Geokinematische Abläufe bei der Verflüssigung von Tagebaukippen

Manfred Wittig

BIUG Beratende Ingenieure für Umweltgeotechnik und Grundbau Freiberg

ZUSAMMENFASSUNG:

Auf den Innenkippen nehmen mit dem Anstieg des Grundwassers die Zahl der Verflüssigungsereignisse und auch die Größe der verflüssigten Bereiche zu. Besonders davon betroffen ist der sogenannte Nordraum der Lausitz südlich von Lübbenau. Dort wurden deshalb Böschungskonturen vor und nach den Verflüssigungsereignissen über Jahre systematisch erfasst. Die erfassten Konturen wurden geokinematisch analysiert, um charakteristische Bewegungsmuster erkennen und beschreiben zu können. Das Ergebnis ermöglicht eine neue Klassifizierung der auf Innenkippen auftretenden Verformungsvorgänge. Darauf aufbauend, entstand eine neue Methodik zur Berechnung der Standsicherheit verflüssigungsgefährdeter Innenkippenflächen deren Basis die Theorien des Erddrucks und Hydromechanik sind. Für den Nachweis des horizontalen Gleichgewichts einer Böschung wird ein Kräfte-, für das der vertikalen, ein Momentenvergleich hergeleitet. Mit einem hydromechanischen Ansatz ist es auch möglich, zusätzlich die Endgeometrie der sich nach der Verflüssigung einstellenden Böschung zu berechnen. Die Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen und der geometrischen Endkonturen zeigen überraschende Übereinstimmungen mit den erfassten gegangenen Böschungsbewegungen.

1 Geländebruchereignisse auf Innenkippen

Auf den Innenkippen der Lausitz sind in der Folge des Grundwasserwiederanstiegs in verflüssigungsfähigen Kippenbereichen Instabilitäten, verbunden mit unterschiedlichen Horizontal- und Vertikaldeformationen festzustellen.

Die Anzahl der Geländebrüche ist offensichtlich mit den durch den Grundwasserwiederanstieg entstandenen oberflächennahen Grundwasserflurabständen verbunden.

Die Anzahl der Böschungsbrüche ist regional unterschiedlich. Innenkippen mit ähnlicher Geometrie des Geländes und hydrogeologischen Bedingungen können regional in unterschiedlicher Weise gefährdet sein. Die unterschiedlich hohe Gefährdung ist wahrscheinlich auf veränderte Materialzusammensetzungen bzw. technologische Ablagerungsbedingungen zurückzuführen.

Durch die eingetretenen Ereignisse sind die Innenkippen mit besonders verflüssigungsgefährdeten Materialien (BIUG GmbH, 2015) bekannt.

Warum ist die Ursache für ein Verflüssigungsereignis in den meisten Fällen nicht eindeutig zu ermitteln?

Ein Verflüssigungsvorgang auf Kippen, wenn er nicht gezielt z. B. durch eine Sprengung oder eine zu schnelle Belastung eines verflüssigungsgefährdeten Untergrundes z. B. eine Auffüllung des Geländes ausgelöst wurde, lässt sich offensichtlich bis heute weder hinsichtlich seiner Erscheinungsform, seiner Größe, seines Beginns, oder auch seines zeitlichen Ablaufs voraussagen.

Bei den gegangenen Ereignissen wird vermutet, dass Verflüssigungsvorgänge durch verschiedene Anregungen, wie Wind, Regen, Frost, seismische Ereignisse, Bohrarbeiten, dynamische Ereignisse, Zusammengehen von technologisch entstandenen Hohlräumen, evtl. auch Sackungen oder auch andere unbekannte Ursachen ausgelöst werden können.

Auf Grund der Vielzahl und der Beliebigkeit der bisher genannten auslösenden Faktoren ist es deshalb auch kaum möglich, einen Verflüssigungsvorgang vorherzusagen. Schwierig ist es dadurch auch, Verhaltensanforderungen für die Nutzung potentiell betroffener Flächen zu erarbeiten, um Verflüssigungsvorgänge auf Innenkippen durch die dort vorgesehene Nutzung zu verhindern.

Ist eine Verflüssigung nicht zuverlässig auszuschließen, ist in den als verflüssigungsgefährdet erkannten Kippen in der Standsicherheitsberechnung immer auch davon auszugehen.

In dieser Ausarbeitung werden deshalb dokumentierten Bewegungsvorgänge auf Innenkippen geokinematisch analysiert und versucht, Berechnungsmodelle daraus zu entwickeln.

2 Erscheinungsformen der Instabilitäten von Böschungen im Bereich von Innenkippen auf der Basis der ermittelten Geometrien

Die Anzahl und auch Größe der Geländebrüche hat mit dem Grundwasserwiederanstieg in den letzten Jahren zugenommen. Für den Nordraum der Lausitz wurden die in den Jahren 2012/2013 aufgetretenen Ereignisse in einer Zusammenstellung (Weißbach, et al., 2014) dokumentiert.

In der Zusammenstellung aller Böschungsbewegungen dieser Bearbeitung wurden drei Typen unterschieden:

Typ 1	keine Horizontalverformung
Typ 2a	mit Horizontalverformung, korrekte Massenbilanz
Typ 2b	mit Horizontalverformung, verfälschte Massenbilanz

Der Begriff „korrekte Massenbilanz“ umfasst dabei alle horizontalen Böschungsbewegungen ohne Massenübertritt in Nebenbereiche.

Betrachtet man die Böschungsgeometrien der Innenkippen vor und nach einer Verflüssigung mittels der Geokinematik rein geometrisch und nutzt dazu die Zusammenstellung der von (Weißbach, et al., 2014) erfassten Geometrien, sind daraus vier unterschiedliche Bewegungsformen (Wittig, 2015) ableitbar:

- Kategorie 1 Horizontale Bewegungen Verschiebung der Böschung, verbunden mit dem schnellen Ausfließen großer Materialmengen, großen Geländeverschiebungen und damit verbundenen Vertikaldeformationen.
- Kategorie 2a Horizontale Bewegungen Verschiebung der Böschung, verbunden mit dem schnellen Ausfließen großer Materialmengen, großen Geländeverschiebungen und damit verbundenen Vertikaldeformationen.– Vertikale Bewegungen, ohne oder mit geringen horizontalen Deformationen <2m, verbunden mit Absenkungen am Böschungskopf und Hebungen am Böschungsfuß, also Ausgleich der Neigung des Ausgangsgeländes, allerdings kaum Austritt von Material und nur eine begrenzten Menge von Wasser aus den entstandenen Rissen am Fußende der Böschung
- Kategorie 2b – Vertikale Bewegungen, zu Beginn der Böschungsverformung ohne oder mit geringen horizontalen Deformationen analog zu 2a, in deren Folge können dann aber noch größere Horizontalbewegungen auftreten und in deren Folge noch begrenzten Mengen von Wasser und Material am Fußende der Böschung aus den Rissen und Strudellöchern austreten.
- Kategorie 3 – Lokal auftretende vertikale Einbrüche im Gelände. Verglichen mit den Bewegungsformen 1 und 2 sind sie von vergleichsweise geringer Größe, sie sind wahrscheinlich Nachbrüche in Hohlräume, die als Folge einer nicht erkannten, an der Oberfläche u.U. nicht sichtbar gewordenen Verflüssigung durch die Verfestigung des Materials darunter gebildet haben.

Die vier geokinematisch abgeleiteten Kategorien bzw. Bewegungsformen 1, 2a und 3 repräsentieren offensichtlich drei unterschiedliche Versagensmechanismen, d.h. für die Standsicherheitsberechnung sind verschiedene Modelle zu prüfen. Die Bewegungsform 2b ist eine Mischform aus 2 und 1, die sich aus der Veränderung der Geometrie während der Verflüssigung ergibt.

3 Bruch-und Verformungsvorgänge auf Innenkippen infolge Verflüssigung und Berechnung der Standsicherheit im Vor- und Nachbruchzustand

In der Abbildung 1 ist eine einfache Böschung dargestellt. Vor dem Eintreten einer Verflüssigung kann man die Sicherheit der sich einstellenden Bruchmechanismen mit den üblichen Verfahren der Bodenmechanik berechnen.

Findet unterhalb der Sickerlinie in der Kippe eine Verflüssigung statt ist dies nicht mehr so. Durch die Verflüssigung entsteht ein Zweischichtsystem. Oberhalb der vorhandenen Grundwasseroberfläche befindet sich der erdfeuchte Boden in einem Zustand der bodenmechanisch betrachtet werden kann. Das darunter verflüssigte Material, kann je nach Verflüssigungsgrad wie eine Flüssigkeit mit unterschiedlicher Viskosität angesehen werden.

Solange die erdfeuchte Überdeckung an keiner Stelle bricht, ist das System „erdfeuchte Überdeckung und verflüssigte Kippe“ als geschlossenes System anzusehen. Die erdfeuchte Überdeckung kann nicht in der verflüssigten Kippe versinken, sondern schwimmt auf dieser auf.

In den verflüssigten Sanden verschwindet die Scherfestigkeit sofort vollständig oder vermindert sich auf eine nur noch geringe Restfestigkeit. Im verflüssigten Material findet nach der Verflüssigung (Wittig, 2015) eine gravitative Verfestigung statt. In deren Folge kann sich sogar eine Wasserlamelle auf Höhe der Grundwasseroberfläche bilden.

Durch die großen Scherfestigkeitsunterschiede ist zu erwarten, dass sich die untere Begrenzung eines erdfeuchten Bruchkörpers unmittelbar unterhalb der Grundwasseroberfläche im verflüssigten Material ausbildet. In dem verflüssigten Material ist die Ausbildung eines tiefer liegenden diskreten starren Bruchkörpers wie im naturfeuchten Material darüber nicht möglich.

Auf der Basis der oben dargelegten Bewegungsformen werden im Folgenden unter Beachtung der genannten Randbedingungen verschiedene Berechnungsmodelle entwickelt und die damit erhaltenen Ergebnisse diskutiert.

4 Modelle zur Berechnung der Standsicherheit

4.1 Horizontales Gleichgewicht einer Böschung nach der Verflüssigung und Auswahl des zutreffenden Bruchmechanismus (Kategorie 1)

Durch die oben vorgestellten Überlegungen entsteht der in der Abbildung 1 dargestellte einfache Bruchmechanismus.

Zur Berechnung des horizontalen Gleichgewichts an diesem potentiellen Bruchkörper wird die konventionelle Erddrucktheorie nach COULOMB / RANKINE (Förster, 1998), (Das, 2012) verwendet. (Wittig, 2015) nimmt gesichert an, dass sich unmittelbar unter der Sickerlinie eine vorgegebene Gleitfläche ohne oder mit deutlich verminderter Scherfestigkeit als untere Begrenzung des Bruchkörpers ausbildet. Zur Berechnung kann dann ein Verfahren ähnlich dem Blockverfahren herangezogen werden. Das Blockverfahren ist in (Förster, 1998) ab Seite 307 ff. detailliert dargestellt.

Durch die vorliegende Randbedingung einer vorgegebenen Gleitfläche unmittelbar unterhalb der Sickerlinie vereinfachen sich die Gleichgewichtsbedingungen.

Im geneigten oberen Teil der Böschung wird im erdfeuchten Bereich durch die mögliche Verschiebung die dort vorhandene Scherfestigkeit vollständig mobilisiert und es wirkt der aktive Erddruck.

Am Böschungsfuß wird in der erdfeuchten Überdeckung ein Widerstand gegen die Bewegung mobilisiert, der passiven Erddruck.

Für den Bruchkörper über dem vollständig verflüssigten Teil der Kippe wird angenommen, dass beide Erddruckkomponenten vollständig mobilisiert sind und horizontal wirken.

Im Falle einer Verflüssigung im gesättigten Bodenkörper verschwindet die Scherfestigkeit an der unteren Begrenzung des Bruchkörpers. Die Standsicherheit der Böschung ist dann allein durch das Gleichgewicht zwischen dem aktiven und passiven Erddruck bestimmt.

Wird die Gleichgewichtsbedingung für das horizontale Gleichgewicht verletzt, kann dann in der erdfeuchten Überdeckung eine horizontale Böschungsbewegung auftreten. Diese wird so lange andauern, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem aktiven und passiven Erddruck eingestellt hat.

Ist die Sickerlinie geneigt, ist in der Gleichgewichtsbedingung zusätzlich eine Hangabtriebskraft zu berücksichtigen.

Existiert in den verflüssigten Materialien des Bruchkörpers eine Restscherfestigkeit (Viskosität), ist diese ebenfalls in die Gleichgewichtsbedingung einzuführen.

4.1.1 Horizontale Gleichgewichtsbedingung eines blockförmigen Bruchkörpers nach einer Verflüssigung bei ebener Grundwasseroberfläche (Kategorie 1)

Für den in Bild 1 definierten Gleitkörper gelten zur Berechnung des Kräftegleichgewichtes folgende Randbedingungen:

- hinter dem Böschungskopf wirkt der aktive Erddruck Ea,
- vor dem Böschungsfuß wirkt der passive Erddruck Ep,
- entlang der Bruchfläche, d.h. unmittelbar unterhalb der Sickerlinie ist der Verlust der wirksamen bzw. totalen Scherfestigkeit ($\varphi'=0$, $\varphi=0$) eingetreten,
- die Erddruckkräfte wirken horizontal,
- ebene Grundwasseroberfläche.

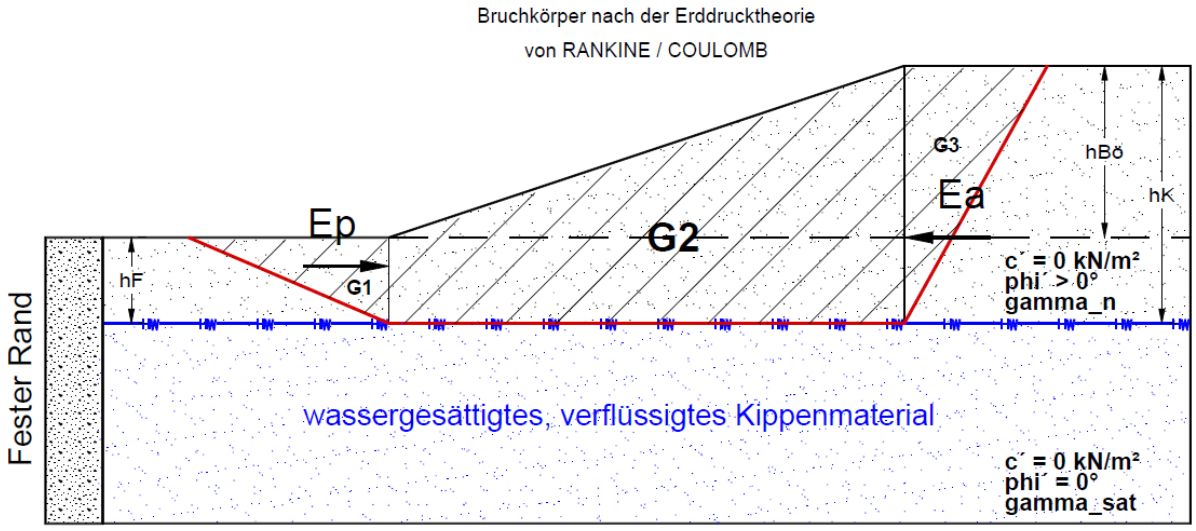

Abb. 1: Ausbildung eines blockförmigen Bruchkörpers oberhalb einer horizontal verlaufenden Grundwasseroberfläche - Erddrucktheorie von RANKINE / COULOMB

Für diesen Bruchkörper errechnen sich die entsprechenden Koeffizienten des aktiven und passiven Erddrucks nach RANKINE / COULOMB mit:

$$K_a = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad K_p = \frac{1+\sin\varphi'}{1-\sin\varphi'} \qquad \textit{1}$$

Bei einer Verflüssigung besitzt die Kippe unterhalb der Grundwasseroberfläche u.U. keine Reibung mehr. Ist das so, dann wirken auf den Böschungskörper der aktive Erddruck als treibende Kraft am Böschungskopf nur noch und der Erdwiderstand als einzige widerstehende Kraft am Böschungsfuß.

Die Erddrücke errechnen sich für den aktiven Erddruck als treibende Kraft

$$E_a = \frac{\gamma_k \cdot h_K{}^2}{2} \cdot K_a \qquad \textit{2}$$

und den passiven Erddruck als widerstehende Kraft

$$E_p = \frac{\gamma_k \cdot h_F{}^2}{2} \cdot K_p \qquad \textit{3}$$

γ_k - Wichte der naturfeuchten Kippe

h_F - Grundwasserflurabstand am Böschungsfuß

h_K - Grundwasserflurabstand am Böschungskopf

Für das Gleichgewicht zwischen beiden Kräften, also einen Sicherheitsfaktor=1, gilt E_a=E_p und der Sicherheitsfaktor berechnet sich aus

$$Si = \frac{E_p}{E_a} = \frac{1/2 \cdot K_p \cdot h_F{}^2 \cdot \gamma_k}{1/2 \cdot K_a \cdot h_K{}^2 \cdot \gamma_k} \qquad 4$$

Die Wichte kürzt sich aus der Gleichung und man erhält

$$Si = \frac{K_p \cdot h_F{}^2}{K_a \cdot h_K{}^2} \qquad 5$$

Löst man diese Gleichung nach dem Grundwasserflurabstand am Böschungsfuß hF auf, ergibt sich ein notwendiger Grundwasserflurabstand am Böschungsfuß

$$h_F = \sqrt{\frac{K_a \cdot h_K{}^2 \cdot S_{fNiveau}}{K_p}} = h_K \cdot \sqrt{\frac{K_a}{K_p}} \cdot \sqrt{S_{fNiveau}} \qquad 6$$

$S_{fNiveau}$ – für die Bearbeitung gewähltes Sicherheitsniveau

In der abgeleiteten Beziehung sind weder die Wichte des naturfeuchten Kippenmaterials und noch die Neigung der Böschung enthalten. Beide haben bei vollständigem Scherfestigkeitsverlust der wassergesättigten Kippe und ebener horizontaler Grundwasseroberfläche offensichtlich keinen Einfluss auf die Standsicherheit.

Für einen Reibungswinkel des erdfeuchten Kippenmaterials von φ´=30 Grad und gewählte Sicherheitsfaktoren von S_fNiveau=1 und S_fNiveau=1,4 ergeben sich die Höhenverhältnisse

$$h_F = 0.333 \cdot h_K \text{ bzw. } h_F = 0.394 \cdot h_K \qquad 7$$

Bei einem Grundwasserflurabstand am Böschungsfuß der einem Drittel des Grundwasserstandes am Böschungskopf entspricht, steht die Böschung im Grenzgleichgewicht. Die Böschung ist bei einer Verflüssigung des wassergesättigten Materials

$$h_F > 0.333 \cdot h_K \qquad 8$$

standsicher gegen eine horizontale Böschungsbewegung.

4.1.2 Horizontales Gleichgewicht für einen Bruchmechanismus bei geneigter Grundwasseroberfläche

Besitzt die Sickerlinie eine Neigung entsteht durch das Gewicht des Bruchkörpers G2 zusätzlich eine Hangabtriebskraft. Stimmt die Neigung der Sickerlinie mit der Fallrichtung der Böschung überein, wirkt die Hangabtriebskraft zusammen mit dem aktiven Erddruck und verringert deren Sicherheit. Ist die Neigung der Sickerlinie der Fallrichtung der Böschung entgegen gerichtet, wirkt die Hangabtriebskraft zusammen mit dem aktiven Erddruck und vergrößert die Sicherheit. Wird das oben vorgestellte Ausgangsmodell mit einer zum Böschungsfuß hin geneigte Grundwasseroberflä-

che unter dem Winkel ε ergänzt (ε zum Restloch geneigt negativ) ergibt sich die folgende Gleichgewichtsbedingung:

$$Si = \frac{K_p \cdot h_F{}^2}{K_a \cdot h_K{}^2 + \mathrm{G}_2 \cdot \sin\varepsilon \cdot S_{fNiveau}} \qquad 9$$

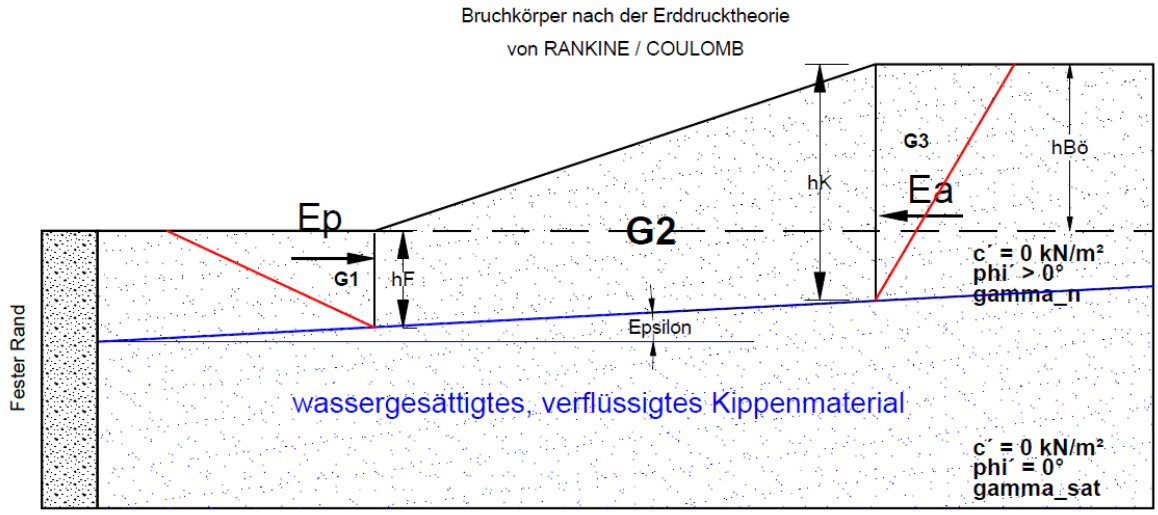

Abb. 2: Ausbildung eines blockförmigen Bruchkörpers oberhalb einer horizontal verlaufenden Grundwasseroberfläche - Erddrucktheorie von RANKINE / COULOMB bei mit (⌒) geneigter Grundwasseroberfläche (ε - Neigung der Sickerlinie)

4.1.3 Horizontales Gleichgewicht für einen Bruchmechanismus bei ebener Grundwasseroberfläche und Ansatz einer Restfestigkeit

Die Restfestigkeit im verflüssigten Kippenmaterial wirkt als Reibungskraft entgegen der Bewegungsrichtung des Bruchkörpers. Das Ausgangsmodell wird durch diese zusätzliche, widerstehende Kraft ergänzt.

$$Si = \frac{K_p \cdot h_F{}^2}{K_a \cdot h_K{}^2 + \mathrm{G}_2 \cos\varepsilon \cdot \tan\phi'_{Kr} \cdot S_{fNiveau}} \qquad 10$$

$tan\varphi'_{Kr}$ - Restreibungswinkel des verflüssigten Kippenmaterials

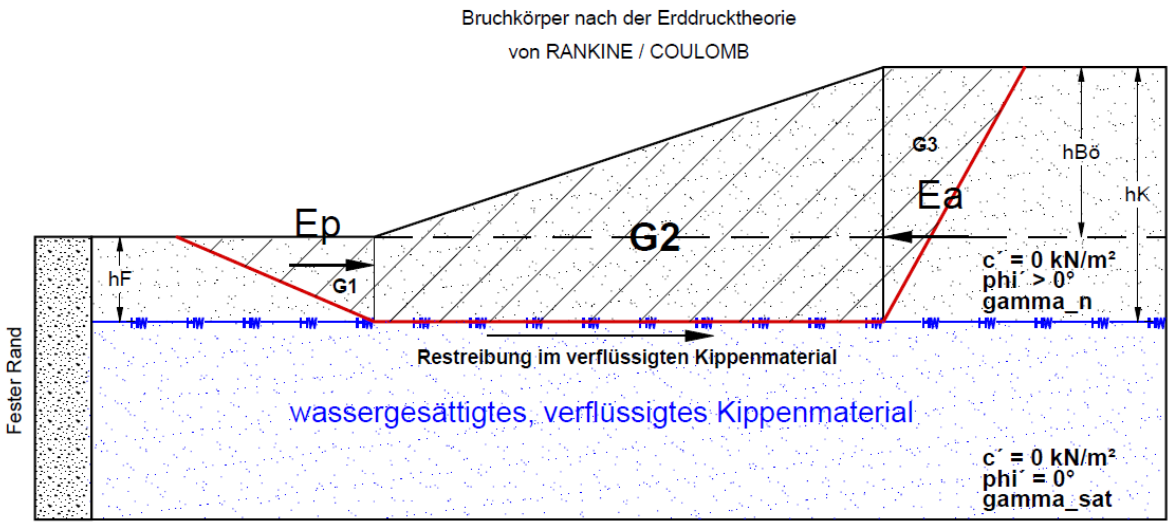

Abb. 3: Definition des blockförmigen Bruchkörpers mit einer zusätzlichen Reibungskraft R durch Restreibung in der verflüssigten Kippe

4.1.4 Allgemeine Sicherheitsdefinition für einen potentiellen Bruchkörper

Die Hangabtriebskraft und die durch die Restreibung entstehende Reibungskraft können auch beide zusammen an einem Bruchkörper angreifen. Wird die anfangs dargestellte einfach Sicherheitsdefinition durch beide Kräfte ergänzt, erhält man eine allgemeine Sicherheitsbedingung

$$S_i = \frac{K_p \cdot {h_F}^2}{K_a \cdot {h_K}^2 + G_2 \cdot \sin\varepsilon + G_2 \cdot \cos\varepsilon \cdot \tan\phi'_{Kr} S_{fNiveau}} \qquad 11$$

Mit dieser Formel kann für Böschungen aus erdfeuchtem Kippenmaterial bei beliebigen Randbedingungen die Sicherheit gegen eine horizontale Böschungsbewegung berechnet werden.

4.2 Vertikales Gleichgewicht – an einem Böschungskörper nach einer Verflüssigung (Kategorie 2)

Allgemeine Überlegungen

Ist die oben abgeleitete horizontale Gleichgewichtsbedingung erfüllt, kann ausgeschlossen werden, dass eine Böschungsbewegung in der Form eines Setzungsfließens mit großen horizontalen Verschiebungen auftritt.

Wie in (Weißbach, et al., 2014) festgestellt, ist es aber auch nur zu vertikalen Bewegungen ohne oder mit geringen Horizontalbewegungen gekommen.

Für die Ableitung einer vertikalen Gleichgewichtsbedingung ist dann davon ausgehen, dass die horizontale Gleichgewichtsbedingung erfüllt ist und ebenfalls kein Massenverlust verflüssigter Massen durch Ausfließen eintritt.

Ist dies gewährleistet, sind für die Ableitung der vertikalen Gleichgewichtsbedingung zwei Fälle zu unterscheiden,

- der oberhalb der verflüssigten Massen befindliche erdfeuchte Bruchkörper verhält sich auf Grund seiner gedrungenen Ausgangsgeometrie wie ein Starrkörper,
- der oberhalb der verflüssigten Massen befindliche erdfeuchte Bruchkörper verhält sich auf Grund seiner geringen Mächtigkeit und der Ausdehnung des verflüssigten Bereiches wie ein schlaffer Körper.

Diese Böschungsgeometrien und Kombinationen aus beiden Fällen wurden ebenfalls durch Weißbach dokumentiert.

4.2.1 Vertikales Gleichgewicht eines starren Böschungskörper nach einer Verflüssigung (Kategorie 2, Fall 1)

In der folgenden Abbildung werden die Druckverhältnisse an einem starren Bruchkörper nach einer Verflüssigung dargestellt.

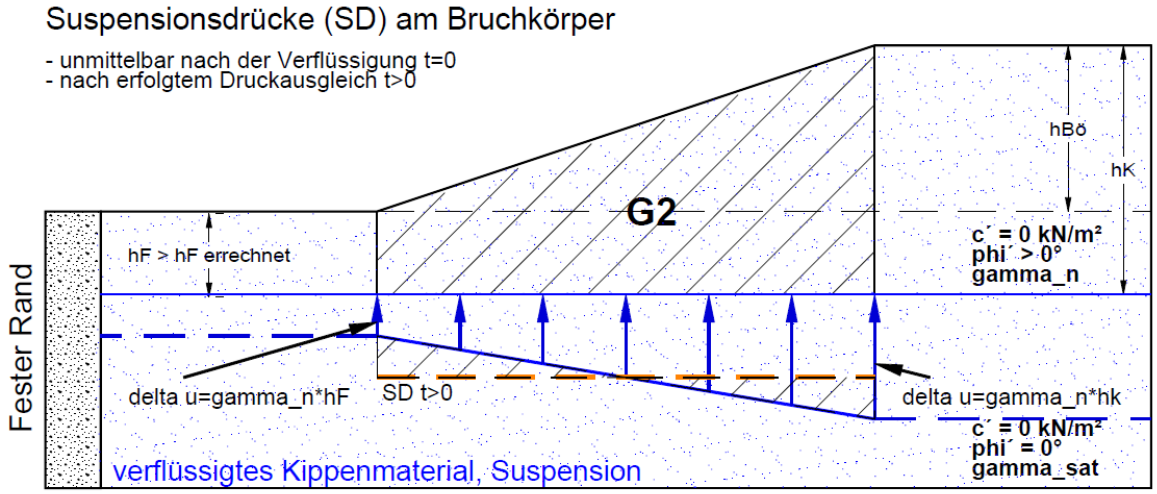

Abb. 4: Drücke im verflüssigten Kippenmaterial unmittelbar nach der Verflüssigung und nach Druckausgleich

Zur Erklärung der Abbildung 4 ist zu sagen:

- Die betrachtete Kippe besteht aus zwei Teilen, dem unterhalb der Sickerlinie befindlichen verflüssigten Kippenkörper und dem darauf aufgelagerten naturfeuchten Kippenkörper. Beide Teile sind vor der Verflüssigung Festkörper.
- Verflüssigt sich der wassergesättigte Teil der Kippe, tritt dort ein Phasenwechsel von einem Feststoff zu einer Flüssigkeit (Suspension) ein.
- Unmittelbar bei der Verflüssigung (Zeit t=0) treten in der entstandenen Suspension Flüssigkeitsdrücke auf, die dem Gewicht der örtlich vorhandenen Überlagerung entsprechen.
- Durch die geringere Überlagerung am Böschungsfuß entsteht in der Suspension ein geringerer Druck als unterhalb des Böschungskopfes.
- Danach (t>0) kommt es zu einem Druckausgleich zwischen Bereichen mit hohem Überlagerungsdruck und denen mit geringerem Druck.

- Dieser Druckausgleich ist mit Massen- (Suspension) und auch Wassertransport (freies Wasser in der Folge einer Verfestigung (Wittig, 2015)) in Richtung der niedrigeren Drücke bzw. Spannungen, also bei einer Böschung zum Böschungsfuß, bei Tieflagen in Richtung der geringsten Überlagerungshöhe verbunden.
- Die Bereiche mit großer Überdeckung sinken in die Suspension ein, die mit geringerer Überdeckung werden angehoben.
- Der Geländeausgleich erfolgt ohne Massenverlust volumentreu und die Höhenunterschiede im Gelände passen sich solange an, bis die vorhandenen Druckunterschiede ausgeglichen sind.
- An den Rändern des verflüssigten Bereiches entstehen u.U. Verschiebungen, die sich durch Risse und Relativbewegungen im Gelände zeigen.
- Betrachtet man den Vorgang schnittbezogen an einer Böschung, dann rotiert der naturfeuchte Starrkörper infolge der angreifenden Kräfte um seinen Schwerpunkt bis eine stabile Endlage erreicht ist.
- Durch die Drehbewegung wird im Fußbereich verflüssigtes Material über die Sickerlinie angehoben und im Kopfbereich sinkt erdfeuchtes Material in die verflüssigte Unterlage ein und gerät unter Auftrieb.
- Alle am starren Bewegungskörper angreifenden Kräfte sind mit ihrem Angriffspunkt in der Abbildung 5 dargestellt.
- Als auslösende aktivierende Größe wirkt der sich Flüssigkeitsdruck zwischen dem Fuß- und Kopfbereich und dem Schwerpunkt des Bewegungskörpers.
- Alle anderen Kräfte sind widerstehend. Sie wirken entgegen der Drehbewegung des erdfeuchten Böschungskörpers.

Daraus ergibt sich die Momentengleichgewichtsbedingung zur Berechnung der Sicherheit gegen Vertikalbewegungen an Innenkippenböschungen starre Bewegungskörpe

$$S_{f11} = \frac{M_{uK1} + M_{FAnh} + M_{FAbs} + M_{R1} + M_{R2}}{M_{uF1}} \qquad \textbf{\textit{12}}$$

M_{uK1}, M_{uF1}	Momente aus Porenwasserdruckveränderung durch Ausgleich
M_{FAnh}, M_{FAbs}	Momente aus Auftrieb des eintauchenden naturfeuchten Erdkörpers in die Suspension und der Anhebung von gesättigtem Material über die Grundwasseroberfläche
M_{R1}, M_{R2}	Momente aus der Reibung an den Flanken

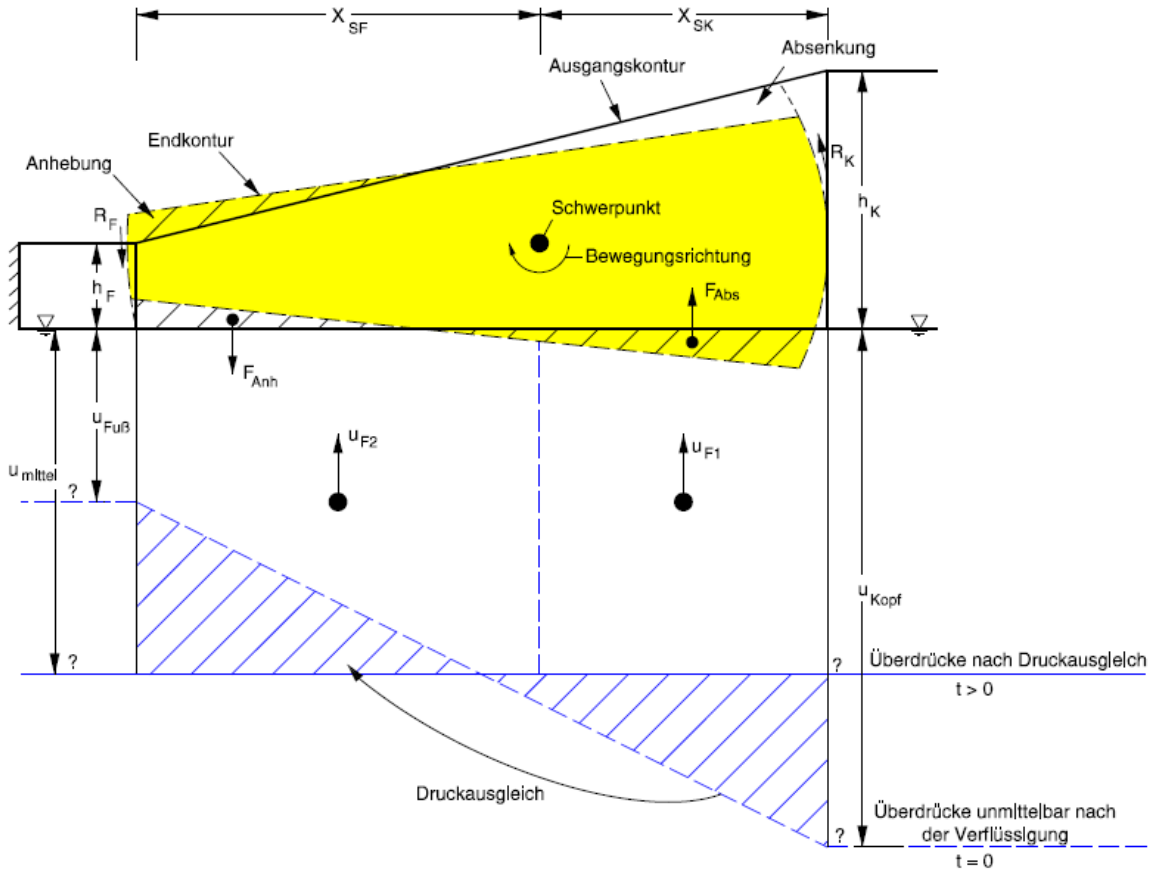

Abb. 5: Vertikales Gleichgewicht mit Darstellung des Bewegungskörpers vor und nach der Verflüssigung, mit erfolgter Drehung und des Druckausgleiches an seiner Basis

Ergebnis einer Standsicherheitsberechnung für einen Starrkörper und Darstellung der stattgefundenen Böschungsbewegung

In der folgenden Abbildung 6 ist das Ergebnis einer Berechnung für das horizontale und vertikale Gleichgewicht zusammengestellt. Die Berechnung wurde im Rahmen eines Sprengkonzeptes zur Abschätzung der zu erwartenden Böschungsbewegungen für eine Sprengung am Böschungsfuß vorgenommen.

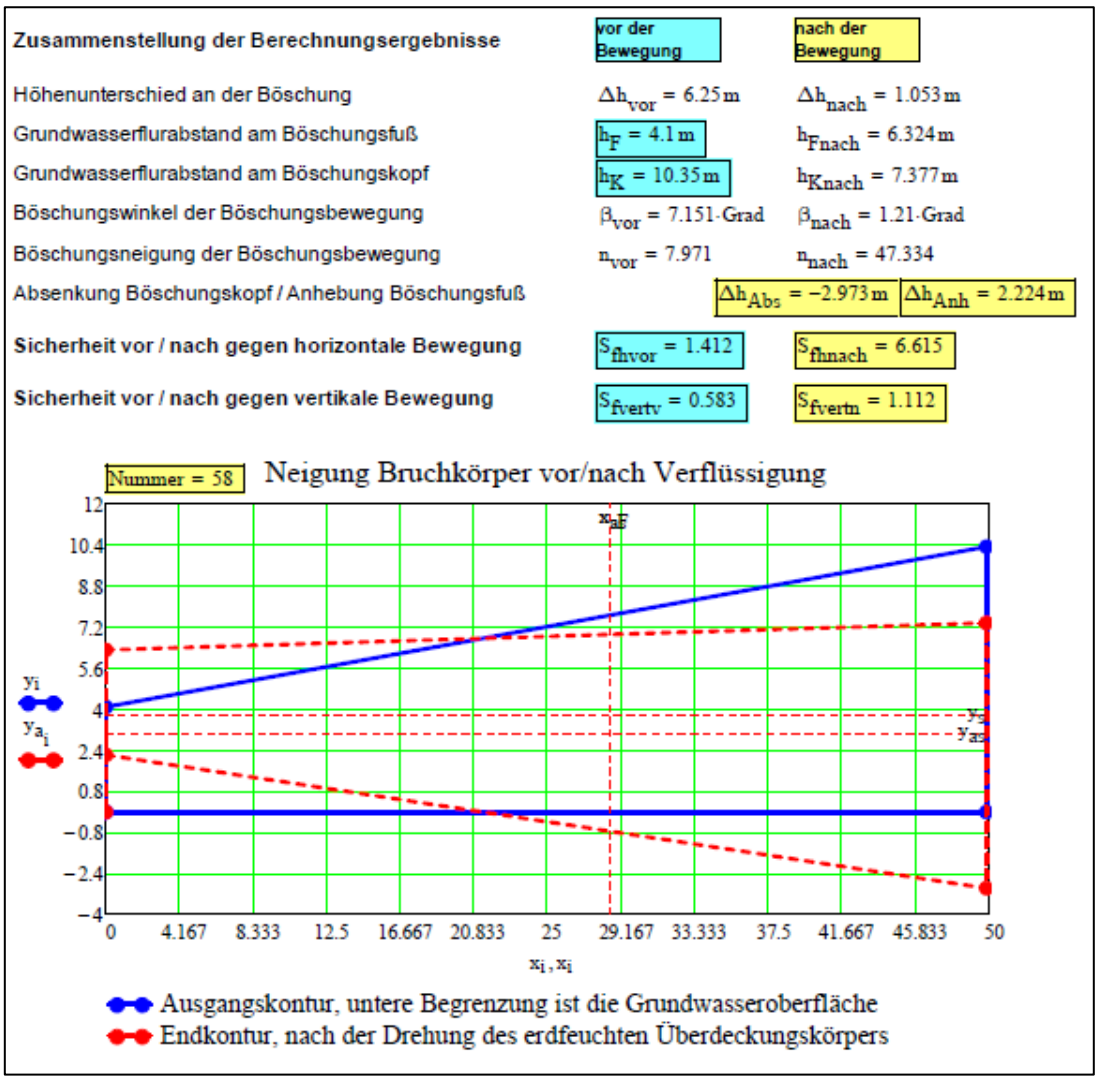

Abb. 6: Berechnung der Sicherheiten und Böschungsdeformation

Die blau unterlegten Werte stellen die Situation vor der Böschungsbewegung, die gelben nach der Bewegung dar. Die Sicherheit gegen eine Horizontalbewegung ist gegeben, die vertikale Sicherheit nicht. Zusätzlich wurde die zu erwartende Absenkung des Böschungskopfes und Hebung des Böschungsfußes errechnet. Während der Sanierungsarbeiten kam es zum erwarteten Böschungssbruch.

In der Abbildung 7 ist die in der Folge elliptisch geformte Böschungsbewegung zu sehen, die dem Bewegungsmuster eines Starrkörpers entspricht. Die Sprengladung befand sich etwa in der Mitte am Fuß des Bruchkörpers. Der Bruchkörper hatte in Fallrichtung der Böschung eine Breite von ca. 50m und in seiner Streichrichtung eine Ausdehnung von ca. 100m. Er bewegte sich in einer Drehbewegung um seinen Masseschwerpunkt. Im Bereich des Böschungskopfes entstand eine ausgeprägte Bruchkante mit der Absenkung des Böschungskopfes von ca. 2.5 m, während es im Fußbereich zu Anhebungen von ca. 1,5m kam. An den entstandenen Rissen trat teilweise Wasser vermischt mit Sand aus.

Abb. 7: Böschungsbewegung auf einer Innenkippe durch eine Verflüssigung

Durch die infolge der Drücke hohen Strömungsgeschwindigkeit des austretenden Wassers (Abbildung 6) wird auch Feststoffmaterial ausgetragen.

Abb. 8: Strudellöcher, entstanden in Bruchzonen durch mit hohem Druck austretenden Wassers und mitgerissenem Sand

4.2.2 Vertikales Gleichgewicht – an einem lang gestreckten Böschungskörper nach einer Verflüssigung (Kategorie 2, Fall 2)

Durch eine Verflüssigung werden oftmals sehr große Bereiche von mehreren hundert Metern Länge und Breite betroffen. Eine Bruchkörperform wie unter 4.2.1. dargestellt wird sich deshalb dort nicht einstellen. In der folgenden Abbildung werden die Druckverhältnisse an einem Bruchkörper dargestellt, der schlaff über den verflüssigten Materialien liegt.

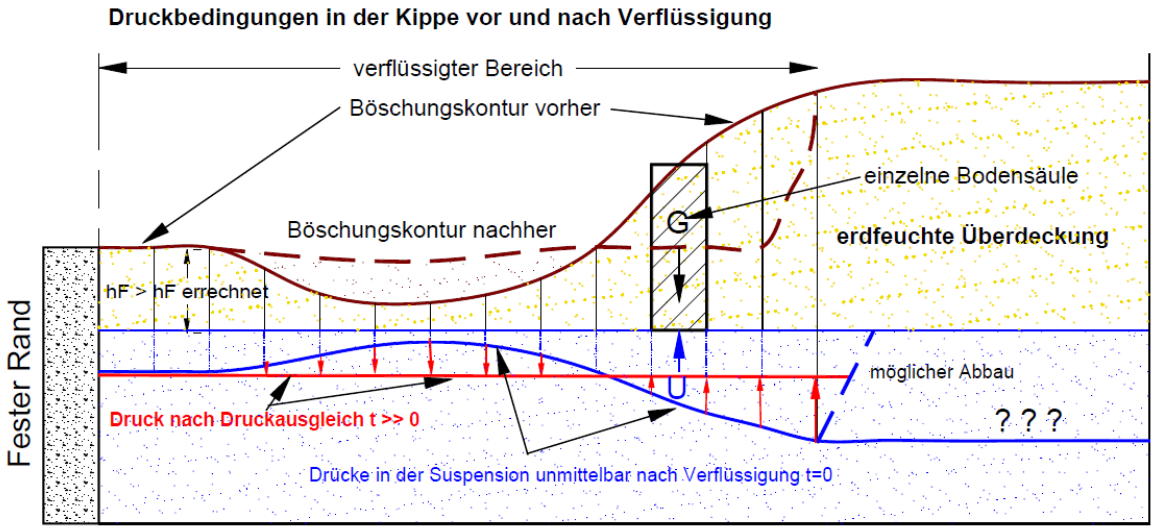

Abb. 9: Druckverhältnisse in den verflüssigten Materialien unmittelbar nach der Verflüssigung (t=0) und nach Druckausgleich

In der der Abbildung 9 ist ein langgestreckter Innenkippenabschnitt dargestellt:

- Die betrachtete Kippe besteht wiederum aus dem unterhalb der Sickerlinie befindlichen verflüssigten Kippenkörper und dem darauf aufgelagerten naturfeuchten Kippenkörper.
- Die Methodik der Berechnung entspricht der gleichen, die schon oben für den Festkörper vorgestellt wurde.
- Die lang gestreckte Böschung wir hier allerdings in Lamellen eingeteilt. Die Lamellen werden unten von der Sickerlinie begrenzt.
- Es wird angenommen, dass sich zwischen den Lamellen keine Reibung entwickelt.
- Unmittelbar nach der Verflüssigung entsteht unterhalb einer Lamelle ein Flüssigkeitsdruck, der dem Gewicht der jeweiligen Lamelle entspricht.
- In der Suspension setzt der Druckausgleich im gesamten verflüssigten Bereich ein.
- Dieser Druckausgleich ist ebenfalls mit Massen- (Suspension) und auch Wassertransport (freies Wasser in der Folge einer Verfestigung (Wittig, 2015)) in Richtung der niedrigeren Drücke bzw. Spannungen verbunden.
- Der Druckausgleich geschieht hier aber flächenhaft.
- Die Bereiche mit großer Überdeckung sinken dadurch ab, die mit geringerer Überdeckung werden angehoben.

- Im gesamten verflüssigten Bereich erfolgt dieser Massenausgleich volumentreu. An den Rändern des verflüssigten Bereiches entstehen Verschiebungen, die sich durch Risse und Relativbewegungen im Gelände zeigen.

Methodik zur Berechnung der Vertikalbewegung der einzelnen Lamellen

Errechnet man nun die Gewichte der einzelnen erdfeuchten Lamellen und summiert diese, erhält man das Gesamtgewicht der erdfeuchten Überdeckung. Dividiert man dieses Gewicht durch die Länge des verflüssigten Bereiches erhält man das mittlere Gewicht der Lamellen, das dem mittleren Flüssigkeitsdruck in der Suspension entsprechen muss. Die Druckdifferenz zwischen dem mittleren Flüssigkeitsdruck und dem Gewicht einer Einzellamelle bestimmt, ob diese einsinkt oder angehoben wird. Sinkt sie ein ist zusätzlich der Auftrieb auf die eingesunkenen Materialien zu berücksichtigen. Wird sie angehoben, ist eine Gewichtsvergrößerung, die sich aus dem Betrag der Anhebung multipliziert mit der Suspensionsdichte ergibt einzurechnen.

Ergebnis einer Standsicherheitsberechnung für einen schlaffen Kippenkörper und Darstellung der stattgefundenen Böschungsbewegung

Fall 1 flache Ausgangsböschung

In der folgenden Abbildung 10 ist das Ergebnis einer Standsicherheitsberechnung mit nachfolgender Ermittlung der sich nach der Verflüssigung einstellenden Böschungsgeometrie für einen Verflüssigungsvorgang in der Vergangenheit enthalten. Die Böschungsbewegung ereignete sich im Nordbereich der Lausitz in einer Region mit Materialien die eine starke Verflüssigungsneigung besitzen, was sich durch viele Verflüssigungsereignisse ausdrückt.

Während des Verflüssigungsvorganges kam es zu einem massiven Massenübertritt in den angrenzenden Restsee, was mit einem Massenverlust und Geländeabsenkung im verflüssigten Bereich verbunden war. Die Grafik ist weitgehend selbsterklärend, zu beachten ist aber die große Überhöhung in der Darstellung.

Die Böschung besaß vor der Verflüssigung eine Ausgangswinkel von 1,7 Grad, was etwa einer durchschnittlichen Neigung von n=1/70 entspricht. Die Böschung hatte also eine Böschungsneigung, die weit unter denen liegt, die man im Ergebnis einer Sanierung herstellen würde.

Die Nachrechnung der Sicherheit nach den oben vorgestellten Verfahren erbrachte für diese Böschung keine Sicherheiten, weder gegen eine horizontale noch vertikale Böschungsbewegung. Der Grundwasserflurabstand im Fußbereich, die feste Grenze wird hier durch einen Rütteldamm gebildet, war durch den Grundwasseranstieg inzwischen zu gering geworden. Der Grenzzustand mit einer Sicherheit Sfh=1 gegen eine horizontale Bewegung war schon bei einem Wasserstand von 56,6 mNHN erreicht. Die Böschungsbewegung fand einem Wasserstand von ca. 60mNHN statt, d.h. der berechnete Wasserstand wurde um ca. 3,5m überschritten bevor die horizontale Böschungsbewegung eintrat. Die vertikale Sicherheit lag bei diesem Wassersrand bei ca. Sfv=0.55, vertikale Bewegungen wurden vorher nicht erfasst.

Die durch die Rutschung entstandenen Geometrie besitzt eine Sicherheit Sfv=1 und Sfh=2.55. Damit sind beim gleichen Wasserstand in diesem Bereich weitere Verflüssigungen der Kategorie 3 zwar möglich, aber größere horizontale und vertikale Böschungsbewegungen ausgeschlossen. In der Grafik ist auch die Geometrie (rote gestrichelte Linie) enthalten, die sich eingestellt hätte, wenn der Rütteldamm für ein Gleichgewicht nach der Verflüssigung hoch genug gewesen wäre. Da der Wasserstand in der Kippe aber zu hoch lag, trat solange Wasser und Material über den Damm in den Restsee über, die Innenkippe senkte sich ab, bis sich das entsprechend sichere Höhenverhältnis (strichpunktierte Linie) eingestellt hat.

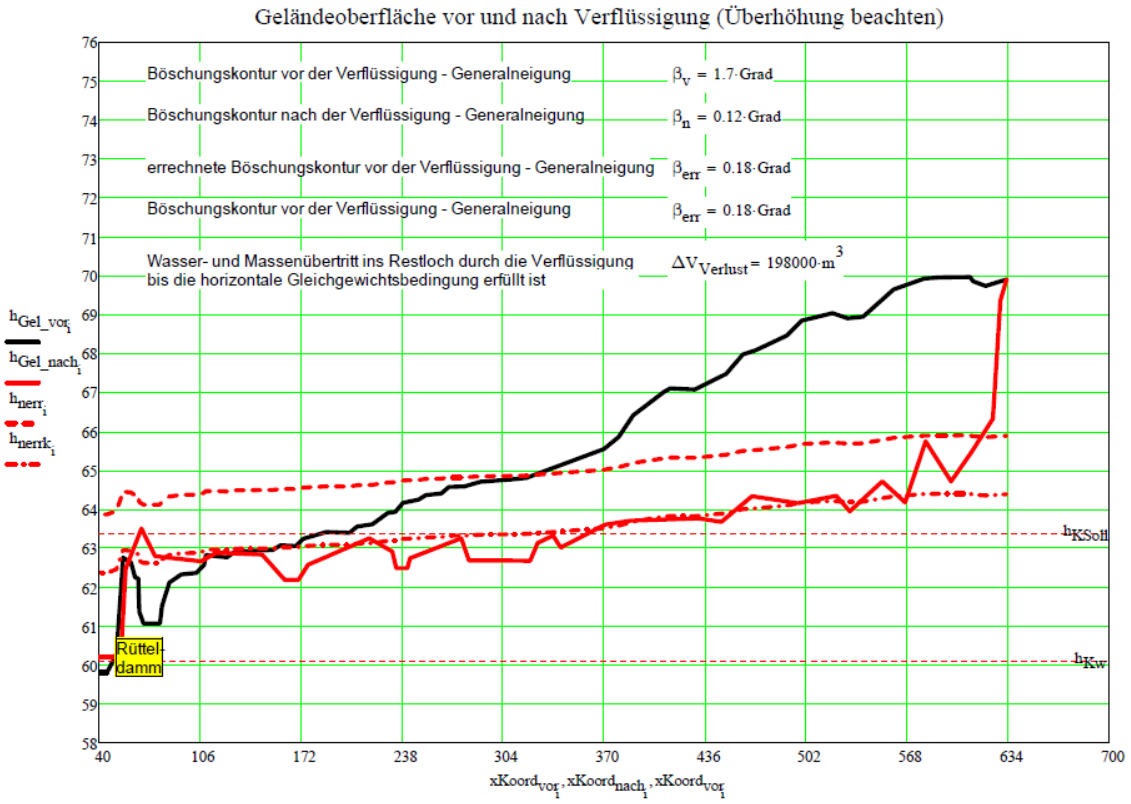

Abb. 10: Ergebnis der Berechnung der Standsicherheit und Deformation einer flach gelagerten Ausgangsböschung

Fall 2 steile Ausgangsböschung

In der Abbildung 11 ist das Ergebnis einer Standsicherheitsberechnung für eine steile Ausgangsböschung enthalten.

Das Vorland der Böschung besaß vor der Verflüssigung einen Ausgangswinkel von 1,9 Grad. Angrenzend an diese befand sich eine hohe Steilböschung, die durch eine Verflüssigung zu Bruch ging. Bei der eingetretenen Böschungsbewegung wurde die Bewegung der erdfeuchten Überdeckung durch die gewachsenen Gegenböschung gestoppt. In der Grafik bezeichnet die schwarze Linie die Ausganggeometrie. Die rote Linie ist die Böschungsgeometrie nach der Rutschung. Die gestrichelte rot-blaue Linie ist die theoretische errechnete Böschungskontur für den zur Zeit der Rutschung vorhandenen Wasserspiegel. Die Übereinstimmung zwischen der errechneten und der realen Endböschungskontur ist sehr gut.

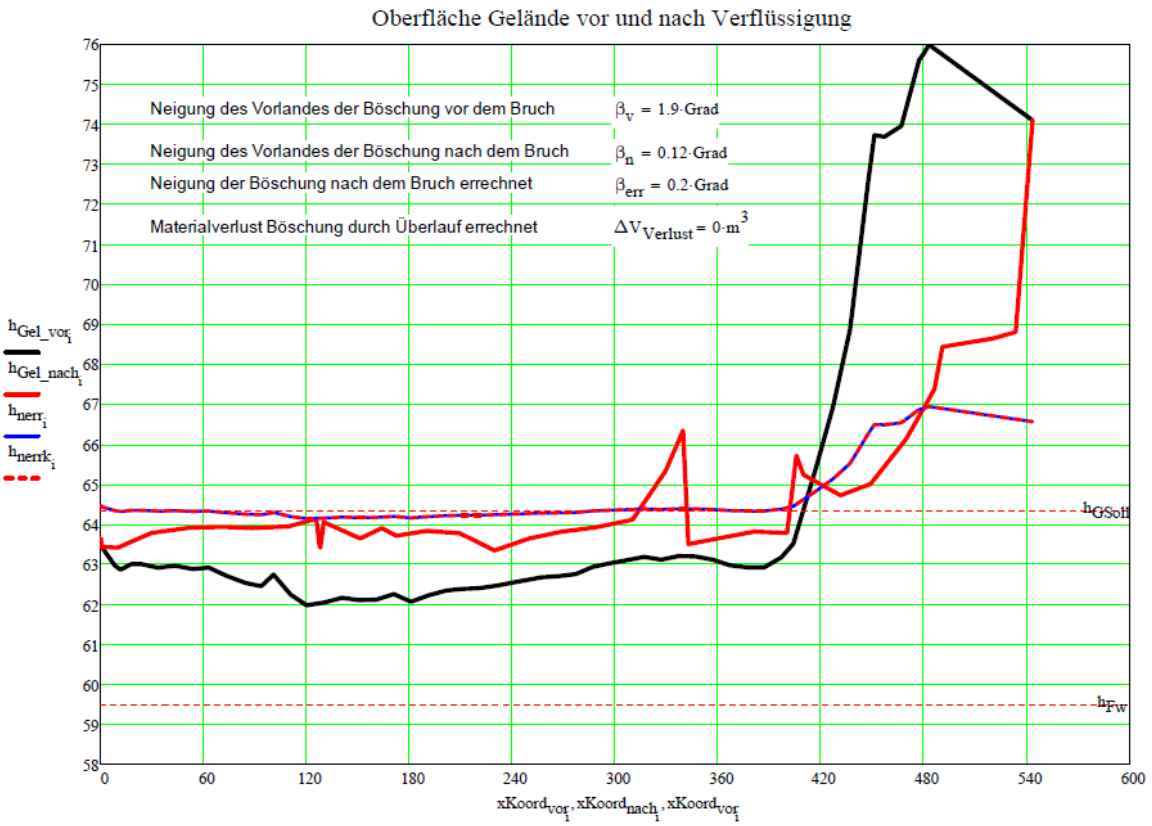

Abb. 11: Ergebnis der Berechnung der Standsicherheit und Deformation einer steilen Ausgangsböschung

5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Standsicherheitsberechnungen und Schlussfolgerungen

5.1 Horizontales Gleichgewicht

5.1.1 Horizontales Gleichgewicht bei ebener Grundwasseroberfläche und ohne Restfestigkeit

Unmittelbar aus den Gleichgewichtsbedingungen ableitbare Aussagen:

Für überstaute Flächen, deren Uferbereiche oder eine Böschung mit frei austretender Sickerlinie ist die Standsicherheit generell nicht nachweisbar. Da sich ein Erdwiderstand am Fuß einer Innenkippenböschung nur in einem nicht verflüssigten Bereich aufbaut, muss dort eine erforderliche erdfeuchte Überdeckung vorhanden sein.

Der am Böschungsfuß einer Böschung notwendige Grundwasserflurabstand muss größer sein als das 0.333-fache des Grundwasserflurabstandes am Böschungskopf (Kippe $\phi' = 30$*Grad)

Wird diese Bedingung eingehalten, ist an der Böschung die Sicherheit gegen ein Setzungsfließen mit großen horizontalen Verschiebungen vorhanden.

Existiert auf der Innenkippe an irgendeiner Stelle eine Tieflage wo dieses Verhältnis zwischen dem Grundwasserflurabstand am Böschungsfuß und –kopf verletzt wird, besteht in diesem Bereich ebenfalls die Gefahr einer horizontalen Böschungsbewegung in Richtung der Tieflage.

Die Sicherung könnte durch Grundwasserabsenkung, einem Geländeab- und –auftrag oder durch Spreng- oder Rütteldruckverdichtung erfolgen.

Wenn auf einer Innenkippe aber eine Verflüssigung eingetreten ist, hält die ausgelöste Böschungsbewegung so lange an, bis sich im gesamten Bereich ein entsprechend standsicheres Höhenverhältnis für den dort vorhandenen Grundwasserflurabstand eingestellt hat.

5.1.2 Horizontales Gleichgewicht mit geneigter Grundwasseroberfläche

a Neigung der Sickerlinie in Fallrichtung der Böschung

Die Ergebnisse für drei unterschiedliche Böschungsneigungen zeigen, dass die Sicherheit mit der Neigung der Sickerlinie Richtung Restloch abnimmt. Dieser Einfluss auf die Standsicherheit ist abhängig vom Winkel der Ausgangsböschung und nimmt mit steileren Anfangsböschungen ab

b Neigung der Sickerlinie entgegen der Fallrichtung der Böschung

Aus den Berechnungen ist ableitbar, dass die Sicherheit mit zunehmender Neigung der Sickerlinie Richtung Innenkippe stark zunimmt.

Die Neigung der Ausgangsböschung hat geringeren Einfluss auf die Sicherheit bei steileren Böschungen. Bei flach geneigten Böschungen nimmt die Sicherheit mit der Neigung der Sickerlinie schnell zu.

Bei der Ausgangsböschung mit einer Neigung 1:10 und einem Grundwasserflurabstand am Böschungsfuß von 3m (Sicherheit Si=1), darf die Böschung bei einer Neigung der Sickerlinie von 1,6 Grad eine Böschungshöhe von ca. 20 m besitzen. Das zeigt, dass man horizontale Böschungsbewegungen schon mit einem geringen Aufwand einer Wasserhaltung vermeiden kann.

5.2 Vertikales Gleichgewicht für geneigtes Gelände nach einer Verflüssigung, mit ebener Grundwasseroberfläche und ohne Restreibung

Die Sicherheit gegen eine vertikale Bewegung wird bei flacheren Böschungen unsicherer.

Aus der Parameterberechnung ist ebenfalls zu ersehen, dass die Deformationen im Kopf und Fußbereich der Böschung bis zur Erreichung eines sicheren Endzustandes bei Sfv=1 ebenfalls mit der Verringerung der Böschungsneigung zunehmen.

Ist die vertikale Sicherheit vorhanden ist immer auch die horizontale gegeben. Für die horizontale Sicherheit ist es allerdings so, dass der Sicherheitszuwachs für steilere Ausgangsböschungen geringer ist, als für flachere.

Solange auf den Innenkippen eine Verflüssigung ausgeschlossen werden kann, ist die Sicherheit der dort vorhandenen Böschungen mit den konventionellen Verfahren der Bodenmechanik berechenbar.

Generelle Vorgehensweise bei der Standsicherheitsbewertung

Ist bei der standsicherheitlichen Bewertung eine Verflüssigung zu berücksichtigen, wurden für die Berechnung der Standsicherheit auf Innenkippen zwei Gleichgewichtsbedingungen abgeleitet,

- ein horizontales Kräftegleichgewicht,
- ein vertikales Momentengleichgewicht.

Mit Bezug auf die angewendeten Gleichgewichtsbedingungen können drei möglichen Ergebnisse eintreten,

- Kategorie 3, beide der oben abgeleiteten Gleichgewichtsbedingungen, die des horizontalen und die des vertikalen Gleichgewichts sind erfüllt,
- Kategorie 2, die vertikale Gleichgewichtbedingung ist nicht erfüllt, aber die horizontale wird eingehalten,
- Kategorie 1 beide Sicherheitsbedingungen werden verletzt.

Mit den Gleichgewichtsbedingungen sind mit folgenden Bruchformen assoziiert:

- Kategorie 3, Bruchvorgänge, die sich als lokal begrenzte Einbrüche oder Bewegungen im Gelände zeigen, in deren Folge aber keine Hebungen eintreten. Die Absenkungen ergeben sich durch eine Verdichtung des Feststoffs infolge der Verflüssigung (Wittig, 2015). Es tritt bei diesen Bewegungen an den Bruchkanten kein oder wenig Wasser oder Suspensionsmaterial aus. Diese Bruchvorgänge treten auf den Innenkippen wahrscheinlich ständig auf, werden wegen ihrer geringen Auswirkungen aber nur selten erfasst.
- Kategorie 2, Bruchvorgänge, die auf der Innenkippe ebenfalls lokal begrenzt sind und mit einer Verringerung der Geländeneigung (Absenkung im Kopfbereich und Anhebung im Fußbereich des Bruches) ohne Horizontalverschiebung einhergehen. Es kann lokal an den Bruchkanten oder sonstigen Rissen zu geringen Wasser- oder Materialaustritten kommen. Die vertikale Sicherheitsbedingung wird zuerst verletzt, d.h. die Anzahl der vertikalen Böschungsbewegungen muss größer sein als die horizontalen.
- Kategorie 1, Bruchvorgänge, die mit horizontalen und vertikalen Verformungen der Kippe verbunden sind, die ebenfalls zu einer Verringerung der Ausgangsneigung des Geländes führen. Dieser Prozess ist mit erheblichen Materialumlagerungen über die Grenzen des eigentlichen Bruchkörpers hinaus verbunden und der gefährlichste Vorgang auf einer Innenkippe. Horizontale Bewegungen mit großem Materialtransport können nur eintreten, wenn Grundwasserflurabstand an einer „festen Berandung“ z.B. Rütteldammes die Höhe des errechneten sicheren Grundwasserflurabstandes unterschreitet oder auf der Innenkippe Tieflagen vorhanden sind, wo diese Bedingung verletzt wird.

Von (Weißbach, et al., 2014) wurden 67 unterschiedliche Böschungsbewegungen im Nordraum der Lausitz erfasst, die direkt zur Überprüfung der oben vorgestellten Gleichgewichtsbedingungen herangezogen werden können.

Bei 5 Einbrüchen im Gelände bzw. Geländeabsenkungen ohne Horizontaldeformation und auch ohne Anhebung sind beide Gleichgewichtsbedingungen erfüllt. Sie sind der Kategorie 3 zuzuordnen.

Bei 43 Böschungsbewegungen wurde die nur die vertikale Gleichgewichtsbedingung verletzt und kam es zu einem Bruchvorgang, verbunden einer mit Verminderung der Geländeneigung ohne eine horizontale Bewegung des Bruchkörpers. Sie gehören zur Kategorie 2.

Bei 19 erfassten Böschungsbewegungen werden beide Sicherheitsbedingungen verletzt. Sie können zweifelsfrei der Kategorie 1 zugeordnet werden. Bei dieser Kategorie war mit Rutschungsbewegungen analog einem Setzungsfließen zu rechnen, die in den meisten Fällen auch so eingetreten sind. Die Grenze zu den Böschungsbewegungen mit nur vertikalen Verschiebungen (Kategorie 2) ist wegen der eingeschränkten Messgenauigkeit nicht immer exakt festzulegen.

Die Eignung der abgeleiteten Gleichgewichtsbedingungen zum Nachweis der Standsicherheit auf verflüssigungsgefährdeten Innenkippen auf der Basis der verwendeten Gleichgewichtsbedingungen wurde auf der Basis der erfassten Böschungsbewegungen im Einzelfall überprüft. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung.

Aus dem Vergleich der erfassten Böschungsbewegungen auf Innenkippen mit den errechneten Deformationen des hier vorgestellten Verfahrens ist abzuleiten, dass für die Kategorie 2, der Überschreitung des vertikalen Momentengleichgewichts, bei einer Verflüssigung auch die Endkontur der entstehenden Böschung berechnen kann.

LITERATURVERZEICHNIS

BIUG GmbH. 2015. Komplexe Bewertung der Innenkippenflächen in der Lausitz, Innenkippe Seese-Ost. Senftenberg : s.n., 2015.

Das, Braja M. 2012. Fundamentals of Geotechnical Engineering. Boston : Cengage Learning - Engineering, 2012.

Förster, W. 1998. Bodenmechanik. Stuttgart, Leipzig : B.G. Teubner Studienbücher Bauwesen, 1998.

LMBV mbH, BIUG GmbH, CDM Smith. 2015. Handlungsgrundlage zur komplexen Bewertung der Innenkippenflächen der LMBV der Lausitz. s.l. : LMBV mbH, 2015.

Weißbach, J. und Kudla, W. 2014. Auswertung der Verflüssigungsereignisse im Nordraum Lausitz in den Jahren 2012/2013. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 2014.

–. 2012. Auswertung und Erkenntnisse aus bisherigen Schadensfällen auf Grund von Verflüssigung bei Innenkippen in der Lausitz. Freiberg : TU Bergakademie Freiberg, Institut für Erdbau und Spezialtiefbau, 2012.

Wittig, M. 2016. Berechnung der Standsicherheit benachbarter Böschungen vor und während der Sprengverdichtung (Parameterstudie). Freiberg : BIUG GmbH, 2016.

−. 2015. Erdstatische Standsicherheitsuntersuchungen von Böschungen in verflüssigungsgefährdeten Kippen des Braunkohlenbergbaus. Freiberg : 8. Geotechnik Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, 2015. 8. Geotechnisches Kolloquium BHT.

−. 2015. Mechanismen der Verfestigung einer Bodensäule nach einer Verflüssigung. Freiberg : BIUG GmbH,Freiberg, Stand 28.10.2015, 2015.

Zander, Jaqueline. 2014. Untersuchungen zum Verhalten locker gelagerter, wassergesättigter Sande nach einer Verflüssigung durch dynamische Anregungen. Freiberg : Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, 2014.