



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Professur für Erdbau und Spezialtiefbau

Gutachten zur Beurteilung von Erforderlichkeit und Geeignetheit vorgeschlagener Maßnahmen zur Sanierung der Inseln im Knappensee (Landkreis Bautzen)

Auftraggeber: Sächsisches Oberbergamt
Kirchgasse 11
09599 Freiberg

Auftragnehmer: TU Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Gustav-Zeuner Str. 1a

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. W. Kudla

Bearbeiter: Dr.-Ing. J. Weißbach (bis 20.09.2020)

Umfang: 37 Seiten

Datum: 21.12.2021

Prof. Dr.-Ing. W. Kudla

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Arbeitsunterlagen	4
3	Grundlagen der Risikobeurteilung	6
3.1	Einflussfaktoren auf das Risiko	6
3.2	Risikowahrnehmung	6
3.3	Möglichkeiten zur Festlegung eines Grenzzrisikos	9
4	Grundlagen zum Gefährdungsmechanismus.....	12
4.1	Bodenverflüssigung und Setzungsfließen	12
4.1.1	Vorgang der Bodenverflüssigung	12
4.1.2	Randbedingungen des Verflüssigungsvorganges.....	12
4.1.3	Eintrittswahrscheinlichkeit von Bodenverflüssigungsereignissen	13
4.2	Schwallwellen	13
4.2.1	Entstehung und Ablauf	13
4.2.2	Bemessungsverfahren und Annahmen	15
4.2.3	Anwendung des Bemessungsverfahrens an einem Beispiel mit Beobachtungsdaten .	19
5	Das Setzungsfließereignis am 11.03.2021 am Ufer des Knappensees.....	22
6	Risikoeinschätzung und Bewertung der Inselböschungen	25
6.1	Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Bodenverflüssigungsereignissen im Bereich der Inseln im Knappensee, die durch ein natürliches Initial ausgelöst werden.....	25
6.2	Bewertung der Wahrscheinlichkeit und des Ausmaßes von Personenschäden infolge von Bodenverflüssigungsereignissen auf den Inseln	27
6.3	Bewertung der Erforderlichkeit von Maßnahmen	29
7	Bewertung der Geeignetheit von Maßnahmen zur Sanierung der Inseln	32
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	34
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	35
	Abbildungsverzeichnis.....	36
	Tabellenverzeichnis.....	37

1 Aufgabenstellung

Das Sächsische Oberbergamt hat die LMBV beauftragt, auf Basis des Sächsischen Polizeigesetzes und der Sächsischen Hohlraumverordnung Sanierungsarbeiten an den Ufern des Knappensees planen und ausführen zu lassen. Von den nach gegenwärtigem Stand im Jahr 2021 abgeschlossenen Maßnahmen sind die Inseln im Knappensee derzeit ausgenommen.

In [AU3] wurde die Erforderlichkeit von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr auch an den Inseln konstatiert. Da die Inseln nicht betreten werden dürfen und dieser Zustand auch weiterhin gelten wird, ist als Gefährdungsmechanismus eine Setzungsfleißrutschung anzusehen, von der Schwallwellen ausgehen, die beim Auftreffen auf das Gegenufer zu einer Gefährdung für dort befindliche Personen führen können. In [AU4] wurden Maßnahmen diskutiert, die diese Gefährdung unterbinden bzw. abmildern sollen. Von 12 betrachteten Maßnahmenvarianten wurden 5 Varianten als zielführend erachtet und zur weiteren Betrachtung vorgeschlagen. Alle diese Varianten sind mit teils erheblichen Eingriffen in den Bestand der Inseln verbunden und führen zu einer längeren Sanierungszeit am Knappensee mit Einschränkungen der Nutzung. Diese Einschränkungen stehen seitens verschiedener lokaler Akteure in der Kritik.

Aus diesem Grund hat das Sächsische Oberbergamt die TU Bergakademie Freiberg, Professur für Erdbau und Spezialtiefbau mit folgenden Ausarbeitungen beauftragt, [AU15]:

1. Erstellung einer Entscheidungsgrundlage zur Erforderlichkeit von Maßnahmen zur Sanierung der Inseln aufgrund einer dezidierten Risikoabwägung für die wichtigsten Rechtsgüter der öffentlichen Sicherheit (Leben, Gesundheit, größere Vermögensschäden).
2. Erstellung einer Entscheidungsgrundlage zur Geeignetheit von Maßnahmen zur Sanierung der Inseln aufgrund einer dezidierten Risikoabwägung für die wichtigsten Rechtsgüter der öffentlichen Sicherheit (Leben, Gesundheit, größere Vermögensschäden).

Vor dem Hintergrund der vom Oberbergamt genannten lokal vorhandenen Akzeptanz von Risiken [AU15] sollte zudem geprüft werden, mit welchen Maßnahmen alternativ ein gesellschaftlich akzeptiertes Risiko erreicht werden kann.

2 Arbeitsunterlagen

- [AU1] AG Braunkohlen-Tiefbau (LMBV-GS): Handlungsgrundlage für die Vorgehensweise der LMBV bei Sicherungs-/ Verwahrungsarbeiten von untertägigen Auffahrungen im Braunkohlenbergbau. StuBA Bund-Länder-Geschäftsstelle für die Braunkohlesanierung, LMBV, Senftenberg/Berlin, 01.11.2016
- [AU2] ARGE Werminghoff: „Geotechnische Planungsleistungen zur Beseitigung der Setzungsfließgefahr und Sanierung des Knappensees (Tagebau Werminghoff I) – Band 1 – Geotechnische Grundlagen“, Zwickau, 14.08.2008
- [AU3] ARGE Werminghoff: „Maßnahmen zur Gefahrenabwehr am Knappensee (ehemaliger Tagebau Werminghoff I) gemäß Sächsischer Hohlraumverordnung – Nachweis der Erforderlichkeit von Gefahrenabwehrmaßnahmen“, Zwickau, Freiberg, 20.03.2013
- [AU4] ARGE Werminghoff: „Maßnahmen zur Gefahrenabwehr am Knappensee (ehemaliger Tagebau Werminghoff I) gemäß Sächsischer Hohlraumverordnung – Prüfung der Geeignetheit technischer Verfahren für die Sicherung der Inseln – Teilaufgabe 1“, Zwickau, Freiberg, 15.11.2019
- [AU5] Bründl, Michael (Hrsg.): Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern, 2009
- [AU6] Förster, Wolfgang; Jennrich, Carsten: „Sanierung und Sicherung setzungsfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen, Teilprojekt 4: Untersuchung der Schwallwellenbildung durch Setzungsfließen in Tagebaurestlöchern auf der Grundlage von Modellversuchen“, Abschlussbericht, Freiberg, 1998.
- [AU7] G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH: „Standsicherheitsuntersuchungen Beurteilung der geotechnischen Situation und Vorschlag von Maßnahmen zur endgültigen Sicherheit des Uferbereiches und der Inseln des Knappensees (Tagebau Werminghoff I)“, Zwickau, Mai 2000
- [AU8] G.U.B. Ingenieurgesellschaft mbH: „Standsicherheitsuntersuchungen, Beurteilung der geotechnischen Situation und Vorschlag von Maßnahmen zur endgültigen Sicherheit des Uferbereiches und der Inseln des Knappensees (Tagebau Werminghoff I) – 1. Nachtrag“, Zwickau, 31.08.2005
- [AU9] Geotechnisches Büro Stahnke: „Geotechnische Stellungnahme zum Hergang und zur Dimension der Rutschung vom 13.09.2018 im Nordwesten der Insel des Senftenberger Sees“, Heidensee, 24.10.2018
- [AU10] Jennrich, Carsten: „Dynamik von Setzungsfließrutschungen und Bildung von Schwallwellen“, Dissertation, Freiberg, 1999.
- [AU11] Knappenseerebellen e.V.: www.knappenseerebellen.de, abgerufen am 18.06.2020
- [AU12] Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH; TU Bergakademie Freiberg; Universität Fridericiana in Karlsruhe: „Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen“ (Grünes Heft), Senftenberg, 1998.
- [AU13] LMBV: „Hausmitteilung: Geotechnisches Ereignis vom 13.09.2018 im Bereich der Innenkippe Niemtsch (Insel SFB – See)“, Senftenberg, 18.09.2018
- [AU14] Müller, Uwe: „Hochwasserrisikomanagement: Theorie und Praxis“, 1. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010 — ISBN 978-3-8348-1247-6

- [AU15] Sächsisches Oberbergamt: „Aufforderung zur Angebotsabgabe, Vergabeverfahren 2019/59 - Gutachten zur Beurteilung von Erforderlichkeit und Geeignetheit vorgeschlagener Maßnahmen zur Sanierung der Inseln im Knappensee (Landkreis Bautzen)“, Freiberg, 11.11.2019
- [AU16] Weißbach, Jörg: „Risikobeurteilung von Bodenverflüssigungsereignissen auf Innenkippen des Lausitzer Braunkohlereviers“, Dissertation, Freiberg, 11.05.2020, URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa2-708562>
- [AU17] Zweckverband Lausitzer Seenland Sachsen: „Masterplan Knappensee 2.0 – Endbericht Masterplan“, Hoyerswerda, Mai 2018
- [AU18] ARGE Werminghoff (G.U.B. Ingenieur AG und BIUG GmbH): „Bewertung des geotechnischen Ereignisses 11.03.2021“, Bericht vom 18.06.2021 im Auftrag der LMBV mbH
- [AU19] DIN EN 1990 „Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung“ (Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:20101997), Ausgabe 2021-10
- [AU20] DIN 19700 Stauanlagen; Teil 11: Talsperren, Ausgabe 2004-11
- [AU21] Vortrag von Fr. K. Sommer bei der Sitzung des *Geotechnischen Beirates* der LMBV am 18.11.2021

3 Grundlagen der Risikobeurteilung

3.1 Einflussfaktoren auf das Risiko

Ausgangspunkt einer Risikobeurteilung ist ein Schaden, der möglicherweise eintritt. Dabei kann es sich um einen Sachschaden, einen Umweltschaden oder einen Personenschaden handeln. Unter Personenschäden sind dabei Verletzungen und Todesfälle zusammengefasst.

Der potenzielle Schaden hat eine Ursache, die Gefährdung genannt wird. Bei der Gefährdung handelt es sich um einen Prozess, der bestimmte Randbedingungen aufweist und oft an eine kausale Kette gebunden ist. Wenn der Prozess abläuft, wird auch von einem schadensauslösenden Ereignis gesprochen.

Bezogen auf eine Gefährdung kann das Risiko ermittelt werden. Dabei wird einerseits die Schwere des Schadens (das Schadensausmaß) und andererseits die Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses berücksichtigt. Mathematisch wird das Risiko als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses und Schadensausmaß ausgedrückt:

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses} \cdot \text{Schadensausmaß}$$

Um das auf eine Gefährdung bezogene Risiko zu senken, kann also durch Maßnahmen einerseits die Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses gesenkt werden. Dies kann geschehen, indem die Randbedingungen einer Gefährdung so verändert werden oder so in die kausale Kette des Prozesses eingegriffen wird, dass die Gefährdung unwahrscheinlicher wird. Auf der anderen Seite kann auch das Schadensausmaß gesenkt werden. Dies geschieht z. B., indem das Zusammentreffen des Gefährdungsprozesses mit Personen oder Objekten verhindert oder zumindest unwahrscheinlich gemacht wird. Daneben kann auch der schadensauslösende Prozess so abgemindert werden, dass der verursachte Schaden kleiner wird.

Mit einer Risikobeurteilung und mit Hilfe des Risikomanagements wird versucht, das vorhandene Risiko soweit abzusenken, dass es gesellschaftlich akzeptiert ist. Als Abgrenzung dient hier das Grenzkisiko (siehe Abbildung 1). Das Grenzkisiko wird durch die Gesellschaft in Abhängigkeit von der Risikowahrnehmung festgelegt (siehe Abschnitt 3.2). Wird das Grenzkisiko überschritten, dann besteht Gefahr. Ist das tatsächlich vorhandene Risiko kleiner als das Grenzkisiko, dann besteht Sicherheit. Nach Umsetzung aller denkbaren Maßnahmen besteht immer noch ein Restrisiko. Ein Risiko von Null ist nicht erreichbar.

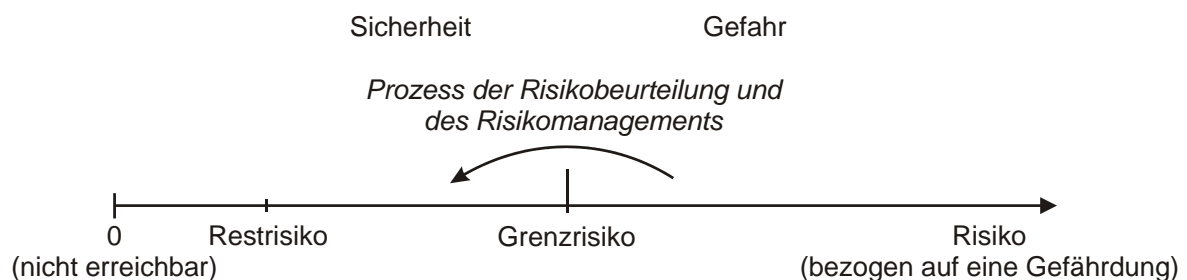


Abbildung 1: Veranschaulichung wesentlicher Begriffe [AU16] auf Basis von [AU1]

3.2 Risikowahrnehmung

Wie das Grenzkisiko durch die Gesellschaft bestimmt wird, ist wesentlich durch die Risikowahrnehmung gelenkt. Wesentliche Faktoren, die die Risikowahrnehmung beeinflussen, sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Faktoren der Risikowahrnehmung [AU16], [AU5]

Faktor	Risikowahrnehmung groß	Risikowahrnehmung klein
Freiwilligkeit	unfreiwillig eingegangene Risiken	freiwillig eingegangene Risiken
Kontrollierbarkeit	Risiken unter der Kontrolle von anderen	Risiken unter eigener Kontrolle
Verteilung	ungleichmäßig verteilte Risiken	gleichmäßig verteilte Risiken
Vorteile	unklare Vorteile	klare Vorteile
Begreifbarkeit	schwierig begreifbar	klar begreifbar
Ungewissheit	unbekannte Risiken	bekannte Risiken
Furcht	Risiken, die Angst verursachen	Risiken, die keine starken Emotionen auslösen
Vertrauen	Risiken, die mit Personen oder Institutionen verbunden sind, die geringes Vertrauen genießen	Risiken, die mit Personen oder Institutionen verbunden sind, die ein hohes Ansehen genießen
Umkehrbarkeit	unumkehrbare Effekte	keine unumkehrbaren Effekte
Beteiligung	persönliche Risiken	unpersönliche Risiken
Ursprung	technische Risiken	natürliche Risiken
Opfer	identifizierbare oder bekannte Opfer	Opfer Bestandteil einer Statistik
Katastrophenpotential	räumlich oder zeitlich konzentrierte Zahl von Opfern	räumlich und zeitlich diffuse Risiken

Den größten Einfluss auf die Risikowahrnehmung und damit auf die Einschätzung der Gesellschaft zum Grenzkrisiko hat es, ob ein Risiko durch die gefährdeten Personen freiwillig eingegangen wird oder nicht (zur Illustration siehe Abbildung 2). Im Allgemeinen wird durch die Gesellschaft ein höheres Grenzkrisiko akzeptiert, wenn Personen ein Risiko wissentlich, freiwillig und aus eigennützigen Gründen eingehen. Dies spiegelt sich in den in der Schweiz empfohlenen Grenzkrisiken wider, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind.



Abbildung 2: Freiwillig eingegangenes Risiko bei der Besteigung des Gipfels der Zugspitze, Foto vom 26.07.2020

Tabelle 2: Vorgeschlagenes Grenzkrisiko für Naturgefahren in der Schweiz in Abhängigkeit von der Freiwilligkeit [AU5]

Risikokategorie	Individuelles Todesfallrisiko Maximaler Wert der Todesfall- wahrscheinlichkeit pro Jahr	Beispiel
Kategorie 1 100 % freiwillig	$10^{-2} - 10^{-3}$	Personen, die Absperrungen bei erhöhter Gefahr bewusst missachten
Kategorie 2 hohe Selbstverant- wortung	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$	Personen, die Gefahrensituati- onen einschätzen können und die Gefahr bewusst eingehen
Kategorie 3 niedrige Selbstverant- wortung	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$	weitgehend bis gänzlich Unbe- teiligte, die Risiken mehr oder minder unfreiwillig eingehen
Kategorie 4 100 % unfreiwillig	$3 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-6}$	

In Bezug auf die Risikowahrnehmung am Knappensee gilt, dass das Risiko, das von Setzungsfließereignissen ausgeht, im Allgemeinen mit einer großen Risikowahrnehmung verbunden wird. Ein Setzungsfließereignis tritt prinzipiell nur selten auf (zeitlich ungleich verteilt), der Vorgang ist schwierig zu begreifen bzw. die Ursachen sind der breiten Bevölkerung unbekannt. Der Ursprung des Risikos ist technischer Natur und es kann theoretisch zu einer räumlich und zeitlich konzentrierten Zahl von Opfern kommen.

Gleichwohl kann die Risikowahrnehmung von Setzungsfließereignissen für einige Personengruppen viel kleiner sein (siehe [AU11]). Hier spielen vor allem die Vorteile, die die Nutzung

des Knappensees mit sich bringen, eine Rolle. Weiterhin ist das Risiko durch Setzungsfließereignisse unpersönlich, da seit der Flutung des Knappensees 1945 keine Setzungsfließereignisse, die durch ein natürliches Initial ausgelöst wurden, aufgetreten sind und es damit auch keine Verletzten, Toten oder Sachschäden gegeben hat (auf das anthropogen ausgelöste Setzungsfließereignis am 11.03.2021 im Zuge der Sanierungsarbeiten an den Ufern des Knappensees wird in Abschnitt 5 eingegangen). Daher wird das abstrakte Risiko, durch ein eines Setzungsfließen geschädigt zu werden, auch freiwillig eingegangen.

Bei Bodenverflüssigungsereignissen (Setzungsfließen und Geländeeinbrüche) wird wie folgt unterschieden:

- a) Bodenverflüssigungsereignisse, die durch ein anthropogenes Initial ausgelöst worden sind; anthropogene Initiale können Springverdichtungsarbeiten, Rütteldruckverdichtungsarbeiten, Erdarbeiten usw. sein
- b) Bodenverflüssigungsereignisse, die durch ein natürliches Initial ausgelöst worden sind. Unter einem natürlichen Initial werden alle Initiale verstanden, die nicht anthropogen sind. Natürliche Initiale sind letztlich unbekannte Initiale.

3.3 Möglichkeiten zur Festlegung eines Grenzkrisikos

Wie oben beschrieben, wird das Grenzkrisiko durch die Gesellschaft festgelegt. Dies kann zum Beispiel in einer gesellschaftlichen Diskussion geschehen. Um ein Grenzkrisiko allerdings begründet festlegen zu können, ist ein Kriterium erforderlich.

Grenzkrisikofestlegung anhand der Wahrscheinlichkeit von Ereignissen

Im Fall von tödlichen Personenschäden beispielsweise im Straßenverkehr können durch statistische Erhebungen die relativen Sterbehäufigkeiten bei bestimmten Tätigkeiten bzw. Ereignissen erfasst werden. Hierfür wird beispielsweise die Zahl der Todesfälle in einem Zeitraum (z. B. ein Jahr) auf die Zahl der Personen einer Grundgesamtheit, die von der entsprechenden Gefährdung betroffen sind, bezogen. Diese Vorgehensweise entspricht der Ermittlung einer relativen Häufigkeit nach der verallgemeinerten Gleichung 1.

$$h_n(A) = \frac{H_n(A)}{n} \quad (1)$$

mit $h_n(A)$ - relative Häufigkeit des Ereignisses A (z. B. Todesfälle)
 $H_n(A)$ - absolute Häufigkeit des Ereignisses A
 n - Anzahl der Elemente der zugrunde gelegten Menge

Für eine große Zahl von Ereignissen kann aus der in der Vergangenheit beobachteten relativen Häufigkeit eines Ereignisses bzw. der relativen Sterbehäufigkeit auf die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses $P(A)$ geschlossen werden (Gleichung 2). Dies gilt bei gleichbleibenden Randbedingungen.

$$h_n(A) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} P(A) \quad (2)$$

Die relative Sterbehäufigkeit bzw. die daraus resultierende Eintrittswahrscheinlichkeit eines Todesfalls für die Zukunft sind wichtige Eingangsgrößen zur Ermittlung des Risikos. Sie bilden damit die Grundlage für die gesellschaftliche Diskussion, welches Risiko akzeptabel ist und welches nicht. Ein Beispiel für die eben genannte Vorgehensweise ist der Straßenverkehr, für den vollständige Statistiken zum Unfallgeschehen mit Todesfolge erstellt werden.

Grenzrisikofestlegung mit Hilfe einer Risikomatrix

Liegen keine Statistiken zu schadensauslösenden Ereignissen A und Personenschäden vor, so kann auf der Basis von Experteneinschätzungen das vorhandene Risiko ermittelt und das Grenzrisiko festgelegt werden. Dies geschieht häufig über eine Risikomatrix (beispielhaft in Abbildung 3). Hierfür werden Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses jeweils in Kategorien eingeteilt. Dies kann beschreibend oder wie beispielhaft in Abbildung 3 über ein Punktesystem erfolgen. Je nachdem, wie Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses zusammenhängen, wird das Risiko bewertet (im Beispiel mit 4 Kategorien). Besonders hohes Risiko besteht, wenn Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses gleichermaßen groß sind. Im Beispiel ist das in der Kategorie I der Fall. Hier sind also besonders dringliche Maßnahmen angezeigt. Bei geringem Schadensausmaß und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit (Kategorie IV) sind nur wenige Maßnahmen mit einer niedrigen Dringlichkeit oder keine Maßnahmen erforderlich.

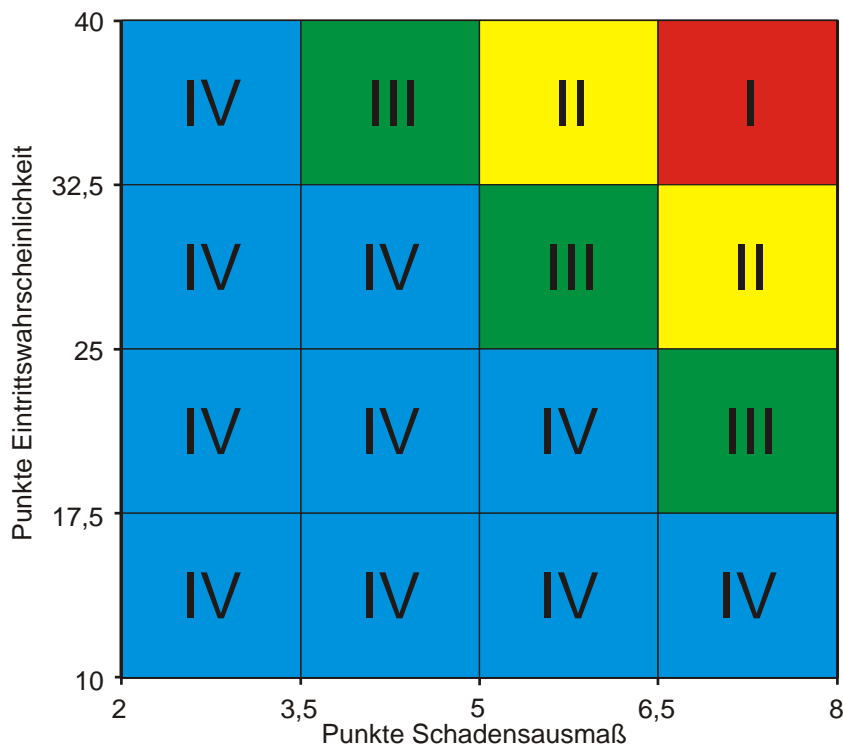


Abbildung 3: Matrix zur Bewertung des Risikos von Tagebrüchen über Braunkohletiefbau [AU1]

Grenzrisiken in DIN EN 1990 Grundlagen der Tragwerksplanung [AU19]

Weitere „Grenzrisiken“ bzw. „operative Versagenswahrscheinlichkeiten“ sind letztlich indirekt in der DIN EN 1990 „Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung“ [AU19] genannt. Die DIN EN 1990 „legt Prinzipien und Anforderungen für die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken fest, beschreibt die Grundlagen der Tragwerksplanung einschließlich der Nachweise und gibt Hinweise zu den dafür anzuwendenden Zuverlässigkeitsanforderungen“ (siehe Abschnitt 1 der DIN EN1990). Diese Norm gilt übergeordnet zu

allen Eurocodes (DIN EN 1991 bis DIN EN 1997) und damit für alle Fachbereiche, wie Stahlbau, Stahlbetonbau, Spannbetonbau, Holzbau, Geotechnik usw. Im (informativen) Anhang B „*Behandlung der Zuverlässigkeit im Bauwesen*“ der DIN EN 1990 sind Schadensfolgeklassen, Zuverlässigkeitsklassen und Zuverlässigkeitsindizes erläutert. Der Anhang C „*Grundlagen der Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten und Zuverlässigkeitsanalyse*“ gibt einen Überblick zu den Zuverlässigkeitsmethoden, die bei der Bemessung im Bauwesen angewendet werden können. Grundsätzlich basieren alle Eurocodes (für Stahlbau, Stahlbetonbau, Holzbau, Geotechnik usw.) auf einer Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten. Dabei sind „*Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex*“ in Abschnitt C.6 vorgegeben. Der Zuverlässigkeitsindex β_n soll bei einem Tragfähigkeitsnachweis 4,7 (bezogen auf 1 Jahr) bzw. 3,8 (bezogen auf 50 Jahre) betragen. Aus der Verteilungsfunktion Φ der Standardnormalverteilung lässt sich damit eine Versagenswahrscheinlichkeit von etwa 10^{-6} (bezogen auf 1 Jahr) bzw. 10^{-4} (bezogen auf 50 Jahre) berechnen (für Einzelheiten siehe Anhang B und C der DIN EN 1990). Die operative Versagenswahrscheinlichkeit in 50 Jahren wird aus der operativen Überlebenswahrscheinlichkeit $\Phi(\beta)$ (kumulative Verteilungsfunktion der Normalverteilung) für 1 Jahr wie folgt berechnet:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n$$

In der DIN EN 1990 ist jedoch auch ausgeführt:

„Die wirkliche Versagenshäufigkeit steht im Wesentlichen im Zusammenhang mit menschlichem Versagen, das bei der Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte unberücksichtigt bleibt (siehe Anhang B). Insofern stellt β nicht notwendigerweise ein Indiz für die wirkliche Versagenshäufigkeit des Tragwerks dar.“

Aus dem Zuverlässigkeitsindex β wird deshalb die operative Versagenswahrscheinlichkeit berechnet und nicht die wirkliche / tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit (siehe auch nachfolgenden Abschnitt 5.2).

Grenzsrisiken / Eintrittswahrscheinlichkeiten entsprechend DIN 19700 Stauanlagen; Teil 11: Talsperren [AU20]

Als weiteres Beispiel für die Festlegung von Risiken bzw. von akzeptierten geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten für schadensauslösende Ereignisse werden die Wahrscheinlichkeiten genannt, die dem Bemessungshochwasser BHQ_1 und BHQ_2 in DIN 19700, *Stauanlagen, Teil 11 Talsperren* zugrunde gelegt. Danach ist beispielsweise bei der Bemessung von Talsperren der Klasse 1 (= Talsperren mit mehr als 15 m Höhe des Absperrbauwerkes) als Bemessungshochwasserzufluss BHQ_1 ein Hochwasserzufluss mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10^{-3} ($T = 1\ 000$ a) zu wählen. Die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit für den Bemessungshochwasserzufluss BHQ_2 muss 10^{-4} ($T = 10\ 000$ a) betragen. Wird der Bemessungshochwasserzufluss BHQ_1 und damit der daraus resultierende maximale Wasserstand ZH_1 am Bauwerk bei geotechnischen Nachweisen (z. B. Nachweis der Böschungsbruchsicherheit, Nachweis der Gleitsicherheit) angesetzt, darf die operative Versagenswahrscheinlichkeit (im Normalfall) 10^{-6} nicht überschreiten (= gesellschaftlich akzeptiertes Risiko). Das Restrisiko ist dann noch kleiner als das gesellschaftlich akzeptierte Risiko (Abbildung 1 im Gutachten).

4 Grundlagen zum Gefährdungsmechanismus

4.1 Bodenverflüssigung und Setzungsfließen

4.1.1 Vorgang der Bodenverflüssigung

Die Bodenverflüssigung ist ein Vorgang, bei dem ein sandiger Boden seine Scherfestigkeit verliert und vorübergehend Eigenschaften einer Flüssigkeit/Suspension annimmt. Wenn es durch Bodenverflüssigung zu einer Rutschung an einer Böschung kommt, wird von einem Setzungsfließen gesprochen. Es kann auch eine Rutschung an einer Böschung auftreten, die sich dann als Bodenverflüssigung ausprägt.

Die Scherfestigkeit eines sandigen Bodens beruht weitgehend auf Reibung zwischen den Körnern. Eine Kohäsion, also eine spannungsunabhängige Scherfestigkeit, die auf adhäsiven Kräften zwischen den kleinen Körnern eines feinkörnigen Bodens beruht, spielt bei Böden, die sich verflüssigen können, keine bedeutende Rolle. Während des Verflüssigungsvorganges ist der Porenwasserdruck so hoch, dass die Körner den Kontakt untereinander verlieren und damit keine Kräfte mehr zwischen den Körnern übertragen werden können (Verlust der Scherfestigkeit). Die Körner können sich frei bewegen und der Porenwasserdruck ist gleich den totalen Spannungen.

Eine Bodenverflüssigung endet, wenn überschüssiges Porenwasser abströmen kann und die Körner in einer neuen, dichteren Packung sedimentieren.

Im Unterschied zu anderen Versagensfällen in der Geotechnik (z. B. Böschungsbruch, Geländebruch oder Grundbruch) kündigt sich eine Bodenverflüssigung nicht an, sondern geschieht ohne vorherige Verformungen, die einen Bruch ankündigen, und damit ohne Vorwarnung.

4.1.2 Randbedingungen des Verflüssigungsvorganges

Damit es zu einer Bodenverflüssigung kommen kann, müssen im Boden bestimmte Randbedingungen vorliegen. In besonderem Maße gilt dies für eine spontane Bodenverflüssigung. Spontan heißt eine Bodenverflüssigung, wenn sie durch eine minimale Störung (Initial) angestoßen wird und sich dann selbstständig in einer Kettenreaktion ausbreitet. Dies ist vergleichbar mit einem Dominoeffekt. Bei größerer Anregung, beispielsweise durch einen Rüttler bei Verdichtungsmaßnahmen, können sich auch Böden verflüssigen, die nicht zu spontaner Verflüssigung neigen.

Voraussetzungen für eine spontane Bodenverflüssigung sind [AU16]:

1. ein instabiles Korngerüst, das bei einer Störung zum Zusammenbruch neigt,
2. kontraktantes Materialverhalten (Volumenabnahme bei Scherung) und
3. eine geringe Durchlässigkeit gegenüber Porenwasser.

Diese Voraussetzungen sind vor allem bei einem wassergesättigtem, (fein-)sandigen Boden mit geringem Feinkornanteil, der locker gelagert ist, gegeben. Bei einem solchen Boden kollabiert das Korngerüst bei einer Störung und durch kontraktantes Materialverhalten verringert sich das Volumen bei Scherung. Die Volumenverringerung führt zu einem Anstieg des Porenwasserdruckes. Bei konstanter totaler Spannung sinkt die effektive Spannung und damit geht der Kornkontakt verloren (Bodenverflüssigung). Da insbesondere Feinsand vergleichsweise gering wasserdurchlässig ist, kann die Rate des Porenwasserdruckaufbaus größer sein als die Rate des Porenwasserdruckabbaus durch Abströmen, so dass es zu einer Ausbreitung der Bodenverflüssigung kommt.

Wenn im Gelände Böschungen vorhanden sind, dann kann es zu einer Rutschung kommen, die Setzungsfleßen genannt wird. Dabei kommt nicht nur der verflüssigte Boden (die Suspension) ins Rutschen, sondern auch der auflagernde erdfeuchte Boden sowie eingelagerte nicht verflüssigte Bereiche. Die erdfeuchte Überdeckung wird dabei gezerrt und es entstehen Risse und Abbruchkanten. In tiefliegenden Bereichen kann sich der Porenwasserüberdruck in Form von Sandvulkanen abbauen. Wenn sich der Böschungsfuß im Wasser befindet, kann dieses durch die rutschenden Massen verdrängt werden und es können Schwallwellen entstehen.

4.1.3 Eintrittswahrscheinlichkeit von Bodenverflüssigungsereignissen

In [AU16] wurde das Risiko, das von Bodenverflüssigungsereignissen auf Innenkippen ausgeht, mit einer Methodik berechnet, die auf der Eintrittswahrscheinlichkeit von Bodenverflüssigungsereignissen basiert. Alle in [AU16] ausgewerteten Bodenverflüssigungsereignisse hatten ein natürliches Initial. Für die Risikoberechnung mussten Szenarien für eine Nutzung der Innenkippenflächen angenommen werden. Bei jedem Szenario wurde eine Personenanzahl auf der Kippe angenommen, die mit der LMBV abgesprachen wurde.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Bodenverflüssigungsereignissen wurde bestimmt, indem 125 Bodenverflüssigungsereignisse hinsichtlich der von ihnen eingenommenen Fläche und hinsichtlich des Jahres ihres Auftretens ausgewertet wurden. Auf dieser Basis konnte die relative Häufigkeit (siehe Gleichung 1) der Ereignisse – getrennt nach Tagebau und Jahr – bestimmt werden. Hierfür wurde als Grundgesamtheit die Fläche angesetzt, in der sich Bodenverflüssigungsereignisse in einem Tagebau ausprägen können. Bodenphysikalische Erkundungsdaten wurden nicht berücksichtigt, sondern es wurden lediglich geometrische Daten zur Gestalt der Geländeoberfläche und zum Grundwasserflurabstand sowie zur Lage von verdichteten Flächen, von früheren Bodenverflüssigungsereignissen und von Wasserflächen genutzt.

Die mittlere relative Häufigkeit von Bodenverflüssigungsereignissen je Tagebau über den gesamten Betrachtungszeitraum wurde mit der mittleren Eintrittswahrscheinlichkeit für Bodenverflüssigungsereignisse in dem betreffenden Tagebau gleichgesetzt.

Voraussetzung für die beschriebene Vorgehensweise war, dass eine ausreichende Anzahl von Bodenverflüssigungsereignissen unter vergleichbaren Randbedingungen vorliegt, die eine statistische Auswertung ermöglicht. **Diese Methodik ist damit nicht auf die Inseln im Knappensee übertragbar, da es dort seit Flutung des Sees kein Bodenverflüssigungsereignis gegeben hat, das durch ein natürliches Initial ausgelöst wurde.**

4.2 Schwallwellen

4.2.1 Entstehung und Ablauf

Schwallwellen sind rutschungsinduzierte Wellen. Dies bedeutet, dass eine Rutschung – im betrachteten Fall ein Setzungsfleßen – die Voraussetzung für eine Schwallwelle ist.

In Abbildung 4 ist der hier betrachtete Ausgangszustand dargestellt. In einem ehemaligen Braunkohletagebau gibt es eine mit Wasser gefüllte Hohlform – einen Bergbaufolgesee. Die Ufer werden entsprechend der Sanierungspraxis im Lausitzer Braunkohlerevier mit einem versteckten Damm gesichert (Abbildung 4 rechts). Dieser verhindert im Falle einer Bodenverflüssigung eine horizontale Bewegung des Bodens in Richtung Bergbaufolgesee ([AU12] S. 119) und damit ein Setzungsfleßen. Links dargestellt ist eine ungesicherte Uferböschung an einem Bergbaufolgesee, wie sie an den Inseln im Knappensee über große Längen vorhanden ist.

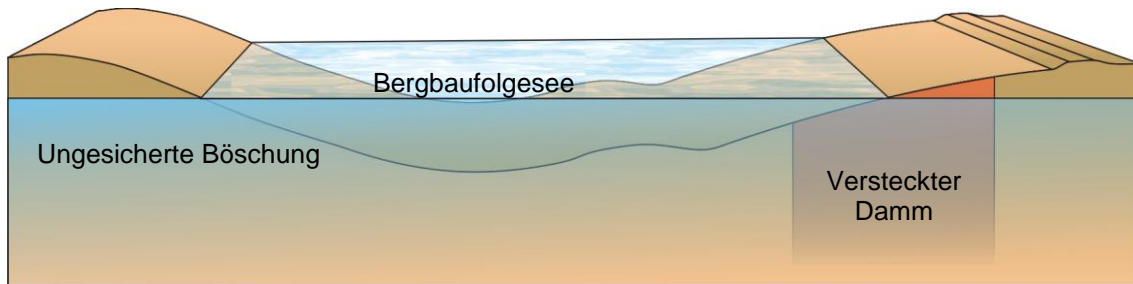


Abbildung 4: Ausgangszustand (links: ungesicherte Böschung an einem Bergbaufolgesee; rechts: mit einem versteckten Damm gesicherte Uferböschung) (Abb. nicht maßstäblich)

Wenn die im Abschnitt 4.1.2 genannten Voraussetzungen für eine spontane Bodenverflüssigung vorliegen und eine horizontale Bewegung des verflüssigten Bodens kinematisch möglich ist, dann kann es zu einem Setzungsfließen kommen, wie es in Abbildung 5 dargestellt ist. Durch die Bodenverflüssigung kommt es zu einem Verlust der Scherfestigkeit im Boden der Böschung. Das Kräfte- bzw. Momentengleichgewicht in der Böschung ist damit nicht mehr gegeben und es kommt zu einer Bewegung des Bodens der Schwerkraft folgend in die Hohlform hinein. Da bei einer Bodenverflüssigung Porenwasserüberdruck auftritt (siehe Abschnitt 4.1.1), kann es zu einer weiteren Ausbreitung des von der Verflüssigung betroffenen Bereiches kommen, was üblicherweise einen staffelförmigen und teilweise zeitlich versetzten Rückgriff in das Böschungshinterland zur Folge hat. Ein Setzungsfließen kann, wenn es im Uferbereich eines Bergbaufolgesees abläuft, zum Großteil unterhalb der Wasserlinie ablaufen und sich damit einer direkten Beobachtung entziehen.

Durch die bewegten Bodenmassen wird Wasser des Bergbaufolgesees seitlich und nach oben verdrängt (Abbildung 5). Es kommt bei einer schnellen Bewegung der verflüssigten Sandmassen zu einer Wasserspiegelanhebung über den Ruhewasserspiegel. Diese Wasserspiegelanhebung breitet sich radial aus und organisiert sich zu einer Schwallwelle (Abbildung 6).

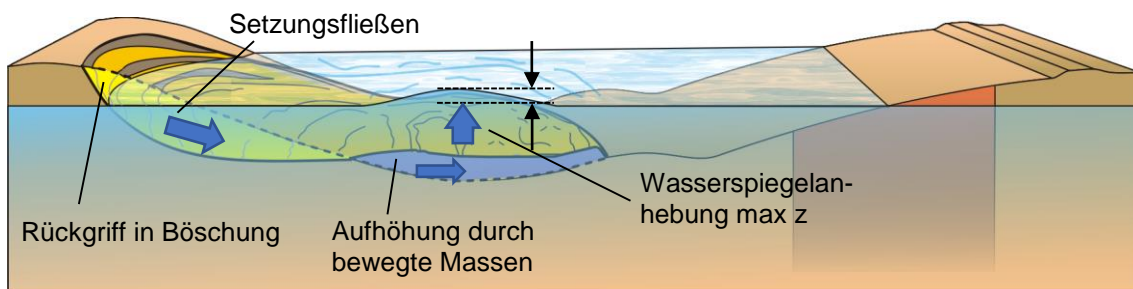


Abbildung 5: Verdrängung von Wasser durch Setzungsfließen, Wasserspiegelanhebung (Abb. nicht maßstäblich)

Bei einer Schwallwelle handelt es sich um eine Einzelwelle, die sich vollständig über den Ruhewasserspiegel erhebt ([AU6]). Die Wellenhöhe h_w ist die Differenz der Höhe des Wellentals zum Wellenkamm. Im Fall der beschriebenen Einzelwelle wird die Wellenhöhe über dem Ruhewasserspiegel gemessen, da es kein Wellental gibt.

Die Schwallwelle breitet sich ausgehend von dem Setzungsfließen radial auf dem Bergbaufolgesee aus. Dabei kommt es rein geometrisch zu einer Abschwächung in Abhängigkeit von der Entfernung zum Anregungsort. Weiterhin ist die Ausbreitung der Schwallwelle von der Wassertiefe abhängig. In Bereichen geringer Wassertiefe verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Welle kann brechen und Wellenenergie kann dissipieren.

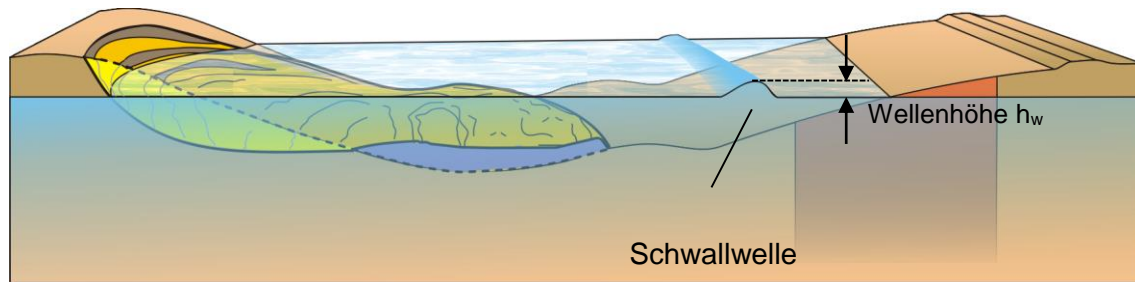


Abbildung 6: Organisation einer Schwallwelle als Einzelwelle (Abb. nicht maßstäblich)

Trifft die Welle auf ein Ufer, so läuft diese auf das Ufer auf (siehe Abbildung 7). Die Auflaufhöhe h_a (der lotrechte Abstand zwischen Ruhewasserspiegel und größter Höhe, die die Welle erreicht) ist davon abhängig, wie hoch die auftreffende Schwallwelle ist, wie die Auflaufböschung geneigt ist und wie rau bzw. durchlässig die Böschungsoberfläche ist.

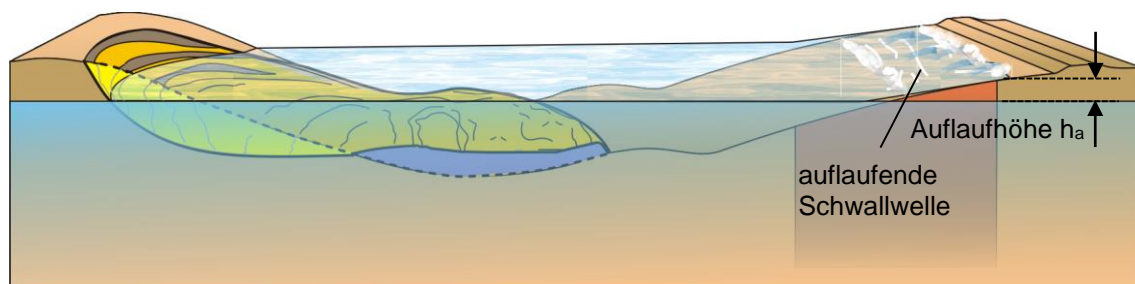


Abbildung 7: Auflaufen der Schwallwelle auf das Gegenufer (Abb. nicht maßstäblich)

4.2.2 Bemessungsverfahren und Annahmen

Zur Abschätzung der Auswirkungen von Schwallwellen existieren verschiedene Literaturquellen, beispielsweise in Bezug auf Felsstürze in alpine Seen. Für setzungsfließinduzierte Schwallwellen in Bergbaufolgeseen der Lausitz wurde ein Bemessungsverfahren entwickelt, das Eingang in die Praxis gefunden hat und auch Grundlage für die Schwallwellenberechnung am Knappensee ist. Dieses Bemessungsverfahren wurde im Rahmen des Projektes „Sanierung und Sicherung setzungsfließgefährdeter Kippen und Kippenböschungen – Teilprojekt 4 Untersuchung der Schwallwellenbildung durch Setzungsfließen in Tagebaurestlöchern auf der Grundlage von Modellversuchen“ entwickelt, das durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie und die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH gefördert wurde [AU6]. Der Abschlussbericht war Grundlage für die Dissertation von Carsten Jennrich [AU10]. In Kurzform und ohne auf die theoretischen Grundlagen einzugehen ist das Bemessungsverfahren Bestandteil des Bandes „Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen“ [AU12] – einer anwendungsorientierten Zusammenfassung der Forschungsergebnisse der 1990er Jahre zur Setzungsfließproblematik, die auch „Grünes Heft“ genannt wird. Im Folgenden wird die Vorgehensweise der Berechnung der Schwallwellen- und Schwallwellenauflaufhöhe kurz vorgestellt und es wird auf Annahmen und Einschränkungen des Verfahrens eingegangen.

Die Schwallwellenhöhe wird schrittweise in einem Algorithmus berechnet, wobei die einzelnen Schritte teilweise aufeinander aufbauen, aber auf unterschiedliche Art und Weise hergeleitet werden.

- Schritt 1 Bilden eines Geotechnischen Modells, Beurteilung der Setzungsfließgefahr
- Schritt 2 Bestimmen möglicher Rückgriffweiten

- Schritt 3 Bestimmen der bewegten Volumina
- Schritt 4 Bestimmen der Rutschungsdauer
- Schritt 5 Bestimmen der maximalen Wellenhöhe und Wellenabflachung durch räumliche Ausbreitung; Bestimmen der Wellenaufbauhöhe am Gegenufer

Im **Schritt 1** werden die bekannten geometrischen, hydrologischen und bodenphysikalischen Daten der betrachteten Böschung in einem geotechnischen Modell zusammengeführt. Wenn aufgrund dieser Daten ein Setzungsfließen möglich erscheint, wird die Schwallwellenberechnung fortgeführt.

Das Ergebnis des Schrittes 1 hängt in hohem Maß von den bodenphysikalischen Eingangsdaten ab. Diese werden in der Regel aus Feldversuchen und aus Laborversuchen an vor Ort gewonnenen Proben gewonnen. Dabei ist die Aufschlussdichte meist so gering, dass eine (geo-)statistische Auswertung der gewonnenen Parameter nicht möglich ist. Da Kippen aufgrund ihrer Genese inhomogen sind, werden Kennwerte, die für die Einschätzung von Bedeutung sind, ob eine Bodenverflüssigung möglich ist, meist konservativ, d. h. auf der sicheren Seite angesetzt. Eine Aussage, ob es überhaupt zu einer Bodenverflüssigung mit anschließenden Setzungsfließen kommt, ist damit nicht möglich. Es kann also keine Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Bodenverflüssigung bzw. Setzungsfließereignis angegeben werden. Es können allenfalls für eine Bodenverflüssigung relevante Randbedingungen (z.B. Porenanteil des Bodens) ermittelt werden.

Ein Anhaltspunkt, ob eine Bodenverflüssigung eher wahrscheinlich ist, ist allerdings das Vorhandensein von historischen Bodenverflüssigungsereignissen unter vergleichbaren Bedingungen an ungesicherten Uferböschungen.

In **Schritt 2** wird die Rückgriffweite eines Setzungsfließens abgeschätzt. Von Bedeutung ist die Rückgriffweite zur Festlegung einer Sicherheitslinie. Sie geht in die weitere Berechnung nicht ein. Die Rückgriffweite wird meist anhand der empirisch gewonnenen Rückgriffweitenformel als dimensionslose Größe (bezogen auf die Höhe der Kippe) bestimmt. Empirisch heißt hier, dass der gefundene Zusammenhang auf der Auswertung von historischen Setzungsfließereignissen beruht. Die Rückgriffweite ist abhängig von der Höhe H_K der Kippe, der Höhe H_{WK} des Wasserspiegels und von zwei Parametern a_1 und b_1 , die wiederum von den Ausfließbedingungen und der Orientierung der Strossenrichtung zur Böschung abhängen. Über einen Faktor δ_1 kann der Einfluss der Größe eines Initials berücksichtigt werden.

Das dimensionslose Rutschungsvolumen (bezogen auf die Breite b eines Setzungsfließens multipliziert mit der Böschungshöhe H^2) wird im **Schritt 3** berechnet. In der Praxis erfolgt dies meist mit einer empirischen Formel, die allerdings nicht auf der Auswertung von historischen Setzungsfließen beruht, sondern auf einer numerischen Parameterstudie. In Abbildung 8 ist das dazugehörige numerische Modell von n Elementen senkrecht zu einer schiefen Ebene dargestellt. Bei der Berechnung wird in Zeitschritten jedes Element volumentreu verformt. Dabei werden jeweils die Randbedingungen zu den Nachbarelementen beachtet.

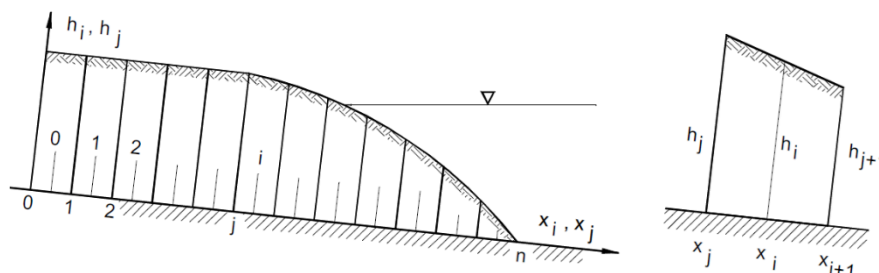


Abbildung 8: Numerisches Modell zur Berechnung von Rutschungsvolumen und Rutschungsdauer [AU6]

In die Bestimmung des dimensionslosen Rutschungsvolumens gehen ein: die Wassertiefe h , die Böschungshöhe H , der Böschungswinkel β , der Reibungswinkel φ_s im Liegenden und die Neigung δ des Liegenden (siehe Abbildung 9).

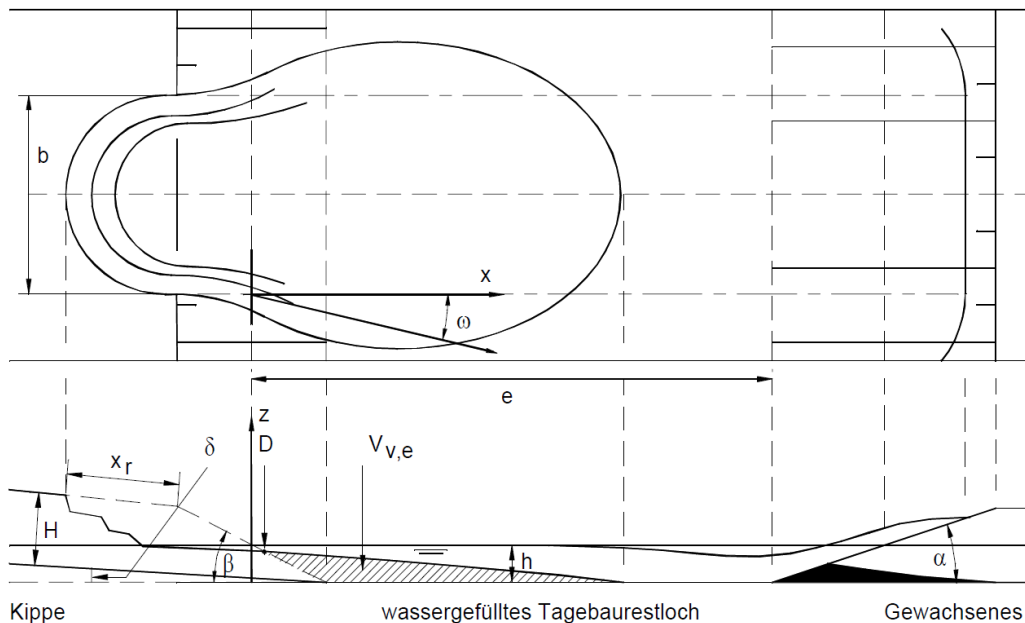


Abbildung 9: Skizze zur Definition der Parameter, die bei der Schwallwellenberechnung benötigt werden [AU6]

Da die Methode auf einem definierten numerischen Modell basiert, wird sie unrealistisch, wenn die tatsächlichen Verhältnisse vom Modell abweichen. Vorliegend ist dies dann der Fall, wenn der Reibungswinkel φ_s klein ist. In Anhang 2 von [AU6] wird daher für $\varphi_s < 3^\circ$ kein dimensionsloses Volumen mehr angegeben und bereits bei $\varphi_s < 5^\circ$ wird das dimensionslose Volumen unrealistisch groß. Dabei muss beachtet werden, dass φ_s eine „integrale Größe dar[stellt], die den Einfluss von Drainagebedingungen, Deformationsbeiträgen und materialbedingten lokalen Festigkeiten beinhaltet“ [AU6]. Der Reibungswinkel kann also nicht im Labor, sondern eigentlich nur als Ergebnis der Rückrechnung eines gegangenen Setzungsfließens bestimmt werden.

Weiterhin wird von einer konstanten Neigung δ des Liegenden mit Einfallen in Richtung Bergbaufolgeesee ausgegangen. Auch diese Verhältnisse liegen nicht immer vor.

Die in **Schritt 4** zugrundeliegende Formel zur Berechnung der dimensionslosen Rutschungsdauer basiert auf dem gleichen numerischen Modell wie bei Schritt 3. Es gehen die gleichen Parameter ein (die Wassertiefe h , die Böschungshöhe H , der Böschungswinkel β , der Reibungswinkel φ_s im Liegenden und die Neigung δ des Liegenden). Bei Reibungswinkeln $\varphi_s < 5^\circ$ steigt die dimensionslose Rutschungsdauer stark an, was am überproportional steigenden Rutschungsvolumen liegt. Auch hier wird eingeschätzt, dass dieser Effekt modellbedingt ist.

In **Schritt 5** werden schließlich die Wellenparameter bestimmt, wobei dieser Schritt weiter untergliedert ist. Die Wellenparameter werden an Hand einer empirischen Formel bestimmt, die aus Modellversuchen abgeleitet wurde. In Abbildung 10 ist der Aufbau der Modellversuche skizziert. Links zu sehen ist ein Hebelmechanismus, mit dem eine Bewegung von Massen durch ein Setzungsfließen simuliert wurde. Variiert wurde dabei die Geschwindigkeit der Bewegung und die Form der Fußplatte (Veränderung des bewegten Volumens). In der mit Wasser gefüllten Rinne ist auf der rechten Seite die Auflaufböschung zu sehen, deren Neigung variiert wurden. Daneben wurde auch die Höhe des Wasserspiegels zwischen den Versuchen

verändert. Gemessen wurde die Wellenhöhe in drei Entfernungen und die Auflauhöhe auf der Auflaufböschung. Die Auswertung der Versuchsergebnisse diente zum Aufstellen von empirischen Beziehungen zwischen den Eingangsparametern und den Wellenparametern.

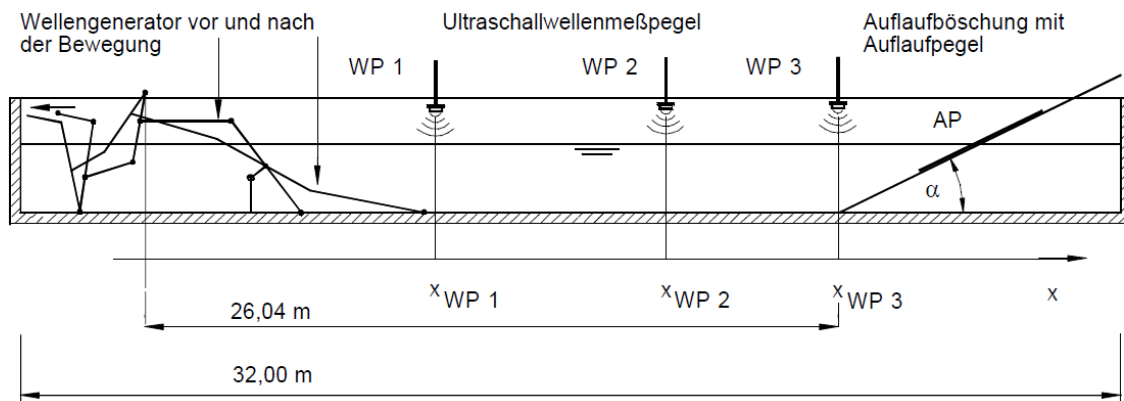


Abbildung 10: Skizze zum Modellversuch zur Bestimmung der Wellenparameter [AU6]

Die **maximale Wasserspiegelanhebung** $\max z$ (dimensionslos, bezogen auf die Wassertiefe h) wird über eine empirische Gleichung aus dimensionslosem Rutschungsvolumen und dimensionsloser Rutschungsdauer abgeleitet. Dies bedeutet, dass Modellunsicherheiten aus Schritt 2 und 3 sowie Modellunsicherheiten aus dem Modellversuch in das Ergebnis einfließen.

Gleiches gilt für die dimensionslose Wellenhöhe h_w , die ebenfalls auf das dimensionslose Rutschungsvolumen und die dimensionslose Rutschungsdauer zurückgeführt wird.

Der Einfluss der räumlichen Wellenausbreitung wird in der Berechnung von $h_w(x, \omega)$ berücksichtigt, wobei x der Abstand von der Rutschung und ω der Winkel ist, der die Wellenausbreitungsrichtung beschreibt. Die Beziehung gilt unter bestimmten geometrischen Annahmen, wobei nicht klar ist, wie sich Abweichungen von diesen Annahmen auswirken.

Zuletzt wird die **dimensionslose Wellenaufauhöhe** h_a (bezogen auf die Wassertiefe h) bestimmt. In die empirisch bestimmte Gleichung geht die maximale Wasserspiegelanhebung $\max z$ (mit der oben genannten Modellunsicherheit), die Entfernung E zum Gegenufer und der Winkel α der Auflaufböschung ein.

Da die Bestimmung der Wellenparameter einem Algorithmus folgt, der schrittweise vorgeht, können sich Modellunsicherheiten zu Beginn im Endergebnis stark auswirken. **Es kann also** - in Abhängigkeit davon, wie sich das Berechnungsmodell von einem tatsächlichen Ereignis (setzungsfließinduzierte Schwallwelle) unterscheidet - **erhebliche Abweichungen der ermittelten Wellenparameter von den tatsächlichen Wellenparametern geben**. Die Berechnungsmethode ist dabei prinzipiell konservativ, so dass die Wellenparameter eher überschätzt als unterschätzt werden. Das Ergebnis, das mit der Berechnungsmethode erzielt wurde, ist in [AU6] nur in einem Fall anhand einer tatsächlich stattgefundenen Schwallwelle überprüft worden. Weitere Kalibrierungen sind nicht bekannt.

Im Folgenden sind Punkte zusammengefasst, die durch das Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt werden können und daher bei der Interpretation der erhaltenen Wellenparameter berücksichtigt werden müssen:

1. Der dem Berechnungsverfahren zugrundeliegende Mechanismus der mit einem Setzungsfließen verbundenen Massenumlagerung ist stark vereinfacht. Tatsächliche Vorgänge können stark von diesem Mechanismus abweichen (bspw. bei einem Setzungsfließen, das sich weitgehend unter Wasser abspielt).

2. Für kleine Reibungswinkel in der Sohle können die maximale Wasserspiegelanhebung $\max z$ und die Wellenaufbauhöhe h_a unrealistisch groß werden. Es liegen kaum Erfahrungen vor, welcher Reibungswinkel realistischerweise anzusetzen ist.
3. Eine Schwallwelle braucht von ihrer Entstehung bis zu dem Punkt, an dem sie ihre maximale Höhe erreicht, einen gewissen Weg, „um sich zu organisieren“. Für kurze Abstände vom rutschenden Ufer zu Ufer, an dem die Welle aufläuft, können daher die die maximale Wasserspiegelanhebung $\max z$ und die Wellenaufbauhöhe h_a überschätzt werden.
4. Bei Wellenaufbau werden nur schwingende (und keine brandenden) Wellen berücksichtigt.
5. Ebenso unberücksichtigt bleiben die Böschungsrauhheit und Böschungsdurchlässigkeit der Auflaufböschung. Daher kann die Wellenaufbauhöhe überschätzt werden.

4.2.3 Anwendung des Bemessungsverfahrens an einem Beispiel mit Beobachtungsdaten

In den Morgenstunden des 13.09.2018 kam es an den Inseln im Senftenberger See (ehemaliger Tagebau Niemtsch) zu einem Setzungsfließen, in dessen Folge sich eine Schwallwelle bildete. Diese wurde beobachtet und in ihrer Auflaufhöhe eingemessen [AU13]. Das der Schwallwelle zugrunde liegende Setzungsfließen wurde als geotechnisches Ereignis untersucht und es kam zu einer Ersteinschätzung [AU9]. Demnach fand ein Großteil der Massenumlagerungen unterhalb der Wasserlinie statt.

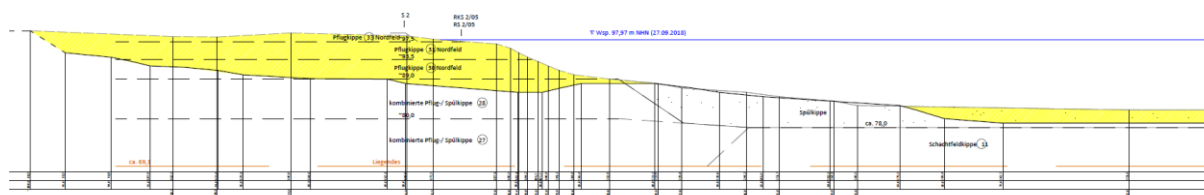


Abbildung 11: Profil 37 zum Setzungsfließen vom 13.09.2018 [AU9]

In Abbildung 11 ist ein Profil dargestellt, welches in etwa der Hauptereignisrichtung entspricht und welches auf einen in [AU13] dokumentierten Uferbereich gerichtet ist („Nordufer westlich des Senftenberger Hafens“). Für dieses Profil wurde die Schwallwellenhöhe mit folgenden Eingangswerten berechnet:

- Höhe des Liegenden $H_L = 86 \text{ m NHN}$
- Höhe der Böschungsschulter $H_B = 99 \text{ m NHN}$
- Höhe des Wasserspiegels $H_W = 98 \text{ m NHN}$
- Restreibungswinkel in Sohle φ_s variiert zwischen 1° und 7°
- Breite der Rutschung $b = 220 \text{ m}$
- Entfernung zum Gegenufer $E = 1120 \text{ m}$
- Neigungswinkel der Sohle $\delta = 1,5^\circ$
- Neigungswinkel der Böschung $\beta = 22^\circ$
- Winkel der Wellenausbreitung $\omega = 45^\circ$
- Neigungswinkel der Auflaufböschung $\alpha = 8^\circ$

Das dimensionslose Volumen $V_{(V,e)}/(b \cdot H^2)$ berechnet sich nach Gleichung 3 [AU6].

$$\frac{V_{V,e}}{b \cdot H^2} = e^{-8,6088} \cdot (\delta + 15^\circ)^{4,1602} \cdot \left(\frac{h}{H}\right)^{0,3671} \cdot \beta^{0,3067} \cdot \varphi_s^{-2,1451} \quad (3)$$

$$\text{mit } h = H_W - H_L \text{ und } H = H_B - H_L$$

In gleicher Weise wird nach Gleichung 4 die dimensionslose Rutschungsdauer $t_e/\sqrt{H/g}$ berechnet (siehe [AU6]).

$$\frac{t_e}{\sqrt{\frac{H}{g}}} = e^{-0,6992} \cdot (\delta + 15^\circ)^{1,9739} \cdot \left(\frac{h}{H}\right)^{-0,2793} \cdot \beta^{-0,1594} \cdot \varphi_s^{-1,0997} \quad (4)$$

Der dimensionslose Wert der maximalen Wasserspiegelanhebung $\max z/h$ berechnet sich nach Gleichung 5 aus dimensionslosem Volumen und dimensionsloser Rutschungsdauer (Bezugsgröße jeweils unter Einbeziehung von h statt H).

$$\frac{\max z}{h} = 0,351 \cdot \left(\frac{V_{V,e}}{b \cdot h^2}\right)^{1,305} \cdot \left(\frac{t_e \sqrt{g}}{\sqrt{h}}\right)^{-0,939} \quad (5)$$

$$\text{mit } \frac{V_{V,e}}{b \cdot h^2} = \frac{V_{V,e}}{b \cdot H^2} \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^2 \text{ und } \frac{t_e \sqrt{g}}{\sqrt{h}} = \frac{t_e \sqrt{g}}{\sqrt{H}} \cdot \sqrt{\frac{H}{h}}$$

Da im betrachteten Fall $h/H > 0,5$ gilt, wird die dimensionslose Wellenhöhe nach Gleichung 6 berechnet.

$$\frac{h_W}{h} = 1,023 \cdot \left(\frac{V_{V,e}}{b \cdot h^2}\right)^{0,977} \cdot \left(\frac{t_e \sqrt{g}}{\sqrt{h}}\right)^{-1,215} \quad (6)$$

Die Abschwächung der Wellenhöhe durch räumliche Ausbreitung wird durch Gleichung 7 berücksichtigt.

$$h_W(x, \omega) \approx h_W(x = b, \omega = 0^\circ) \cdot \cos^2 \omega \cdot \sqrt{\frac{1 + \pi}{1 + \pi \cdot \frac{x}{b}}} \quad (7)$$

$$\text{mit } h_W(x = b, \omega = 0^\circ) = h_W(\text{Gleichung 6})$$

Die dimensionslose Wellenaufbauhöhe h_a/h berechnet sich nach Gleichung 8. Für Verhältnisse $h/H > 0,75$, wie sie im betrachteten Fall vorliegen, wird ein Ansatz von $0,5 \dots 0,8 \cdot \max z$ empfohlen.

$$\frac{h_a}{h} = 2,741 \cdot \left(\frac{\max z}{h}\right)_{x=E}^{1,196} \cdot (\tan \alpha)^{-0,220} \quad (8)$$

Für Einschränkungen der Gültigkeit der genannten Gleichungen und Hinweise zur Berechnung siehe [AU6].

Tabelle 3: Wellenhöhe und Wellenaufhöhe in Abhängigkeit vom Restreibungswinkel in der Sohle (Ansatz von 0,5 ... 0,8 max z bei h/H > 0,75)

	gemessen	berechnet			
		$\varphi_s = 7^\circ$	$\varphi_s = 5^\circ$	$\varphi_s = 3^\circ$	$\varphi_s = 1^\circ$
Wellenhöhe h_w [m]	-	0,07 ... 0,11	0,12 ... 0,19	0,29 ... 0,47	2,03 ... 3,30
Wellenauflauf h_a [m]	0,84	0,10 ... 0,18	0,20 ... 0,35	0,59 ... 1,04	6,06 ... 10,6

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Berechnungen für die oben genannten Eingangswerte zusammengefasst. Sie zeigen, dass die gemessene Wellenaufhöhe mit einem Restreibungswinkel in der Sohle von $\varphi_s = 3^\circ$ ermittelt werden kann. Die Lotungen, die in [AU9] gezeigt werden, lassen jedoch einen kleineren Restreibungswinkel vermuten, was zu wesentlich größeren Wellenparametern führen würde. Ergebnisse zu φ_s aus Rückrechnungen liegen nicht vor.

Die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens zur Schwallwellenberechnung sind in hohem Maße davon abhängig, ob der Mechanismus des Setzungsfließens und der Mechanismus der Wellenausbreitung dem Modell entsprechen, welches in der Aufstellung des Verfahrens zugrunde gelegt wurde. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse der Schwallwellenberechnung, die in [AU4] aufgeführt werden, kritisch hinterfragt werden.

Die Schwallwellenberechnungen in [AU4] konnte nicht überprüft werden, da in [AU4] lediglich die Ergebnisse, nicht aber die Eingangswerte und Berechnungsansätze dokumentiert sind.

5 Das Setzungsfließereignis am 11.03.2021 am Ufer des Knappensees

Am 11.03.2021 ist im Zuge der Sanierungsarbeiten am Ufer des Knappensees ein großes Setzungsfließereignis aufgetreten (siehe Abbildungen 12 und 13). Auch wenn in diesem Gutachten die Inseln des Knappensees behandelt werden, muss das Setzungsfließen am 11.03.2021 zwingend in die Analyse miteinbezogen werden. Dazu soll analysiert werden, welche Randbedingungen beim Setzungsfließereignis am 11.03.2021 vergleichbar zu den Randbedingungen an den Inseln bzw. an den Ufern der Inseln gewesen sind, und welche Randbedingungen sich beim Setzungsfließereignis am 11.03.2021 sich von den Randbedingungen an den Inseln unterscheiden.

Das Setzungsfließereignis am 11.03.2021 ist detailliert im Bericht der ARGE Werminghoff vom 18.06.2021 [AU18] analysiert und bewertet worden. Bei dem Setzungsfließen sind ca. 1 Mio. m³ Sand aus der nordöstlichen Uferböschung des Knappensees ausgeflossen [AU18] bzw. 1,34 Mio. m³ nach [AU20]. Der Ausfluss ist durch mehrere Videos (siehe YouTube) dokumentiert. Der entstandene Rutschungskessel hat Abmessungen von ca. 300 m x 370 m. Die Rutschungsmassen flossen in südwestlicher Richtung aus (siehe Abbildung 12). Dabei erreichten sie auch das Vorfeld der Inseln des Knappensees. Der Seegrund ist durch die Ausflussmassen im südwestlichen Teil des Knappensees um etwa 0 m bis 4 m erhöht worden. Die Erhöhung ist aus Abbildung 13 ersichtlich. Die Seegrunderhöhung wurde durch Lotung vor und nach dem Ereignis ermittelt. Bei dem Setzungsfließereignis sind auch Bäume aus der Waldfläche in den See gespült worden. Durch die Rutschung wurde eine Waldfläche von ca. 250 m Länge und von ca. 150 m Breite erfasst und zerstört.

Durch das Setzungsfließereignis und die folgende Massenverdrängung unter Wasser ist eine Schwallwelle mit einer Höhe von ca. 0,5 m bis 0,8 m entstanden. Die Schwallwelle hat das Südufer des Knappensees erreicht, ist dort aufgelaufen und hat dort zu Schäden geführt, die in [AU19] beschrieben sind. Die auflaufende Welle hatte laut Augenzeugenberichten eine Höhe von ca. 1,5 m [AU18, S. 35]. Die Schwallwelle muss auch auf den südlichen Bereich der Inseln aufgelaufen sein.

Durch den Masseneintrag beim Setzungsfließen in den See hat sich der Wasserstand kurzfristig um etwa 0,33 m erhöht. Weder durch die Erhöhung des Wasserstandes noch durch den dynamischen Krafteintrag durch die Schwallwelle ist an den Inseln ein Setzungsfließen ausgelöst worden.

Die Ursache bzw. das Initial für dieses Setzungsfließereignis waren Erdarbeiten bei Station 2+050 m im wasserseitigen Uferbereich des Knappensees, die vom Schiff / Ponton ausgeführt wurden [AU18, S. 69]. Durch die Arbeiten ist der Seeuntergrund teils profiliert worden. Dadurch fanden (geringe) Auftrags- und Abtragsarbeiten statt, so dass in [AU18] auf Seite 72 der Schluss gezogen wird: „Die bautechnischen Einwirkungen und die Baggerarbeiten selbst werden als Initial angesehen.“ Die Arbeiten wurden auf Grundlage der Ausführungsplanung und den Bauvorgaben ausgeführt. Ein Fehlverhalten oder ein Verstoß gegen die Sicherheitsbestimmungen durch die bauausführenden Firmen wurde nicht festgestellt.

Die Sanierungsarbeiten fanden an den Ufern des Knappensees, nicht an den Ufern der Inseln statt. Bei diesem Setzungsfließereignis ist niemand zu Schaden gekommen, da der Uferbereich aufgrund der Sanierungsarbeiten gesperrt war. Allerdings sind Sachschäden aufgrund der Schwallwelle, die am gegenüberliegenden Ufer aufgelaufen ist, aufgetreten.

Ein solches, bei Sanierungsarbeiten auftretendes Setzungsfließereignis wurde am Knappensee von vornherein nicht ausgeschlossen, weil es ingenieurtechnisch nicht ausgeschlossen werden kann. Um das Personenrisiko zu minimieren, wurden umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen hinsichtlich des Arbeitsschutzes getroffen, die bewirkt haben, dass bei dem Setzungsfließereignis kein Personenschaden entstanden ist.

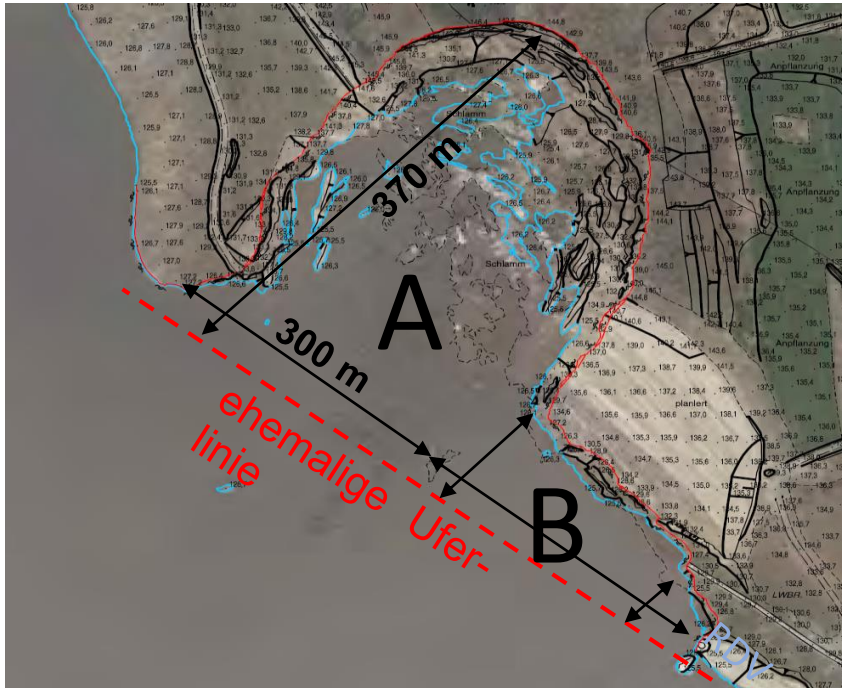


Abbildung 12: Rutschungskessel (Bereich A) und südlich angrenzender Bereich B des Setzungsfließens am 11.03.2021 [AU20]

Legende:

Differenzmodell Im Rutschungsbereich



Shaded Relief des Seegrundes aus Lotung
In Hellblau dargestellt

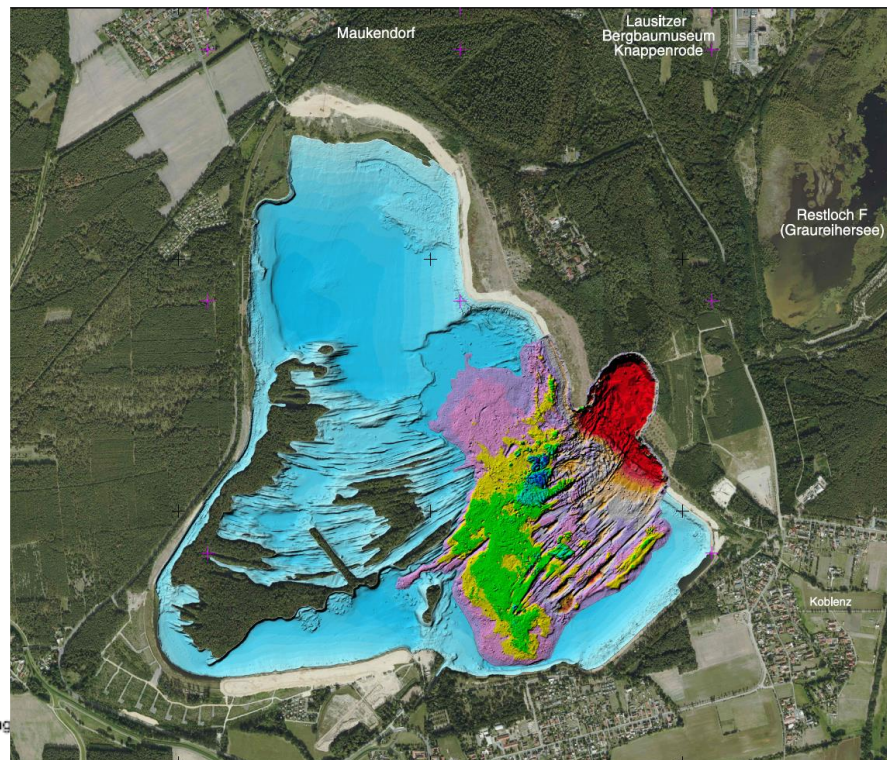


Abbildung 13: Abtrag (über Wasser) und Auftrag (unter Wasser) der ausgeflossenen Sandmassen [AU20]

In Bezug auf die Standsicherheit der Inselböschungen können aus dem Setzungsfleißereignis am 11.03.2021 folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Das Setzungsfleißereignis wurde durch Bautätigkeit (Massenumlagerungen) wenig von der Uferlinie entfernt ausgelöst (anthropogenes Initial). Die Inseln dürfen nicht betreten werden. Massenumlagerungen im Vorfeld der Uferlinie der Inseln sind nicht zulässig.
2. Für die Inseln besteht ein Betretungsverbot. Das Betretungsverbot muss dauerhaft aufrechterhalten und kontrolliert werden. Es muss verhindert werden, dass ein anthropogenes Initial auftritt.
3. Die beim Setzungsfleßen am 11.03.2021 eingespülten Sandmassen haben sich auch mit einer Höhe zwischen 0 m und 4 m im südöstlichen Vorfeld der Inseln abgelagert. In den Bereichen, in denen sich Sand unter Wasser abgelagert hat, sind die Böschungen der Inseln unter Wasser eher stabilisiert als destabilisiert worden.
4. Der dynamische Krafteintrag durch die Schwallwelle der Rutschung vom 11.03.2021 kann im weitesten Sinne auch als eine Art Belastungstest für die Inseln gewertet werden. Der dynamische Krafteintrag hat nicht dazu geführt, dass ein Setzungsfleßen bei den Inseln ausgelöst wurde.
5. Durch den relativ schnellen Anstieg des Wasserspiegels im Knappensee um 0,33 cm und die damit verbundenen Spannungsänderungen ist ebenfalls kein Setzungsfleßen ausgelöst worden.
6. Ein Setzungsfleßen in der Größenordnung von 1 Mio. m³ wird in der Form bei den Inseln nicht für möglich gehalten, da die Inseln flacher sind als das Gelände des Rutschungskessels (vor der Rutschung). Auch erhebt sich die Geländeoberfläche bei den Inseln maximal 10 m über die Wasseroberfläche von ca. 125,50 mNHN. Die Geländeoberfläche des größten Teils des Rutschungskessels lag jedoch zwischen 144,00 mNHN und 146,30 mNHN und damit ca. 20 m über der Wasserspiegeloberfläche.

Insgesamt wird eingeschätzt, dass ein Setzungsfleßen, wie es am 11.03.2021 bei den Sanierungsarbeiten am östlichen Ufer des Knappensees aufgetreten ist, bei den Inseln nicht auftreten kann, sofern an den Inseln und im Vorfeld der Inseln der Eintrag von anthropogenen Initialen verhindert wird.

6 Risikoeinschätzung und Bewertung der Inselböschungen

6.1 Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Bodenverflüssigungsereignissen im Bereich der Inseln im Knappensee, die durch ein natürliches Initial ausgelöst werden

In diesem Gutachten geht es ausschließlich um die Bewertung des Risikos, dass ein Setzungsfließereignis an den Ufern **der Inseln** auftritt, das durch ein **natürliches Initial** ausgelöst wird. Es geht nicht um Risiken für Setzungsfließereignisse, die bei bautechnischen Sanierungsarbeiten auftreten können (anthropogenes Initial). Die Aussagen sind nicht auf die Verhältnisse übertragbar, die vor der Sanierung an den Ufern des Knappensees vorhanden waren.

Eine Bodenverflüssigung auf bzw. an den Ufern der Inseln ist die Voraussetzung für ein schadenauslösendes Ereignis und damit für die Gefährdung, die von den Inseln im Knappensee ausgeht. In [AU3] wurden die vorhandenen Unterlagen ausgewertet und es wurde für die Inseln grundsätzlich festgestellt, dass eine Bodenverflüssigung möglich ist. Dabei wurde auf Bodenuntersuchungen im Umfeld der Inseln, auf darauf aufbauende Standsicherheitsuntersuchungen und auf historische Setzungsfließereignisse verwiesen. Eine Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Bodenverflüssigung im Bereich der Inseln im Knappensee konnte auf Basis der Erkenntnisse nicht angegeben werden.

Bei den Inseln im Knappensee muss unterschieden werden,

- a) ob der dort vorhandene Boden nur verflüssigungsfähig ist und
- b) auch zu einer spontanen Bodenverflüssigung, die durch ein natürliches Initial ausgelöst wird, neigt und / oder auch
- c) eine Bodenverflüssigung durch ein anthropogenes Initial ausgelöst werden kann.

Zu a) Die Inseln bestehen aus verflüssigungsfähigem Sand.

Zu b) Eine „Erkundung“, ob eine spontane Bodenverflüssigung durch ein natürliches Initial ausgelöst werden kann, ist nicht möglich. Für diese Aussage müssten flächendeckende und hoch aufgelöste Informationen zur Lagerungsdichte, zum Spannungszustand und zur Granulometrie des Bodens vorliegen. Eine solche Erkundung ist technisch nicht möglich. Spontane Bodenverflüssigungen an den Inseln sind seit der Flutung des Sees im Jahr 1945 nicht dokumentiert.

Zu c) Die Inseln dürfen derzeit und auch zukünftig nicht betreten werden. Damit sind anthropogene Initiale ausgeschlossen, wenn das Betretungsverbot eingehalten wird.

Die in [AU3] zusammengestellten historischen Setzungsfließen fanden alle noch vor der Flutung im Jahr 1945 statt. Auffällig ist dabei, dass es offensichtlich zu einer zeitlichen Häufung der Setzungsfließereignisse in der Zeit kam, in der der Grundwasserspiegel in der Kippe bereits angestiegen war, die Flutung des Tagebaus jedoch noch nicht abgeschlossen war. Dies war der Zeitraum von Ende der 1930er bis zum Anfang der 1940er Jahre. Im Jahr 1945 kam es dann – auch bedingt durch ein Hochwasserereignis und durch Auswirkungen des Kriegsendes – zu einer schnellen Füllung des Tagebaus mit Wasser, wobei nahezu der Endwasserspiegel erreicht wurde.

Die beobachtete Häufung der Bodenverflüssigungsereignisse in den 1930er bis 1940er Jahren deckt sich mit Untersuchungsergebnissen von Schütze, die in [AU6] enthalten sind. Schütze hat untersucht, bei welchen Wasserstandsverhältnissen häufig Setzungsfließereignisse auftreten. Das Verhältnis des Wasserstandes H_{WK} in der Kippe zur Kippenhöhe H_K kann theoretisch zwischen 0 und 1 schwanken. Meist liegt es in einem Bereich zwischen etwa 0,2 und 0,9.

Nach [AU6] kommt es besonders häufig zu Setzungsfließen, wenn das Verhältnis des Wasserstandes H_{WK} in der Kippe zur Kippenhöhe H_K mittlere Werte (= ca. 0,35 bis 0,6) einnimmt (siehe Abbildung 14). Das Maximum der Häufigkeit von Setzungsfließen liegt bei einem Verhältnis H_{WK}/H_K von ca. 0,4 bis 0,5. Solche Verhältnisse gab es im Knappensee im Wesentlichen nur vor Abschluss der Flutung. Heute ist das Verhältnis H_{WK}/H_K meist deutlich größer als 0,5; es liegt im Bereich von 0,8 ... 0,9.

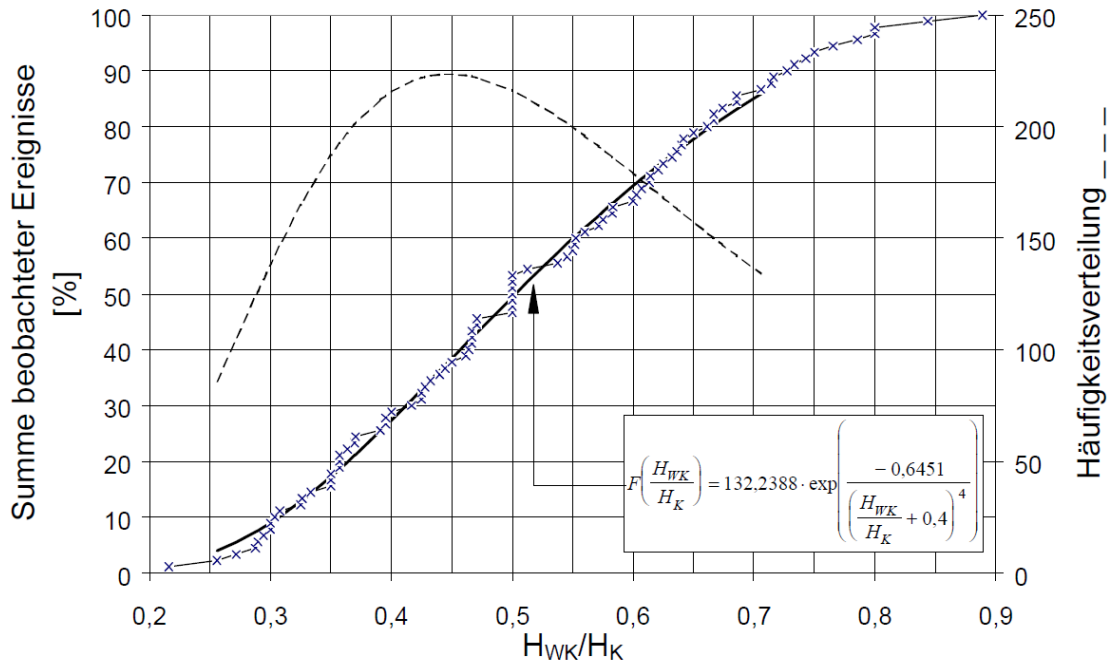


Abbildung 14: Summe beobachteter Setzungsfließrutschungen in Abhängigkeit vom Wasserstandsverhältnis und Darstellung der Häufigkeitsverteilung [AU6]

Nach Abschluss der Flutung des Knappensees im Jahr 1945 sind nach aktuellem Kenntnisstand keine Setzungsfließrutschungen mit einem natürlichen Initial eingetreten. Dies gilt auch für Zeiten, in denen durch Hoch- oder Niedrigwasser extreme hydrologische Zustände geherrscht haben (z. B. Hochwasser mit einer Kote von 126,60 m NHN im Juli 1981 und Niedrigwasser mit einer Kote von 122,80 m NHN im Dezember 1985 [AU3]). Historische Setzungsfließrutschungen, auch im Bereich der Inseln, sind demnach kein direkter Hinweis darauf, dass eine spontane Bodenverflüssigung auch heute noch wahrscheinlich ist.

Damit wird es als wenig wahrscheinlich eingeschätzt, dass eine spontane Bodenverflüssigung, die durch ein natürliches Initial ausgelöst wird, im Bereich der Inseln eintritt. In 75 Jahren ist es zu keinem durch ein natürliches Initial ausgelösten Setzungsfließereignis gekommen, obwohl – soweit bekannt – die hydrologischen Bedingungen „extremer“ waren als es die derzeitige Bewirtschaftung vorsieht.

Wie bereits ausgeführt, werden anthropogene Initiale nicht als Auslöser von Bodenverflüssigungseignissen in Betracht gezogen, da die Inseln dauerhaft nicht betreten werden dürfen. Ein solches Betretungsverbot muss durch entsprechende Maßnahmen, die hier nicht näher betrachtet werden, umgesetzt werden.

6.2 Bewertung der Wahrscheinlichkeit und des Ausmaßes von Personenschäden infolge von Bodenverflüssigungsereignissen auf den Inseln

Durch eine Bodenverflüssigung wird ein schadensauslösendes Ereignis lediglich in Gang gesetzt. Damit es zu einem Personenschaden kommt, bedarf es einer Abfolge von Vorgängen, die jeweils an bestimmte Randbedingungen gekoppelt sind und die jeweils eine eigene Wahrscheinlichkeit aufweisen. Im Folgenden werden diese Punkte einzeln aufgezählt und erörtert.

1. **Spontane Bodenverflüssigung** – Es muss zu einer spontanen Bodenverflüssigung kommen. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist in Abschnitt 6.1 diskutiert.
2. **Ausprägung als Setzungsfließen** – Der von der Bodenverflüssigung erfasste Bereich muss sich kinematisch als Setzungsfließen ausprägen können. Dies ist dann der Fall, wenn die Stützung seitlich fehlt. Bei den Inseln im Knappensee fehlt diese regelmäßig an den außenliegenden Böschungen. Falls es zu einer Bodenverflüssigung im Inneren oder zwischen den Inseln kommt, dann prägt sich die Bodenverflüssigung möglicherweise nicht als Setzungsfließen aus.
3. **Ausbildung und Ausbreitung einer Schwallwelle** – Beim Setzungsfließen muss sich die Sand-Suspension in einer so hohen Geschwindigkeit verlagern, dass sich eine Schwallwelle ausbildet. Die Ausbreitung einer Schwallwelle wird von geometrischen Randbedingungen beeinflusst. In tiefem Wasser kann sich eine Schwallwelle ungehindert ausbreiten und bricht nicht, wodurch sie nur eine geringe Gefährdung für Wasserfahrzeuge darstellt. In Bereichen mit geringer Wassertiefe verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwallwelle. Dies führt zu einer Stauchung der Welle und die Welle bricht (siehe auch Setzungsfließereignis am 11.03.2021). Dabei wird Energie dissipiert. Wie stark dieser Effekt ist, hängt von der Entfernung zwischen Setzungsfließen und betrachteter Böschung sowie von der Gestalt des Seegrundes ab. In Abbildung 15 ist zu sehen, dass im östlichen Bereich des Knappensees Untiefen (lokale Wassertiefe < 2 m) vorhanden sind, die eine Schwallwelle in diesem Bereich abschwächen würden. Durch das Setzungsfließereignis am 11.03.2021 hat sich zudem die Seetiefe im südlichen Bereich vor den Inseln verringert (siehe Abbildung 13). Dies ist positiv zu bewerten, da sich durch die Ablagerung des Materials unterwasserseitig vor den Inselböschungen die Standsicherheit der Inselböschungen (einschließlich des Bereiches unter Wasser) erhöht hat.
4. **Auflaufen der Schwallwelle** – Die Auflaufhöhe einer Schwallwelle ist abhängig von der Neigung und von der Beschaffenheit (Rauigkeit und Durchlässigkeit) der Auflaufböschung. Durch eine große Rauigkeit und Durchlässigkeit, beispielsweise eine Ufersicherung mit Steinwurf oder einem starken Bewuchs, kann die Auflaufhöhe reduziert werden.
5. **Anwesenheit von Personen (nutzungsabhängig)** – Ob sich in einem bestimmten Uferabschnitt, der von einer auflaufenden Schwallwelle getroffen wird, Personen aufhalten, ist wesentlich von der Nutzung abhängig. Auch die Anzahl der Personen, z. B. bezogen auf eine Flächeneinheit, hängt von der Nutzung ab. Eine Nutzung, bei der der unmittelbare Uferbereich betreten wird, sind beispielsweise Badestrände und Bootseinlassstellen. Wenn der Uferbereich naturbelassen ist und durch dichte Vegetation das Betreten des Ufers erschwert wird und zusätzlich eine entsprechende Beschilderung vorhanden ist, dann ist der Aufenthalt von Personen eher unwahrscheinlich. Abbildung 16 zeigt die geplante Nutzung des Knappensees. Nutzungen, die einen Aufenthalt von Personen im Uferbereich nach sich ziehen, befinden sich weitgehend außerhalb des Umfeldes der Inseln im Knappensee (> 500 m Abstand).
6. **Anwesenheit von Personen (zeitabhängig)** – Eine spontane Bodenverflüssigung kann „prinzipiell“ jederzeit stattfinden – auch wenn das Auftreten einer Bodenverflüssigung als unwahrscheinlich eingestuft wird. Die Anwesenheit von Personen am Ufer ist

jedoch stark von der Tages- und Jahreszeit und von den vorherrschenden Wetterbedingungen abhängig. Bezogen auf ein ganzes Jahr ist die Zeit, die Personen am Seeufer verbringen, klein. Wenn man beispielsweise davon ausgeht, dass ein Badestrand nur an 50 Tagen im Jahr zu jeweils 10 Stunden besucht ist, dann besteht lediglich eine 6-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass bei einem zeitlich zufälligen, spontanen Bodenverflüssigungsereignis Personen am Strand sind (Gleichung 9).

$$\frac{50 \text{ Tage} \cdot 10 \text{ Stunden}}{365 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ Stunden}} = 0,057 \approx 6 \% \quad (9)$$

7. **Wahrnehmung und Flucht** – Bei einer auflaufenden Schwallwelle kann insbesondere in Strandsituationen davon ausgegangen werden, dass eine relevante Zahl von Personen durch die Wahrnehmung der Gefahr und Flucht vor der Schwallwelle aus der Gefahrenzone gelangt.

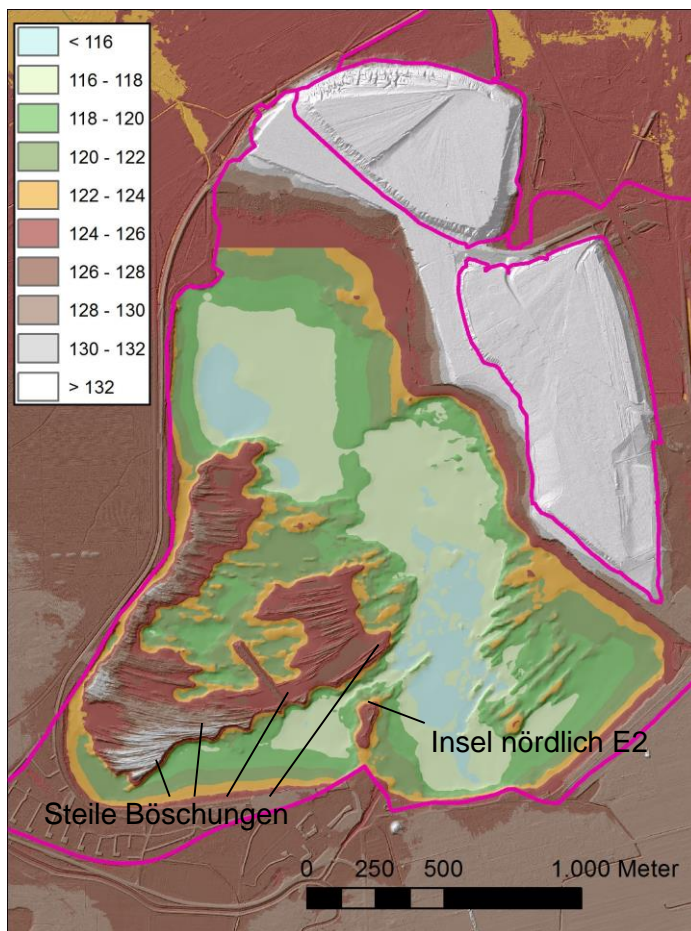


Abbildung 15: Digitales Geländemodell des Knappensees (Höhenangaben in mNHN, Stand 2016, Wasser abgedeckt)

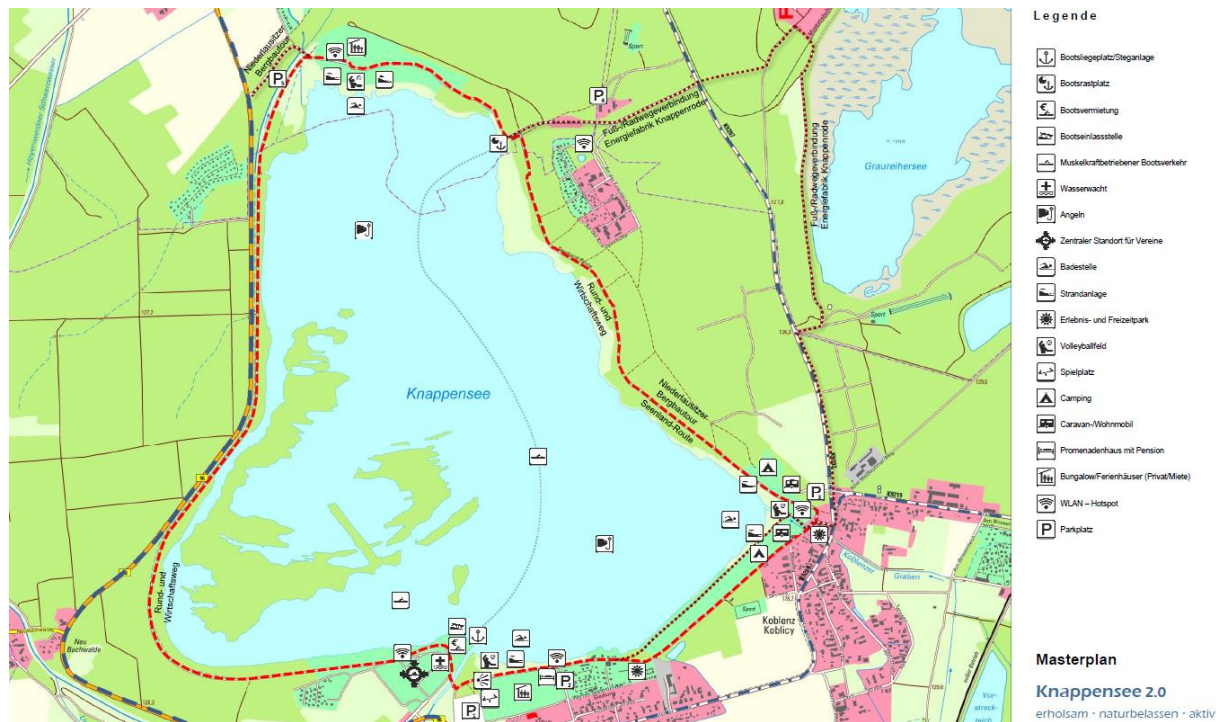


Abbildung 16: Masterplan zur Nutzung des Knappensees und dessen Umfeld [AU17]

Es kann festgehalten werden, dass eine **Schädigung von Personen** durch ein Bodenverflüssigungsereignis, das von den Inseln ausgeht, **unwahrscheinlicher ist als das Bodenverflüssigungsereignis selbst**. Dies wird damit begründet, dass in der kausalen Kette nicht jedes Bodenverflüssigungsereignis eine Schwallwelle auslöst, die dann noch auf Personen am Ufer treffen muss, und diese schädigt. Daneben gibt es noch Einflüsse, die die Höhe der Schwallwelle und damit die Auflauhöhe und auf diese Weise die Wahrscheinlichkeit verringern, dass eine von einer auflaufenden Schwallwelle getroffene Person tatsächlich geschädigt wird.

6.3 Bewertung der Erforderlichkeit von Maßnahmen

Entsprechend der Aufgabenstellung ist das Risiko für die Rechtsgüter Leben, Gesundheit und größere Vermögensschäden abzuwägen und darauf aufbauend zu bewerten, ob Maßnahmen erforderlich sind.

Im Abschnitt 4 wird der Gefährdungsmechanismus erläutert, der von den Inseln im Knappensee ausgeht. Es handelt sich dabei um Schwallwellen, die von Setzungsfließereignissen auf Grund von natürlichen Initialen an den Böschungen der Inseln ausgelöst werden. Da entsprechend der geplanten Nutzung ([AU17]) auf den Inseln selbst und im Bereich der Ufer keine größeren (privaten) Sachwerte vorhanden sein sollen (z. B. in Form von Wochenendgrundstücken), wird an dieser Stelle durch die Verfasser davon ausgegangen, dass größere Vermögensschäden nicht auftreten können.

Durch die Nutzung der Ufer des Knappensees beispielsweise als Badestrand ist es zwar unwahrscheinlich, jedoch denkbar, dass es durch auftreffende und auf die Ufer auflaufende Schwallwellen zu Personenschäden kommt. Hierbei wird unterschieden, ob es zu Gesundheitsschäden oder zu Todesfällen kommen kann. Als maßgeblich für Personenschäden wird durch die Verfasser der Tod durch Ertrinken, ggf. in Verbindung mit einem Kälteschock, eingeschätzt. Ertrinkt eine Person nicht, dann ist von keinen dauerhaften Gesundheitsschäden auszugehen. Aus diesem Grund ist für die Bewertung der Erforderlichkeit von Maßnahmen das Rechtsgut Leben maßgebend.

Der Tod eines Menschen infolge einer auftretenden Schwallwelle tritt dann ein, wenn die Person durch die Schwallwelle in das Wasser gerissen wird und dort ertrinkt. Ob dies geschieht, ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Höhe der Schwallwelle,
- Wassertemperatur,
- Fähigkeit der Person, zu schwimmen und
- körperliche Konstitution der Person.

Eine Kausalität in dem Sinne, dass das Auftreffen einer Schwallwelle zwingend zu Todesopfern führt, ist nach Ansicht der Verfasser nicht vorhanden. Vielmehr ist die Wahrscheinlichkeit, an dem Vorgang zu sterben (begrifflich auch die „Letalität“) deutlich unter dem Wert 1.

Durch Maßnahmen kann die Gefährdung, die von den Inseln im Knappensee ausgeht, auf zwei verschiedene Weisen beeinflusst werden. Zum einen kann die Wahrscheinlichkeit eines Bodenverflüssigungsereignisses als Beginn des schadensauslösenden Ereignisses verringert werden. Zum anderen kann durch Maßnahmen die Höhe der Schwallwelle so verringert werden, dass die Letalität auf einen Wert nahe Null sinkt. Beide Arten von Maßnahmen haben das gleiche Ziel, den Schutz des Rechtsgutes Leben, unterscheiden sich jedoch in Ort und Umfang des Eingriffs.

Aufgrund des in Abschnitt 6.1 als wenig wahrscheinlich eingeschätzten Eintretens eines Bodenverflüssigungsereignisses auf Grund eines natürlichen Initials an den Inseln im Knappensee und der in Abschnitt 6.2 getroffenen Feststellung, dass eine Schädigung von Personen eine geringere Wahrscheinlichkeit aufweist als das Eintreten eines Bodenverflüssigungsereignisses, **werden umfassende Maßnahmen an den Inseln im Knappensee seitens der Verfasser dieses Berichtes als nicht erforderlich betrachtet. Dies ist die zentrale Aussage dieses Gutachtens.** Einschränkungen zu dieser Aussage in Teilbereichen werden in Abschnitt 7 diskutiert. Bei dieser Aussage wird vorausgesetzt, dass das Betretungsverbot der Inseln dauerhaft erhalten bleibt und ein Schutzstreifen um die Inseln erhalten bleibt. Nur bei einem dauerhaften Betretungsverbot ist ausgeschlossen, dass anthropogene Initiale auftreten.

Die Einschätzung, dass umfassende Maßnahmen an den Inseln nicht erforderlich sind, orientiert sich an einem qualitativen Vergleich des tatsächlich vorhandenen Risikos mit dem gesellschaftlich akzeptierten Grenzkrisiko. Das Risiko, was von den Inseln im Knappensee ausgeht, ist klein, weil die Jährlichkeit eines Bodenverflüssigungsereignisses, das durch ein natürliches Initial ausgelöst wird und infolgedessen sich eine Schwallwelle bildet, kleiner als einmal in 50 Jahren ist (aktuell 75 Jahre ohne Ereignis). Weiterhin sind von den Schwallwellen im Wesentlichen Uferbereiche betroffen, die eine eingeschränkte Nutzung haben. Damit halten sich Personen dort nur selten auf (z. B. südlich der Inseln, siehe Abbildung 16). Die Kombination aus geringer Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Ereignisses und geringem Schadensausmaß führt zu einem geringen Risiko. Illustriert werden kann dies z. B. in einer Risikomatrix (siehe Abbildung 17).

Jährlichkeit eines Ereignisses > 1/5 a			
Jährlichkeit eines Ereignisses 1/50 a ... 1/5 a			
Jährlichkeit eines Ereignisses < 1/50 a			
	Nutzung eingeschränkt (Personen halten sich selten und in geringer Anzahl auf)	Nutzung zeitweise (Personen halten sich zeitlich eingeschränkt auf, z.B. Badestrand)	Nutzung intensiv und dauerhaft (z.B. Ferienhäuser, Promenaden)

Abbildung 17: Risikomatrix zur Illustration des vorhandenen Risikos

In der Region des Knappensees bestehen Initiativen, die ausdrücklich ein höheres Grenzzisiko in Kauf nehmen, um den Knappensee schnell und umfassend nutzen zu können ([AU11]). Ein quantitatives Ergebnis einer gesellschaftlichen Diskussion zur Höhe des Grenzzisikos, bezogen auf die Gefährdung, die von den Inseln im Knappensee ausgeht, existiert zwar nicht. In der Risikowahrnehmung wird der Knappensee allerdings nicht mehr als bergbauliche Hinterlassenschaft wahrgenommen, weil die derzeitige Generation den bergbaulichen Zustand nicht mehr kennt. Dies bedeutet, dass die Risiken, die vom Knappensee ausgehen, wie allgemeine Lebensrisiken behandelt werden können. Das gesellschaftlich akzeptierte Grenzzisiko für den Knappensee kann so durch Vergleiche mit Grenzzisiken in angrenzenden Lebensbereichen bestimmt werden. Dies gilt auch dann, wenn – wie derzeit – die Uferbereiche des Knappensees saniert/verdichtet werden. Inwieweit diese Einschätzung auch nach dem Setzungsfließereignis am 11.03.2021 aufrecht erhalten wird, muss die Diskussion in der Öffentlichkeit zeigen.

In [AU14] wird beschrieben, welche Schutzziele für die Gefährdung durch Hochwasser im Freistaat Sachsen angewandt werden. Bei Hochwasser handelt es sich um eine Gefährdung, die nicht nur große Sachschäden nach sich ziehen kann, sondern auch Personenschäden. Die genannten Schutzziele sind das Ergebnis einer gesellschaftlichen Diskussion.

Während für geschlossene Ortschaften ein Schutzziel für ein Hochwasser, das ein mittleres statistisches Wiederkehrintervall T von 100 Jahren aufweist, empfohlen wird, gilt für „*Einzelgebäude, nicht dauerhaft bewohnte Siedlungen*“ ein Schutzziel vor einem Ereignis mit $T=25$ Jahren. Übertragen auf den Kenntnisstand des Knappensees ist das vorhandene Risiko, das von den Inseln ausgeht, kleiner als das Grenzzisiko, welches für den Prozess Hochwasser gilt. Nimmt man also den Prozess Hochwasser als gesellschaftlich akzeptierten Maßstab, so ist das vorhandene Risiko kleiner als das Grenzzisiko, sofern der Zeitraum von 75 Jahren ($=3 \cdot 25$ Jahre) im Hinblick auf eine statistische Auswertung als ausreichend langer Zeitraum angesehen wird, um eine solche Aussage treffen zu können.

7 Bewertung der Geeignetheit von Maßnahmen zur Sanierung der Inseln

In der Unterlage [AU4] werden verschiedene Varianten diskutiert, wie mit der Gefährdung durch ein Setzungsfließen von den Inseln im Knappensee umgegangen werden soll. Für die weiterführende Betrachtung werden in [AU4] folgende Varianten empfohlen:

- Variante c2) Abtrag der Inseln durch seeseitigen Massenabtrag
- Variante e1) Herstellung seeseitiger Stützkörper ohne Inselinneres
- Variante e3) Herstellung eines seeseitigen, die Inseln umspannenden Stützkörpers
- Variante e4) Herstellung eines seeseitigen, die Inseln umspannenden Stützkörper mit Verfüllung des Schutzgrabens
- Variante e5) Herstellung eines seeseitigen, die Inseln umspannenden Stützkörpers mit Verfüllung des Schutzgrabens, sSPV auf der Innenkippenfläche der Hauptinsel

Die „Nullvariante“ a) (Sperrung der Insel) wird in [AU4] nicht empfohlen, da diese laut [AU4] „*nicht geeignet zur Zielerreichung der Gefahrenabwehr*“ ist. Auch die Variante b) (Desensibilisierung der Inselböschungen) wird in [AU4] als ungeeignet angesehen, denn „*eine, wenn auch abgeminderte, Gefahrenlage bleibt weiterhin bestehen*“. Begründet wird dies mit verbleibenden Böschungen, die im Lastfall „Verflüssigung“ (der Boden wird unterhalb des Grundwasserspiegels als vollständig verflüssigt angesehen und die Festigkeit entsprechend gemindert) nicht standsicher sind.

Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.3 wird hier die Auffassung vertreten, dass die umfassenden Maßnahmen, die in [AU4] zur weiteren Bearbeitung vorgeschlagen werden (siehe oben), nicht erforderlich sind, da das vorhandene Risiko kleiner ist als das gesellschaftlich akzeptierte Grenzkisiko. Davon unabhängig sind alle in [AU4] vorgeschlagenen Maßnahmen dazu geeignet, das vorhandene Risiko weiter zu senken. In Bezug auf Abbildung 1 auf Seite 6 heißt das, dass das vorhandene Risiko bereits kleiner als Grenzkisiko ist (Sicherheit) und durch die Maßnahmen noch weiter (in Abbildung 1 nach links) in Richtung des Restrisikos verschoben wird.

Die vorgenannten Ausführungen gelten für die umfassenden Maßnahmen, wie sie in [AU4] beschrieben sind. Es gibt jedoch Einzelaspekte des derzeitigen Zustandes der Inseln im Knappensee, die einer weiteren Überprüfung bedürfen und gegebenenfalls Maßnahmen nach sich ziehen können.

1. In [AU4] wird für Einzelböschungen im Süden der Inseln in einer Standsicherheitsberechnung auch ohne Ansatz einer Verflüssigung eine nicht ausreichende Standsicherheit berechnet (Profil 6a, Anlage 2.2). Die Böschung befindet sich nahe des Grenzgleichgewichtes. Hier könnte durch wasserseitige Vorschüttungen aus gut durchlässigem Material das Risiko, das sich ein Setzungsfließen einstellt, das wiederum eine Schwallwelle verursacht, verringert werden. Da jedoch das Aufbringen von gut durchlässigem Material einen anthropogenen Eingriff an den unterwasserseitigen Inselböschungen darstellt und auch wiederum Spannungsumlagerungen nach sich zieht (siehe Ereignis 11.03.2021), durch die wiederum während der Arbeiten ein Setzungsfließereignis ausgelöst werden kann, sollte auf die Vorschüttungen verzichtet werden. Zudem wäre auch aufgebracht durchlässiges Material kein 100%-iger Schutz gegen ein Setzungsfließen, da hier enorme Mengen aufgebracht werden müssten.

2. Weiterhin bedarf die nördlich der Einsetzstelle im Teilbereich E2 befindliche Insel (siehe Abbildung 15) einer gesonderten Betrachtung. Für Setzungsfliessen an den Böschungen dieser Insel gelten die in Abschnitt 6.2 getroffenen Aussagen nur eingeschränkt. Die Gründe hierfür sind die räumliche Nähe zu den geplanten Nutzungen im Bereich des Ortes Groß Särchen und damit die eingeschränkte Möglichkeit, dass Schwallwellen durch Energiedissipation abgeschwächt werden können. Es wird daher empfohlen, diese Insel gesondert zu betrachten. Dies kann durch eine gezielte Untersuchung der Bodeneigenschaften der Insel und/oder durch gezielte Maßnahmen („Desensibilisierung“, Abtrag oder Sicherung) geschehen.
3. Über diese technischen Maßnahmen hinaus sollten die zukünftigen Nutzungen an den Ufern des Knappensees im Bewusstsein der Gefährdung durch Schwallwellen geplant werden, um das Risiko klein zu halten. Wie in [AU17] gezeigt, sollten Nutzungen, die eine große Personenzahl am Ufer und den häufigen Aufenthalt nach sich ziehen, in Bereiche abseits der Inseln gelegt werden. Laut Auskunft des Oberbergamtes wird im Bereich D-West keine Badenutzung zugelassen. Eine auf die Uferböschung auflaufende Schwallwelle könnte den Rundweg um den Knappensee zwar überspülen. Die Auswirkungen einer Schwallwelle auf dem Rundweg sollen durch entsprechende Bepflanzung des Ufers (z. B. mit Schilf) klein gehalten werden, damit eine Gefahr für Leib und Leben für Personen auf dem Rundweg sehr unwahrscheinlich bis nach menschlichem Ermessen nicht vorhanden ist. Durch eine entsprechende Gestaltung (z. B. Schilfgürtel, Vegetation) des südlichen Ufers des Knappensees, in dem nach [AU3] die größten Schwallwellenauflaufhöhen erwartet werden, kann ein vertretbares Risiko eingehalten werden.
4. Durch entsprechende Beschilderung und Kontrollen sowie durch ein dauerhaftes Offenhalten des Schutzgrabens muss das Betreten der Inseln unterbunden werden. Nur so können anthropogene Initiale ausgeschlossen werden.
5. Weiterhin kann – um das Risiko weiter gering zu halten – bei Niedrigwasser (Unterschreitung des Absenckzieles von 124,20 mNHN) eine temporäre Sperrung bestimmter Ufer veranlasst werden. Bei Niedrigwasser ist prinzipiell die Schwallwellenhöhe größer und es ist möglich, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein Bodenverflüssigungseignis erhöht ist. Prinzipiell soll der See und die Uferbereiche auch bei Hochwasser (Überschreitung von 126,00 mNHN) gesperrt werden.
6. Damit das Risiko, das von den Inseln im Knappensee ausgeht, dauerhaft klein bleibt, darf die Nutzung der nahegelegenen Ufer zukünftig nicht so verändert werden, dass sich das Risiko erhöht. Daher ist eine entsprechende Berücksichtigung in der Raumplanung und Bauleitplanung erforderlich. Darüber hinaus sollte durch Beschilderung und Informationstafeln auf die weiterhin bestehende geringe Gefährdung aufmerksam gemacht werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Von den Inseln im Knappensee geht nach Unterlagen, die von der LMBV in Auftrag gegeben wurden, eine Gefährdung aus, weshalb in diesen Unterlagen Maßnahmen zur vollständigen Beseitigung der Gefährdung vorgeschlagen wurden. Im Auftrag des Sächsischen Oberbergamtes sollte untersucht werden, ob auf Basis einer Risikoabwägung diese Maßnahmen an den Inseln im Knappensee erforderlich und/oder geeignet sind, die wichtigsten Rechtsgüter der öffentlichen Sicherheit zu schützen und damit Personenschäden zu vermeiden.

Die Gefährdung, die von den Inseln im Knappensee ausgeht, sind Schwallwellen, die von Setzungsfließen an den Böschungen der Inseln induziert werden. Bei den Setzungsfließen handelt es sich um Rutschungen, die plötzlich und ohne Vorankündigung durch spontane Bodenverflüssigung durch ein natürliches Initial entstehen. Die Schwallwellen können auf die Seeufer auflaufen, wodurch prinzipiell Personen ins Wasser gerissen werden können und die Möglichkeit besteht, dass die Personen ertrinken.

Bei den Inseln werden Bodenverflüssigungen auf Grund von anthropogenen Initialen ausgeschlossen, da die Inseln dauerhaft nicht betreten werden dürfen und auch keine Sanierungsarbeiten geplant sind. Ein Setzungsfließereignis, wie es am 11.03.2021 bei den Sanierungsarbeiten am Ufer des Knappensees aufgetreten ist, und bei dem ca. 1 Mio m³ Sandmassen ausgeflossen sind, kann bei den Inseln nicht auftreten, wenn das Betretungsverbot eingehalten wird.

Das Bemessungsverfahren, mit dem die Schwallwellenhöhe und die Wellenaufbauhöhe berechnet werden, beruht auf Annahmen und Vereinfachungen, die ein konservatives Ergebnis („auf der sicheren Seite“) liefern. Bei dem sehr großen Setzungsfließereignis am 11.03.2021 ist eine Schwallwelle mit ca. 0,5 m bis 0,8 m Höhe aufgetreten.

Die Voraussetzung für das Ausbilden einer Schwallwelle, eine spontane Bodenverflüssigung auf Grund eines natürlichen Initials, wird als wenig wahrscheinlich angesehen, da es seit Flutung des Knappensees (aktuell 75 Jahre) zu keinem derartigen Ereignis gekommen ist. Dies gilt auch für hydrologisch ungünstige Zustände (Hochwasser, Niedrigwasser).

Die Wahrscheinlichkeit, dass Personen durch eine Schwallwelle zu Tode kommen, ist niedriger als die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Bodenverflüssigungereignis kommt. Der Grund dafür ist, dass es einer ganzen Kette von Vorgängen bedarf, damit die Voraussetzungen vorhanden sind, damit eine Person geschädigt wird.

Aus der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadensauslösenden Setzungsfließereignisses mit einem natürlichen Initial und der im Umfeld der Inseln eingeschränkten Nutzung der Seeufer wird abgeleitet, dass insgesamt ein Risiko von Inseln im Knappensee ausgeht, das kleiner ist als das im gesellschaftlichen Kontext akzeptierte Grenzkrisiko. Dementsprechend werden die in den Unterlagen [AU4] der LMBV vorgeschlagenen Maßnahmen als nicht erforderlich angesehen. Jedoch wird empfohlen, für Teilaspekte bzw. Böschungen an der Südseite der Inseln gesonderte Untersuchungen zu veranlassen. Damit das vorhandene Risiko auch in Zukunft gering bleibt, muss eine angepasste Nutzung sichergestellt werden. Die zukünftige, teilweise eingeschränkte Nutzung des Knappensees sollte in die Raumplanung aufgenommen werden, und die Bevölkerung entsprechend informiert werden.

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AFB	Abraumförderbrücke
ALS	Airborne-Laserscan
AU	Arbeitsunterlage
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
NHN	Normalhöhennull
sSPV	schonende Sprengverdichtung
a_1, b_1	Parameter
b	Breite der Rutschung
e	Eulersche Zahl
E	Entfernung Rutschung- Gegenufer
g	Erdbeschleunigung
h	Wassertiefe
H	Höhe der Kippenböschung
h_a	Wellenaufbauhöhe
$h_n(A)$	relative Häufigkeit des Ereignisses A
h_w	Wellenhöhe
H_B	geodätische Höhe der Böschungsschulter
H_K	Höhe der Kippe
H_L	geodätische Höhe des Liegenden
$H_n(A)$	absolute Häufigkeit des Ereignisses A
H_W	geodätische Höhe des Wasserspiegels
H_{WK}	Höhe des Wasserspiegels vor der Kippe
$max z$	maximale Wasserspiegelanhebung
n	Anzahl der Elemente der zugrunde gelegten Menge
$P(A)$	Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses A
T	mittleres statistisches Wiederkehrintervall
t_e	Bewegungsdauer
$V_{v,e}$	während der Rutschung verdrängtes Wasservolumen im Endzustand
α	Neigungswinkel der Auflaufböschung
β	Neigungswinkel der Böschung
β	Zuverlässigkeitsindex
δ	Neigungswinkel des Liegenden
δ_1	Faktor zum Einfluss eines Initials
φ_S	Sohlreibungswinkel
ω	Winkel zur Beschreibung der Wellenausbreitungsrichtung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Veranschaulichung wesentlicher Begriffe [AU16] auf Basis von [AU1]	6
Abbildung 2:	Freiwillig eingegangenes Risiko bei der Besteigung des Gipfels der Zugspitze, Foto vom 26.07.2020	8
Abbildung 3:	Matrix zur Bewertung des Risikos von Tagebrüchen über Braunkohletiefbau [AU1]	10
Abbildung 4:	Ausgangszustand (links: ungesicherte Böschung an einem Bergbaufolgensee; rechts: mit einem versteckten Damm gesicherte Uferböschung) (Abb. nicht maßstäblich)	14
Abbildung 5:	Verdrängung von Wasser durch Setzungsfließen, Wasserspiegelanhebung (Abb. nicht maßstäblich)	14
Abbildung 6:	Organisation einer Schwallwelle als Einzelwelle (Abb. nicht maßstäblich)	15
Abbildung 7:	Auflaufen der Schwallwelle auf das Gegenufer (Abb. nicht maßstäblich)	15
Abbildung 8:	Numerisches Modell zur Berechnung von Rutschungsvolumen und Rutschungsdauer [AU6]	16
Abbildung 9:	Skizze zur Definition der Parameter, die bei der Schwallwellenberechnung benötigt werden [AU6]	17
Abbildung 10:	Skizze zum Modellversuch zur Bestimmung der Wellenparameter [AU6]	18
Abbildung 11:	Profil 37 zum Setzungsfließen vom 13.09.2018 [AU9]	19
Abbildung 12:	Rutschungskessel (Bereich A) und südlich angrenzender Bereich B des Setzungsfließens am 11.03.2021 [AU20]	23
Abbildung 13:	Abtrag (über Wasser) und Auftrag (unter Wasser) der ausgeflossenen Sandmassen [AU20]	23
Abbildung 14:	Summe beobachteter Setzungsfließrutschungen in Abhängigkeit vom Wasserstandsverhältnis und Darstellung der Häufigkeitsverteilung [AU6]	26
Abbildung 15:	Digitales Geländemodell des Knappensees (Höhenangaben in mNHN, Stand 2016, Wasser abgedeckt)	28
Abbildung 16:	Masterplan zur Nutzung des Knappensees und dessen Umfeld [AU17]	29
Abbildung 17:	Risikomatrix zur Illustration des vorhandenen Risikos	31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Faktoren der Risikowahrnehmung [AU16], [AU5]	7
Tabelle 2:	Vorgeschlagenes Grenzkrisiko für Naturgefahren in der Schweiz in Abhängigkeit von der Freiwilligkeit [AU5]	8
Tabelle 3:	Wellenhöhe und Wellenaufbauhöhe in Abhängigkeit vom Restreibungswinkel in der Sohle (Ansatz von 0,5 ... 0,8 max z bei $h/H > 0,75$)	21