

La construcción de un pozo de 43m de profundidad en el centro de Barcelona con una máquina VSM

The construction of a 43m depth shaft in the centre of Barcelona with the VSM

Felipe Mendaña Saavedra. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
SPICC, S.L. Madrid, (España). fms@spicc.e.telefonica.net

Peter Schmäh. Ingeniero Industrial
Herrenknecht AG, Schwanaus-Allmannsweier, Deutschland. Schmaeh.peter@herrenknecht.de

Francisco Ávila Aranda. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Herrenknecht Panamá Corp. Panamá. Francisco.avila@herrenknechtpanama.com

Cyrus Schumpa. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Herrenknecht Ibérica, S.A. Sant Vicenç dels Horts, Barcelona (España). Cyrus.schumpa@herrenknect.es

Revista de Obras Públicas
nº 3.529. Año 159
Febrero 2012
ISSN: 0034-8619
ISSN electrónico: 1695-4408

Resumen: El artículo expone con detalle los trabajos de preparación del emplazamiento, el montaje de la máquina, la excavación y el tratamiento del material excavado. Se hace primero una descripción de los trabajos de preparación del sitio, necesarios para la instalación y el funcionamiento de la VSM. A continuación se describen los procesos de la excavación y separación del escombro y los incidentes que se presentaron durante la construcción del pozo.

Palabras Clave: Máquina de pozos verticales; Planta de separación; Asientos; Dovelas; Revestimiento; Conductos de energía; Gato de cables de retención, Lodo; "Gap" (sobreexcavación); Tapón de fondo; Cabezal de excavación; Borde de corte

Abstract: The article refers to the detailed description of the preparation, the assembly of the equipment on site, the excavation and the treatment of the excavated material. First there is a description of the preparation works on the jobsite which are necessary to install and work with the VSM. This is followed by a description of the excavation and separation processes and the incidents during the construction of the shaft.

Keywords: Vertical Shaft Machine, Separation plant, Settlements, Segments, Rings, Lining, Energy lines, Strand jack, Slurry, Gap (overcut), Bottom plug, Drum, Cutting edge

1. Introducción

La máquina vertical de pozos (VSM) es uno de los diversos equipos fabricados por HERRENKNECHT para la minería o la construcción civil de túneles. El nuevo método se puede aplicar a la construcción de pozos de ataque (y montaje), de ventilación y salida de emergencia de los túneles o bien de pilotes de cimentación de proyectos "of shore". El diámetro interior de las actuales VSMs puede ser desde 4,50 m a 10 m. Teniendo en cuenta la existencia de agua en el terreno, las VSM se han diseñado y fabricado como un sistema de excavación sumergida.

El sistema comprende la máquina vertical que hace la excavación del terreno del pozo y la planta de separación a la que se bombea la mezcla de lodo y material excavado. Dicha planta separa el material del agua, que se incorpora de nuevo al

1. Introduction

The vertical shaft machine is one among other products fabricated by HERRENKNECHT which are used in the mining and tunnelling sector. The concept can be used for assembly and dismantling shafts of microtunnelling machines, for ventilation and evacuation exits of tunnels or for foundation piles in offshore projects. The range of inner diameter of already built shafts with the VSM is from 4,50m to 10m. Due to the existence of groundwater the VSM is developed and fabricated as a submerged excavating system.

The system contains the VSM machine which is excavating at the bottom of the shaft and the separation plant, which is taken care of the slurry coming from the shaft. The separation plant separates the excavated material from the water

circuito hidráulico, que la devuelve al pozo por bombeo.

Las ventajas del sistema son: las desviaciones mínimas; la seguridad en el trabajo; la ausencia de asientos y la posibilidad de simultanejar la excavación y el revestimiento de anillos de dovelas prefabricadas de concreto reforzado, en terrenos de características diversas.

Dado el reducido espacio necesario para todo el equipo de la VSM, éste es el sistema ideal para la construcción de pozos en zonas urbanas, como se ha demostrado ya en Nápoles (Italia) y Gerona (España).

El pozo, situado en pleno centro de Barcelona, es uno de los cuatro pozos para ventilación y salida de emergencia del tramo entre las estaciones de Barcelona - Sants (del extremo SW de la ciudad) y la estación Barcelona - Sagrera (del extremo NE) de la línea de Alta Velocidad Española (AVE) Madrid - Barcelona - Frontera Francesa.



Fig. 1. Excavación inicial del pozo por métodos convencionales/Starting of shaft excavation by conventional methods.

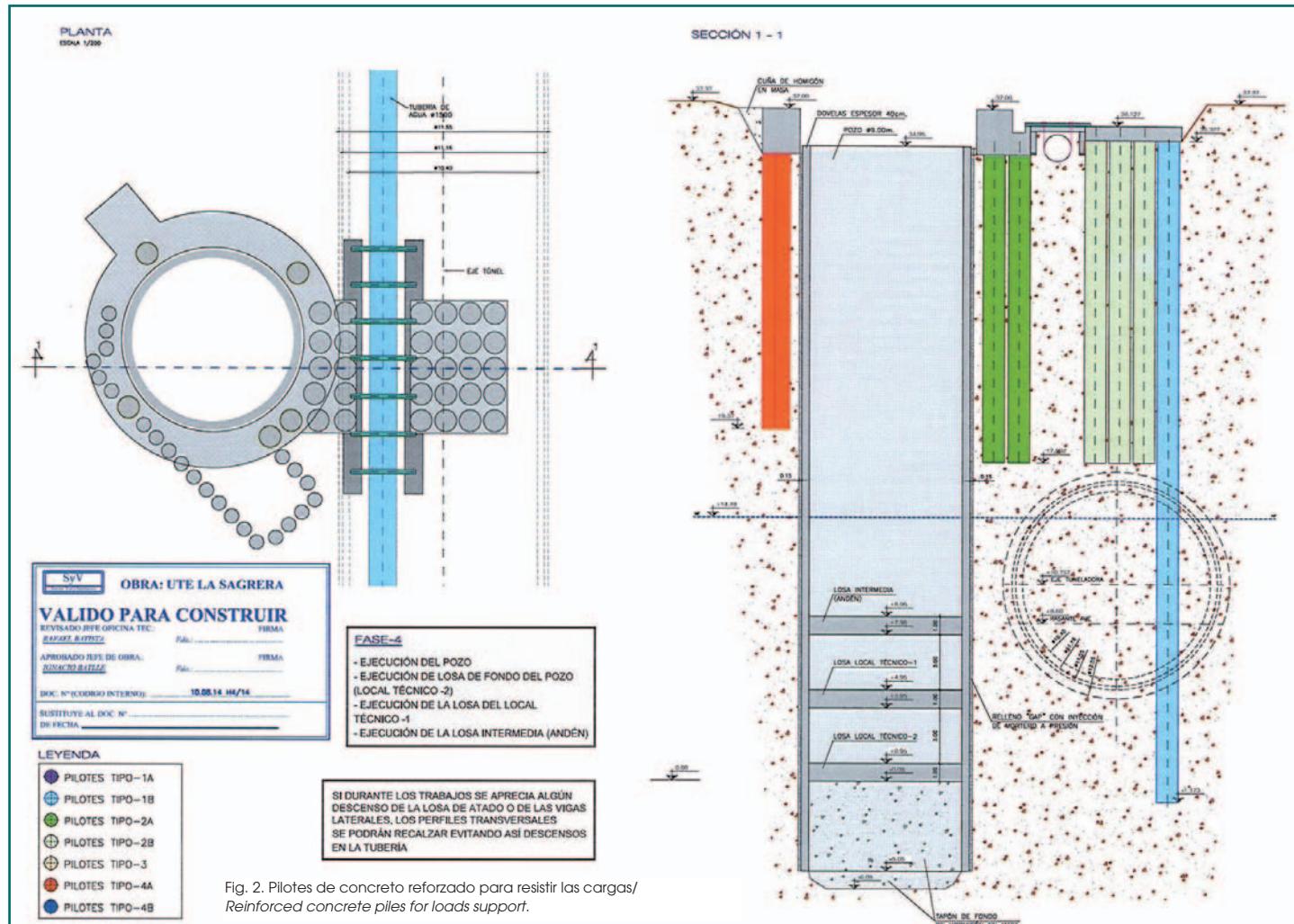


Fig. 2. Pilotes de concreto reforzado para resistir las cargas/Reinforced concrete piles for loads support.



2. Trabajos del montaje

Los primeros trabajos para la construcción del Pozo Enrique Granados (llamado así por estar situado en el cruce de la calle de ese nombre con la calle Provenza, bajo el cual discurre el túnel de línea del AVE) consistieron en la construcción de un anillo de pilotes y la viga circular de atado de sus cabezas, en concreto reforzado, diseñados para las cargas transmitidas al terreno durante la construcción.

Para construir los pilotes del anillo y la sección de arranque de la excavación del pozo con VSM (que comprende 5 anillos del revestimiento) fue necesario excavar con máquinas convencionales los primeros 2,5 m del terreno del pozo (Figura 1).

Fue necesario, además, construir pilotes adicionales para consolidar el terreno con el fin de excavar la galería de conexión con el túnel de línea, que se construiría una vez terminado el pozo, para realizar desde ella una reparación general de la Rueda de corte de la TBM de dicho túnel. (Figura 2)

Como no se contaba todavía con anillos prefabricados de dovelas, para evitar retrasos la viga de atado se hizo con concreto reforzado con encofrado interior convencional y no usando para ello los tres primeros anillos prefabricados, como se ha hecho en otros proyectos (Figura 3). En la armadura de refuerzo se fijaron también los anclajes para: los equipos auxiliares de la VSM; las tres grúas de elevación de la VSM; los cuatro gatos de retención del revestimiento y la torre de las líneas de energía. La situación de los anclajes y la geometría de la viga de atado con una separación de 50 mm respecto del anillo de revestimiento del pozo, se ve en la Figura 4.

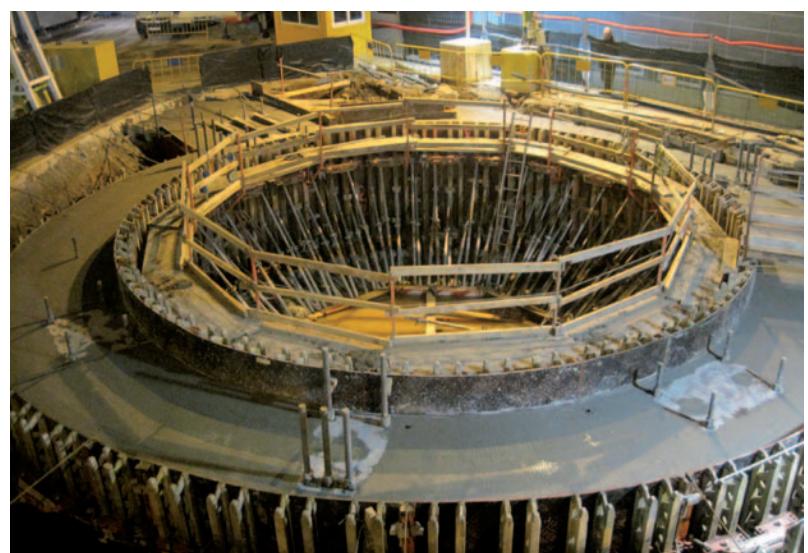


Fig. 3. Viga de atado: encofrado interior, refuerzo y viga terminada/Ring beam: interior lining, reinforced steel and finished concreting.

which is used again in the water circuit and is pumped back into the shaft.

The advantages of this shaft installation method, are the minimal deviations, the safety, minimizing of settlements and the continues process of excavating and segment rings building at the same time. The system can handle various soil condition from soft soil to soft rock.

Due to the small area requirements of the VSM system is it an ideal tool for urban shaft constructions, as already shown in Naples, Italy and Gerona, Spain.

The shaft in the centre of Barcelona is one of in total four ventilation and evacuation shafts of the High Speed Railway Line from Madrid over Barcelona to the French border in the line section between the central station Barcelona-Sants and the northern station Barcelona-Sagrera.

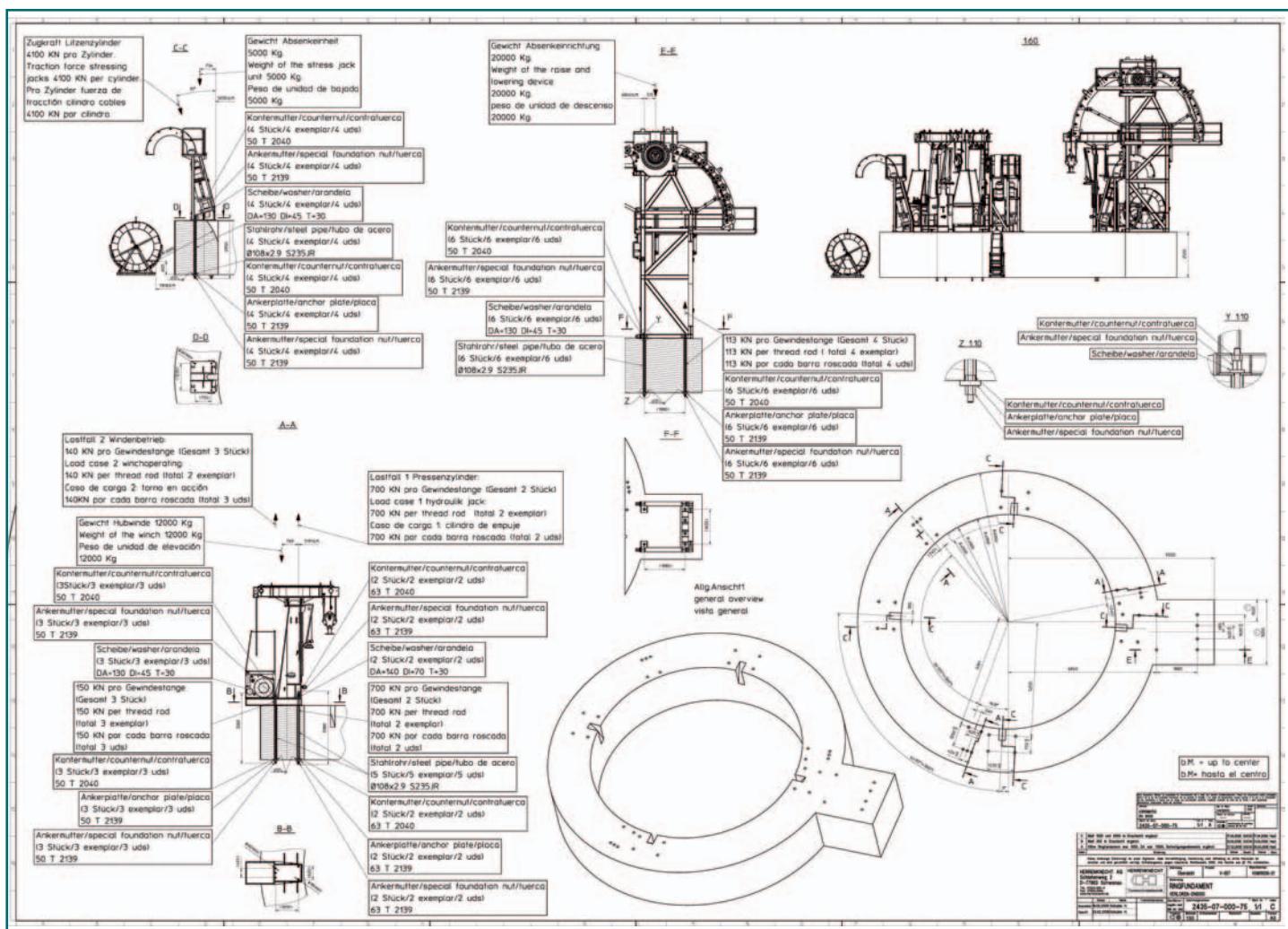


Fig. 4. Geometría de la viga de atado y posición de los anclajes/
Form of the ring beam and location of the anchors.

2. Assembly works

The first works on the construction site of the Enrique Granados shaft, so called because it is situated in the cross of the streets Provença and Enrique Granados, were the construction of piles and the reinforced concrete ring beam, that will take care of the different loads during the shaft sinking period.

For the ring beam and the starting section of the VSM, the first five rings, needed a pre-excavation of 2,5m, made by conventional excavators. (figure 1)

Some of the installed piles were constructed to protect the planned crosscut for refurbishment works on the cutterhead, from the tunnel machine, after the finishing of the shaft (Figure 2).

Due to the missing of the segments for the first rings and the time pressure the ring beam was made with a conventional casting and not with using the first three



Fig. 5. Construcción y elevación de un anillo completo para colocarlo dentro del pozo/Assembly and lifting of a ring to be placed into the shaft.



Fig. 6. Vista del borde cortante de acero a 45° del primer anillo y conexión de éste con los gatos de retención/View of the 45° steel cutting edge of the first ring and its connection to the strand jacks.

Las dovelas de los anillos se unen con tornillos que se aprietan desde el interior y el exterior, una vez colocado el anillo. Dada la pequeña separación existente entre la viga de atado y el anillo de dovelas, no se pueden apretar los tornillos desde el exterior en las dovelas de los tres anillos iniciales si se colocan dentro de la viga de atado, por lo cual cada uno de ellos se construyó fuera del pozo y se elevó completo para su colocación (Figura 5).

Una vez montados los gatos de retención y colocado el primer anillo, los cables de los gatos se fijaron al anillo usando piezas de acero en forma de cajas embebidas en el concreto del anillo. En la Figura 6 se ve la estructura metálica del borde cortante del primer anillo, que es la pieza básica de todo el proceso de hincado del revestimiento del pozo. También se ve la conexión de los gatos de retención con el primer anillo por medio de las cajas de acero embebidas en dicho anillo. Los gatos de retención aguantan el peso total del revestimiento del pozo más el de la máquina que está trabajando en su interior. Los gatos sirven para retener el revestimiento, que se va hincando por su propio peso, por lo que los elementos de empuje que llevan las grúas de elevación de la máquina no se utilizan generalmente durante la excavación.

Esta fase de arranque se completó montando el resto de los 5 anillos para colocar la máquina VSM en su interior (Figura 7). Una vez colocada la máquina dentro del tramo de arranque, se puede montar el resto del equipo: las grúas de elevación en la superficie de la viga circular de atado y las conduc-

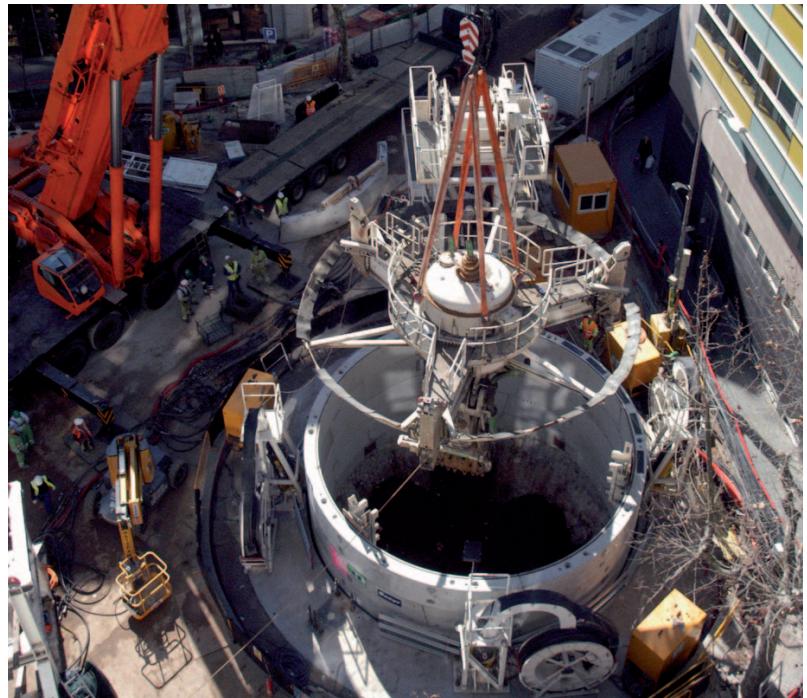


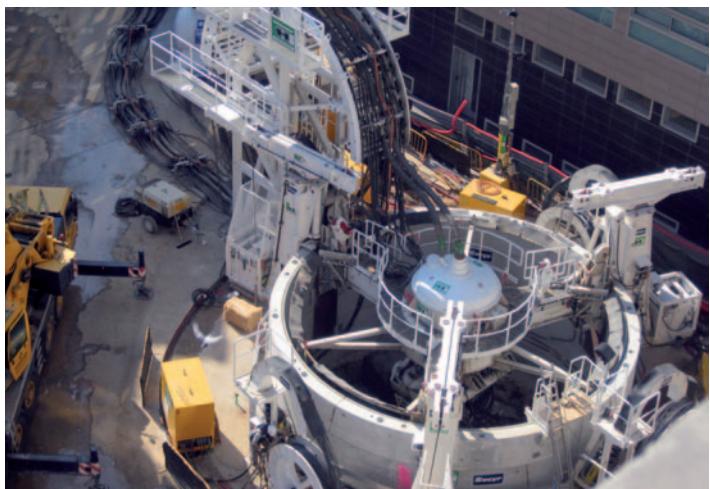
Fig. 7. Colocación de la VSM de 65 ton dentro del pozo y montaje del resto de equipos/Lifting of the 65 ton VSM inside the shaft and assembly of the rest of the equipment.

rings made of precast segments like an inner casting as done in other projects. In the reinforcement steel are also installed the anchors for the equipment of the VSM around the shaft: the three winches for the lifting of the VSM; the four strand jacks which carry the shaft and the tower for the energy lines. The places for the anchors and the necessary geometrical form of the ring beam with a gap of 50 mm between ring beam and shaft can be seen in figure 4.

In figure 3 are shown the casting and concrete works of the ring beam.

The segments are connected with screws which are tight from inside and outside of the built ring. Due to the small gap there is no possibility to tight the screws on the outside of the segments inside of the already made ring beam, so each of the first three rings are built on the surface of the construction site and then installed together inside the ring beam.

After the installation of the strand jacks and the first ring, the strand jacks are connected to the first ring using some special boxes and plates inside of the ring. In figure 6 is shown the 45 degree of the cutting edge which supports the sinking process of the shaft. Also is shown the connection of the strand jacks with the first ring by using special plates and boxes. The strand jack cylinders take the whole weight of the shaft and the inside installed machine. The cylinders are used to lower the shaft, the shaft sinks by his own weight, so the



ciones a la planta de separación y al depósito de agua (Figura 8).

La planta de separación está construida por módulos, de forma que el dispositivo se puede modificar de acuerdo con las exigencias de cada proyecto. En éste se utilizó una HSP 500, con precribado, dos centrifugadoras y una unidad de flocuación (Figura 9).

3. La fase de excavación y revestimiento con anillos de dovelas

Después del montaje de la máquina, han de presentarse los cables de retención y hacer el ajuste del sistema. Hecho el ajuste, el pozo se llena de



Fig. 8. Vista de la VSM dentro del pozo y de la "cadena" de los conductos de energía/View of the VSM inside the shaft and of the "tower" for the energy lines.
 A la derecha, fig. 9.
 Planta de separación/Right,
 Separation plant.

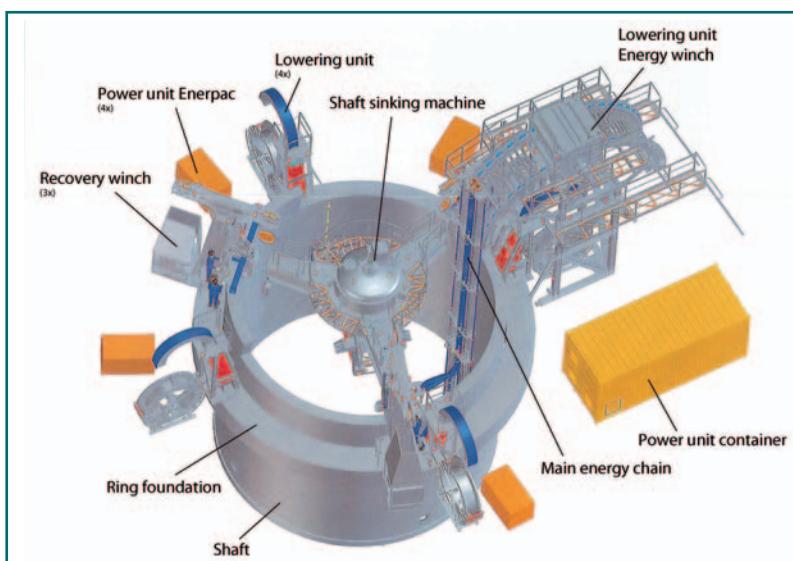
installed pushing rams in the lifting winches are normally not used, during the shaft installation.

After this the start section will be completed by building up the first 5 rings needed for the machine installation. The 65 ton VSM is now ready to be positioned inside the shaft in the prepared machine attachment (Figure 7).

The rest of the equipment will be assembled: the lifting winches on the surface of the ring beam, the lines to the separation plant and to the hydraulic aggregate.

The separation plant is constructed with modules, so the setup can be modified in dependence of the requirements of each project, here were used a HSP 500, a pre-screen, two centrifuges and a flocculation unit. See Figures 8, 9 and 10.

Fig. 10. Esquema funcional de la VSM y sus equipos auxiliares/
 Set up of the VSM and its auxiliary equipment



3. Excavation and segmental lining phase

After the assembly of the machine, the strands will be pre-stressed and the calibration of the system will be done. After the calibration the shaft is flooded with water, so the slurry pump can work. Also the gap is filled with bentonite through (at) the inside wall of the shaft installed bentonite lines for lubrication. On the figures 11 and 12 are shown the set up of the VSM system and of the separation plant.

Already after the first sinking of 0,2 m one of the strand jacks failed and had to be replaced by a new. It took one week to get a replacement cylinder and install it in position.

After the restart the working time was extended and a second shift was installed, so the weekly working hours

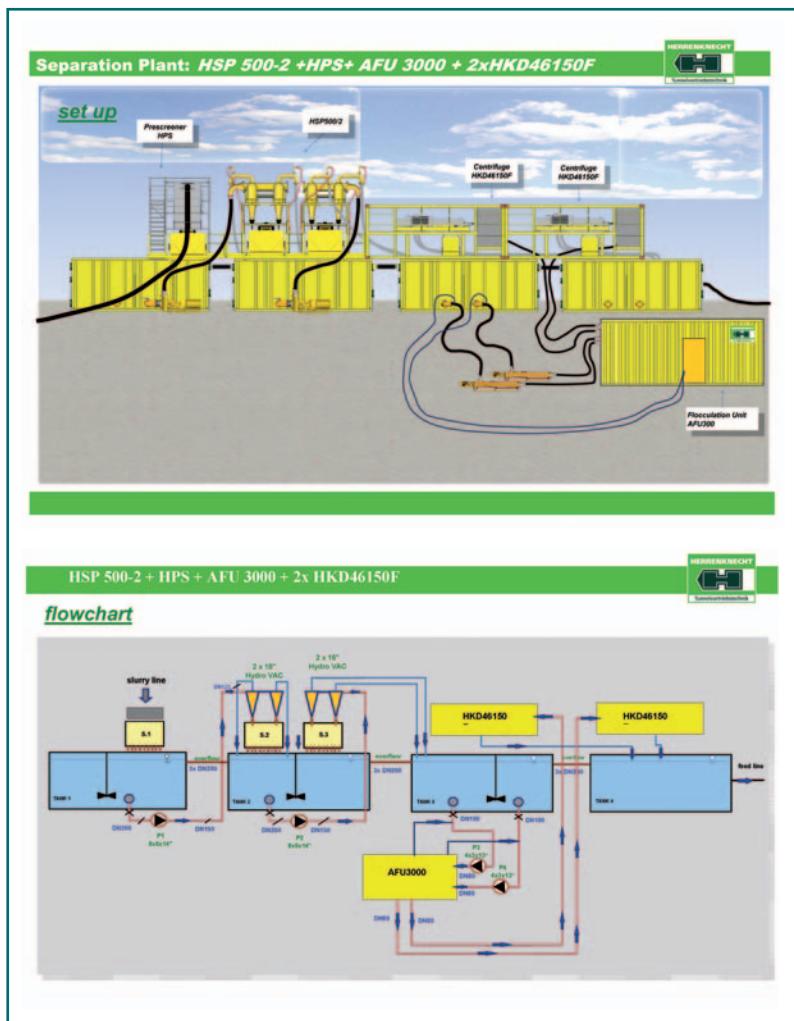


Fig. 11. Esquema funcional de la planta de separación/Set up of the separation plant.

agua para que la bomba del lodo pueda funcionar. También se rellena el “gap” con bentonita para la lubricación a través del revestimiento, por medio de las líneas de bentonita instaladas en su interior. En las Figuras 10 y 11 se muestran los esquemas funcionales en la VSM y de la planta de separación del Pozo de Barcelona.

Poco después de hacer una primera hincada de 0,2 m, hubo un fallo en uno de los gatos de retención (Figura 12), que hubo que sustituir por uno nuevo. Se tardó una semana en traer un cilindro nuevo e instalarlo.

Una vez reanudada la excavación, se amplió el tiempo útil de trabajo montando un segundo turno, con lo que en vez de las 62 horas por semana previstas, se emplearon 99,5 horas para recuperar el tiempo perdido.



Fig. 12. Gato de retención/Strand jack.

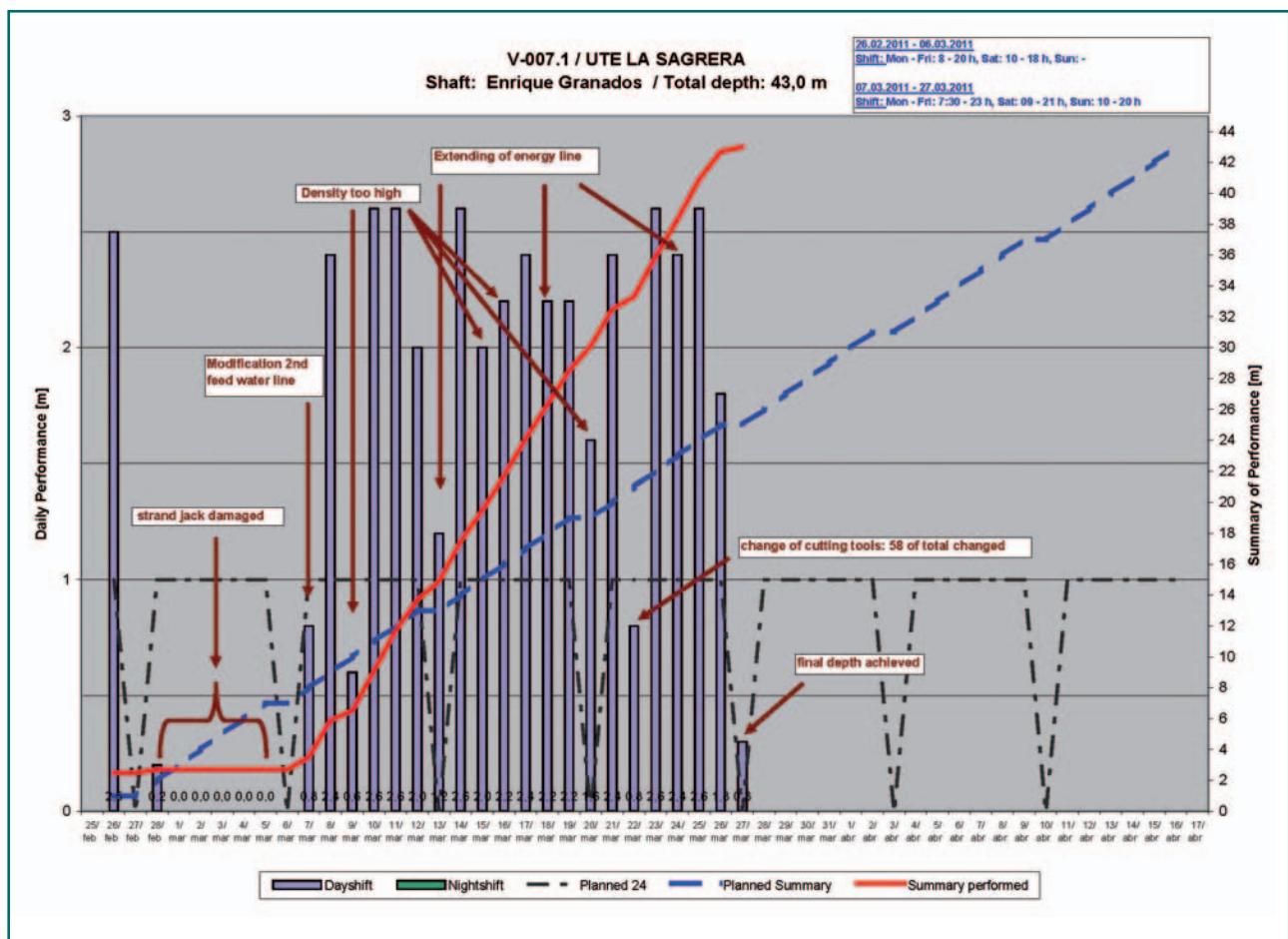


Fig. 13. Línea adicional para incorporar coagulante/Additional line for the



Fig. 14. Mandos y pantallas en la cabina del operador/Right, Cams and screens in the pilot cabine.

Fig. 15.
Esquema de
avances/Perfor
mance chart.



Una vez cortado el terreno por el cabezal de la VSM, se bombea a la planta de separación por la bomba instalada detrás del cabezal. En la planta, el slurry se trata con polímeros para que puedan trabajar las centrifugadoras retirando del agua las partículas finas. El agua permanece en el circuito hidráulico y el material se lleva al vertedero en camiones.

Después de la reanudación, y durante 3 días, se verificó que los polímeros añadidos, y antes ensayados en laboratorio, no reaccionaban con el material excavado, por lo que las partículas finas permanecían en el circuito hidráulico elevando la densidad del slurry hasta $1,25 \text{ t/m}^3$ que es el límite máximo hasta el que puede trabajar la bomba. Mientras se ensayaban 70 productos diferentes en cinco laboratorios de fabricantes distintos para encontrar un polímero adecuado, el tiempo útil de la excavación se redujo a cuatro días y el slurry se cambió por agua en la planta de separación.

La solución final fue un doble tratamiento que precisó hacer trabajos de adaptación de la planta: fue ne-

rose from the scheduled 62 hours up to 99,5 hours to regain the lost time.

After the ground is cut and crushed by the drum, the integrated slurry pump, behind the drum, pump the soil water mixture to the separation plant.

In the separation process the slurry is treated with polymers for supporting the centrifuges to get the fine particles out of the water. The water remains in the water circuit and the material is carried away by trucks (Figure 13).

On the third day of excavating after restart, the polymers which were added in the flocculation unit, formerly proved in laboratory tests, didn't react anymore with the excavated material, so the fine particles stayed in the water circuit and the density of the slurry rised up to $1,25 \text{ t/m}^3$, the absolutely limit for the slurry pump to work. While trying approx. 70 different products were tested in five different fabricant laboratories to find a working polymer. On four days the excavating time was limited to approx. and the slurry is changed to fresh water in the separation plant. The final

La construcción de un pozo de 43 m de profundidad en el centro de Barcelona con una máquina VSM
The construction of a 43m depth shaft in the centre of Barcelona with the VSM

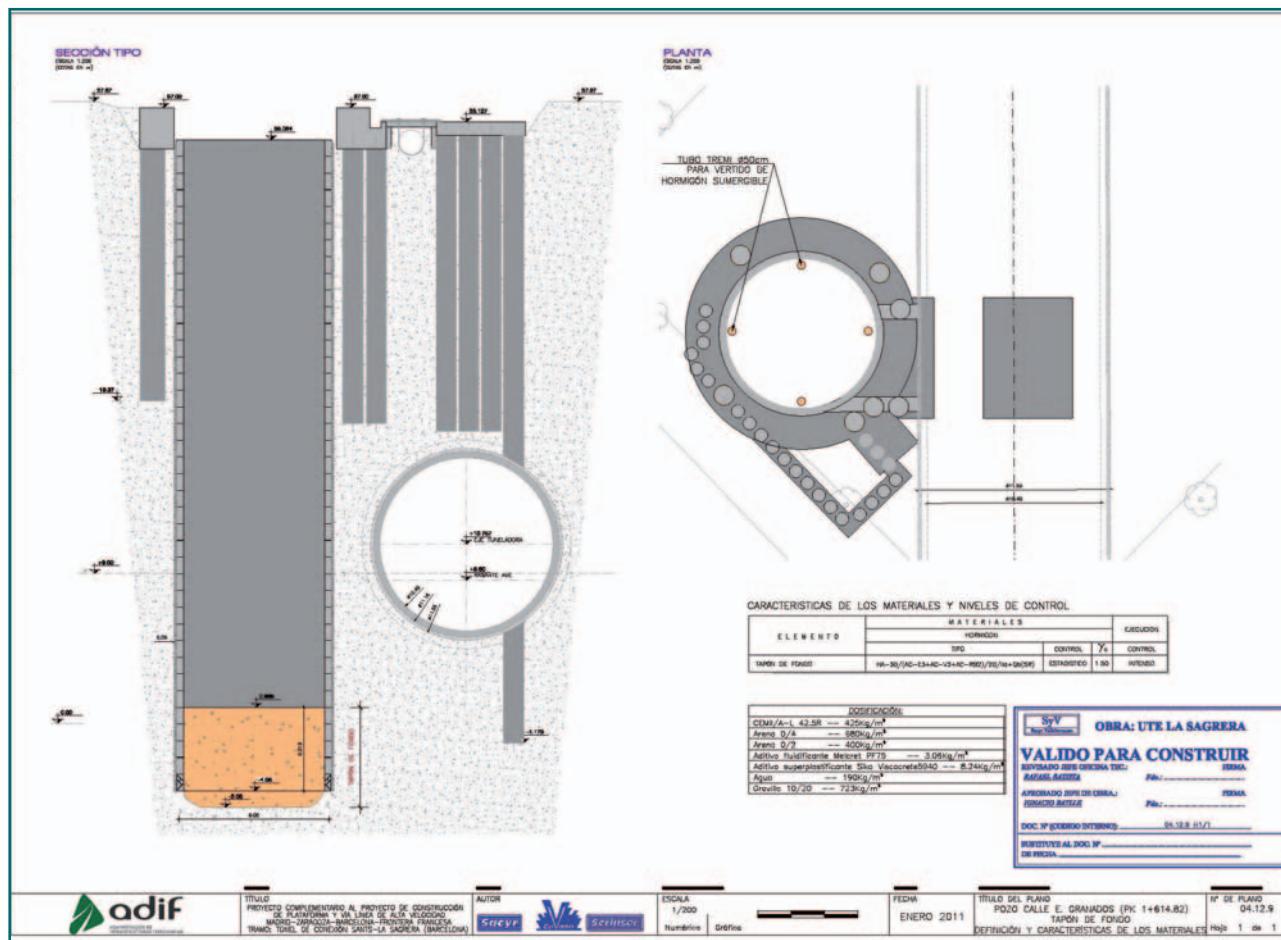


Fig. 16. Tapón de fondo.
Diseño y puesta en obra del concreto/Bottom plug. Design and concreting.

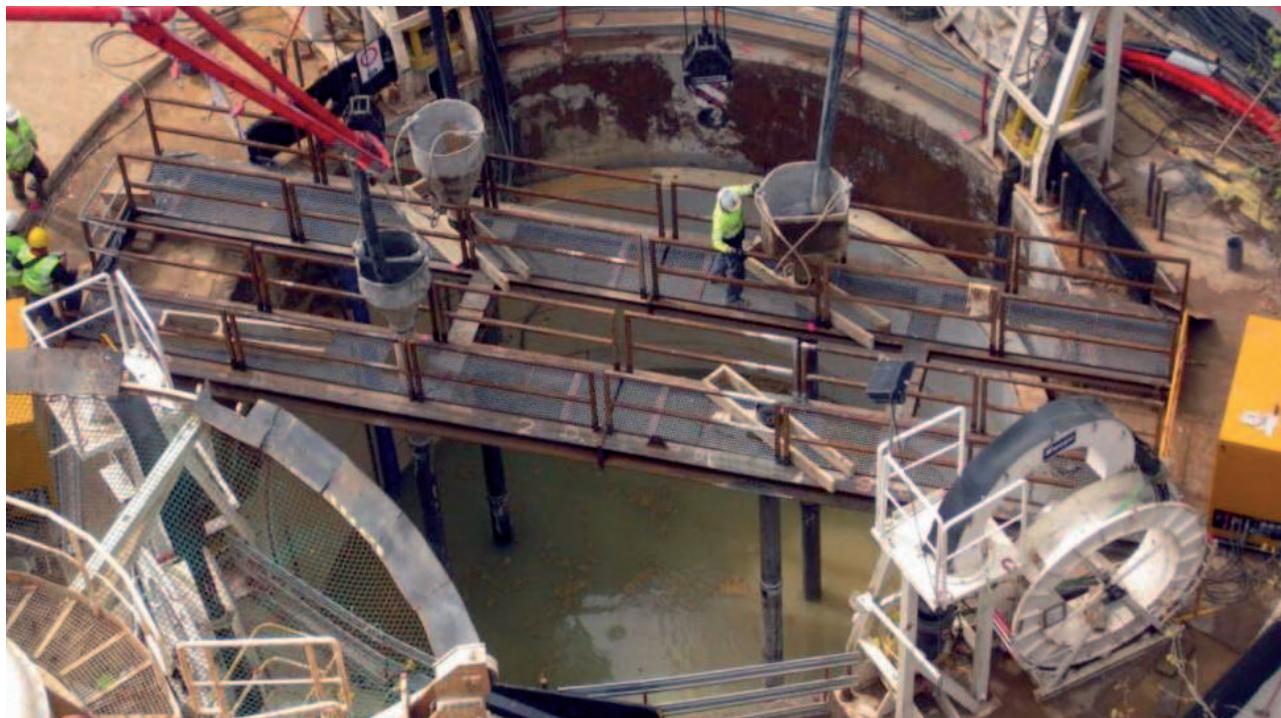
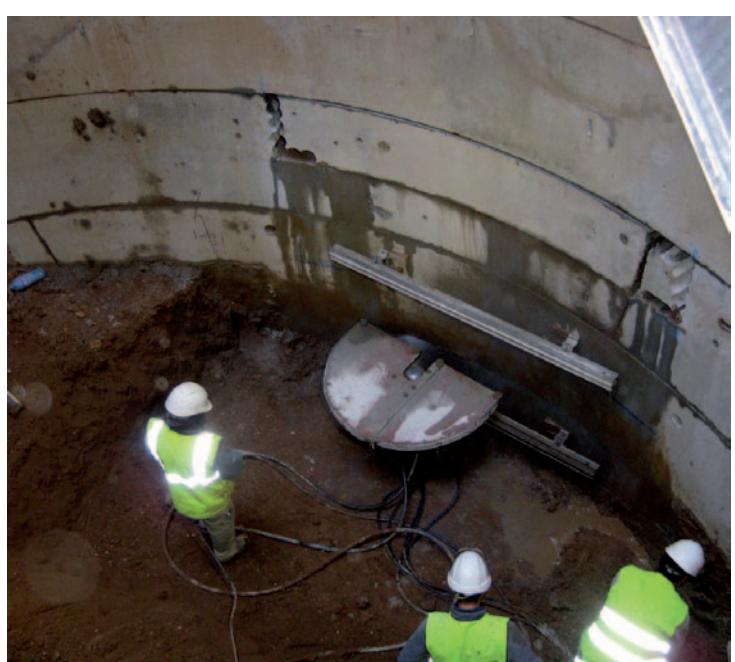
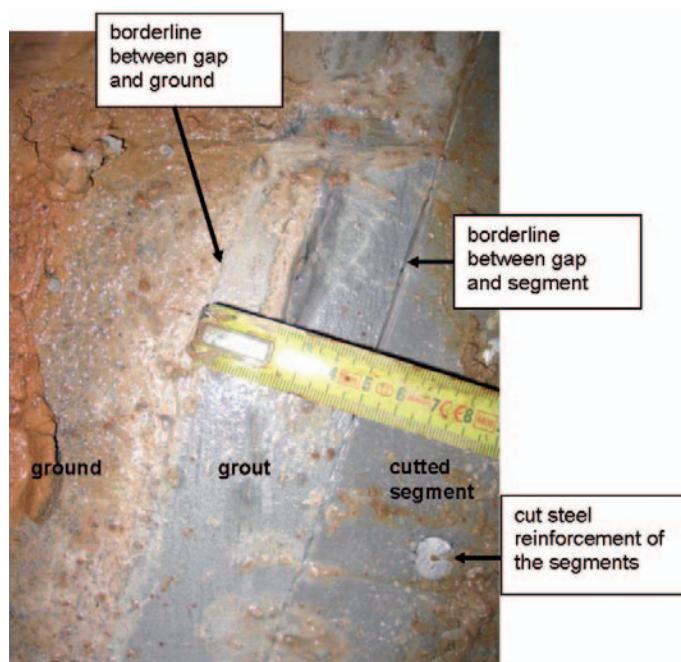




Fig.17. Corte del revestimiento con sierra de diamante/Lining cut by diamond saw.





cesario en primer lugar la adición de coagulante líquido al slurry y después hacer un tratamiento con floculantes antes de pasar a las centrifugadoras para que la densidad se mantuviera en el rango 1,15 a 1,20 t/m³ (Figura 13).

Como el diámetro de excavación es igual al diámetro exterior del anillo aumentado en 50 mm para el sobreexcavado, el cabezal excava por debajo del nivel del borde de corte, todo ello operado por control remoto desde la cabina, donde el piloto tienen mandos y pantallas para controlar el proceso de excavación (Figura 14).

La excavación del pozo de 43 m de profundidad duró un mes, como puede verse en el esquema de avances de la Figura 15.

solution is a double treatment which requires some adaption works on the separation plant: First adding coagulant liquid to the slurry followed by treatment with flocculants before passing to the centrifuges, so the density get stable with a value range from 1,15 t/m³ to 1,20 t/m³.

The excavation diameter is the outside diameter of the ring plus 50 mm overcut, so the drum excavates down under the cutting edge, all operated by remote mode from the control cabin where the operator have full control of all relevant parameters in the excavating and sinking process. (Figure 14)

The excavation of the 43 meters depth shaft took one month as shown on the performance chart (Figure 15).

Fig. 18.
Excavación de la galería transversal/Opening of the cross-cut.

Fig. 19. Acceso por la galería para reparar la Rueda de corte de la TBM/
Access by the cross-cut to repair the TBM cutting head.



4. Continuación de los trabajos después de la terminación de la excavación y revestimiento

Una vez terminado el pozo y retirada la VSM se construyó el tapón de fondo (Figura 16). Finalizado dicho tapón comenzó la inyección del "gap" a través de las tuberías de bentonita, sustituyendo la bentonita por lechada de cemento.

Al hacer la galería transversal se pudo comprobar que el "gap" estaba lleno a una profundidad de 25 m.

Terminado el relleno del "gap", el cliente rellenó los 25 metros inferiores con tierras traídas en camiones para construir la galería transversal lo más rápidamente posible. Los anillos se cortaron con sierra de diamante (Figura 17) y una vez excavada la galería transversal fue posible para el personal acceder a la Rueda de corte para su reparación (Figuras 18 y 19). ♦

4. Following civil works after finishing the excavation and lining works

After finishing the shaft and lifting out of the VSM the bottom plug, as shown in figure 16, is made out of underwater concrete, using four pipes going down to the bottom, where the concrete are pumped thru.

When the bottom plug is finished the grouting of the gap starts by using the installed bentonite hoses. The grout is replacing the bentonite in the gap. As a result of the open crosscut, it is possible to see the fulfilled gap in a depth of 25m.

After the filling of the gap, the client fills the shaft 25 meters with gravel delivered by trucks, to be able to construct the crosscut as fast as possible. The segments are cut with a diamante saw (figure 17). After the making of the crosscut, the crew is available to realize the refurbishment works at the accessible cutting wheel (figures 18 and 19). ♦