

Stockmann, Wiesner und Ernst:

Mehrstufige Erkundung und Untersuchung eines Böschungsgrundbruchs im Oberen Muschelkalk



Mehrstufige Erkundung und Untersuchung eines Böschungsgrundbruchs im Oberen Muschelkalk

Dipl.-Ing. Aiko Stockmann, Dipl.-Geol. Gerald Wiesner, Dipl.-Ing. Christian Ernst, Alle: witt & partner geoprojekt GmbH, Weimar



Der Beitrag dokumentiert die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Schadenserkundung eines großflächigen Böschungsgrundbruchs an einem neu hergestellten Autobahndamm. Zielstellung war neben der Feststellung der Schadensursache die Schaffung einer sicheren und hinreichend genauen Planungsgrundlage für die nachfolgende Sanierung. Es wird dargestellt, wie bewährte Untersuchungsmethoden Schritt für Schritt eingesetzt und kombiniert wurden, um die bestehenden Kenntnisdefizite zu beseitigen und die offenen Fragen mit angemessenem Aufwand sicher zu beantworten. Aus den Ergebnissen der durchgeführten Erkundungen und Untersuchungen wurde ein plausibles geologisch-geomechanisches Bruchkörpermodell erstellt. Anhand des Modells konnte belegt werden, dass eine unmittelbar unter der Dammflanke verlaufende Störungszone mit ungünstig einfallenden Schichten ursächlich für das Bruchversagen war. Weiterhin konnte die Sanierungsmaßnahme effizient geplant und Aussagen zur Standsicherheit der Randbereiche getroffen werden.



Multistage exploration and investigation of an extensive slope collapse in the Upper Muschelkalk: *The investigation procedure and results of a slope collapse of a newly constructed highway embankment are described in this paper. In addition to determination of the cause of collapse, a further objective was to provide a safe and sufficiently detailed planning basis for the subsequent reconstruction of the embankment. It will be demonstrated how common geotechnical investigation methods were used step by step and combined with each other to resolve existing knowledge deficits and to answer the outstanding questions reliably with reasonable effort. As a result of the conducted explorations and investigations a plausible geological and geomechanical failure model was developed. By using this model a geological fault-zone with an adverse strata dip just below the edge of the embankment flank was established as the reason for the failure. Consequently the reconstruction measure could be designed efficiently and conclusions concerning the stability of the embankment edge drawn.*

Anfang Juli 2010 ereignete sich in einem Neubauabschnitt der BAB A4 (Abschnitt AS Magdala – AS Jena Göschwitz) ein großflächiger Bruch einer neu hergestellten Dammböschung. Im Bild 1 ist die Lage des Schadensbereichs im betreffenden Trassenabschnitt markiert.

Die Neubaustrecke verläuft im Schadensbereich entlang einem mit etwa 5° flach nach Nordost ge-

neigten Hang. Im Bild 2 ist der Dammquerschnitt mit den wesentlichen geometrischen Angaben dargestellt. Danach besitzt die Böschung eine Neigung von 1 : 1,8 bei einer Gesamthöhe von rund 20 m vom Böschungsfuß bis zur Oberkante des neben der Fahrbahn angeordneten Lärmschutzwalls.

Der Damm war zum Zeitpunkt des Bruchs bereits etwa ein halbes Jahr annähernd im Sollprofil fertiggestellt und wurde als Baustraße für Erdstofftransporte genutzt. Da im unmittelbaren Bruchbereich keine Bautätigkeit stattfand, lagen zum genauen Eintrittszeitpunkt und zur zeitlichen Entwicklung des Bruchs keine Kenntnisse vor.

Für die geotechnische Baubegleitung der Bauherrin, der DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin, bestand die vordringliche Aufgabe darin, Sofortmaßnahmen festzulegen und anschließend die Schadensursache zu untersuchen. Im Rahmen der Erkundung der Schadensursache waren unter anderem Fragen hinsichtlich der Verantwortlichkeit sowie der Abgrenzung des potenziellen Gefährdungsbereichs zu beantworten und weiterhin die geotechnischen Planungsgrundlagen für die abschließende Sanierung zu schaffen. Für diese komplexe Aufgabenstellung war es zweckmäßig, die Bearbeitung und Untersuchung schrittweise vorzunehmen.

Schadensbild

Das im Bild 3 enthaltene Schadensbild mit Blick von der Böschungsschulter zeigt die für viele Böschungsbrüche typischen Erscheinungen, wie eine steile

Bild 1. Lageplanauszug Neubauabschnitt BAB A4, VKE 5531, mit Kennzeichnung des Schadensbereichs.



Abrisskante mit dezimeterbreiten und metertiefen Zugrissen. Das Bruchbild erstreckte sich über etwa 150 m Länge, wobei die Längsrisse spitzwinklig zur Trasse verliefen und bis etwa 10 m hinter die Böschungsschulter reichten.

Am Böschungsfuß und im Vorland war das Schadensbild eher untypisch (Bild 4). Es zeigten sich nur geringe Aufwölbungen, keine Bruchmassen, jedoch eine Wulstbildung und Überschiebung des Oberbodens bis 35 m vor dem Böschungsfuß (Bild 5).

Ausgehend vom Schadensbild konnte mit hoher Wahrscheinlichkeit von einem Böschungsgrundbruch, also einem Verlauf der Gleitfläche unterhalb des Böschungsfußes, und damit von einem Versagen des Damuntergrunds ausgegangen werden. Ein unmittelbar am Böschungsfuß hergestellter Baggerschurf ermöglichte eine erste Einschätzung der Baugrundverhältnisse, lieferte jedoch keine Hinweise auf das Vorhandensein einer potenziellen Gleitfläche.

Sofortmaßnahmen

Unmittelbar nach der Feststellung und Erstbegutachtung des Schadens waren Maßnahmen zur Abwendung einer Gefährdung und zur Sicherung des Schadensbereichs vorzusehen. In Abstimmung mit der Bauüberwachung und dem Bauherrn wurden folgende Maßnahmen angeordnet:

- ➔ Absperrung: Mittels Bauzaun wurde der Schadensbereich bei einem Mindestabstand von 10 m zwischen Baustraßen und vorhandenen Rissen abgesperrt.
- ➔ Anlegen von Gräben: Zur Vermeidung des Zufließens von Oberflächenwasser aus dem Planumbereich wurden Entwässerungsgräben angelegt.
- ➔ Teilabtrag von Massen: Zur Entlastung der Böschung, zur Minderung der progressiven Bruchentwicklung und in Vorbereitung der Erkundungsarbeiten wurden rund 2.000 m³ Bruchmassen an der Böschungsschulter abgetragen und am Böschungsfuß angeschüttet.

Schadensuntersuchung

Grundlagenermittlung und Erkundung

Im ersten Schritt zur Untersuchung der Schadensursachen wurden im Sinne einer Grundlagenermittlung vorhandene Unterlagen zur Baugrundsituation und der Baudokumentation recherchiert und hinsichtlich der Aufgabenstellung geprüft sowie eine Bestandsvermessung des Schadensbereichs vorgenommen.

Auf der Grundlage der Bestandsvermessung wurde ein Erkundungskonzept aufgestellt (Bild 6). Danach wurden acht Bohrungen sowie ein Baggerschurf geplant, wobei der Schwerpunkt im Wesentlichen zunächst auf der Erkundung des zentralen Bruchbereichs lag. Jede Bohrung wurde mit einer schweren Rammsondierung ergänzt, um die Lagerungsverhältnisse beziehungsweise Steifigkeiten besser einschätzen zu können. Zur

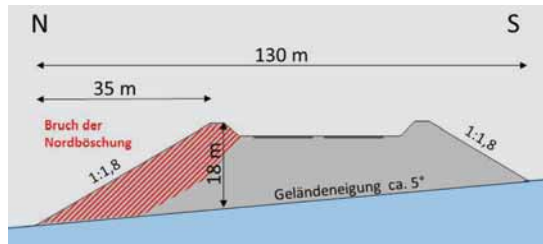


Bild 2. Schematische Darstellung des Dammquerschnitts mit Kennzeichnung des Bruchbereichs.



Bild 3. Schadensbild mit Blick von der Böschungsschulter in Richtung Ost.



Bild 4. Schadensbild am Böschungsfuß mit Blickrichtung West.



Bild 5. Wulstbildung und Überschiebung im Vorland der Böschung.

Klassifizierung des Dammschüttmaterials und des Baugrunds wurden Probenahmen und bodenmechanische Laborversuche geplant.

Stockmann, Wiesner und Ernst:

Mehrstufige Erkundung und Untersuchung eines Böschungsgrundbruchs im Oberen Muschelkalk

Weiterhin wurden im Schadensbereich und außerhalb rasterförmig Messmarken zur Durchführung eines Verformungsmonitorings hergestellt. Im Zuge der Erkundung wurde zusätzlich der Ausbau einer Bohrung zu einer Grundwassermessstelle

sowie einer weiteren Bohrung zu einem Vertikal-inklinator veranlasst.

Zwischenergebnisse

Recherche der Baudokumentation und Baugrundverhältnisse

Die Herstellung der Dammaufstandsflächen und des Dammkörpers war in den Bauakten durch Abnahmeprotokolle sowie Qualitätsprüfungsprotokolle dokumentiert. Planungsgemäß wurde nach dem Abschieben des Oberbodens die Tragfähigkeit der Dammaufstandsfläche beurteilt und anschließend mit der Dammschüttung begonnen. Im Schadensbereich wurde der Damm auf den zersetzten bis entfestigten Gesteinen des Oberen Muschelkalks (Mergelsteinersatz mit Kalksteinbrocken) beziehungsweise Hangschutt gegründet, wobei auf eine Bindemittelverbesserung der Dammaufstandsflächen aufgrund der vergleichsweise guten Tragfähigkeit verzichtet wurde. Die Dammschüttung wurde ZTVE-gerecht aus dem im Trassenbereich anfallenden Aushubmaterial, vorwiegend bestehend aus gemischtkörnigen bis bindigen Böden und zerkleinertem, veränderlich festem Triasgestein, hergestellt [1]. Aus der Baudokumentation ließen sich also keine Rückschlüsse auf bautechnisch bedingte Schadensursachen schließen.

Die im Rahmen der Streckenerkundung [2] in der Nähe des Schadensbereichs abgeteufte Bohrungen wiesen recht einheitliche Baugrundverhältnisse mit vergleichsweise guten Tragfähigkeiten aus. Danach stehen unter einer geringen Lockergesteinsbedeckung Festgesteine des Oberen Muschelkalks an. In den Schichtenverzeichnissen ist eine schiefe Lagerung der Festgesteine ausgewiesen. Die vorhandenen Erkundungsergebnisse ergaben also keine Hinweise auf baugrundbedingte Schadensursachen.

Aus der Recherche der regionalgeologischen Verhältnisse ergaben sich Indizien für eine gestörte Lagerung der anstehenden Festgesteine. Bild 7 zeigt, dass trassennah die Störungszone des Magdalaer Grabens verläuft, die von herzynisch (NW-SO), annähernd parallel zur Trasse streichenden Hauptstörungen begrenzt wird. In unmittelbarer Nähe des Schadensbereichs sind ausstreichende Leitbänke (moCC, moCG) des Oberen Muschelkalks mit lokal gemessenen Einfallswinkeln von 8 beziehungsweise 25° und einer Einfallrichtung etwa rechtwinklig zur Trasse dokumentiert. Daraus folgt, dass die Baugrundverhältnisse lokal stark gestört sein können. Eine baugrundbedingte Schadensursache wäre plausibel.

Baugrunderkundung

Im Bild 8 ist ein schematisches Bohrprofil des Schadensbereichs am Böschungsfuß dargestellt. In allen Bohrungen innerhalb des Schadensbereichs wurde in Tiefen zwischen 3 bis 8 m unter GOK eine markante Kalksteinbank (moCG-Glaukonitbank) erbohrt, die mit 20 bis 25° flach einfällt, wie das Kernfoto im Bild 9 zeigt. Durch Parallelisierung der Bohrergebnisse wurde festgestellt, dass die



Bild 6. Lageplan des Schadensbereichs mit Aufschlusspunkten und Messmarken.

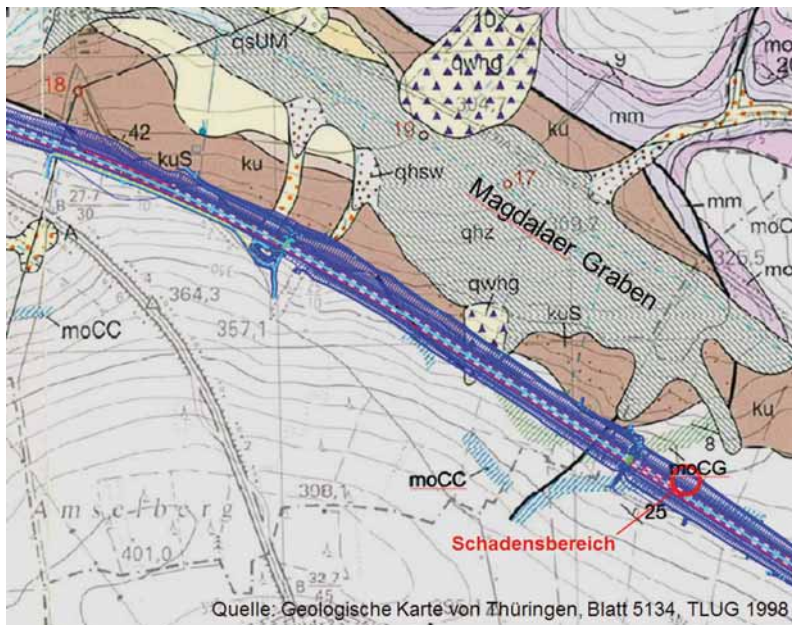
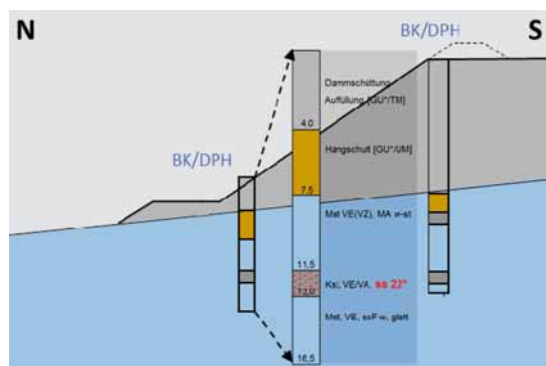


Bild 7. Lageplanauszug mit hinterlegter geologischer Karte [3, 4].

Bild 8. Schnitt und exemplarisches Bohrprofil (schematisch).



Einfallrichtung der Bank annähernd der Böschungfallrichtung entspricht.

Der Zustand der Dammschüttung und der Lockergesteinsüberdeckung entsprach mit einem vorwiegend bindigen Charakter und steifer Konsistenz den Erwartungen und war damit eher unauffällig. In Verbindung mit den Sondiererergebnissen konnte der Verlauf der Gleitfläche innerhalb des Damms anhand lokaler Auflockerungszonen nachgewiesen werden.

Die Bohrergebnisse belegen somit das Vorhandensein einer Kalksteinbank als potenzielle Gleitzone im Untergrund des Schadensbereichs. Das exakte Niveau der Gleitfläche war nicht eindeutig festzustellen.

Verformungsmonitoring

Die rasterförmig über den Schadensbereich angelegten Messmarken wurden regelmäßig, während der Erkundungsphase zweimal wöchentlich, geodätisch eingemessen. Anhand der Messergebnisse konnten die Verformungsbeträge, -richtung und -geschwindigkeit ermittelt werden.

Im Bild 10 ist der Verformungsverlauf der Messpunkte eines Böschungsquerschnitts innerhalb der ersten zwei Monate nach Beginn des Monitorings dargestellt. Unmittelbar nach der Massenumlagerung zur Entlastung der Böschung kamen die Bewegungen zunächst zum Stillstand. Nach etwa sechs Wochen setzten die Bewegungen, vermutlich ausgelöst durch die in diesem Zeitraum aufgetretenen Starkniederschläge (monatliche Niederschlagsmenge 170 mm), wieder ein und verdeutlichten das sich progressiv fortsetzende Bruchverhalten der Böschung. In Trassenlängsrichtung ergab sich keine Änderung der Bruchkörpergeometrie.

Bild 10. Ergebnisse der geodätischen Kontrollmessungen.

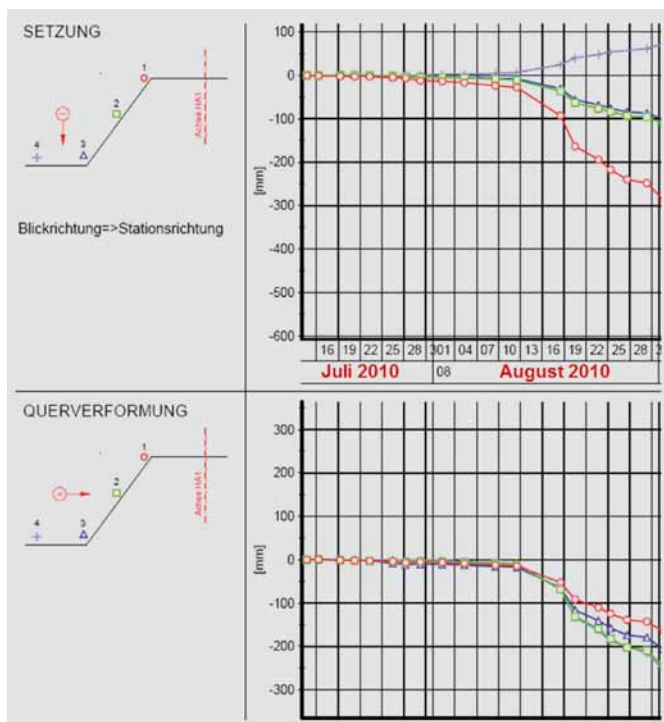


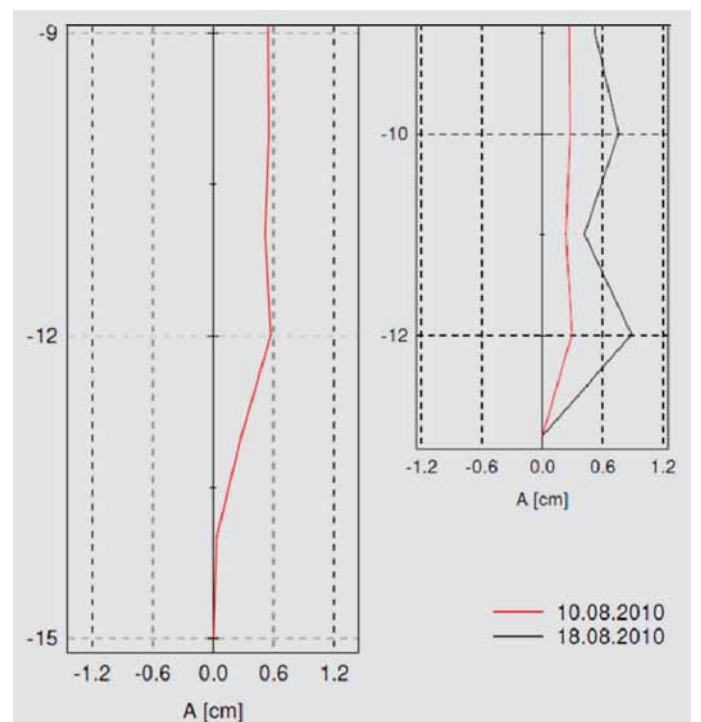
Bild 9. Kernfoto: Mergelstein mit Kalksteinbank (moCG), flach geneigt.

Mithilfe des geodätischen Messmonitorings waren die räumliche und zeitliche Erfassung der Bruchkörperbewegung und damit auch die Abgrenzung des aktiven Bruchbereichs möglich. Mithilfe der Verformungsvektoren konnte das geomechanische Bruchmodell verifiziert werden.

Analog zu den geodätischen Kontrollmessungen wurde das am Böschungsfuß hergestellte Vertikalinklinometer regelmäßig gemessen. Im Bild 11 sind die Ergebnisse der Messungen Mitte August 2010 – zum Zeitpunkt der Fortsetzung der Hangbewegungen – dargestellt.

Die Messung vom 10.08.2010 bestätigte, dass der Bruchkörper bis in das Niveau der Kalksteinbank bei 12 bis 13 m unter GOK reicht. Bei der Folgemessung vom 18.08.2010 war das Inklinometerrohr in einer Tiefe von 13 m abgeschert. Daraus war zu

Bild 11. Ergebnisse der Inklinometermessung am Böschungsfuß.



Stockmann, Wiesner und Ernst:

Mehrstufige Erkundung und Untersuchung eines Böschungsgrundbruchs im Oberen Muschelkalk

schlussfolgern, dass die Gleitfläche entgegen der ursprünglichen Vermutung unmittelbar unterhalb der markanten Kalksteinbank (moCG) liegt. Die Lage der Gleitfläche als eine entscheidende Unbekannte des geomechanischen Modells wurde also identifiziert.

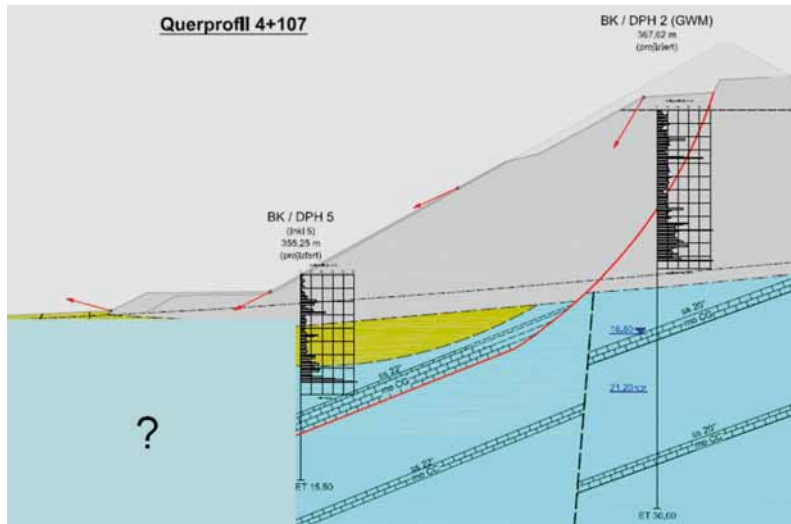


Bild 12. Bruchkörpermodell – Zwischenzustand.

Rot: Lage der Gleitfläche und Verformungsvektoren.

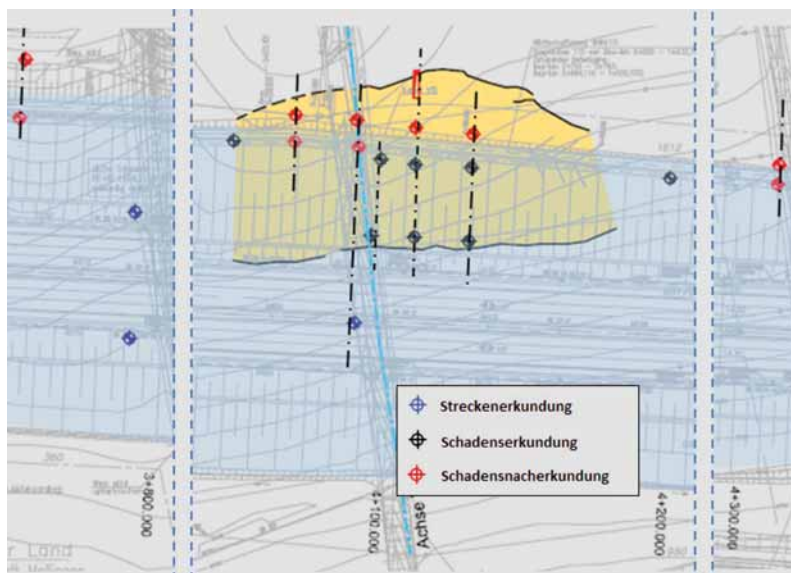
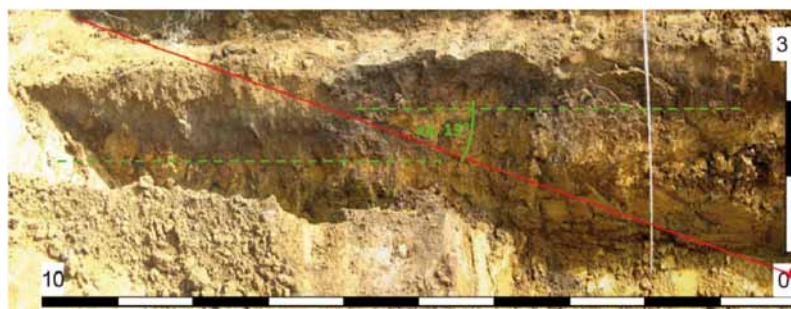


Bild 13. Lageplan der Nacherkundung.

Bild 14. Schurf im Austrittsbereich der Gleitfläche.



Bruchkörpermodell und Kenntnisdefizite

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen konnte das geologisch-geomechanische Bruchkörpermodell schon recht plausibel nachgebildet werden (Bild 12). Die Gleitfläche und die Verformungsvektoren sind rot dargestellt.

Kenntnisdefizite bestanden noch hinsichtlich des Verlaufs der Gleitfläche vor dem Böschungsfuß und der Abgrenzung des potenziell bruchgefährdeten Bereichs in Trassenlängsrichtung. Zur Beantwortung dieser offenen Fragen waren ergänzende Erkundungsmaßnahmen sowie die Erstellung und Verifizierung eines Berechnungsmodells notwendig.

Ergänzende Erkundungsmaßnahmen

Zur Detailerkundung sowie zur Abgrenzung des Schadensbereichs wurden Bohrungen sowie ein Schurf an der Bruchfront gemäß Bild 13 durchgeführt. Eine dieser Bohrungen vor dem Böschungsfuß wurde zur Verifizierung des vorläufigen Bruchkörpermodells als Inclinometer ausgebaut.

In dem Schurf konnte der Verlauf der Gleitfläche im oberflächennahen Bereich vor dem Böschungsfuß erfasst werden (Bild 14). Danach taucht die Gleitfläche annähernd linear mit einem Winkel von 15° ab. Kalksteinstücke und -platten deuteten auf das Vorhandensein der Kalksteinbank (moCG) etwa ab 3 m unter GOK.

Mit diesen Feststellungen sowie anhand der Ergebnisse der ergänzenden Bohrungen und der Inclinometermessungen wurde das Bruchkörpermodell entsprechend Bild 15 vervollständigt. Es fügt sich zu einem Bruchbild, das maßgeblich durch die an eine am Böschungsfuß verlaufende Störung gebundene, gegeneinander gerichtete Verkippung der Schichten bestimmt wird.

Die spezielle Lage und Ausbildung dieser Schichten führen zu einer Verringerung der Tragfähigkeit, insbesondere in dem von Schubkräften beanspruchten Bereich des Böschungsfußes.

Durch die Auswertung der zusätzlich erkundeten Querschnitte konnte die räumliche Orientierung der für das Bruchkörpermodell maßgebenden Störung ermittelt werden (Bild 16). Die Störung verläuft analog zum Rissbild spitzwinklig zur Böschung, wobei der Schnittpunkt zwischen Böschungsfuß und Störung etwa im Zentrum des Bruchs liegt. In den erkundeten Querschnitten außerhalb des Schadensbereichs wurde eine sölige Lagerung der Festgesteine festgestellt und damit weitgehend ausgeschlossen, dass in der näheren Umgebung vergleichbare ungünstige Baugrundverhältnisse vorhanden sind.

Rückrechnung des Bruchzustands

Auf Basis des Bruchkörpermodells wurde der Versagenszustand numerisch nachgebildet und der Bruch im Grenzzustand untersucht (Bild 17). Im Ergebnis wurde für den zentralen Querschnitt eine effektive Bruchscherfestigkeit mit einem Reibungswinkel von 17° ermittelt, die für das tonig-merglige Zersatzmaterial in der Gleitfläche als plausibel anzusehen war.

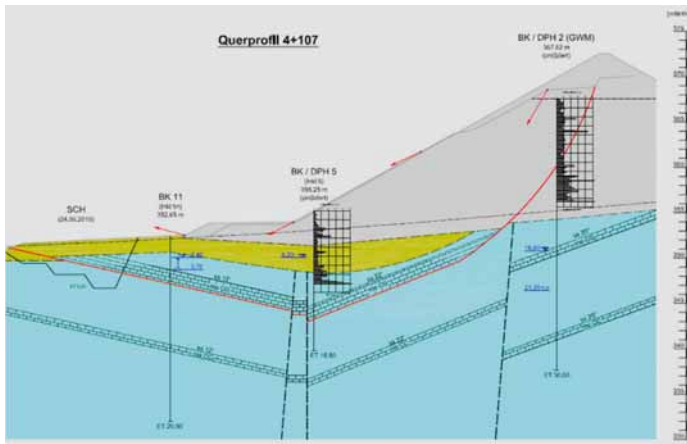


Bild 15. Vervollständigtes Bruchkörpermodell.

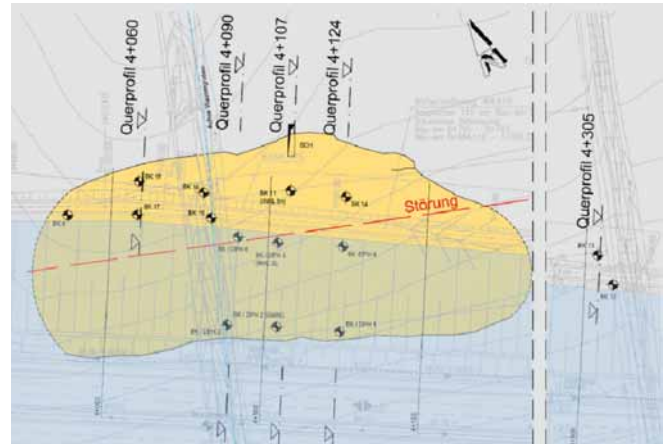


Bild 16. Lageplan mit Verlauf der maßgebenden Störung.

Bei der Berechnung weiterer Querschnitte konnte nachgewiesen werden, dass mit der veränderten Lage der Störung im Randbereich des Böschungsgrundbruchs die Standsicherheit zunimmt und außerhalb des Bruchkörpers kein Standsicherheitsdefizit mehr besteht.

Zusammenfassung und Fazit

Mit den Untersuchungs- und Berechnungsergebnissen konnten die Ursachen des Böschungsversagens festgestellt, das Baugrundrisiko realistisch beurteilt und eine hinreichend genaue Planungsgrundlage vorgelegt werden. Damit war die Voraussetzung für eine sichere und wirtschaftliche Sanierung geschaffen.

Die Lösung der vergleichsweise komplexen Aufgabenstellung konnte im vorliegenden Fall dadurch erreicht werden, dass bewährte Untersuchungsmethoden schrittweise eingesetzt und miteinander kombiniert wurden. Die Zwischenergebnisse wurden jeweils auf Plausibilität geprüft und die möglichen Szenarien betrachtet. Der Kenntnisstand konnte in interdisziplinärer Zusammenarbeit vervollständigt und offene Fragen schrittweise beantwortet werden. Die kooperative Zusammenarbeit mit dem Bauherrn und dessen Akzeptanz dieser Vorgehensweise waren ebenfalls wichtig für den erfolgreichen Abschluss der Untersuchungen und der anschließenden Sanierung.

Quellennachweis

- [1] FGSV: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. ZTVE-StB09.
- [2] WBI: BAB A4 Eisenach-Görlitz Verkehrseinheit AS Magdala-AS Jena/Göschwitz (VKE 5531) – Geotechnisches Gutachten freie Strecke West, Bau-km 0+000 bis Bau-km 7+465 (westlich des Jagdbergtunnels). (2006).
- [3] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: ATKIS Kartenmaterial 2010. Amtliches Topographisches Informationssystem.
- [4] Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie: Geologische Karte von Thüringen. Blatt 5134, (1998).

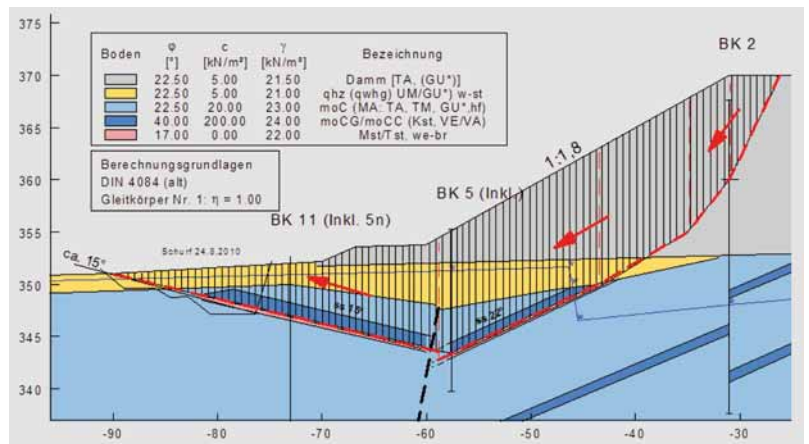


Bild 17. Berechnungsquerschnitt im zentralen Bruchbereich.