



## **Bericht zu Gutachten der BKW FMB Energie AG Für das Wasserkraftwerk Mühleberg**

### **1. Ausgangslage**

Das Wasserkraftwerk Mühleberg (WKW-M) befindet sich wenige Kilometer oberhalb des Atomkraftwerks Mühleberg. Die Erdbebensicherheit des Wasserkraftwerks Mühleberg ist daher hochrelevant für die Sicherheit des AKW Mühleberg. Zur Standsicherheit des Wasserkraftwerks liegen drei Gutachten der BKW FMB Energie AG vor. Die Gutachten wurden innerhalb von vier Monaten erstellt. Sie sind vom 31. Januar 2012, 30. März 2012 bzw. 4. Mai 2012 datiert. Wir haben die drei Gutachten eingehend betrachtet. In diesem Bericht sind einige Befunde zusammenfassend dargestellt.

### **2. Geltende Richtlinien und Auslegung**

Für Wasserkraftwerke sind drei Richtlinien [1], [2] und [3] relevant. Sie behandeln die Sicherheit von Wasserkraftwerken im Allgemeinen ([1]), die konstruktiven Aspekte der Wasserkraftwerke ([2]) und die Erdbebensicherheit für Wasserkraftwerke ([3]).

- In Richtlinie [1] werden Grundsätzliche Angaben gemacht, z.B. Sperrklassen, Lastfälle, Baugrundklassen, Erdbebenlasten, Rechenmethoden, Sicherheitsnachweisen (Stabilität und Verschiebung) etc.
- In Richtlinie [2] werden spezielle Angaben für die Dimensionierung des Bauwerks gemacht, z.B. die erforderlichen Sicherheitsfaktoren gegen Gleiten ohne und mit Berücksichtigung der Kohäsion etc.
- In Richtlinie [3] werden spezielle Angaben zu Erdbebenlasten gemacht z.B. Baugrundklassen, Erdbebenspektren, Festigkeitskennwerte für Kontaktfläche, Stabilitätsnachweise etc.

Es ist davon auszugehen, dass die drei Richtlinien eine Einheit für die Standsicherheit von Wasserkraftanlagen bilden und dass sie nicht widersprüchlich sind. Bei den Anforderungen der Stabilitätsnachweise (Sicherheitsfaktoren) gibt es m.E. keinen Spielraum. Eine Unterschreitung der Sicherheitsfaktoren ist daher nicht tolerierbar.

Bei den Nachweisen wird zwischen Wehren und Dämmen unterschieden. Für Wehre als leichtgewichtige Konstruktion sind die Stabilitätsnachweise für Flachgründung gegen Gleiten und Kippen maßgebend. Für Dämme sind die bleibenden Verschiebungen von Bedeutung. Die Nachweise dienen dazu, lokale und globale Schäden zu vermeiden.

Die o.g. Richtlinien gelten für Wasserkraftwerke im Allgemeinen. Das Wasserkraftwerk Mühleberg hat jedoch eine Besonderheit, da sich ein AKW im Unterlauf des Wasserkraftwerks befindet. Ein Versagen des Wasserkraftwerks hat schwerwiegende Konsequenz für das AKW. Dieses Szenario wird durch die Richtlinien nicht abgedeckt. Eine erhöhte Sicherheit für das Wasserkraftwerk scheint angebracht.

### 3. Sicherheitsfaktoren (SF) für Stabilitätsnachweise nach Richtlinien

In Richtlinie [2] (Konstruktive Sicherheit) werden die Sicherheitsfaktoren explizit angegeben und betragen 1,5 für „normalen“, 1,3 für „außerordentlichen“ und 1,1 für „extremen“ Lastfall (Erdbeben). Sie gelten für den Fall ohne Berücksichtigung der Kohäsion. Mit Berücksichtigung der Kohäsion erhöhen sich die Sicherheitsfaktoren auf 3, 4 und 5. Ich gehe davon aus, dass der SF=5 für normal, 4 für außerordentlich und 3 für extrem gilt. Der Grund für die relativ großen SF liegt wohl darin, dass die Kohäsion bei Verschiebungen teilweise oder gänzlich verloren gehen kann.

In Richtlinie [3] (Erdbebensicherheit) wird der Sicherheitsfaktor nicht explizit angegeben. Hier wird lediglich verlangt, dass „Beim Stabilitätsnachweis ist nachzuweisen, dass während des Erdbebens kein Gleiten oder Kippen der Sperre oder Teile davon stattfinden kann.“

### 4. Sicherheitsfaktoren in den Gutachten

#### 4.1. Gutachten Januar

Im Januar Gutachten wurden folgende SF unter Berücksichtigung der Kohäsion für das Maschinenhaus:

*Tabelle 7-1 Maschinenhaus - Globale Gleitsicherheitsfaktoren.*

|                             | Zeitverlauf |      |       |
|-----------------------------|-------------|------|-------|
|                             | S1          | S2   | S3    |
| statisch                    | 2.97        | 2.97 | 2.97  |
| dynamisch                   | 1.36        | 1.32 | 1.38  |
| Bleibende Verschiebung [mm] | 18.54       | 9.10 | 14.71 |

und folgende SF für das Wehr ermittelt:

*Tabelle 7-2 Wehr - Globale Gleitsicherheitsfaktoren.*

|                             | Zeitverlauf |      |      |
|-----------------------------|-------------|------|------|
|                             | S1          | S2   | S3   |
| statisch                    | 6.48        | 6.48 | 6.48 |
| dynamisch                   | 2.36        | 2.97 | 2.46 |
| Bleibende Verschiebung [mm] | 0.11        | 0.00 | 0.03 |

Die bleibenden Verschiebungen sind mit angegeben. Zur Beurteilung der Standsicherheit gegen Gleiten wurde die Richtlinie [2] zugrunde gelegt. Der Gutachter kam zu dem Schluss, dass die geforderten SF mit Kohäsion von 3, 4 und 5 für den Lastfall „Erdbeben“ nicht eingehalten wurden. Es ist nicht ganz klar, ob die vertikale Komponente der Beschleunigung überall berücksichtigt wurde.

Aus dem Gutachten geht nicht klar hervor, ob sich die SF auf pseudo-statische Berechnungen oder auf Berechnungen aus Zeitverlauf beziehen. In letztem Falle variieren die SF mit der Zeit. Dies soll im Gutachten genauer angegeben werden. Man merkt ferner, dass keine Sensibilitätsuntersuchungen gemacht wurden.

Nach Tabelle 7-1 und 7-2 vom Gutachten gibt es bleibende Verschiebungen sowohl beim Maschinenhaus als auch beim Wehr. Ohne Angabe der Bodenkennwerte und der kritischen Beschleunigung lassen sich die bleibenden Verschiebungen schwer beurteilen. M.E. stehen die bleibenden Verschiebungen in Widerspruch zu den hohen Kohäsionen. Das worst-case Szenario mit  $c=0$  sollte untersucht werden.

**Fazit vom Januar Gutachten:** Für den Lastfall Erdbeben kann die Standsicherheit gegen Gleiten unter Berücksichtigung der Kohäsion gemäß Richtlinie [2] nicht eingehalten werden.

#### 4.2. Gutachten März

Im März Gutachten bleiben die SF unverändert. Zur Beurteilung der Standsicherheit gegen Gleiten wurde anstelle Richtlinie [2] Richtlinie [3] herangezogen. Der Gutachter kam bei gleichen SF zum Schluss, dass die SF über 1,0 liegen und daher die Standsicherheit gegen Gleiten erfüllt ist. Dass die Aussagen bei gleichen SF in den Gutachten unterschiedlich ausfallen, ist sehr unbefriedigend. Unter „Stabilitätsnachweis“ machte der Gutachter folgende Angaben:

**10 Stabilitätsnachweis**

Beim Stabilitätsnachweis ist zu zeigen, dass durch das Erdbeben kein Gleiten oder Kippen der Sperre oder Teilen davon verursacht wird, welches zu einer lokalen oder globalen Instabilität führen kann.

Für Berechnungen mit Berücksichtigung der Kohäsion hält die BWG-Richtlinie zur konstruktiven Sicherheit [11] folgendes fest:

*Grundsätzlich kann die Kohäsion dort, wo sie vorhanden ist und der innere Reibungswinkel gleichzeitig tief angesetzt ist, berücksichtigt werden. Für die Festlegung der Kohäsion sollte auf Versuchsergebnisse, allenfalls auf publizierte Resultate aus der Literatur zurückgegriffen werden. Die Sicherheitsfaktoren sind dann aber zu erhöhen, um den Unsicherheiten und dem Risiko, dass sich die Kohäsion infolge einer Bewegung vermindert oder verschwindet, Rechnung zu tragen.*

In der BWG-Richtlinie ist zum Nachweis der Erdbebensicherheit [13] bei einer Berücksichtigung der Kohäsion keine Erhöhung des Sicherheitsfaktors vorgesehen. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass für die Kohäsion konservative Werte angesetzt werden.

Die Stabilitätsnachweise werden für die statischen und die dynamischen (Überlagerung der Erdbebenbeschleunigung mit den statischen Lasten) Berechnungen geführt.

Diese Angaben sind widersprüchlich. Einerseits ist der SF bei Berücksichtigung einer Kohäsion nach der Richtlinie für Konstruktive Sicherheit [2] zu erhöhen (rot gerahmt). Andererseits muss der SF nach der Richtlinie für Erdbebensicherheit [3] nicht erhöht werden (grün gerahmt).

Neu im März Gutachten wurde eine Sensibilitätsuntersuchung präsentiert. Die Kohäsion wurde von 400 kPa auf 300 kPa reduziert. Die Ergebnisse sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Die Aussage „Sensibilitätsstudien für die direkt aus den Versuchsreihen erhaltene Kohäsion von 300 kPa sowie für einen Sohlwasserdruck von 0%“ stimmt mit den Angaben in der Tabelle nicht überein, wo ein Sohlwasserdruck von 100% angegeben ist. Hier besteht Erklärungsbedarf. Ferner sei auf folgende Unstimmigkeit hingewiesen. Obwohl die SF fürs Maschinenhaus nach Tabelle 10-3 bei allen drei Lastfällen (S1, S2 und S3) über 1,0 liegen, meinte der Gutachter, dass der SF unter 1,0 liegt. Dies bleibt ebenfalls zu klären.

### 10.1.3 Beurteilung der Gleitsicherheit

Für die getroffenen Annahmen liegen die berechneten globalen Gleitsicherheitsfaktoren über einem Wert von 1.0. Sensitivitätsstudien für die direkt aus den Versuchsreihen erhaltenen Kohäsion von 300 kPa sowie für einen Sohlwasserdruck von 0% (Fundation vollständig dräniert), zeigen, dass die Gleitsicherheit für das Wehr auch für den gemessenen, geringeren Kohäsionswert erfüllt ist. Für das Maschinenhaus liegen die dynamischen Werte jedoch unter 1.0. Durch eine Reduktion des Sohlwasserdrucks kann die Gleitsicherheit erhöht werden.

Tabelle 10-3 Sensitivitätsstudie Gleitsicherheit.

| Annahmen               |           |    | Maschinenhaus | Wehr |
|------------------------|-----------|----|---------------|------|
| c = 300 kPa<br>w: 100% | statisch  |    | 2.45          | 5.10 |
|                        |           | S1 | 1.14          | 1.91 |
|                        | dynamisch | S2 | 1.11          | 2.39 |
|                        |           | S3 | 1.16          | 1.97 |
| c = 400 kPa<br>w: 0%   | statisch  |    | 3.80          | 7.33 |
|                        |           | S1 | 1.67          | 2.65 |
|                        | dynamisch | S2 | 1.65          | 3.34 |
|                        |           | S3 | 1.69          | 2.77 |

Die berechneten globalen Gleitsicherheitsfaktoren liegen über 1.0. Dies ist gemäss BWG-Richtlinie zum Nachweis der Erdbebensicherheit [13] zulässig. Zusätzlich zum konservativen Wert für die Kohäsion wurden folgende Punkte berücksichtigt:

Wie man aus dieser Tabelle erkennt, spielt die Kohäsion eine wichtige Rolle für die SF gegen Gleiten. Die angesetzten Kennwerte sollen besser begründet werden. Eine Untersuchung mit Nullkohäsion sollte durchgeführt werden, um das worst-case Szenario zu zeigen.

Anders als in Januar Gutachten wurden die bleibenden Verschiebungen hier getrennt behandelt. Die Werte sind kleiner als die des Gutachtens in Januar. Eine Erklärung zu diesem Unterschied wurde nicht geliefert. Ein Grenzwert für die bleibenden Verschiebungen wurde



nicht angegeben. Ohne einen Grenzwert lassen sich die ermittelten bleibenden Verschiebungen nicht beurteilen. Ob die hohen Kohäsionen bei Verschiebungen zwischen Bauwerken und Untergrund noch vorhanden sind, bleibt zu klären.

Die bleibenden Verschiebungen wurden bei reduzierten Scherfestigkeiten mit partiellen SF ermittelt. Man beachte, dass die Untersuchung der Standsicherheit gegen Gleiten mit globalen Sicherheitsfaktoren durchgeführt wurde. Diese gemischte Vorgehensweise von globalen und partiellen Sicherheitsfaktoren ist nicht empfehlenswert.

**Fazit vom März Gutachten:** Die Ergebnisse vom Januar Gutachten bleiben weitgehend unverändert. Anstelle Richtlinie [2] für konstruktive Sicherheit wurde die Standsicherheit gemäß Richtlinie [3] für Erdbebensicherheit beurteilt.

### 11.2 Bleibende Verschiebungen

Es wurde nachgewiesen, dass sowohl für das Maschinenhaus wie auch für das Wehr während eines starken Erdbebens die globalen Gleitsicherheitsfaktoren stets über 1.0 bleiben (siehe Sektion 10.1). Eine andere Betrachtung mit partiellen Sicherheitsfaktoren mit 3.0 für Kohäsion und 1.1 für den Reibungswinkel kann unter Umständen für bestimmte Zeitschritte eine – geringe – Verschiebung der Bauwerke stattfinden. Die Aufsummierung aller einzelnen Verschiebungen ergibt die Grössenordnung der zu erwartenden totalen Verschiebungen.

In dieser Berechnung wird angenommen, dass sich die Bauwerke verschieben können falls die partielle Sicherheit kritisch wird. Für die Berechnung der Verschiebungen wurde die Newmark-Methode angewandt.

Tabelle 11-1 Bleibende Verschiebungen bei Maschinenhaus und Wehr (mm).

|               | Zeitverlauf |      |       |
|---------------|-------------|------|-------|
|               | S1          | S2   | S3    |
| Maschinenhaus | 13.64       | 5.57 | 11.28 |
| Wehr          | 0.00        | 0.00 | 0.00  |

Beim Maschinenhaus sind die totalen bleibenden Verschiebungen gering und können keine lokalen Schäden verursachen. Für das Wehr sind die Beschleunigungen an der Gleitfläche stets geringer als die kritische Beschleunigung, so dass keine totale bleibende Verschiebung auftritt.

### 4.3. Gutachten Mai

Im Gutachten von Mai bleiben die Ergebnisse der vorherigen Gutachten weitgehend unverändert. Auf eine Berechnung der bleibenden Verschiebungen wird im Mai Gutachten verzichtet. Eine Sensibilitätsstudie wurde zwar präsentiert. Man beachte, dass die Berechnung mit einer Kohäsion von  $c=300$  kPa, also der aus den Versuchen ermittelten Kohäsion durchgeführt wurde. In der Tat handelt es sich bei dieser Sensibilitätsstudie um die eigentliche Berechnung. Eine weiter reduzierte Kohäsion von z.B. 200 kPa wäre sinnvoll im Sinne einer echten Sensibilitätsstudie. Es ist dann vor auszusehen, dass der SF in diesem Falle unter 1 sinken wird. Dafür wäre eine Berechnung der bleibenden Verschiebungen notwendig.

Das Mai Gutachten bringt keine wesentliche Verbesserung in den Nachweisen gegenüber den zwei vorherigen Gutachten. Vielmehr wurde versucht, die Probleme erst gar nicht

anzusprechen. Angesichts der niedrigen Sicherheitsreserve ist m.E. eine Untersuchung der bleibenden Verschiebung unabdingbar. Danach kann man beurteilen, ob die bleibenden Verschiebungen lokale und globale Schäden zur Folge haben.

**Fazit:** Bei den drei Gutachten wurden die Richtlinien teils widersprüchlich angewandt. Für das Januar Gutachten wurde die Richtlinie für Konstruktive Sicherheit zugrunde gelegt, während die Richtlinie für Erdbebensicherheit für die Gutachten von März und Mai vorwiegend verwendet wurde.

## 5. Bleibende Verschiebungen

Die bleibenden Verschiebungen in den Januar und März Gutachten wurden nach dem Newmark-Verfahren ermittelt. Dabei ist es üblich, die Kohäsion zu Null zu setzen. Der Gutachter hat die Kohäsion jedoch nur unwesentlich reduziert. Ob die hohe Kohäsion bei diesen Verschiebungen noch vorhanden ist, soll besser begründet werden.

## 6. Kennwerte des Untergrunds

Die Qualität der Standsicherheitsuntersuchung ist nur so gut wie die Zuverlässigkeit der Kennwerte. Aus den Sensibilitätsuntersuchungen kann man die Bedeutung der Kohäsion für die Standsicherheitsuntersuchung deutlich erkennen. Bereits eine Reduktion der Kohäsion von 400 kPa auf 300 kPa bringt stark reduzierte SF gegen Gleiten. Der relativ große Unterschied der zwei Bohrkampagnen in 1980 und 2011 zeigt, dass der Untergrund sehr inhomogen aufgebaut ist. Die Kohäsion lässt sich daher sehr schwer abschätzen. Die Diskussion um die Kennwerte in den Gutachten war sehr kurz gehalten und nicht plausibel begründet (siehe nachfolgende Tabelle von den Gutachten):

Die potentielle Gleitfläche setzt sich aus einer quasi horizontalen (Basis) und einer schräg an die Oberfläche verlaufenden, geneigte Fläche (Keil) zusammen (Abbildung 4-2). An der Basis verläuft die Gleitfläche durch die Gesteinsschichten mit der geringsten Festigkeit unterhalb der Scherriegel des Maschinenhauses resp. Wehrs. Aufgrund von Unebenheiten und der Rauheit kann die Scherfestigkeit um 15% des unteren Grenzwerts der Kohäsion aus den einaxialen Druckversuchen erhöht werden (Tabelle 4-4) [22]. Die geneigte Fläche verläuft sowohl durch Tonstein-Mergel als auch durch Sandstein-Schichten. Die Scherfestigkeit der geneigten Fläche wird vom relativen prozentuellen Anteil der verschiedenen Gesteine, durch welche die Gleitfläche auf der Talseite verläuft, bestimmt. Die scheinbare Kohäsion ist abhängig von der Normalspannung im Sandstein (Tabelle 4-4). Die Sensitivität der Gleitsicherheit bezüglich der mittels Laborversuchen ermittelten Kohäsion (300 kPa) und dem erhöhten Wert (400 kPa) wird in Kapitel 10.1.3 behandelt.

Tabelle 4-4 Charakteristische Kennwerte der Scherfestigkeitsparameter am Standort des WKW Mühleberg [22].

| Basis      |               | Keil                                       |            |               |
|------------|---------------|--|------------|---------------|
| c<br>[kPa] | $\phi$<br>[°] |  | c<br>[kPa] | $\phi$<br>[°] |
| 400        | 21            | Unterhalb einer Normalspannung von 580 kPa | 460        | 15            |
|            |               | Oberhalb einer Normalspannung von 580 kPa  | 280        | 30            |

Die runden Zahlen für die Kohäsionen in der Tabelle zeigen diese Unsicherheit deutlich an. Eine Erhöhung der Kohäsion um 15% ist nicht ohne weiteres nachvollziehbar. Laborversuche mit kleinen Proben, z.B. einaxiale Druckversuche oder triaxiale Versuche, liefern i.d.R. höhere Scherfestigkeiten als das Gebirge. Dies betrifft sowohl die Kohäsion als auch den Reibungswinkel. Eine Erhöhung der Scherfestigkeit scheint hier nicht angebracht. Auch die scheinbare Kohäsion von Sandstein bedarf einer genauen Begründung. Die Abhängigkeit der Kohäsion und des Reibungswinkels von der Normalspannung ist nicht ohne weiteres nachvollziehbar. Normalerweise nimmt der Reibungswinkel mit zunehmender Normalspannung nicht zu sondern ab. Dass die Kohäsion unterhalb einer Normalspannung von 580 kPa größer als oberhalb ist, bleibt ebenfalls zu klären.

Es ist wünschenswert, die Kennwerte nach charakteristischen Kennwerten und möglichen Kennwerten anzugeben. Damit lässt sich der Streubereich erkennen und die Ergebnisse der Sensibilitätsuntersuchung besser beurteilen. Ferner sollen die Scherfestigkeiten nach Spitzenfestigkeiten und Restfestigkeiten angegeben werden. Damit kann man die ermittelten SF und die bleibenden Verschiebungen besser beurteilen. Aus dem März Gutachten ist es ersichtlich, dass die Sicherheit gegen Gleiten bei einer Kohäsion von 300 kPa als kritisch zu betrachten ist. Man beachte, dass die Kohäsion von 300 kPa direkt aus den Laborversuchen abgeleitet wurde.

## **7. Schlussfolgerung**

Angesichts der Ungereimtheiten in den Gutachten sind die Standsicherheitsnachweise des Wasserkraftwerks Mühleberg noch nicht als erbracht anzusehen. Die Ungereimtheiten betreffen sowohl die Anwendung der Richtlinien als auch die Nachweise selbst. Die Widersprüche in der Anwendung der Richtlinien sollten zuerst geklärt werden. Die angesetzten Scherfestigkeitskennwerte sollen besser begründet werden. Nur dann können das Sicherheitsniveau und die Sensibilitätsstudien beurteilt werden. Es ist empfehlenswert, die Eckpunkte der Standsicherheitsnachweise durch ein Gremium von Fachleuten festzulegen, z.B. Kennwerte des Untergrunds, Sicherheitsfaktoren und Nachweismethode, Grenzen der bleibenden Verschiebungen etc.

## **Literaturverzeichnis**

- [1] Sicherheit der Stauanlagen, Richtlinien des BWG - Version 1.1 (November 2002)
- [2] Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zur konstruktiven Sicherheit, Berichte des BWG, Serie Wasser – Version 1.0 (August 2002)
- [3] Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zu dem Nachweis der Erdbebensicherheit, Berichte des BWG, Serie Wasser - Version 1.2 (März 2003)
- [4] BKW FMB Energie AG, Wasserkraftwerk Mühleberg, Überprüfung der Erdbebensicherheit, Stabilitätsnachweis, 31. Januar 2012
- [5] BKW FMB Energie AG, Wasserkraftwerk Mühleberg, Überprüfung der Erdbebensicherheit, Linear-elastische Berechnungen, 30. März 2012

[6] BKW FMB Energie AG, Wasserkraftwerk Mühleberg, Überprüfung der Erdbebensicherheit, Linear-elastische Berechnungen, 4. Mai 2012

14.02.2013



Prof. Dr.-Ing. W. Wu  
Vorstand  
Institut für Geotechnik  
Universität für Bodenkultur  
Feistmantelstr. 4  
1180 Wien  
Tel. 0043 1 47654 5550  
Fax 0043 1 47654 5567