahezu über den gesamten Bereich im Grenzgleichgewicht befindet, so dass davon ausgegangen werden muss, dass generell kleine Störungen im System zur Böschungsruutschen führen, wie sie in der Vergangenheit augenscheinlich an den übersteilen Böschungsstellen bereits eingetreten sind (vgl. Kapitel 3.4).

Wenngleich bisher lediglich örtlich begrenzte lokale Abrutschungen auf der Böschungsoberfläche eingetreten sind, muss hierbei berücksichtigt werden, dass generell durch lokal abgerutschte Böschungsbereiche die Gesamtstandsicherheit der Böschung verringert und die Wahrscheinlichkeit eines globalen Versagens dadurch vergrößert wird.

Hinsichtlich der Beurteilung der Standsicherheit der angrenzenden Bebauung zeigen die Berechnungen, dass eine unmittelbare Gefährdung der

Gebäude nicht vorhanden ist. Gleichwohl sind im Fall einer Böschungsrutschung Sachschäden (Setzungen, Risse etc.) nicht auszuschließen. Für den Straßenraum sind allerdings weitergehende Schäden zu erwarten, da potentielle Bruchkörper generell die Straße erfassen, so dass hier Sach- und Personenschäden nicht auszuschließen sind.

Zusammenfassend ist somit festzuhalten, dass insbesondere in den **Abschnitte I und II** konstruktive bzw. bauliche Maßnahmen zur Ertüchtigung der Uferböschung und zur Herstellung einer ausreichenden globalen Standsicherheit zwingend erforderlich sind. Die **Abschnitte III und IV** weisen zwar eine rechnerisch ausreichende Standsicherheit auf, allerdings können mit der Zeit verstärkt auftretende lokale Abrutschungen auf der Böschungsoberfläche auch hier zu einer globalen Instabilität der Gesamtböschung führen.

Eine ausreichende Standsicherheit der Uferböschung kann somit nur durch konstruktive bzw. bauliche Maßnahmen hergestellt werden. Organisatorische Maßnahmen wie Verkehrsbeschränkung, Park- und Nutzungsverbote, können die Gefahr einer Böschungsrutschung verringern, aber nicht ausschließen.

ICG Düsseldorf GmbH & Co. KG


Dr. Lammertz


Bredt


Haarer

Anlagen

Verteiler

Bezirksregierung Köln 5x