

Annika Mittmann

## Rock Mechanical Issues of the Planned Opencast Mining Lakes

After the end of lignite mining in the Rhenish mining area, the remaining volume of the three existing opencast mines will be filled with water. The creation of opencast mining lakes on a scale that has not yet been achieved anywhere in the world represents a complex task for

the mining company and the responsible authorities. The authorisation and supervisory tasks are carried out by the Mining and Energy in NRW department of the Arnsberg District Government, located in Dortmund/Germany, which is responsible for the entire state.

## Gebirgsmechanische Fragestellungen der geplanten Tagebauseen

Nach Beendigung der Braunkohlegewinnung im Rheinischen Revier wird das Restvolumen der drei bestehenden Tagebaue mit Wasser gefüllt werden. Die Anlage von Tagebauseen in Dimensionen, die weltweit noch nicht erreicht wurden, stellt eine komplexe Aufgabenstellung für den Bergbautreibenden und die zuständigen

Behörden dar. Die genehmigungsrechtlichen und aufsichtlichen Aufgaben werden dabei von der landesweit zuständigen Abteilung Bergbau und Energie in NRW der Bezirksregierung Arnsberg, Standort Dortmund, wahrgenommen.

### Introduction

After the end of lignite mining in the Rhenish mining area, the remaining volume of the three existing opencast mines will be filled with water. The creation of opencast mining lakes on a scale that has not yet been achieved anywhere in the world – the Hambach opencast mining lake will be the deepest lake in Germany in the future – represents a complex task for the mining operator and the responsible authorities (Figure 1). The state-wide Mining and

### Einleitung

Nach Beendigung der Braunkohlegewinnung im Rheinischen Revier wird das Restvolumen der drei bestehenden Tagebaue mit Wasser gefüllt werden. Die Anlage von Tagebauseen in Dimensionen, die weltweit noch nicht erreicht wurden – der Tagebausee Hambach wird zukünftig der tiefste See Deutschlands sein – stellt eine komplexe Aufgabenstellung für den Bergbautreibenden und die zuständigen Behörden dar (Bild 1). Die genehmigungsrechtlichen und aufsichtlichen Aufgaben werden dabei von der landesweit zuständigen Abteilung Bergbau und Energie in NRW der Bezirksregierung Arnsberg, Standort Dortmund, wahrgenommen.

Das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen hat sich mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und der RWE AG am 04. Oktober 2022 darauf verständigt, den Kohleausstieg um acht Jahre auf 2030 vorzuziehen. Bundesrechtlich wurde die Verständigung mit dem Gesetz zur Beschleunigung des Braun-

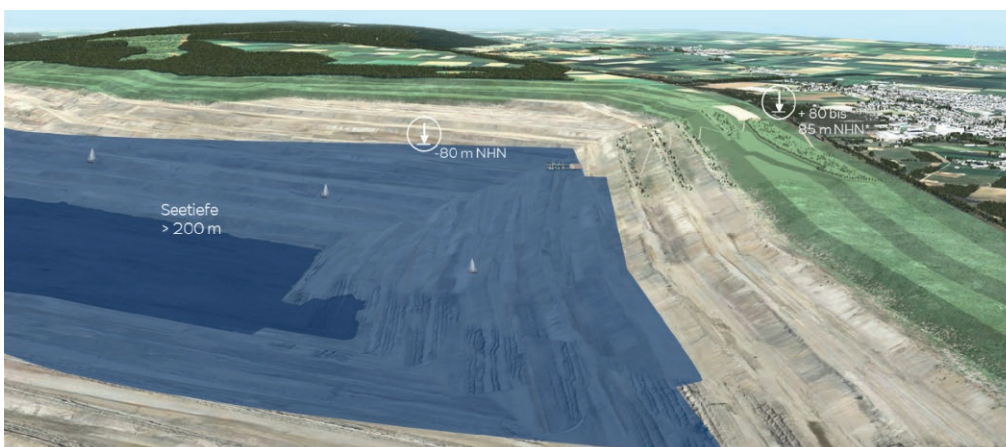


Fig. 1. The construction of opencast mining lakes on a scale that has not yet been achieved anywhere in the world represents a complex task for the mining operator and the responsible authorities.

Bild 1. Die Anlage von Tagebauseen in Dimensionen, die weltweit noch nicht erreicht wurden, stellt eine komplexe Aufgabenstellung für den Bergbautreibenden und die zuständigen Behörden dar. Source/Quelle: RWE Power AG

Energy in NRW department of the Arnsberg district government, located in Dortmund/Germany, is responsible for authorisation and supervisory tasks.

On 4th October 2022, the Ministry of Economic Affairs, Industry, Climate Protection and Energy of the State of North Rhine-Westphalia reached an agreement with the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) and RWE AG to bring forward the coal phase-out by eight years to 2030. The agreement was implemented under federal law with the Act on the Acceleration of the Lignite Phase-out in the Rhenish Mining Area of 19 December 2022. This places a greater focus on the timely, safe restoration of a landscape that combines economic, nature conservation and social interests. The geotechnical aspects to be considered in this context are diverse, complex and, not least, have a significant influence on the future utilisation of the opencast mining lakes.

With the new version of the "Guideline for Stability Analyses" (RfS), which is decisive for opencast lignite mines in North Rhine-Westphalia, in 2013 and the approval of the first special operating plan for an opencast mining lake embankment in the area of the Inden opencast mine in 2014, the working group "Rock Mechanics in Rhenish Lignite Mining", which has been in existence since 2009, drew up an extensive catalogue of tasks to ensure the stability of the opencast mine embankments as the structures of the century, taking into account the current state of the art and with regard to existing standards and regulations.

In order to be able to present and discuss the knowledge gained since then with a panel of experts, the working group "Rock mechanics in Rhenish lignite mining" organised a specialist workshop on "Rock mechanical issues relating to the planned opencast mining lakes" in 2022.

### **Workshop on rock mechanical issues**

The approximately 75 participants in the workshop included representatives from ministries, authorities and mining companies as well as numerous representatives from various universities.

Following an introductory presentation on the classification of the accelerated coal phase-out with its challenges and opportunities, various issues relating to the stability of opencast mining lakes, which had already been defined by the working group, were presented and discussed in three sessions. Among other things, the verification procedure developed in recent years for safety against soil liquefaction in the case of tilted lake embankments, as required by the RfS, was explained. As, in addition to tilted embankments, excavated sea slopes are also created in connection with the premature phase-out of lignite, it is also necessary to investigate the shear strength and long-term behaviour of grown lake embankments and to analyse the specification of excavated sea slopes and the associated issues. With the filling of the opencast mining lakes, it is also necessary to analyse the effects of hydrodynamic origin on the lake embankments.

### **Detection methods for tilted lake embankments**

The design of the lake embankments is carried out on the tipping side with spoil material that has been dumped by the spreader. In addition to the static requirements for maintaining the stability of opencast mine embankments, the influence of seismicity

kohleausstiegs im Rheinischen Revier vom 19. Dezember 2022 umgesetzt. Damit rückt die zeitgerechte, sichere Wiederherstellung einer Landschaft, die wirtschaftliche, naturschutzfachliche und soziale Interessen vereint, verstärkt in den Fokus. Die in diesem Zusammenhang zu berücksichtigenden geotechnischen Aspekte sind vielfältig, vielschichtig und haben nicht zuletzt einen maßgeblichen Einfluss auf die zukünftige Nutzung der Tagebauseen.

Bereits mit der Neufassung der für die Braunkohlentagebaue in Nordrhein-Westfalen maßgebenden „Richtlinie für Standsicherheitsuntersuchungen“ (RfS) im Jahr 2013 und der Zulassung des ersten Sonderbetriebsplans für eine Tagebauseeböschung im Bereich des Tagebaus Inden im Jahr 2014, hat der seit 2009 bestehende Arbeitskreis „Gebirgsmechanik im Rheinischen Braunkohlenbergbau“ einen umfangreichen Aufgabenkatalog aufgestellt, um die Standsicherheit der Tagebauseeböschungen als Jahrhundertbauwerke unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Technik und mit Blick auf bestehende Normen und Regelwerke gewährleisten zu können.

Um die seitdem gewonnenen Erkenntnisse im Kreis eines Fachauditoriums vorstellen und diskutieren zu können, hat der Arbeitskreis „Gebirgsmechanik im Rheinischen Braunkohlenbergbau“ im Jahr 2022 einen Fachworkshop zum Thema „Gebirgsmechanische Fragestellungen der geplanten Tagebauseen“ durchgeführt.

### **Workshop zu gebirgsmechanischen Fragen**

Unter den rd. 75 Teilnehmern des Workshops befanden sich neben Vertretern von Ministerien, Behörden und Bergbauunternehmen auch zahlreiche Vertreter verschiedener Universitäten.

Nach einem Einführungsvortrag zur Einordnung des beschleunigten Kohleausstiegs mit seinen Herausforderungen und Chancen wurden in drei Sessions verschiedene, bereits durch den Arbeitskreis definierte, Fragestellungen zu standsicherheitlichen Aspekten von Tagebauseen vorgestellt und diskutiert. Dabei wurde u. a. das in den vergangenen Jahren entwickelte Nachweisverfahren zur Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung bei gekippten Seeböschungen, wie gemäß RfS gefordert, erläutert. Da neben gekippten Böschungen im Zusammenhang mit dem vorzeitigen Ausstieg aus der Braunkohle auch geschnittene Seeböschungen entstehen, ist es zudem erforderlich, die Scherfestigkeiten und das langfristige Verhalten gewachsener Seeböschungen zu untersuchen und die Spezifikation geschnittener Seeböschungen und der damit verbundenen Fragestellungen zu analysieren. Mit Befüllung der Tagebauseen gilt es außerdem, Einwirkungen hydrodynamischen Ursprungs auf die Seeböschungen zu betrachten.

### **Nachweisverfahren für gekippte Seeböschungen**

Die Gestaltung der Seeböschungen erfolgt kippenseitig mit durch den Absetzer verstärktem Abraummaterial. Neben den statischen Anforderungen zur Einhaltung der Standsicherheit der Tagebauseeböschungen ist seit der Fassung der RfS vom 16. Mai 2003 auch der Einfluss der Seismizität auf die Standsicherheit für den Fall der außergewöhnlichen Einwirkung durch Erdbeben zu untersuchen. Mit Ergänzung der RfS vom 8. August 2013 wird bei der Betrachtung der Auswirkungen von Erdbeben auf bleibende Böschungen darüber hinaus gefordert, diese so zu gestalten und aufzubauen, dass eine Bodenverflüssigung nicht zu besorgen ist. Ein entsprechendes Nachweisverfahren unter Berücksichtigung der für das Rheinische Revier relevanten Erdbebenbelastung wurde durch den

on the stability in the event of extraordinary effects from earthquakes must also be investigated since the version of the RfS dated 16th May 2003. With the amendment to the RfS dated 8th August 2013, when considering the effects of earthquakes on permanent embankments, it is also required that these be designed and constructed in such a way that there is no risk of soil liquefaction. A corresponding verification procedure, taking into account the earthquake load relevant to the Rhenish mining area, has since been developed by the contractor with scientific support and is currently in the validation phase.

Such a verification procedure must take into account both the seismic load as an effect and the resistance side. With regard to the action side, not only the earthquake-induced accelerations and their effect on the stability, but also their influence on the stability of the grain structure or the grain contact surfaces must be considered.

On the resistance side, the behaviour of the tipping material against the disintegration of the grain structure as a result of cyclic loading must be investigated. In addition to the storage density and/or viscosity, the load history (ageing), the internal tilt structure and the granulometric properties such as grain roundness, surface roughness or mineral composition of the material are among the main influencing factors that determine the resistance of the grain structure under cyclic loading (1).

As a detection method must cover all these effects, a multi-stage concept was developed, which provides for both in-situ and supplementary laboratory and technical centre tests. Freeze samples, e.g., were taken from trenches and the storage density was determined in situ in order to be able to realistically reproduce the sample structure in the laboratory. The liquefaction resistance was determined using cyclic and trained triaxial tests. At the same time, the shear wave velocities were measured so that a correlation between shear wave velocity and liquefaction resistance could be established. Furthermore, a relationship between the liquefaction resistance and the resistances from pressure soundings could be derived. In the subsequent application of the method, it is thus possible to combine punctual investigations (pressure probe) and areal investigations (measurement of shear wave velocities) to assess the safety of tilted embankments against soil liquefaction.

According to the RfS, proof of sufficient stability is provided on the basis of a quasi-static approach. If no successful proof can be provided on the basis of this approach, dynamic calculations with adequate constitutive laws must be carried out. Using dynamic calculations, the degree of terrain deformation and the effects of cyclic mobility on the resulting terrain deformations can be realistically modelled using appropriately calibrated constitutive laws and numerical models (1). Against this background, finite element calculations were used to demonstrate the stability and serviceability of tilted opencast mine embankments in order to estimate the shear wave velocities occurring in the embankments and to identify any areas at risk of liquefaction.

In order to validate the above-mentioned method for verifying the stability of opencast mine slopes under seismic excitation, model tests at different scales are carried out at the Chair of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Environmental Geotechnics at the Ruhr University Bochum, Bochum/Germany.

Unternehmer mit wissenschaftlicher Unterstützung zwischenzeitlich entwickelt und befindet sich in der Validierungsphase.

Ein solches Nachweisverfahren muss sowohl die seismische Belastung als Einwirkung als auch die Widerstandsseite berücksichtigen. Mit Blick auf die Einwirkungsseite sind also nicht nur die erdbebenbedingten Beschleunigungen und deren Wirkung auf die Standsicherheit, sondern auch ihr Einfluss auf die Stabilität des Korngerüsts bzw. der Kornkontaktflächen zu betrachten.

Auf der Widerstandseite ist das Kippenmaterialverhalten gegen den Zerfall des Korngerüsts infolge zyklischer Belastung zu untersuchen. Neben der Lagerungsdichte und/oder der Viskosität zählen die Belastungsgeschichte (Alterung oder aging), die innere Kippenstruktur sowie die granulometrischen Eigenschaften wie Rundheit der Körnung, Oberflächenrauigkeit oder Mineralzusammensetzung des Materials zu den wesentlichen Einflussfaktoren, welche den Widerstand des Korngerüsts unter zyklischer Belastung bestimmen (1).

Da ein Nachweisverfahren alle diese Effekte erfassen muss, wurde ein mehrstufiges Konzept entwickelt, welches sowohl in situ- als auch ergänzende Labor- und Technikumsuntersuchungen vorsieht. So erfolgte z. B. die Entnahme von Gefrierproben aus Schürfen und die Bestimmung der Lagerungsdichte in situ, um die Probenstruktur im Labor realitätsnah abbilden zu können. Anhand von zyklischen undrainierten Triaxialversuchen wurde der Verflüssigungswiderstand ermittelt. Gleichzeitig wurden die Scherwellengeschwindigkeiten gemessen, sodass eine Korrelation zwischen Scherwellengeschwindigkeit und dem Verflüssigungswiderstand hergestellt werden konnte. Weiterhin konnte eine Relation zwischen dem Verflüssigungswiderstand und den Widerständen aus Drucksondierungen abgeleitet werden. In der späteren Anwendung des Verfahrens lassen sich somit punktuelle Untersuchungen (Drucksonde) und flächenhafte Untersuchungen (Messung von Scherwellengeschwindigkeiten) zur Bewertung der Sicherheit gekippter Seeböschungen gegenüber Bodenverflüssigung kombinieren.

Gemäß RfS erfolgt der Nachweis einer ausreichenden Standsicherheit auf Basis eines quasi-statischen Ansatzes. Kann auf Grundlage dieses Ansatzes kein erfolgreicher Nachweis erbracht werden, sind dynamische Berechnungen mit adäquaten Stoffgesetzen durchzuführen. Anhand dynamischer Berechnungen können das Maß der Geländeformungen und auch die Effekte der zyklischen Mobilität auf resultierende Geländeformungen mit entsprechend kalibrierten Stoffgesetzen und numerischen Modellen realitätsnah abgebildet werden (1). Vor diesem Hintergrund wurde anhand von Finite-Elemente-Berechnungen der Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von gekippten Tagebauseeböschungen zur Abschätzung der in den Böschungen auftretenden Scherwellengeschwindigkeiten sowie der Identifikation ggf. verflüssigungsgefährdeter Bereiche erläutert.

Zur Validierung des o. g. Verfahrens zum Nachweis der Standsicherheit der Tagebauseeböschungen unter seismischer Anregung werden am Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik der Ruhr-Universität Bochum Modellversuche in unterschiedlichen Skalierungen durchgeführt. Neben klein- und großmaßstäblichen 1 g-Modellversuchen kommen auch Zentrifugenmodellversuche im erhöhten Schwerfeld (ng) zum Einsatz (1). Um die seismischen Einflüsse – hier wird grundsätzlich zwischen Befüllungsphase und Endzustand unterschieden – abbilden zu können, erfolgt eine entsprechende dynamische Anregung der Versuchsaufbauten. Neben



In addition to small- and large-scale 1 g model tests, centrifuge model tests in an elevated gravity field ( $n_g$ ) are also used (1). In order to be able to map the seismic influences – a fundamental distinction is made here between the filling phase and the final state – the test setups are dynamically excited accordingly. In addition to varying the dynamic excitation, different slope inclinations, different tipping materials and different water levels upstream and downstream of the slope are considered.

Centrifuge model tests are currently being carried out in cooperation with the University Gustave Eiffel, Nantes/France, on geometries typical for opencast mine slopes using typical opencast mine tipping sands (1). In combination with the large-scale model tests, which are also still planned, these form the basis for the final validation of the verification procedure developed to guarantee the stability of the tilted opencast mine slopes under earthquake impact and, in particular, to verify safety against soil liquefaction.

### Rock mechanical issues of excavated sea slopes

Before the accelerated termination of lignite-fired power generation, the construction of tilted lake embankments in front of the opencast mine embankments was the only option, particularly with regard to deposit protection. As a result of the accelerated coal phase-out, however, large quantities of coal now remain in the deposit, which means that excavated sea slopes (Figure 2) will also be created in the course of shaping the opencast mine lakes, for which new geotechnical questions need to be answered.

Excavated opencast mine sea slopes are characterised by a high storage density of the natural soils and the fact that the soils have already been exposed to earthquakes in the course of the earth's history. Safety against soil liquefaction can therefore be considered a given in the event of an earthquake. In contrast to tilted embankments, excavated sea slopes are defined by their geological characteristics, i.e. material structure, stratification and tectonics are predetermined. These aspects must be taken into account when verifying stability. In addition, erosion safety and material behaviour over time must be considered in detail. This also applies to the residual quantities of coal remaining in the opencast mine slopes.

Due to the presence of cohesive horizons in the lake embankments, possible consistency changes and swelling effects as a result of water contact cannot be ruled out, both during the filling phase and in the permanent final state. In order to reliably guarantee the long-term safety of the lake embankments, backfilling is therefore planned in front of the cohesive horizons. The expect-

der Variation der dynamischen Anregung werden unterschiedliche Böschungsneigungen, verschiedene Kippenmaterialien und unterschiedliche Wasserstände vor und in der Böschung betrachtet.

Gegenwärtig werden in Kooperation mit der Universität Gustave Eiffel, Nantes/Frankreich, Zentrifugenmodellversuche an für Tagebauseeböschungen typischen Geometrien unter Verwendung tagebautypischer Kippensande durchgeführt (1). In Kombination mit den ebenfalls noch geplanten großmaßstäblichen Modellversuchen bilden diese die Grundlage für die abschließende Validierung des entwickelten Nachweisverfahrens zur Gewährleistung der Standsicherheit der gekippten Tagebauseeböschungen bei Erdbeneinwirkung sowie insbesondere zum Nachweis der Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung.

### Gebirgsmechanische Fragestellungen geschnittener Seeböschungen

Insbesondere unter Berücksichtigung des Lagerstättenschutzes war vor der beschleunigten Beendigung der Braunkohlenverstromung ausschließlich die Anlage von gekippten Seeböschungen vor den Tagebaurandböschungen vorgesehen. Infolge des vorgezogenen Kohleausstiegs verbleiben nun jedoch große Kohlemengen in der Lagerstätte, womit im Zuge der Gestaltung der Tagebauseen auch geschnittene Seeböschungen (Bild 2) entstehen werden, für die es neue geotechnische Fragestellungen zu beantworten gilt.

Geschnittene Tagbauseeböschungen zeichnen sich durch eine hohe Lagerungsdichte der gewachsenen Böden sowie die Tatsache aus, dass die Böden im Lauf der Erdgeschichte bereits Erdbeben ausgesetzt waren. Die Sicherheit gegenüber Bodenverflüssigung kann somit für den Erdbebenfall als gegeben betrachtet werden. Im Gegensatz zu gekippten Böschungen sind geschnittene Seeböschungen über ihre geologische Prägung definiert, d.h. Materialaufbau, Schichteinfallen und Tektonik sind vorgegeben. Diesen Aspekten ist beim Nachweis der Standsicherheit entsprechend Rechnung zu tragen. Zudem ist die Erosionssicherheit und das Materialverhalten über die Zeit eingehend zu betrachten. Das gilt auch für die in den Tagebauböschungen verbleibenden Restkohlemengen.

Aufgrund des Verbleibs bindiger Horizonte in den Seeböschungen sind mögliche Konsistenzänderungen und Quelleffekte infolge des Wasserkontakts sowohl in der Befüllungsphase als auch für den dauerhaften Endzustand nicht auszuschließen. Um die langfristige Sicherheit der gewachsenen Seeböschungen dennoch verlässlich zu gewährleisten, sind daher Vorschüttungen vor den bindigen Horizonten vorgesehen. Bei der Bemessung dieser Vorschüttungen sind auch zu erwartende Materialverlagerungseffekte infolge von Wellenerosion während der Befüllungsphase zu berücksichtigen (1). Hin-

sichtlich des in den Standsicherheitsuntersuchungen zu berücksichtigenden Ansatzes zur Scherfestigkeit für bindige Horizonte hat sich der Ansatz von Restscherfestigkeiten als geeignet erwiesen, um die andernfalls infolge möglicher Verformungen zu erwartenden zeit- und schwegabhängigen Reduktionen der Festigkeiten an den geschnittenen Böschungen ausschließen zu können.

Die Ansätze zur zuverlässigen Bestimmung der Scherfestigkeiten toniger Bodenhorizonte unter Berücksichtigung der

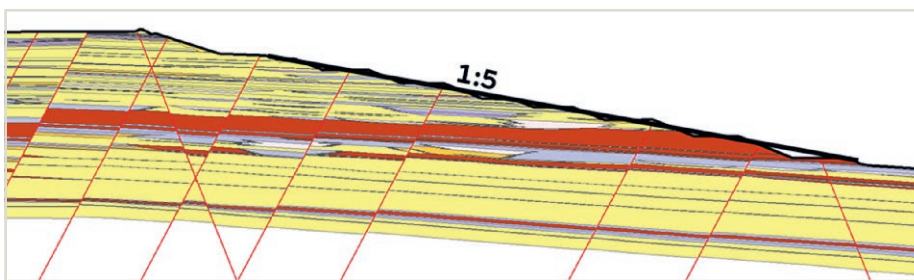


Fig. 2. Excavated sea slopes (general slope 1:5).  
Bild 2. Geschnittene Seeböschung (Generalneigung 1:5). Source/Quelle: RWE Power AG

ed material displacement effects due to wave erosion during the filling phase must also be taken into account when dimensioning these pre-fills (1). With regard to the approach to shear strength for cohesive horizons to be considered in the stability analyses, the approach of residual shear strength has proven to be suitable in order to exclude the time- and shear path-dependent reductions in strength on the excavated slopes that would otherwise be expected as a result of possible deformations.

The approaches for the reliable determination of the shear strengths of clayey soil horizons, taking into account the influences of the lake filling, were presented by the Institute of Geotechnics at the Technical University (TU) Dresden. In order to be able to make a reliable estimate of the shear strength, the investigations used a model concept, based on the geological history of the clay layers, to trace the main influences on the change in the shear strength of the in-situ soils as a result of the excavation of the opencast mines and their subsequent filling with water.

With a view to preserving the remaining areas of the Hambach Forest, part of the existing underground mine workings of the former Union 103 pit near Morschenich in the Hambach mining field will be preserved. In order to avoid possible water pathways during the filling phase and effects such as spontaneous combustion of the coal, which could have a negative impact on the long-term stability of the embankment, complete backfilling with setting building material is planned.

### Hydrodynamic effects on the lake embankments

Using the example of the Inden opencast mine, the transformation of the opencast mine into an opencast lake was reconstructed with a view to the expected hydro-morphological processes in the embankment and bank area. After the end of lignite mining in 2029, an opencast mine lake with an area of 1,300 ha and a water volume of approximately 750 M m<sup>3</sup> will be created over a period of around 30 to 40 years. In view of the stability of the opencast mine embankments, relevant erosion effects must be avoided, in particular due to wave-induced sediment redistribution.

A physical model test setup was realised in the hydraulic engineering laboratory of the Institute of Hydraulic Engineering and Technical Hydromechanics (IWD) at the TU Dresden to map the expected processes. Various soil substrates such as forest gravel, sands and mixed soils were tested. All of the substrates showed a redistribution of material from the shore zone to the neighbouring underwater area, known as cliff-reef formation. With regard to the proportion of fine grains, materials with higher erosion resistance exhibited slower reef development and blocky refraction in the cliff area, while materials with lower erosion resistance tended to exhibit more pronounced reef formation and gradual shoreline reshaping (1). With the aim of continuous and predictable shoreline reshaping, so-called lean forest gravel with approximately 20% fines were identified as the most suitable embankment cover layer. Further criteria, such as vegetation, planned utilisation and slope inclination, must now be investigated at the target water level as the lake design progresses. Further research into the scalability and transferability of scale model tests to embankment transformation processes should help to recognise, understand and evaluate scale effects accordingly.

Einflüsse durch die Seebefüllung wurden durch das Institut für Geotechnik der Technischen Universität (TU) Dresden vorgestellt. Um eine verlässliche Abschätzung der Scherfestigkeit treffen zu können, wurden bei den Untersuchungen anhand eines Modellkonzepts, ausgehend von der geologischen Entstehungsgeschichte der Tonschichten, die wesentlichen Einflüsse auf die Veränderung der Scherfestigkeit der anstehenden Böden infolge des Aushubs der Tagebaue und deren anschließender Wasserbefüllung nachvollzogen.

Mit Blick auf den Erhalt der Restbereiche des Hambacher Forsts wird ein Teil des im Abbaufeld Hambach vorhandenen untertägigen Grubengebäudes der ehemaligen Schachanlage Union 103 bei Morschenich erhalten bleiben. Um mögliche Wasserwegsamkeiten während der Befüllungsphase und Effekte wie Selbstentzündung der Kohle, welche sich negativ auf die dauerhafte Standsicherheit der Böschung auswirken könnten, zu vermeiden, wird eine vollständige Verfüllung mit abbindendem Baustoff vorgesehen.

### Hydrodynamische Einwirkungen auf die Seeböschungen

Am Beispiel des Tagebaus Inden wurde die Transformation des Tagebaus zu einem Tagebausee mit Blick auf zu erwartende hydro-morphologische Prozesse im Böschungs- und Uferbereich nachvollzogen. Nach Beendigung der Braunkohlenförderung im Jahr 2029 wird über einen Zeitraum von etwa 30 bis 40 Jahren ein Tagebausee mit einer Fläche von ca. 1.300 ha und einem Wasservolumen von ca. 750 Mio. m<sup>3</sup> entstehen. Dabei sind vor dem Hintergrund der Standsicherheit der Tagebauseeböschungen diesbezüglich relevante Erosionseffekte, insbesondere durch welleninduzierte Sedimentumlagerungen, zu vermeiden.

RAGSTIFTUNG 

## Verantwortung für die Nachbergbauzeit

Verlässlichkeit gehörte stets zu den Werten des Steinkohlenbergbaus. Verlass ist damit auch auf die RAG-Stiftung. Sie übernimmt im vollen Umfang die Finanzierung der dauerhaften Aufgaben des Nachbergbaus: Grubenwasserhaltung, Poldermaßnahmen und Grundwasserreinigung. Mit der Finanzierung und auch mit der Förderung von Spitzenforschung auf diesem Gebiet sorgt sie dafür, dass die Umwelt in der Nachbergbauzeit intakt bleibt. Darüber hinaus fördert die RAG-Stiftung Projekte, die den Fortbestand der sozialen Werte des Bergbaus sichern, und setzt somit langfristig wirkende Impulse für die Region. Für eine lebenswerte Zukunft über Tage.



Erlebe die RAG-Stiftung in 360°



In addition to the physical model tests, extensive lake state and sediment transport analyses were carried out to examine the influence of wind-induced waves in the embankment and shore area in detail. In addition to planning documents, bathymetric and sedimentological data were also used to create the model. The wind measurement data from the Nörvenich and Geilenkirchen weather stations of the German Weather Service (DWD) were used as the main input parameters. In addition to stationary storm events with high return periods, transient wind events were also simulated over several annual cycles, taking into account different water level heights, wind directions and wind speeds (1).

The three-dimensional, hydro-morphodynamic models used showed sediment transport in the opencast mining lakes in a direction normal to the shore and parallel to the shore, whereby the longitudinal shore transport with oblique wave run-up is the determining load case. For the filled opencast mining lakes, a strong exposure of the eastern banks was observed both during storm events and in long-term observations (1). The present simulation results have not only proven the effectiveness of the 1:25 to 1:30 inclined wave impact zones, but are also suitable as a basis for the further planning of bank and embankment designs as well as for safety assessments and subsequent utilisation concepts.

## Conclusion

In addition to identifying the issues that still need to be addressed, the findings presented at the workshop form a solid basis for proving the rock mechanical feasibility and answering detailed geotechnical questions relating to opencast mining lakes and lake embankments. In the future, the examination of intended early utilisation of lake basins and their surroundings under the existing legal framework conditions in the mining safety context will also be increasingly taken into account.

## References / Quellenverzeichnis

(1) Gebirgsmechanische Fragestellungen der geplanten Tagebauseen. In: World of Mining, Heft 3/2023.

## Author / Autorin

Rbe Annika Mittmann M.Sc., Abteilung 6 Bergbau und Energie in NRW, Bezirksregierung Arnsberg, Standort Dortmund

Zur Abbildung der zu erwartenden Prozesse wurde im Wasserbaulabor des Instituts für Wasserbau und Technische Hydromechanik (IWD) der TU Dresden ein physikalischer Modellversuchsaufbau realisiert. Getestet wurden verschiedene Bodensubstrate wie Forstkies, Sande und auch Mischböden. Bei allen Substraten zeigte sich eine Materialumlagerung von der Uferzone in den angrenzenden Unterwasserbereich, die sogenannte Kliff-Riff-Bildung. Im Hinblick auf den Feinkornanteil wiesen Materialien mit höherem Erosionswiderstand eine langsamere Riffentwicklung und ein blockhaftes Nachbrechen im Kliffbereich auf, während Materialien mit geringerem Erosionswiderstand zu einer ausgeprägteren Riffbildung und einer graduellen Uferumformung neigten (1). Mit der Zielrichtung einer kontinuierlichen und vorhersagbaren Uferumformung wurde im Ergebnis sogenannter magerer Forstkies mit ca. 20 % Feinanteil als geeignetste Böschungsdeckschicht ermittelt. Im weiteren Verlauf der Seegestaltung gilt es nun, weitere Kriterien, wie z. B. Bewuchs, geplante Nutzungen und die Böschungsneigungen, im Zielwasserstand zu untersuchen. Weitergehende Forschungen zur Skalierbarkeit und Übertragbarkeit von maßstäblichen Modellversuchen auf Böschungsumbildungsprozesse sollen helfen, Maßstabeffekte zu erkennen, zu verstehen und entsprechend bewerten zu können.

Begleitend zu den physikalischen Modellversuchen wurden umfangreiche Seegangs- und Sedimenttransportanalysen zur detaillierten Betrachtung des Einflusses windinduzierter Wellen im Böschungs- und Uferbereich vorgenommen. Neben planerischen Unterlagen wurden auch bathymetrische und sedimentologische Daten zur Modellerstellung zugrunde gelegt. Als wesentliche Eingangsparameter wurden die Windmessungsdaten der Wetterstationen Nörvenich und Geilenkirchen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Neben stationären Sturmereignissen mit hohen Wiederkehrperioden wurden auch instationäre Windereignisse über mehrere Jahressgänge unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wasserspiegelmöglichkeiten, Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten simuliert (1).

Die verwendeten dreidimensionalen, hydro-morphodynamischen Modelle zeigten im Ergebnis einen Sedimenttransport in den Tagebauseen in ufernormale und uferparallele Richtung, wobei der Uferlängstransport bei schrägem Wellenanlauf der bestimmende Lastfall ist. Für die gefüllten Tagebauseen ließ sich sowohl bei Sturmereignissen als auch bei langjährigen Betrachtungen eine starke Exposition der östlichen Ufer beobachten (1). Die vorliegenden Simulationsergebnisse haben dabei nicht nur die Wirksamkeit der 1:25 bis 1:30 geneigten Wellenschlagzonen nachgewiesen, sondern eignen sich zudem als Grundlage für die weitergehende Planung von Ufer- und Böschungsgestaltungen sowie für Sicherheitsbewertungen und Nachnutzungskonzepte.

## Fazit

Die im Workshop vorgetragenen Erkenntnisse bilden neben der Identifizierung der noch zu bearbeitenden Fragestellungen eine solide Grundlage für den Nachweis der gebirgsmechanischen Machbarkeit und die Beantwortung darauf aufsetzender geotechnischer Detailfragen der Tagebauseen und der Seeböschungen. Dabei wird zukünftig zunehmend auch die Prüfung angestrebter frühzeitiger Nutzungen von Seemulden und -umfeld unter den bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen im bergsicherheitlichen Kontext entsprechende Berücksichtigung finden.