



# METROPOLITANA C13 DI VARSAVIA

## SCAVO CONVENZIONALE DEI TUNNEL DI COLLEGAMENTO

La complessa storia della costruzione  
di tre gallerie di collegamento

**L**a costruzione delle tre gallerie di collegamento tra il lato est ed il lato ovest della stazione C13, adiacente al fiume Vistola, ha una storia lunga e complessa, dal momento che passano al di sotto una delle principali arterie stradali di Varsavia (Wislostrada).

Dopo il tentativo di scavare la prima galleria, il fronte del tunnel è crollato nella notte del 13 Agosto, 2012, e un volume di circa 10.000 metri cubi di massa liquida (acqua, suolo limoso e sabbia) ha allagato il lato ovest della stazione, che

è stato riempito con più di sette metri di materiale. Fortunatamente, chi era al lavoro è riusciti a fuggire, ma le macchine e le attrezzature sono state perse. Questa è la storia di come i tunnel sono stati completati, attraverso il miglioramento del suolo, jet grouting, barre in vetroresina, congelamento del terreno ed un'accurata scelta delle fasi di lavoro.

### Introduzione

La stazione Centrum Nauki Kopernik on Line II della metropolitana di Varsavia si trova a fianco del fiume Vistola (Figura 1). Questa stazione d'ora in avanti sarà denominata stazione C13.

La stazione è composta da tre parti: la parte est e la parte occidentale e tre tun-

Massimiliano Bringiotti, Ferdinando De Angelis,  
Marco Aurelio Piangatelli  
CIPA S.p.A.



**Figura 1** La stazione Centrum Nauki Kopernik ed il fiume Vistola

nel di connessione di 40 metri di lunghezza con una grande sezione trasversale (170 m<sup>2</sup>). Essa comprende i binari lungo i lati e la piattaforma lungo il centro. La ragione per la quale si è scelto il collegamento sotterraneo dei due pozzi con un tunnel è dovuta alla presenza di una galleria stradale (Wislostrada, in seguito denominata WS), che deve essere sotto attraversata dalla nuova linea metropolitana (Figura 2).

Il tunnel esistente (Wislostrada) è stato costruito molti anni prima, tra diaframmi, e alcune strutture di fondazione interferiscono con il tunnel sotterraneo. La sfida era quella di costruire le connessioni senza interrompere il traffico di veicoli lungo l'autostrada soprastante. Tutte le opere si sono svolte in condizioni geologiche e idrogeologiche molto difficili a

causa della presenza di depositi alluvionali del fiume Vistola con caratteristiche meccaniche scadenti. Il suolo è costituito da sabbie relativamente sciolte nella parte superiore, e limi sovrastanti argille plioceniche ad alta plasticità altamente disturbate dagli effetti del ripetuto scorrimento di depositi morenici glaciali.

La stazione si trova interamente sulla sponda ovest del fiume Vistola: il confine orientale del pozzo della stazione è a meno di 10 metri dalla riva del fiume. La stazione è stata costruita in tecnologia top-down con diaframmi (1.40 m di spessore). La profondità massima di scavo raggiunge un livello di 24 metri.

I due tunnel laterali hanno un diametro interno di circa 7 metri e la loro forma è perfettamente circolare per consentire, dopo il loro completamento, il passag-

gio della TBM.

I tre tunnel dovevano essere scavati nel terreno argilloso con metodi tradizionale. Invece, il terreno risultò essere formato da materiali sabbiosi sotto falda. In sostanza, è come se i tunnel fossero stati scavati sotto il letto del fiume, in presenza di acqua corrente. Un'ulteriore importante complicazione è dovuta alla presenza delle fondazioni del tunnel WS realizzate da diaframmi, che sarebbero stati smantellati durante lo scavo delle gallerie e in presenza del normale traffico veicolare. Questo articolo si concentra sui vari tentativi di scavo che sono stati attuati per completare il collegamento.

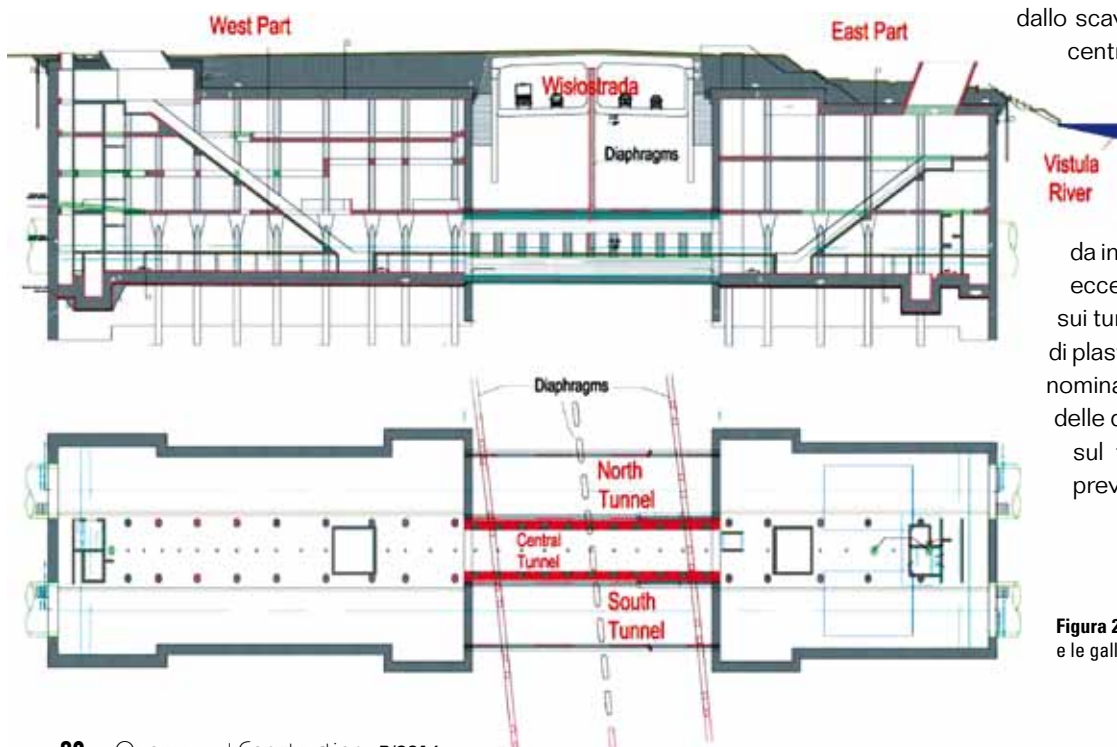
### Tentativi di scavo

Sono stati effettuati diversi tentativi di costruzione delle tre gallerie. Il primo tentativo ha seguito il progetto originale che si basava su un profilo geologico che si è rivelato impreciso. Era prevista solo argilla lungo il percorso tunnel ma così non è stato.

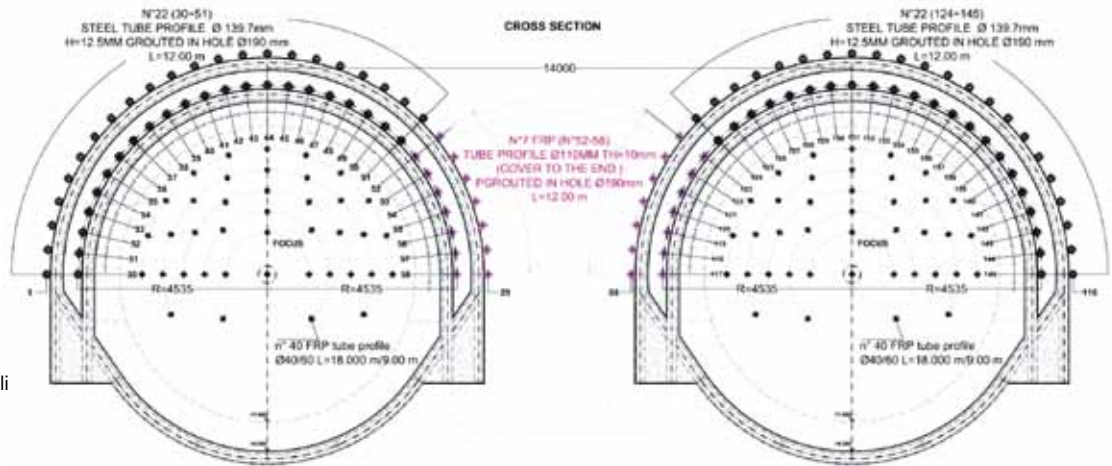
### Primo tentativo. Infilaggi con micropali (Canopy Piles)

Lo schema originale di costruzione prevedeva lo scavo ed il rivestimento delle due gallerie laterali (per le linee), seguito dallo scavo e rivestimento del tunnel centrale (per la piattaforma), collegato ai due tunnel laterali da archi.

Lo scavo delle due gallerie laterali avrebbe dovuto essere sostenuta da infilaggi di micropali in acciaio, eccetto per i lati che si affacciano sui tunnel centrali e da tubi in fibra di plastica rinforzata (di seguito denominati tubi FRP) al fronte. Ai lati delle due gallerie che si affacciano sul tunnel centrale, il progetto prevedeva tubi FRP invece di



**Figura 2** Le due parti della stazione e le gallerie di collegamento



**Figura 3**  
Progetto originale delle due gallerie laterali da scavare

quelli in acciaio, per consentire il successivo scavo del tunnel centrale, il cui rivestimento definitivo avrebbe dovuto essere sostenuto dal rivestimento definitivo dei due tunnel laterali (Figura 3).

Dopo il primo carotaggio sui diaframmi dell'ingresso del tunnel nord sul lato ovest, il 2 febbraio 2012, si verificò un flusso di massa di sabbia e acqua dal foro nel pozzo (Figura 4).



**Figure 4** Afflusso di acqua

Non c'era terreno argilloso dietro il muro, come previsto, ma qualcos'altro. La necessità di procedere con indagini geologiche lungo il percorso del tunnel divenne evidente. In precedenza le indagini non potevano essere eseguite in modo da non chiudere la WS. Il foro fu tappato ed ebbe inizio una nuova campagna di indagini.

**Indagine geologica**

Una volta che le parti est e ovest della stazione furono scavate, è stato possibile eseguire un rilevamento geologico del percorso del tunnel, con fori orizzontali e sub-orizzontali, a partire dai diaframmi della stazione e senza dover chiudere il tunnel WS sopra occupato. Il risultato di questa indagine è stato che

il livello del terreno argilloso era più basso di quanto previsto e che la parte superiore delle sezioni del tunnel erano in materiale sabbioso sotto falda.

La decisione è stata presa per eseguire un miglioramento del suolo, ma dal momento che gli interventi non potevano essere attuati dal tunnel WS per non chiuderlo, un nuovo progetto è stato redatto, esso includeva colonne di jet grouting sulla parte superiore del tunnel. (Figura 5).

**Secondo tentativo. Jet Grouting**

Il nuovo programma di lavoro prevedeva lo scavo del tunnel nord prima, seguito dal tunnel sud. Il tunnel centrale sarebbe stato l'ultimo. Lo scavo sarebbe stato

**Figura 5** Progetto aggiornato con colonne di jet grouting

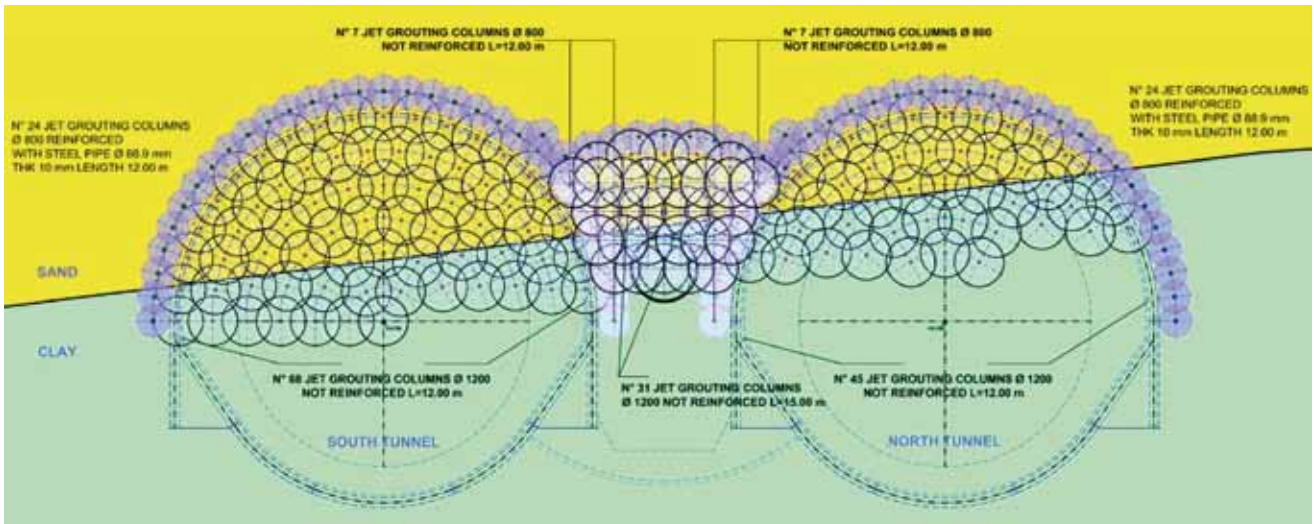




Figura 7 Collasso del fronte del tunnel



Figura 8 Afflusso di acqua, sabbia e argilla afflusso nel tunnel, e macchine nel fango

eseguito da entrambe le direzioni est e ovest di ogni tunnel, fino ai diaframmi centrali che sostengono il tunnel WS. Si iniziò con il Jet grouting e gli infilaggi di micropali sui diaframmi del lato ovest del tunnel nord con una grande macchina, poi la grande macchina fu spostata sul lato est della stazione, per l'altra faccia del tunnel nord, e una macchina più piccola è arrivata nella lato ovest. In seguito, è stato sistemato il fronte est delle altre due gallerie. Il fronte restante del tunnel a sud nella parte orientale sarebbe stato l'ultimo. Durante i miglioramenti del suolo effettuati sul lato est, lo scavo della galleria

nord iniziò dal lato ovest, seguendo le fasi illustrate nella Figura 6. Dopo la demolizione dei diaframmi della stazione, il primo passo dello scavo fu concluso. I diaframmi che sostengono il tunnel WS sono stati demoliti e il rivestimento primario è stato applicato, composto da nervature d'acciaio, rete metallica, montanti sull'arco e calcestruzzo spruzzato. Il secondo passo dello scavo è iniziato e proseguito senza problemi. Ogni 75 cm, uno strato di calcestruzzo spruzzato è stato applicato alla parete del tunnel durante il rivestimento primario della parte precedentemente scavata di tunnel. La sera del 13

LA STAZIONE È COMPOSTA DA TRE PARTI: LA PARTE EST E LA PARTE OCCIDENTALE E TRE TUNNEL DI CONNESSIONE DI 40 METRI DI LUNGHEZZA CON UNA GRANDE SEZIONE TRASVERSALE DI 170 M<sup>2</sup>

Agosto, 2012, lo scavo è arrivato alla quinta centina d'acciaio della seconda fase di scavo (Figura 6). Gli operatori hanno applicato la calcestruzzo spruzzato sulla parete delle gallerie al fine di stabilizzarle, e sono andati a cena alle 10:30 PM.

### Il crollo del fronte del tunnel

Alle 22:45, un caposquadra ha visto che qualcosa di strano stava accadendo. Un po' di acqua affluiva dalla parte superiore e dalla parete del tunnel. Immediatamente ha dato l'allarme, e una squadra corse giù. Alle 23:00 hanno iniziato a spruzzare un altro strato di calcestruzzo sul fronte del tunnel, ma poiché il calcestruzzo spruzzato si stava gonfiando e spaccando in alcune zone del fronte, l'azione intrapresa è stata interrotta e tutti i lavoratori hanno tentato di posizionare del materiale contro il fronte per contenerlo (Figura 7).

Allo stesso tempo, poiché il fronte continuava a muoversi, nonostante l'azione di contenimento, gli operai riuscirono a salvare le attrezzature e le macchine utilizzando la gru, ma non erano in grado di terminare questa operazione poiché era stata ordinata l'evacuazione immediata della stazione.

Per evitare il temuto crollo del lato ovest della stazione, è stato intenzionalmente accelerata l'inondazione pompando l'acqua dal fiume Vistola in modo da equilibrare la pressione esterna del terreno sulle pareti (Figura 9). L'accesso al tunnel WS è stato vietato per motivi di sicurezza. Molte macchine sono state

Figura 6 Vista di una fase di scavo di tunnel Nord dal lato ovest

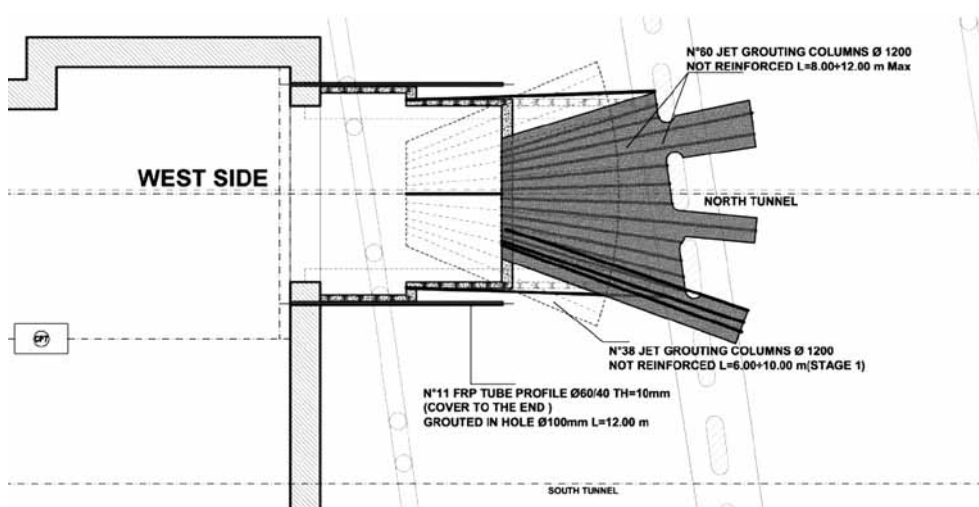




Figura 9 La stazione prima dell'evento e dopo l'inondazione intenzionale

perse nella stazione (Figura 10). Fortunatamente, nessuno è rimasto ferito.

### Il riempimento con calcestruzzo sotto il tunnel WS

Dopo le indagini conoscitive non distruttive, è stato determinato che c'era un deposito di materiale solido, per lo più di sabbia, di circa 6.500 metri cubi all'interno della stazione, e una perdita della quantità equivalente di materiale sotto la lastra stradale del tunnel Wislostrada. La cavità sotto il tunnel WS è stata riempita con acqua fino a circa 2 metri dal fondo della lastra. La lastra stradale, quindi, non è stata sostenuta dal sottosuolo naturale, ed è stata sospesa in equilibrio rischioso tra i diaframmi laterali.

Per riempire la cavità con il calcestruzzo, c'è stata un'operazione iniziale con una massiccia iniezione di calcestruzzo, autolivellante, con miscele progettate per trovare una soluzione sott'acqua. La seconda operazione per il consolidamento profondo è stata eseguita con una iniezione a bassa pressione di miscele cementizie seguite da miscele chimiche, utilizzando tubi a manichetta. La seconda operazione è stata fermata e non è stata

completata poiché l'iniezione di miscela rialzò la lastra stradale in alcuni punti fino a 20 cm.

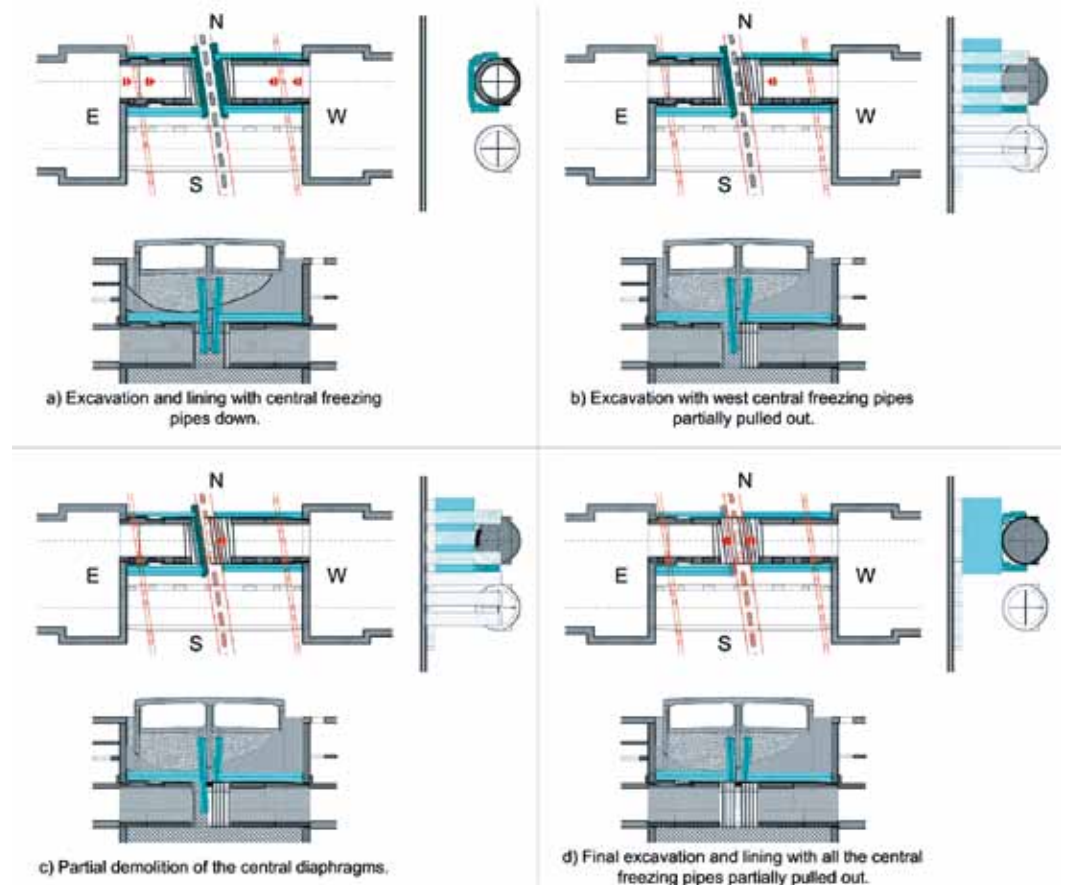
### Il terzo ed ultimo tentativo. Congelamento del terreno

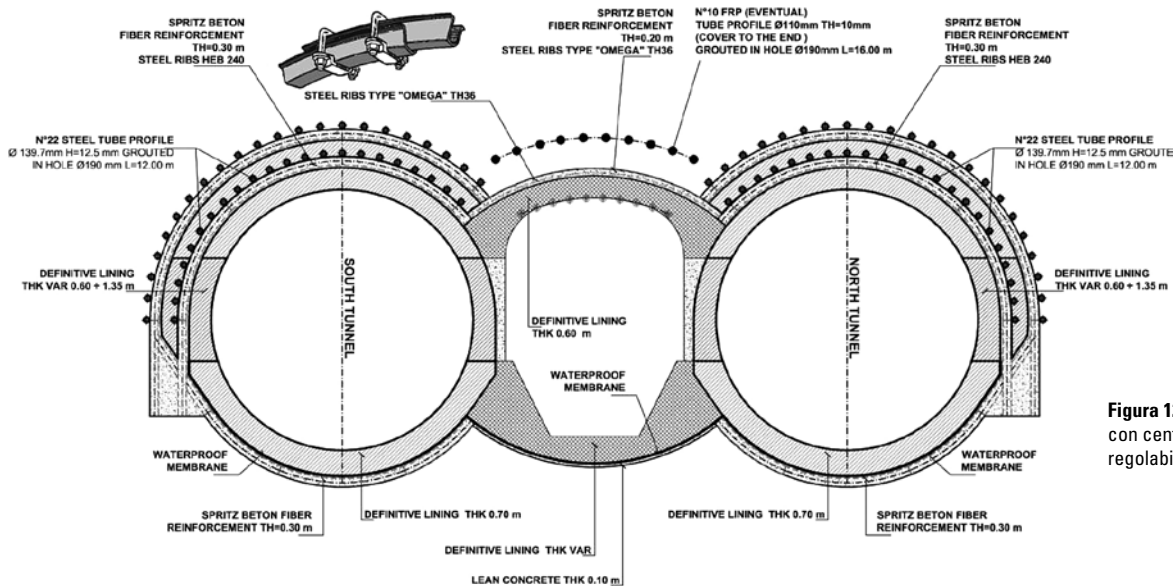
Il congelamento del terreno è stata la soluzione finale adottata per migliorare il terreno stesso (vedi Capata et al. 2015).



Figura 10 Una delle macchine sepolta dalle macerie

Figura 11 Fasi di scavo e rivestimento





**Figura 12** Tunnel centrale con cinte tipo Omega regolabili

Sommozzatori ispezionarono il fondo della stazione e trovarono un grande mucchio di sabbia che ostruiva l'entrata del tunnel, quindi la stazione è stata accuratamente svuotata del materiale di afflusso. Il mucchio di sabbia è stato accuratamente rimosso, strato per strato, ed è stato costruito un muro di calcestruzzo rinforzato con il metodo della sottomurazione. Sono state installate sonde di congelamento orizzontali e ver-

ticali. Le fasi di scavo sono state piuttosto complesse.

La figura 11 mostra alcune fasi di progettazione del tunnel nord (simili a quelli per il tunnel sud e le gallerie centrali).

Le sonde orizzontali sono state poste tutto attorno alla sezione della galleria, e le sonde verticali sono state collocate ai lati dei diaframmi centrali di supporto del tunnel WS. Gli scavi sono stati effettuati dalle due direzioni e fermati nei

pressi dei diaframmi. Le due sezioni sono state allineate e dopo le sonde verticali sono state parzialmente tirate su, la sezione centrale è stata scavata e rivestita.

Le due gallerie laterali sono state completate e poi il tunnel centrale è stato scavato utilizzando, nel rivestimento primario, cinte posizionate sulle cinte delle gallerie laterali, scoperte durante lo scavo. Le cinte centrali sono state



**Figura 13** In alto, una galleria laterale; a destra, il tunnel centrale; in basso, una foto panoramica delle tre gallerie



Figura 14



saldate alle centine delle gallerie laterali e, alla fine del ciclo di scavo, i pilastri dei tunnel laterali sono stati tagliati. Sono state scelte centine del tipo “Omega” (Figura 12) per compensare la variabilità delle diverse lunghezze dell'arco.

**Epilogo**

La storia dello scavo delle gallerie è molto più complessa di quanto queste poche pagine cercano di descrivere rapidamente. Come potete immaginare, la costruzione del tunnel era parte di un

lavoro più ampio e più complesso e le difficoltà incontrate in questa costruzione hanno influenzato continuamente la programmazione di tutte le opere. Ci sono voluti più di due anni e mezzo per completare il tunnel, ma grazie agli sforzi delle persone che hanno lavorato per risolvere i gravi problemi di questo lavoro al fine di salvaguardare le persone stesse, le strutture e le attrezzature, per quanto possibile, i tunnel sono stati completati. La figura 14 mostra un'immagine delle gallerie di oggi. ◆

**Bibliografia**

Capata, V., Lombardi, A. and Bizzi, F. 2015. *Line II of Warsaw Underground: the excavation of tunnel connector (Centrum Nauki Kopernik station)*. *Infrastructure Conference Proceedings – ICE Publishing*