

VÝSTAVBA LHC VE STŘEDISKU CERN U ŽENEVY ■ CIVIL ENGINEERING WORKS FOR THE LHC PROJECT IN CERN

Článek popisuje některé z důležitých částí podzemních betonových konstrukcí, které byly budovány při přestavbě urychlovače LEP na výkonnější systém LHC ve výzkumném středisku CERN u Ženevy. ■ Several parts of important underground concrete structures constructed during the rebuilding of the LEP system for higher capacity of the LHC system in the research centre CERN close to Geneva are described in the article.

Urychlovač je zařízení, v němž se pomocí magnetického nebo elektrického pole uvádí do pohybu elektricky nabití částice (ionty, elektrony, protony, pozitrony ad.). Při studiu struktury hmoty se částice srážejí s hmotným terčem nebo navzájem, přičemž se rozpadají na složky, které jsou sledovány citlivými senzory. Analýza naměřených výsledků srážek umožňuje ověřovat teorie o struktuře hmoty (HN 3. srpna 2010).

Mezi roky 1984 až 1989 byl ve výzkumném centru CERN u Ženevy postaven urychlovač označovaný LEP (Large Electron Positron machine). Analýza výsledků uskutečněného výzkumu a vývoje odpověděla na řadu otázek, ale bezprostředně otvírala další „proč a jak?“. Postupně vše směřovalo k zájmu simulovat tzv. velký třesk. Než se takový experiment mohl na jaře letošního roku úspěšně uskutečnit, bylo potřeba vybudovat nový ještě silnější urychlovač označovaný jako LHC (Large Hadron Collider). Pro něj bylo možno z velké části využít stávající konstrukce LEP, které bylo třeba rozšířit o hlavní podzemní experimentální prostory určené pro měření chování svazku paprsků, šachty umožňující přístup k nim z povrchu a řadu dalších podzemních halových prostor, ve kterých jsou instalována náročná budící a měřicí zařízení, a na povrchu vybudovat objekty pro umístění kompresorů, ventilačního zařízení, elektrických systémů, přístupových kontrol a elektronického řízení celého projektu (obr. 1 až 3).



1

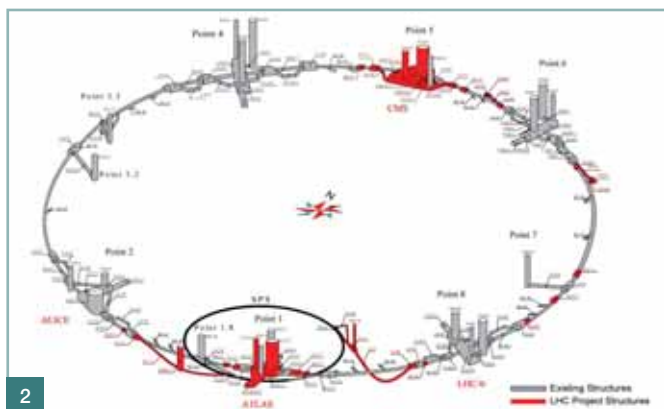
Nové výzkumné aktivity se soustředily do dvou hlavních míst (obr. 4). Jedno centrum je označováno jako Point 5 a je zde umístěno veškeré potřebné vybavení pro nový detektor CMS. Druhé centrum nese označení Point 1 a je určené pro experimentální zónu ATLAS. Obě centra jsou podobná, tvoří je dvě obrovské podzemní kaverny, jedna pro detektor, druhá pro servisní zařízení, kolem obou jsou různé štoly, tunely a komory pro umístění potřebného vybavení a zajištění přístupu. Na povrchu jsou budovy s kanceláři, chladicími, ventilačními a kryogenními zařízeními ad.

Výstavba LHC byla zahájena dle plánu v dubnu 1998. V listopadu 2000 byly ukončeny všechny experimenty na LEP a zařízení bylo rozebráno. Většina stavebních prací pro LHC Projekt trvala 4,5 až 5 let. Pouze Point 5 byl vzhledem ke své složitosti dokončen až za 6,5 roku.

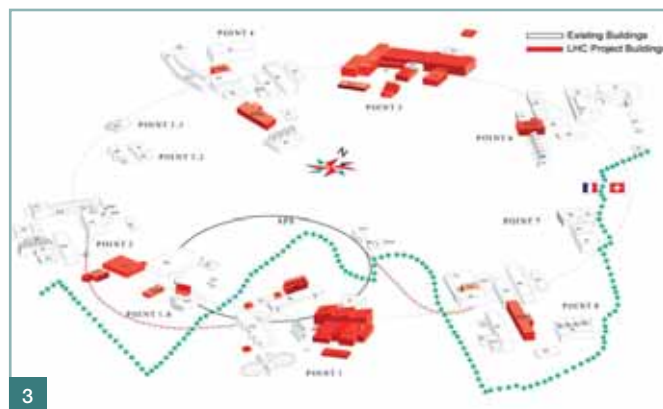
POPIS KONSTRUKCÍ

Původní LEP tvoří kruhový tunel délky 26,7 km (poloměr cca 3 km) vybudovaný v hloubce 45 až 170 m pod povrchem. Rovina kruhu je ukloněná 1,4° vzhledem k horizontále, aby se převážná většina kruhového tunelu nacházela ve stejných geologických podmínkách – sedimenty Lemman Basin Molasse (obr. 5). To vyžadovala předepsaná přesnost instalace veškerých zařízení v tunelu (tolerance $\pm 0,1$ mm) a stabilita jejich provozu.

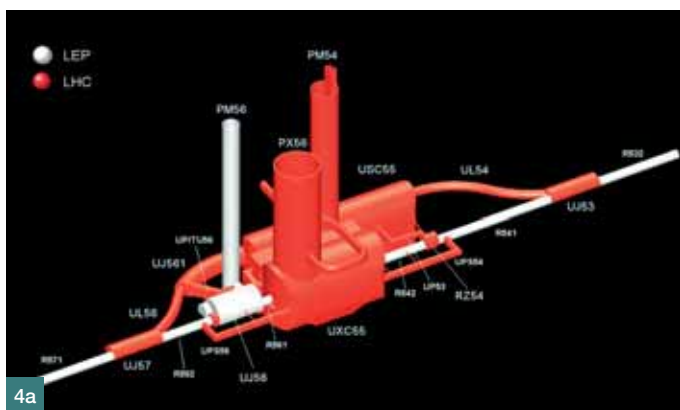
K oběma hlavním podzemním centrům (Point 5 a Point 1)



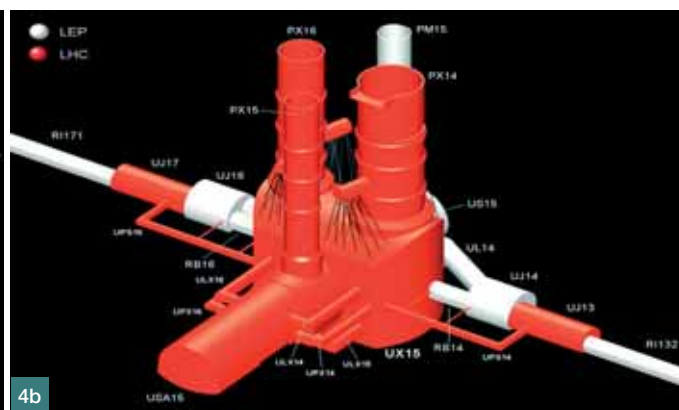
2



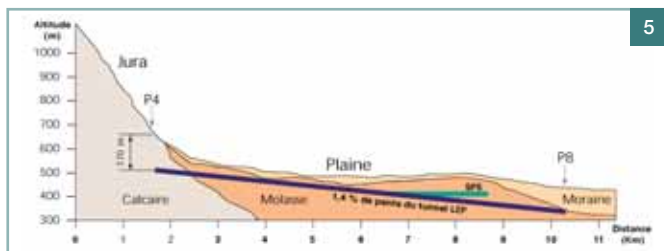
3



4a



4b



5

Obr. 1 Celkový pohled na oblast výzkumného centra CERN
 Fig. 1 General view of CERN area

Obr. 2 Podzemní konstrukce projektů LEP a LHC
 Fig. 2 Underground structures

Obr. 3 Nadzemní konstrukce projektů LEP a LHC
 Fig. 3 Surface buildings

Obr. 4 a) Point 5, b) Point 1
 Fig. 4 a) Point 5, b) Point 1

Obr. 5 Geologické podmínky v místě projektu
 Fig. 5 Geologic circumstances

vedou svislé přístupové šachty o průměru až 20 m a délce cca 65 m. Pro detektor CMS (Point 5) byly vyraženy dvě souběžné kaverny. Větší, určená přímo pro zařízení CMS detektoru, má průměr 26 m a délku 53 m a menší, určená pro servisní zařízení, má průměr 18 m a délku 85 m. Protože z technologických důvodů bylo potřeba umístit obě kaverny co nejbližší k sobě, cca 7 m, horninový pilíř mezi nimi byl nahrazen vyztuženým betonovým pilířem délky 50 m a výšky 28 m. Nejprve byl v podzemí vytěžen a znovupostaven pilíř a teprve potom se začalo s ražbou přilehlých kaveren. Nad centrem bylo na povrchu postaveno devět nových objektů zastřešujících:

- dvě přístupové šachty do podzemní experimentální kaverny,
- přístupovou šachtu do servisní kaverny,
- všechny podpůrné a servisní činnosti spojené s provozem CMS detektoru.

V centru ATLAS jsou dvě vyražené kaverny vzájemně kolmé. Větší, experimentální je 30 m široká, 35 m vysoká a 53 m dlouhá, menší, servisní má průměr 20 m a délku 65 m. Obě kaverny jsou propojeny pěti tunely průměru 2,2 až 3,8 m. Na povrchu bylo postaveno osm nových budov zajišťujících provoz podzemního detektoru.

TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

Nehledě na významné množství informací o geologickém prostředí, v kterém byl vybudován experimentální okruh pro LEP, bylo třeba zajistit podrobný geologický průzkum pro nový projekt. Realizovaný průzkum zahrnoval třicet čtyři vrtných zkoušek, což reprezentuje celkem 30 000 m vrtných prací. Bylo uskutečněno množství místních šetření a laboratorních testů, aby byly co nejpřesněji stanoveny určující podmínky:

- určení jednotlivých horninových vrstev – hloubka uložení jejich horního povrchu a tloušťka vrstvy,
- množství, přítok a směr proudění podzemní vody v moréno- vých vrstvách
- pevnosti horninových vrstev,
- pevnost skalního podloží, bobtnavost a obrusnost.

V několika případech průzkum prokázal přítomnost ložisek ropy (i v místě budoucí kaverny pro Atlas detektor), což se

muselo projevit v úpravě přípravných pracích, projektu konstrukcí i technologickém postupu výstavby objektu.

Vedení CERN od počátku nepovolilo podzemní razící práce za pomoci odstřelů horniny. Pro omezení existovaly dva důvody: vnější – centrum leží pod obydlenou oblastí (obr. 1) a vnitřní – až do listopadu 2000 probíhala experimentální činnost na původním projektu LEP a ani po jejím ukončení nemohlo být špičkové vybavení střediska jakkoli ohroženo otřesy z odstřelů při ražbě. Výstavby probíhala Novou rakouskou tunelovací metodou s ražbou pomocí hydraulických kladiv a různých typů razicích strojů.

Tloušťka vnějšího ostění ze stříkaného betonu s nebo bez přidání vláken se pohybovala od 75 do 500 mm, místy s vyztužením kari sítěmi nebo horninovými kotvami průměru 25 až 40 mm a délky 1,5 až 12 m. V několika případech byly použity i speciální kotvy do bobtnavých hornin. Vnitřní ostění je z monolitického betonu tloušťky 250 až 2 000 mm. Obě ostění odděluje izolační membrána.

Ražbu provázely i neočekávané události, např. opakované závaly či zalití razicího stroje ropou z naraženého ložiska. Objevily se i různé konstrukční a technologické problémy, které bylo třeba vyřešit během výstavby.

Při výstavbě přístupových šachet v Pointu 5 bylo třeba projít 50 až 55 m silně zvodnělých moréno- vých sedimentů. Zvodnělé vrstvy byly v hloubce 15 a 40 m pod povrchem s rychlostí proudění 20 m/den. Byly zvažovány dvě možnosti odclonění podzemní vody: hluboké podzemní stěny nebo zmrazení zeminy. Po sedmiměsíčním výzkumu se vedení projektu přiklonilo k druhé variantě. Byl použit obvyklý postup zmrazování zeminy. Nejprve byla vrstva zeminy zmrazena pomocí tekutého čpavku a následně byl pro udržení teploty na hodnotě $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ vháněn do svislých vrtů vyvrtaných po obvodě kruhu po 1,5 m solný roztok (obr. 6). Postup prací provázely různé komplikace, jejichž řešení vyžadovalo dodatečné injektáže, více vrtů se solankou, použití tekutého dusíku ad. – dokončení této fáze se posunulo o pět měsíců a její cena výrazně vzrostla.

Při výstavbě velké kaverny pro detektor Atlas bylo třeba vyřešit technologický postup pro těžební a betonářské práce v místě průchodu stávajícího LEP tunelu. Uživatel LEP



Tab. 1 Srovnání konstrukcí pro projekt LEP a LHC
 ■ Tab. 1 Comparison of the civil engineering works of LEP and LHC projects

| Projekt | LEP | LHC |
|---|-----------|---------|
| Počet přístupových šachet | 19 | 6 |
| Délka tunelů (všech průměrů) [m] | 32 600 | 6 500 |
| Počet konstrukcí | 70 | 30 |
| Plocha konstrukcí [m ²] | 59 000 | 28 000 |
| Objem vytěžených prostor [m ³] | 1 100 000 | 420 000 |
| Objem betonu v podzemních konstrukcích [m ³] | 230 000 | 125 000 |
| Objem betonu v povrchových konstrukcích [m ³] | 85 000 | 42 000 |



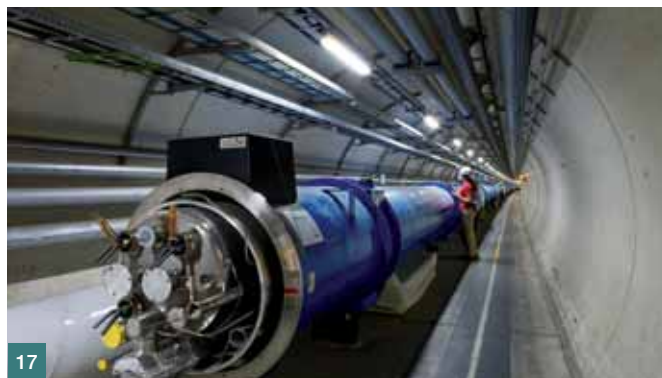
14



15



16



17

urýchlovače trval na tom, že při odtěžování horní části kaverny nesmí dojít za žádných okolností k poklesu stropu tunelu o více než 30 mm. Bylo tedy rozhodnuto odtěžit pouze 10 m pod budoucí klenbou kaverny a provést zde potřebné betonářské práce, zatímco o 17 m níže ještě nerušeně dobíhal experimentální projekt v LEP urýchlovači.

Dalším problémem bylo zajištění stability 8 000 t těžké betonové klenby uzavírající kavernu zahrnující i mohutné nosníky pojízdného jeřábu a horní části dvou koncových stěn budované mezi stávající kavernu a novou servisní kavernu tak, aby nepřetěžovala procházející tunel LEP. Po zvážení několika variant bylo vybráno originální řešení. Strop kaverny bude dočasně zavěšen přes 38 třináctipramenných kabelů ukotvených z různých míst betonové konstrukce o 20 m výše do čtyř štol vybudovaných z přístupových šachet (obr. 4b a 13). Kabely byly rozmístěny před uložením betonu do bednění klenby a po betonáži byly napnuty až na 220 t. Všechny operace proběhly přesně podle plánu. V březnu 2002, zhruba devět měsíců po betonáži, bylo uskutečněno měření, jehož výsledky ukázaly, že pokles stropu kaverny je menší než 1 mm. I když je třeba připustit, že část zatížení byla přenesena přes silně vyztužené napojení ostění přístupových šachet na ostění kaverny, přes jejich kotvenou výztuž, přímo do horninového masivu. Po vybetonování 5 m silné základové desky a 2 m silných stěn kaverny a zainjektování spáry pod jeřábovými nosníky bylo možno uvolnit napětí v kabelech a kotvách a stropní klenba kaverny se opřela o své podpůrné konstrukce.

ZÁVĚR

Během výstavby celého komplexu se sice vyskytlo několik neočekávaných událostí a incidentů, ale v porovnání s rozsahem celého projektu se jednalo o méně závažné události, jež se všechny obešly bez větších škod a arbitrážních řešení jejich následků. Investor vyslovil uznání všem zúčastněným z hlediska přístupu k řešení obtížného zadání i jeho realizace.

Obr. 6 Odtěžování přístupové šachty pomocí zmrazení horniny ■ Fig. 6 Access shaft sinking by freezing

Obr. 7 Přístupové šachty průměrů 12,1 a 20,5 m, hluboké cca 100 m ■ Fig. 7 Access shafts with diameters 12,1 and 20,5 m, deep cca 100 m

Obr. 8 Výztuž stěny jedné z kaveren, průměr výztuže 40 mm (v tendru 16 mm) ■ Fig. 8 Reinforcement of a wall

Obr. 9 Na dně přístupové šachty ■ Fig. 9 On the bottom of the access shaft

Obr. 10 Horní okraj šachty s posuvnou betonovou uzavírací deskou ■ Fig. 10 Top edge of the shaft with concrete plug

Obr. 11 Detail vyztužení betonové uzavírací desky ■ Fig. 11 Detail of the reinforcement of the concrete plug

Obr. 12 Betonáž spodní klenby kaverny ■ Fig. 12 Concreting of the bottom vault of cavern

Obr. 13 Zavěšený strop velké kaverny, a) detail aktivních kotev v pomocné štolě ■ Fig. 13 Suspended cavern roof, a) detail of the anchor

Obr. 14 Dokončená kaverna ■ Fig. 14 Completed cavern

Obr. 15 Otvírání šachty pod 2 000 t těžkou součástkou ■ Fig. 15 Opening of the shaft under 2 000 t load

Obr. 16 Spouštění technologie šachtou do kaverny ■ Fig. 16 Lowering of the technology through the shaft

Obr. 17 Tunel LHC ■ Fig. 17 LHC in the tunnel

| | | |
|-----------|--|--------------|
| Investor | CERN | |
| Projekt | French Aficoor | |
| Dodavatel | francouzsko-britské konsorcium Cossec-Waterman | |
| Realizace | duben 1998 až červenec 2005 | |
| Cena | celkem | 498 mil. CHF |
| | konsultace, expert. posudky a arch. návrhy | 50 mil. CHF |
| | stavební práce | 448 mil. CHF |
| | | |

podle článku Johna Andrew Osborna, CERN, připravila Jana Margoldová
Obrázky: John A. Osborn