

Risikobewertung von Altbergbauflächen auf Basis von Bruchwahrscheinlichkeiten

Steffen Päßler

ONTRAS Gastransport GmbH, Leipzig

ZUSAMMENFASSUNG:

Im Artikel werden deterministische und probabilistische Verfahren zur Bewertung des Risikos in tagesbruchgefährdeten Braunkohlengebieten vorgestellt und verglichen. Dabei wird besonders auf die Theorien zu den Bruchwahrscheinlichkeiten nach Fenk und Päßler eingegangen und die wechselseitigen Abhängigkeiten beleuchtet. Weiterhin werden die Möglichkeiten eines altbergbaulichen Risikomanagements auf der Basis von Bruchwahrscheinlichkeiten mit ihren Vor- und Nachteilen aufgezeigt.

1 Einleitung

Die tagesbruchgefährdeten Flächen des früheren Braunkohlentiefbaus stellen ein grundsätzliches Sicherheitsrisiko dar. Bei der Nachnutzung dieser Gebiete ist abzuwägen, ob die beabsichtigte Nutzung aus sicherheitstechnischer Sicht vertretbar ist bzw. welche Sanierungsmaßnahmen zur Gewährleistung eines akzeptablen Sicherheitsniveaus notwendig sind. Da ggf. die finanziellen Mittel für die Bergbausanierung zurückgefahren werden, ist in Zukunft stärker zu prüfen, ob auch mit weniger Sanierungsaufwand die öffentliche Sicherheit gewährleistet werden kann. Hier können probabilistische Bewertungsmethoden einen signifikanten Beitrag leisten.

2 Deterministische (klassische) Herangehensweise

Die klassische deterministische Sicherheitsbetrachtung geht davon aus, dass ein Tagesbruch zu jeder Zeit und mit einem prognostizierbaren Durchmesser auftreten kann. Ein technisches System ist dann sicher, wenn es ohne größere Schäden einen solchen Tagesbruch überspannen kann. Auf der einen Seite ist diese Herangehensweise in der Auslegungsphase von Bauwerken grundsätzlich richtig, da sie den „worst-case“ abbildet. Auf der anderen Seite wäre bei konsequenter Anwendung dieser Sicherheitsphilosophie selbst das temporäre Betreten der Flächen nicht zulässig.

3 Probabilistische Ansätze

Die probabilistische Herangehensweise führt im Gegensatz dazu eine Risikobewertung durch. Das Risiko ergibt sich aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem Schadensausmaß, was im Altbergbau im direkten Zusammenhang mit der Flächennutzung steht. Während der Durchmesser eines Tagesbruchs nach FENK (1979) hinreichend genau zu prognostizieren ist, ist die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit problematisch. Dabei ist zu unterscheiden, ob das Durchbrechen des Tagesbruchs als Schaden gewertet wird oder erst dann, wenn Personen oder Sachwerte gefährdet bzw. beschädigt werden.

Zweifelsohne wird in Deutschland primär der Personenschutz betrachtet. In diesem Zusammenhang stellt das Durchbrechen eines Tagesbruchs zwar ein „unerwünschtes Ereignis“ dar. Jedoch ist das kein sicherheitstechnisches Problem, solange sich keine Personen im Gefahrenbereich aufhalten. Aus der latenten Gefahr eines Tagesbruchs wird erst dann eine konkrete Gefährdung von Leib und Leben, wenn sich Menschen im betreffenden Gebiet aufhalten. Daher setzt eine probabilistische Risikobewertung im Gegensatz zur deterministischen Betrachtung eine sicherheitstechnische Analyse der Oberflächennutzung voraus.

4 Betrachtungen zur Bruchwahrscheinlichkeit

4.1 Statistische Untersuchung Mitteldeutscher Braunkohlengruben

Durch FENK (1977), Meier (2003) und Päßler (2015) wurden umfangreiche statistische Untersuchungen des Tagesbruchgeschehens im Mitteldeutschen Braunkohlerevier durchgeführt. Es zeigt sich, dass nur bei ca. 40 % der Gruben überhaupt Tagesbrüche aktenkundig sind und die Bruchdurchmesser sehr unterschiedlich verteilt sind (Abb. 1).

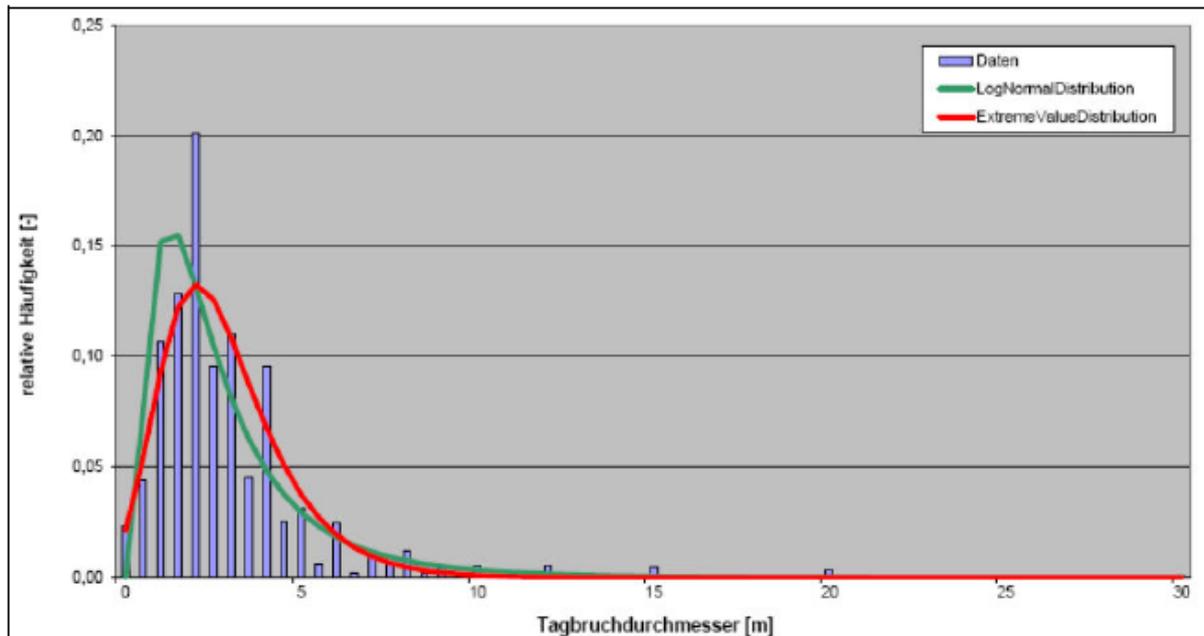


Abb. 1: Verteilung der Tagesbruchdurchmesser im Mitteldt. Braunkohlerevier

Die Abb. 1 zeigt, dass 90 % der gefallenen Brüche einen Durchmesser ≤ 5 m, 95 % $\leq 7,3$ m und 99 % $\leq 14,9$ m aufweisen. Das 99,9999 % Quantil einer Extreme Value Verteilung liegt mit einem Bruchdurchmesser von 21,9 m sehr nah am größten bisher nachgewiesenen Betrag von 22 m (Paesler et Veenker 2010).

4.2 Relative Bruchwahrscheinlichkeit nach FENK

FENK (1979) gibt auf Basis von statistischen Untersuchungen an, dass für die relative Bruchwahrscheinlichkeit die Teufe H [m] des Hohlraums, die Mächtigkeit M_K [m] der Kohle-Hangendton-Überdeckung und die maximale Mächtigkeit $max. M_B$ [m] der mächtigsten bindigen Schicht im Deckgebirge maßgeblich sind. Darauf aufbauend ist die relative Bruchwahrscheinlichkeit P_B nach folgender Formel zu berechnen:

$$P_B = e^{-[0,08(H-15)+0,20M_K+0,17(max M_B)]} \quad 1$$

Den stärksten Einfluss auf das Bruchgeschehen hat laut FENK die Hohlraumteufe. Auf Basis von statistischen Betrachtungen leitet FENK eine kritische Bruchwahrscheinlichkeit von 0,4 % ab. Darüber sind sicherheitstechnische Maßnahmen notwendig.

4.3 Spezifische Bruchwahrscheinlichkeit nach Päßler

Päßler (2015) schlägt vor, die aktenkundigen Brüche mit dem Durchbauungsgrad ins Verhältnis zu setzen. Die Bruchwahrscheinlichkeit wird als Quotient von Tagesbruchanzahl auf die Anzahl der Streckenmeter bzw. auf Hektar Abbaufäche bezogen. Die spezifische Bruchwahrscheinlichkeit P_E , bezogen auf den einzelnen Streckenmeter, ergibt sich in Abhängigkeit von der Teufe T und der maximalen Mächtigkeit $max.M_B$ der bindigen Schichten als Grenzkurve nach:

$$P_E = f(T, max M_B) = 0,074 \cdot T^{-1,31} \cdot max M_B^{-1,32} \dots \dots \left[\frac{\text{Tagesbrüche}}{\text{Jahr} \cdot \text{Streckenmeter}} \right] \quad 2$$

Für die spezifische Bruchwahrscheinlichkeit P_F (bezogen auf ein Grubenfeld):

$$P_F = f(T, max M_B) = 2,69 \cdot T^{-0,82} \cdot max M_B^{-1,54} \dots \dots \left[\frac{\text{Tagesbrüche}}{\text{Jahr} \cdot \text{ha Grubenfeld}} \right] \quad 3$$

Beide Funktionen sind Grenzkurven der Maximalwerte und weisen gegenüber der Regressionsfunktion der Stichproben eine durchschnittliche Sicherheit von $S = 2,5$ auf. Die spezifischen Bruchwahrscheinlichkeiten P_E bzw. P_F lassen zwar keine Prognose eines bevorstehenden Bruches über einem konkreten Einzelhohlraum zu, jedoch sind sie ein Maß für die Gefährdung der Tagesoberfläche und können mit geltenden Normen im Bereich der technischen Zuverlässigkeit und des Risikomanagements verglichen werden. Für die praktische Umsetzung wurden die Grenzkurven für die spezifische Bruchwahrscheinlichkeit in einem Nomogramm umgesetzt (Abb. 2).

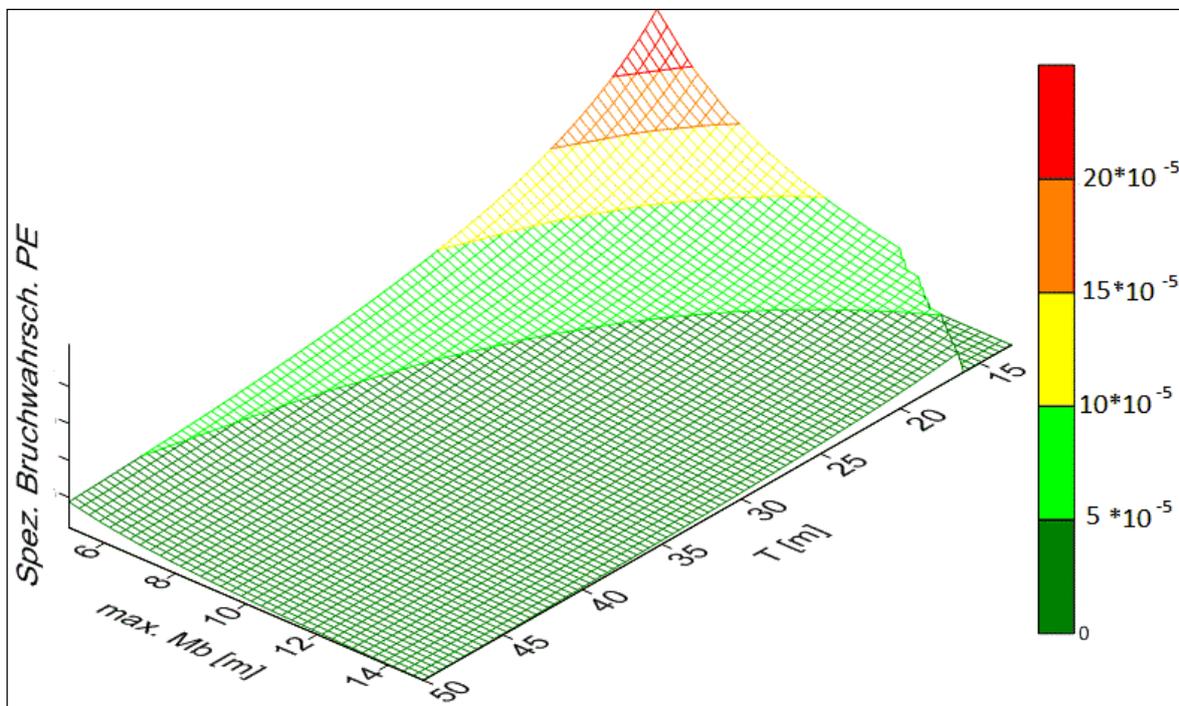


Abb. 2: Nomogramm für die spezifische Bruchwahrscheinlichkeit P_E in Abhängigkeit der Teufe und der maximalen Mächtigkeit der bindigen Schichten

Bei der Anwendung des Nomogramms wären bei einem (sehr großen) Grubenfeld mit 20.000 m offener Streckenlänge, bei der höchsten spezifischen Bruchwahrscheinlichkeit ($2,5 \cdot 10^{-4}$) statistisch 5 Tagesbrüche pro Jahr im Grubenfeld zu erwarten.

Auch bei dieser Herangehensweise wurden der Einfluss der drei Einflussgrößen Teufe des Hohlraums, Mächtigkeit Kohle-Hangendton-Überdeckung und maximale Mächtigkeit der bindigen Schicht im Deckgebirge nachgewiesen, was die Ergebnisse von FENK im Wesentlichen bestätigt. Der Einfluss der Teufe ist dabei dominierend. Die Korrelation mit der maximalen Mächtigkeit der bindigen Schicht ist etwas schwächer ausgeprägt als bei FENK. Es wird vermutet, dass bei sehr mächtigen bindigen Schichten im Deckgebirge der Hohlraum länger braucht, um sich zur Tagesoberfläche durchzuarbeiten. Insofern könnten die 40 Jahre Abstand zwischen den statistischen Erhebungen den Unterschied erklären. Der Einfluss der Mächtigkeit der Kohle-Hangendton-Überdeckung auf die spezifische Bruchwahrscheinlichkeit ist, im Gegensatz zu FENK, nur sehr schwach ausgeprägt, was auf eine unzureichende Datenlage für diesen Parameter zurückgeführt wird. Deswegen wurde dieser nicht weiter betrachtet.

4.4 Korrelationen der Bruchwahrscheinlichkeiten

Werden die Untersuchungen von FENK und die des Autors zur relativen bzw. spezifischen Bruchwahrscheinlichkeit verglichen, so zeigen sich auffallende Parallelen. Das ist nicht überraschend, da beide Parameter ein empirisches Maß für die Gefährdung der Tagesoberfläche darstellen. Die skalierte Vergleichsrechnung in Abb. 3 zeigt, dass der Trend beider Bruchwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Teufe fast identisch ist und nur bei großen Teufen, d.h. geringen Bruchwahrscheinlichkeiten, Unterschiede feststellbar sind.

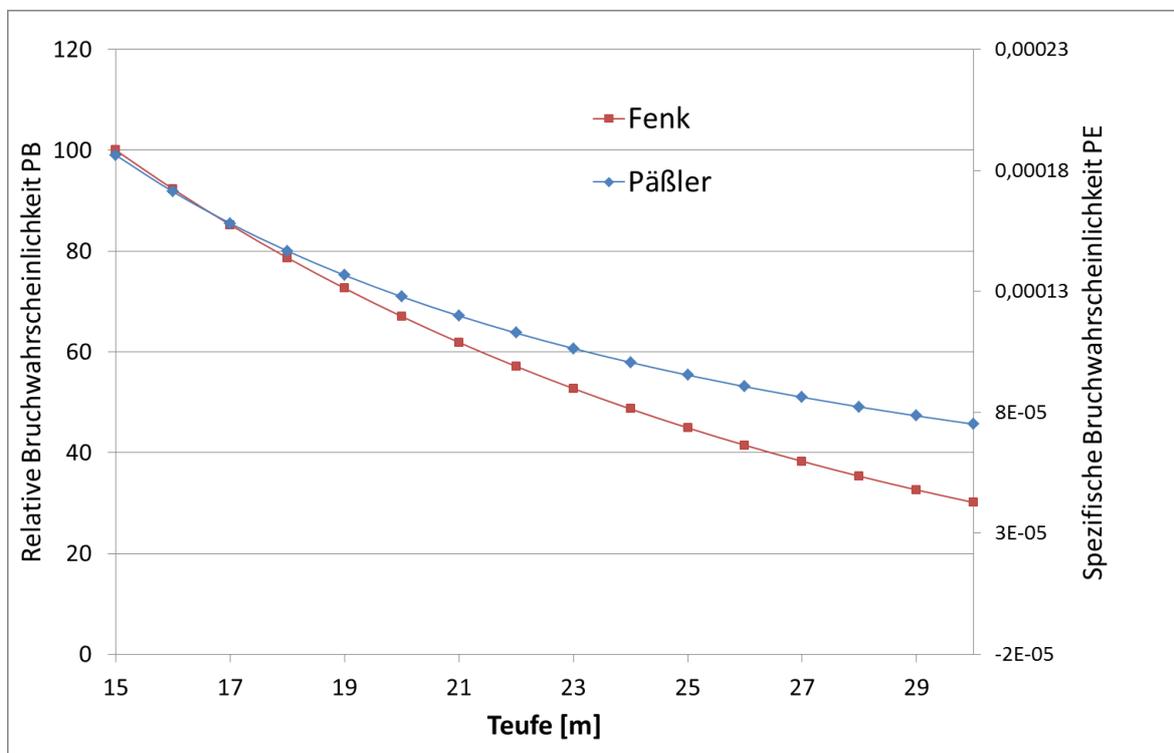


Abb. 3: Relative und spezifische Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Teufe (skaliert)

Gegenüber der Teufe ist die Korrelation beim Parameter maximale Mächtigkeit der bindigen Schichten schwächer ausgeprägt. Die spezifische Bruchwahrscheinlichkeit P_E wird hier stärker beeinflusst (Abb. 4).

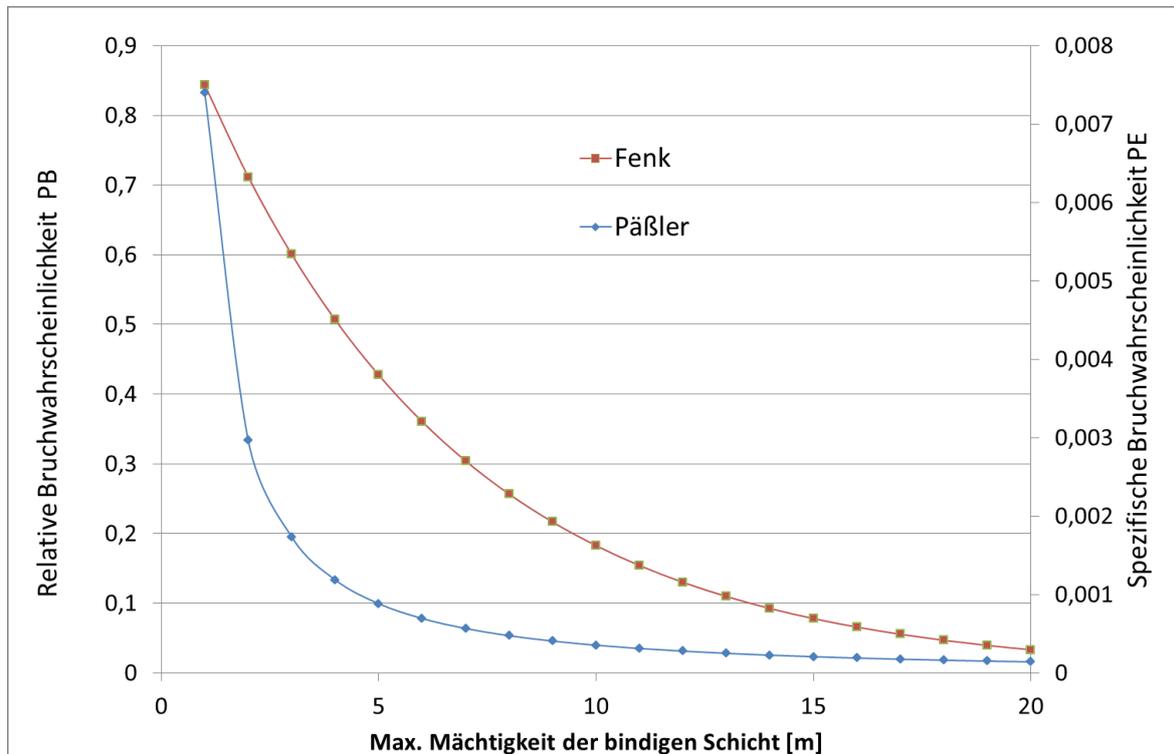


Abb. 4: Relative und spezifische Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der maximalen Mächtigkeit der bindigen Schicht (skaliert)

Da die Teufe bei beiden der dominierende Parameter ist und gleichzeitig die beste Korrelation der Stichproben untereinander aufweist, ist es für zukünftige Untersuchungen zweckmäßig, beide Bruchwahrscheinlichkeiten (bezogen auf die Teufe) ineinander umwandeln zu können. Durch Umstellen der Formel 1 (ohne die Parameter $max. M_B$ und M_K) auf die Teufe und Einsetzen in Formel 2 ergibt sich:

$$P_E = f(P_B) = 0,0065 \cdot \left(15 - \frac{\ln \cdot P_B}{0,08}\right)^{-1,31} \dots \dots \left[\frac{\text{Tagesbrüche}}{\text{Jahr} \cdot \text{Streckenmeter}} \right] \quad 4$$

Bezogen auf die Fläche des Grubenfeldes ergibt sich:

$$P_F = f(P_B) = 0,166 \cdot \left(15 - \frac{\ln \cdot P_B}{0,08}\right)^{-0,82} \dots \dots \left[\frac{\text{Tagesbrüche}}{\text{Jahr} \cdot \text{ha Grubenfeld}} \right] \quad 5$$

Beispielsweise würde eine relative Bruchwahrscheinlichkeit nach FENK P_B in Höhe von 10 % auf einem Hektar Grubenfeld 0,0075 Tagesbrüche pro Jahr erwarten lassen. Dies entspricht bei einem relativ großen Grubenfeld von 133 ha Fläche die statistische Erwartung von einem Tagesbruch jährlich.

5 Risiko auf Basis der Bruchwahrscheinlichkeiten

In einer Empfehlung der Dt. Gesellschaft für Geotechnik wurden Vorschläge für eine verbale Beschreibung der Tagesbruchgefährdung getroffen (DGGT, 2004). Die Einstufungen in „sehr wahrscheinlich“, „wahrscheinlich“, „wenig wahrscheinlich“ und „praktisch unmöglich“ spiegeln zwar den Stand der Technik wider. Die Bewertung ist aber sehr vom Bearbeiter abhängig und nicht quantifizierbar. Für die spezifischen Bruchwahrscheinlichkeiten macht der Autor in Päßler (2015) einen Vorschlag in Bezug auf die Risikoklassen nach DGGT (2004). Dieser Vorschlag ist in der Tabelle 1 links dargestellt. Zusätzlich wurden die relativen Bruchwahrscheinlichkeiten nach FENK auf Basis der Formeln 4 und 5 berechnet.

Tab. 1: Bruchwahrscheinlichkeiten für verschiedene Risikoklassen

Risikoklasse/ Tages- Bruchgefährdung nach DGGT (2004)	Spezifische Bruchwahrscheinlichkeit P_E/P_F nach Päßler		Relative Bruchwahrscheinlichkeit Nach Fenk (für P_E/P_F)
	bezogen auf Streckenmeter und Jahr	bezogen auf Abbaufläche und Jahr	
I – sehr wahrscheinlich	$2,5 \cdot 10^{-4}$ /(m*a)	$2,2 \cdot 10^{-2}$ /(ha*a)	≥ 100 %
II – wahrscheinlich	$1,0 \cdot 10^{-4}$ /(m*a)	$1,0 \cdot 10^{-2}$ /(ha*a)	50 % / 30 %
III – wenig wahrscheinlich	$1,0 \cdot 10^{-5}$ /(m*a)	$1,0 \cdot 10^{-3}$ /(ha*a)	0,005 % / 0 %
IV – praktisch unmöglich	$1,2 \cdot 10^{-7}$ /(m*a)	$1,0 \cdot 10^{-6}$ /(ha*a)	0 %

Hierbei ist zu beachten, dass die Werte für die Risikoklassen die obere Grenze der Stichproben darstellen, die verwendeten Grenzkurven aus dem Nomogramm (Abb. 1) eine Sicherheit von durchschnittlich $S = 2,5$ beinhalten, weshalb die relative Bruchwahrscheinlichkeit nach FENK für den Praktiker sehr hoch erscheint.

5.1 Grenzzisiko

Da ein Null-Risiko nicht möglich ist, muss ein Grenzzisiko definiert werden, ab wann das System nach dem Stand der Technik „sicher“ ist. Das bedeutet ausdrücklich nicht, dass keine Brüche möglich sind, sondern dass ein Schadenseintritt „praktisch unmöglich“ und damit für die breite Öffentlichkeit akzeptabel wird.

Päßler (2015) schlägt hier ein Grenzzisiko von einem Tagesbruch für ein großes Grubenfeld innerhalb von 200 Jahren vor, was das Alter der ältesten Gruben im Mitteldeutschen Braunkohlenrevier ist (ältere Daten gibt es sozusagen nicht). Das Grenzzisiko liegt dann für $P_E = 1,2 \cdot 10^{-7}$ (Tagesbrüche pro Streckenmeter und Jahr) bzw. $P_F = 1 \cdot 10^{-6}$ (Tagesbrüche pro ha Grubenfläche und Jahr).

Parallel gibt FENK eine kritische Bruchwahrscheinlichkeit von 0,4 % (bei Annahme einer Sicherheit von 95%) an. Dies ist aber nicht als Grenzzisiko zu verstehen, bei dem das System „sicher“ ist. FENK stellt ausdrücklich fest, dass bis zur Grenzteufe immer eine Gefährdung durch Tagesbrüche existiert. Vielmehr war diese Grenze zur Abschätzung des Sanierungsaufwandes und seiner Priorisierung gedacht. Die Grenze hat sich auch in soweit praktisch bewährt, da sie gemäß Formel 1 eine „kritische“ Teufe von 84 m bedeutet und ab dieser Teufe auch keine Tagesbrüche mehr aktenkundig

sind. Wird der Wert in die Formeln 4 und 5 eingesetzt, ergeben sich spezifische Bruchwahrscheinlichkeiten von $P_E = 2 \cdot 10^{-5}$ und $P_F = 4 \cdot 10^{-3}$. Gemäß Tab. 1 liegen diese Werte im Bereich der Risikoklasse II (Tagesbruch wahrscheinlich). Das Grenzkrisiko nach Päßler liegt um den Faktor 100 darunter, ist also sehr konservativ. Wie oben bereits erwähnt, ist hier eine hohe Sicherheit einkalkuliert, so dass bei eingehender Untersuchung die kritische Bruchwahrscheinlichkeit nach FENK auch in die Risikoklasse III (Tagesbruch wenig wahrscheinlich) eingeordnet werden könnte, was sicherlich praxisnäher ist.

5.2 Möglichkeiten des Risikomanagements mit Bruchwahrscheinlichkeiten

Ziel der altbergbaulichen Risikomanagements ist es, durch Maßnahmen das Risiko unter das Grenzkrisiko zu drücken. Für die deterministische Bewertung kann dies durch altbergbauliche Sanierung bzw. technische Sicherungsmaßnahmen geschehen.

Für die probabilistische Bewertung können Sanierungen einerseits oder Flächenmanagement andererseits (oder eine Kombination) zielführend sein. Auf Basis probabilistischer Normen, die im Ausland teilweise Gesetzescharakter haben, sind in Tabelle 2 spezifische Bruchwahrscheinlichkeiten P_F für verschiedene Oberflächennutzungen angegeben.

Tab. 2: Akzeptable Bruchwahrscheinlichkeiten für verschiedene Oberflächennutzungen

Oberflächennutzung	Akzeptable Spezifische Bruchwahrscheinlichkeit P_F [Tagesbrüche/a/ha]	Akzeptable Risikoklasse
Landwirtschaft	1,3	I – sehr wahrscheinlich
Forstwirtschaft	1 bis 0,5	I – sehr wahrscheinlich
Anliegerstraße	10^{-2} bis 10^{-3} je nach Fahrzeugdichte	I bis II
Rohrleitungen	10^{-2} bis 10^{-5} je nach Gefährlichkeit	II bis III
Industriegebiet	10^{-3} bis 10^{-6} je nach Anzahl Mitarbeiter	III – IV
Wohngebiet	10^{-6} (genormt)	IV – praktisch unmöglich

Zusammenfassend zeigt die Tab. 2, dass Land- und Forstwirtschaft auch ohne Sanierung selbst bei hoher Tagesbruchgefahr sicherheitstechnisch zulässig sein kann. Bei anderen Nutzungsarten müssen in der Regel vorher altbergbauliche Sanierungen durchgeführt oder es muss der Nachweis geführt werden, dass ein bestimmtes Quantil des Bruchdurchmessers (vgl. Abb. 1) zu keinem Schaden am Bewertungsobjekt führt.

Dass Land- und Forstwirtschaft in tagesbruchgefährdeten Gebieten vertretbar sein kann, ist für den Praktiker keine Überraschung und wurde in der Vergangenheit auch so gehandhabt. Der probabilistische Ansatz schafft hier Rechtssicherheit, da der Nachweis eines nach Stand der Technik „sicheren“ Systems geführt werden kann. Jedoch schließt selbst ein „sicheres“ System die Möglichkeit eines Schadenseintritts ausdrücklich nicht aus! Es ist eben nur sehr unwahrscheinlich.

Wird also planerisch und genehmigungstechnisch eine bestimmte Nutzungsform sichergestellt, so kann auch mit geringerem oder sogar ohne altbergbauliche Sanierung ein „sicherer“ Zustand nach dem Stand der Technik erreicht werden. Beispielsweise ist offensichtlich, dass bei einem Totalre-

servat oder Zielgebiet eines Truppenübungsplatzes kein Personenschaden aufgrund von Tagesbrüchen zu befürchten ist. An dieser Stelle muss aber ebenso sehr deutlich erwähnt werden, dass in diesem Fall entweder eine dauerhafte Nutzungseinschränkung gesellschaftlich akzeptabel sein muss und bei jeder Nutzungsänderung ein entsprechendes Sanierungserfordernis erneut zu bewerten ist!

5.3 Vor- und Nachteile der Probabilistik

Die Vorteile der deterministischen Herangehensweise lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Vorgehensweise ist historisch gewachsen und wird allgemein akzeptiert (Stand der Technik).
- Die Sicherheitsbeiwerte basieren auf Jahrzehnte langen Erfahrungen.
- Die berechnete Sicherheit lässt eine Festlegung der Sanierungspriorität zu

Die Nachteile der Deterministik sind:

- Die Einhaltung einer festgelegten Sicherheit garantiert nicht, dass es zu keinem Schaden kommen kann.
- Durch die Auslegung anhand der maximalen Belastung findet unter Umständen eine erhebliche Überdimensionierung des Bauwerkes statt, die wirtschaftlich nicht akzeptabel sein kann
- Für den Altbergbau existieren keine gesicherten Sicherheitsbeiwerte, die altbergbauliche Randbedingungen abbilden.
- Der Einfluss von Sicherungs- und Überwachungsmaßnahmen wird durch das Sicherheitskonzept kaum abgebildet.
- Gebiete mit niedriger bzw. hoher Oberflächennutzung (z.B.: Ödland, Wohngebiete) werden gleich bewertet.

Die probabilistische Bewertung ist durch folgende Vor- und Nachteile gekennzeichnet:

Vorteile Probabilistik:

- Die Vorgehensweise ist nachvollziehbar und mittlerweile als DIN EN (rechtlich) anerkannt.
- Die unterschiedliche Oberflächennutzung wird durch verschiedene Grenzwerte für Eintrittswahrscheinlichkeiten (Sicherheitsstufen) abgebildet.
- Festlegung von Umfang und Intervall von Überwachungsmaßnahmen und Sanierungsprioritäten sind möglich.
- Berechnungen, wie sich Sicherungsmaßnahmen auf die Versagenswahrscheinlichkeit auswirken, sind möglich.

Nachteile Probabilistik:

- Die Bestimmung der einzelnen Wahrscheinlichkeitsverteilungen ist sehr schwierig und teilweise kaum möglich.
- Die errechneten Wahrscheinlichkeiten garantieren nicht, dass die Gefährdung tatsächlich höher oder niedriger sein kann (Vertrauensbereich).

- Die Vorgehensweise ist, zumindest in Deutschland, nicht historisch gewachsen und wird (noch) von vielen Experten in Zweifel gezogen.

6 Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Hr. Prof. Fenk für seine Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Tagesbrüchen, die die Grundlage für die eigenen Forschungen waren sowie die fachlichen Hinweise für dieses Manuskript.

LITERATUR

DGGT (2004): Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Arbeitskreis 4.6, Empfehlung „Geotechnisch-markscheiderische Untersuchung und Bewertung von Altbergbau“, veröffentlicht auf dem 4. Altbergbaukolloquium, Leoben, 2004

Fenk, J. (1979): Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge, Dissertation B, Bergakademie Freiberg, 1979

Päßler, S. (2015): Über die Wahrscheinlichkeit von Tagesbrüchen und die Risikobewertung am Beispiel von Rohrleitungen im Mitteldeutschen Braunkohlentiefbau, Habilitation, TU Bergakademie Freiberg, 2015

Päßler, S, Veenker, M. (2010): Gefährdung von Gashochdruckleitungen durch Tagesbrüche, 10. Altbergbaukolloquium, Freiberg, 2010, S. 196 – 210, ISBN 978-3-86797-106-5