

Securing final and border slopes in the open-pit lignite mines of the Rhenish mining district from the perspective of the mining authority

Sicherheit von End- und Randböschungen in den Braunkohletagebauen des Rheinischen Reviers aus Sicht der Bergbehörde

ROLF WILHELM PETRI, Germany

1 Characteristic features of the Rhenish lignite mining district

The Rhenish mining district in North Rhine-Westphalia has a deposit volume of 35 billion tons of economically extractable reserves; thus, making it one of the most significant lignite deposits in Germany and Europe. Over more than 100 years, a mining industry has evolved which is concentrated in the three large-scale open-pit mines Garzweiler, Hambach and Inden of the mining company RWE Power AG today. Approximately 100 million tons of lignite are mined every year and used primarily to generate electricity.

The lignite deposits in the Lower Rhine Basin date back to the Tertiary Period. The overburden consists of loosely packed sedimentary rock mass originating in the Quaternary and the Tertiary Periods. It has a series of water bearing and water storing layers arranged in several groundwater horizons. For mining, the overburden has to be dewatered in several steps all the way to the seam floor. Up to three lignite seams with a total thickness of about 60 m are available for mining. The underlying stratum of the oldest seam is found at depths of up to 420 m below the terrain's surface. The deposit consists of several fault systems running from the southeast to the northwest in four blocks.

At some of the faults, slow tectonic shifts as well as earthquakes occur even today. The Lower Rhine Basin is one of Germany's most earthquake prone regions; although in a comparison with the rest of the world, Central Europe has to be classified as a region with few earthquakes. Yet more than 1000 quakes have been registered since exact measurements and recordings were first taken in 1955; the strongest one occurred on April 13, 1992 with a magnitude of 5.9.

The region in which the lignite is mined used to be originally characterized by agriculture. Due to the high earnings resulting from the agriculture and the steadily expanding commercial and industrial sector as well as an excellent infrastructure, the population density is higher than 500 inhabitants per km² and corresponds to the median population density of North Rhine-Westphalia while the average for the Federal Republic of Germany is considerably lower at an average value of 226 inhabitants per km².

Ltd. Bergdirektor Dipl.-Ing. ROLF WILHELM PETRI,
Bezirksregierung Arnsberg, Bergverwaltung Düren/Dez. 61,
Josef-Schregel-Str. 21, 52349 Düren, Germany
Tel. +49 (0) 2421-9440-12
e-mail: rolf.petri@bra.nrw.de

1 Besonderheiten des Rheinischen Braunkohlenreviers

Das Rheinische Revier in Nordrhein-Westfalen ist mit einem Lagerstätteninhalt von 35 Mrd. t wirtschaftlich gewinnbarer Vorräte die bedeutendste Braunkohlenlagerstätte in Deutschland und Europa. In über 100 Jahren hat sich ein Bergbau entwickelt, der sich heute auf die drei Großtagebaue Garzweiler, Hambach und Inden des Bergwerksunternehmers RWE Power AG konzentriert. Jährlich werden etwa 100 Mio. t Braunkohle gefördert und zum größten Teil in der Verstromung eingesetzt.

Das Braunkohlenvorkommen in der Niederrheinischen Bucht stammt aus dem Tertiär. Das überdeckende Gebirge ist ein sedimentäres Lockergebirge quartären und tertiären Ursprungs. Es gliedert sich durch Abfolge von wasserführenden und wasserstauenden Schichten in mehrere Grundwasserhorizonte. Für den Bergbau muss das Gebirge in mehreren Schritten bis zum Flözliegenden entwässert werden. Zum Abbau stehen bis zu drei Braunkohlenflöze mit einer Gesamtmächtigkeit von gut 60 m an. Das Liegende des jeweils ältesten Flözes befindet sich in Teufen von bis zu 420 m unter Geländeoberkante. Die Lagerstätte ist durch mehrere von Südosten nach Nordwesten verlaufende Störungssysteme in vier Schollen gegliedert.

An einigen Störungen ereignen sich bis zum heutigen Tag langsame tektonische Verschiebungen und auch Erdbeben. Die Niederrheinische Bucht zählt zu den erdbebenstärksten Regionen in Deutschland, wenngleich ganz Mitteleuropa im Weltvergleich als erdbebenarm einzustufen ist. Immerhin wurden seit Beginn der exakten Messungen und Aufzeichnungen im Jahr 1955 in der Region über 1000 Beben registriert, das stärkste am 13. April 1992 mit einer Magnitude von 5,9.

Die Region, in welcher der Braunkohlenabbau betrieben wird, ist ursprünglich landwirtschaftlich geprägt. Infolge des hohen Ertrages der Landwirtschaft und ständig gewachsener gewerblich-industrieller Wirtschaft sowie einer gut ausgebildeten Infrastruktur liegt die Besiedlungsdichte bei über 500 Einwohnern je km² und entspricht in etwa der mittleren Besiedlungsdichte von Nordrhein-Westfalen, während zum Vergleich für die Bundesrepublik Deutschland der Mittelwert mit 226 Einwohnern je km² deutlich niedriger liegt.

Für den Braunkohlenbergbau in der Niederrheinischen Bucht bestehen insbesondere folgende Problemfelder:

- hoher wasserwirtschaftlicher Aufwand für die Tagebauentwässerung,
- mächtige Abraumschichten und damit hohe Gewinnsteuern,
- zusätzliche seismische Beanspruchungen und

Lignite mining in the Lower Rhine Basin faces primarily the following problems:

- considerable water management efforts have to be undertaken to dewater the open-pit mines,
- thick overburden layers and, thus, considerable extraction depths,
- additional seismic stress,
- high conflict potential with the people and the business community in the surrounding region due to several relocations and many points of contact between the mining operation and the neighbourhood.

It is due to the above mentioned issues that the safe and secure construction of open-pit border slopes and final slopes assumes a particularly important role.

2 District Government Arnsberg as the Mining Authority in North Rhine-Westphalia

The official approval and monitoring of the safe operation of lignite open-pit mines in the Federal State of North Rhine-Westphalia (NRW) are the duties and responsibility of the District Government Arnsberg, Department of Mining and Energy in North Rhine-Westphalia, which is the responsible mining supervisory authority for the entire state. Within the scope of its responsibilities associated with mining supervision, the governmental office regulates and monitors also the safe and secure construction of open-pit slopes.

3 Elements of state lignite planning as the first step in safety

Border slopes, which are created along the excavation boundary of an open-pit mine, as well as permanent final slopes are subject to a two-step safety concept in the governmental planning and approval process.

During the first step, the mining is delimited in the so-called lignite plan. Lignite plans are important elements in North Rhine-Westphalia's regional planning. They are created in a special regional governmental board, the lignite committee, to plan an open-pit mining project or relocations and are approved by the state government. In the lignite plans for mining projects, a safety zone is already fixed by determining the excavation boundary and safety line in accordance to the provisions [1] of the State Planning Act. The stipulations of the lignite plans have to be observed by all governmental offices in their respective approval procedures.

The excavation boundary specified in the lignite plan includes the excavation area within which the extraction of lignite has priority above and beyond other utilizations and functional claims. During the later mining approval procedure, which is based on the lignite plan, mining may only be approved within the excavation boundary. The excavation boundary represents the inner boundary of the so-called safety zone while the outer boundary of this zone is formed by the safety line which is specified by parcels. The safety zone is the section between the edge of the excavation/dump site and the safety line whose width is based primarily on mining safety related aspects. Its width usually corresponds to either half the depth or even the full depth of the open-pit mine at the site in question, but at least 100 m. The safety line encloses and surrounds that area which would be affected directly by excavation and/or dumping activities taking place on the terrain's surface. It is in particular in this area, if it should prove to be necessary, that measures can be undertaken against hazards and any other issues associated with mining. This zone also provides room for operational measures and facilities, for example, wells and pipes, to dewater open-pit mines as well as installations which are used for emission control during the time of operation. When approving

- hohes Konfliktpotenzial mit Menschen und Wirtschaft in der Umgebung durch zahlreiche Umsiedlungen und viele Berührungspunkte zwischen Bergwerksbetrieb und Nachbarschaft.

Aus allen der vorgenannten Aspekte kommt einer sicheren Gestaltung der Tagebaurand- und Endböschungen eine ganz besondere Bedeutung zu.

2 Bezirksregierung Arnsberg als Bergbehörde in Nordrhein-Westfalen

Die bergrechtliche Genehmigung und die Überwachung des sicheren Betriebs der Braunkohlentagebaue im Bundesland Nordrhein-Westfalen (NRW) sind Aufgaben der Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW, die als Bergaufsicht landesweit zuständig ist. Im Rahmen ihrer bergaufsichtlichen Tätigkeit regelt und überwacht die Behörde auch die sichere Gestaltung der Tagebauböschungen.

3 Elemente der staatlichen Braunkohlenplanung als erste Sicherheitsstufe

Randböschungen, die entlang der Abbaugrenze eines Tagebaus angelegt werden, sowie auf Dauer bestehende Endböschungen unterliegen in den behördlichen Planungs- und Genehmigungsverfahren einem zweistufigen Sicherheitskonzept.

In einer ersten Stufe erfolgt eine Begrenzung des Abbaus im sog. Braunkohlenplan. Braunkohlenpläne sind wichtige Elemente der Landesplanung in NRW. Sie werden von einem besonderen regionalpolitischen Gremium, dem Braunkohlenausschuss, für die Planung eines Tagebauvorhabens oder für Umsiedlungen aufgestellt und durch die Landesregierung genehmigt. In den Braunkohlenplänen für Abbauvorhaben wird gemäß den Bestimmungen [1] zum Landesplanungsgesetz bereits durch Festlegung von Abbaugrenze und Sicherheitslinie eine Sicherheitszone festgelegt. Die Vorgaben der Braunkohlenpläne müssen von allen Behörden in ihren jeweiligen Genehmigungsverfahren beachtet werden.

Die im Braunkohlenplan festgelegte Abbaugrenze umschließt die Abbaufäche, innerhalb derer die Gewinnung von Braunkohle Vorrang vor anderen Nutzungs- und Funktionsansprüchen hat. Im späteren bergrechtlichen Genehmigungsverfahren, das auf die Braunkohlenplanung aufsetzt, darf Abbau nur innerhalb der Abbaugrenze genehmigt werden. Die Abbaugrenze stellt die innere Begrenzung der sog. Sicherheitszone dar, während die äußere Grenze dieser Zone von der Sicherheitslinie gebildet wird, welche parzellenscharf bestimmt wird. Die Sicherheitszone ist der Bereich zwischen Abbau-/Verkippungskante und der Sicherheitslinie, dessen Breite sich vorrangig nach bergsicherheitstechnischen Gesichtspunkten bemisst. Ihre Breite entspricht in der Regel der halben oder gesamten Teufe des Tagebaus an der betroffenen Stelle, mindestens jedoch 100 m. Mit der Sicherheitslinie wird diejenige Fläche umschlossen, innerhalb derer unmittelbare Auswirkungen der Abbau- bzw. Verkippungsmaßnahmen auf die Geländeoberfläche auf die Geländeoberfläche nicht ausgeschlossen werden können. Insbesondere auf dieser Fläche können, falls erforderlich, Maßnahmen zur Sicherung gegen Gefahren und sonstige den Bergbau begleitende Maßnahmen getroffen werden. Auch bietet diese Zone während der Betriebszeit des Tagebaus Platz für betriebliche Maßnahmen und Einrichtungen wie Brunnen und Leitungen zur Tagebauentwässerung sowie Einrichtungen zum Immissionsschutz. Mit der Zulassung des bergrechtlichen Rahmenbetriebsplans macht die Bergbehörde Abbaugrenze und Sicherheitszone für den Bergbaubetrieb rechtlich verbindlich.

the general operating plan for mining, the mining authority makes the excavation boundary and the safety zone legally binding for the mine operator.

4 Approvals in accordance with the mining law as the second step in safety

While a first safety element comes into existence by determining a horizontal distance on the terrain's surface during lignite planning, the creation of a stable slope system comes into play during the second step of the safety concept. Geometrically, this applies to the design of the general incline of the slope which is defined as the angle of the line between the upper edge of the slope and the lowest part of the slope's toe above the horizontal. The general incline of the slope is determined by the inclination of the individual slopes and the corresponding number and width of the berms structuring and dividing the entire slope. This second safety element assumes a particular, decisive role in the practical application. The mining authority demands proof of the stability attained to individual cases for all relevant border and final slope systems of an open-pit mine in the course of the official mining approval procedure authorizing the general operating plan and also subsequently at regular intervals when submitting the special operating plans.

5 Guideline for stability as a generally accepted code of practice

To examine and evaluate the stability of border slopes and permanent slopes in open-pit lignite mines and the requisite elevated dumps as well as the residual mining lakes, the generally accepted code of safety practice in North Rhine-Westphalia is the District Government Arnsberg's Guideline [2] for Investigating the Stability of Slopes in Open-Pit Lignite Mines in its most recent version containing the first supplement dated August 8, 2013 – 61.19.1-2-1. It describes the requirements which need to be considered in the verification procedure. According to the stipulations of the Mining Ordinance for Lignite Mines, it is necessary to furnish proof of the stability of the border slopes and final slopes. This proof is to be submitted by the mining company already during the planning phase and has to be approved by the mining authority prior to its implementation.

The stability can be verified via:

- geotechnical investigations (geological, hydrogeological, and geomechanical studies),
- surveying documents,
- calculations of the stability,
- evaluations of the stability,
- results of monitoring measures.

The mining authority generally determines already while examining the general and main operating plans for which slopes it is necessary to prepare stability calculations.

The requirements for stability need to be given sufficient consideration already while planning the slopes. That is why the preliminary exploration of the geological and hydrological conditions needs to be carried out in a timely manner.

6 A requirement for stability calculations

Stability calculations are needed as essential evaluation criteria for verification in line with the Mining Ordinance for Lignite Mines if and when the stability cannot be taken for granted on the basis of previous experiences and evidence.

Stability calculations are generally to be prepared if and when:

4 Genehmigung nach Bergrecht als zweite Sicherheitsstufe

Während in der Braunkohlenplanung ein erstes Sicherheitselement durch Festlegung eines horizontalen Abstandes an der Geländeoberfläche besteht, kommt in der zweiten Stufe der Sicherheitskonzeption die Ausbildung eines standsicheren Böschungssystems zum Tragen. Geometrisch zeigt sich dies für eine Böschung in der Auslegung der Generalneigung, welche als Winkel der Verbindungslinie zwischen Böschungsoberkante und unterstem Böschungsfuß gegen die Horizontale definiert ist. Die Generalböschungsneigung wird durch Neigung der Einzelböschungen und durch entsprechende Anzahl und Breite der die gesamte Böschung gliedernden Bermen bestimmt. Diesem zweiten Sicherheitselement kommt in der Praxis eine besonders prägende Bedeutung zu.

Für alle relevanten Rand- und Endböschungssysteme eines Tagebaus verlangt die Bergbehörde in den bergrechtlichen Genehmigungsverfahren mit Zulassung des Rahmenbetriebsplans eines Tagebaus und regelmäßig folgend von dem die Vorlage von Sonderbetriebsplänen mit einem auf den Einzelfall abgestimmten Standsicherheitsnachweis.

5 Richtlinie für Standsicherheit als allgemein anerkannte Regel der Technik

Für die Untersuchung und Beurteilung der Standsicherheit von Randböschungen und bleibenden Böschungen der Braunkohlentagebaue und der zugehörigen Hochkippen sowie der Restseen wird in Nordrhein-Westfalen als allgemein anerkannte Regel der Sicherheitstechnik die Richtlinie [2] der Bez.-Reg. Arnsberg für die Untersuchung der Standsicherheit von Böschungen der im Tagebau betriebenen Braunkohlenbergwerke in der Neufassung mit 1. Ergänzung vom 08.08.2013 - 61.19.2-2-1 angewendet. Darin sind die Anforderungen an die anzuwendenden Nachweisverfahren beschrieben. Nach den Bestimmungen der Bergverordnung für die Braunkohlenbergwerke ist die Standsicherheit für Rand- und Endböschungen nachzuweisen. Dieser Nachweis ist vom Bergbauunternehmer bereits in der Planungsphase zu erbringen und muss von der Bergbehörde vor Ausführung genehmigt sein.

Zum Nachweis der Standsicherheit dienen

- geotechnische Untersuchungen (geologische, hydrogeologische und geomechanische Untersuchungen),
- markscheiderische Unterlagen,
- Berechnungen der Standsicherheit,
- Beurteilungen der Standsicherheit,
- Ergebnisse von Beobachtungsmaßnahmen.

Die Bergbehörde entscheidet in der Regel bereits bei der Prüfung von Rahmen- und Hauptbetriebsplänen, für welche Böschungen die Anfertigung von Standsicherheitsberechnungen erforderlich ist.

Die standsicherheitslichen Erfordernisse müssen bereits bei der Planung der Böschungen in hinreichender Weise berücksichtigt werden. Dies erfordert eine rechtzeitige vorauslaufende Erkundung der geologischen und hydrologischen Verhältnisse.

6 Erfordernis von Standsicherheitsberechnungen

Standsicherheitsberechnungen sind als wesentliche Beurteilungsgrundlage für den Nachweis im Sinne der Bergverordnung für Braunkohlenbergwerke erforderlich, wenn die Standsicherheit nicht bereits aufgrund bisheriger Erfahrungen und Nachweise als gegeben anzusehen ist.

- the stability cannot be considered as given after the geotechnical investigations have been properly assessed,
- any objects in need of protection (e.g. special buildings, industrial plants, traffic structures, supply and waste disposal pipes, flowing bodies of water, retaining structures, nature reserves) are found in the area bordering on the slope's edge,
- any ground conditions that favor landslides (e.g. tectonic stress zones, stratum boundaries or strata with little stability, adverse hydrological conditions, additional static loads or vibrations and tremors, for example, due to transportation infrastructures, old mining structures, coal pillars or permanent coal pillars, former dump sites) are present or
- the mining authority demands it in individual cases.

Stability calculations are to be carried out while using the results of the geotechnical investigations which were conducted in procedures which are appropriate for the actual local conditions and conform to the state of technology. Generally speaking, calculations are to be carried out using both averaged as well as adverse soil mechanical parameters; the influence of the characteristic value approach on the stability is to be determined through comparison calculations.

7 Calculation methods for different fracture mechanisms

The applicable calculation methods and calculation programs along with the documents needed for the verification are to be submitted to the mining authority for approval. That is why the calculation methods were verified and officially confirmed for:

- fracture mechanisms with circular slip lines (slice procedures),
- composite fracture mechanisms with straight slip lines (rigid body method).

In many cases, it is often possible to realistically describe fracture mechanisms with the help of circular slip lines. Geological cross-sections depicting the strata, faults, and strata boundaries as well as miscellaneous weak zones, groundwater levels and/or dewatering objectives, and the slope's geometry are to be prepared before determining the potential slip lines for the slope area under investigation. The slope area under investigation is to be divided into perpendicular slices which correspond to the loose rock layers dissected by the slip lines. The calculation method is, thus, called the slice procedure; it is described in more detail in the DIN standard 4084.

The slip lines under investigation are to be specified while taking the instable geomechanical zones into account. The slip lines, which are decisive for adverse stability, are to be ascertained mathematically.

When residual water is present in the sector of the slope under investigation, then it is necessary to consider the pore water pressure with regard to the height of the water level and the specific weight of the water saturated soil. If present, the additional static loads influencing the slope body need to be also considered.

The stability is calculated according to Bishop's method which is explained with examples in DIN 4084. It is also possible to carry out additional stability calculations which have been tested in open-pit lignite mining (e.g. the B.O.R. or JANBU methods). Bishop's calculation method can only be used for plain cylindrical slip surfaces; for straight slip line sections and/or fracture sections, calculations need to be carried out using the methods described below.

Due to the tectonic conditions in the Rhenish lignite mining district, it is necessary to also consider for fracture mechanisms that reach deeper into the ground slip lines that run straight in sections due to instable zones which are predetermined by the rock mass. The individual fracture blocks can only move parallel to the external

Standsicherheitsberechnungen sind in der Regel anzufertigen, wenn

- die Standsicherheit nach Beurteilung der durchgeführten geotechnischen Untersuchungen nicht als gegeben anzusehen ist,
- zu schützende Objekte (z.B. besondere Gebäude, Industrieanlagen, Verkehrsbauwerke, Ver- und Entsorgungsleitungen, Fließgewässer, Stauanlagen, Naturschutzgebiete) im Böschungsrandbereich vorhanden sind,
- rutschungsbegünstigende Gebirgsverhältnisse (z.B. tektonische Beanspruchungszonen, Schichtgrenzen oder Schichten mit geringer Scherfestigkeit, ungünstige hydrologische Verhältnisse, statische Zusatzlasten oder Erschütterungen etwa durch Verkehrsanlagen, alte Grubenbaue, Kohlepfiler oder -festen, ehemalige Kippen) vorliegen oder
- die Bergbehörde dies im Einzelfall verlangt.

Standsicherheitsberechnungen sind unter Verwendung der Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen nach Verfahren durchzuführen, die für die vorliegenden Gegebenheiten geeignet sind und dem Stand der Technik entsprechen. In der Regel sind die Berechnungen sowohl unter Ansatz gemittelter wie auch unter Ansatz ungünstiger bodenmechanischer Kennwerte durchzuführen; der Einfluss des Kennwertansatzes auf die Standsicherheit ist durch Vergleichsberechnungen zu ermitteln.

7 Berechnungsverfahren für verschiedene Bruchmechanismen

Die anzuwendenden Berechnungsverfahren und Rechenprogramme sind der Bergbehörde unter Beifügung der zur Prüfung erforderlichen Unterlagen zur Zustimmung anzuzeigen. In diesem Sinne wurden Berechnungsverfahren geprüft und behördlich bestätigt für

- Bruchmechanismen mit kreisförmigen Gleitlinien (Lamellenverfahren),
- zusammengesetzte Bruchmechanismen mit geraden Gleitlinien (Starrkörpermethode).

Bruchmechanismen können in vielen Fällen durch kreisförmige Gleitlinien realistisch beschrieben werden. Für den zu untersuchenden Böschungsbereich sind geologische Schnitte mit Darstellung der Schichten, der Verwerfungen und Schichtgrenzen und sonstiger Schwächezonen, der Grundwasserstände bzw. Entwässerungsziele und der Böschungsgeometrie zu erstellen und danach die möglichen Gleitflächen festzulegen. Der zu untersuchende Böschungsbereich wird entsprechend den von der Gleitlinie durchschnittenen Lockergesteinsschichten in lotrechte Lamellen eingeteilt. Die Berechnungsmethode wird von daher als Lamellenverfahren bezeichnet; sie ist in der Norm DIN 4084 näher beschrieben.

Die zu untersuchenden Gleitlinien werden unter Berücksichtigung von gebirgsmechanischen Schwächezonen festgelegt. Die in standsicherheitlicher Hinsicht maßgebenden ungünstigsten Gleitlinien sind rechnerisch zu ermitteln.

Bei Vorhandensein von Restwasserständen im betrachteten Böschungsbereich sind der Porenwasserdruck entsprechend der Höhe des Wasserstandes und die Wichte des wassergesättigten Bodens zu berücksichtigen. So vorhanden müssen auch auf den Böschungskörper einwirkende statische Zusatzlasten berücksichtigt werden.

Die Berechnung der Standsicherheit erfolgt mit dem Berechnungsverfahren nach Bishop, das beispielhaft in DIN 4084 erläutert ist. Darüber hinaus können zusätzliche Standsicherheitsberechnungen nach anderen im Braunkohlenbergbau erprobten Verfahren (z.B. die Verfahren nach B.O.R. oder JANBU) durchgeführt werden. Das Berechnungsverfahren nach Bishop ist nur für kreiszylindrische Gleitflächen anzuwenden; bei abschnittsweise

slip lines. The procedure that is also called the rigid body method considers fracture mechanisms which are kinematically possible and which can be clearly solved mathematically. This method is also described in DIN 4084. The procedure is to be used primarily for fracture blocks for which the location of the external and internal slip lines is clearly determined by geomechanically instable zones, such as, for example, thin clay horizons and faults. The investigation is to be carried out for the most adverse fracture mechanisms.

To ascertain the stability coefficient η according to Fellenius, a uniform reduction is carried out for the shear strength parameters of all slip lines.

The specific values which are used in the stability calculations to describe the soil mechanical properties come from the soil mechanical field and laboratory investigations. The mining company has been operating a certified geomechanical and soil mechanical test lab for many decades.

8 Assessing the stability

When assessing whether the slope is stable, it is necessary to take the previous experiences into account while using the results of the geotechnical investigations, the surveying documents, and the calculation results.

If stability calculations need to be carried out, then the necessary stability coefficient needs to be specified and substantiated depending on the extent of the geotechnical investigations, the reliability of the applied characteristic geomechanical values while also considering the risk potential of the objects found in the sector of the slope's edge that need to be protected, the scheduled lifetime of the slope, and the protection of the deposit for each sectional plane under consideration.

The mathematically determined stability coefficient η of individual slopes and slope systems has to be above 1.0 for the worst case scenario.

For objects that need to be protected in the sector of the slope's edge and for permanent slopes, the stability coefficient has to be at least 1.3 for the slope system. When this value is not reached, then an explanation has to be given for each individual case.

When assessing the stability of slopes, it is also possible to take into account the spatial restraints of the slope's toe as well as the measures designed to maintain or increase the stability and to monitor the slope. And the intended utilization has to be taken into consideration as well.

9 Considering earthquakes

Due to the seismic features of the Rhenish lignite mining district, the impact of potential earthquakes has to be also considered for permanent slopes of residual lakes and elevated dumps. This is investigated with the help of pseudo-static or dynamic methods.

The prerequisite for investigations applying these methods is the absence of liquefaction effects in the materials with which the slopes are actually constructed. That is why the permanent slope has to be designed and built in such a way that soil and/or ground liquefaction is not to be feared. The mining company has to properly demonstrate this.

When the pseudo-static method is used, the forces that come into play during earthquakes are either considered to be part of the gravitational acceleration (k being classified as the "seismic coefficient") or the peak ground acceleration caused by earthquakes (χ being the "pseudo-static coefficient"). The value domain of the seismic coefficient k varies from region to region and the more so, the stronger the earthquake is that is to be anticipated for a particular region. When using the pseudo-static coefficient χ , the magnitude of the earthquake which is to be anticipated is factored in using the peak ground acceleration PGA.

geraden Gleit- bzw. Bruchlinienabschnitten sind Berechnungen entsprechend nachstehender Methode zu führen.

Aufgrund der tektonischen Gegebenheiten im Rheinischen Braunkohlenrevier ist es bei tiefergehenden Bruchmechanismen erforderlich, auch Gleitlinien zu betrachten, die entsprechend den im Gebirgskörper vorgegebenen Schwächezonen abschnittsweise gerade verlaufen. Die einzelnen Bruchkörper können dabei Bewegungen nur parallel zu äußeren Gleitlinien ausführen. Bei dem auch als Starrkörpermethode bezeichneten Verfahren werden Bruchmechanismen betrachtet, die kinematisch möglich und mathematisch eindeutig zu lösen sind. Die Methode ist ebenfalls in DIN 4084 beschrieben. Das Verfahren ist vorrangig für Bruchkörper anzuwenden, bei denen die Lage der äußeren und inneren Gleitlinien durch gebirgsmechanische Schwächezonen, wie z.B. geringmächtige Tonhorizonte und Verwerfungen, eindeutig vorgegeben ist. Die Untersuchung ist für die ungünstigsten Bruchmechanismen durchzuführen.

Zur Ermittlung des Standsicherheitskoeffizienten η nach Fellenius wird eine gleichmäßige Abminderung der Scherfestigkeitsparameter über alle Gleitlinien vorgenommen.

Die in den Standsicherheitsrechnungen angesetzten Kennwerte zur Beschreibung der bodenmechanischen Eigenschaften stammen aus bodenmechanischen Feld- und Laboruntersuchungen. Der Bergbauunternehmer betreibt seit Jahrzehnten ein inzwischen zertifiziertes gebirgs- und bodenmechanisches Prüflabor.

8 Beurteilung der Standsicherheit

Unter Verwendung der Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen, der markscheiderischen Unterlagen und der Berechnungsergebnisse ist unter Berücksichtigung der bisherigen Erfahrungen zu beurteilen, ob die Böschung standsicher ist.

Soweit Standsicherheitsberechnungen durchzuführen sind, ist der erforderliche Standsicherheitskoeffizient je nach Umfang der geotechnischen Untersuchungen, der Zuverlässigkeit der angesetzten geomechanischen Kennwerte und unter Berücksichtigung des Gefährdungspotenzials der im Böschungsrandbereich gelegenen zu schützenden Objekte, der vorgesehenen Standzeit der Böschung und des Lagerstättenschutzes für jede betrachtete Schnittebene festzulegen und zu begründen.

Der rechnerisch ermittelte Standsicherheitskoeffizient η von Einzelböschungen und Böschungssystemen muss für den ungünstigsten anzunehmenden Fall angemessen über 1,0 liegen.

Bei zu schützenden Objekten im Böschungsrandbereich und bei bleibenden Böschungen muss der Standsicherheitskoeffizient für das Böschungssystem mindestens 1,3 betragen. Ein Unterschreiten dieses Wertes bedarf einer einzelfallbezogenen Begründung.

Bei der Beurteilung der Standsicherheit von Böschungen können auch die räumliche Einspannung des Böschungsfußes sowie Maßnahmen zur Erhaltung oder Erhöhung der Standsicherheit und zur Beobachtung der Böschung berücksichtigt werden. Die geplante Nutzung muss berücksichtigt werden.

9 Berücksichtigung von Erdbeben

Infolge der seismischen Besonderheiten des rheinischen Braunkohlenreviers müssen bei bleibenden Böschungen von Restseen und von Hochkippen zusätzlich die Einwirkungen berücksichtigt werden, die durch mögliche Erdbeben verursacht werden. Dies wird mittels pseudo-statischer oder dynamischer Verfahren untersucht.

Voraussetzung für die Untersuchung mit diesen Verfahren ist das Nichtauftreten von Verflüssigungseffekten der Materialien, mit denen die Böschungen hergestellt werden. Folglich sind bleibende Böschungen so zu gestalten und aufzubauen, dass eine Bodenverflüssigung nicht zu besorgen ist. Dies hat der Unternehmer in geeigneter Weise darzulegen.

In order to validate the applicability of the selected pseudo-static method for the specific case of elevated dumps and residual lakes in the Rhenish lignite mining district, Prof. Dr.-Ing. Triantafyllidis was commissioned by the District Government Arnberg to prepare an expert's report [3]. By using dynamic calculation methods, he carried out a retrograde calculation of the pseudo-static coefficient which is to be used in pseudo-static methods. It was, thus, possible to demonstrate that the pseudo-static calculation which was used in this approach can come up with results that are at least equivalent to those of the dynamic methods.

Determining the recurrence intervals and ascertaining the respective ground accelerations for the stability verification is to be carried out as follows:

- for permanent slope systems of residual lakes: Until the final water level is reached (filling phase): Design basis earthquake 1 – recurrence interval $T = 500$ years. After having reached the final water level (final state): Design basis earthquake 2 – recurrence interval $T = 2,500$ years,
- for permanent individual slopes of residual lakes and permanent slopes of elevated dumps: Design basis earthquake 1 – recurrence interval $T = 500$ years. Design basis earthquake 1 – recurrence interval $T = 500$ years.

The definition of these data is carried out as per DIN 19700-10 [4] whereby large dams of the Category 1 are to be assigned a recurrence interval of 2500 years for a global failure due to earthquake damage (probability of occurrence $4 \cdot 10^{-4}$). Compared to Eurocode 8, slope systems of residual lakes actually get higher acceleration rates (recurrence interval Eurocode 8: $T = 475$ years). The calculation for the residual lake slopes is, thus, designed to take a possible later land use into account which is to meet the requirements of DIN EN 1998 (Eurocode 8).[5]

The peak ground acceleration (PGA) on the terrain surface is to be ascertained either via the site-specific data retrieval of seismic hazards from the German Research Centre for Geosciences Potsdam (GFZ Potsdam) [6] or via a site-specific seismic report of the Geological Service North Rhine-Westphalia (GD NRW), or any other competent agency. When the acceleration of the bedrock is to be ascertained, it is necessary to consider ground reinforcement due to the existing sediment cover.

The horizontal and vertical components of an earthquake's side effects are assumed to be acting simultaneously in the calculation. The acceleration is always considered to be a horizontal component moving in the direction of the open slope. For vertical acceleration, both possible directions are to be considered in different calculation steps. If information is only available on the horizontal seismic acceleration, then the vertical acceleration is to be ascertained from it with the factor 0.7.

When using dynamic methods, then the ground acceleration caused by earthquakes is to be calculated according to its elapsed time without any reduction.

If pseudo-static methods are used, then it is necessary to reduce the maximum acceleration PGA which is caused by earthquakes by applying the pseudo-static coefficient χ . The dimension of χ is to be determined in accordance with Prof. Dr. Triantafyllidis' expert report subject to recurrence intervals as well as the location of the fracture mechanisms (near surface or deep fracture mechanisms).

The impact of the earthquake acceleration on the pore waters in the slopes and the water level of the residual lake are to be taken into consideration with the help of the appropriate methods.

10 Official verification and approval procedure

The calculations submitted by the mining company are to be verified on behalf of the mining authority by the Geological Service

Beim pseudo-statischen Verfahren werden die durch ein Erdbeben auftretenden Kräfte entweder als Anteil der Erdbeschleunigung (mit k als „seismischer Koeffizient“ bezeichnet) oder anhand der durch Erdbeben verursachten Spitzenbodenbeschleunigung (mit χ als „pseudo-statischer Koeffizient“ bezeichnet), angesetzt. Der Wertebereich des seismischen Koeffizienten k ist regional unterschiedlich und umso größer, je stärker die in einem Gebiet zu erwartenden Erdbeben sind. Bei Nutzung des pseudo-statischen Koeffizienten χ wird die Stärke der zu erwartenden Erdbeben durch die Spitzenbodenbeschleunigung PGA berücksichtigt.

Um für den konkreten Anwendungsfall für Hochkippen und Restseen im Rheinischen Braunkohlenrevier die Eignung des gewählten pseudo-statischen Ansatzes zu überprüfen, wurde Prof. Dr.-Ing. Triantafyllidis von der Bezirksregierung Arnberg mit der Erarbeitung eines Gutachtens [3] beauftragt. Durch den Einsatz dynamischer Berechnungsverfahren erfolgte in seiner Arbeit eine Rückrechnung der in pseudo-statischen Verfahren anzusetzenden pseudo-statischen Koeffizienten. Damit konnte bestätigt werden, dass die pseudo-statische Berechnung in dem hier gewählten Ansatz sicherheitlich mindestens gleichwertige Ergebnisse erbringt wie die dynamischen Verfahren.

Die Festsetzung der Wiederkehrperiode und die Ermittlung der zugehörigen Bodenbeschleunigungen für den Standsicherheitsnachweis sind wie folgt vorzunehmen:

- für bleibende Böschungssysteme von Restseen: bis zum Erreichen des endgültigen Wasserstandes (Befüllphase): Bemessungserdbeben 1 – Wiederkehrperiode $T = 500$ Jahre und nach Erreichen des endgültigen Wasserstandes (Endzustand): Bemessungserdbeben 2 – Wiederkehrperiode $T = 2500$ Jahre,
- für bleibende Einzelböschungen von Restseen und bleibende Böschungen von Hochkippen: Bemessungserdbeben 1 – Wiederkehrperiode $T = 500$ Jahre Bemessungserdbeben 1 – Wiederkehrperiode $T = 500$ Jahre.

Diese Festlegungen erfolgen in Anlehnung an DIN 19700-10 [4], wonach große Talsperren der Klasse 1 gegen globales Versagen für Erdbebeneinwirkungen mit einer Wiederkehrperiode von 2500 Jahren auszulegen sind (Eintrittswahrscheinlichkeit $4 \cdot 10^{-4}$). Gegenüber dem Eurocode 8 werden damit für Böschungssysteme von Restseen höhere Beschleunigungen angesetzt (Wiederkehrperiode Eurocode 8: $T = 475$ Jahre). Die Bemessung der Restseeböschungen wird damit bereits im Hinblick auf eine spätere bauliche Nutzung, für die die Anforderungen der DIN EN 1998 (Eurocode 8) zu berücksichtigen sind, ausgelegt [5].

Die Spitzenbodenbeschleunigung (PGA) an der Geländeoberfläche ist aus einer ortsbezogenen Datenabfrage zu Erdbebengefährdung beim Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ Potsdam) [6] oder durch ein standortspezifisches seismisches Gutachten des Geologischen Dienstes NRW oder einer anderen fachkundigen Stelle zu ermitteln. Wird die Beschleunigung am Grundgebirge ermittelt, ist dabei eine Bodenverstärkung durch die vorhandene Sedimentüberdeckung zu berücksichtigen.

Horizontale und vertikale Komponenten von Erdbebeneinwirkungen werden im Rechenansatz als gleichzeitig wirkend angenommen. Dabei ist die Beschleunigung stets für eine Horizontalkomponente in Richtung der offenen Böschung anzusetzen. Für die Vertikalbeschleunigung werden beide möglichen Richtungen in unterschiedlichen Rechengängen betrachtet. Sofern nur die Angabe zur horizontalen Erdbebenbeschleunigung vorliegt, ist aus dieser die Vertikalbeschleunigung mit dem Faktor 0,7 zu ermitteln.

Bei Anwendung dynamischer Verfahren wird die durch Erdbeben hervorgerufene Bodenbeschleunigung entsprechend ihres Zeitverlaufs ohne Abminderung angesetzt.

Kommen pseudo-statische Verfahren zur Anwendung, ist die durch Erdbeben hervorgerufene maximal auftretende Beschleunigung PGA unter Verwendung des pseudo-statischen Koeffizienten χ abzumindern. Die Größe von χ ist entsprechend dem genann-

North Rhine-Westphalia with the help of comparative calculations. The Geological Service also investigates other possible fracture blocks and fracture mechanisms. The results of the soil mechanical field and laboratory investigations will also be verified for their plausibility and completeness. When specific problems exist, it is also possible to consult additional experts.

The test report of the Geological Service includes information and recommendations for the construction and monitoring of slopes. And finally, the mining authority verifies the stability verification in accordance with all the requirements of the Federal Mining Act and grants approval.

This procedure assures the verification and assessment of the stability by three different agents which is why it is also called the six eyes principle.

11 Constructing and monitoring slopes

The company has to construct stable slopes. Dump sites are, in particular, to be built in such a way that alternating strata of different materials are created which produces a special stability. The construction of the slope is accompanied by stability investigations. Surveyors have to record the slope's structure on behalf of the company. With the help of the surveying results, the mining authority can determine whether a slope has been built as planned.

Deformations of the slope's edge systems have to be monitored. That is why manual measurement methods and automated measurement systems with alarms are used. The proper operation of the measurement systems is monitored by the mining authority. Significantly higher accelerations in the overburden deformation can be the first indication of sliding surfaces forming in the overburden and can signal the beginning of a disproportionate deformation. In such a case, the automated measurement systems would trigger an alarm at a permanently staffed location. Past practice has shown that the speed of the overburden deformations in the Rhenish mining district initially starts slowly and then accelerates continuously. When there is a timely warning, then there is sufficient reaction time to initiate measures designed to maintain or strengthen the resistant forces in the overburden. This includes, for example, an immediate compensation of the inner overburden dump, support fillings at the slope's toe, or an additional reduction of the groundwater levels. In order to reduce the primary forces in the overburden, it is possible to carry out relief dredging at the slope's head or to undertake additional drainage measures.

12 Work Group Ground Mechanics to improve the codes of practice

In the course of advanced professional training, regular joint discussions are held with experts in order to exchange information about the operating conditions and the ascertained measurements, on the one hand, as well as new developments, on the other hand. As a consequence of this exchange of expertise, the mining authority has founded together with the Geological Service North Rhine-Westphalia and the mining company RWE Power AG a work group for ground mechanics in lignite mining which systematically seeks to advance the generally accepted codes of safety practice in this field.

The organization consists of a coordination group which conducts the strategic planning, formulates the respective professional requests, and assures the general framework for the technical work. This technical work is performed by a smaller core work group which handles the tasks formulated by the coordination group by topic. The core work group is supplemented also by the work of external experts if so required.

ten Gutachten von Prof. Dr. Triantafyllidis in Abhängigkeit von der Wiederkehrperiode sowie der Lage der Bruchmechanismen (oberflächennahe oder tiefe Bruchmechanismen) festzusetzen.

Die Auswirkungen der Erdbebenbeschleunigung auf das Porenwasser in der Böschung und den Wasserspiegel im Restsee sind mittels geeigneter Verfahren zu berücksichtigen.

10 Behördliche Prüfung und Genehmigung

Die vom Bergbauunternehmer vorgelegten Berechnungen werden im Auftrag der Bergbehörde durch den Geologischen Dienst NRW mit Hilfe von Vergleichsrechnungen geprüft. Der Geologische Dienst untersucht außerdem weitere mögliche Bruchkörper und Bruchmechanismen. Auch die Ergebnisse der bodenmechanischen Feld- und Laboruntersuchungen werden auf Plausibilität und Vollständigkeit geprüft. Bei besonderen Problemstellungen bleibt zudem die Hinzuziehung von weiteren Sachverständigen vorbehalten.

Der Prüfbericht des Geologischen Dienstes enthält Hinweise und Empfehlungen zur Herstellung und Überwachung der Böschungen. Abschließend prüft die Bergbehörde den Standsicherheitsnachweis nach allen Anforderungen des Bundesberggesetzes und erteilt eine Genehmigung.

Das Verfahren gewährleistet eine Prüfung und Beurteilung der Standsicherheit durch drei verschiedene Teilnehmer und wird auch als Sechs-Augen-Prinzip bezeichnet.

11 Herstellung und Überwachung von Böschungen

Der Unternehmer hat Böschungen standsicher herzustellen. Insbesondere sind Kippen gezielt so aufzubauen, dass eine Wechsellagerung aus verschiedenen Materialien hergestellt wird, durch die besondere Stabilität erzeugt wird. Der Böschungsaufbau wird durch Standsicherheitsuntersuchungen begleitet. Der Unternehmer muss die Anlage der Böschungen durch Markscheider vermessungstechnisch erfassen lassen. Anhand der Vermessungsergebnisse kann die Bergbehörde kontrollieren, ob eine Böschung planmäßig erstellt worden ist.

Die Verformungen von Randböschungssystemen müssen überwacht werden. Hierzu werden manuelle Messverfahren und automatisierte Messsysteme mit Alarmgebung eingesetzt. Der ordnungsgemäße Betrieb der Messsysteme wird von der Bergbehörde überwacht. Signifikant erhöhte Geschwindigkeiten der Gebirgsverformung können erste Anzeichen für sich im Gebirge ausbildende Gleitflächen darstellen und auf den Beginn einer unverhältnismäßigen Verformung hinweisen. Die automatisierten Messsysteme geben in einem solchen Fall unverzüglich Alarm an eine ständig besetzte Stelle. Die Praxis der vergangenen Jahre hat gezeigt, dass sich im Rheinischen Revier die Geschwindigkeit der Gebirgsverformung zunächst langsam und kontinuierlich erhöht. Bei rechtzeitiger Warnung besteht ausreichende Reaktionszeit, Maßnahmen zur Erhaltung oder Erhöhung der widerstehenden Kräfte im Gebirge einzuleiten. Dazu zählen beispielsweise ein unmittelbares Nachführen der Innenkippe, Stützsüttungen am Böschungsfuß oder eine weitere Reduzierung der Grundwasserstände. Zur Reduzierung der treibenden Kräfte im Gebirge können Entlastungsbaggerungen am Böschungskopf oder zusätzliche Entwässerungsmaßnahmen ausgeführt werden.

12 Arbeitskreis Gebirgsmechanik für Fortentwicklung der Regeln der Technik

Im Zuge der fachlichen Fortbildung finden regelmäßig gemeinsame Fachgespräche mit Sachverständigen statt, um sich über die betrieblichen Verhältnisse und die ermittelten Messwerte einerseits

References/Literatur

- [1] Verordnung zur Durchführung des Landesplanungsgesetzes (LandesplanungsgesetzDVO – LPIG DVO) vom 8. Juni 2010 GV, NRW: 334.
- [2] http://esb.bezreg-arnsberg.nrw.de/a_2/a_2_019/a_2_019_007/index.html.
- [3] TRIANTAFYLIDIS, T. (Juni 2013): Gutachterliche Stellungnahme zu Standsicherheitsberechnungen mit Ansatz von „Erdbebenbeschleunigungen für Böschungen im Rheinischen Braunkohlenbergbau“ – Überprüfung des quasistatischen Ansatzes der Erdbebenbeschleunigung bei Standsicherheitsuntersuchungen und Bewertung der Rechenverfahren zur Böschungstabilität.
- [4] DIN 19700 (Juli 2004): Stauanlagen.
- [5] Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - DIN EN 1998-1:2010-12; DIN EN 1998-1/NA:2011-01; DIN EN 1998-5:2010-2012; DIN EN 1998-5/NA:2011-07, 2010-2011.
- [6] Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ Potsdam): Interaktive Abfrage von Karten der Erdbebengefährdung und Beschleunigungs-Antwortspektren für die Gefährdungsniveaus gemäß DIN 19700.