

Hangrutsch östlich des Ortes

53533 Müsch an der Ahr

Geotechnisch-ingenieurgeologische Erkundung und Ursachenerforschung zur Rutschung

Abschlussgutachten mit Bewertung der Gefährdungslage und Aufzeigen von Gegenmaßnahmen

Auftraggeber: Obere Landesbehörde Rheinland-Pfalz
Struktur- und Genehmigungsdirektion SGD Nord
Neustadt 21
D – 56068 Koblenz

Auftragnehmer: TABERG Ingenieure GmbH
Zum Pier 77
44536 Lünen
Tel.: 0231 / 98 70 73 - 0
Fax: 0231 / 98 70 73 - 17
E-Mail: info@taberg.de

unter Mitwirkung von: RocTec GmbH & Co. KG
Am Sportplatz 17
59069 Hamm
Tel.: 0173 / 70 14 663
E-Mail: info@roc-tec.de



Projekt-Nr.: 23-0049

Gutachter: Dr.-Ing. R. Scherbeck (TABERG)
Dr. rer. nat. Till Hellenkamp (RocTec)

Mitarbeiter: Fr. Samira Ahmadnia, B.Sc.

Datum: 26.02.2026

Umfang: 47 Seiten und 7 Anlagen

I	INHALTSVERZEICHNIS	SEITE
I	Inhaltsverzeichnis	2
II	Anlagenverzeichnis	2
III	Verwendete Unterlagen	3
1	Vorgang und Aufgabenstellung	5
2	Ausgangssituation	6
2.1	Projektgebiet	6
2.2	Abgrenzung der Rutschung	7
2.3	Lokale Geologie	8
2.4	Gefährdungsszenario	10
3	Felderkundung	10
3.1	Bohrungen	10
3.2	Bohrlochteleviewer	11
3.3	Inklinometermessungen	13
3.4	Geodätische Vermessungen	15
3.5	Grundwassersituation	17
3.6	Oberflächenabfluss/Sturzflutkarte Rheinland-Pfalz	18
4	Geophysikalische Messungen der Uni Bonn	20
4.1	Seismische Messungen	20
4.2	Geoelektrische Messungen	21
5	Geotechnisches ingenieurgeologisches Modell	23
5.1	Aufbau des Schichtenmodells des Untergrundes	23
5.2	Schichtenbeschreibung	24
5.3	Geotechnische Kennwerte	27
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Erkundung	29
5.5	Grundlagen zum ingenieurgeologischen Rechenmodell	30
5.6	Gleichgewichtszustand der Böschung	32
5.7	Auswirkungen der Erosion des Böschungsfußes auf die Rutschung	35
6	Variantenstudie	38
6.1	Vorbemerkungen zur Variantenstudie	38
6.1.1	Unterbrechen der Vorzugsfließwege (Variante 1)	38
6.1.2	Sicherung des Böschungsfußes (Variante 2)	41
6.1.3	Anströmungssituation verändern (Variante 3)	43
6.2	Grobkostenschätzung	44
7	Zusammenfassung und Empfehlung zum weiteren Vorgehen	45

I Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Lagepläne, 1:1.250
- Anlage 1.1: Übersichtslageplan des Projektgebietes
- Anlage 1.2: Übersichtslageplan mit Bohransätzen
- Anlage 1.3: Lageplan der geophysikalischen Messprofile der Uni Bonn
- Anlage 2: Geotechnische Profilschnitte, 1:500
- Anlage 2.1: Geotechnisches Profil A
- Anlage 2.2: Geotechnisches Profil B
-
- Anlage 3: Ergebnisse der geotechnischen Erkundung
- Anlage 3.1: Schichtenverzeichnisse der Kernbohrungen
- Anlage 3.2: Protokolle der Laborversuche
- Anlage 3.3: Bohrkernfotos Bohrungen BK01 bis BK06
- Anlage 3.4: Übersicht über die Versuchsergebnisse
- Anlage 3.5: Darstellung Bohrlochteleviewer BK01 und BK02
-
- Anlage 4: Ergebnisse der Vermessungsarbeiten
- Anlage 4.1: Geodätischen Messungen (alle Punkte)
- Anlage 4.2: Geodätische Messungen (Auswahl)
- Anlage 4.3: Tabellarische Übersicht über die ausgeführten geodätischen Messungen
-
- Anlage 5: Inklinometermessungen
- Anlage 5.1: Tabellarische Übersicht über die ausgeführten Messungen
- Anlage 5.2: Ergebnisse der Inklinometermessungen Messbericht 23
-
- Anlage 6: Ergebnisse der geotechnischen Berechnungen
- Anlage 6.1: Profile A und B nach SSR-Verfahren
- Anlage 6.2: Gleitfläche nach SSR-Verfahren
- Anlage 6.3: Profil A mit Böschungsabtrag
-
- Anlage 7: Tabelle mit Grobkostenschätzung Variante 1 bis Variante 3

II VERWENDETE UNTERLAGEN

- /1/ TABERG Ingenieure GmbH (2023): Hangrutsch östlich des Ortes 53533 Müsch – Geotechnische Erkundung und Ursachenerforschung des Rutschhanges an der Ahr, Untersuchungskonzept mit 14 Seiten und 2 Anlagen vom 24.10.2023.
- /2/ TABERG Ingenieure GmbH (2025): Hangrutsch bei Müsch Ingenieurleistungen zur Erstellung eines Untersuchungskonzeptes zur Gefahrenermittlung im Hangbereich der Ahr in der Gemarkung Ahrweiler – fortlaufende Besprechungsvermerke BV: a) BV1 vom 24.10.2024, b) BV2 vom 09.01.2025, c) BV3 vom 18.02.2025 und d) BV4 vom 03.04.2025.
- /3/ TABERG Ingenieure GmbH (2025): Hangrutsch bei Müsch, Gemarkung Ahrweiler; Ingenieurleistungen zur Erstellung eines Untersuchungskonzeptes zur Gefahrenermittlung für den Hangbereich der Ahr – Stellungnahme: Zuarbeit der Uni Bonn zur Gefährdungsabschätzung der Rutschungsbewegung des Hanges (Feuchtigkeitsmonitoring mittels Geoelektrik mit 6 Seiten und eine Anlage vom 27.03.2025.
- /4/ Universität Bonn, Fakultät für Geographie, Arbeitsgruppe Geomorphologie und Umweltsysteme (2025): Feuchtigkeitsmonitoring des Untergrunds mittels ERT Time Lapse Analyse auf der Rutschung in Müsch mit 6 Seiten vom 07.03.2025.
- /5/ TABERG Ingenieure GmbH (2025): E-Mail – Hangrutsch Müsch – Fortführung der Messungen TABERG an Kühn Geoconsulting – Anpassung des Messturnus der Inklinometermessungen vom 01.06.2025.
- /6/ Kühn Geoconsulting GmbH (2025): Fortlaufende Messberichte zu den ausgeführten Inklinometermessungen. Nullmessung vom 17.02.2025 (Ink 2) bis 22. Folgemessung vom 04.11.2025. 23 Messberichte zur Nullmessung und den Folgemessungen.
- /7/ Vermessung Buchholz (2025): Fortlaufende geodätische Messungen. Messprotokolle der ausgeführten Messungen. Nullmessung vom 04.10.2024 bis zur 24. Folgemessung vom 04.12.2025. Insgesamt 24 Folgemessungen.
- /8/ Wenzel et al. (2024): Persistent post-flood hillslope activity posing a potential landslide dam hazard in the Ahr valley, Germany – SpringerOpen, Environmental Sciences Europe (2024) 36:158.
- /9/ Bell et al. (2024): Electrical Resistivity Tomography (ERT) Moisture Monitoring on the Müsch Landslide (Ahr valley, Germany) – Department of Geography, University of Bonn. 1 Poster von 2024.
- /10/ Türke, H. (1999): Statik im Erdbau. 3. Auflage. Ernst & Sohn, Berlin XIII + 306 Seiten, mit 396 Abbildungen und 111 Tabellen.
- /11/ Rocscience (2025): Geotechnische Modellierungssoftware zur geotechnischen Abschätzung von Böschungsstabilitäten, RS2 der Firma Rocscience unter www.rocscience.com.

- /12/ DGGT Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (2019): Informationen und Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ Berechnung der Standsicherheit mit der FEM durch Reduzierung der Festigkeitsparameter. Zeitschrift Geotechnik 42, Heft 2, pp. 88-97.
- /13/ LfU RLP - Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (226): Sturzflutgefahrenkarten für Rheinland-Pfalz. WMS-Dienste unter [www.wasserportal.rlp-umwelt.de/.../sturzflutgefahrenkarte vom 21.02.2026](http://www.wasserportal.rlp-umwelt.de/.../sturzflutgefahrenkarte_vom_21.02.2026)
- /14/ SGD Nord (2023): Vollzug der Bodenschutzgesetze; Hangrutsch bei Müsch in der Gemarkung Ahrweiler – Erkundung und Gefahrenbeurteilung – Angebotsaufforderung zur Abgabe eines Angebotes mit 11 Seiten vom 16.03.2023.

1 Vorgang und Aufgabenstellung

Das durch Starkregenereignisse ausgelöste Hochwasser vom 14. auf den 15.07.2021 hat im gesamten Ahrtal massive Schäden an der Infrastruktur und den Uferbereichen der Ahr verursacht. An verschiedenen Stellen entlang der Ahr wurden die Uferbereiche von aufgehenden Hangböschungen durch das Flusswasser und die damit verbundene Feststofffracht abgetragen. Hierdurch veränderte sich die erdstatische Situation der Uferböschungen. Stellenweise konnten sich hierdurch Rutschkörper bilden, die bis in die höhergelegenen Bereiche der zum Teil steil zur Ahr hin einfallenden Hänge hineinreichen. Diese Rutschkörper wurden möglicherweise schon in der Vergangenheit durch natürliche Erosion angelegt und wurden durch das Hochwasser nunmehr reaktiviert. Eine solche Situation scheint auch im Bereich des Projektgebietes östlich des Ortes Müsch vorzuliegen. Vermutlich hat das Hochwasserereignis am Fuß der nach Süden ansteigenden Böschung die Reaktivierung von fossilen Rutschflächen im Untergrund der Begleitböschungen der Ahr bewirkt.

Die SGD-Nord führt hier zusammen mit dem LGB (Landesamt für Geologie und Bergbau, Rheinland-Pfalz) die Erkundung der Rutschhanges östlich des Ortes Müsch durch.

Die TABERG Ingenieure GmbH wurde am 12.06.2023 mit der fachtechnischen Begleitung der geotechnischen Erkundung beauftragt. Im Rahmen der Erkundung des Baugrunds wurden durch die Firma Stölben GmbH zwischen dem 06.01.2025 und 23.05.2025 sieben Kernbohrungen ausgeführt, die teils zu Inklinometermessstellen (Ink) und Grundwassermessstellen (GWM) ausgebaut wurden. Die Ausführung der geotechnischen Inklinometermessungen erfolgte durch das Büro Kühn Geoconsulting GmbH aus Bonn. Parallel zu den Bohrarbeiten erfolgte ein geodätisches Monitoring durch das Vermessungsbüro Buchholz, Koblenz.

Der vorliegende Bericht führt die ausgeführten Felderkundungen zu einem ingenieurgeologischen Modell des Ahrhanges zusammen und schätzt im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung die

Standsicherheit der Böschung ab. Abschließend werden aus ingenieurgeologischer Sicht Hinweise zum Umgang mit der örtlichen Situation gegeben.

Das vorliegende Gutachten wurde durch unseren ehemaligen Projektleiter Dr. Hellenkamp erstellt, der seit dem 02.01.2026 unter der RocTec GmbH & Co. KG (im Folgenden: RocTec) firmiert. Um gegenüber unserem AG eine kontinuierliche Projektfortführung zu gewährleisten, hat TABERG daher die Fa. RocTec als Nachunternehmer eingebunden.

2 Ausgangssituation

2.1 Projektgebiet

Das Projektgebiet in Müsch (siehe Abbildung 1) liegt am Fluss Ahr nordwestlich des Ortskerns von Müsch. Die Anfahrt erfolgt über die B258 und L73, die am südwestlichen Ortsrand von Müsch nach Norden abzweigt und dem Verlauf der Ahr folgt. Lokal kann das Projektgebiet über die „Bergstraße“ sowie die Straße „Im Kesselfeld“ erreicht werden.

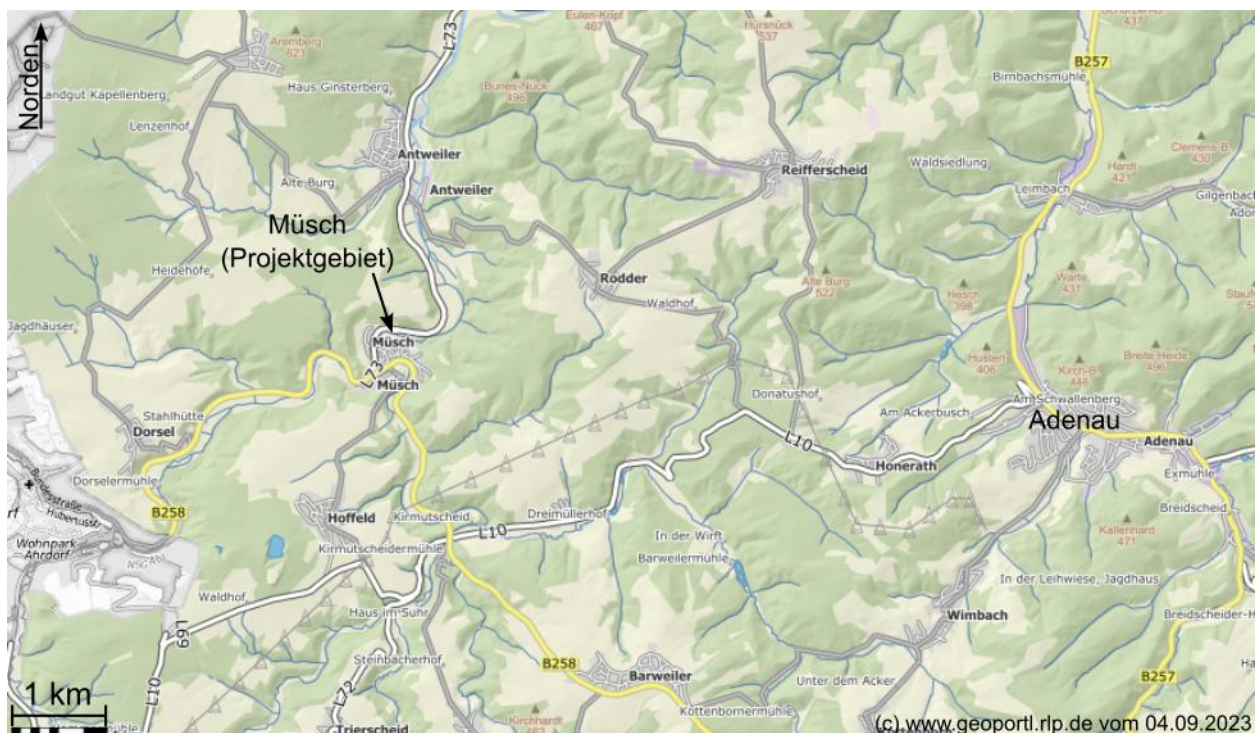


Abbildung 1: Lage des Projektgebietes in Müsch nördlich der B258 und westlich von Adenau.

Die örtliche stark bewaldete Böschung reicht von einem Höhengniveau von ca. +289 m NHN im Bereich der Ahr bis ca. +375 m NHN auf dem Höhenrücken in Richtung Südosten (siehe Anlage 1.1). Der Hang wird auf einem Niveau von ca. +303 m NHN vom Ahrtalradweg auf einer

ehemaligen Bahntrasse gekreuzt. Weitere Forstwege queren den Hang (vgl. Anlage 1.1) auf einem Niveau von +325 m NHN (unterer Forstweg) und +346 m (oberer Forstweg).

Bei dem Hochwasser wurde augenscheinlich der untere Böschungsfuß erodiert, wodurch sich eine steile Böschung hin zur Ahr eingestellt hat. Geodätische Messungen zeigen hier eine stattfindende Verschiebung des Böschungsfußes in Richtung der Ahr (siehe Kapitel 3.4).

Mittig in der Böschung soll sich ein ehemaliger Deponiekörper (mit einer Füllung aus mineralischen Abfällen, Bauschutt, etc.) befinden, der im Rahmen der Arbeiten jedoch nicht erkundet oder angetroffen wurde. Die vermutete Lage ist in der Anlage 1.1 skizziert. Der Deponiekörper wird im Bodenschutzkataster unter der Bezeichnung „Ablagerungsstelle Müsch, Rödchen“ geführt.

2.2 Abgrenzung der Rutschung

Der Rutschungskörper weist eine Fläche von ca. 2 ha auf und ist in der Anlage 1.1 und Anlage 1.2 in seiner Lage skizziert. Der in Bewegung geratene Böschungsabschnitt weist eine Länge von ca. 90 m bis 100 m parallel zur Ahr auf. Im Bereich des Radwegs (siehe Anlage 1.1) ist die Abgrenzung der Rutschung durch Risse im Asphalt des Radwegs möglich (siehe Abbildung 2).

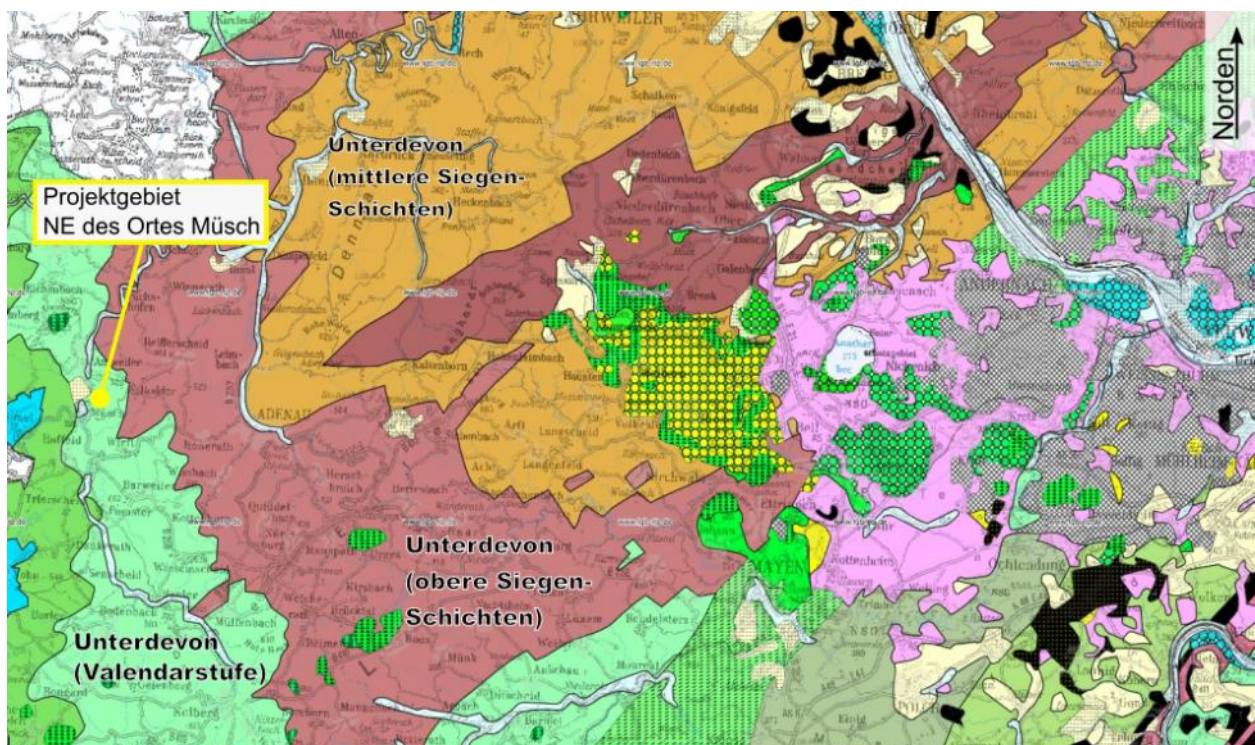


Abbildung 2: Verschiebung in der Achse des Radwegs im Bereich der Rutschung.

Im Bereich des unteren und oberen Forstwegs sind ebenfalls Abrisskanten des Rutschungskörpers festzustellen (siehe Anlage 1.1). Die Forstwege werden hier senkrecht von den Abrisskanten gequert. Oberhalb des oberen Forstwegs (siehe Anlage 2) flacht die Böschung ab. Ein gespalteener Baum, dessen Wurzel auseinandergerissen ist, gibt Hinweise auf die obere Abrisskante und ggf. die obere Grenze der Rutschung. Die obere Abrisskante wird mit einem Höhenniveau auf ca. +362,5 m NHN vermutet.

2.3 Lokale Geologie

Geologisch liegt der Ort Müsch im Ahrgebirge im Westen des Rheinischen Schiefergebirges. Die im Projektgebiet anstehende Wechsellagerung wird aus Tonschiefern, Siltsteinen und Sandsteinen bzw. Einschaltungen von Sandsteinschichten gebildet. Die Einheiten wurden vor ca. 400 Mio. Jahren im Unterdevon abgelagert und sind den Oberen Siegen-Schichten bzw. der Unteren Valendarstufe zuzuordnen (siehe Abbildung 3). Eine Verfaltung und Deformation der unterdevonischen Gesteinseinheiten erfolgte im Zuge der variszischen Orogenese durch eine Einengung aus Richtung Südwesten vor ca. 420 Mio. Jahren bis 250 Mio. Jahren.



Durch die Nordwest-Südost gerichtete Einengung entstanden Nordost-Südwest orientierte Sattel- und Muldenstrukturen, die sowohl in Hauptstrukturen wie auch Spezialfaltungen in den Gesteinen des Ahrtals zu finden sind. Querschläggig zu den Sattel- und Faltenachsen entstanden durch die tektonisch Beanspruchung Querverschiebungen bzw. Störungen (AC-Flächen der Sattel-/Muldenstrukturen). Die Ahr folgt als Fluss den Hauptstrukturen nach Nordwesten und durchbricht die steilen Talflanken bevorzugt in Bereichen von Querverschiebungen.

Die Ahr als namensgebender Hauptvorfluter des Ahrtals wird durch viele Nebentäler gespeist, aus denen das Wasser in der Ahr zusammenläuft. Die Ahr verläuft zum Teil entlang steil aufragender Felswände und mäandert in breiteren Tallagen durch Flussauen. Der Fluss trifft jedoch in regelmäßigen Abständen auf die aufgehenden Talhänge und stellt dort steile Böschungen her.

Dies führt über die Zeit zu erosionsbedingten Nachbrüchen des Gesteins von den Flanken sowie zur Umlagerung von Material (z.B. Bildung von Auen).

Die Auswertung der Daten des digitalen Geländemodells des LGB zum Untersuchungsgebiet (siehe Anlage 1.1) ergibt eine in Richtung der Ahr einfallende Hangneigung von ca. 19° . Die Böschungsneigungen an der Geländeoberkante reichen von $\beta = 36^\circ$ bis $\beta = 42^\circ$ und sind damit deutlich steiler geneigt. Im Bereich der vorderen Böschung zur Ahr (steiler Böschungsabriss) wird ein Böschungswinkel von 60° erreicht (siehe Anlage 2.1 und Anlage 2.2). Auf dem oberen Plateau zwischen Bohrung BK5 und BK04 weist der Böschungswinkel nur noch $\beta = 13^\circ$ auf.

Die Ausprägung der Oberfläche sowie die eindeutig zu erkennenden Geländekanten legen den Rückschluss auf eine hangparallele Rutschmasse nahe. Aufgrund der Verwerfungen an der Geländeoberkante kann auf eine Bewegung der Lockergesteinsauflage rückgeschlossen werden (siehe Anlage 1.1).

Auch eine anthropogene Überprägung des Hanges kann aufgrund der Morphologie nicht ausgeschlossen werden. Nachgewiesen sind in der Örtlichkeit am Böschungsfuß Arbeiten zum Bau der Bahntrasse und von Stützbauwerken (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Neu asphaltierter Abschnitt des Ahrtalradwegs (2021) auf der ehemaligen Bahntrasse. Im Hintergrund ist ein gemauertes Stützbauwerk des lokalen Hangabschnitts zu erkennen. (Foto vom 28.04.2023)

2.4 Gefährdungsszenario

Auf Grundlage der Erläuterung des Sachverhaltes zur Böschungsrutschung in Müsch /14/ durch das LGB wurde der Hang im Rahmen des Flutereignisses vom 14. auf den 15. Juli 2021 auf einer Länge von 115 m um ca. 15 m erodiert. Der südlich gelegene Uferbereich hat sich damit ca. 15 m nach Süden in Richtung des Hanges verlagert. Auf Grundlage des Böschungsanschnitts sowie der Auswertung der vorliegenden Geländemodelle wurde der Hang als alte Rutschmasse beschrieben. Durch die zurückliegende Bewegung des Hanges wurde das Ahrbett eingeengt und nach Norden in Richtung der Landesstraße L73 verschoben /14/.

Aus geologischer Sicht ist damit eine Interaktion und Zusammenhang zwischen Fluss und Rutschhang hergestellt. Wird der Böschungsfuß abgetragen, setzt sich der Hang in Bewegung, bis ein neuer geotechnischer Gleichgewichtszustand erreicht ist.

Aufgrund des massiven erosionsbedingten Abtrags am Böschungsfuß kann nun eine Reaktivierung der Rutschung nicht ausgeschlossen werden. Risse und Verschiebungen in der Trasse des Radwegs belegen dies. Aus ingenieurgeologischer Sicht ergibt sich daraus die Fragestellung, ob der aktuelle erosive Abtrag am Böschungsfuß geeignet ist, den Hang zu destabilisieren. Zusätzlich besteht die Befürchtung, dass sich die Rutschungsbewegung bei weiter fortschreitender Erosion am Böschungsfuß beschleunigt und ggf. die Ahr zuschiebt /14/.

Die nachfolgend beschriebene Erkundung hat damit das Ziel, den Hang ingenieurgeologisch zu beschreiben und eine Modellvorstellung vom Mechanismus der Rutschung zu entwickeln. Abschließend wird auf dieser Basis ein Ausblick auf mögliche bautechnische Maßnahmen gegeben, die geeignet sind, die Standsicherheit des Hanges positiv zu beeinflussen.

3 Felderkundung

3.1 Bohrungen

Zur Erkundung der Rutschung und als Grundlage des ingenieurgeologischen Modells des Untergrundes wurde Kernbohrungen durch die Firma Stölben GmbH ausgeführt. Die Ausführung der Bohrarbeiten erfolgte zwischen dem 06.01.2025 und dem 23.05.2025. Die Bohrungen wurden als Rotations- und Rammkernbohrung mit Doppelkernrohr mit Inliner ausgeführt. Dabei wird der Kern überbohrt und die Kernmarsch direkt in einem PVC-Rohr gesichert.

Die Kernbohrungen dienten zur Ermittlung des Schichtenaufbaus des Untergrundes, der durch einen Geologen der Firma TABERG bei der Aufnahme des Schichtenprofils der Bohrkerns ermittelt wurde. Die Aufnahme der Kerne erfolgte in Abstimmung und zusammen mit der Abteilung Ingenieurgeologie des LGB.

Die Koordinaten sowie die Bohrtiefen und die Ansatzhöhe der jeweiligen Bohrung sind in der vorangestellten Tabelle 1 zusammengefasst. Die Lage der Bohrungen ist außerdem in der Anlage 1.1 und Anlage 1.2 im Lageplan dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die ausgeführten Bohrungen in Müsch. GWM - Grundwassermessstelle, Ink - Inklinometermessstelle

Bohrung	Bohrtiefe [m u. GOK]	Rechtswert	Hochwert	Ansatzhöhe [m NHN]	Ausbau
BK 1	40	346055,8	5584063,9	+303,7	Inklinometer Ink 1 bis Ink 4
BK 2	40	346097,9	5584079,0	+303,6	
BK 3	70	346123,7	5584027,6	+324,9	
BK 4	43	346131,3	5583970,9	+345,3	
BK 5	42	346073,0	5584009,6	+325,5	Grundwasser- messstellen GWM 5 bis 7
BK 6	30	346066,7	5584144,3	+293,7	
BK 7	15	346066,7	5584143,7	+293,0	

Die Bohrungen BK1 und BK2 wurden südlich des Radwegs ausgeführt, um den Untergrundaufbau vom Radweg bis unter das Sohlniveau der Ahr zu erkunden. Die Bohrungen BK3 und BK5 wurden auf dem unten Forstweg gebohrt. Die Bohrung BK4 wurde mittig des damals abgeschätzten Rutschungskörper auf dem oberen Forstweg ausgeführt. Die Bohrungen BK6 und BK7 wurden am nördlichen Ufer der Ahr am gleichen Standort (Abstand ca. 0,6 m) ausgeführt und zu Grundwassermessstellen GWM ausgebaut. Dabei wurde die Bohrung BK7 zur Altersdatierung ungeöffnet im Kernlager des LGB zur weiteren Verwendung eingelagert. Die Bohrung BK7 wird daher im vorliegenden Gutachten nicht weiter berücksichtigt.

Nach Fertigstellung der Bohrungen erfolgte der Ausbau zu Messstellen. Von den ausgeführten sieben Bohrungen wurden vier im Bereich der Rutschung, südlich der Ahr gelegen, zu Inklinometermessstellen ausgebaut (BK1 bis BK4 – siehe Tabelle 1). Mit den Inklinometermessstellen kann auf die Tiefenlage einer Gleitfuge rückgeschlossen werden (siehe Kapitel 3.3). Drei weitere Bohrungen BK5 bis BK7 (siehe Tabelle 1) wurden zu Grundwassermessstellen ausgebaut, um Hinweise zur Tiefenlage des Gebirgswasserspiegel zu erhalten.

Neben der Ermittlung des Schichtenaufbaus und dem Ausbau zu Messstellen erfolgte eine Entnahme von Bodenproben zur weiteren Analyse im Labor.

3.2 Bohrlochteleviewer

In den Bohrungen BK1 und BK3 erfolgte eine Aufnahme der Bohrlochwand mit einem Bohrlochteleviewer. Aus der Analyse der Daten können Hinweise auf das Einfallen von Schichten und

Klüften in den Bohrungen abgeleitet werden. Die Messung erfolgte durch die Firma GIF – Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker und Partner GmbH am 06.02.2025 am Bohrloch BK1 und am 05.03.2025 am Bohrloch BK3. Bei der Aufnahme wird die Bohrlochwand fortlaufend fotografiert bzw. akustisch abgetastet. In der Bohrung BK1 wurde ein Bereich von ca. 6 m unter GOK bis 32 m unter GOK mit dem Televiewer befahren, danach war das Bohrloch für das Messgerät blockiert. Die Messung in der Bohrung BK03 wurden zwischen ca. 8 m unter GOK bis ca. 26 m unter GOK ausgeführt (siehe Anlage 3.5).

Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt die Aufnahme der Bohrlochwand der jeweiligen Bohrung im Bereich der Tiefengleitfuge der Rutschung.

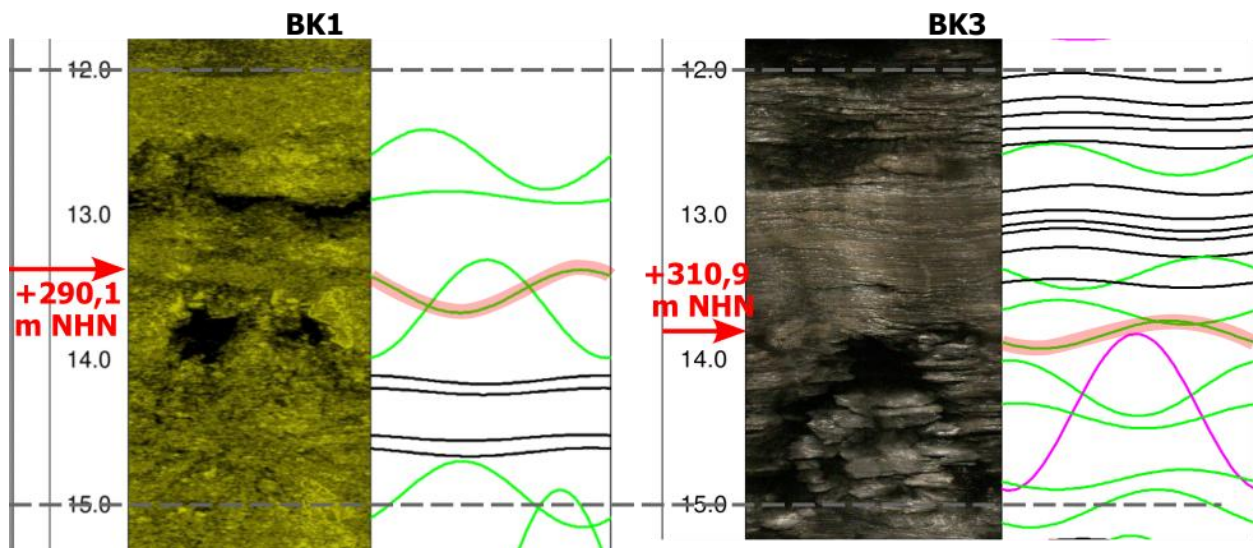


Abbildung 5: Aufnahme Bohrlochteleviewer im Bereich der Gleitfläche vgl. Kapitel 3.3.

Sowohl in der Bohrung BK01 wie auch in der Bohrung BK03 wurde eine Fläche (ggf. die Gleitfuge) im betreffenden Tiefenabschnitt identifiziert. In den Bohrungen handelt es sich vermutlich eher um einen Bereich bzw. eine Gleitzone. Die Gleitfläche aus den Inklinometermessungen liegt oberhalb des Festgesteinshorizontes, was eine scharfe Abgrenzung auch bei der Bohrkernaufnahme nicht möglich macht, weil es sich um eine aufgearbeitetes Lockergesteinskonglomerat handelt (vgl. Anlage 3.2 und 3.5).

Die ausgewertete Darstellung resultiert aus dem Verschnitt der Bohrlochachse bzw. Bohrlochwand mit Schichtflächen, Klüften oder Störungsflächen. Dabei ergeben sich horizontale Linien bei flacher Lagerung, geschwungene Linien bei geneigter Lagerung und eine vertikale Linie bei seigerer Lagerung. Je nach Steigung der können kann das Einfallen und die Fallrichtung ermittelt werden.

Eine Lagenkugeldarstellung der abgeleiteten Klüfte und Schichtflächen ist in der Abbildung 6 dargestellt. Nach den Auswertungen des Televiewers fällt die Schichtung/Schieferung (SS/SF) nach

Westen bis Nordwesten ein (siehe Abbildung 6). Ergänzend gibt es eine Kluftfläche (KL), die nach Nordosten einfällt.

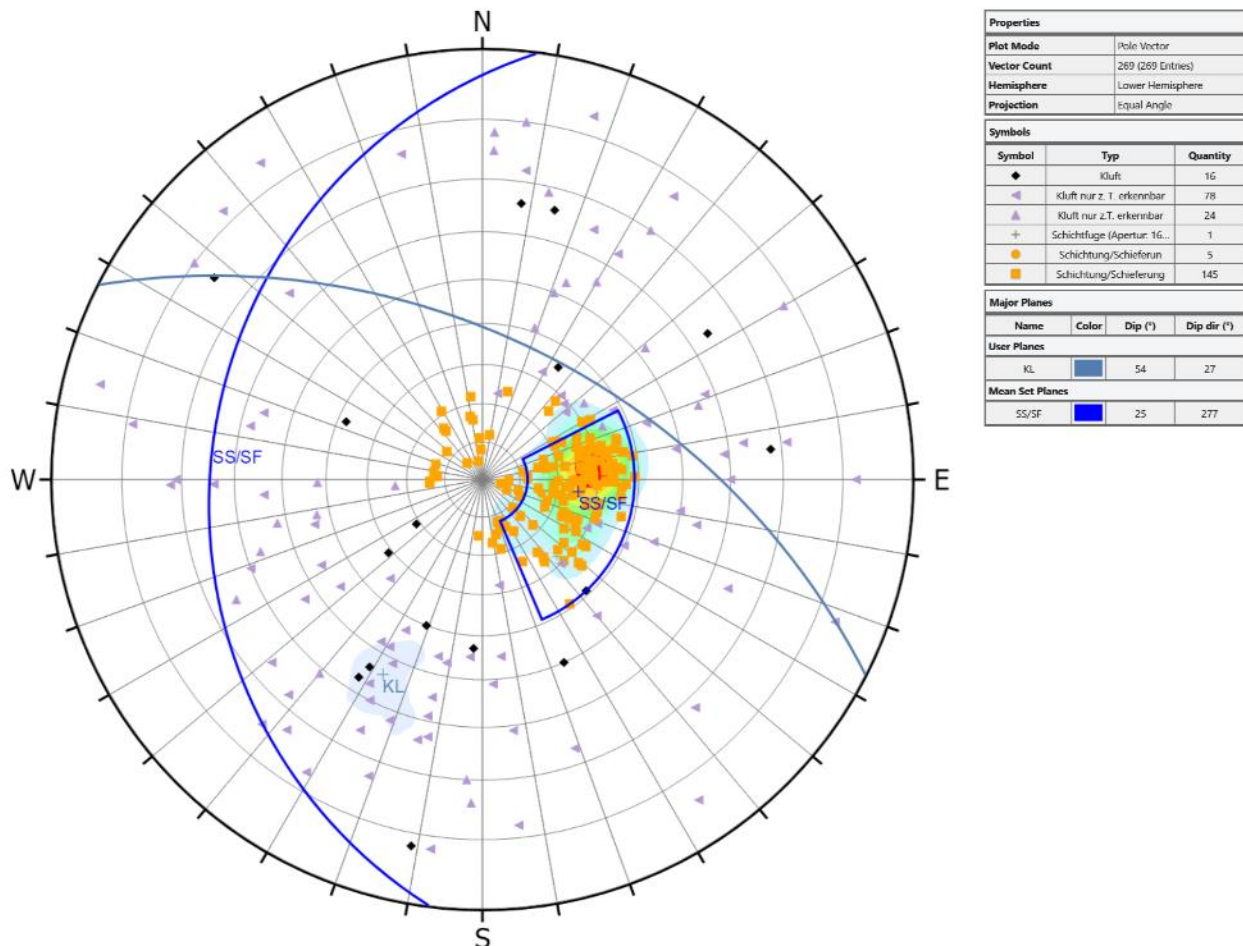


Abbildung 6: Darstellung aller Flächen nach der automatischen Auswertung der TelevIEWERAufnahmen in den Bohrlöchern BK1 und BK3.

3.3 Inklinometermessungen

Von den sieben ausgeführten Bohrungen wurden vier Bohrungen im Bereich der Rutschung zu Inklinometermessstellen ausgebaut (vgl. Tabelle 1), um im jeweiligen Böschungsbereich die Tiefenlage der Gleitfuge messtechnisch erfassen zu können. Nach Fertigstellung der ersten Messstelle BK2 wurde durch das Büro Kühn Geoconsulting aus Bonn direkt mit den Inklinometermessungen begonnen (siehe /6/). Die Anlage 5.1 gibt eine Übersicht über die ausgeführten Messungen. Sobald eine weitere Messstelle durch die Bohrfirma Stölben fertiggestellt wurde, wurde diese umgehend im Rahmen der nächsten Folgemessung ins Messprogramm der Inklinometermessungen aufgenommen.

Während der Messungen erfolgten Forstarbeiten, bei denen insbesondere Wegebauarbeiten im Bereich des unteren Forstwegs ausgeführt wurden. Dabei wurde der Messstellenkopf der Messstelle INK3 beschädigt, sodass die Messstelle zunächst unbrauchbar wurde. Im Rahmen eines zusätzlichen Ortstermins konnte die Messstelle am 15.07.2025 jedoch wiederhergestellt werden. In der Folge wurden die Messungen wieder turnusmäßig fortgeführt.

Im Rahmen der Inklinometermessungen konnte die vermutete Tiefengleitfuge eindeutig identifiziert werden. Die Tiefenniveaus der ermittelten Gleitfläche sind in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengefasst. Die Tiefenlagen reichen zwischen ca. 12 m bis 13 m unter GOK im Bereich des Radwegs sowie des unteren Forstwegs bis ca. 7 m unter GOK im Bereich des oberen Forstwegs. Die Gleitfläche liegt im vorderen Bereich der Böschung tiefer als oben am Hang.

Ein Vergleich mit den Höhenlagen des Geländes lässt darauf rückschließen, dass eine Tiefengleitfuge auf Höhe des Normalwasserstands der Ahr am Fuß des Hanges austritt. Der Böschungsfuß liegt auf Höhe der Ahr auf einem Niveau von ca. +289 m NHN (siehe Anlage 2.1 und Anlage 2.2). Die Inklinometer Ink 1 und Ink 2 weisen die Tiefenlage der Gleitfuge auf einem Niveau von ca. +290,1 m NHN bis +291,1 m NHN aus (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Tiefenlagen der Gleitfugen in den Inklinometern /6/.

Mess- stelle	GOK [m NHN]	POK /6/ [m NHN]	Lage der Tiefengleitfuge	
			[m u POK]	[m NHN]
Ink 1	+303,7	+303,5	13,4	+290,1
Ink 2	+303,6	+303,4	12,3	+291,1
Ink 3	+324,9	+324,7	13,8	+310,9
Ink 4	+345,3	+345,1	6,8	+338,3

Ergänzend zur Tiefenlage der Gleitfläche ist aus den Inklinometermessungen die Abnahme bzw. Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit zu ermitteln. Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt die Auswertung für die Messstelle Ink 2 gemäß /6/.

Bis Anfang Juli 2025 wurde die Messstelle Ink 2 in einem wöchentlichen Messturnus gemessen. Der Messturnus wurde danach auf vier Wochen verlängert. Aus der Abbildung 7 bzw. den Darstellungen in /6/ ist eindeutig nachzuvollziehen, dass die Bewegungsgeschwindigkeit des Rutschhanges etwa ab April/Mai 2025 abnimmt. Dieser Trend wird bis etwa Ende Oktober 2025 beibehalten.

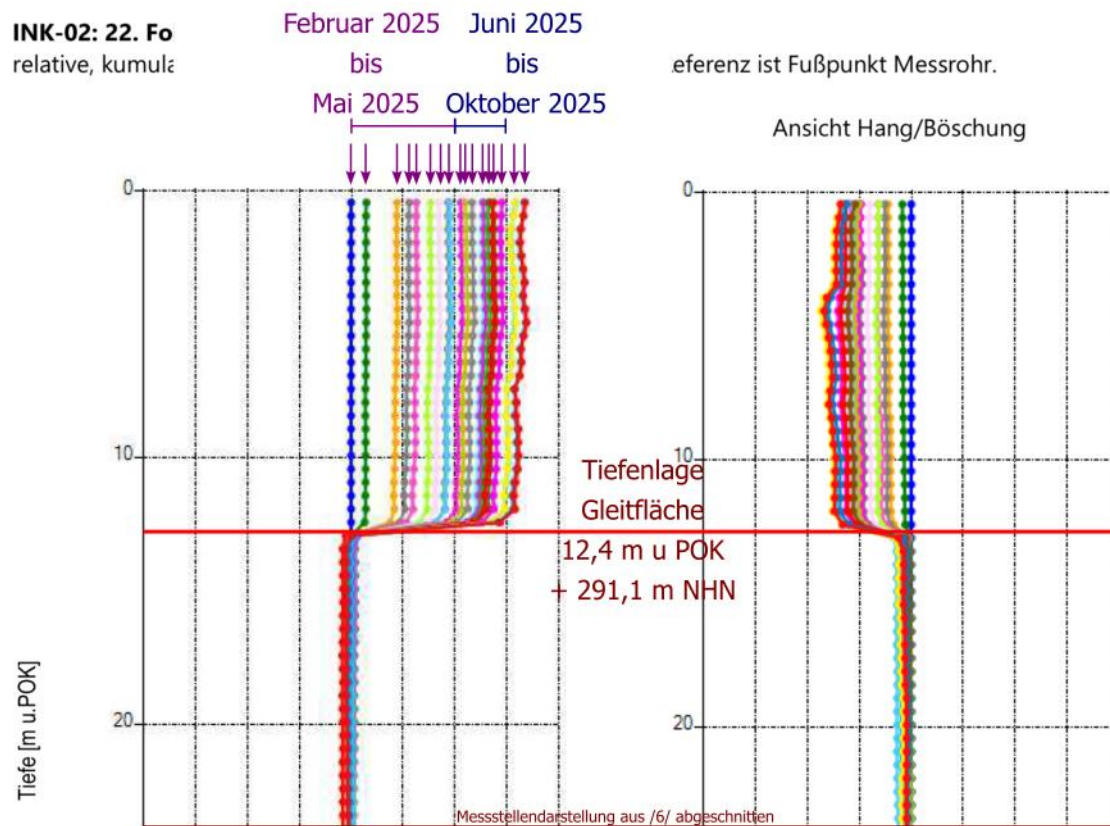


Abbildung 7: Exemplarische Auswertung der Inklinometermessung der Messstelle Ink 2 aus /6/.

3.4 Geodätische Vermessungen

Neben den Inklinometermessungen erfolgte eine geodätische Vermessung des Hanges über ein dichtes Messpunktnetz mit insgesamt bis zu 44 Messpunkten. Das Messpunktnetz wurde entlang der Böschung, des Radwegs sowie des unteren und oberen Forstwegs gelegt, um die Rutschung über eine Oberflächenmessung eingrenzen zu können.

Die Messungen erfolgten durch das Vermessungsbüro Buchholz (Heinrich-Ermann-Straße 10, 56077 Koblenz). Die Nullmessung wurde am 09.04.2024 ausgeführt. Sämtliche Folgemessungen beziehen sich auf die Nullmessung als Ausgangszustand. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass der Ausgangszustand der Messung nicht den Ausgangszustand der Rutschung widerspiegelt. Mit den Messungen wurde zu einem unbekannten Deformationszustand des Hanges begonnen. Da der Materialabtrag am Böschungsfuß zum Zeitpunkt des Hochwassers aus Juli 2021 erfolgte, muss davon ausgegangen werden, dass seit diesem Zeitpunkt eine Kriech- bzw. Rutschungsbewegung eingesetzt hat, die bis heute andauert.

Die Messung erfolgt mit einem Tachymetersystem. Unter günstigen Messbedingungen kann von einer absoluten Genauigkeit von ca. ± 3 mm ausgegangen werden. Die relative Genauigkeit zwischen den einzelnen Folgemessungen beträgt damit $\pm 1,5$ mm. Die geodätische Messung wurde in einem zwei- bis vierwöchigem Messturnus ausgeführt (siehe Anlage 4.3). Die vereinzelt auftretenden größeren Abstände sind auf organisatorische Belange (ausstehende Vertragsverlängerung) zurückzuführen (betrifft 10. bis 12. Folgemessung).

Sämtliche im Rahmen des Projektes gemessenen Punkte sind in der Anlage 1.2 dargestellt. Dabei beziehen sich die Punkte mit den 600er-Nummern auf den vorderen Böschungsbereich. Hier wurden bereits durch die Geographische Fakultät der Universität Bonn direkt nach der Flut Messpunkte eingerichtet, die mittels Laserscanvermessung überwacht wurden. Die Überwachungspunkte wurden mit in das Überwachungsnetz übernommen. Die Punkte mit den 2000er Nummern wurden entlang des Radwegs gesetzt. Die Punkte mit den 3000er Nummer liegen auf dem unteren Forstweg. Die Punkte mit den 4000er Nummern liegen entlang des oberen Forstwegs. Zum Zeitpunkt der Festlegung der Messpunkte waren die Abmessungen des Rutschungskörpers noch unbekannt, sodass weiter oberhalb noch 5000er Punkte gesetzt wurden, die jedoch später als unveränderliche Festpunkte herangezogen wurden.

Aufgrund der bereits in Kapitel 3.3 erwähnten Wegebauarbeiten des Forstes waren die Punkte 4002 und 4003 am 25.06.2025 beschädigt und waren nicht mehr messbar (siehe Messbericht zum 04.08.2025 /7/). Ergänzend hierzu waren die Punkte 3002, 3003, 3004, 3005, 3006 sowie 4001, 4004, 4006 teilweise mit Schotter überdeckt. Die Punkte wurden durch den Vermesser wieder freigelegt. Der Vermessungsingenieur weist im Bericht zur 20. Folgemessung vom 04.08.2025 /7/ darauf hin, dass nicht garantiert werden kann, dass die Bewegung der Punkte allein auf die Hangbewegung zurückzuführen ist.

Unabhängig davon konnte der ins Rutschen geratene Hangbereich (fortlaufend als Rutschung bezeichnet) mit den geodätischen Messungen zwischen dem 09.04.2024 (Nullmessung) und 04.12.2025 (24. Folgemessung) räumlich eingegrenzt und betragsmäßig überwacht werden. In der Anlage 1.2 sind die resultierenden Vektoren der einzelnen Vermessungspunkte dargestellt (Darstellung überhöht). Aus der Darstellung lässt sich eindeutig ableiten, dass die Messpunkte 2002, 2003, 3002, 3003, 3006, 3007, 4002, 4022 in der Rutschung liegen.

Die Verschiebung der einzelnen Punkte ist neben der Anlage 1.2 auch als Zeitreihe in der Anlage 4.1 (Einzelpunkte) bzw. Anlage 4.2 (Punktauswahl der Rutschung) zusammengefasst.

Die Verschiebungsbeträge im Bereich des Radwegs erreichen einen Betrag von bis zu 0,25 m (Pkt. 2003). Im Bereich des unteren Forstwegs reichen diese Verschiebungen bis 0,28 m (Pkt. 3003).

Neben den absoluten Verschiebungen wurden aus den monatlichen Messungen mittlere Verschiebungsgeschwindigkeiten berechnet. Damit ist eine differenzierte Entwicklung der Bewegung des Hanges möglich. Die Anlage 4.2 unten zeigt eine Darstellung zu den

Geschwindigkeitsprofilen der Messpunkte innerhalb der Rutschung. Es fällt dabei auf, dass sich die Messpunkte global synchron bewegen. Wenn die Bewegungsgeschwindigkeit ansteigt, nimmt sie im Allgemeinen auch bei allen Punkten zwar unterschiedlich stark, jedoch gleichzeitig zu. Die Bewegungsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,2 mm/d bis 2,2 mm/d (siehe Anlage 4.2).

Vereinzelte treten jedoch an einigen Punkten gemessene Verschiebungen auf, die der gesamte Hang so nicht wiedergibt. So ist im Februar 2025 eine Bewegung der Messpunkte 2003 und 3002 im Bereich des Profil B festzustellen, die im westlichen Bereich der Böschung nicht gemessen wurde. Hieraus kann insbesondere abgeleitet werden, dass die Bewegungen vermutlich nach dem Winter und regenreicher Zeit zunehmen. Anschließend nimmt die Bewegung über den Sommer wieder ab, ehe ab Ende August 2025 eine erneute Beschleunigung eintritt. Diese ist so jedoch ausschließlich in den berechneten Bewegungsgeschwindigkeiten zu erkennen. Eine plötzliche Zunahme der Lage oder Höhenverschiebung wurde zum gleichen Zeitpunkt nicht festgestellt.

Ein vollständiger Stillstand der Rutschung wurde in der gesamten Betrachtung nicht festgestellt. Der Hang bewegt sich auf Grundlage der Vermessungsergebnisse langsam, aber kontinuierlich. Natürlich muss jedoch bei der Bewertung berücksichtigt werden, dass die Geschwindigkeit aus einer Vektorsumme berechnet wird, die aus mathematischen Gründen bei einem systembedingten, immer vorhandenen Messfehler nicht auf Null zurückgehen kann.

Die 600er Punkte im vorderen Böschungsbereich werden aus der hier vorgenommenen Betrachtung herausgenommen, da diese in einem eigenen Bruchkörper der Uferböschung direkt zur Ahr hin liegen. Die gemessenen Deformationen erreichen hier einen Bereich von 1 m, was mit einem vollständigen Abriss einer Scholle gleichzusetzen ist. Zudem sind einige der Vermessungsziele an Holzpflocken oder Bäumen angebracht, was keiner qualifizierten Messpunktinstallation entspricht. Die vordere Böschungskante unterliegt damit der natürlichen Erosion durch den Fluss. Der Materialabtrag ist geotechnisch losgelöst von der Gesamtrutschung zu sehen und es haben sich eigene Bruchkörper ausgebildet (vgl. Anlage 1.2).

3.5 Grundwassersituation

Die Grundwassersituation im Projektgebiet kann auf Grundlage der Bohrprotokolle der Bohrfirma Stölben abgeschätzt werden. Während der Bohrarbeiten erfolgte morgens die Messung des Wasserstands im jeweiligen Bohrloch. Die jeweils letzten in den Bohrungen gemessenen Wasserstände sind in der nachfolgenden Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Wasserstand des Grundwassers im Rahmen der Bohrungen (Bohrprotokolle).

Bohrung	BK01	BK02	BK03	BK04	BK05	BK06
Wasserstand [m unter GOK]	12,4	12,9	18,4	20,6	17,3	3,5
Wasserstand [m NHN]	+291,3	+290,7	+306,5	+324,7	+308,2	+290,2

Entsprechend der Messungen liegt der Wasserstand mit ca. 12,5 m unter GOK in den Bohrungen BK01 und BK02 im Bereich des Ahrwasserpegels. Der Hang entwässert demnach in die Ahr als nächsten Vorfluter.

Im Mittelhang liegt der Wasserstand (unterer Forstweg) im Bereich von ca. 17,5 m unter GOK und damit im Schnitt A im Grundgebirge (Kluftgrundwasserleiter) und im Schnitt B in der Rutschmasse (Porengrundwasserleiter). Grundsätzlich ist hier festzuhalten, dass die Messung in den Bohrungen vermutlich auf eine Schichtwasserführung auf dem Festgesteinskopf zurückzuführen ist. Im Bereich der Bohrung BK4 liegt der freie Grundwasserspiegel ebenso im Übergangsbereich zwischen der Rutschmasse und dem unterlagernden festen devonischen Gebirge.

Bezogen auf die beschriebenen Tiefenniveaus der Gleitflächen aus Kapitel 3.3, liegt der Grundwasserstand auf Höhe des Radwegs sowie auf Höhe des unteren Forstwegs im Bereich der Gleitfläche bzw. im Übergangsbereich zwischen Rutschmasse und Festgesteinsoberkante.

3.6 Oberflächenabfluss/Sturzflutkarte Rheinland-Pfalz

Das Land Rheinland-Pfalz stellt landesweite Hinweiskarten für die Sturzflutgefährdung nach Starkregenereignissen zur Verfügung. Die Daten können über einen WMS-Dienst (wie hier angewendet /13/) bzw. ein Webportal grundstücksspezifisch eingesehen werden. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Kartierung für den Abschnitt der Rutschung in Müsch.

Für die Analyse des Grundstücks wurde auf den Datensatz „Fließgeschwindigkeiten SRI 7 1 Std.“ sowie auf die „Fließwege SRI10 4 Std.“ zurückgegriffen. „Der Starkregenindex (SRI) beschreibt dabei auf einer Skala von 1 bis 12 die zunehmende Überflutungsgefahr in Abhängigkeit von der

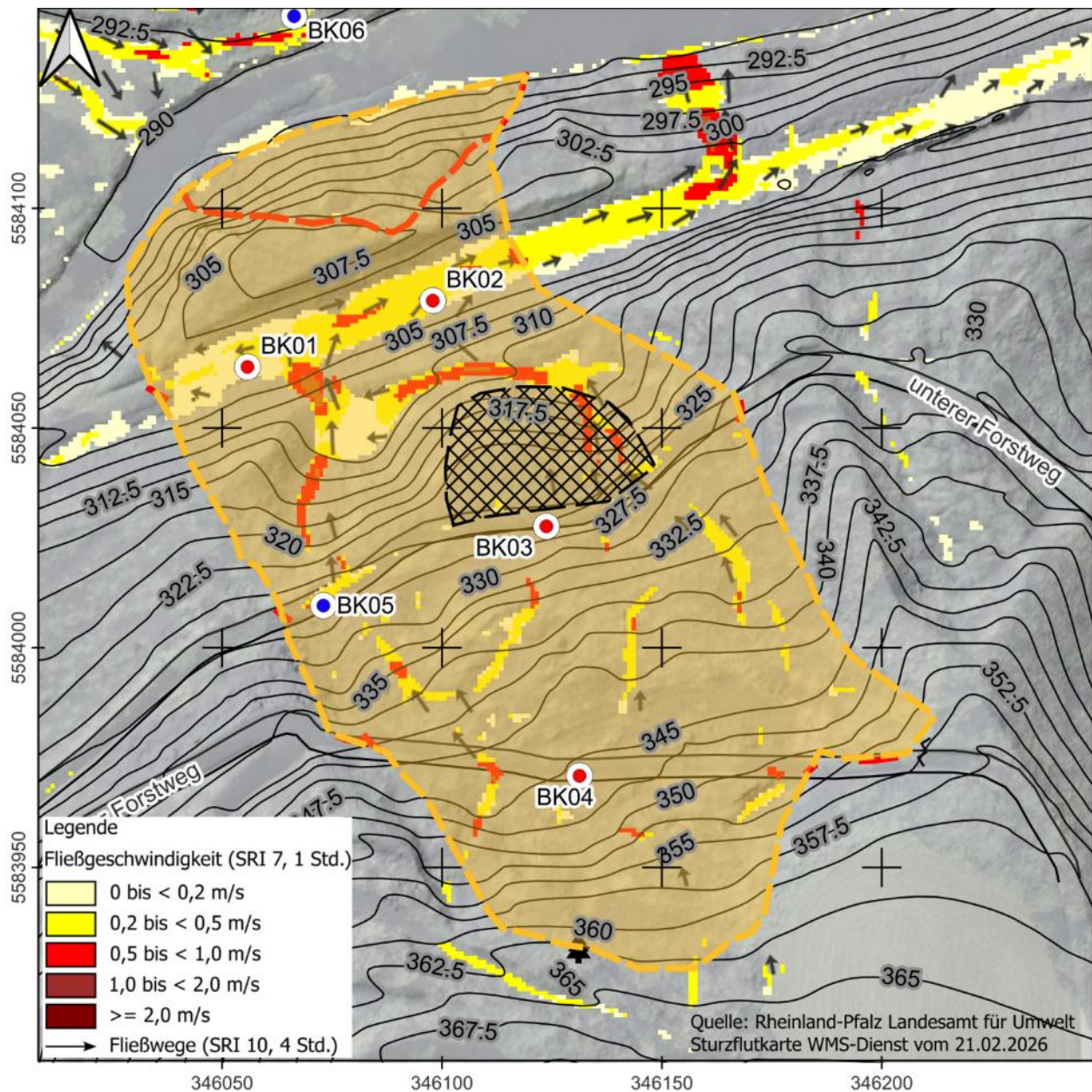


Abbildung 8: Ausschnitt aus der Sturzflutkarte des Landes Rheinland-Pfalz - Rutschhang in Müsch. Hauptabflusswege und Fließgeschwindigkeiten.

Stärke eines Starkregenereignisses“ /13/. Dabei entspricht das SRI 7 einem außergewöhnlichen Starkregenereignis mit einer Regenmenge von ca. 40 l/m² bis 47 l/m² über die Dauer von einer Stunde. Das SRI 10 4 Std. gibt ein extremes Starkregenereignis über die Dauer von vier Stunden mit einer Regenmenge von 112 l/m² bis 136 l/m² wieder.

In der Abbildung 8 wurden diese Szenarien kombiniert dargestellt, um sowohl die grundsätzlichen Fließwege im Bereich der Rutschung wie auch wie auch Fließgeschwindigkeiten abbilden zu könne. Für die Fließgeschwindigkeiten wurde auf den Datensatz des SRI 7 zurückgegriffen.

Neben den Fließgeschwindigkeiten kann an diesen Stellen auch grob auf die Wassertiefe im jeweiligen Bereich rückgeschlossen werden. Grundsätzlich konzentriert sich hier der Oberflächenabfluss. Die Fließwege wurden aus dem SRI 10 4 Std. übernommen, da hier die prinzipiellen Abflussbahnen am deutlichsten hervortreten.

Für die Rutschung geht aus den Daten /13/ hervor, dass sich im Rutschhang die Hauptabflusswege für eine zu entwässernde Fläche von ca. 3,2 ha (32.000 m²) zwischen dem Höhenrücken im Süden und der Ahrböschung im Norden befinden. Von den 3,2 ha entfallen ca. 2 ha auf die Rutschung selbst. Das Wasser konzentriert sich insbesondere an den Seiten der Rutschung (vgl. Abbildung 8) und sammelt sich im Bereich des Radwegs. Der Hauptabfluss erfolgt dann ausgehend vom Radweg nach Osten. Im Bereich des oberen und unteren Forstwegs treten zwar kleine Einstaubereiche auf, jedoch werden beide Wege primär von den Fließwegen gequert. Die Hauptabflusswege im Hang befinden sich in Fallrichtung der jeweiligen Mulde. Oberhalb der BK01 entsteht auf dem südlich gelegenen Plateau im Hang, am Fuß des Deponiekörpers ein kleiner Einstaubereich, ehe das Wasser auf den Radweg abfließt.

Aufgrund der Fließwege insbesondere in den seitlichen Mulden des Hanges, die gleichfalls die Rutschung nach Osten und Westen begrenzen, ist davon auszugehen, dass hier Wasser durch Versickerung direkt der Tiefengleitfläche zutreten kann. Zudem ist davon auszugehen, dass Wasser direkt in Spalten und Risse in den Untergrund eintritt, die als Abrisskante in der Böschung vorhanden sind.

4 Geophysikalische Messungen der Uni Bonn

Die Uni Bonn und Uni Göttingen führen seit Oktober 2021 ein geophysikalisches Monitoring an dem Rutschhang durch. Dabei werden Untersuchungen mit passiver Seismik und Geoelektrik ausgeführt.

4.1 Seismische Messungen

Wenn sich Erd- bzw. Gesteinsschichten gegeneinander verschieben, werden seismische Wellen emittiert (seismisches Signal). Während der passiven seismischen Überwachung wurden fünf Geophone im Bereich der Rutschung aufgestellt (siehe Anlage 1.3), die die entsprechenden seismischen Signale aufgezeichnet haben. Über 305 Tage wurden insgesamt 3.082 seismische Signale aufgezeichnet, die Hinweise auf kleine Rutschungsbewegungen zulassen. Die Ergebnisse der Messung sind ausführlich in /8/ beschrieben und werden hier daher zusammenfassend aufgegriffen.

Grundsätzlich wurden im gesamten Hang flächig seismische Signale aufgezeichnet (siehe Abbildung 9a). Konzentrationen der Signale liegen an der westlichen und östlichen Abrisskante der

Rutschung vor. Rückschlüsse aus den aufgezeichneten Signalen sind aufgrund des flächigen Auftretens, dass sich die gesamte Böschung in diesem Bereich in Bewegung befindet.

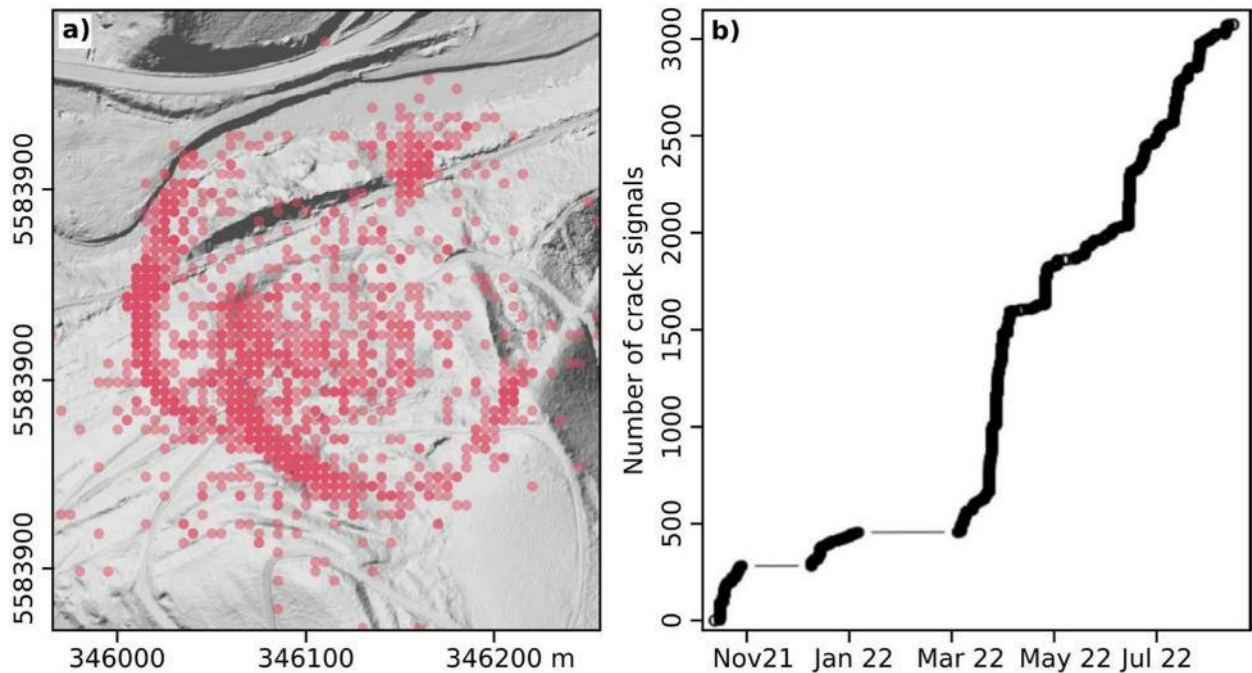


Abbildung 9: Ergebnisse der seismischen Messung an der Rutschung Müsch /8/.

Die Abbildung 9b) zeigt das kumulative Auftreten der seismischen Signale. Die Rutschung verläuft demnach zeitlich nicht linear, sondern in Schüben. So treten immer wieder Stufen in der Kurve auf, bei denen über einen längeren Zeitraum keine Signale aufgezeichnet wurden und sich die Böschung aus seismischer Sicht in Ruhe befunden hat.

4.2 Geoelektrische Messungen

Neben der seismischen Erkundung der Rutschung erfolgten geoelektrische Widerstandsmessungen (fortlaufend als ERT bezeichnet „**E**lectrical **R**esistivity **T**omography). Mit der ERT-Methode können Leitfähigkeitsunterschiede im Boden aufgelöst werden. Trockener Boden bzw. Fels ist abgesehen von wenigen Ausnahmen (z.B. Salze oder Erze) grundsätzlich schlecht elektrisch leitend. Sobald der Boden jedoch feucht oder nass ist, ändert sich diese Eigenschaft. Somit kann vereinfacht angenommen werden:

Hoher elektrischer Widerstand (schlecht leitend) = trocken (kein Wasser/Feuchtigkeit)

Niedriger elektrischer Widerstand (gut leitend) = nass (Hinweise auf Wasser/Feuchtigkeit)

Durch die ERT lassen sich eben solche Unterschiede im Untergrund auflösen. Auf diese Weise kann eine Feuchtigkeitsverteilung für den Untergrund abgeschätzt werden. Unter der grundsätzlichen Voraussetzung, dass eine entsprechende Gleitfläche bei Rutschungen immer auch direkt mit der Anwesenheit von Wasser zusammenhängt, kann auf diese Weise eine Abschätzung zur Lage einer Gleitfläche aufgrund von Widerstandskontrasten im Boden vorgenommen werden.

Durch die profilartige Anordnung der Elektroden bei der ERT kann bei einer Korrelation der Ergebnisse am Standort von Bohrungen eine direkte Zuordnung zur Tiefenlage von Feuchte- oder Nässezonen erfolgen. Die punktuelle Schichtinformation der Bohrung kann auf diese Weise in die Fläche übertragen werden.

Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die ERT-Ergebnisse entlang des Vertikalprofil (vgl. Anlage 1.3). Bei der Korrelation der Tiefenlage der Gleitfläche aus dem ERT-Profil im Vergleich zu den Inklinometermessungen kann eine korrigierte Interpretation des geoelektrischen Profils vorgenommen werden.

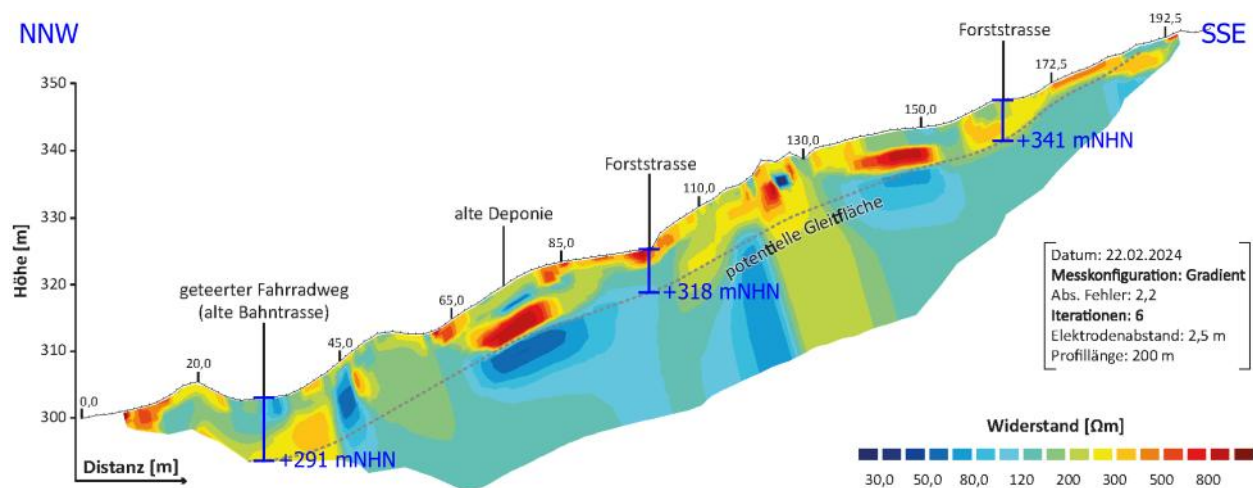


Abbildung 10: Ergebnis der Tiefenlage zur Gleitfläche aus der ERT-Messung (vertikale Profil) nach /9/.

Im Bereich der oberen Forststraße passt die Tiefenlage des Leitfähigkeitskontrastes zu den Ergebnissen der Inklinometermessung Ink 4 (siehe Abbildung 11). Aus geotechnischer Sicht taucht hier die Gleitfläche jedoch im oberen Hang nochmal auf. Die Böschungsneigung in diesem Abschnitt ist flach. Erst im Bereich der unteren Forststraße kann eine Gleitfläche bis in eine Tiefe von ca. 13 m abtauchen und unterlagert den unteren Teil der Böschung bis auf das Niveau der Ahr (vgl. Abbildung 11). Im Bereich des Radwegs reicht die Gleitfläche unter den Modellrand der Widerstandsmessung. Das Ahrniveau von +289 m NHN wird hier nicht erreicht.

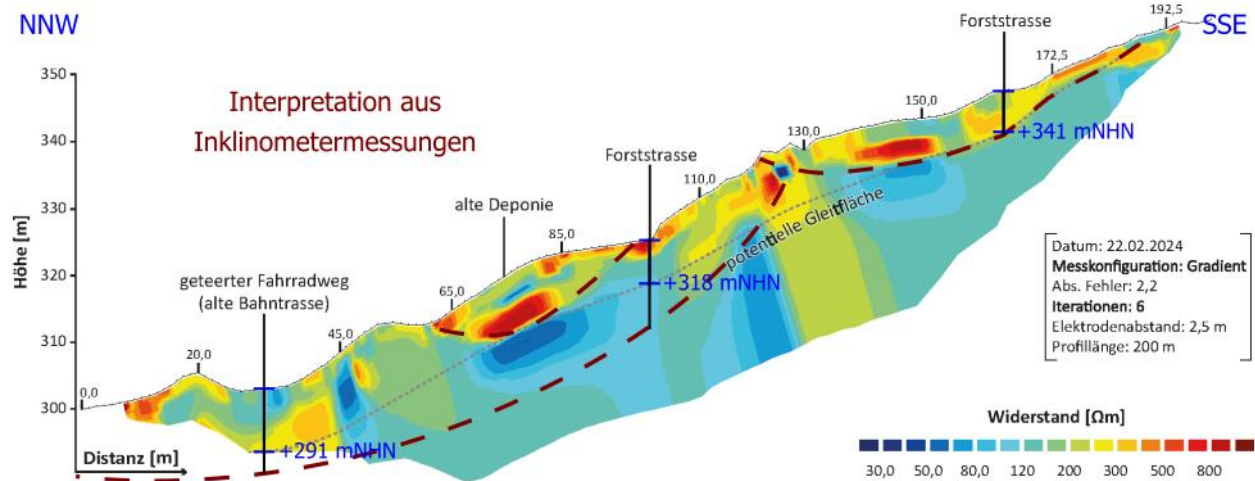


Abbildung 11: Interpretation aufgrund der Inklinometermessungen.

Im mittleren Hang ist ein deutlicher Leitfähigkeitskontrast zwischen dem Deponiekörper und dem Untergrund festzustellen. Der vermutlich vor Kopf geschüttete Deponiekörper weist eine deutlich höhere Wasserdurchlässigkeit auf als der verwitterte Tonstein des unterlagernden Devons. Das versickernde Wasser sammelt sich an der Basis des Deponiekörpers. Im Profil ergibt sich so eine Zone der geringen Leitfähigkeit oberhalb eines nassen Bereichs. Leitfähigkeitskontraste unterhalb des Deponiekörpers werden durch diesen Effekt verdeckt.

5 Geotechnisches ingenieurgeologisches Modell

5.1 Aufbau des Schichtenmodells des Untergrundes

Die Auswertung des digitalen Geländemodells im Zusammenhang mit den geodätischen Messungen sowie den Inklinometermessungen weist die Rutschung eindeutig nach. Aufgrund der Hangmorphologie mit der Ahr am Fuß der Böschung sowie des steilen Uferbereichs und dem dahinterliegenden aufgehenden Hang wird insbesondere aufgrund des unruhigen Reliefs im digitalen Geländemodell (vgl. Anlage 1.1) auf eine bereits fossil angelegte Rutschung geschlossen. Die Ergebnisse der Bohrungen legen zudem aufgrund der Schichtenfolge den gleichen Schluss nahe. Grundsätzlich wurde mit den Bohrungen ein dreigliedriger Schichtaufbau erkundet, der als solcher in der Anlage 2 in den Profilen sowie der Anlage 3.1 und Anlage 3.2 als Bohrkernfotos sowie als Schichtenverzeichnis dargestellt ist:

Schicht 1 – Lockergesteinsauflage mit kataklastischen Zonen

Schicht 2 – Rutschmasse mit kataklastischen Zonen

Schicht 3 – Devonisches Sandstein-/Tonsteingebirge

Als kataklastische Zone werden Abschnitte in den Bohrkernen beschrieben, in denen das Gestein scharfkantig zerbrochen ist. Die einzelnen Komponenten sind maximal leicht kantengerundet. Die Zonen zeichnen sich zudem durch einen vorhandenen Feinkornanteil aus, der abhängig vom Grad der Zerlegung des Gesteins variiert. Im vorliegenden Fall weisen kataklastische Zonen Korngrößen vom Sand bis in den groben Kiesbereich auf. Bei einer erneuten diagenetischen Verfestigung würde aus dem Material unter Druck und Temperatureinfluss ein Kataklasit entstehen.

Die drei Schichten können in den einzelnen Bohrungen entsprechend der nachfolgenden Tabelle 4 abgegrenzt werden.

Tabelle 4: Unterkanten der Schichtgrenzen des geologischen Untergrundmodells.

Schicht	Beschreibung		BK1	BK2	BK3	BK4	BK5
GOK [m NHN]			+303,7	+303,6	+324,9	+345,3	+325,5
1	Lockergestein	[bis m u GOK]	5,8	14,7	8,5	7,8	8,0
2	Rutschmasse	[bis m u GOK]	17,3	25,6	18,0	25,0	14,9
3	Devonisches Gebirge	[bis m u GOK]	> 40,0	> 40,0	> 70,0	> 43,0	> 42,0

5.2 Schichtenbeschreibung

Schicht 1: Lockergesteinsauflage

Die Lockergesteinsauflage ist als Schicht im gesamten Projektgebiet als oberste Einheit ausgehend von der Geländeoberkante anzutreffen. Die Lockergesteinsauflage weist ausgehend von der Geländeoberkante im Projektgebiet Mächtigkeiten zwischen 6 m bis 8 m unter GOK auf (vgl. Tabelle 4). Lediglich in der Bohrung BK2 wurde eine Tiefe bis ca. 15 m unter GOK festgestellt. Die tiefere Abgrenzung liegt vermutlich daran, dass die Schicht 1 nicht immer eindeutig von der Schicht 2 getrennt werden kann, insbesondere wenn das Material durch eine Rutschungsbewegung überprägt ist.

Die ocker bis braune Lockergesteinsauflage (siehe Anlage 3.3) besteht bei der Benennung aufgrund der Korngrößenverteilung aus einem schluffigen Kies oder kiesigen Schluff mit wechselnden Anteilen von Sand und ggf. Ton (siehe Anlage 3.2 und Anlage 3.4). Überwiegend ist das Material stark sandig und schwach tonig ausgebildet. Stellenweise können größere Komponenten

wie Steine und Blöcke enthalten sein. In der Lockergesteinsauflage treten schichtweise kataklastisch Zonen auf. Diese sind dann aufgrund der Zerlegung kiesig ausgeprägt.

Nach DIN 18196 kann das Material als SU, SU*, GU, GU*, GW charakterisiert und als weit gestuft beschrieben werden. Das Material weist natürliche Wassergehalte zwischen ca. $w_n = 6,5 \%$ und ca. $w_n = 25 \%$ und liegt damit überwiegend in einer halbfesten Konsistenz vor, vereinzelt ist das Material insbesondere bei höheren Wassergehalten als weich zu beschreiben. Aus den Laborversuchen zur Konsistenz lässt sich für die Feinkornfraktion $d > 0,4 \text{ mm}$ (Füllkorn) die Einstufung überwiegend als TL/TM ableiten.

Die Durchlässigkeit des Materials wird auf Grundlage der Charakterisierung nach DIN 18 196 mit Durchlässigkeiten $k_f = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ bis $k_f = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ abgeschätzt. In Bereichen die eher als kiesig bis sandig zu beschreiben sind, kann die Durchlässigkeit bis auf $k_f = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ bis $k_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ansteigen. Ohne den Deponiekörper in der Mitte des Hanges untersucht zu haben, wird auch hier aufgrund der lockeren Schüttung des aufgefüllten Materials von entsprechend hohen Durchlässigkeiten ausgegangen.

Der vermutete Deponiekörper ist in der Anlage 1 bzw. Anlage 2 gesondert ausgewiesen, wird aber bodenmechanisch der Schicht 1 zugeordnet.

Schicht 2: Rutschmasse

Unterhalb der Lockergesteinsauflage steht eine Schicht an, die hier als Rutschmasse beschrieben wird. Die Rutschmasse reicht bis in eine Tiefe zwischen ca. 15 m und 25 m unter GOK an (vgl. Tabelle 4). Die Schicht ist zur überlagernden Lockergesteinsauflage wie auch zum unterlagernden Gebirge nicht scharf abzugrenzen. So kann nicht eindeutig festgelegt werden, ob sich noch ein Verwitterungskopf des unterlagernden devonischen Gebirges im Liegenden der Schicht befindet.

Das Material ist überwiegend stark zerlegt, insbesondere die Komponenten in Grobkies Korngröße sind kantig bis schwach kantengerundet ausgeprägt, was auf einen kurzen Transportweg (z.B. Hangschutt) hinweist. Das Material ist in jedem Fall weit gestuft (vgl. Anlage 3.4) und aufgearbeitet. Die Kornverteilung reicht vom Grobkies bis zum Feinkorn, entsprechend der Laborversuche. Auf Grundlage der Bohrungen ist jedoch davon auszugehen, dass die Schicht hauptsächlich aus Steinen und Blöcken aufgebaut ist (Block im Matrix System). In der Bohrung werden diese als zerbrochene oder durchgehende Festgesteinskerne erkundet (vgl. Abbildung 12).

Wird eine Klassifikation nach DIN 18 196 für bautechnische Zwecke vorgenommen, ergibt sich eine ähnliche Ansprache wie bei der Lockergesteinsauflage. In der Schicht 2 (Rutschmasse) sind ebenso SU, SU*, GU, GU*, GW entsprechend der Laborversuche (siehe Anlage 3.4) vertreten. Die Schicht weist eine graue bis graublaue Färbung auf und ist durch kataklastische Zonen gekennzeichnet. Zwischen den Zonen kann auf Grundlage des Bohrkerns auch immer auf größere Komponenten in Stein- und Blockkorngröße rückgeschlossen werden (vgl. Anlage 3.4 – BK2 und BK3 und Abbildung 12).

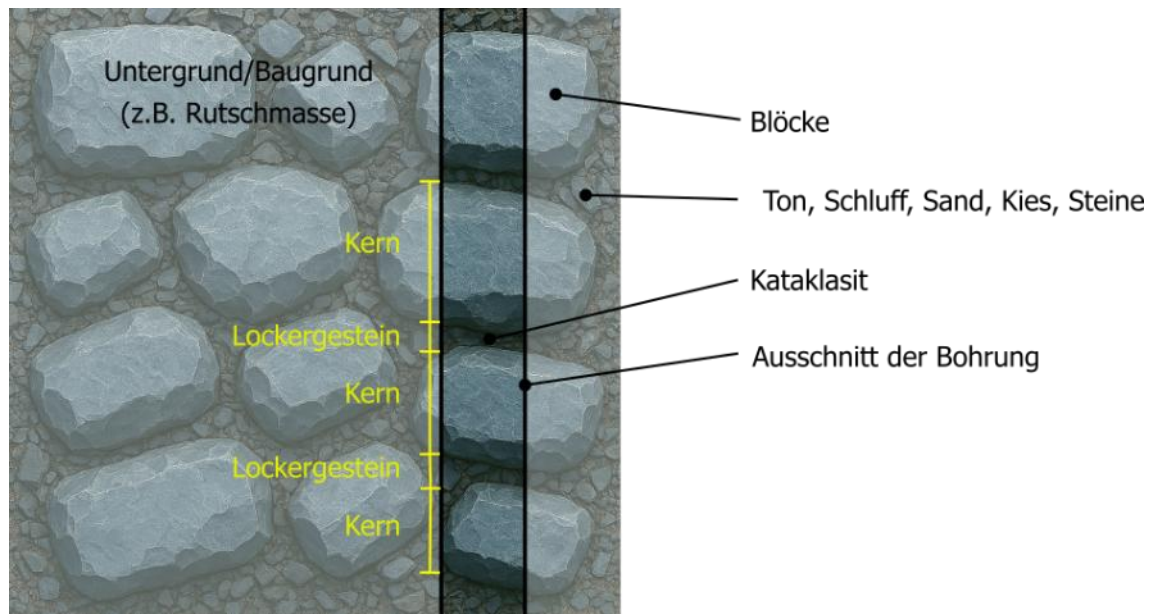


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Ausschnitts einer Bohrspur durch eine Rutschmasse (erstellt mit KI-Unterstützung durch MS-Copilot am 18.02.2026).

Die Rutschmasse weist über die kataklastischen Zonen in Verbindung mit den größeren Komponenten sequentiell gut durchlässige Schichten auf. Die Durchlässigkeit dieser Schichten wird entsprechend den Annahmen aus der Schicht 1 mit $k_f = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ bis $k_f = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ abgeschätzt.

In der Rutschmasse liegt ausgehend von den Inklinometermessungen die Gleitfläche der Rutschung. Eine direkte Ansprache der Gleitfläche in den Bohrkernen war anhand des Kerns nicht möglich. In der betreffenden Tiefe liegt eher kataklastisches, feinkörniges Material vor, das leicht von der Bohrspülung ausgespült werden kann. Dies führt im entsprechenden Tiefenbereich leicht zu Kernverlusten. Grundsätzlich deckt sich jedoch die Ansprache der Schicht Rutschmasse mit der Modellvorstellung einer böschungsbildenden fossilen Rutschmasse unterhalb einer Lockergesteinszone (Schicht 1), die insbesondere im Bereich der Wege anthropogen überprägt wurde.

Schicht 3: Devonisches Sandstein-/Tonsteingebirge

Unterhalb der Rutschmasse steht das unterlagernde devonische Sandstein- und Tonsteingebirge an. Die Felslinie wurde im Bereich des Rutschhanges in einer Tiefe von 15 m bis 25 m unter GOK angetroffen. Insbesondere im Bereich der Bohrungen BK1 und BK2 war die Rutschmasse nach unten hin nicht eindeutig vom unterlagernden Gebirge abzugrenzen (vgl. Anlage 3.3), weil immer wieder kataklastische Zonen oder Kernabschnitte mit höherem Zerlegungsgrad auftreten.

Die Festgesteinsoberkante steigt parallel zur Böschungsoberkante an. Die Abgrenzung im Bereich der Bohrungen BK1 im Bereich des Radwegs erfolgte in der gleichen Tiefe wie bei der Bohrung BK4 oben am Hang (siehe Anlage 1.2 und Tabelle 4).

Das Gebirge weist die typische braune bis dunkelgraue Färbung auf, die stellenweise ins Graublau reichen kann. Die Farbunterschiede durch die unterschiedlichen Zusammensetzungen aus Schluff-/Ton- und Sandsteinen führen zu einer deutlich zu erkennenden feinen Laminierung. Die Sandsteine sind meist mittel- bis grobkörnig und quarzitisches gebunden. Im Gegensatz dazu sind die Schluff- und Tonsteine eher dünnbankig und graublau bis dunkelgrau ausgeprägt. Sandsteine und Schluff-/Tonsteine treten meist in schneller Folge auf und sind flaserig ineinander übergehend.

Das Gebirge ist durch die variskische Gebirgsbildung stark tektonisch beansprucht und verfaltet. Hierdurch entstehen stark anisotrope mechanische Eigenschaften. Die mechanischen Eigenschaften sind abhängig von der Belastungsrichtung relativ zur Schichtung bzw. Schieferung des Gebirges.

Das Gebirge ist überwiegend als verwitterungsresistent zu beschreiben und bildet durch die starke Klüftung einen Klüftgrundwasserleiter.

5.3 Geotechnische Kennwerte

Im Rahmen der Bohrkernaufnahme erfolgte zudem eine Probenahme von Bodenproben zur weiteren Erkundung und Charakterisierung des Materials im geotechnischen Labor. Hier wurden insbesondere die intermittierend auftretenden Lockergesteins- bzw. lockergesteinsartigen Schichten beprobt (vgl. Anlage 3.3), um abschließend geotechnische Parameter zur Erstellung des ingenieurgeologischen Untergrundmodells ableiten zu können. Die Proben der Bohrungen BK01 und BK02 wurden insbesondere im bodenmechanischen Labor des LGB weiter untersucht. Ergänzt wurde das Laborprogramm durch zusätzliche Versuche mit Probenmaterial aus den Bohrkernen BK03 bis BK05 im bodenmechanischen Labor der Firma TABERG. Die ausgeführten Laborversuche sind in der nachfolgenden Tabelle 5 zusammengefasst. Protokolle der Laborversuche sind in der Anlage 3.2 dem Gutachten angehängt. Eine zusammenfassende Übersicht über die Versuchsergebnisse zeigt die Anlage 3.4.

Tabelle 5: Typ und Anzahl der ausgeführten Laborversuche.

Laborversuch	Prüfnorm	LGB	TABERG
Wassergehalt	DIN EN ISO 17892-1	11	19
Kornverteilung	DIN EN ISO 17892-4	6	18
Zustandsgrenzen	DIN EN ISO 17892-12	7	6
Wasseraufnahme	DIN 18 132	10	-

Das untersuchte Bodenmaterial wurde aus den Bohrungen entnommen. Damit ist die Probenahme auf einen Bohrkern mit 100 mm Durchmesser begrenzt. Größere Gesteinsfragmente können damit nur in Bohrachse auftreten und wurden im Rahmen der Lockergesteinsversuche nicht untersucht. Von dem erkundeten Block-in-Matrix-System wurde insbesondere die Matrix mit den kiesig und sandig dominierten Abschnitten untersucht. Insbesondere erfolgte hier die Untersuchung der kataklastischen Zonen, um die Scherparameter auf einer Rutschfläche insbesondere im Hangschutt abschätzen zu können.

Aus den Laborversuchen ergibt sich nach der Bodengruppe für das untersuchte Material überwiegend ein stark schluffiger Kies GU* (siehe Anlage 3.4). Vereinzelt reicht die Korngröße bis zu einem stark schluffigen Sand SU*. Grundsätzlich kann aufgrund der Kornverteilungen davon ausgegangen werden, dass das Matrixmaterial überwiegend schluffig, tonig bis stark schluffig ausgebildet ist. Zudem ist die Sandkornfraktion überwiegend weitgestuft vertreten. Für die Abschätzung der Reibungswinkel muss jedoch immer auch die Blockfraktion für die mechanischen Eigenschaften herangezogen werden, wenn das Gefüge blockgestützt und nicht matrixgestützt auftritt. Im Falle eines blockgestützten Gefüges werden höhere Reibungswinkel und eine niedrige Kohäsion anzusetzen sein. Im Falle eines matrixgestützten Gefüges wird der Reibungswinkel der Matrix für das mechanische Verhalten des Materials maßgebend. Der Reibungswinkel fällt bei stark schluffigen und tonigen Materialien geringer aus, wobei eine entsprechende Kohäsion zu berücksichtigen ist. Zudem wird das Material dann sensitiver gegenüber Wasser reagieren.

Das unterlagernde devonische Gebirge wird als grundsätzlich eigenstandsicher und stabil angenommen. Aus diesem Grund erfolgt keine parametrische Beschreibung der Scherparameter des Festgesteins oder der Trennflächen.

Auf Grundlage der klassifizierenden Laborversuche gemäß Tabelle 5 und in Verbindung mit den vorangegangenen Ausführungen werden die charakteristischen Scherparameter für die Bodenschichten entsprechend der nachfolgenden Tabelle 6 abgeschätzt.

Tabelle 6: Geotechnische Kennwerte abgeschätzt aus den Laborversuchen

Schicht	Bodengruppe DIN 18 196	Reibungswinkel φ'_k [°]	Kohäsion c'_k [kN/m²]
1 – Lockersteinsauflage	SU, SU*, GU, GU*, GW	22,5° bis 27,5°	0 bis 15
2 – Rutschmasse		27,5° bis 35°	0 bis 15
3 – Devongebirge	Fels	keine Angabe	keine Angabe

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Erkundung

Die Ergebnisse der Erkundung und der Untersuchungen dienen der weiteren Modellbildung zur Gefährdungsabschätzung und als Grundlage für ein ingenieurgeologisches Rechenmodell.

- *Abgrenzung des Rutschungskörpers*
Ausgehend von der Böschungsfläche hat sich eine ca. 90 m breite (entlang Radweg) bis ca. 115 m breite (entlang untere Forststraße) Rutschmasse gelöst. Das in Bewegung befindliche Areal reicht bis etwa auf ein Niveau von +362,5 m NHN den Hang hinauf. Ausgehend vom Ahrniveau auf ca. +289 m NHN umfasst damit die Rutschung eine Höhe von ca. 74 m bei einer flachen Länge von ca. 212 m. Dies entspricht einer Generalneigung der Gleitfläche von ca. $\psi = 19^\circ$ bis $\psi = 20^\circ$.
- *Dreigliedriger Schichtenaufbau*
Der erkundete dreigliedrige Schichtenaufbau mit der Lockergesteinsauflage an der Geländeoberkante sowie der unterlagernden fossilen Rutschmasse über dem devonischen Grundgebirge beschreibt den Regelaufbau des Rutschhanges. Insbesondere die Rutschmasse besteht größtenteils aus einem Block-in-Matrix-System mit zwischengeschalteten kataklastischen Zonen.
- *Maximaler Verschiebungsbetrag*
Die maximalen Verschiebungsbeträge liegen am unteren Radweg bei ca. 0,25 m über den Messzeitraum und steigen bis zum unteren Forstweg auf 0,28 m an. Die Bewegungsgeschwindigkeiten des Hanges liegen auf Grundlage der Geodätischen Messung zwischen 0,2 mm/d bis 2,2 mm/d. Der Hang bewegt sich kontinuierlich, ein vollständiger Stillstand wurde während der gesamten Messung nicht festgestellt.

– *Tiefenlage der Gleitfugen*

Die Tiefenlage der Gleitfuge konnte eindeutig mit den Inklinometermessungen erkundet werden. Im Bereich des Radwegs tritt die Gleitfläche auf Höhe des Böschungsfußes zur Ahr hin aus. Die Gleitfläche verläuft dann parallel der Festgesteinsoberkante bis zum unteren Forstweg. Ab hier steigt die Gleitfläche an und verläuft in Richtung des Schichtübergangs von Lockergesteinsauflage zur Rutschmasse im Bereich der Bohrung BK4. Die Tiefenlage der Gleitfläche variiert damit zwischen ca. 12 m am Hangfuß und ca. 6 m im Bereich des oberen Forstwegs.

– *Grundwassersituation*

Der freie Grundwasserspiegel wurde bei den Bohrungen am Böschungsfuß auf dem Niveau knapp oberhalb des Ahrwasserstand gemessen. Im Bereich des unteren Forstwegs liegt der Wasserstand am Übergang zum unterlagernden devonischen Gebirge. Abgesehen vom oberen Hang (oberer Forstweg) liegt der Grundwasserstand damit vermutlich als Schichtwasser auf dem gering durchlässigen Gebirge (Durchlässigkeit Porengrundwasserleiter Rutschmasse im Gegensatz zum Kluftgrundwasserleiter Gebirge). Der Grundwasserspiegel liegt damit ebenfalls auf Höhe der Gleitflächen im unteren Böschungsbeereich sowie im Mittelhang.

5.5 Grundlagen zum ingenieurgeologischen Rechenmodell

Um im Folgenden die Ursache bzw. den Mechanismus der Rutschung für den Rutschhang abzuschätzen, wird das im Kapitel 5.1 beschriebene geotechnische Modell des Untergrundes in ein ingenieurgeologisches Rechenmodell überführt und abschließend mit den Beobachtungen vor Ort verglichen. Die Schichten werden dabei durch spezifische geotechnische Parameter (Scherparameter) beschrieben, auf deren Grundlage sich die Standsicherheit der Böschung abschätzen lässt und Rückschlüsse zum vorherrschenden Mechanismus gezogen werden können.

Die Berechnungen erfolgen mit dem Programmsystem RS2 (2D-FE) der Firma Rocscience /11/, das auf der Finite-Elemente-Methode basiert. Zur Abschätzung des bestimmenden Mechanismus als Auslöser der Rutschung wurde die numerische Berechnung zweigeteilt ausgeführt:

1. Im ersten Schritt erfolgte die Berechnung des ingenieurgeologischen Rechenmodells mit einer schrittweisen Reduktion der Scherparameter (SSR-Verfahren). Damit wurde sowohl im Profilschnitt A wie auch im Profilschnitt B der standsicherheitstechnische Grenzgleichgewichtszustand ermittelt. Ausgehend von vorgegebenen Scherparametern werden diese so lange schrittweise reduziert, bis sich die Böschung im Grenzgleichgewicht befindet. Über den ermittelten SSR-Faktor kann dann das Wertepaar aus Reibungswinkel und Kohäsion im Grenzgleichgewicht bestimmt werden.

Als zweites Ergebnis der Berechnung können die Zonen der größten auftretenden Scherspannungen abgeschätzt werden. Diese treten in Bereichen auf, in denen die Böschung im Modell potentiell versagt und sich eine Gleitfuge ausbildet.

2. Der zweite Schritt wurde ausschließlich für das Profil A ausgeführt, da die maßgebliche geotechnische Böschungsgeometrie in beiden Profilschnitten vergleichbar bzw. sehr ähnlich ist. Für die Überprüfung der Auswirkungen einer schrittweisen Erosion des Böschungsfußes wurde eine durchgehende Gleitfläche in den Tiefen der Inklinometermessstellen ins Modell integriert. Für die Scherfläche wurde ebenfalls der kritische SRF berechnet, um die Gleichgewichtsbedingung in der Gleitfläche zu erhalten.

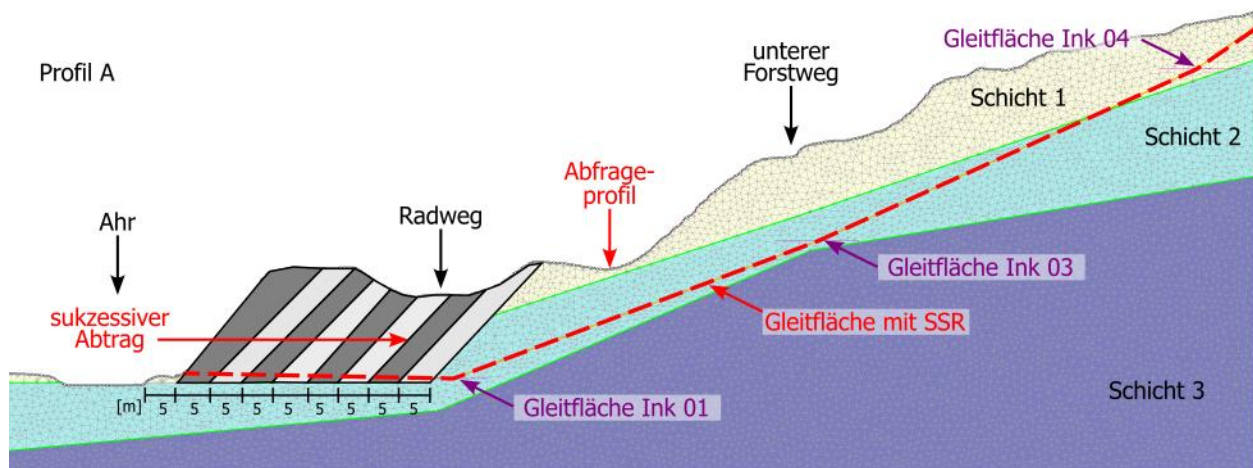


Abbildung 13: Prinzipskizze zur Simulation des erosiven Böschungsabtrags mit Lage des Abtragsprofils.

Anschließend wird ein sukzessiver Abtrag bzw. eine Erosion am Böschungsfuß in 5 m Schritten (Erosions-/Abtragsphasen) simuliert. Der Gleitfläche wurden dabei die Scherparameter des Grenzgleichgewichts zugeordnet, um zu kontrollieren, wie sich das Grenzgleichgewicht durch die Erosion des Böschungsfußes verändert, bzw. der Verformungszustand des Hanges zunimmt. Eine plastische Verformung der Modellschichten wurde dabei rechnerisch nicht zugelassen, sondern nur in der Gleitfläche ermöglicht. An einem südlich des Radwegs (siehe Abbildung 13) gelegten vertikalen Abtragsprofil (simulierte Inklinometermessstelle) wird dann die Zunahme der Verformung der dahinterliegenden Böschung abgeschätzt.

Wird der Böschungsfuß durch das Wasser sukzessive erodiert und dadurch die Normalkräfte in der Gleitfuge reduziert, reduziert sich der Scherwiderstand in der Gleitfuge – vermutlich liegen hier ohnehin aktuell nur noch Restscherfestigkeiten vor. Der Verformung des dahinterliegenden Böschungsbereich in Richtung der Ahr nimmt zu. Erfolgt diese Zunahme nach mehreren Schritten bei gleicher Abtragslänge nicht linear, ist von einer Beschleunigung der Rutschung auszugehen.

Es handelt sich somit um eine Abschätzung von Deformationszuständen im Zusammenhang mit geotechnischen Szenarien, die Hinweise auf ein ggf. mögliches Spontanversagen des Hanges geben sollen. Mit der durchgeführten FEM-Analyse werden lediglich Gleichgewichtszustände für verschiedene Abtragsphasen berechnet. Da das Modell keine zeitabhängigen Materialgesetze oder dynamischen Prozesse berücksichtigt, können aus den Ergebnissen weder reale Verschiebungsbeträge noch Rutschungsgeschwindigkeiten abgeleitet werden. Die berechneten Deformationen stellen lediglich numerische Zustandsgrößen dar, die Hinweise auf eine mögliche Instabilität liefern, jedoch keine zeitliche Entwicklung abbilden.

5.6 Gleichgewichtszustand der Böschung

Die Böschung befindet sich aktuell nicht im Gleichgewichtszustand, sondern bewegt sich (vgl. Kapitel 3.4). Damit befindet sich die Böschung nicht im Grenzgleichgewicht ($SF = 1$), sondern gemessen am Sicherheitsfaktor darunter ($SF < 1$). Die Rückrechnung über die SSR erlaubt jedoch die Abschätzung der mindestens erforderlichen Scherparameter, um den Hang im Gleichgewicht zu halten.

Als Ausgangsparameter für die SSR-Berechnung wurden die Scherparameter der Tabelle 7 verwendet. Die Parameter wurden dabei bewusst über denen der Tabelle 6 angesetzt, um die Spannweite der auf Grundlage der Laborversuche abgeschätzten Scherparameter im Rahmen der Berechnung einzuschließen. Die Schicht 1 – Lockergesteinsauflage und Schicht 2 – Rutschmasse wurden für SSR-Berechnung hinsichtlich der Startbedingungen zusammengefasst und es wurde für beide Schichten zusammen eine SSR ausgeführt, da davon ausgegangen wird, dass die Bewegung entsprechend der Inklinometermessungen auf einer tiefen Gleitfläche und nicht getrennt nach zwei schichtspezifischen Gleitflächen erfolgt.

Die Ergebnisse der SSR-Berechnung sind in der Anlage 6.1 für das Profil A und das Profil B dargestellt. Die ermittelten SRF (**s**hear **s**trengh **r**eduction **f**actor) sind in der nachfolgenden Tabelle 8 angegeben. Der SRF für das Profil A beträgt $SRF_A = 1,05 [-]$ und für das Profil B $SRF_B = 1,2 [-]$.

Im Profil A beträgt der Reibungswinkel $\varphi_A = 33,7^\circ$ und die Kohäsion $c_A = 23,8 \text{ kN/m}^2$ im Gleichgewichtszustand. Im Profil B beträgt Reibungswinkel $\varphi_B = 30,3^\circ$ und die Kohäsion $c_B = 20,8 \text{ kN/m}^2$ im Gleichgewichtszustand. Da beide SRF nahe bei dem Wert 1 liegen, kann gefolgert werden, dass sich die Böschung schon im natürlichen Ausgangszustand im Grenzgleichgewicht befindet. Zudem weisen beide Profile ähnliche Scherparameter im Grenzgleichgewicht auf. Geotechnisch verhalten sich damit beide Profile ähnlich.

Tabelle 7: Ausgangsparameter für die Modellierung mit denen die tatsächlichen charakteristischen Parameter über die SSR abgeschätzt werden.

Schicht	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]	Wichte γ γ' [kN/m ³]
1 - Lockergesteinsauflage	35,0	25	19 10
2 – Rutschmasse	35,0	25	20 10
3 – SST-/TST-Gebirge	27,5	1.000	27 17

Tabelle 8: Ergebnisse der SSR mit Angabe der Scherparameter im Gleichgewichtszustand im Profil A und Profil B.

Scherparameter		Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
Startbedingung		35,0	25,0
SRF _A [-]	1,05	33,4	23,8
SRF _B [-]	1,2	30,3	20,8
SRF _{A, Gleitfläche} [-]	2,0	19,3	12,5

Exemplarisch wurde in der nachfolgenden Abbildung 14 die Ergebnisdarstellung für den $SRF_B = 1,2$ [-] dargestellt (vgl. Anlage 6.1). Es wird deutlich, dass sich die Zonen mit der maximal auftretenden Scherbeanspruchung im Bereich der gemessenen Gleitfugen aus den Inklinometermessstellen befinden (siehe Abbildung 14). Lediglich im Bereich des Radwegs verläuft die Zone der maximalen Scherbeanspruchung auf der Modellgrenze zur Schicht 3 in die Tiefe.

Insbesondere die nach oben austretenden potentiellen Gleitflächen im Bereich des oberen Forstwegs wurde im Gelände so beobachtet. Ergänzend zeigt das Ergebnis aus der SSR-Berechnung bei einem $SRF_B = 1,2$ bei der Auswertung des abgeschätzten Verformungszustand, dass sich die potentielle Deformation des Hanges bis zum Böschungsfuß fortsetzt (siehe Abbildung 15).

Die etwas niedrigeren Scherparameter bzw. der niedrigere SRF im Profilschnitt A ist auf die steilere Böschungsgeometrie an der Böschungsfrent zur Ahr sowie im Mittelhang im Bereich des Deponiekörpers zurückzuführen. Die Ergebnisse zur Lage der Gleitflächen des Profils A sind ebenfalls in der Anlage 6.1 dargestellt. Die maßgebenden Instabilitäten stellen oberflächennahe Versagensformen der direkten Abbruchkante zur Ahr sowie des vermutlich vor Kopf geschütteten Deponiekörpers dar.

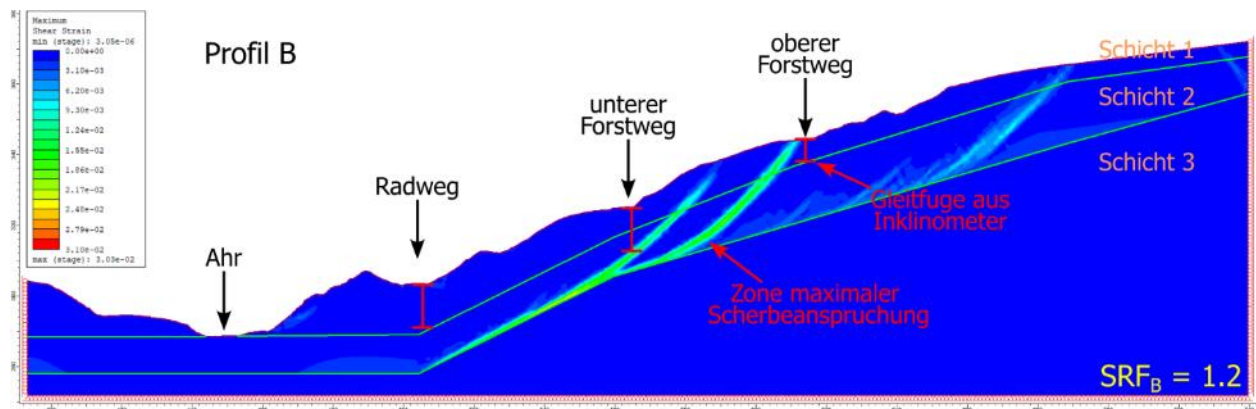


Abbildung 14: Exemplarische Ergebnisdarstellung der SSR-Berechnung am Profil B mit Darstellung der Zonen maximaler Scherbeanspruchung.

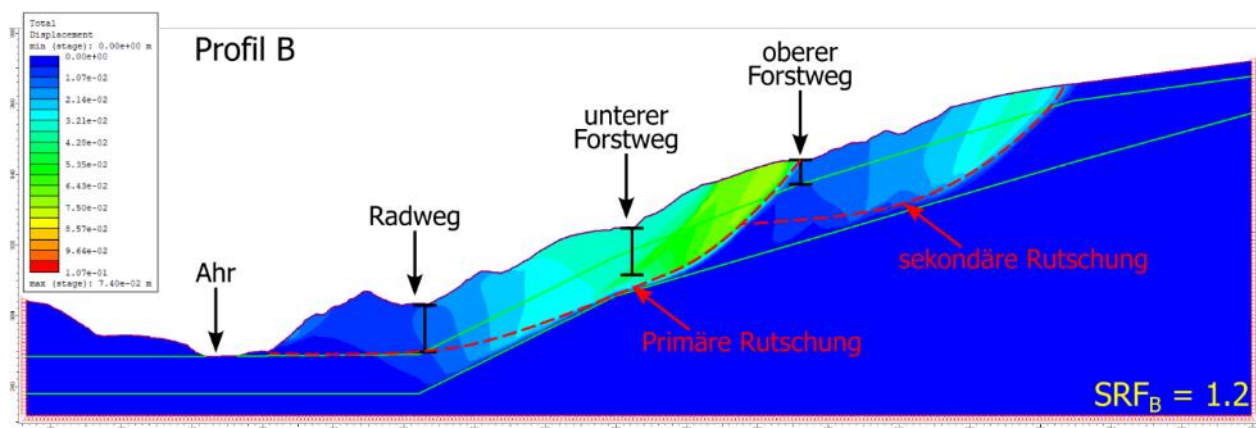


Abbildung 15: Abschätzung der maximalen Verschiebung im Hang im Gleichgewichtszustand im Profil B.

Aus der Betrachtung und Rückrechnung der Scherparameter auf Grundlage des ingenieurgeologischen Modells ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Böschung schon bei vergleichsweise hohen Scherparameter im Gleichgewichtszustand befindet. Schon kleine Veränderungen wie z.B. Wasser werden sofortige Auswirkungen auf die Böschungstabilität haben.
- Mit dem Modell ist der Rutschungskörper in seinen Dimensionen wie in Kapitel 2.2 bestätigt. Die Abrisskante im Bereich des oberen Forstwegs sowie die Tiefenlage der Gleitfugen im Modell erscheinen auf Grundlage der Inklinometermessungen und Beobachtungen im Hang plausibel.

5.7 Auswirkungen der Erosion des Böschungsfußes auf die Rutschung

Zur Abschätzung der Gefährdung durch ein Böschungsversagen des gesamten Hanges wurden das Widerlager bzw. das Auflager am Böschungsfuß schrittweise reduziert (vgl. Abbildung 13). Die Abschätzung erfolgte ausschließlich für das Profil A, da sich beide Profilschnitte im Modell geomechanisch ähnlich verhalten.

Um nun den Einfluss eines erosiven Böschungsabtrags abzubilden, wurde die Gleitfläche mit den reduzierten Scherparametern (siehe Tabelle 8) modelliert. Die Ergebnisse der SSR-Berechnung für die Gleitfläche sind in der Anlage 6.2 dem Gutachten angehängt. Mit den reduzierten Scherparametern im Grenzgleichgewicht der Böschung (Reibungswinkel $\varphi_{A, SRF=2} = 19,3^\circ$ und Kohäsion $c_{A, SRF=2} = 12,5 \text{ kN/m}^2$) befindet sich der gesamte Hang aufgrund der durchgehenden Gleitfläche im Grenzgleichgewicht. Anschließend wurde die vordere Böschung schrittweise „abgetragen/erodiert“, sodass eine Reduktion der haltenden Scherkräfte am Böschungsfuß eintritt und ggf. das Widerlager am Böschungsfuß entfernt wird.

Die einzelnen Modellschritte sind für die Stufen des Massenabtrags 0 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m und 45 m in der Anlage 6.3 mit dem allgemeinen Verformungszustand der Böschung dargestellt. Die Ergebnisse der „Verformungsmessung“ im Abfrageprofil (siehe Abbildung 13) sind in der nachfolgenden Abbildung 16 dargestellt.

Mit zunehmendem Böschungsabtrag erhöht sich der Deformationsgrad des Hanges sukzessive. Bis zu einem Abtrag von ca. 30 m gemessen von der aktuellen Böschungsfront ist keine nennenswerte Zunahme der Verschiebungen festzustellen. Erst wenn die Abtragsfront die 30 m überschreitet, beginnt der dahinter befindliche Hang im Modell maßgeblich instabil zu werden. Im letzten Schritt bei einem Abtrag von 45 m erfolgt der Anstieg der Verformung dann schlagartig.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die berechneten Verschiebungsbeträge im mm-Bereich nur das allgemeine Verhalten des Hanges widerspiegeln und nicht als exakte Werte der Böschungsreaktion zu verstehen sind. Die Darstellung der Kurven spiegeln das prinzipielle Verhalten des Hanges im Modell wider.

Es ist davon auszugehen, dass das beschriebene Szenario auch auf die Situation vor Ort zutrifft. Das grundsätzliche Szenario, dass sich die Böschungsbewegung bei einem sukzessiven Abtrag des Böschungsfußes beschleunigen kann, ist damit nachgewiesen. Zusammenfassend ist damit zu folgern, dass das Widerlager bzw. Auflager am Böschungsfuß maßgeblich zur Stabilität des Gesamthangs beiträgt.

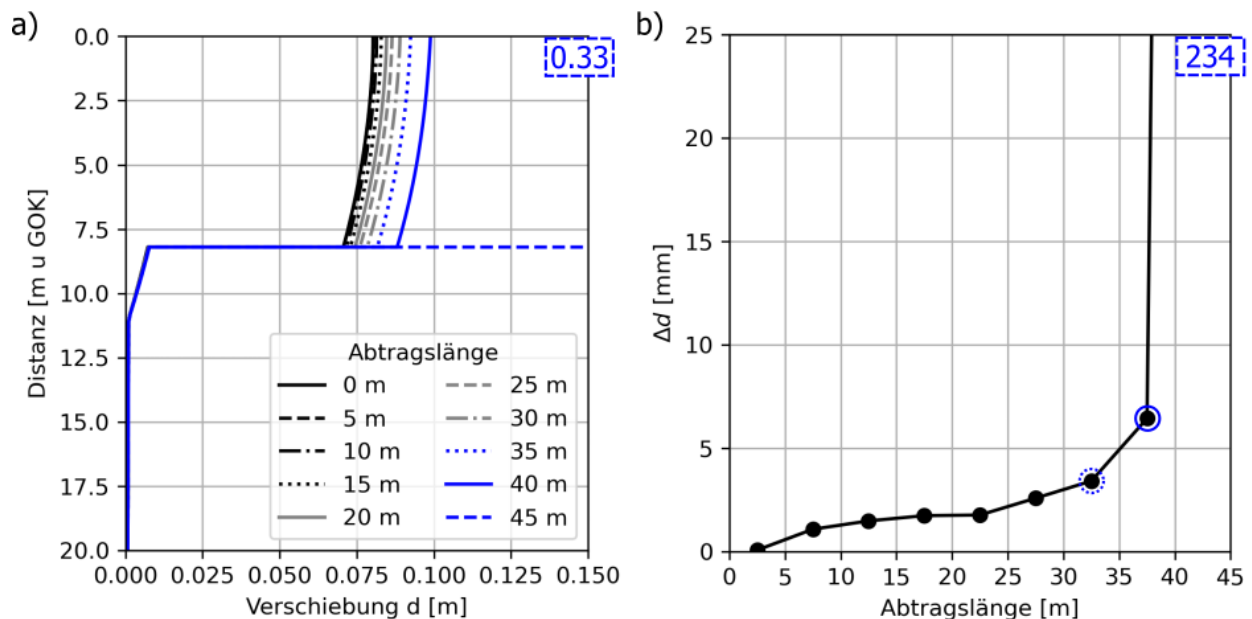


Abbildung 16: a) Zunahme der Verschiebung der Böschung gemessen an einem Referenzprofil in ca. 50 m Entfernung von der Böschungsfrent. b) Ansteigende relative Deformation zwischen den einzelnen Abtragsstufen. *Bemerkung: Der Wert für die Abtragslänge 45 m reicht weit über die Darstellung hinaus. Der Anstieg erfolgt plötzlich. Die Werte sind nur nachrichtlich dargestellt.*

6 Bestandsaufnahme und Gefährdungsbeurteilung

Mit den ausgeführten Untersuchungen mit geodätischen und geotechnischen Messverfahren sowie den Bohrungen und Laborversuchen kann die Rutschung ingenieurgeologisch beschrieben werden. Die Ergebnisse der Untersuchung für die fachgutachterliche Bewertung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die flussseitige Böschungskante ist dem erosiven Angriff des Wassers ausgesetzt und hat eigene kleine Bruchkörper gebildet, die sukzessive in die Ahr nachbrechen.
- Die Rutschung besteht aus mehreren Teilen (vgl. Anlage 6). Neben der vorderen Böschung zwischen Ahr und Radweg tritt im Bereich des Ahrufers die Gleitfläche der dahinterliegenden fossilen Großrutschung aus. Die Hauptgleitfläche tritt im Bereich des oberen Forstwegs aus. Die weiter oben am Hang liegenden Bereiche werden vermutlich „mitgezogen“ bzw. rutschen sekundär nach, es liegt hier keine scharfe Grenze vor. Vermutlich handelt es sich um gestaffelte Brüche, die sich den Hang weiter hinaufziehen (vgl. Anlage 1.2)

- Die Bewegung der Rutschung des Hanges dauert an. Der Hang ist über die Dauer der Untersuchung nicht vollständig zum Stillstand gekommen. Seit dem Flutereignis aus dem Jahr 2021 ist von einer anhaltende Kriechbewegung des Hanges auszugehen.
- Die ausgeführten Untersuchungen lassen den Rückschluss zu, dass sich die Böschung in Schüben bewegt (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 0). Es sind zeitliche Phase zunehmender Bewegungsintensität festzustellen, nach denen die Bewegungsgeschwindigkeit aber wieder stark abnimmt.
- Durch die Auswertung der geophysikalischen Messungen der Uni Bonn insbesondere zur Geoelektrik in Verbindung mit der im Rahmen der Bohrungen ermittelten Grundwassersituation kann davon ausgegangen werden, dass Wasser einen maßgeblichen Einfluss auf die Rutschung hat.
- Aus der Sturzflutkarte des Landes Rheinland-Pfalz geht hervor, dass für den Hangabschnitt die Hauptabflusswege durch den Rutschhang verlaufen und damit das Potential für direkten Wasserzutritt in die Gleitfläche besteht.
- Der Hang befindet sich aufgrund seiner geometrischen Form sowie der auf Grundlage der Laborversuche abgeschätzten Scherparameter im Gleichgewichtszustand.
- Auf Grundlage der ausgeführten Berechnungen zur Ermittlung der Scherparameter im Gleichgewichtszustand des Hanges kann davon ausgegangen werden, dass schon kleine Veränderungen (z.B. zusätzliches Wasser in der Gleitfläche) zu einer maßgeblichen Verschlechterung der Situation führen.
- Der sukzessive Abtrag des Böschungsfußes wird nicht sofort, jedoch langfristig nachteilige Auswirkungen auf die Gesamtstandsicherheit der Böschung haben.
- Ein spontanes Versagen des Hanges ist entsprechend der Betrachtungen aus Kapitel 5.7 erst bei einer Böschungserosion von mehreren 10er-Metern zu erwarten. Grundsätzlich wird sich jedoch bei sukzessiv fortschreitender Erosion am Böschungsfuß die Rutschungsbewegung des Hanges fortsetzen.

Aus fachgutachterlicher Sicht befindet sich der Hang in einem labilen Gleichgewicht. Schon kleine Änderungen im Bereich der Gleitfläche (z.B. Wasserzutritt durch Niederschlagsereignisse) führen zu einer Beschleunigung der Rutschung. Zudem wird eine Beschleunigung der Rutschung erwartet, wenn ein kritisches Maß an Material am Böschungsfuß z.B. durch Erosion entfernt wird. Eine Prognose zu Rutschungsgeschwindigkeiten kann jedoch nicht vorgenommen werden.

Auf Grundlage der ausgeführten Untersuchungen und der fachgutachterlichen Einschätzung wird die Böschung ohne technische Maßnahmen nicht von allein zum Stehen kommen. Hierdurch wird das Ahrbett sukzessive nach Norden verlagert werden. Ein Zuschieben der Ahr durch den Hang (vgl. Kapitel 2.4) ist aus fachgutachterlicher Sicht erst bei größeren Erosionsraten am

Böschungsfuß geotechnisch möglich. Die aktuell stattfindende Kriechbewegung kann fortlaufend geotechnisch überwacht werden (Monitoring), um die Reaktionen des Hanges z.B. auf Niederschläge weiter zu erkunden. Zusätzlich können konstruktive Maßnahmen zur positiven Beeinflussung der Standsicherheit des Hanges geplant und ausgeführt werden.

7 Variantenstudie

7.1 Vorbemerkungen zur Variantenstudie

Die nachfolgend beschriebenen Varianten sind aus geotechnischer Sicht geeignet, die Standsicherheit des Hanges positiv zu beeinflussen. Da es sich überwiegend um wasserbau- bzw. Maßnahmen mit Eingriff in die Hydraulik und Hydrogeologie des gesamten Hanges handelt, wird hier auf eine erforderliche Fachplanung verwiesen. Vor Umsetzung einer etwaigen Maßnahme sind die hydraulischen und hydrogeologischen Auswirkungen durch ein Fachbüro zu planen. Diese Planung ist dann wiederum mit einem Fachplaner für Geotechnik bzw. Ingenieurgeologie hinsichtlich der mechanischen Auswirkungen auf die Rutschung abzustimmen. In jedem Fall wird eine fachübergreifende Planung empfohlen.

Geotechnisch bezieht sich dies insbesondere auf Massenumlagerung und die Umsetzung von bautechnischen Maßnahmen. Es muss sichergestellt sein, dass bautechnische Zustände während der Umsetzung nicht zu einer nachteiligen Beeinflussung der Rutschung führen. Aus diesem Grund konzentriert sich die Variantenstudie auf Maßnahmen die ohne große bautechnische Eingriffe in den Rutschhang auskommen. Zufahrt für Großbaugerät (z.B. Bohrpfahleräte) oder auch die kaskadenweise Installation von rückverankerten Balken durch die Gleitfläche werden aufgrund der Zugänglichkeit (Forstwege) nicht weiterverfolgt.

Die nachfolgenden beschriebenen Varianten sind aus geotechnischer Sicht einzeln oder in Kombination geeignet, die Rutschungsbewegung zu verlangsamen und im besten Fall zu stoppen.

7.1.1 Unterbrechen der Vorzugsfließwege (Variante 1)

Zur Reduktion des Wassers im Bereich der Gleitfläche müssen die Vorzugsfließwege bzw. die Versickerung von Wasser im Hang unterbunden werden. Zusätzlich wird im Interesse des natürlichen Erhalts des Ahrtals sowie des Naturschutzes vorausgesetzt, dass der Wald nicht gerodet wird und auch keine entsprechende vollflächige Abdichtung der Oberfläche erfolgt. Da eine flächige Versickerung des Wassers im bewaldeten Gebiet damit nicht unterbunden werden kann, soll versucht werden, das ablaufende Oberflächenwasser auf Grundlage von /13/ (vgl. Kapitel 3.6) im Bereich der Forstwege zu fassen und geordnet abzuleiten.

Hierfür wären die Ertüchtigung bzw. der Ausbau der Forstwege zu Notabflussrinnen erforderlich. Talseits wird ein Damm gesetzt, der direkt in einer im Westen verlaufende Abflusskaskade entwässert (siehe Abbildung 17). Grundsätzlich sollte die Rinne im Tiefpunkt des Hanges gesetzt werden, entsprechen der Höhenlinien steigen die Forstwege nach Osten hin an. Das Wasser wird

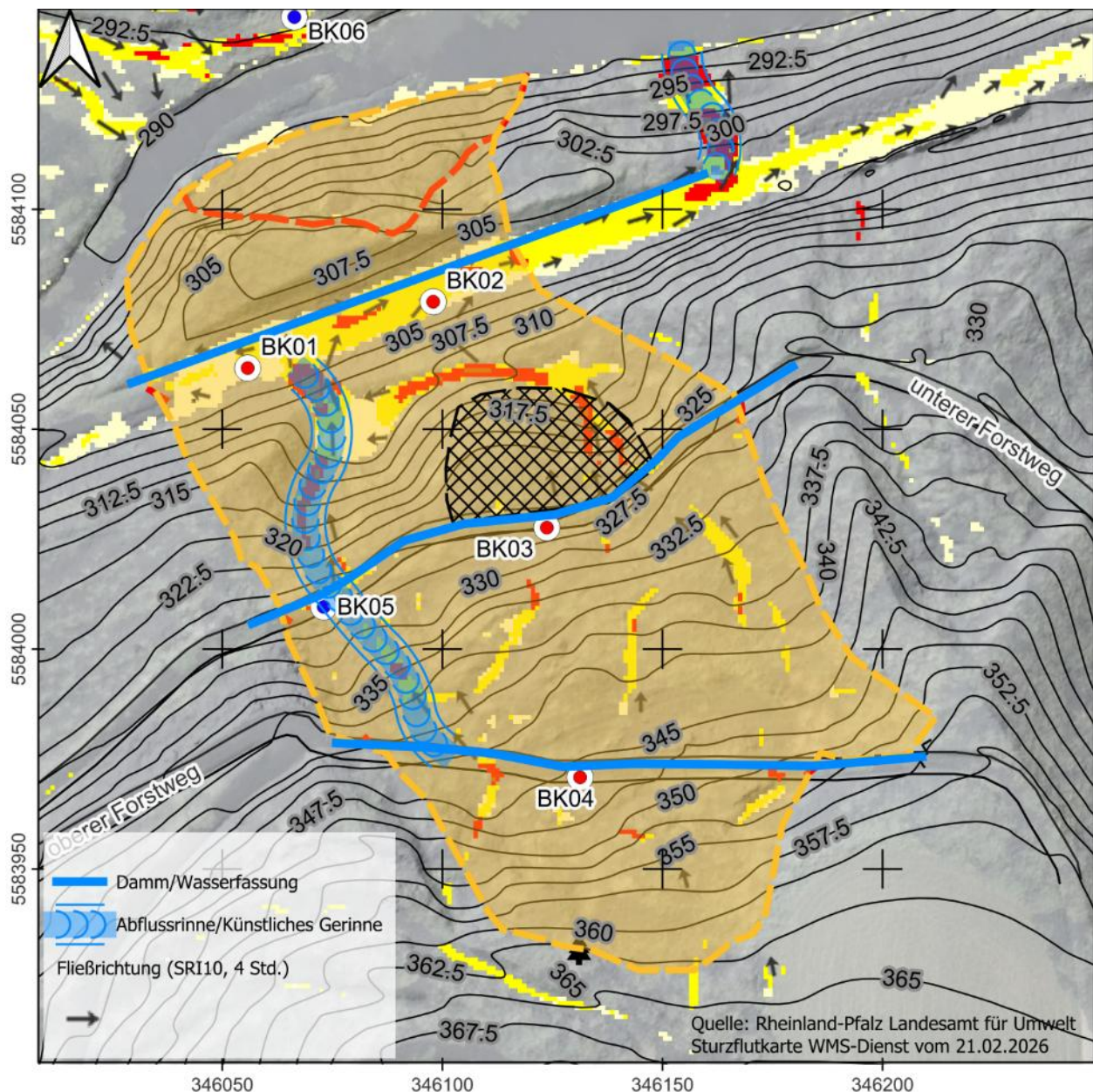


Abbildung 17: Fassung des Oberflächenwassers im Bereich der Rutschung.

Wenn man von dem in Kapitel 3.6 abgeschätzten 3,2 ha Einzugsgebiet ausgeht, teilen sich die Wassermengen überschlägig entsprechend der nachfolgenden Tabelle 9 auf. Es wird im ungünstigsten Fall davon ausgegangen, dass kein Wasser versickert und sämtliches Wasser als Oberflächenabfluss gefasst und abgeleitet werden muss. Die Wassermengen wurden auf Grundlage der

angegebenen Niederschläge /13/ (SIR 7 über 1 Std.) abgeschätzt. Im Bereich des Radwegs laufen die Wassermengen zusammen und entwässern dann über einen Zulauf in die Ahr.

Das Sammelgerinne im Westen muss technisch dicht ausgeführt werden, damit kein Wasser an dieser Stelle in die Gleitfuge eintritt. Die Lage des Gerinnes liegt in einem Bereich mit starker seismischer Aktivität (vgl. Kapitel 0), sodass hier von einem direkten Einfluss auf die Rutschung im Falle von nachteiligen Veränderungen für die hydraulische Situation ausgegangen werden muss.

Tabelle 9: Wassermengen der Wasserfassung im Bereich des Rutschhanges.

Dammabschnitt	Fläche Einzugsgebiet	Wassermenge [m³/h]
Oberer Forstweg	17.000 m²	680 bis 800
Unterer Forstweg	7.000 m²	280 bis 330
Radweg	6.000 m² + 24.000 m³	1.200 bis 1.410

Bei der Konstruktion werden sämtliche Fließwege in Betongerinnen geführt, die über eine Erdbaumaßnahme in der Örtlichkeit installiert werden. Insbesondere die westliche Rinnenstruktur (Hauptgerinne) wurde als kaskadierendes Betongerinne angenommen, damit eine Wasserfassung auch im Falle einer fortschreitenden Kriechbewegung des Hanges gewährleistet ist. Die Installation erfolgt immer in einem Böschungseinschnitt mit einem Gründungspolster aus Schotter. Ausgehend von den talseitigen Begrenzungsdämmen (z.B. L-Steine), die im Rahmen eines Ausbaus der Waldwege eingebaut werden können, wird hier dem Hauptgerinne mit dem natürlichen Gefälle des Weges das Wasser zugeleitet. Das Wasser wird vom Hauptgerinne aus auf den Radweg geleitet, der im betreffenden Abschnitt (siehe Abbildung 17) zu einer Notablaufbahn ausgebaut wird, ebenfalls als Betongerinne. Über ein Einleitbauwerk kann dann das Wasser aufgenommen und östlich des Hangrutsches in die Ahr abgeleitet werden.

Für die Fortführung der Planung ist neben einem Fachbüro für Hydrogeologie und Hydraulik der naturschutzrechtliche Aspekt zu berücksichtigen. Ergänzend sind vor etwaigen Maßnahmen die Eigentumsverhältnisse entlang der Forstwege zu klären. Aufgrund der Erfahrungen im Rahmen der Bohrarbeiten ist die Forstfläche zwischen den Wegen in privatem Besitz. Die Forstwege an sich werden aufgrund der nur begrenzten Breite für die vollständige Ausführung der Maßnahmen nicht ausreichen.

7.1.2 Sicherung des Böschungsfußes (Variante 2)

Der Fuß der Böschung liegt in einer Prallhangsituation der Ahr. Von Westen kommend trifft die Ahr auf das südliche Flussufer und wird hier nach Nordosten abgelenkt (Abbildung 18). Hierdurch entsteht für die Böschung eine ungünstige Situation durch die Anströmung, die zu sukzessivem Materialabtrag führt. Um den erosiven Materialabtrag durch das Wasser zu begrenzen oder ggf. zu verhindern, wird empfohlen, die Böschung konstruktiv zu befestigen.

Grundsätzlich ist hier eine massive Böschungssicherung mit Bohrpfehlwand und Stützmauer möglich, die auch zu einem Widerlager der Rutschung ausgebaut werden kann. Dies hat erfahrungsgemäß jedoch einen erheblichen Eingriff in die natürliche Böschung zur Folge und erfordert ein massives technisches Bauwerk. Ein entsprechendes Bauwerk muss dauerhaft unterhalten werden. Aus diesem Grund wird die Planung eines massiven Bauwerks zur Böschungssicherung nicht weiterverfolgt.

Im Gegensatz zum technischen Bauwerk kann ein „naturnaher“ Erosionsschutz hergestellt werden. Hierfür wird auf Grundlage einer „Bewehrten Erde“-Konstruktion (BE-Konstruktion) ein Stützkörper vor der Böschung hergestellt. Ausgehend von einer Sauberkeitsschicht mit Kolkchutz erfolgt der Aufbau eines Bewehrten-Erde-Damms entlang eines ca. 170 m bis 200 m langen Böschungsabschnitts (vgl. Abbildung 18).

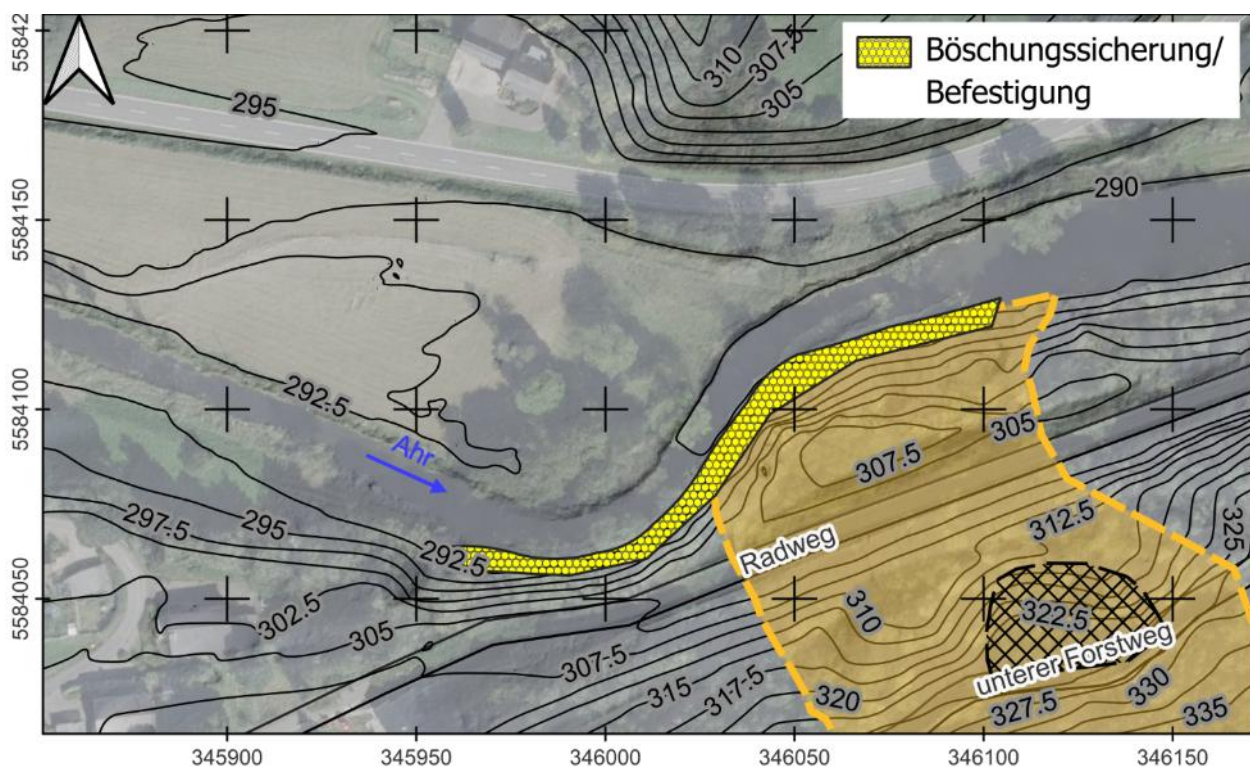


Abbildung 18: Lageskizze zur Böschungsbefestigung im Anstrombereich des Prallhangs und Gleithangs entlang der Rutschung.

Für die Herstellung der BE-Körper wird eine geeignete Geotextilkonstruktion vorgeschlagen. Das Bodenmaterial wird dann in das Textil lagenweise verdichtet eingebaut. Anschließend wird das Textil ahrseitig umgeschlagen und die nächste Schicht aufgesetzt. Der so entstehende Damm kann ahrseitig mit massiven großen Wasserbausteinen und Blöcken gesichert werden (siehe Abbildung 19). Alternativ zum Geotextil kann die Konstruktion mit rückverankerten Gabionen (gefüllten Stahldrahtkörper) ausgeführt werden.

Das Geotextil dient dabei der Verhinderung des Feinkornaustrags sowie dem stabilen Aufbau der Böschung. Zusätzlich kann mit dem Verfahren ein zusätzliches Widerlager am Böschungsfuß hergestellt werden, sodass neben dem Erosionsschutz die Rutschung auch durch die zusätzliche Auflast am Böschungsfuß positiv beeinflusst wird. Als Anprallschutz und Schutz für das Geotextil und den Böschungsfuß im Hochwasserfall dienen die Wasserbausteine.

Die Bauausführung muss vollständig von der Wasserseite erfolgen. Entlang des ca. 200 m langen Böschungsabschnitts muss eine Arbeitsebene vor die Böschung gebaut werden. Diese Arbeitsebene wird mit 4 m Breite angenommen. Da die Ahr an dieser Stelle nur ca. 10 m bis 15 m breit ist wird der Fließquerschnitt durch die Arbeitsfläche eingeengt, ggf. ist eine temporäre Verlegung der Ahr erforderlich. Nach der Herstellung der Arbeitsebene erfolgt die Installation einer Behelfsbrücke als Zufahrt.

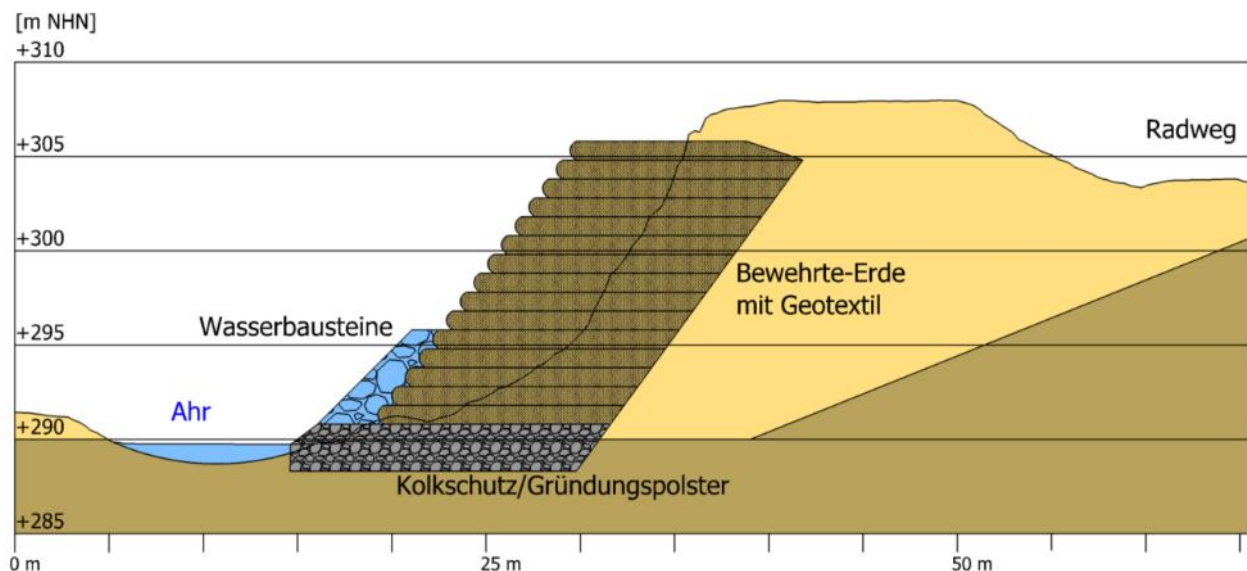


Abbildung 19: Skizze zur Herstellung der BE-Konstruktion mit Sicherung aus Wasserbausteinen.

Nach der Vorprofilierung des Uferbereichs (Beräumen von Bäumen und Sträuchern) erfolgt ein segmentweiser Bodenaushub in der Tiefe der BE-Konstruktion bis aus Gründungstiefe ca. 0,5 m bis 1,0 m unter Sohlentiefe der Ahr. Die Gründung bis knapp oberhalb der Wasserlinie kann mit Wasserbausteinen sicher gegen Auskolkung ausgeführt werden. Anschließend erfolgt der lagenweise verdichtete Aufbau der BE-Konstruktion in entsprechenden Geotextilbahnen oberhalb der

Wasserlinie. Die BE-Konstruktion ist abschließend mit einer Vorsatzschale aus Wasserbausteinen zu sichern (vgl. Abbildung 19).

Die Sicherungshöhe richtet sich nach der Hochwasserlinie (HQ5, HQ10, HQ100) sowie nach dem Ergebnis einer hydraulischen Strömungsmodellierung. Es muss dabei sichergestellt sein, dass die Konstruktion den Anforderungen an den Böschungsschutz (z.B. sukzessiver Materialaustrag) genügt, gleichzeitig jedoch keinen nachteiligen Einfluss auf das Fließgewässer, insbesondere den Abstrom hat.

7.1.3 Anströmungssituation verändern (Variante 3)

Neben der Ausführung zur Erosionssicherung am Böschungsfuß wird als weitere Maßnahme die wasserbauliche Veränderung der Anströmungssituation vorgeschlagen. Von Westen kommend fließt die Ahr an einem nördlich des Flusslaufs gelegenen Auengebiet vorbei, das aktuell landwirtschaftlich genutzt wird (siehe Abbildung 20). Um die Anströmungssituation für die Ahrböschung des Rutschhanges positiv zu beeinflussen, besteht die Möglichkeit das Flussbett schon ca. 200 m vor dem Rutschhang nach Norden zu verlegen. Dabei wird für die Planung angenommen, dass ein künstliches Gerinne mit einer Breite von ca. 10 m und einer Tiefe von 2 m hergestellt wird. Seitlich werden dann Randdämme geschüttet, die abschließend mit Wasserbausteinen verkleidet werden.

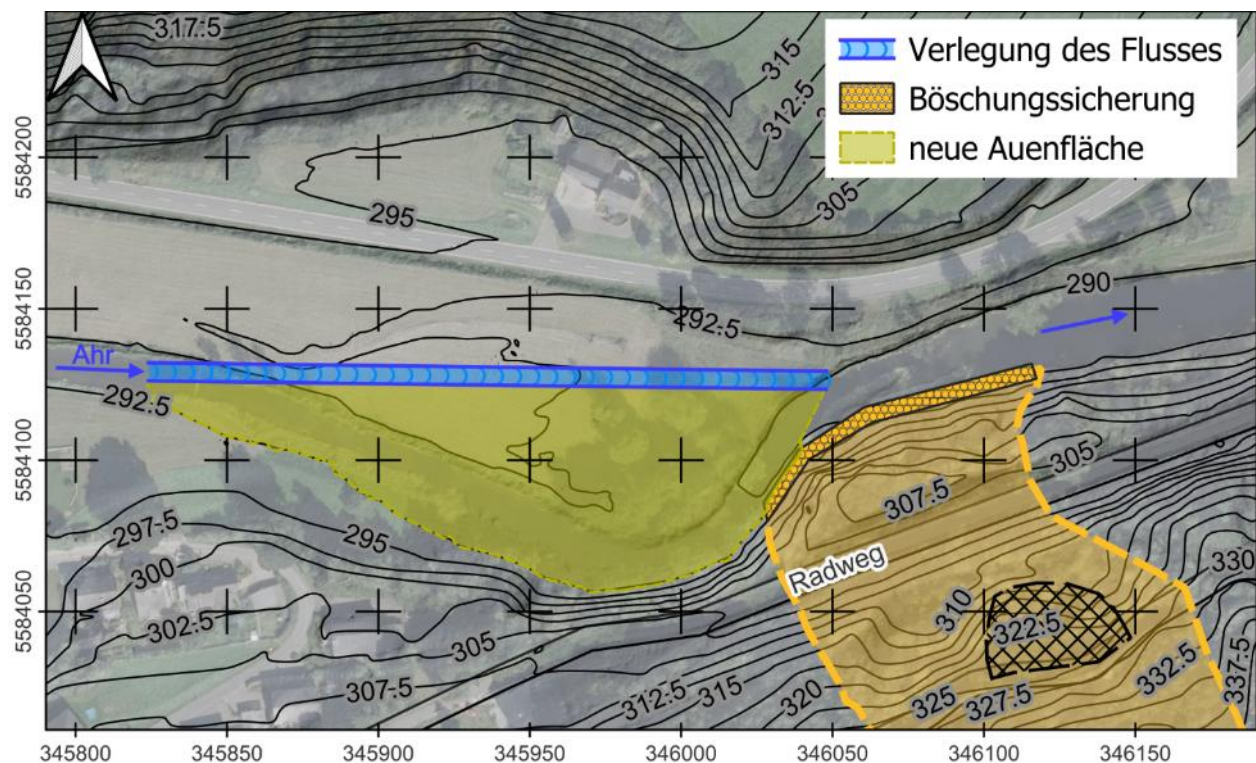


Abbildung 20: Lageskizze zur Steuerung des Anstroms der Uferböschung im Rutschungsbe-
reich.

Ausgehend von der Variante 2 muss auch hier von einer Arbeitsebene aus gearbeitet werden, die in die Ahr hineinzubauen ist. Im Bereich der Rutschung muss außerdem segmentweise gearbeitet werden, um den ca. 12 m bis 15 m tiefen BE-Körper herstellen zu können, ohne die Böschung nachhaltig zu schwächen. Wie zuvor orientiert sich die Höhe der BE-Konstruktion an den Vorgaben aus dem Hochwasserschutz.

Mit der Maßnahme wird die Prallhangsituation verbessert, da die Böschung nun nicht mehr direkt angeströmt wird (vgl. Abbildung 18 und Abbildung 20). Im Bereich, in dem Ahr an der Böschung des Rutschhanges vorbeifließt, kann eine wasserbautechnische Sicherung entsprechend Kapitel 7.1.2 ausgeführt werden. Diese kann dann jedoch auf ca. 100 m Flusslauf eingekürzt werden. Im Anstrombereich entsteht eine ca. 10.000 m² große neue Auenfläche bzw. die alte Auenfläche wird nach Süden hin verlagert (vgl. Abbildung 1).

Die Maßnahme bedarf einer detaillierten wasserbaulichen Planung und beeinflusst die Rutschung nur indirekt. Mit der Maßnahme wird in jedem Fall die sukzessive Erosion des direkten Böschungsbereichs der Rutschung im Regelabfluss (Normalwasserstand) positiv beeinflusst. Im Hochwasserfall, wenn die neu geschaffene Auenfläche überflutet wird, muss jedoch ebenso die Erosionssicherheit der Böschung gewährleistet sein.

7.2 Grobkostenschätzung

Die Grobkostenschätzung für die drei im Kapitel 7.1 beschriebenen Varianten zur positiven Beeinflussung der Rutschungsbewegung ist in der Anlage 7 tabellarisch zusammengefasst.

Es wird darauf hingewiesen, dass für die Kostenschätzung nur sehr grobe Annahmen getroffen werden konnten, um eine Größenordnung für entsprechende Maßnahmen zu erhalten. Es wurde zudem ein Sicherheitszuschlag von 25% auf die Baukostenschätzung aufgrund des Planungsstandes berücksichtigt. Zudem wurden die weiteren Planungskosten für Wasserbau, Geotechnik und Tragwerksplanung pauschal angesetzt und aus den Baukosten der nachfolgenden Varianten herausgerechnet. Es wird im Rahmen der Grobkostenschätzung davon ausgegangen, dass sämtliche Arbeiten als Ortbetonarbeiten nach dem Erdbau erfolgen. Für die Abschätzung der Baukosten mussten die Einheitspreise je Einheit als Mischkalkulation abgeschätzt werden. So wurde für die Aushubarbeiten ein mittlerer Preis für Entsorgung und Transport zusammengefasst.

1. Kostenschätzung Variante 1 – Vorzugsfließwege

Die Baukosten zur Herstellung der Vorzugfließwege wurde mit einem finanziellen Aufwand von ca. 3,6 Mio. EUR (netto) abgeschätzt. Bei der Maßnahme sind insbesondere noch grundstück- und naturschutzrechtliche Aspekte zu berücksichtigen, die im Rahmen der Kostenschätzung nicht mit aufgenommen wurden.

2. Kostenschätzung Variante 2 – Böschungssicherung

Die Baukosten zur Herstellung der Böschungssicherung wurden mit einem finanziellen Aufwand von ca. 5,5 Mio. EUR (netto) abgeschätzt. Für die Installation der Arbeitsebene wurde dabei von einer mittleren Tiefe der Ahr von 2 m bei Normalwasserstand ausgegangen. Die Arbeitsebene wurde mit einer Höhe von 0,5 m über Normalwasserstand angenommen. Bei einer erforderlichen Verlegung der Ahr wurde das für Arbeitsebene angesetzt Volumen abzüglich des Überstands oberhalb der Wasserlinie angesetzt. Insgesamt wird bei dem Bauwerk eine geotextilbewehrte Böschungsfläche von ca. 3.000 m² hergestellt.

3. Kostenschätzung Variante 3 – Verlegung des Flusses

Die Kostenschätzung der Variante 3 basiert auf den reduzierten Ansätzen der Variante 2 und wurde hauptsächlich um die neuen Positionen zur Verlegung der Ahr in die Auenfläche ergänzt. Grundstücks-, naturschutz- und wasserbaurechtliche Aspekte bei der Verlegung des Flusses wurden bei der Kostenschätzung nicht berücksichtigt. Die Baukosten zur Herstellung der Verlegung des Flusses in Verbindung mit einer Böschungssicherung auf Höhe der Rutschung, wurden mit einem finanziellen Aufwand von ca. 5,5 Mio. EUR (netto) abgeschätzt.

Es wird abschließend darauf hingewiesen, dass die vorliegende Variantenstudie hauptsächlich aus geotechnischer Sicht erstellt wurde und insbesondere ingenieurtechnische Aspekte und rechtliche Aspekte des Wasserbaus (z.B. Strömungsmodelle zur Auswirkung des Bauwerks auf die Ahr) nicht beinhaltet. Für entsprechende Planungen sind entsprechende Fachbüros zu beteiligen.

8 Zusammenfassung und Empfehlung zum weiteren Vorgehen

Das Gutachten erläutert die geotechnische Situation im Bereich der Rutschung in Müsch auf Grundlage der ausgeführten Erkundungen, Untersuchungen und Berechnungen. Zusammenfassend wurden deutliche Hinweise auf die Reaktivierung einer bereits fossil angelegten Rutschmasse gefunden, die sich durch die Erosion des Böschungsfußes bei dem Hochwasserereignis aus Juli 2021 wieder in Bewegung gesetzt hat.

Mit den ausgeführten Erkundungen und Messungen konnte eine anhaltende Bewegung des Hangs (Kriechen) über die letzten Jahre nachgewiesen werden. Über die ausgeführten Inklinometermessungen wurde die Gleitfläche der Rutschung eindeutig ermittelt. Die Rutschfläche reicht danach vom Böschungsfuß auf Höhe der Ahr bis auf den Höhenrücken ca. 70 m den Hang hinauf. Die Rutschung weist eine Breite von ca. 100 m auf.

Sowohl die Lage der Gleitfläche wie auch Hinweise auf den nachteiligen Einfluss von Schichtenwasser im Bereich der Gleitfläche wurden sowohl im Rahmen der Untersuchungen der Universität Bonn über Geoelektrik und Seismik wie auch durch die ausgeführten ingenieurgeologischen Berechnungen bestätigt. Es wurde dabei nachgewiesen, dass die Gleitfläche über den gesamten Hang nachverfolgt werden kann.

Aus den Berechnungen ergeben sich jedoch Hinweise auf einen zweigeteilten Rutschungskörper. Der untere Rutschungskörper weist eine Abrisskante auf Höhe des unteren Forstweges auf. Durch einen simulierten Abtrag der Ahrböschung am Böschungsfuß (infolge Erosion) konnte nachgewiesen werden, dass sich die Erosion des Böschungsfußes nachteilig auf die Gesamtstandsicherheit der Böschung auswirkt. Dies resultiert insbesondere aus dem Nachweis, dass sich die Böschung aufgrund der aus den Laborversuchen ermittelten Scherparametern in Verbindung mit der Böschungsgeometrie im geomechanischen Grenzgleichgewicht befindet. Schon kleine Änderungen im Wassergehalt in der Gleitfläche führen zu einer Beschleunigung der Rutschungsbewegung.

Ab einem Böschungsabtrag von ca. 25 m beschleunigt sich die Rutschung im ingenieurgeologischen Modell. Aufgrund der im Modell getroffenen Annahmen ist dieses Ergebnis so zu verstehen, dass die grundsätzliche Möglichkeit einer Beschleunigung der Rutschung bei fortschreitender Erosion des Böschungsfußes besteht. Aufgrund des dazu erforderlichen umfangreichen Massenabtrags können hier jedoch entgegenwirkende Maßnahmen ergriffen werden. Aus diesem Grund sollten die Monitoringmaßnahmen fortgeführt werden, diese sind auch für den Nachweis des Erfolgs einer etwaigen Sicherungsmaßnahme erforderlich.

In der abschließenden Variantenstudie wurden drei Maßnahmen vorgestellt, die indirekt über die Reduktion von Wasser in der Rutschmasse wie auch über die Erosionssicherung des Böschungsfußes geeignet sind, die Standsicherheit der Rutschung positiv zu beeinflussen.

Um die Standsicherheit des Kriech- bzw. Rutschhangs nachhaltig zu verbessern, wird das nachfolgend gestaffelte Vorgehen empfohlen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Maßnahmen sich zwar positiv auswirken, es jedoch nicht abschließend festzustellen ist, ob die Rutschung dadurch nachhaltig zum Erliegen kommt.

1. Fachplanung einer Sicherung des Böschungsfußes

Aufgrund des Nachweises, dass die Erosion des Böschungsfußes nachteilige Auswirkungen auf die Gesamtstandsicherheit des Rutschhangs hat, sollte auch hier die Planung sowohl geotechnisch wie auch wasserbautechnisch als fachübergreifende Planung fortgeführt werden. Ziel ist ein genehmigtes, ausführungsreifes Konzept zur Sicherung des Böschungsfußes.

2. *Monitoring der örtlichen Situation*

Da es sich bei der Reduktion des Wassers im Hang nur um eine indirekte Maßnahme handelt, wird aus gutachterlicher Sicht die Fortsetzung des geodätischen Monitorings empfohlen. Durch das Monitoring (Geodätische Messungen, ggf. GPS-Dauermessungen, automatische Messsysteme) kann der Erfolg z.B. der Wasserfassung in der Rutschung nachgewiesen werden. Es wird empfohlen, das bestehende Monitoring ggf. auszubauen und von einer Fachfirma für geotechnisches Monitoring und geodätische Messungen ein Monitoringkonzept für ein automatisches Monitoring erstellen zu lassen.


3. *Reduktion von Wasser im Rutschhang*

Entsprechend der Variante 1 wird empfohlen, den Einfluss von Wasser auf die Rutschungsbewegung zu kontrollieren bzw. das Wasser nach Möglichkeit aus dem Hang herauszuhalten. Es wird die Umsetzung zur Fassung der Niederschläge im Bereich der Rutschmasse und den darüberliegenden Flächen empfohlen.

Sollten abschließend die Entwässerung des Hanges wie auch die Sicherung des Böschungsfußes nicht ausreichen, die Rutschung maßgeblich positiv zu beeinflussen, werden weitere Maßnahmen wie ein an das Monitoring gekoppelter Alarmplan empfohlen.

Lünen, den 26.02.2026

TABERG Ingenieure GmbH



Dr.-Ing. R. Scherbeck

RocTec GmbH & Co. KG



Dr. rer. nat. Till Hellenkamp

