

Vergleich der Sicherheiten nach altem und neuem Sicherheitskonzept an ausgewählten Dammbauwerken

Dr.-Ing. Karola Heinrich
Dipl.-Ing. Katy Henniger
PD Dr.-Ing. Peter-Andreas von Wolffersdorff

BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH
Paul-Schwarze-Straße 2, D-01097 Dresden

1 Einleitung

Ausgangspunkt für den Beitrag zur Bewertung der Standsicherheit von Dämmen nach altem und neuem Sicherheitskonzept sind die umfangreichen Erfahrungen, die bei BAUGRUND DRESDEN an vielfältigen Standsicherheitsuntersuchungen von Dämmen und Deichen im Rahmen der Nachsorge, von Um- und Ausbaumaßnahmen, Zustandsermittlungen und Neubauvorhaben gesammelt werden konnten.

Mit Einführung des überarbeiteten Merkblattes „Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“ (MSD, Ausgabe August 2005) der Bundesanstalt für Wasserbau am 22.09.2005 wurden die geotechnischen Nachweise zur Standsicherheit der Dämme entsprechend den Normen DIN 1054, Ausgabe Januar 2005 und DIN 1055 Teil 100, Ausgabe März 2001 auf das Teilsicherheitskonzept umgestellt. Die Grundsätze zu Versagensmechanismen und zur Anwendung von Berechnungsverfahren sowie die Anzahl der zu untersuchenden Lastfälle sind unverändert geblieben.

An ausgewählten Dammquerschnitten wurden Vergleichsberechnungen zur Böschungsstandsicherheit nach dem Lamellenverfahren (DIN 4084) auf der Grundlage des summarischen Sicherheitskonzeptes in Verbindung mit dem MSD, Ausgabe 1998 und des Sicherheitskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN 1054:2005-01 in Verbindung mit dem MSD, Ausgabe August 2005 durchgeführt.

Ziel des Vergleiches ist es, eventuelle Veränderungen des Sicherheitsniveaus bei Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Vergleich zum bisherigen Sicherheitsniveau auf der Grundlage von summarischen Sicherheiten zu zeigen.

Weitere Vergleichsberechnungen zur Standsicherheiten wurden anhand von Finite-Elemente-Modellen unter Verwendung der Phi-c-Reduktion mit dem Ziel durchgeführt, die jeweils maßgeblichen Versagensmechanismen zu finden und die dazugehörige Sicherheit nach der Fellenius-Regel im Sinne des neuen Teilsicherheitskonzeptes zu bestimmen.

Der Umfang der durchgeführten Untersuchungen und die ermittelten Ergebnisse werden an einem Dammquerschnitt aus dem Bereich des Wesel-Datteln-Kanals beispielhaft dargestellt.

2 Damm des Wesel-Datteln-Kanals

BAUGRUND DRESDEN wurde vom Wasser- und Schifffahrtsamtes Duisburg-Meiderich beauftragt, ein Baugrundgutachten und Standsicherheitsberichte im Rahmen der Dammnachsorge am Wesel-Datteln-Kanal, Los I zu erstellen. Nachdem in der ersten Bearbei-

tungsphase die Erkundung von Dammaufbau und Untergrund, die Errichtung von Grundwassermessstellen, die Durchführung von bodenmechanischen Laborversuchen und die Baugrundbeurteilung erfolgt waren, wurde in der zweiten Bearbeitungsphase die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Dämme in ausgewählten maßgebenden Querschnitten untersucht. Die Berechnungen zur Böschungsstandsicherheit wurden nach dem summarischen Sicherheitskonzept auf der Grundlage des MSD von 1998 durchgeführt. Die Vergleichsberechnungen mit Teilsicherheitsbeiwerten, die nicht zur o.g. Beauftragung gehörten, wurden erst nach Einführung des MSD 2005 zusätzlich vorgenommen.

Der ausgewählte Dammquerschnitt befindet sich am km 38,10 am Nordufer des Wesel-Datteln-Kanals bei Marl in Nordrhein-Westfalen (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Dammabschnitt bei km 38,10 am Nordufer des Wesel-Datteln-Kanals

Der tiefere Untergrund wird durch kreidezeitlichen Mergel gebildet, der von Fluss- und Schmelzwassersanden mit mehreren Metern Mächtigkeit überlagert wird. Darüber folgt holozäner Auesand von ca. 5 m Dicke mit Auelehmschichten.

Der ausgewählte Dammabschnitt liegt im Einwirkungsbereich des Steinkohlenabbaus. Im Zeitraum 1930 bis 2002 sind hier etwa 3 m Senkungen eingetreten. Die ursprünglich aus örtlichem Aushubmaterial (Sand) geschütteten Dämme wurden zum Ausgleich der Bergsenkungen nachträglich mit Anschüttungen aus Waschberge – einem bei der Steinkohlegewinnung anfallenden Material – erhöht und verbreitert. Wo erforderlich, wurde bei den Erhöhungen eine Fußspundwand am landseitigen Dammfuß angeordnet. Das Dammvorland ist durch Auffüllungen aus Sand und Waschberge zum Ausgleich der Senkungen geprägt.



Abb. 2: Dammkrone und Wasserseite des Dammes bei km 38,10 am Nordufer des Wesel-Datteln-Kanals

Der Damm ist im betrachteten Abschnitt ca. 9 m hoch. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, verläuft auf der Dammkrone ein Betriebsweg. Die landseitige Böschung wurde mit einer Neigung von 1:3 hergestellt. Die wasserseitige Böschung ist mit einer Tondichtung, einem Mineralfilter und einer Steinschüttung versehen und besitzt Neigungen von ca. 1:3,6 (oberer Teil) bzw. 1:2,5 (unterer Teil). Auf der Kanalsohle setzt sich der beschriebene Aufbau fort.

Mittlere Grundwasserstände im Vorland liegen ca. 2,5 m unter OK Gelände. Maximale Grundwasserstände bei Hochwasser der etwa 350 m entfernten Lippe können die Geländeoberkante erreichen.

Der den Vergleichsberechnungen zugrunde liegende obere Betriebswasserstand BWo befindet sich reichlich 3 m unterhalb der Dammkrone.

3 Berechnungsmodelle für Grundwasserströmungen und Standsicherheiten

Abb. 3 zeigt das Geometriemodell, das sowohl die Grundlage für Modelle der Sickerlinienberechnungen als auch für Modelle der Standsicherheitsanalysen bildet.

Für die Vergleichsberechnungen nach herkömmlichem und neuem Sicherheitskonzept wurde die Sickerlinie im Damm als ein Ergebnis stationärer Grundwasserströmungsberechnungen nach Finite-Elemente-Methode (FEM) im ebenen zweidimensionalen System ermittelt (Programm GGU-SS-FLOW 2D). Die Ergebnisse der Grundwasserströmungsbe-

rechnungen (Porenwasserdruckverteilungen) werden dann direkt in die Modelle zur Standsicherheitsberechnung übernommen (Programm GGU-STABILITY).

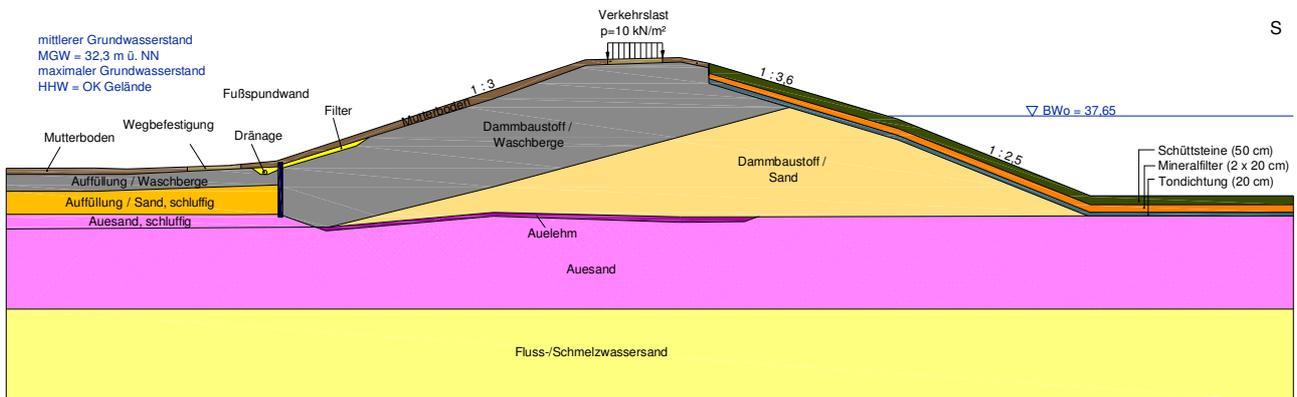


Abb. 3: Geometrisches Modell für den Dammquerschnitt WDK Los I km 38,10 Nordufer

Bei der Anwendung der Finite-Elemente-Methode (Programm PLAXIS 2D, Version 8.2) zur Berechnung der Grundwasserströmungen und der Standsicherheiten mit der Phi-c-Reduktion wurde ebenfalls die in Abb. 3 dargestellte Geometrie zugrunde gelegt, jedoch mit um 10 m verlängertem Vorland bzw. verlängerter Kanalsohle. Im Unterschied zu den o.g. Vergleichsberechnungen werden die Berechnungen an ein und demselben zwei-dimensionalen Finite-Elemente-Modell durchgeführt (siehe Abb. 4).

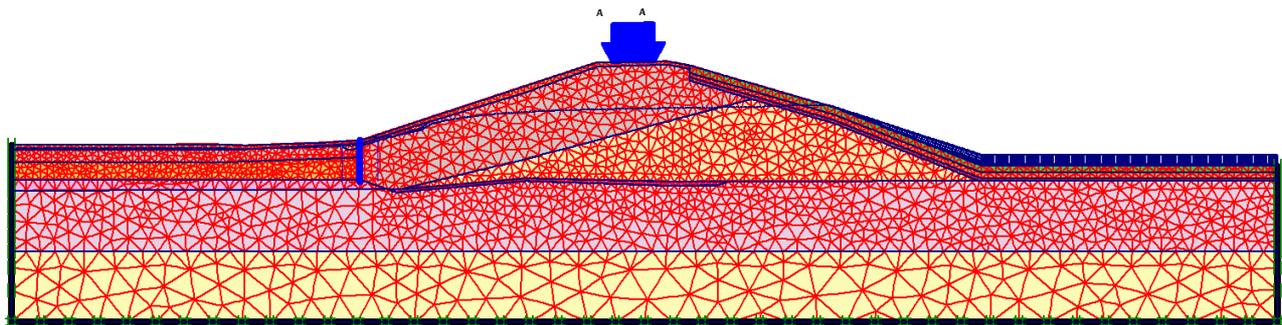


Abb. 4: Finite-Elemente-Modell zur Ermittlung der GW-Strömungen und der Standsicherheit (Phi-c-Reduktion) für den Dammquerschnitt WDK Los I km 38,10 Nordufer

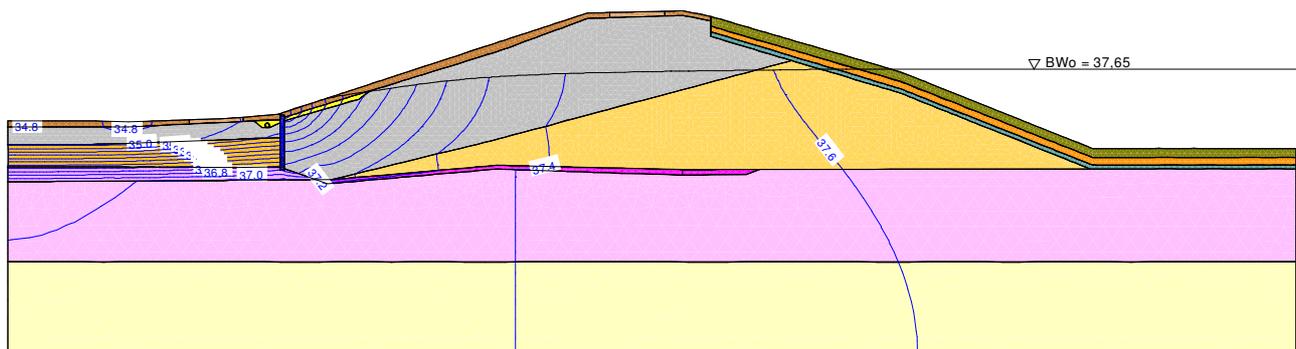
Die Fußsüdwand wurde im hydrogeologischen Modell als nahezu dicht mit einer Durchlässigkeit von $k = 10^{-8}$ m/s und im Modell zur Ermittlung der Böschungsstandsicherheit als Bauteil angesetzt.

In dem in Abb. 4 dargestellten Finite-Elemente-Modell wurde die Fußsüdwand mit Stabelementen, die von aktivierten Interface-Elementen umschlossen sind, modelliert. Bei dieser Konfiguration ist die Fußsüdwand vollständig undurchlässig.

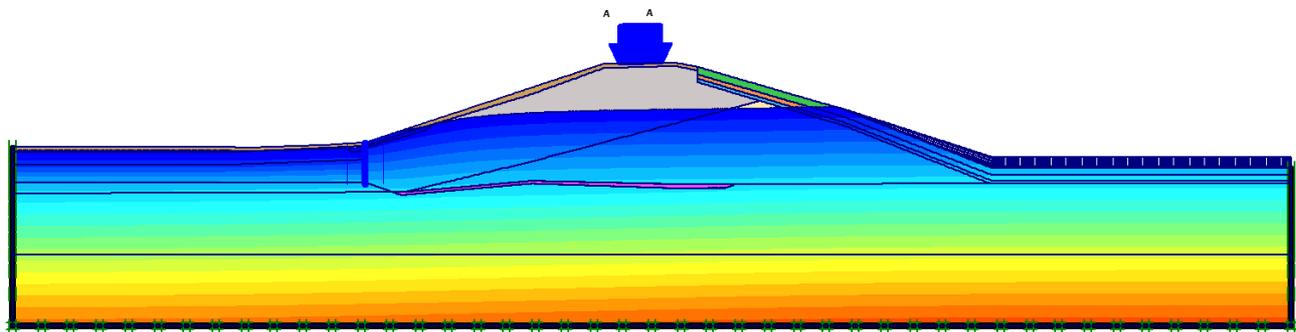
In Abb. 5 sind die Sickerlinien für den Lastfall 4 mit Ausfall der Tondichtung und der Dränage nach beiden Finite-Elemente-Berechnungen dargestellt. Es zeigte sich für alle untersuchten Lastfälle, dass die unterschiedliche Modellierung der Fußsüdwand und die Anwendung verschiedener Software keine Auswirkungen auf Sickerlinie haben.

Als Verkehrslast auf dem Betriebsweg entlang der Dammkrone wurde $p_v = 10$ kN/m² berücksichtigt.

| Boden | k_x [L/T] | k_y [L/T] | n_{eff} [-] | Bezeichnung |
|---|-----------------------|-----------------------|------------------|-------------------------------|
|  | $4.000 \cdot 10^{-6}$ | $4.000 \cdot 10^{-6}$ | 0.15 | DBS und Auffüllung/Waschberge |
|  | $5.000 \cdot 10^{-7}$ | $5.000 \cdot 10^{-7}$ | 0.15 | Auffüllung/Sand, schluffig |
|  | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | 0.20 | Dammbaustoff/Sand |
|  | $4.000 \cdot 10^{-6}$ | $4.000 \cdot 10^{-6}$ | 0.15 | Filter/Dränage |
|  | $1.000 \cdot 10^{-9}$ | $1.000 \cdot 10^{-9}$ | 0.10 | Auelehm |
|  | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | 0.20 | Auesand |
|  | $5.000 \cdot 10^{-7}$ | $5.000 \cdot 10^{-7}$ | 0.15 | Auesand, schluffig |
|  | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | 0.20 | Fluss-/Schmelzwassersand |
|  | $5.000 \cdot 10^{-5}$ | $5.000 \cdot 10^{-5}$ | 0.20 | Mutterboden |
|  | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | 0.20 | Wegbefestigung |
|  | $1.000 \cdot 10^{-2}$ | $1.000 \cdot 10^{-2}$ | 0.20 | Schüttsteine |
|  | $1.000 \cdot 10^{-3}$ | $1.000 \cdot 10^{-3}$ | 0.20 | Mineralfilter |
|  | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | $1.000 \cdot 10^{-4}$ | 0.20 | Tondichtung |
|  | $1.000 \cdot 10^{-8}$ | $1.000 \cdot 10^{-8}$ | 0.10 | Fußspundwand |



a)



b)

Abb. 5: Sickerlinie und Potentiallinien für Lastfall 4 (Ausfall von Tondichtung und Filter/Dränage) a) Berechnung mit GGU-SS-FLOW 2D, b) Berechnung mit PLAXIS 2D, Version 8.2

Nach dem Merkblatt „Standicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“ und den Vorgaben des Wasser- und Schifffahrtsamtes sind 2 Lastfälle (LF 1 und 3) für Land- und Wasserseite sowie ein zusätzlicher Lastfall (LF 4) für die Landseite zu untersuchen.

Im Lastfall 1 sind ständige Lasten und regelmäßig auftretende Verkehrslasten zu berücksichtigen. Bei vorliegender voll gedichteter Kanalstrecke sind die Dichtungs- bzw. Sicherungselemente (Böschungs- und Sohlendichtung) als intakt anzusetzen. Die am landseitigen Dammfuß befindliche Schicht „Filter/Dränage“ wird als voll wirksam angesetzt. Ein häufig möglicher erhöhter Grundwasserstand wird in Höhe Dränagesohle (34,5 m ü. NN) berücksichtigt.

Im Lastfall 3 sind in Ergänzung zum Lastfall 1 gleichzeitig mögliche außerplanmäßige Lasten, wie z.B. Ausfall von Betriebs- und Sicherungsvorrichtungen, Unfälle, außergewöhnliche Kanalwasserstände, zu berücksichtigen. Dieser Lastfall schließt das Versagen

des 1. Sicherungselementes, d.h. die hydraulische Unwirksamkeit der gesamten Tondichtung, ein.

Im Lastfall 4 sind zusätzlich zum Lastfall 3 nicht völlig auszuschließende Einwirkungen berücksichtigt. Das betrifft den Ausfall des 2. Sicherungselementes, d.h. hydraulische Unwirksamkeit der Schicht „Filter/Dränage“.

Die für die Strömungs- und Standsicherheitsberechnungen erforderlichen charakteristischen Kennwerte für die Dammbaustoffe und Untergrundschichten stützten sich auf die Ergebnissen der Erkundung und der Laborversuche. Für die Tondichtung, den Mineralfilter und die Steinschüttung wurden Erfahrungswerte angesetzt.

4 Berechnungskennwerte nach altem und neuem Sicherheitskonzept

Zwischen den Verfahrensweisen nach altem und neuem MSD gibt es Unterschiede bezüglich des Ansatzes der Kohäsion und Festlegung von Rechenwerten.

Nach MSD 1998 war die Kohäsion rechnerisch nur zu 75 % des charakteristischen Wertes anzusetzen. Dafür durften abweichend von DIN 4084 (1981) die in Tab. 1 angegebenen, geringeren erforderlichen Sicherheiten auch für Lamellenverfahren angewendet werden.

Nach MSD 2005 darf die Kohäsion in voller Höhe des charakteristischen Wertes (zu 100 %) angesetzt werden.

Tab. 1: Erforderliche Sicherheiten nach MSD 1998

| erforderliche Sicherheiten nach MSD 1998 | Lastfälle | | | |
|---|-----------|------|------|------|
| | LF 1 | LF 2 | LF 3 | LF 4 |
| erf η | 1,30 | 1,20 | 1,10 | 1,00 |

In Tab. 2 sind die für die Vergleichsberechnungen verwendeten Kennwerte der Baugrundschichten und Dammbaustoffe zusammengestellt. Die für Mutterboden angegebene Kohäsion ist die Durchwurzelungskohäsion c_w für eine mäßig dichte Grasnarbe.

Bei den Untersuchungen nach MSD 1998 wurde die vorhandene Sicherheit der Böschung mit den in Tab. 2 enthaltenen Kennwerten (Kohäsion nach Spalte 4) direkt berechnet und anschließend mit der erforderlichen Sicherheit nach Tab. 1 verglichen. Zum Nachweis einer ausreichenden Böschungsstandsicherheit war die folgende Bedingung einzuhalten:

$$\eta_{\text{vorh.}} \geq \eta_{\text{erf.}} \quad (1)$$

Bei den Nachweisen nach MSD 2005 ergeben sich die Bemessungswerte der Widerstände durch Division der in Tab. 2 angegebenen charakteristischen Werte (Kohäsion nach Spalte 5) durch die Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände nach Tab. 3:

$$\tan \varphi'_d = \tan \varphi'_k / \gamma_\varphi \quad (2a) \quad \text{und} \quad c'_d = c'_k / \gamma_c \quad (2b)$$

Tab. 2: Charakteristische Werte der Baugrundsichten und Dammbaustoffe einschl. Abminderung nach MSD 1998 für den Querschnitt WDK Los I km 38,10 Nordufer

| Bezeichnung der Schicht | Wichte des Bodens γ [kN/m ³] | Reibungswinkel des dränierten Bodens φ' bzw. φ'_k [°] | Kohäsion des dränierten Bodens c' [kN/m ²] | |
|-------------------------------------|---|---|---|------------------------------|
| | | | MSD 1998 75 % von c'_k | MSD 2005 100 % von c'_k |
| Dammbaustoff, Auffüllung/Waschberge | 20 | 34 | 4 | 5,3 |
| Dammbaustoff/Sand | 18 | 31 | 0 | 0 |
| Auffüllung/schluffiger Sand | 19,5 | 32 | 3 | 4 |
| Filter/Dränage | 19 | 33 | 0 | 0 |
| Auelehm | 18,5 | 23 | 4,5 | 6 |
| Auesand | 18,5 | 33 | 0 | 0 |
| Auesand, schluffig | 19,5 | 32 | 3 | 4 |
| Fluss-/Schmelzwassersand | 19 | 35 | 0 | 0 |
| Mutterboden | 15 | 28 | 3 | 4 |
| Wegbefestigung | 19 | 34 | 0 | 0 |
| Steinschüttung | 18 | 36 | 0 | 0 |
| Mineralfilter | 18 | 34 | 0 | 0 |
| Tondichtung | 19 | 23 | 10 | 13 |

Tab. 3: Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände im GZ 1C nach DIN 1054:2005-01 und MSD 2005

| Einwirkungen bzw. Widerstände | Teilsicherheitsbeiwerte | Lastfälle | | | |
|---|-------------------------|-----------|------|------|------|
| | | LF 1 | LF 2 | LF 3 | LF 4 |
| ständige Einwirkungen | γ_G | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| ungünstig veränderliche Einwirkungen | γ_Q | 1,30 | 1,20 | 1,00 | 1,00 |
| Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens | γ_φ | 1,25 | 1,15 | 1,10 | 1,00 |
| Kohäsion c' des dränierten Bodens | γ_c | | | | |

Nach dem Teilsicherheitskonzept ist eine ausreichende Sicherheit dann gegeben, wenn der Ausnutzungsgrad μ des Bemessungswiderstandes nach E DIN 4084:2002-11 die folgende Bedingung erfüllt:

$$\mu \leq 1,0 \quad (3)$$

Nach MSD 2005 ist der Nachweis der Sicherheit der Gesamtböschung im Rahmen des Nachweises des Grenzzustandes GZ 1C (Verlust der Gesamtstandsicherheit) zu führen. Er entspricht dem Nachweis der globalen Standsicherheit nach MSD 1998.

Wird die lokale Standsicherheit der Böschung mit Gleitkreisen (bei bindigem Dammbaustoff) bzw. mit böschungsparellen Gleitflächen oder als Tangensvergleich (bei nichtbindigem Dammbaustoff) nachgewiesen, sind die Teilsicherheitsbeiwerte nach Tab. 3 bzw. der Bemessungswert des Reibungswinkels φ_d anzusetzen.

Bei dem vereinfachten Nachweis der lokalen Standsicherheit einer lückenlos mit Gras bewachsenen Böschung für die Lastfälle 3 und 4 unterhalb der potenziellen Sickerlinienaustrittsstelle ist der charakteristische Wert des Reibungswinkels φ_k zu verwenden ($\beta \leq \varphi_k / 2$).

5 Ergebnisse der Vergleichsberechnungen

Für land- und wasserseitige Böschung wurde für die Lastfälle 1 und 3 sowie für die Landseite für Lastfall 4 die Standsicherheit der Dammböschungen mit den Kennwerten nach Tab. 2 nach dem summarischen Sicherheitskonzept (MSD 1998) und nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten (MSD 2005) ermittelt.

Mit der zur Verfügung stehenden Software (GGU-STABILITY) können Standsicherheitsberechnungen nach beiden Sicherheitskonzepten ausgeführt werden. Die Berechnungsergebnisse sind in Tab. 4 gegenübergestellt.

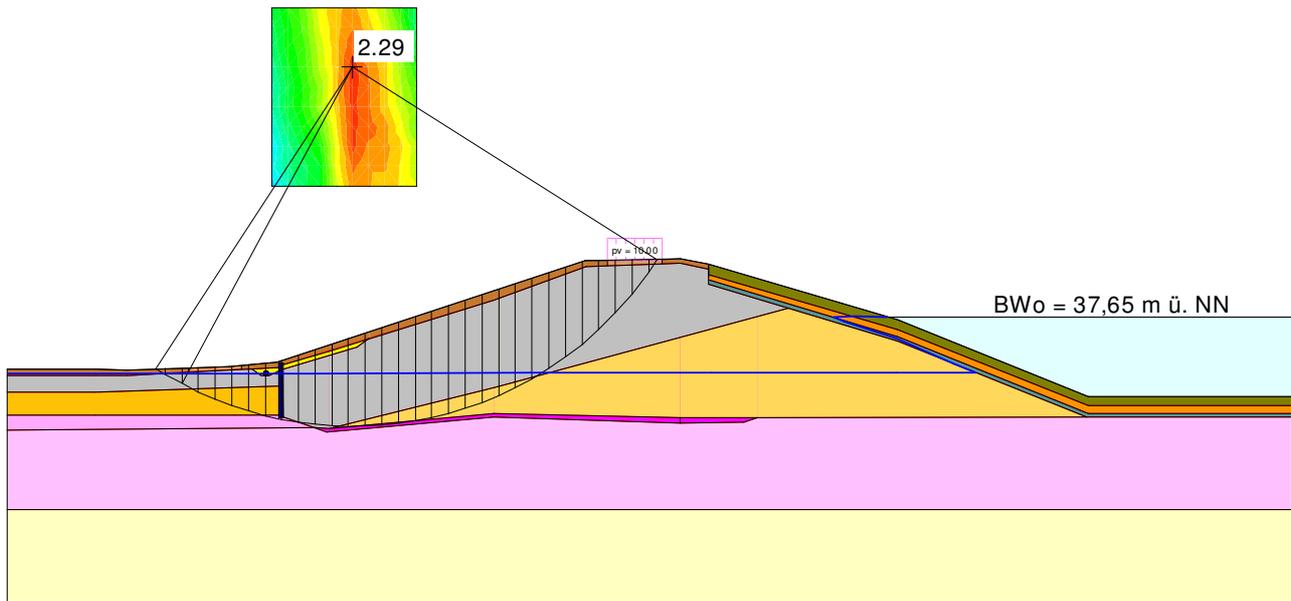
Tab. 4: Berechnungsergebnisse für Querschnitt WDK Los I km 38,10 Nordufer nach altem und neuem Sicherheitskonzept

| Böschung | Lastfall | MSD 1998 | | MSD 2005 |
|------------------|----------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | Gesamtsicherheit vorh η | Ausnutzungsgrad μ ^{*)} | Ausnutzungsgrad μ |
| Wasserseite | 1 | 2,87 | 0,45 | 0,44 |
| Landseite | 1 | 2,29 | 0,57 | 0,53 |
| Wasserseite | 3 | 1,75 | 0,63 | 0,62 |
| Landseite | 3 | 1,57 | 0,70 | 0,68 |
| Landseite Global | 4 | 1,55 | 0,65 | 0,63 |
| Landseite Lokal | 4 | 1,39 | 0,72 | 0,62 |

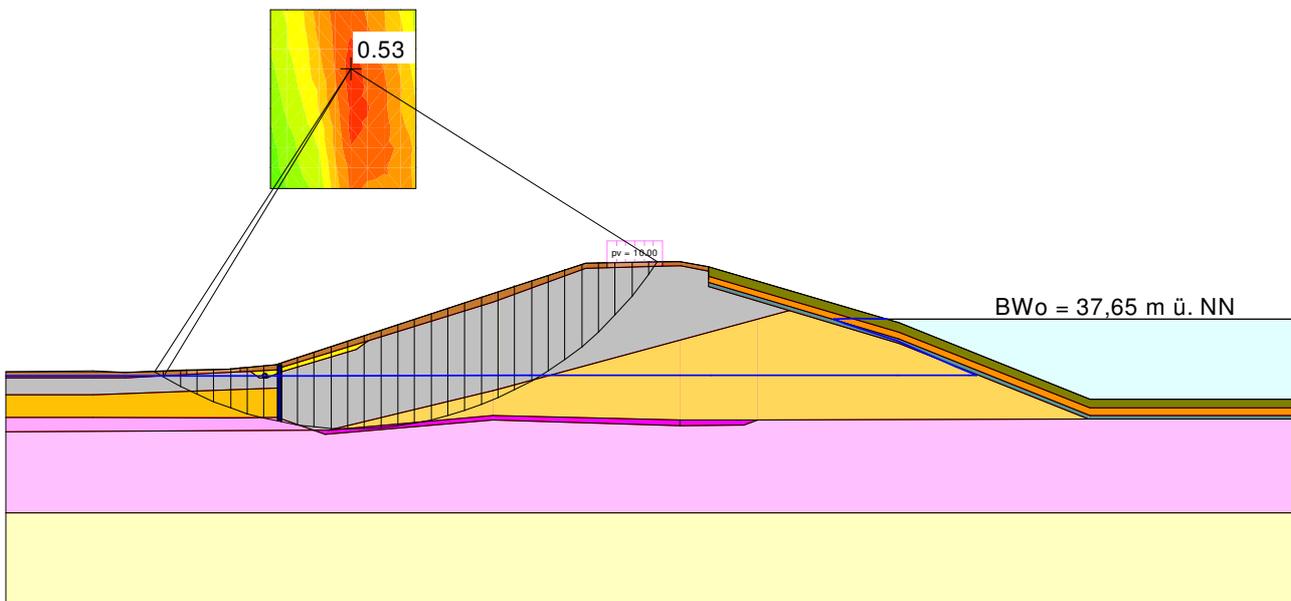
^{*)} Der aus der Gesamtsicherheit η für Vergleichszwecke umgerechnete Ausnutzungsgrad ergibt sich aus $\mu = 1/\eta \cdot \text{erf } \eta$.

Die Berechnungen nach altem und neuem Sicherheitskonzept liefern in den meisten Fällen ähnliche Ergebnisse, d.h. ein weitgehend ähnliches Sicherheitsniveau.

Der Ausnutzungsgrad nach dem neuen Konzept ist tendenziell etwas geringer als nach dem alten Konzept. Die Ursache dafür liegt hauptsächlich in der nach altem Konzept auf 75 % des charakteristischen Wertes abgeminderten, rechnerisch angesetzten Kohäsion. Deshalb sind die nach Tab. 4 ermittelten Unterschiede für die Landseite mit bindigeren Materialien größer als für die Wasserseite (vgl. auch Abb. 6).



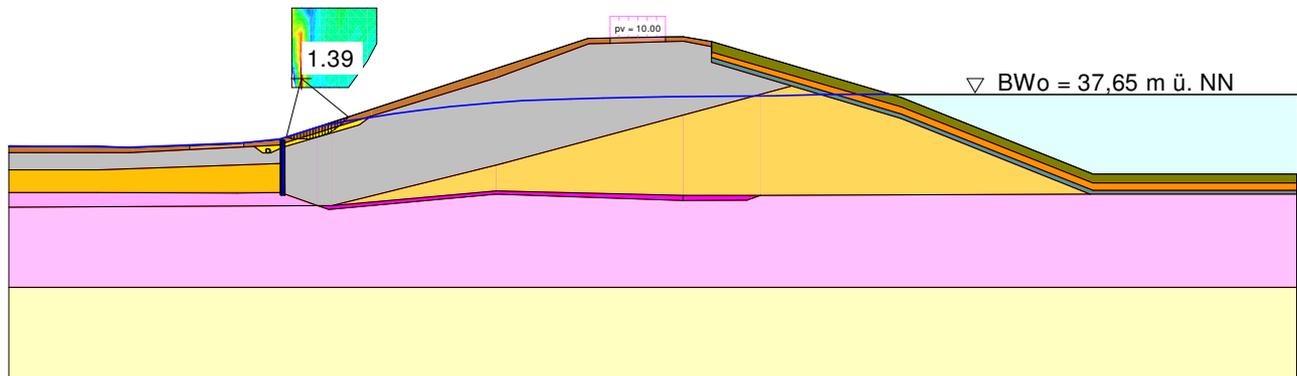
a)



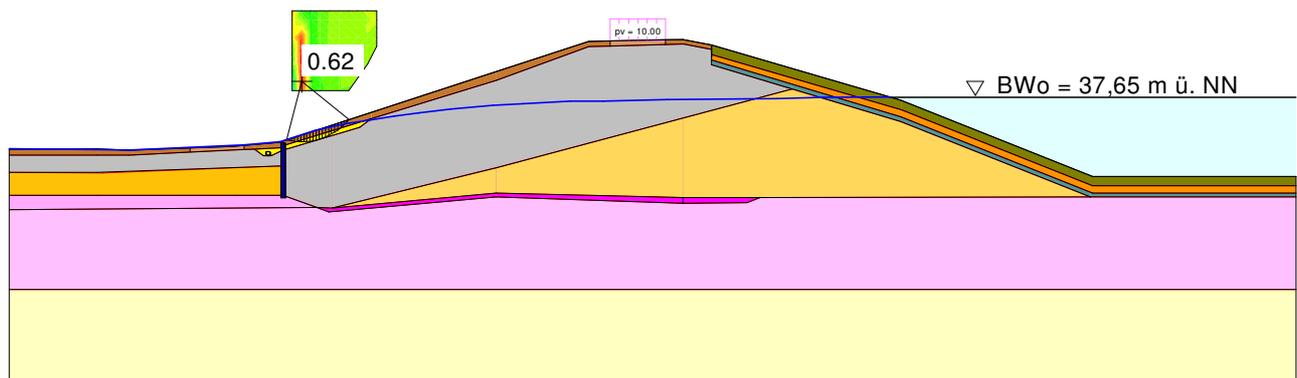
b)

Abb. 6: Böschungsstandsicherheit Lastfall 1 Landseite Querschnitt WDK Los I km 38,10 Nordufer, a) nach MSD 1998, b) nach MSD 2005

Die größte Differenz zwischen den Ergebnissen nach altem und neuem Konzept ergaben sich für die lokale Sicherheit der Landseite im Lastfall 4. Der kleine Gleitkreis verläuft nur in der Filterschicht ($c = 0$) und im Mutterboden (Durchwurzelungskohäsion), vgl. Abb. 7. Der Anteil der Durchwurzelungskohäsion an der Tragsicherheit ist damit groß. Die nach MSD 1998 vorgegebene Abminderung auf 75 % des charakteristischen Wertes der Kohäsion führt zu dem höheren Ausnutzungsgrad im Vergleich zum neuen Konzept.



a)



b)

Abb. 7: Lokale Sicherheit der landseitigen Böschung im Lastfall 4, Querschnitt WDK Los I km 38,10 Nordufer, a) nach MSD 1998, b) nach MSD 2005

6 Einfluss der Widerstände und Einwirkungen auf den Ausnutzungsgrad

6.1 Einfluss des Bodenwiderstandes „Kohäsion“

Anhand der vorgenommenen Vergleichsberechnungen wurde festgestellt, dass die Kohäsion infolge der Abminderung nach MSD 1998 zu größeren Unterschieden in den Ergebnissen nach altem und neuem Konzept führt. Da die Materialien im betrachteten Dammschnitt wenig bindig sind und somit geringe Kohäsionswerte aufweisen, wird nachfolgend zusätzlich gezeigt, wie Schichten mit großen Werten der Kohäsion die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen beeinflussen.

Dazu wurden am vorn betrachteten Beispiel die Dammbaustoffe als bindige Materialien mit Kennwerten nach Tab. 5 angenommen. Für alle weiteren Schichten gelten unverändert die Kennwerte nach Tab. 2. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 zusammengestellt.

Tab. 5: Charakteristische Werte einschließlich Abminderung nach MSD 1998 für Vergleichsberechnungen mit bindigen Dammbaustoffen

| Bezeichnung der Schicht | Wichte des Bodens γ [kN/m ³] | Reibungswinkel des dränierten Bodens φ' bzw. φ'_k [°] | Kohäsion des dränierten Bodens c' [kN/m ²] | |
|------------------------------------|---|---|---|----------------------------|
| | | | MSD 1998 $c' = 75\%$ | MSD 2005 $c'_k = 100\%$ |
| Dammbaustoff und Auffüllung/bindig | 20 | 25 | 7,5 | 10 |
| Dammbaustoff/Schluff | 18 | 26 | 6 | 8 |

Tab. 6: Ergebnisse der Vergleichsberechnungen zum Einfluss der Kohäsion nach altem und neuem Sicherheitskonzept

| Böschung | Lastfall | MSD 1998 | | MSD 2005 |
|-------------|----------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | | Gesamtsicherheit vorh η | Ausnutzungsgrad μ *) | Ausnutzungsgrad μ |
| Wasserseite | 1 | 2,71 | 0,48 | 0,44 |
| Landseite | 1 | 2,12 | 0,61 | 0,57 |
| Wasserseite | 3 | 1,85 | 0,60 | 0,56 |
| Landseite | 3 | 1,51 | 0,73 | 0,69 |
| Landseite | 4 | 1,49 | 0,67 | 0,63 |

*) Der aus der Gesamtsicherheit η für Vergleichszwecke umgerechnete Ausnutzungsgrad ergibt sich aus $\mu = 1/\eta \cdot \text{erf } \eta$.

Die Ergebnisse nach Tab. 6 zeigen, dass auch bei bindigen Materialien mit vergleichsweise großer Kohäsion nach altem und neuem Sicherheitskonzept ein ähnliches Sicherheitsniveau ermittelt wird. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen nach MSD 1998 und MSD 2005 sind jedoch überwiegend etwas größer als bei nicht bzw. schwach bindigen Böden und verdeutlichen den Einfluss der Größe der Kohäsion bzw. ihr Anteil an der Tragsicherheit auf den Ausnutzungsgrad.

6.2 Einfluss der veränderlichen Einwirkung „Verkehrslast“

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass nicht nur die Widerstände sondern auch die veränderlichen Einwirkungen den Ausnutzungsgrad beeinflussen. Dazu wird die Verkehrslast auf dem Betriebsweg entlang der Dammkrone um den Faktor 5 auf $p_v = 50 \text{ kN/m}^2$ erhöht. Alle weiteren Annahmen bleiben gegenüber Abschnitt 2 bis 4 unverändert.

Analog den Ergebnissen nach Tab. 4 ergeben sich nach altem und neuem Sicherheitskonzept ähnliche Ergebnisse. Wie die in Tab. 7 enthaltenen Ausnutzungsgrade nach altem und neuem Sicherheitskonzept zeigen, besitzt die absolute Größe der Verkehrslast keinen nennenswerten Einfluss auf das Sicherheitsniveau.

Tab. 7: Ergebnisse der Vergleichsberechnungen zum Einfluss der Verkehrslast nach altem und neuem Sicherheitskonzept

| Böschung | Lastfall | MSD 1998 | | MSD 2005 |
|-------------|----------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | Gesamtsicherheit vorh η | Ausnutzungsgrad μ ^{*)} | Ausnutzungsgrad μ |
| Wasserseite | 1 | 2,54 | 0,51 | 0,51 |
| Landseite | 1 | 2,10 | 0,62 | 0,60 |
| Wasserseite | 3 | 1,67 | 0,66 | 0,65 |
| Landseite | 3 | 1,49 | 0,74 | 0,72 |
| Landseite | 4 | 1,47 | 0,68 | 0,66 |

^{*)} Der aus der Gesamtsicherheit η für Vergleichszwecke umgerechnete Ausnutzungsgrad ergibt sich aus $\mu = 1/\eta \cdot \text{erf } \eta$.

Durch große Verkehrslasten kann die durch Abminderung der Kohäsion nach MSD 1998 bedingten Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Konzepte teilweise etwas verringert bzw. völlig ausgeglichen werden, da der Einfluss der Kohäsion gegenüber dem Einfluss der Verkehrslast dann in den Hintergrund tritt.

6.3 Einfluss der außergewöhnlichen Einwirkung „Erdbeben“

Für den ausgewählten Dammabschnitt am Wesel-Datteln-Kanal sind zwar keine Einwirkungen infolge Erdbeben relevant. Für Dämme in anderen Regionen, wie z.B. an Rhein, Main, Neckar und Donau, sollten Einwirkungen infolge Erdbeben jedoch nicht ausgeschlossen werden.

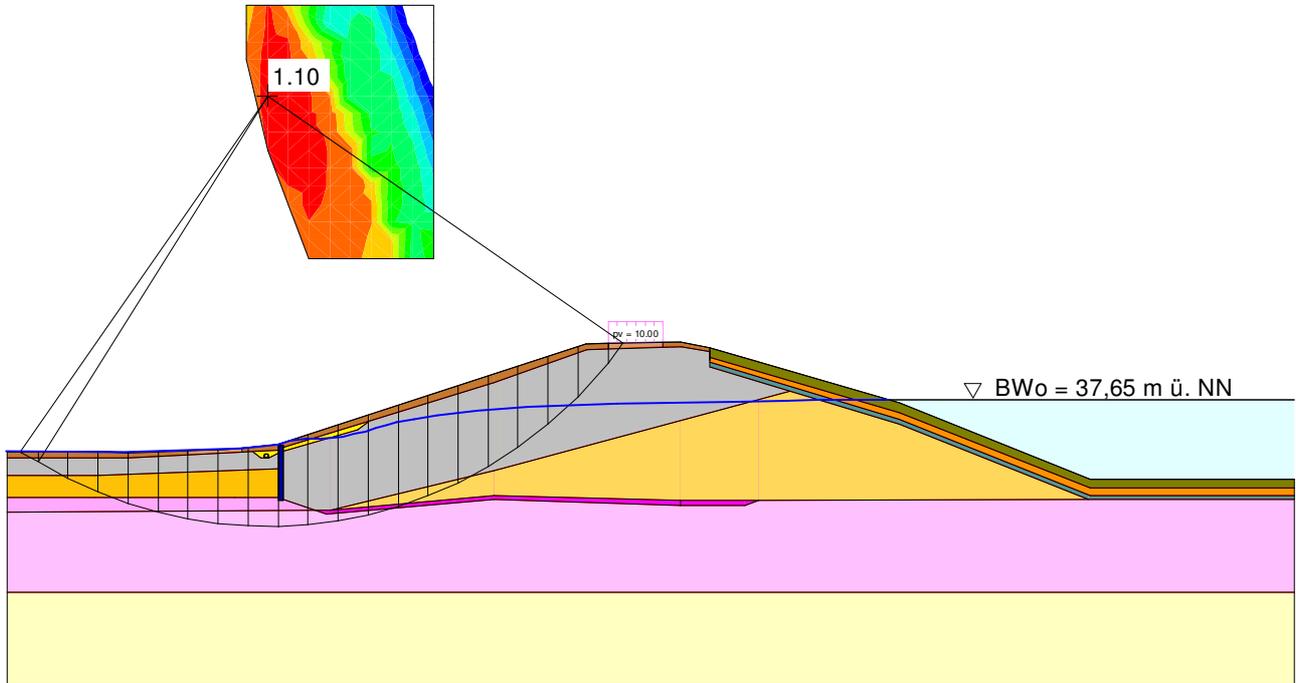
Beispielhaft wird eine horizontale Beschleunigung $a_h = 0,70 \text{ m/s}^2$ und eine vertikale Beschleunigung in Höhe $a_v = a_h / 2$ als Erdbebeneinwirkung auf den Damm angesetzt. Das entspricht in grober Näherung in Abhängigkeit von den Untergrund- und Standortverhältnissen einer Intensität von I = 6 bis 7 der MSK-Skale (Medwedew, Sponheuer, Karnik).

Nach altem und neuem Sicherheitskonzept ergeben sich analog den Ergebnissen nach Tab. 4 auch bei Einwirkung durch Erdbeben ähnliche Ergebnisse (vgl. Tab. 8).

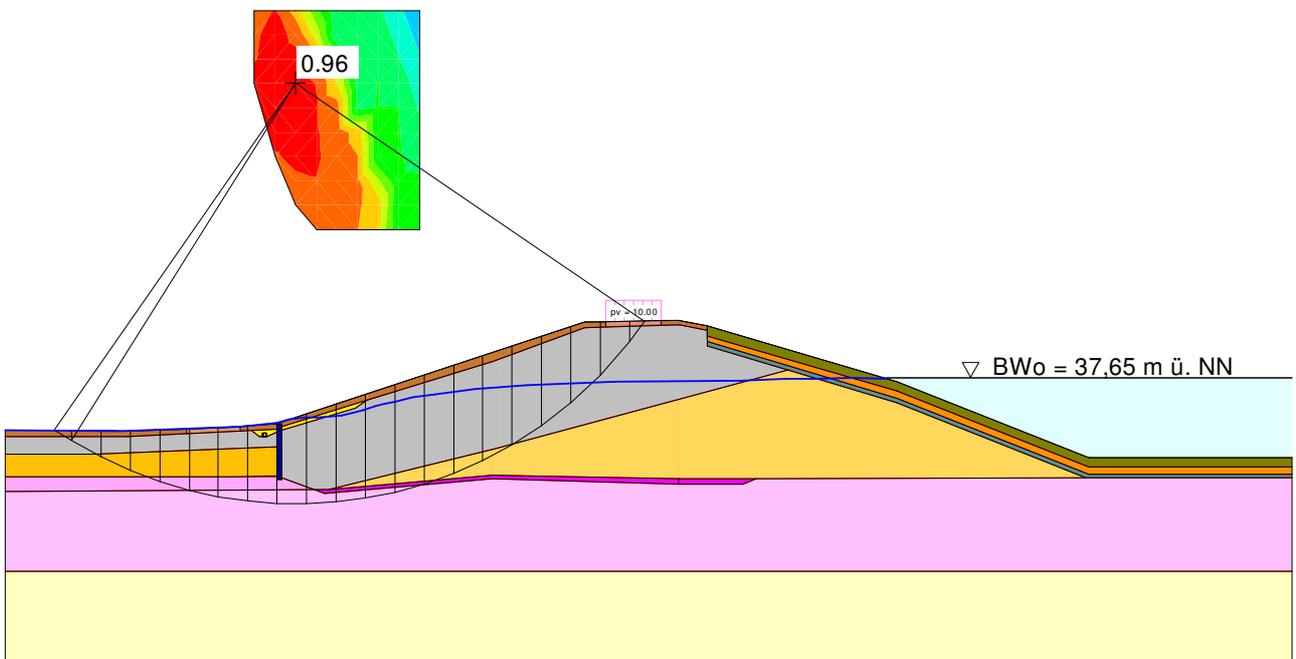
Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen nach beiden Konzepten sind nur geringfügig bzw. nur in einigen Fällen größer als ohne Erdbebeneinwirkung.

Der größte Unterschied zwischen den Ergebnissen nach altem und neuem Sicherheitskonzept ergibt sich für die lokale Sicherheit der Landseite im Lastfall 4. Hier bewirkt die höhere, rechnerisch berücksichtigte Durchwurzelungskohäsion der Mutterbodendeckung (100 % des charakteristischen Wertes) nach dem neuen Konzept einen deutlich kleineren Ausnutzungsgrad (ähnlich den Ergebnissen nach Tab. 4).

Für die Landseite wurde nach dem alten Konzept im Lastfall 3 bei der angesetzten Erdbebeeinwirkung eine vorhandene Gesamtsicherheit in Höhe der erforderlichen Sicherheit ermittelt, was einem umgerechneten Ausnutzungsgrad $\mu = 1,0$ entspricht. Nach dem neuen Konzept ist der Ausnutzungsgrad jedoch kleiner als 1,0 (vgl. Abb. 8).



a)



b)

Abb.8: Böschungsstandsicherheit Lastfall 3 Landseite bei Einwirkung infolge Erdbeben, a) mit summarischem Sicherheitsbeiwerten, b) mit Teilsicherheitsbeiwerten

Tab. 8: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen zum Einfluss der außergewöhnlichen Einwirkung Erdbeben nach altem und neuem Sicherheitskonzept

| Böschung | Lastfall | MSD 1998 | | MSD 2005 |
|---------------------|----------|---------------------------------|--|-----------------------|
| | | Gesamtsicherheit vorh η | Ausnutzungsgrad μ ^{*)} | Ausnutzungsgrad μ |
| Wasserseite | 1 | 2,15 | 0,61 | 0,58 |
| Landseite | 1 | 1,77 | 0,73 | 0,69 |
| Wasserseite | 3 | 1,23 | 0,90 | 0,88 |
| Landseite | 3 | 1,10 | 1,00 | 0,96 |
| Landseite Global | 4 | 1,09 | 0,92 | 0,88 |
| Landseite Lokal | 4 | 1,07 | 0,93 | 0,80 |

^{*)} Der aus der Gesamtsicherheit η für Vergleichszwecke umgerechnete Ausnutzungsgrad ergibt sich aus $\mu = 1/\eta \cdot \text{erf } \eta$.

7 Vergleich der Standsicherheitsuntersuchungen mit dem Gleitkreis-Lamellenverfahren und mit der Finite-Elemente-Methode

7.1 Theoretische Grundlagen zu Standsicherheitsberechnungen mit der Finite-Elemente-Methode

Grundlage für Standsicherheitsuntersuchungen mit der FEM sind Betrachtungen des vollständigen plastischen Grenzzustandes mit statisch zulässigen Spannungsfeldern und kinematisch zulässigen Feldern der Deformationsraten. Bei der verwendeten Software (PLAXIS 2D, Version 8.2) wird dabei die Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb in Verbindung mit einer über den Dilatanzwinkel definierten nicht assoziierten Fließregel abgefragt. Die programmtechnische Umsetzung erfolgt durch die sogenannte Phi-c-Reduktion, bei der die Scherfestigkeitsparameter $\tan \varphi$ und c aller mit dem elasto-plastischen Mohr-Coulomb-Modell beschriebenen Schichten so lange reduziert werden, bis ein Versagen des Gesamtsystems eintritt. Die Sicherheit des Systems definiert sich dabei wie folgt:

$$M_{sf} = \tan \varphi_{input} / \tan \varphi_{reduziert} = c_{input} / c_{reduziert} \quad (4)$$

Die sich nach (4) ergebende Sicherheit M_{sf} berechnet sich aus dem Verhältnis der vorhandenen Scherfestigkeit ($\tan \varphi_{input}$, c_{input}) zur Scherfestigkeit im Grenzzustand ($\tan \varphi_{reduziert}$, $c_{reduziert}$). Diese Sicherheitsdefinition geht auf Fellenius zurück und wird auch Fellenius-Regel genannt. Der reziproke Wert $1/M_{sf}$ entspricht dem Ausnutzungsgrad μ nach MSD 2005, wenn die Input-Scherparameter aller mit dem Mohr-Coulomb-Modell beschriebenen Schichten als abgeminderte Bemessungswerte $\tan \varphi_d$, c_d und veränderliche Lasten als erhöhte Bemessungswerte q_d für den Grenzzustand GZ 1C gemäß DIN 1054:2005-01 und MSD 2005 vorgegeben werden. Bei Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes lassen sich somit Standsicherheitsberechnungen nach konventionellen Berechnungsmethoden (z.B. Gleitkreis-Lamellenverfahren) und nach der Finite-Elemente-Methode vergleichen. Es ist

jedoch zu beachten, dass mit der FEM jeweils nur der maßgebende Versagensmechanismus ermittelt werden kann. Vorgaben für zu erwartende Versagensmechanismen hinsichtlich globaler und lokaler Standsicherheit auf der Wasser- und Landseite des Dammes sind nicht möglich.

7.2 Versagensmechanismen und Ausnutzungsgrade nach der Finite-Elemente-Methode und nach dem Gleitkreis-Lamellenverfahren

Für die Lastfälle 1, 3 und 4 wurden mit den jeweils geltenden Sickerlinien als Ergebnis der zuvor durchgeführten Berechnungen der stationären Grundwasserströmungen Phi-c-Reduktionen durchgeführt und auf diese Weise die maßgebenden Versagensmechanismen und die zugehörigen Ausnutzungsgrade bestimmt.

Als maßgebender Versagensmechanismus für den Lastfall 1 ergibt sich nach der Phi-c-Reduktion eine oberflächennahe Gleitfläche entlang der Tondichtung. Im Rahmen der Nachsorge von Dämmen wird davon ausgegangen, dass für diesen Versagensfall bei Ausführung einer Regelbauweise eine ausreichende Standsicherheit gegeben ist. Diese Aussage wird mit der durchgeführten FE-Berechnung bestätigt. Die ermittelte Sicherheitsreserve zum Grenzgleichgewicht ($\mu = 0,42$) für die oberflächennahe Gleitfläche entlang der Tondichtung im Lastfall 1 ist sehr groß. Dieser Fall wird deswegen im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Der maßgebende Versagensmechanismus nach der Phi-c-Reduktion für den Lastfall 3 ist in Abb. 9 dargestellt. Er ist dem in Abb. 6b dargestellten Gleitkreis, der als maßgebend mit einem Sicherheitsminimum nach dem Gleitkreis-Lamellenverfahren ermittelt wurde, sehr ähnlich. Es ist jedoch festzustellen, dass sich vor der Fußspundwand kein Gleitkreis sondern ein Mechanismus mit einer Gegengleitfläche ausbildet. Ein Gleitkreis stellt somit nur eine Näherung dar. Der Versagensmechanismus, der das vollständige Grenzgleichgewicht erfüllt, setzt sich dagegen aus 2 Bruchkörpern zusammen.

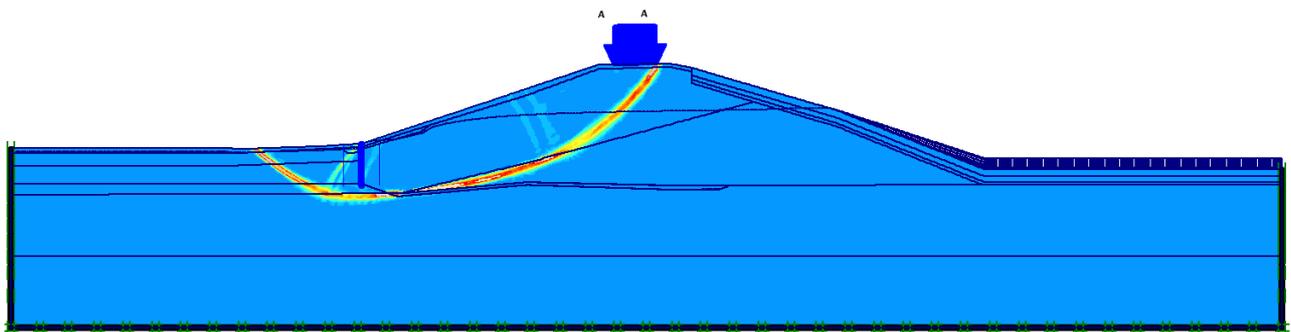


Abb.9: Maßgebender Versagensmechanismus für Lastfall 3 nach der Phi-c-Reduktion

Abb. 10 zeigt den Versagensmechanismus für den Lastfall 4 nach der Phi-c-Reduktion. Dieser Mechanismus ist mit dem im Rahmen der Untersuchung der lokalen Standsicherheit der landseitigen Böschung nach MSD 2005 (siehe Abb. 7b) vergleichbar. Es zeigt sich, dass auch in diesem Fall ein Gleitkreis nur eine Näherung darstellt. Der mit der FEM ermittelte Versagensmechanismus entspricht eher dem Lamellenverfahren nach Janbu oder dem Blockgleiten nach E DIN 4084 (2002).

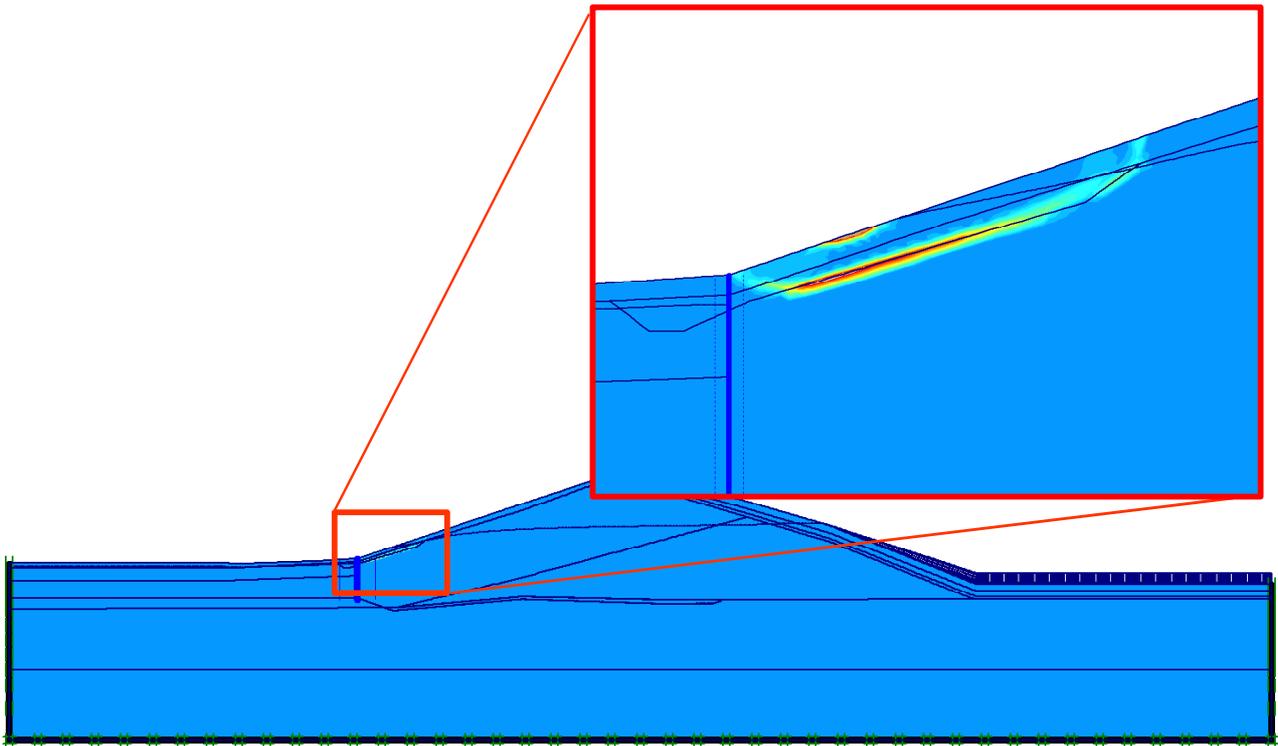


Abb.10: Maßgebender Versagensmechanismus für Lastfall 4 nach der Phi-c-Reduktion

In Tab. 9 sind die Ausnutzungsgrade der Lastfälle 3 und 4 nach dem Teilsicherheitskonzept (MSD 2005) für die maßgebenden Versagensmechanismen nach dem Gleitkreis-Lamellenverfahren und nach FEM zusammengestellt.

Tab. 9: Vergleich der Ausnutzungsgrade für maßgebende Versagensmechanismen nach dem Gleitkreis-Lamellenverfahren und nach FEM

| Böschung | Lastfall | Lamellenverfahren | Finite-Elemente-Methode (Phi-c-reduktion) |
|---------------------|----------|--|--|
| | | Ausnutzungsgrad μ nach MSD 2005 | Ausnutzungsgrad μ nach MSD 2005 |
| Landseite Global | 3 | 0,68 | 0,67 |
| Landseite Lokal | 4 | 0,63 | 0,70 |

Für den Lastfall 3 wird deutlich, dass die beiden sehr ähnlichen Versagensmechanismen (Gleitkreis nach dem Lamellenverfahren, Zwei-Körper-Mechanismus mit kreisförmiger äußerer Gleitfläche nach FEM) ein entsprechend ähnliches Sicherheitsniveau ergeben.

Im Unterschied dazu zeigt sich bei der Untersuchung der lokalen Sicherheit auf der Landseite im Lastfall 4, dass bei der üblichen Annahme eines Gleitkreis ein geringerer Ausnutzungsgrad als bei dem maßgebenden Versagensmechanismus nach FEM ergibt. Das bedeutet für diesen Fall einer lokalen Standsicherheit ist keine kreisförmige Gleitfläche sondern ein Gleitfläche in Anlehnung an Janbu bzw. an das Blockgleiten maßgebend.

Die durchgeführten Vergleichsberechnungen der Standsicherheiten nach dem konventionellen Gleitkreis-Lamellenverfahren und nach der Finite-Elemente-Methode haben gezeigt, dass im Rahmen des neuen Teilsicherheitskonzeptes die Standsicherheit von Dämmen alternativ auch mit FEM ermittelt werden kann, vorausgesetzt das verwendete FEM-Programm enthält einen Berechnungsmodus mit einer automatischen Phi-c-Reduktion. Die Vergleichsberechnungen haben außerdem verdeutlicht, dass es in einzelnen Fällen zweckmäßig sein kann, die FEM zur Suche von maßgebenden Versagensmechanismen zu verwenden.

8 Zusammenfassung und Folgerungen für die Anwendung des neuen Sicherheitskonzeptes

Bei Anwendung des neuen Sicherheitskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten in Verbindung mit dem MSD 2005 zur Untersuchung der Standsicherheit von Dammböschungen wird prinzipiell ein ähnliches Sicherheitsniveau ermittelt, wie nach dem herkömmlichen, summarischen Sicherheitskonzept in Verbindung mit dem MSD 1998.

Bei kohäsionslosen Materialien sind die Differenzen am geringsten. Mit zunehmendem Anteil der Kohäsion an der Tragsicherheit nehmen die Differenzen zwischen den Berechnungsergebnissen nach altem und neuem Konzept tendenziell zu. Die Ursache liegt hauptsächlich in dem unterschiedlichen, rechnerischen Ansatz der Kohäsion des dränierten Bodens von 75 % des charakteristischen Wertes nach MSD 1998 bzw. von 100 % des charakteristischen Wertes nach MSD 2005.

Im Einzelfall kann der nach dem neuen Sicherheitskonzept und MSD 2005 errechnete Ausnutzungsgrad um etwa 0,1 bzw. ca. 10 % bis 15 % unter dem vergleichbaren Ausnutzungsgrad nach dem herkömmlichen Konzept bzw. MSD 1998 liegen. Durchschnittlich wurde bei Vergleichsberechnungen nach dem neuen Konzept ein um etwa 0,02 bis 0,04 kleinerer Ausnutzungsgrad (das entspricht ca. 2 % bis 8 %) als nach dem herkömmlichen Konzept festgestellt.

In Grenzfällen, in denen nach dem herkömmlichen Konzept in Verbindung mit MSD 1998 die vorhandene Sicherheit bereits in Größe der erforderlichen Sicherheit bzw. ganz leicht darunter lag, kann sich mit dem neuen Konzept in Verbindung mit MSD 2005 ein Ausnutzungsgrad $\mu < 1,0$ ergeben, d.h. ein Nachweis der bisher nicht erfüllt war, kann nun gerade noch aufgehen.

Bei Anwendung des summarischen Sicherheitskonzeptes ist neben der Beurteilung der Ausnutzung der Tragsicherheit in einem Lastfall (Verhältnis von erforderlicher und vorhandener Sicherheit) auch ein direkter Vergleich der Ergebnisse für die verschiedenen Lastfälle möglich, da im errechneten Wert der vorhandenen Sicherheit $\eta_{\text{vorh.}}$ die dem entsprechenden Lastfall zugeordnete erforderliche Sicherheit $\eta_{\text{erf.}}$ noch nicht eingerechnet ist. Damit war bisher der unmittelbare Vergleich der absoluten rechnerischen Sicherheiten bei unterschiedlichen Beanspruchungen möglich.

Bei Anwendung des Konzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten ergibt sich zwar unmittelbar der Ausnutzungsgrad μ im jeweiligen Lastfall. Ein Vergleich der absoluten rechnerischen Sicherheiten für die verschiedenen Lastfälle untereinander ist durch die bereits eingerechneten Teilsicherheiten nicht mehr möglich. Mit dem Ausnutzungsgrad lassen sich nur die jeweiligen Sicherheitsreserven bzw. Sicherheitsdefizite bezüglich des durch die einge-

rechneten Teilsicherheiten definierten Sicherheitsniveaus vergleichbar darstellen. So kann beispielsweise im Lastfall 4 ein geringerer Ausnutzungsgrad μ , d.h. größere Sicherheitsreserve, ermittelt werden als im Lastfall 3 (vgl. Tab. 4, Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8, Landseite), obwohl die absolute Gesamtsicherheit nach dem herkömmlichen Konzept im Lastfall 4 jeweils kleiner war als die Sicherheit im Lastfall 3.

Im Ergebnis der Vergleichsberechnungen wird festgestellt, dass die ermittelten Sicherheiten bzw. Ausnutzungsgrade sensibel auf den rechnerischen Ansatz der Kohäsion des dränierten Bodens reagieren. Die im MSD 1998 enthaltene Sicherheit durch Abminderung des charakteristischen Wertes der Kohäsion auf 75 % als Rechenwert fällt mit Anwendung des neuen Sicherheitskonzeptes weg.

Deshalb sollte künftig besondere Sorgfalt auf eine zuverlässige Ermittlung des charakteristischen Wertes der Kohäsion des dränierten Bodens und eine entsprechende Absicherung durch Laborversuche gelegt werden.

Die Festlegung des charakteristischen Wertes der Durchwurzelungskohäsion für die Deckschicht von mit Gras bewachsenen Dammböschungen – vor allem im möglichen Sickerlinienaustrittsbereich – muss mit gleicher Sorgfalt vorgenommen werden, da sie oft einen entscheidenden Einfluss auf die Erfüllung des rechnerischen Nachweises der lokalen Sicherheit der landseitigen Böschung im Lastfall 3 und 4 ausübt. Bei der visuellen Begutachtung der Dammböschungen im Zuge von Ortsbegehungen ist deshalb die Qualität der Grasnarbe genau zu erfassen. Im Zuge der Instandhaltung der Dammbauwerke kommt dem Erhalt und der Nachbesserung von Fehlstellen in der Grasnarbe eine große Bedeutung zu.

Die Anwendung des Konzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten bietet nunmehr bei Dämmen den Vorteil vergleichbare Standsicherheitsberechnungen auch mit der Finite-Elemente-Methode durchzuführen. In diesem Zusammenhang eignet sich FEM unter Verwendung der Phi-c-Reduktion hervorragend, maßgebenden Versagensmechanismen zu finden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die bisher nach dem herkömmlichen summarischen Sicherheitskonzept in Verbindung mit MSD 1998 untersuchten und als ausreichend standsicher beurteilten Dämme auch bei Anwendung des neuen Sicherheitskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten in Verbindung mit MSD 2005 rechnerisch als standsicher zu bewerten sind.

9 Schrifttum

BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) (1998): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Eigenverlag BAW, Karlsruhe (ersetzt durch Ausgabe 2005)

BAW (Bundesanstalt für Wasserbau) (2005): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Eigenverlag BAW, Karlsruhe

DIN 1054:2005-01: Baugrund; Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Deutsches Institut für Normung e.V., Januar 2005

DIN 1055-100 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Deutsches Institut für Normung e.V., März 2001

DIN 4084 (1981): Baugrund; Gelände- und Böschungsbruchberechnungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Juli 1981

E DIN 4084 (2002): Baugrund; Geländebruchberechnung, Beuth Verlag, Berlin, November 2002

GGU-SS-FLOW 2D, Version 7.57, Finite-Elemente-Programm zur Berechnung zweidimensionaler, stationärer Grundwasserströmungen,

GGU-STABILITY, Version 7.10, Programm zur Berechnung der Böschungsbruchsicherheit nach DIN 4084,

PLAXIS 2D Version 8.2, Finite-Elemente-Programm zur zweidimensionalen Berechnung von dränierten und undränierten Spannungen und Verformungen in Boden und Fels sowie in Bauwerken einschließlich Konsolidation, 2005