

Dust Control in a Novel Technology for the Construction of Shafts

In Belarus, potash mining has been carried out intensively for about 60 years, so far by the state-owned company Belaruskali in six mines. Since 2011, the privately financed Nezhinskiy mine has been planned in the deposit near Soligorsk, and construction of this greenfield mine started in 2016. The planning from 2011 initially envisaged the sinking of two shafts using the freez-

ing method and the application of drilling and blasting. In 2016, the future operator Slavkaliy decided to use a new technology for sinking, mechanized shaft drilling from the solid with machines from Herrenknecht AG, Schwanau/Germany. In this paper, the methods and experiences in dust control in this mechanized process are described.

Staubbeherrschung bei einer neuartigen Technologie zum Bau von Schächten

In Weißrussland wird seit ca. 60 Jahren intensiv Kalibergbau betrieben, der bisher vom staatlichen Unternehmen Belaruskali in sechs Bergwerken durchgeführt wird. Seit 2011 wird das privat finanzierte Bergwerk Nezhinskiy in der Lagerstätte bei Soligorsk geplant und 2016 wurde mit dem Bau dieses Bergwerks auf der „grünen Wiese“ begonnen. Die Planung aus dem Jahr 2011 sah zunächst das Abteufen von zwei Schächten im Gefrierverfahren

und mit Anwendung von Bohr- und Sprengarbeit vor. Im Jahr 2016 wurde vom zukünftigen Betreiber Slavkaliy entschieden, eine neue Technologie für das Abteufen anzuwenden, das mechanisierte Schachtbohren aus dem Vollen mit Maschinen der Herrenknecht AG, Schwanau. Im vorliegenden Beitrag werden die Methoden und Erfahrungen bei der Staubbeherrschung in diesem mechanisierten Verfahren beschrieben.

1 General

For about 60 years, Belarus is experiencing intensive mining for potash. All six mines are operated by the government-owned company Belaruskali. The mining region is located near the city of Soligorsk, some 200 km south of the Belarusian capital Minsk. The mineral extraction is conducted in longwall mining at depths from 440 to 1,100 m and without backfill. Worldwide, Belaruskali ranks fourth in potash production. In another mining district, the Petrikovsk Mine has commenced production recently in 2019.

Since 2011, the green-field project Nezhinskiy is being planned with a new mine nearby Soligorsk. First construction works have commenced in 2016 (Figure 1).

The planning from 2011 intended the sinking of two freeze shafts, using conventional drilling and blasting technology. The shafts were designed with a final diameter of 7.0 m and a depth of around 750 m.

After completion, the proposed use was the hoist of potash at Shaft 1, and general hoist (manriding and material) at Shaft 2. The overburden consists of sand, clay, chalk, mudstone and dolomite from top to bottom and the deposit was reached at about 450 m depth and an alternating deposit of rock salt and potash. The shaft pipes were waterproofed to a depth of 320 m with cast-iron tubings. As a temporary lining, an unreinforced concrete was

1 Allgemeines

In Weißrussland wird seit ca. 60 Jahren intensiv Kalibergbau betrieben, der bisher vom staatlichen Unternehmen Belaruskali in sechs Bergwerken durchgeführt wird. Das Hauptrevier liegt um die Stadt Soligorsk, die sich ca. 200 km südlich der Hauptstadt Minsk befindet. Der Abbau erfolgt im Strebbau ohne Versatz im Bruchbau in Teufen von 440 bis 1100 m. Unter den Kaliproduzenten belegt Belaruskali den vierten Platz. Außerhalb dieses Reviers ging im Jahr 2019 das Bergwerk Petrikovsk von Belaruskali in Betrieb.

Seit 2011 wird ein privat finanziertes Bergwerk namens Nezhinskiy in der Lagerstätte bei Soligorsk geplant und 2016 wurde mit dem Bau dieses Bergwerks auf der „grünen Wiese“ begonnen (Bild 1).

Die Planung aus dem Jahr 2011 sah das Abteufen von zwei Schächten im Gefrierverfahren und mit Anwendung von Bohr- und Sprengarbeit vor. Der lichte Durchmesser sollte 7,0 m bei einer Teufe von ca. 750 m betragen.

Der geplante Schacht 1 soll als Förderschacht und der geplante Schacht 2 als Seilfahrts- und Materialschacht genutzt werden. Das Deckgebirge besteht von oben nach unten aus Sand, Ton, Kreide, Tonstein und Dolomit und die Lagerstätte wurde bei etwa 450 m Teufe und einer Wechsellagerung aus Steinsalz und Kali erreicht. Die Schachtröhren wurden bis zu einer Teufe von 320 m wasserdicht mit gusseisernen Tübbingungen ausgebaut. Als vorläufiger Aus-



Fig. 1. View of the construction site in January 2019.

Bild 1. Ansicht der Baustelle im Januar 2019. Source/Quelle: Redpath Deilmann

placed in the tubing section. In the salt shaft, a pure concrete lining was used.

The mine was connected to the shafts at a depth of about 680 m. No further fills were constructed. The mine workings close to the shaft and 9 km of roadway drive were included in the scope of the contract.

In 2016, the future operator Slavkaliy decided to use a new technology for sinking instead of sinking with drilling and blasting, namely mechanized shaft drilling from the solid with machines from Herrenknecht AG, Schwanau/Germany. Herrenknecht has been the technology and world market leader for tunnel boring machines for decades. For about ten years now, the company has also been developing machines for use in mining and, in particular, in shaft sinking.

Herrenknecht has recombined various components already used in the 1970s and 1980s and further developed them with today's state-of-the-art technology. For the use of the Herrenknecht machine at the Nezhinskiy mine, the diameters of the shafts had to be increased by 1m to 8.0m.

2 Mechanical shaft sinking

In mechanical shaft sinking, two options are available for the hauling of the rock:

- The hydraulic haulage works with a full-face cutting head under water. The mixture of muck and water is then pumped to the sinking platform, where it is separated, and the rock is carried to surface using buckets. This option was realised by Deilmann-Haniel GmbH, now Redpath Deilmann, Dortmund/Germany, with machinery of the German manufacturer Wirth for the sinking of two shafts at a coal mine. This technology was meant to be reused in 1984/1985, also in other fields, but the projects have never been carried out.
- For the second option, the pneumatic haulage, a part-face cutting head is used in dry conditions. This technology was also practically tested: one shaft was sunk at a rock salt, another one at a coal mine in 1984/1985. Operating companies were Gewerkschaft Walter and later Deilmann-Haniel. Again, further projects were planned, and machines were improved,

bau wurde im Tübbingabschnitt ein unbewehrter Beton eingebracht. Im Salzschaft wurde ein reiner Betonausbau verwendet.

Das Bergwerk wurde in ca. 680 m Teufe an die Schächte angeschlossen. Weitere Füllörter wurden nicht erstellt. Die schachtnahen Grubenräume und 9 km Streckenauffahrung waren im Auftragsumfang enthalten.

Im Jahr 2016 wurde vom zukünftigen Betreiber Slavkaliy entschieden, statt Teufen mit Bohr- und Sprengarbeit eine neue Technologie für das Abteufen anzuwenden, nämlich das mechanisierte Schachtbohren aus dem Vollen mit Maschinen der Herrenknecht AG, Schwanau. Herrenknecht ist seit Jahrzehnten Technologie- und Weltmarktführer für Tunnelbohrmaschinen. Seit etwa zehn Jahren entwickelt man dort auch Maschinen für den Einsatz im Bergbau und dabei insbesondere im Schachtbau.

Herrenknecht hat verschiedene bereits in den 1970er und 1980er Jahren eingesetzte Komponenten neu kombiniert und mit dem heutigen Stand der Technik weiterentwickelt. Für den Einsatz der Herrenknecht-Maschine auf dem Bergwerk Nezhinskiy mussten die Durchmesser der Schächte um 1 m auf 8,0 m vergrößert werden.

2 Maschinelles Schachtateufen

Für das maschinelle Schachtateufen gibt es zwei Verfahren zur Abförderung des gelösten Materials:

- Die hydraulische Förderung, bei welcher der Vollschnittbohrkopf unter Wasser betrieben und das Wasser-/Berge-Gemisch abgepumpt wird, um es dann auf der Maschine zu separieren und die Berge mit Kübeln nach über Tage zu fördern. Mit Maschinen der Fa. Wirth wurde dieses Verfahren von der Deilmann-Haniel GmbH, heute Redpath Deilmann, Dortmund, in zwei Schächten in der Steinkohle eingesetzt und man plante 1984/1985 weitere Entwicklungen und Anwendungen, zu denen es allerdings nicht mehr kam.
- Die pneumatische Förderung ist die zweite Methode, die mit einem Teilschnittausleger in trockenen Verhältnissen arbeitet. Diese Technik wurde 1984/85 von Gewerkschaft Walter, später Deilmann-Haniel, in zwei Schächten, einmal Steinsalz und einmal Steinkohle, eingesetzt. Auch für dieses Verfahren plante man weitere Verbesserungen und entwickelte eine leistungsfähigere Maschine, welche dann ebenfalls nicht mehr zur Anwendung kamen. Der Schneidausleger dieser Maschinen wurde im Übrigen damals von Herrenknecht geliefert und das Saugsystem zur Abförderung wurde aus der Schiffsentladung bezogen.

3 Entwicklung der Herrenknecht AG – Schachtbohrmaschine Typ SBR Shaft Boring Roadheader

Im Jahr 2010 startete Herrenknecht einen neuen Einsatz dieser Technologie unter der Bezeichnung „Shaft Boring Roadheader (SBR)“ zum Einsatz in weichem und mittelhartem Gestein bis ca. 100 MPa Festigkeit.

Die erste Anwendung erfolgte ab 2012 in zwei Kalischächten in Kanada für das Bergwerk Jansen der BHP Billiton ebenfalls in

but also never implemented. Even then, Herrenknecht was involved with these projects and delivered the boom with the cutting drum. The piping for the pneumatic haulage was used from the marine industry.

3 Development of Herrenknecht AG – shaft sinking machine Type SBR shaft boring roadheader

In the year of 2010, the new type shaft sinking machine, called shaft boring roadheader (SBR), was introduced by Herrenknecht. It was designed for the use in rock of low to moderate hardness with a strength of up to 100 MPa.

From 2012, the Jansen Mine in Canada, owned by BHP Billiton, was the first site to use this first-generation technology, also in combination with ground freezing. With the experiences from the Jansen Mine and together with the former Deilmann-Haniel GmbH, Herrenknecht started to develop the second generation of the SBR in 2016/2017. Numerous minor but also major changes and improvements have been made to ensure a reliable 3 m/d advance.

3.1 Mode of operation of the SBR

The type SBR is fitted with a telescopic boom holding the cutting drum. The boom can be rotated by 360° to work in all radial directions. The cutting drum itself has a horizontal axis, measuring 1.2 m in diameter and 1.5 m in width. It is driven with 600 kW hydraulic power and, as all road heading machines, has only one rotational direction. The drill bits used are round shank bits.

The cutting sequence starts from the shaft centre to the intended radius of the shaft for each slice, one by one, creating a bowl-like shaft bottom. The sequence can be controlled manually or automatically, using one of several programmes installed with the software onboard the SBR. The operator may also adjust the radius within a defined range, which is useful when foundations shall be excavated. The maximum diameter available with the machine used in Belarus is 12 m. The maximum depth of each cut with the drum is 0.2 m and can be repeated up to six times by telescoping the boom. Therefore, the SBR is eligible to advance 1.2 m before it must be moved down.

As sinking in frozen ground, Herrenknecht decided to realise the haulage of the waste rock using a pneumatic mucking system (PNM) (Figure 2).

The chipped rock enters the PNM-system right at the cutting drum where a tray is mounted on the shaft-centre-side. From there, a 30 m long pipe system carries the rock to a cyclone (Figure 3), which separates rock and air – the rock falls whereas the air moves up and passes a dry-filter system

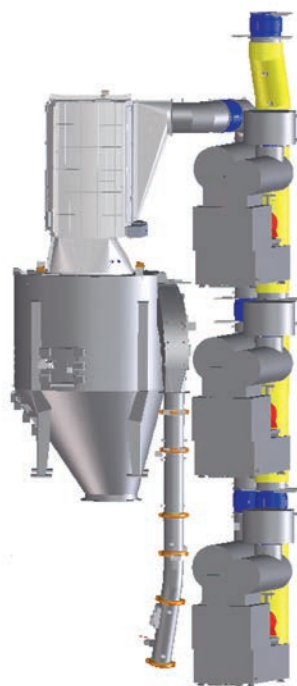


Fig. 2. Pneumatic conveying system.
Bild 2. Pneumatisches Fördersystem.
Source/Quelle: Herrenknecht

Kombination mit dem Gefrierverfahren. Diese Maschinen stellen die erste Generation SBR dar und lieferten wertvolle Erfahrungen für die zweite Generation SBR, die 2016/2017 gemeinsam von Herrenknecht und der damaligen Deilmann-Haniel GmbH im Detail entwickelt wurde. Es wurden zahlreiche grundsätzliche Änderungen, aber auch viele Detailarbeiten durchgeführt, um einen stabilen Betrieb mit 3,0 m/d Bohrfortschritt zu erreichen.

3.1 Funktionsweise der SBR

Die Schachtbohrmaschine vom Typ SBR hat am unteren Ende einen 360° schwenkbaren, teleskopierbaren Schneidausleger mit einer horizontal angeordneten Schneidtrommel. Diese Schneidtrommel wird hydraulisch mit 600 kW angetrieben und hat wie alle Teilschnittmaschinen nur eine Drehrichtung zur Schachtmittle. Die Schneidtrommel hat einen Durchmesser von 1,2 m, eine Breite von 1,5 m und ist mit Rundschaftmeißeln bestückt.

Die Schneidsequenz beginnt immer in der Schachtmittle und wird nach außen geführt. Dadurch entsteht eine schüssel-förmige Schachtsohle, die mit verschiedenen automatisierten Schneidmustern erstellt wird. Die Walze sticht maximal 0,2 m tief ein und wiederholt diesen Vorgang bis zu sechsmal, um den Schacht 1,2 m tief auszubrechen. Der Ausbruchdurchmesser ist in vorher festgelegten Bereichen variabel, sodass auch Fundamente für den Schachtausbau und Füllortansätze geschnitten werden können.

Herrenknecht entschied sich wegen des Einsatzes im Gefrierschacht für die pneumatische Förderung der Berge von der Schachtsohle (Bild 2). Das System wird als Pneumatic Mucking System (PNM-System) bezeichnet.

Die Ansaugöffnung befindet sich auf ganzer Breite direkt an der Schneidtrommel auf der Schachttinnenseite. Von diesem Ansaugkasten führt die Saugleitung ca. 30 m senkrecht aufwärts



Fig. 3. Suction tank (cyclone) on WD 8.
Bild 3. Saugtank (Zyklon) auf WD 8.
Source/Quelle: Herrenknecht/Redpath Deilmann

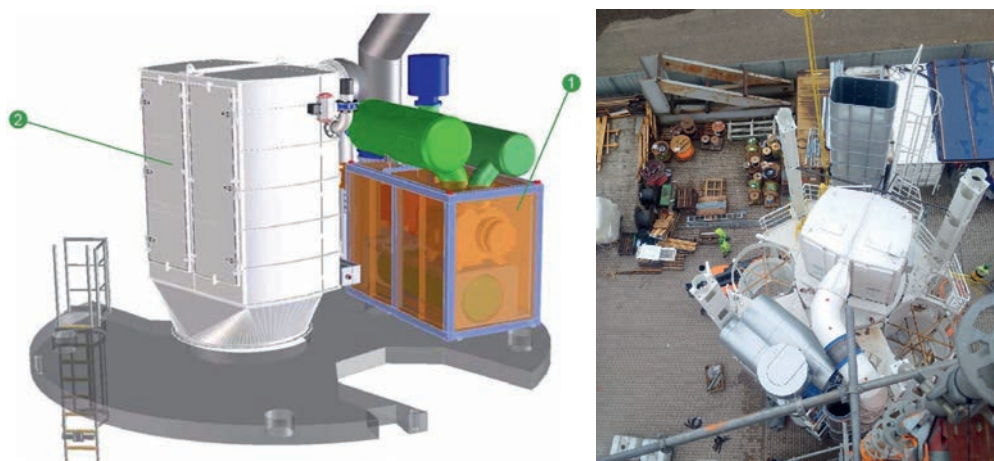


Fig. 4. Dry dust extractor on WD 9. // Bild 4. Trockenentstauber auf WD 9.
Source/Quelle: Herrenknecht/Redpath Deilmann

(Figure 4). The air then passes a set of blowers, producing the required negative pressure that is needed to move the air and pick up the chips from shaft bottom. Three blowers are installed, manufactured by Aerzener Maschinenfabrik, each with 315 kW (Figure 5).

With the installed power of the blowers, the exhaust air could reach temperatures of up to 70 °C, which would have a negative effect on the mine climate and might even lead to defrosting the ground. To avoid unwanted heat effects, the second generation of the SBR is now equipped with an external cooling circuit, allowing some 800 kW of potentially emitted heat to be removed from the shaft.

Furthermore, adjustments can be made with ventilation. The fan station includes a 520 kW heater, placed upstream of the fan, and a cooler at the downstream side. The cooler is powered from the main freezing plant and allows to decrease the intake air temperature to as low as 2 °C.

Back to tracing the rock: Underneath the cyclone, a 7 m³ kibble was placed, sealing with the cyclone's outlet and being filled during the cutting process. During this process, the kibble is not attached to the hoist rope, but can be placed back into hoist position with a rotating platform.



Fig. 5. PNM blowers with noise protection in the plant.
Bild 5. PNM-Gebläse mit Schallschutz im Werk.
Source/Quelle: Redpath Deilmann

bis zu einem Saugtank, der nach dem Prinzip des Zyklons arbeitet (Bild 3). Die Saugluft wird oben aus dem Saugtank in einen Trockenentstauber geleitet (Bild 4). Die Sauggebläse sind auf der Reinfluftseite mit dem Entstauber verbunden. Diese Gebläse erzeugen den erforderlichen Unterdruck, um das gelöste Gestein von der Schachtsohle zu entfernen. Es werden drei Drehkolbengebläse der Aerzener Maschinenfabrik mit jeweils 315 kW Antriebsleistung eingesetzt (Bild 5).

Die Abluft aus dem PNM-System hat Temperaturen von max. 70 °C, was im Gefrierschacht Auf-

tauvorgänge auslöst und das Grubenklima deutlich verschlechtert. Daher wurden in der SBR der zweiten Generation ein Kühler für die PNM-Abluft und andere Komponenten installiert, was ca. 800 kW Abwärme mit einem Kühlwasserkreislauf nach Über- ta- ge bringt.

Außerdem wurden in einer Bewetterungsanlage über Tage die Frischwetter im Winter erst geheizt und hinter den Ventilatoren bis max. 2 °C stark abgekühlt, um das Kondensat auszufällen. Die Wetterheizung hatte 520 kW und die Wetterkühlung 2.200 kW Leistung, die von den Gefriermaschinen abgegriffen wurden.

Unten am Saugtank wurde der Bergekübel druckdicht ange- dockt und direkt während des Saugvorgangs gefüllt. Der leere Kü- bel mit 7 m³ Inhalt wurde mit einem Drehtisch aus der Förderung unter den Saugtank gebracht.

Das gesamte Saugsystem der zweiten Generation wurde für das Beherrschen von wassergesättigten und verklebungsanfälli- gen Gebirgsschichten für den Einsatz in Weißrussland optimiert.

Die SBR stellte eine Kombination aus Abteufmaschine und Arbeitsbühne dar, weil eine weitere Arbeitsbühne im Schacht problematisch gewesen wäre. Die Maschinen waren für einen maximalen Schneiddurchmesser von 12 m ausgelegt worden.

Beide Maschinen wurden im Werk Schwanau aufgebaut, wo- bei eine Maschine komplett übereinander errichtet wurde und alle Funktionen gefahren werden konnten. Dabei konnten alle Systeme getestet und eingestellt werden. Die Baustellenmann- schaft von Herrenknecht und Redpath Deilmann war in dieser Zeit wochenlang auf den Maschinen, um die Mitarbeiter mit den Details vertraut zu machen. Die Werksabnahme der ersten Ma- schine erfolgte im Juli 2018 in Schwanau.

3.2 Abteufanlage

Bei der SBR für Belarus wurde frühzeitig entschieden, je Schacht zwei getrennte Förderanlagen zu verwenden. Es gab eine Förder- maschine, die ausschließlich Berge förderte. Die andere För- derung war für Seilfahrt, Material und Betontransport vorgesehen.

In der SBR gab es oberhalb der Schalung einen Betonvertei- behälter, der eine Kübelfüllung Beton aufnehmen konnte. Dieser Behälter konnte rund um den Schacht gefahren werden, um die Schalung gleichmäßig mit Beton zu füllen.

The entire second-generation suction system was optimized to cope with water-saturated and sticking rock strata for use in Belarus.

The SBR represented a combination of sinking machine and working platform because another working platform in the shaft would have been problematic. The machines were designed for a maximum cutting diameter of 12 m.

Both machines were set up at the Schwanau plant, with one machine completely stacked on top of the other, so that all functions could be run. This allowed all systems to be tested and adjusted. The Herrenknecht and Redpath Deilmann site crew spent weeks on the machines during this time to familiarize the employees with the details. Factory acceptance for this machine was granted in July 2018.

3.2 Sinking plant

At the SBR for Belarus, it was decided early on to use two separate hoisting machines for each shaft. There was one hoisting machine that exclusively conveyed tailings. The other hoist was intended for rope travel, material and concrete transport.

In the SBR, there was a concrete distribution tank above the formwork that could hold a bucketful of concrete. This tank could be driven around the shaft to fill the formwork evenly with concrete.

The SBR was designed so that both conveyors could travel to the bottom. This is essential with regard to changing large machine parts and can also be used for direct loading of the buckets at the bottom in the event that pneumatic conveying of the tailings is not possible.

The SBR had a weight of 400 t and was about 50 m high with eleven tiers. Due to the roadheading boom and the weight, the machine could not be braced in the shaft but was permanently suspended from ropes and winches. The four SBR winches per shaft each had a pulling force of 455 kN.

For the sake of completeness, the cable support winches and the emergency travel winches at each shaft should also be mentioned.

The machine weight and the safety factors customary in shaft construction necessitated twelve rope strands because the suspension ropes had to be reeved several times. Suspension from the ropes was carried out high up in the machine in order to obtain large installation spaces for the PNM system and the hopper loading. Even so, the decks of the SBR were packed full of aggregates and relatively tightly packed because the core machine could only be 7.2 m in diameter.

During the cutting, the SBR is centralised and its position fixed using four hydraulic stabilisers, respectively shields, installed at the core machine about 7 m above the face. Furthermore, additional but smaller stabilisers are used at the SBR's vertical centre. Yet, the weight of the SBR is only absorbed by the ropes.

The machine was equipped with a claw/shield system above the cutting boom centered about 7 m above the invert and again stabilized in the middle of the SBR with small claws. However, load transfer of the machine weight was not provided by these shields.

Rock control and the installation of the concrete shaft lining or segments were carried out from levels 2 to 4. Deck 3 was vertically movable by 2.0 m within the SBR so that the formwork could

Die SBR wurde so gestaltet, dass beide Förderungen bis zur Sohle fahren konnten. Dies ist im Hinblick auf den Wechsel großer Maschinenteile unerlässlich und kann auch für den Fall, dass das pneumatische Abfordern der Berge nicht möglich sein sollte, zur Direktbeladung der Kübel auf der Sohle genutzt werden.

Die SBR hatte ein Gewicht von 400 t und war mit elf Etagen ca. 50 m hoch. Bedingt durch den Teilschnittausleger und das Gewicht konnte die Maschine nicht im Schacht verspannt werden, sondern hing permanent an Seilen und Winden. Die vier SBR-Winden je Schacht verfügten jede über eine Zugkraft von 455 kN.

Der Vollständigkeit halber sollen noch die Kabeltragseilwinden und die Notfahrwinden an jedem Schacht erwähnt werden.

Das Maschinengewicht und die im Schachtbau üblichen Sicherheitsfaktoren bedingten zwölf Seilstränge, weil die Aufhängeseile mehrfach eingesichert werden mussten. Die Aufhängung an den Seilen erfolgte weit oben in der Maschine, um große Einbauräume für das PNM-System und die Kübelbeladung zu erhalten. Trotzdem waren die Decks der SBR voll mit Aggregaten und relativ eng gepackt, weil die Kernmaschine nur 7,2 m Durchmesser haben konnte.

Die Maschine wurde mit einem Prätzen-/Schildsystem über dem Schneidausleger ca. 7 m über der Sohle zentriert und in der Mitte der SBR nochmals mit kleinen Prätzen stabilisiert. Eine Lastabtragung des Maschinengewichts erfolgte durch diese Schilde jedoch nicht.

Die Gebirgsbeherrschung und das Einbringen des Schachtausbaus aus Beton bzw. Tübbing erfolgte von den Etagen 2 bis 4. Das Deck 3 war innerhalb der SBR um 2,0 m vertikal verfahrbar, um jederzeit die Schalung erreichen zu können. Bei einer Abteufleistung von 3,0 m/d und einer Betonschalung mit 4,8 m Höhe mussten diese beiden Vorgänge entkoppelt werden, weil mit dem Umsetzen der SBR alle elf Etagen 1,2 m abgesenkt wurden.

Die sinnvolle Kombination von Schneiden und Ausbauen war eine der Hauptaufgaben beim Design der zweiten Generation der SBR. Auch die Betonversorgung war dabei zu berücksichtigen. Dazu wurde auf der Baustelle eine eigene Betonanlage aufgebaut und die geforderten Betonqualitäten wurden nach vielen Versuchen aus den örtlichen Materialien hergestellt. Dabei sind die Erfahrungen von Redpath Deilmann aus vielen Schachtbauprojekten sowie die Erfahrungen von Herrenknecht aus der ersten Generation der SBR eingeflossen.

4 Auftrag für Deilmann-Haniel Juli 2017

Im Juli 2017 wurde der Vertrag zwischen Slavkaliy und Deilmann-Haniel in Minsk unterschrieben. Unmittelbar danach beauftragte Deilmann-Haniel Herrenknecht mit dem Bau und der Lieferung der beiden Schachtbohrmaschinen SBR MI 029 und 030. Mit hohem Zeitdruck wurden alle Planungs- und Beschaffungsvorgänge gestartet und vorangetrieben, denn zahlreiche Maschinen und Geräte waren neu zu beschaffen.

Durch Slavkaliy wurde sehr frühzeitig festgelegt, dass das Abteufen mit den endgültigen Fördergerüsten erfolgen sollte. Das Bohren der Gefrierlöcher war Leistung des Auftraggebers und wurde durch einen weißrussischen Unternehmer durchgeführt.

Die SBR hatte eine installierte Leistung von 2.000 kW, die auf der Spannungsebene 10 kV zur Maschine gebracht wurde. Die SBR wurde über LWL-Kabel mit allen wesentlichen Einrichtungen über Tage verbunden, denn die Schachtsignalanlage und die Förderma-

be reached at any time. With a sinking rate of 3.0 m/d and a concrete formwork height of 4.8 m, these two operations had to be decoupled because all eleven levels were lowered by 1.2 m when the SBR was moved.

The implementation of shaft lining works in parallel to advance was one of the main objectives when the SBR's second generation was designed. An independent concrete plant was built on site to guarantee a smooth operation. Detailed testing with material from local pits was accomplished to fulfil the requirements for the various demanded concrete qualities. Again, prior experiences made by Redpath Deilmann as well as Herrenknecht proved quite helpful.

4 Contract for Deilmann-Haniel July 2017.

In July 2017, the contract between Slavkaliy and Deilmann-Haniel was signed in Minsk. Immediately thereafter, Deilmann-Haniel commissioned Herrenknecht with the construction and delivery of the two shaft drilling machines SBR MI 029 and 030. With high time pressure, all planning and procurement processes were started and pushed forward, as numerous machines and equipment had to be newly procured.

Slavkaliy determined at a very early stage that the sinking should be carried out with the final head frames. The drilling of the freeze holes was a service of the client and was carried out by a Belarusian contractor.

The SBR had an installed capacity of 2,000 kW, which was brought to the machine at the 10 kV voltage level. The SBR was connected to all essential equipment above ground via fiber optic cables, because the shaft signaling system and the hoisting machines, as well as the SBR winches, had to exchange extensive data with each other.

All switchgear, machinery and equipment on the site were linked to a process control system to provide constant access to operating states and fault messages in a control center. This system was also used to record running times in order to obtain data for weak-point analysis.

5 Progress of construction work until summer 2021

In October 2017, construction of the freezing equipment and installation of the piping system began. The freezing plant was composed of six freezing machines, each with a capacity of 500 kW, so that a freezing capacity of 3,000 kW at a brine temperature of -35°C was achieved. 40 freezing holes were created per shaft. There were three temperature measurement holes per shaft to control frost propagation. Freezing began in February 2018 and proceeded as planned, so that the sinking of the pilot shafts could be started quickly.

After completion of the foreshafts at a depth of 50 m, the erection of the headframes was carried out in a remarkably short time by a steel erector from Belarus. In parallel, both SBRs were manufactured at Herrenknecht in Schwanaue, erected and "cold" tested as part of the plant assembly. The machines were then dismantled and transported to Belarus. The complete conveying system and the equipment for ventilation and concrete production had to be set up.

To achieve first advance with one SBR before the end of 2018 was the main goal on site. After a ceremony with local children naming the SBRs "Olga" and "Uljana", MI 029 started to cut on

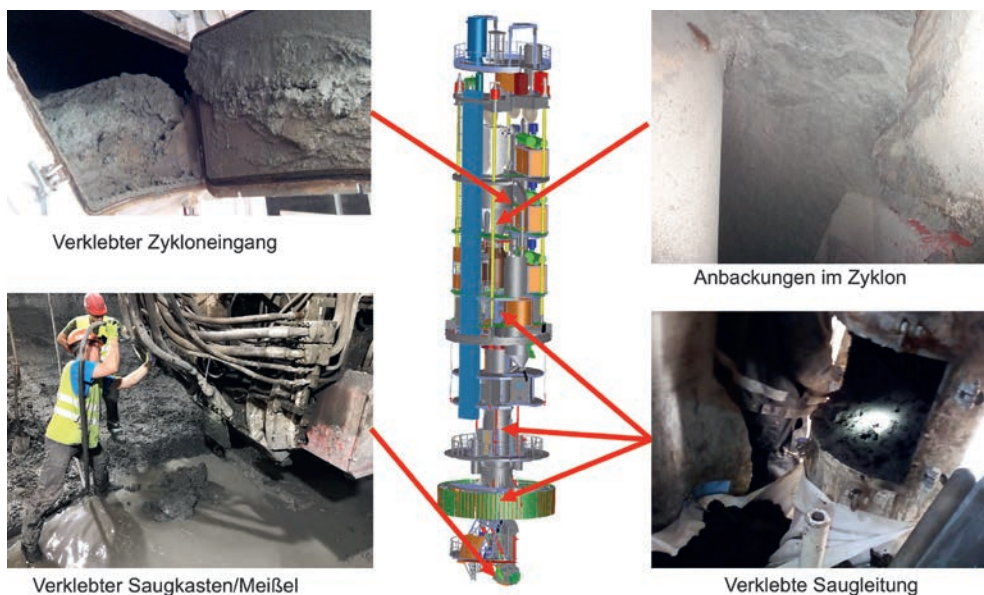


Fig. 6. Malfunctions in the PNM system.
Bild 6. Störungen im PNM System. Source/Quelle: Redpath Deilmann

11th December 2018, and the first kibble was in the hoist. MI 030 followed in mid-January 2019.

Sinking started relatively smoothly in the freeze shaft, but subsequently there were some surprises to overcome (Figure 6). Heavy wear developed on the suction line of the SBR faster than expected and the first holes soon appeared that had to be “patched”. Sticking in the suction system cost a lot of time and effort. After reaching a very sticky chalk layer, the buckets could hardly be emptied.

Various measures were taken to counteract this. Subsequently, a sinking rate > 3 m/d was achieved in the freeze shaft and also scratched the 4 m mark, which can be considered a great success.

In both shafts, a modernized formwork system with hydraulic drawers for sealing against the shaft wall was used for concreting. The system is an in-house development of Redpath Deilmann, which is patented.

A serious problem then arose in shaft 2 at a depth of 170 m directly below the freeze shaft, where a soft clay was encountered. At the end of March, the shaft erupted on a large scale and, because this could not be stopped, had to be backfilled with several hundred cubic meters of concrete. This large excavation led to almost four weeks of interruption in the sinking operations.

It was decided to shorten the formwork and bring it as low as possible down to the bottom in order to support the rock as quickly as possible. This proved to be the right course of action and sinking operations could be resumed. Subsequently, outputs of up to 4 m/d were regularly achieved.

May 2019 was the first record month and the sinking performance surpassed the record for shaft sinking in Belarus. This was 80.8 m with drilling and blasting. Despite poor geology, 88 m was achieved in Shaft 2 and 82.7 m in Shaft 1. This achievement is also particularly noteworthy because a sinking team was built up from many new colleagues in just a few weeks.

In June 2019, the 300 m mark was reached and sinking was stopped at 326 m to install the segments on the way up. Sub-

schinen sowie die SBR-Winden mussten einen umfangreichen Datenaustausch untereinander betreiben.

Alle Schaltanlagen, Maschinen und Geräte auf der Baustelle wurden mit einem Prozessleitsystem verknüpft, um ständigen Zugriff auf Betriebszustände und Störungsmeldungen in einer Zentrale zu erhalten. Mit diesem System wurden auch die Laufzeiten aufgenommen, um Daten zur Schwachstellenanalyse zu erhalten.

5 Ablauf der Bauarbeiten bis Sommer 2021

Im Oktober 2017 begann der Aufbau der Gefrieranlagen und das Installieren des Rohrsystems. Die Gefrieranlage setzte sich aus sechs Gefriermaschinen mit je 500 kW Leistung

zusammen, sodass eine Gefrierkapazität von 3.000 kW bei einer Soletemperatur von -35 °C erreicht wurde. Pro Schacht wurden 40 Gefrierlöcher erstellt. Zur Kontrolle der Frostausbreitung gab es je Schacht drei Temperaturmesslöcher. Das Gefrieren begann im Februar 2018 und verlief wie geplant, sodass zügig das Teufen der Vorschächte begonnen werden konnte.

Nach Fertigstellung der Vorschächte bei einer Teufe von 50 m wurde der Aufbau der Fördergerüste in bemerkenswert kurzer Zeit durch einen Stahlbauer aus Belarus durchgeführt. Parallel wurden beide SBR bei Herrenknecht in Schwabau hergestellt, im Rahmen der Werksmontage aufgebaut und „kalt“ getestet. Anschließend wurden die Maschinen demontiert und nach Belarus transportiert. Die komplette Förderanlage und die Einrichtungen zur Bewitterung sowie zur Herstellung von Beton waren aufzubauen.

Ziel war ein Teufbeginn mit der ersten SBR noch im Jahr 2018. Nach der Taufe beider Maschinen durch Kinder aus der Nähe der Baustelle auf die Namen „Olga“ und „Uljana“ startete am 11. Dezember 2018 die SBR MI 029 und es wurde der erste Kübel gekippt. Die SBR MI 030 hat Mitte Januar 2019 angeschnitten.

Das Teufen begann im Gefrierschacht relativ problemlos, aber in der Folge gab es einige Überraschungen zu meistern (Bild 6). An der Saugleitung der SBR entstand schneller als erwartet starker Verschleiß und es traten bald erste Löcher auf, die zu „flicken“ waren. Verklebungen im Saugsystem kosteten viel Zeit und Mühe. Nach dem Erreichen einer sehr klebrigen Kreideschicht ließen sich die Kübel kaum noch entleeren.

Mit diversen Maßnahmen wurde gegengesteuert. Danach wurde im Gefrierschacht eine Teufleistung > 3 m/d erreicht und auch an der 4 m-Marke gekratzt, was als großer Erfolg einzustufen ist.

In beiden Schächten wurde zum Betonieren eine modernisierte Schalung mit hydraulischen Schubladen zur Abdichtung an der Schachtwand eingesetzt. Das System ist eine Eigenentwicklung von Redpath Deilmann, die patentiert ist.

Zu einem gravierenden Problem kam es dann in Schacht 2 bei einer Teufe von 170 m direkt unter dem Gefrierschacht, wo ein

sequently, the tubbing columns were grouted in an extensive operation to achieve tightness of the shafts. The SBRs were used as working platforms for this purpose, which proved to be unproblematic.

Subsequently, sinking continued in the salt shaft and monthly output was achieved with both machines, even surpassing an old Deilmann record from 1938. Almost 150 m of shaft were produced in one month. This brought the entire system to its limits. Redpath Deilmann considers the performance limit for loosening the rock and concreting the shaft tube in a good geology with no stability problems to be 7 m/d.

After that, the filling locations came up for execution. Contrary to what had been planned, no explosives were available and the shaft had to be excavated by machine at short notice. For this purpose, an AM 50 TSM was used, which performed very well in the space and rock conditions (Figure 7).

The TSM was connected to the suction system of the SBR and thus the tailings could be removed efficiently. The AM 50 was moved several times from shaft 2 to shaft 1 and back, because a second AM 50 was not available. The time required for erection and dismantling of the machine is quite manageable and can be easily integrated into the work flow. The filling holes were lined with in-situ concrete. Then both shafts were brought down to the final depth. After further sealing work had been carried out in the segment shaft, the installation of tie bars and screeds was started. For this purpose, the Herrenknecht machines were removed from the shaft and replaced by a working platform. In both shafts, the internals were completed and installation of the final hoisting system began.

Numerous new large structures were built around the shafts by the end of 2021, such as office and mastication buildings as well as the salt shed and potash factory buildings.

6 Dust control

SBR as the sinking machine has already installed the aggregates for dust control. The suction system is the key element to remove and discharge dust from the cutting process. In this machine,

weicher Ton anstand. Ende März brach der Schacht in großem Umfang aus und musste, weil das nicht zu stoppen war, mit einigen hundert Kubikmetern Beton verfüllt werden. Dieser große Ausbruch hat zu fast vier Wochen Unterbrechung der Teufarbeiten geführt.

Es wurde entschieden, die Schalung zu verkürzen und so tief wie möglich unten zur Sohle zu bringen, um das Gebirge möglichst schnell abzustützen. Das erwies sich als der richtige Weg und die Teufarbeiten konnten wieder aufgenommen werden. In der Folge wurden regelmäßig Leistungen von bis zu 4 m/d erreicht.

Der Mai 2019 war der erste Rekordmonat und die Teufleistungen haben den Rekord im Schachtbau in Weißrussland übertroffen. Der lag mit Bohren und Sprengen bei 80,8 m. Trotz schlechter Geologie wurden in Schacht 2 88 m und in Schacht 1 82,7 m erreicht. Diese Leistung ist auch deshalb besonders erwähnenswert, weil in nur wenigen Wochen aus vielen neuen Kollegen eine Teufmannschaft aufgebaut wurde.

Im Juni 2019 wurde die 300 m-Marke erreicht und bei 326 m wurde das Abteufen gestoppt, um die Tübbinge auf dem Weg nach nach oben einzubauen. Anschließend wurden die Tübbingsäulen in einer umfangreichen Aktion verpresst, um die Dichtigkeit der Schächte zu erreichen. Die SBR wurden dabei als Arbeitsbühnen benutzt, was sich als unproblematisch erwiesen hat.

Nachfolgend wurde dann im Salzschaft weiter geteuft und man erreichte mit beiden Maschinen monatliche Leistungen, die sogar einen alten Deilmann-Rekord von 1938 übertroffen haben. Es wurden fast 150 m Schacht in einem Monat hergestellt. Damit kam das gesamte System an seine Grenzen. Die Leistungsgrenze für das Lösen des Gebirges und das Betonieren der Schachtröhre in einer guten Geologie ohne Standfestigkeitsprobleme sieht Redpath Deilmann bei 7 m/d.

Danach kamen die Füllörter zur Ausführung. Anders als geplant war kein Sprengstoff verfügbar und es musste kurzfristig maschinell aufgeföhren werden. Dazu wurde eine TSM vom Typ AM 50 eingesetzt, die sich in den Platz- und Gebirgsverhältnissen sehr gut bewährt hat (Bild 7).



Fig. 7. TSM AM 50 at the inset. // Bild 7. TSM AM 50 im Füllort. Source/Quelle: Redpath Deilmann

Die TSM wurde mit dem Saugsystem der SBR verbunden und so konnte die Abförderung der Berge leistungsfähig erfolgen. Die AM 50 wurde dabei mehrfach von Schacht 2 zu Schacht 1 und zurück umgesetzt, weil eine zweite AM 50 nicht verfügbar war. Der Zeitaufwand für Montage und Demontage der Maschine ist recht überschaubar und kann gut in die Abläufe eingefügt werden. Die Füllörter wurden mit Ortbeton ausgekleidet. Danach wurden beide Schächte bis zur Endteufe nach unten gebracht. Nach weiteren Abdichtungsarbeiten im Tübbingschaft wurde der Einbau von Spurlatten und Einstrichen begonnen. Dazu wurden die Herrenknecht-Maschinen aus dem Schacht entfernt und durch eine Arbeitsbühne ersetzt. In beiden Schächten wurden

dust control is a by-product of the conveying system, which can be described as a successful system.

The separation of conveying air and material is very well done in the large cyclone, and the cleaning of the exhaust air in the filter placed on the cyclone is also 100% reliable in operation. The three blowers have operated completely trouble-free and have not produced any failures.

The problem child in the system is wear in the suction line, especially with frozen material. In the Belarus project, wear in the hose between the cutting boom and the pipeline was expected in the machine, but there were no abnormalities there.

Various ideas about changing pipe materials or the like could not be implemented due to time constraints, and armoring was carried out on site or pipe sections with larger wall thicknesses were built and used. Wear decreased drastically in the non-frozen shaft and was easier to control.

The workplaces on the machine were always clean and even the required cleaning was not difficult due to relatively good accessibility.

It had been expected that the blowers would produce a high noise level. This was not the case and much better than expected.

However, the system quickly reaches its limits when dealing with sticky material in conjunction with water and then requires a lot of cleaning at various points from the cutting head to the recovery bucket. This was well demonstrated by the geology in these two shafts. It is controllable, but there is still work to be done on it in the future. The machine uses extensive sensor technology to very quickly detect clogging suction pipe sections, and you have to react immediately. The crew on the machine must therefore be sufficiently strong and qualified to deal with it. Permanent daily cleaning or even cleaning in shifts is the key to success and high machine availability.

7 Summary

On the construction site in Belarus, something was achieved with the SBR machines that represents enormous progress in technical terms. Many details were completely new, because shaft sinking with these machines is high-tech.

Everyone on the site – Belarusians, Russians and Germans, as well as Herrenknecht employees from other countries around the world – embraced the new machines, and the ambition and determination of everyone involved was clearly noticeable.

Author / Autor

Dipl.-Ing. Thomas Ahlbrecht, Redpath Deilmann GmbH, Dortmund

die Einbauten fertiggestellt und der Einbau der endgültigen Förderanlage begonnen.

Um die Schächte herum wurden bis Ende 2021 zahlreiche neue große Bauteile errichtet, wie Büro und Kauengebäude sowie die Salzschruppen und die Gebäude der Kalifabrik.

6 Staubbeherrschung

Die SBR als Teufmaschine hat die Aggregate zur Staubbeherrschung schon eingebaut. Das Saugsystem ist das Schlüsselement, um Staub aus dem Schneidprozess zu beseitigen und abzuführen. Die Staubbeherrschung ist bei dieser Maschine ein Nebenprodukt des Fördersystems, das als ein gelungenes System bezeichnet werden kann.

Die Trennung von Förderluft und Fördergut erfolgt sehr gut in dem großen Zyklon und die Reinigung der Abluft im auf den Zyklon aufgesetzten Filter ist ebenfalls zu 100% betriebsicher. Die drei Gebläse haben völlig störungsfrei gearbeitet und keine Ausfälle erzeugt.

Das Sorgenkind im System ist der Verschleiß in der Saugleitung, insbesondere bei gefrorenem Material. Bei dem Projekt in Belarus wurde Verschleiß im Schlauch zwischen Schneidausleger und Rohrleitung in der Maschine erwartet, aber dort gab es keine Auffälligkeiten.

Diverse Gedankenspiele zu veränderten Rohrwerkstoffen o.ä. waren aus Zeitgründen nicht umsetzbar und es wurde auf der Baustelle aufgepanzert bzw. wurden Rohrteile mit größeren Wandstärken gebaut und verwendet. Der Verschleiß sank im nicht gefrorenen Schacht drastisch ab und war leichter zu beherrschen.

Die Arbeitsplätze auf der Maschine waren immer sauber und selbst die erforderliche Reinigung war durch relativ gute Zugänglichkeit nicht schwierig.

Erwartet worden war, dass die Gebläse einen hohen Geräuschpegel erzeugen würden. Das war nicht der Fall und viel besser als erwartet.

Das System kommt aber bei klebrigem Material in Verbindung mit Wasser schnell an seine Grenzen und benötigt dann sehr viel Reinigungsaufwand an diversen Stellen vom Schneidkopf bis zum Bergekübel. Das hat die Geologie in diesen beiden Schächten gut gezeigt. Es ist beherrschbar, aber daran muss in Zukunft noch einiges getan werden. Die Maschine erkennt durch eine umfangreiche Sensorik sehr schnell sich zusetzende Saugleitungsteile und man muss sofort reagieren. Die Mannschaft auf der Maschine muss also ausreichend stark und qualifiziert sein, damit umzugehen. Eine permanente tägliche Reinigung oder sogar schichtweise ist der Schlüssel zum Erfolg und zu einer hohen Verfügbarkeit der Maschine.

7 Resümee

Auf der Baustelle in Belarus wurde mit den SBR-Maschinen etwas geschafft, was technisch einen enormen Fortschritt bedeutet. Viele Details waren völlig neu, denn das Schachtteufen mit diesen Maschinen ist High-Tech.

Alle auf der Baustelle – das waren Weißrussen, Russen und Deutsche sowie Mitarbeiter von Herrenknecht aus weiteren Ländern der Welt – haben die neuen Maschinen angenommen und der Ehrgeiz und die Zielstrebigkeit aller Beteiligten war deutlich spürbar.