

NÁVRH MIKROTUNELOVÁNÍ PLYNOVODU PŘETÍNAJÍCÍHO ENVIRONMENTÁLNĚ CITLIVOU OBLAST POBŘEŽÍ V AUSTRÁLII

DESIGN OF A UTILITY-MICRO-TUNNEL FOR CROSSING UNDER A SENSITIVE SHORE AREA

TANER AYDOGMUS, CARSTEN SCHULTE

ABSTRAKT

Projekt Wheatstone v hodnotě 29 miliard australských dolarů provozovaný společností Chevron je jedním z největších projektů zaměřených na nakládání s přírodními zdroji v Austrálii. Nachází se v oblasti Ashburton North, 12 kilometrů západně od města Onslow v Západní Austrálii a bude se skládat ze dvou závodů na zkapalňování zemního plynu (LNG) o celkové kapacitě 8,9 milionu tun ročně a místní paroplynové elektrárny. Těžba zemního plynu bude prováděna z naleziště v moři, nacházejícího se asi 250 km od pobřeží Onslow v Západní Austrálii. Jakmile bude projekt Wheatstone v provozu, Austrálie se stane druhým největším vývozcem LNG na světě. Pro překonání environmentálně citlivé oblasti pobřeží byl vyražen mikrotunel o vnitřním průměru 2 m a o délce přibližně 1242 m, a to technologií protlaku. Tento tunel bude vystrojen potrubím o průměru 1,1 m, kterým bude proudit plyn ze zařízení pro jeho těžbu v moři. Vyprojektování této stavby přináší řadu jedinečných výzev právě proto, že startovací jáma se nachází na pobřeží, přičemž samotná trasa tunelu protíná oblast pobřeží a končí v demontážní jámě nacházející se v moři. Tento článek poskytuje shrnutí projektu Wheatstone Shore Crossing, představuje jeho významné rysy a zabývá se hlavními aspekty projektu mikrotunelování.

ABSTRACT

The A\$29 billion Chevron-operated Wheatstone Project is one of Australia's largest resource projects. Located at Ashburton North, 12 kilometres west of Onslow in Western Australia, the project will consist of two LNG trains with a combined capacity of 8.9 million tonnes per annum and a domestic gas plant. The LNG Plant will serve the offshore gas fields, which are situated some 250km off the coast of Onslow in Western Australia. Once operational and on-stream, the Wheatstone Project will contribute to Australia becoming the world's second largest exporter of LNG. For crossing the environmentally sensitive shore area a micro-tunnel with an internal diameter of 2m and approx. 1,242m in length has been constructed by means of the pipe-jacking method. The micro-tunnel will accommodate a 1.1m diameter pipeline (trunkline) to deliver gas from the offshore fields LNG Plant. The Wheatstone shore crossing design involves a number of unique challenges owing to its coastal location, where the alignment crosses through a shore area and terminates in a marine environment. This paper provides an overview of the Wheatstone Shore Crossing Project, presents the key features, and discusses the main aspects of the micro-tunneling design.

ÚVOD

Projekt Wheatstone je realizován ve sdružení dceřiných společností Chevronu, Kuwait Foreign Petroleum Exploration Company (KUFPEC), Apache Corporation a Kyushu Electric Power Company společně s PE Wheatstone Pty Ltd (část vlastní TEPCO).

Plyn se bude těžit z nalezišť Wheatstone, Iago, Julimar a Brunello, která jsou situována nějakých 250 km od pobřeží, u kterého se nachází město Onslow. Jakmile bude projekt Wheatstone v provozu, Austrálie se stane druhým největším vývozcem LNG na světě.

Z wheatstoneských nádrží se bude plyn přepravovat ocelovým potrubím (plynovodem) k pobřeží. Tunel, který tvoří prefabrikované betonové potrubí, byl vyražen technologií bentonitového štítu (mix slurry shield) ze startovací jámy nacházející se na pevnině směrem k moři. Poté, co tunel protne pláž, pásmo písčitých dun a přímořská odlivová pásma, vyústí do demontážní jámy štítu nacházející se v moři (obr. 2). Do dokončeného a zatopeného tunelu pak byl vtažen plynovod vedoucí z naleziště Wheatstone tak, aby došlo k protnutí pobřežní oblasti.

Celkem 1,2 kilometru dlouhý tunel vyústující pod oceánem postavila společnost THIESS Pty Ltd (součást skupiny Hochtief). Práce na stavbě byly zahájeny po období cyklonů v roce 2013.

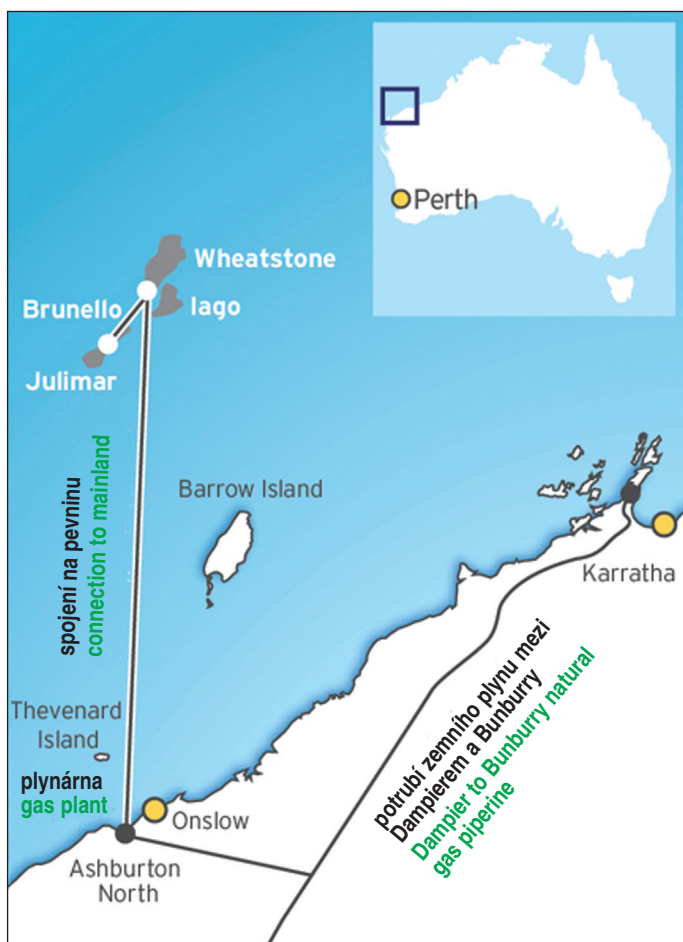
INTRODUCTION

The Wheatstone Project is a joint venture between Australian subsidiaries of Chevron, Kuwait Foreign Petroleum Exploration Company (KUFPEC), Apache Corporation and Kyushu Electric Power Company, together with PE Wheatstone Pty Ltd (part owned by TEPCO).

The Liquefied Natural Gas (LNG) Plant will serve the Wheatstone, Iago, Julimar and Brunello offshore gas fields, which are situated some 250km off the coast of Onslow. Once operational and on-stream, the Wheatstone Project will contribute to Australia becoming the world's second largest exporter of LNG.

The gas from the Wheatstone reservoirs will be transferred via a steel pipeline (trunkline) to shore. The tunnel which is formed by precast concrete pipes, was driven with a Tunnel Boring Machine (TBM) from an onshore launching shaft towards the sea. After crossing the beach, dune zones and low water coastal zones, the micro-tunnel exits into an offshore TBM retrieval pit (cf. Fig. 2). After tunnel construction, the trunkline from the Wheatstone gas field was pulled into the flooded tunnel to finally undercross the shore area.

THIESS Pty Ltd constructed the 1.2 kilometer long tunneled shore crossing under the ocean which will connect two offshore gas reserves with the Wheatstone LNG Plant.



Obr. 1 Situační nákres – projekt Wheatstone
Fig. 1 Location Plan – Wheatstone Project

Společnosti HOCHTIEF Engineering (projekční skupina firmy Hochtief) byla zadána zakázka na dodání koncepční studie projektu, realizačního projektu a projektu skutečného provedení pro startovací jámu štítu na pevnině, prefabrikovaného betonového protlačovaného potrubí a demontážní jámu štítu v moři. Dále byla společnost HOCHTIEF Engineering najata na poskytnutí podpůrných konzultačních služeb před a v průběhu výstavby tohoto projektu.

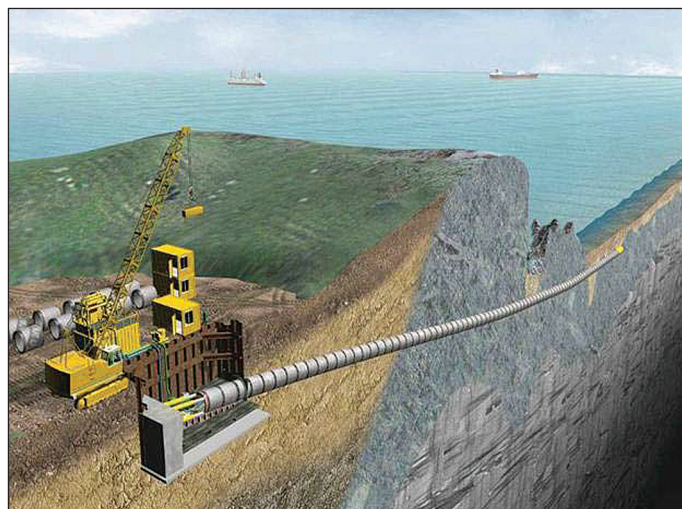
Projekt Wheatstone Shore Crossing znamenal řadu jedinečných výzev, a to právě kvůli svému umístění na pobřeží, kde jeho trasa přetíná pobřežní oblast a končí v mořském prostředí.

GEOLOGICKÉ PROSTŘEDÍ A PODMÍNKY STAVBY

Projekt Wheatstone Shore Crossing se nachází 12 kilometrů jihozápadně od Onslow v Západní Austrálii. Podle geologického průzkumu Západní Austrálie/Onslow [2] je místo projektu pokryto povrchovými usazeninami z období holocénu, které jsou tvořeny písčitémi dunami uloženými na jílovité pánvi a příbřežních přílivových deskách. Pod povrchovými vrstvami se nacházejí třetihorní a čtvrtohorní zeminy a horniny. Celky, které jsou úplně nejvýše, se nazývají Ashburton Red Beds. Pod nimi jsou na geologické mapě zobrazeny karbonátové horniny z období paleogénu.

Na základě výsledků geotechnických šetření jsou očekávané geologické celky, na něž se narazí podél navrhované trasy mikrotunelu, zobrazeny na obr. 3.

Geologii podél trasy tunelu je možné rozdělit do dvou hlavních úseků, a to místa tvořená plážovým pískem poblíž vstupní stavební jámy – přibližně 130 metrů a Ashburton Red Beds na zbyvajících 1112 metrech. Bylo možné zde narazit také na zasypané koryto dřívějšího říčního toku.



Obr. 2 Projekt Wheatstone Shore Crossing – v délce 1,2 km se využije metody mikrotunelování, aby se předešlo jakémukoli narušení pobřeží v oblasti Ashburton North

Fig. 2 Wheatstone Shore Crossing Project – Micro-tunnelling for 1.2km will be used for the Shore Crossing to Avoid Disturbing the Coastline at Ashburton North

The on-site construction works commenced after the cyclone season in 2013.

HOCHTIEF Engineering was awarded a contract to deliver the Concept, Detailed, Final and Construction Design for the onshore TBM launch shaft, precast concrete jacking pipes, and offshore TBM retrieval pit. Further, HOCHTIEF Engineering was engaged in providing Engineering Support services prior to and during construction.

The Wheatstone shore crossing design involved a number of unique challenges owing to its coastal location, where the alignment crosses through a shore area and terminates in a marine environment (cf. Fig. 2).

GEOLOGIC SETTING AND SITE CONDITIONS

The Wheatstone Shore Crossing Project is located 12 kilometers south-west of Onslow, Western Australia (cf. Fig. 1). According to the Geological Survey of Western Australia / Onslow Sheet [1] the project site is covered with Holocene-aged surficial deposits associated with dune, claypan, supratidal and intertidal-flats. The surficial soils are underlain by Tertiary to Quaternary aged soil and rock. The uppermost of these units are referred to as the Ashburton Red Beds. Underlying this unit, Lower Tertiary carbonate rocks are indicated on the geological sheet.

Based on the results of the geotechnical investigations the generalized stratigraphy and geological units anticipated to be encountered along the proposed micro-tunnel alignment are shown in Figure 3.

The geology along the tunnel alignment can be divided into two main sections, which is the dune beach sand, in the vicinity of the entry point, for approximately 130 meters and Ashburton Red Beds in the remaining 1,112 meters. There was also the possibility of encountering an infilled palaeochannel (former river courses) along the tunnel alignment.

Groundwater level variations had been measured in the vicinity of the micro-tunnel alignment using pressure transducers installed in monitoring wells. The monitoring results indicated that the groundwater level varies from approximately 0.5m AHD to 0.8m AHD over a tidal range of about

Kolísání úrovně spodní vody bylo měřeno v blízkosti trasy mikrotunelování za použití tlakových zařízení nainstalovaných v měrných studních. Výsledky sledování naznačily, že se spodní voda pohybuje přibližně mezi 0,5 m AHD (Australian Height Datum, tj. australská střední hladina moře) a 0,8 m AHD nad výškovým rozpětím mezi přílivem a odlivem, které je přibližně 2,3 m. Pro účely vyprojektování stavební jámy na pevnině byla předpokládána maximální hladina spodní vody 1,5 m AHD, která brala v úvahu možné zvednutí spodní vody na pevnině v případě silné bouře. Pro účely vyprojektování protlaku byla předpokládána maximální a minimální hladina vody podél trasy tunelu určována hladinami HAT a LAT, které byly předpokládány v úrovni:

- Highest Astronomical Tidal Level (HAT), tj. nejvyšší astronomický příliv: 1,36 m AHD;
- Lowest Astronomical Tidal Level (LAT), tj. nejnižší astronomický odliv: -1,22 m AHD.

Podle australské normy AS 1170.4-2007 a na základě vyhodnocení očekávaných geologických podmínek podél trasy bylo místo stavby klasifikováno pro účely statického výpočtu a návrhu projektu jako seismická třída Ce (místo s nízkou vrstvou zeminy). V AS 1170.4-2007, část 4 je roční pravděpodobnost výskytu zemětřesení 2×10^{-3} (výskyt jednou za 500 let) pro oblast Onslow vyznačena přibližně 0,12 g. Tento výskyt jednou za 500 let se považuje za ekvivalent Operating Basis Earthquake (OBE), tj. úroveň zemětřesení, na níž je stavba naprojektována a při které dojde k zachování provozuschopnosti stavby.

SPECIFICKÉ ASPEKTY NÁVRHU PROJEKTU

Předmět díla

Společnosti THIESS byla zadána zakázka Design and Build. Předmět díla projekční části obsahoval projekt protlaku včetně jeho vytyčení, geotechnického průzkumu a vyprojektování protlačovaného potrubí. Projekt obsahoval

2.3m. For the purposes of the onshore shaft design, the assumed maximum design ground water level was at 1.5m AHD to allow for the potential for some groundwater mounding onshore during a heavy storm event. For the purposes of the jacking pipe design, it was assumed that the maximum and minimum design water levels along the tunnel alignment are controlled by the HAT and LAT, which were assumed with:

- Highest Astronomical Tidal Level (HAT): 1.36 m AHD;
- and Lowest Astronomical Tidal Level (LAT): -1.22 m AHD.

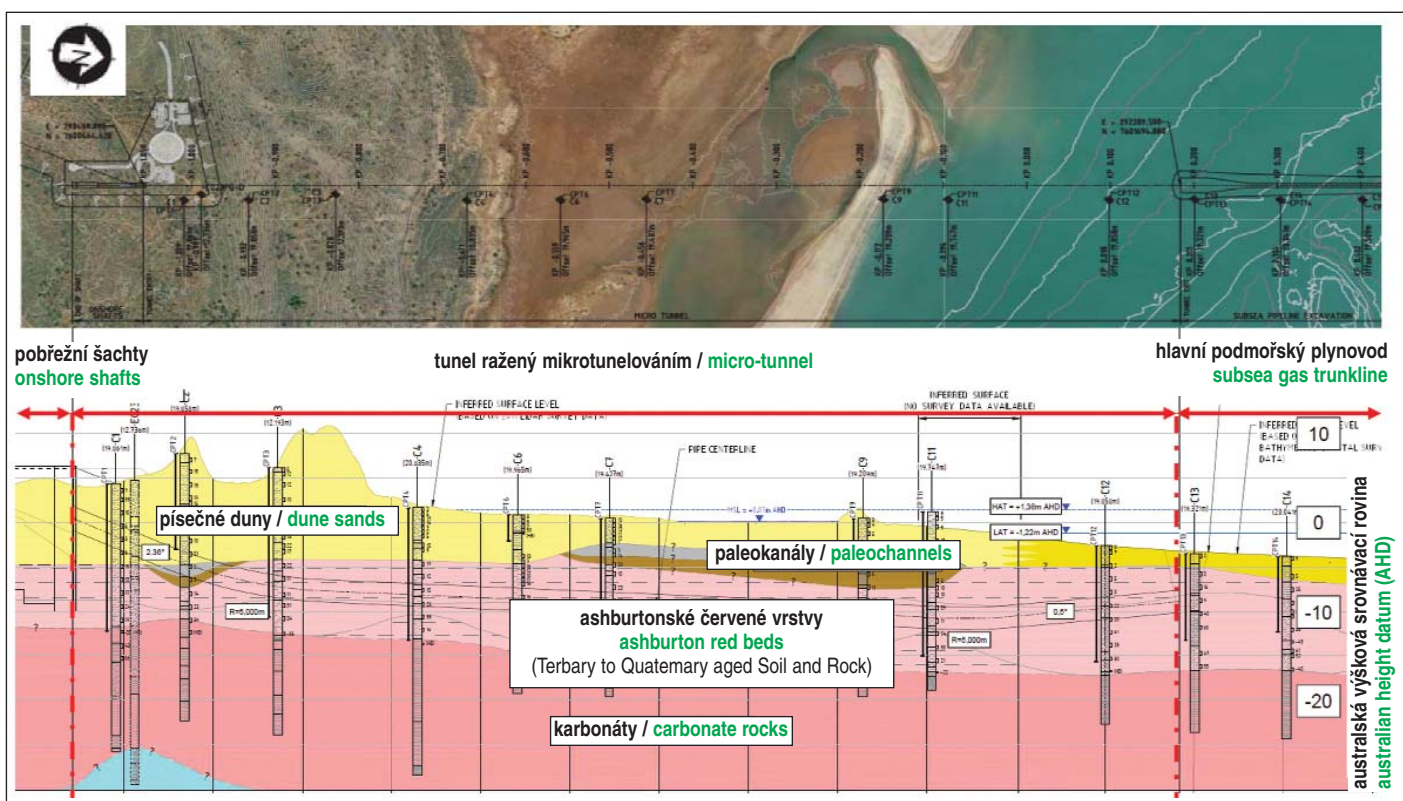
According to the Australian Standard (AS 1170.4-2007) and based on an assessment of the anticipated ground conditions along the alignment, the project site was classified as Seismic Site Class Ce (Shallow Soil Site) for structural analysis and design purposes. In AS 1170.4-2007 Part 4 the 2×10^{-3} annual probability of exceedence (500 year return period) earthquake for the Onslow area is mapped at about 0.12g. This 1-in-500-years event is considered equivalent to the Operating Basis Earthquake (OBE).

PARTICULAR ASPECTS OF THE DESIGN ELEMENTS

Scope of Works

THIESS' was awarded a Design and Build contract. The scope of works for the design section comprised the design of the jacking-pipeline including the alignment, geotechnical investigation and design of the jacking pipes. The design also included the onshore shafts and the offshore TBM retrieval pit. All temporary work designs associated with the site was a part of THIESS's scope.

The scope of works for the construction elements comprised the procurement of all the jacking pipes, site establishment including amenities, procurement, set-up and demobilization of all tunneling infrastructure (e.g. slurry treatment



Obr. 3 Geologický profil podél trasy mikrotunelu

Fig. 3 Geologic Profile along the Micro-Tunnel Alignment

také startovací jámu na pevnině a demontážní jámu pro vytažení štítu v moři. Součástí díla byl i projekt veškerých dočasných prací souvisejících se stavbou.

Předmět stavebního díla zahrnoval pořízení veškerého protlačovaného potrubí, zařízení staveniště včetně zázemí, zajištění, přípravu a odstranění veškeré tunelovací infrastruktury (např. separačního zařízení, generátoru, velínu, nádrže na mísení bentonitu, atd.), výstavbu startovací jámy a protlačovací stavební jámy, veškeré ražby včetně vystrojení, vytažení štítu, výstavbu rampy pro zatahování potrubí a odstranění staveniště.

Předmět díla společnosti HOCHTIEF Engineering obsahoval studii, realizační projekt a projekt skutečného provedení stavby pro následující oblasti:

Projekt trasy:

- trasa mikrotunelu pro účely naváděcího systému štítu.

Projekt stavební jámy na pevnině:

- projekt protlačovací a startovací jámy včetně spodní desky, podpěr (přední zeď a boční opěrné zdi) a monitoring;
- rozhraní s tlačným rámem, hlavní tlačnou stanicí a tlačným systémem;
- projekt stavební jámy s rampou pro vtažování potrubí včetně spodní desky a ukotvovacích bodů pro zatahování trubek.

Projekt protlačovaného potrubí:

- projekt prefabrikovaného betonového protlačovaného potrubí včetně speciálních prvků sestávajícího ze standardního potrubí, potrubí s ocelovým opláštěním pro použití u vyústění v moři a speciálního potrubí pro instalaci systému katodické ochrany a monitoring;
- projekt nosných bodů, který bere v úvahu jednotlivá zatížení včetně povolených tolerancí pro zvedání, nakládání, instalaci a přepravu;
- výkresy výztuže a tvaru včetně detailů;
- požadavky na betonovou směs protlačovaného potrubí.

Projekt demontážní jámy štítu v moři:

- projekt demontážní jámy štítu v moři včetně stabilizačních opatření u vyústění potrubí;
- stabilizace vyžadovaná u vyústění protlačovaného potrubí na jedno období cyklonů včetně zatížení souvisejícího s instalací plynovodu;
- určení/specifikace zpětného zásypu, stabilizovaný písek podle potřeby.

Budoucí dopady nákladní dopravy po pozemních komunikacích:

- vyhodnotit dopad výstavby dopravního a servisního koridoru pro nákladní vozidla a jeho provozu na betonové potrubí v mikrotunelu.

Dále byla společnost HOCHTIEF Engineering najata na poskytování konzultační podpory a služeb projektového managementu před a v průběhu výstavby, například přezkoumání a prověření metodologie ražby a pomocných zařízení, přezkoumání technické dokumentace včetně specifikace štítu, manipulačního zařízení a logistiky stavby, základní geotechnické zprávy, aby se zajistila vhodnost projektů stavebních jam a protlačovaného potrubí, atd.

Trasa mikrotunelování a výběr bentonitového štítu

Trasa se skládá ze tří výškových oblouků (obr. 3). Nejprve směřuje dolů v úhlu 2,36 stupně přibližně 150 m, poté navazuje úsek se sklonem 0,23 stupně na následujících přibližně 700 m. Tunel přechází do sklonu 0,5 stupně v oblasti vyústění. Každý oblouk má poloměr 5000 m.

Společnost THIESS za konzultační pomoci HOCHTIEF Infrastructure provedla výběr štítu na projekt mikrotunelu

plant, generator power, control room, bentonite mixing tank etc.), construction of the launch and jacking shafts, all tunneling work including fit-out items, the recovery of the TBM, construction of the pipe pull ramp and site demobilization.

HOCHTIEF Engineering's scope of work included the delivery of the Concept, Detailed, Final and Construction Design for the following listed Design Packages:

Alignment Design

- Micro-tunnel alignment for the purposes of TBM guidance system.

Onshore Shafts Design

- Jacking and launch shaft design including base slab, jacking abutment (headwall and wing-walls) and monitoring;
- Interface with jacking frame, main jacking station and sliding system;
- Pipe Pull Ramp Shaft design including base slab and trunkline pulling anchor points.

Jacking Pipes Design

- Design for all precast concrete Jacking Pipes including specials, comprising of standard pipes, steel lined for use at the marine exit and special pipes for installation of cathodic protection monitoring system;
- Design of lifting points taking into account load cases including lifting, stacking, installation and transportation allowances;
- Reinforcement and related formwork drawings including details;
- Concrete Mix requirements for Jacking Pipes;

Offshore TBM Retrieval Pit Design

- Design for the offshore TBM retrieval pit including stabilization measures around pipe exit;
- Stabilization required for jacking pipes exit for one cyclone season including loads from trunkline installation;
- Determination/specification of backfill, stabilized sand as required.

Future Haulage Road Impacts

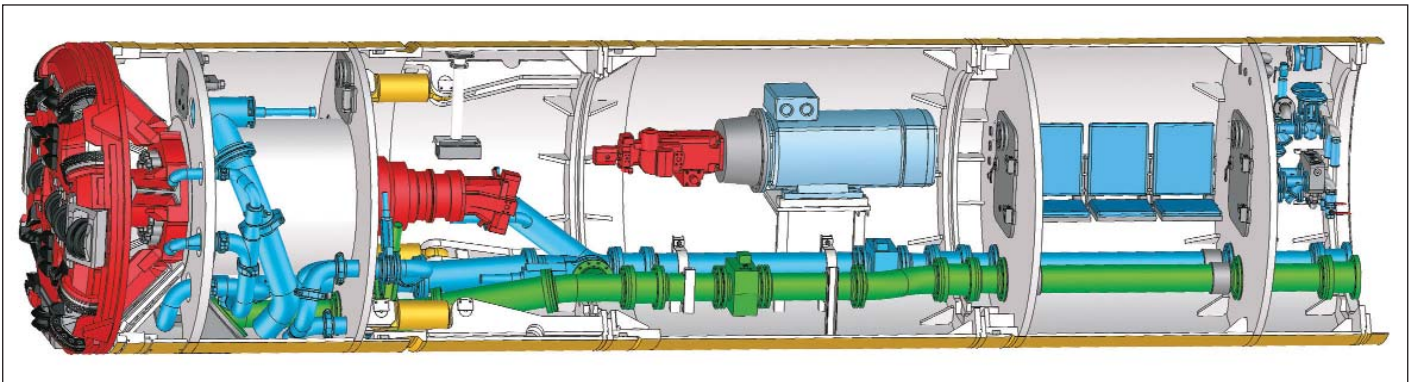
- Assess the effect of heavy haul road and service corridor construction and operation on the micro-tunnel concrete pipes.

Furthermore, HOCHTIEF Engineering was engaged in providing Engineering Support and Design Management services prior and during construction, e.g. review and verification of Tunneling Methodology and Auxiliary Equipments, review of various Engineering Reports, including TBM specifications, handling equipment and site logistics, Geotechnical Baseline Report, to ensure suitability for shafts and jacking pipe designs etc.

Micro-Tunnel Alignment and Selection of the TBM

The alignment consists of three different vertical curves (Fig. 3). Firstly it heads down at an angle of 2.36 degrees for approx. 150m before flattening out at 0.23 degrees for the next approx. 700m. The tunnel takes transitions into a 0.5 degree inclination up until the tunnel exit. Each curve has a radius of 5,000m.

THIESS, in consultation with HOCHTIEF's Tunneling division, carried out the selection of the TBM for the Wheatstone Micro-tunneling Project based on the machine's ability to excavate the inferred geology (cf. Fig. 3), expected to be encountered along the 1,242m-long tunnel alignment;



Obr. 4 Typická konfigurace bentonitového štítu série AVND
Fig. 4 Typical AVND-Series TBM Configuration

zdroj:source: © Herrenknecht AG

Wheatstone na základě schopnosti daného stroje razit v uvažovaných geologických podmínkách, které se očekávaly podél trasy tunelu dlouhé 1242 m, a také na základě úspěšnosti podobných technologií protlaku a výkonu zařízení v podobných geologických podmínkách též i na minimalizaci rizik vyplývajících z celého procesu realizace protlaku. Pro tento projekt byl vybrán kombinovaný bentonitový razicí štít Herrenknecht AVND 2000 AB (obr. 4, 11) a související systémy a komponenty, jako jsou například hyperbarická komora (kompresní/dekompresní komora), podmořský modul pro vytažení stroje, automatická hlavní protlačovací stanice a 11 meziprotlačovacích stanic, navigační systém od společnosti VMT SLR-V atd. Tento štít byl zvolen proto, že jde o nejpokročilejší a nejkompletnější systém protlaku, který je v současnosti na trhu k dispozici.

Projekt protlačovaného potrubí

Od dokončení v říjnu 2013 je mikrotunel Wheatstone považován za nejdelší tunel zhotovený technologií protlaku na jižní polokouli. Jeho délka je 1242 m, vnější průměr 2,45 m a vnitřní průměr 2 m. Je v něm sedm různých druhů trubek. Délka každé z nich je 3 m a v závislosti na typu váží 12 až 16 tun.

Společnost HOCHTIEF Engineering vyhotovila projekt protlačovaného potrubí s výjimkou tlačných mezistanic, které projektoval dodavatel THIESS.

Protlačované potrubí bylo vyprojektováno podle německého předpisu DWA-A 161 (2010) „*Statically calculation of pipe jacking*“,

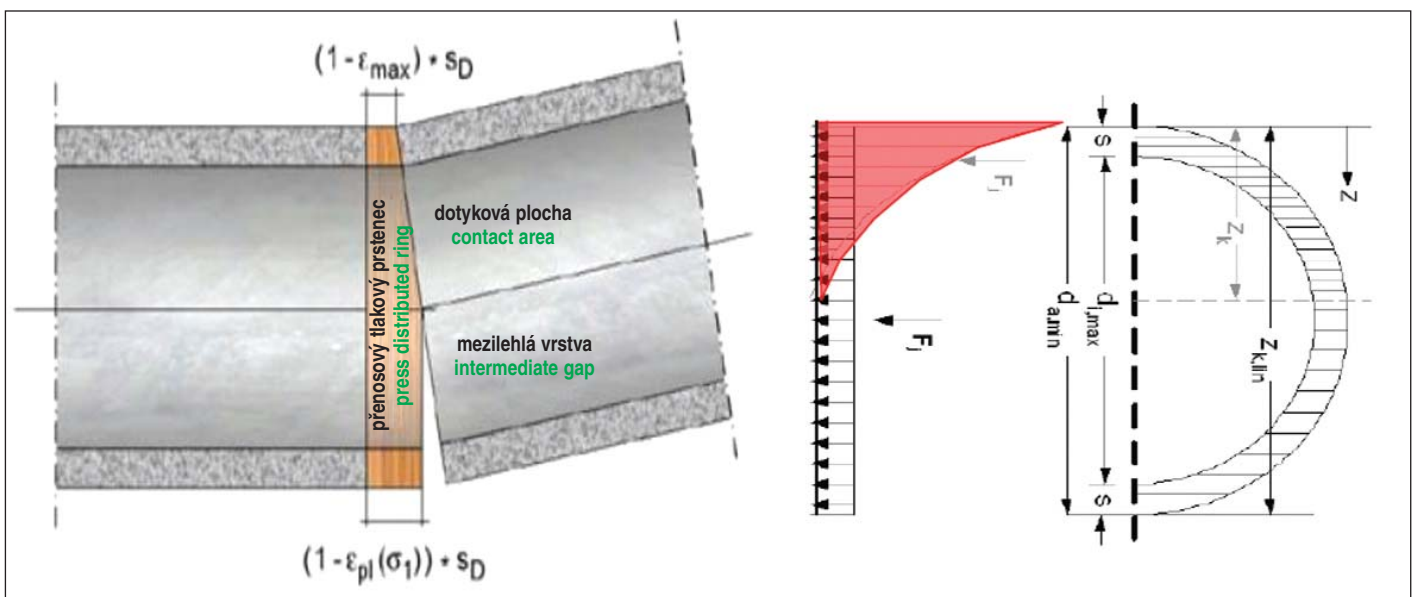
on the successful track record of similar pipe jacking machines and equipment performance in similar ground conditions as well as on the overall pipe jacking process execution risk minimization. The Herrenknecht AVND 2000 AB TBM (cf. Fig. 4 and 11), a mix shield slurry machine, and the associated systems and components, such as an airlock (compression / decompression chamber), sub-sea recovery module, automatic main jacking station and 11 inter-jack stations, VMT SLR-V Guidance system etc. have been selected for this project, due to being the most advanced and complete pipe jacking systems currently available on the market.

Jacking Pipes Design

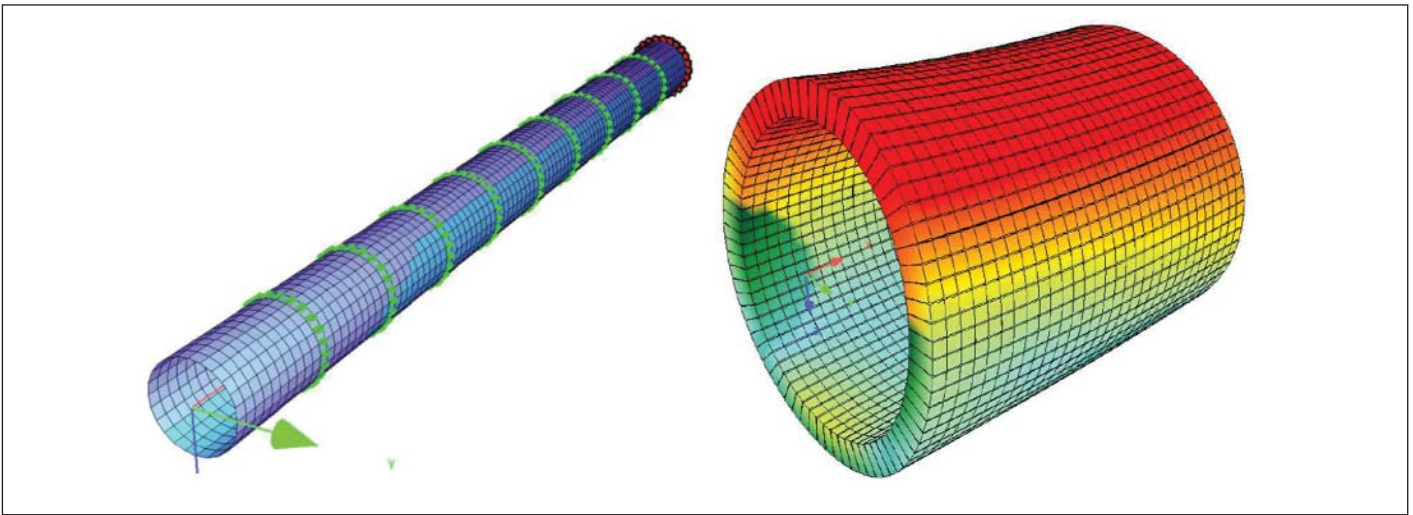
Since completion in October 2013, the Wheatstone micro-tunnel is considered to be the longest pipe-jacked tunnel in the Southern Hemisphere. It is 1,242m in length with an outside diameter of 2.45m and an internal diameter of 2m. There are seven (7) different types of pipes. The length of each is 3m, weighing from 12 to 16 tons depending on the type.

HOCHTIEF Engineering completed the design for the micro-tunnel jacking pipes, except for the inter-jack stations which were designed by THIESS.

The jacking pipes have been designed according to the German guideline DWA-A 161 (2010), “*Structural Calculation of Jacking Pipes*”. It was decided that this provided the



Obr. 5 Úhlové vychýlení a z toho vyplývající rozložení tlaku na spoji dvou trubek
Fig. 5 Angular Deflection and Resulting Stress Distribution in the Joint between two Pipes



Obr. 6 Příklad z 3D analýzy vzájemného působení zeminy a konstrukce důrazem na potrubní spoje

Fig. 6 Exemplary Calculation Plots from 3D-FE Numerical Analyses of the Complex Soil-Structure-Interaction with Emphasis on the Pipe Joints

protože tento předpis poskytoval nejlepší projekční základ a zásady týkající se protlaku a byl aktuálnější než australské předpisy.

Předpis DWA bere v úvahu efekt deformace prstenců způsobený přenosem tlakové síly a jeho vliv na betonové potrubí. Chování těchto zátěž přenášejících prstenců, vložených mezi čela trub ve spojích, má značný dopad na nejvyšší tlaky, které působí na čela trub v průběhu protlačování (obr. 5). V minulosti vedl přílišný tlak k trhlinám v betonovém plášti ve spojích. Toto je důležitým kritériem při projektování, jelikož tyto prstence vykazují významné nelineární chování materiálu v průběhu fáze komprese a dekomprese.

Předpis DWA byl v projektu použit zejména:

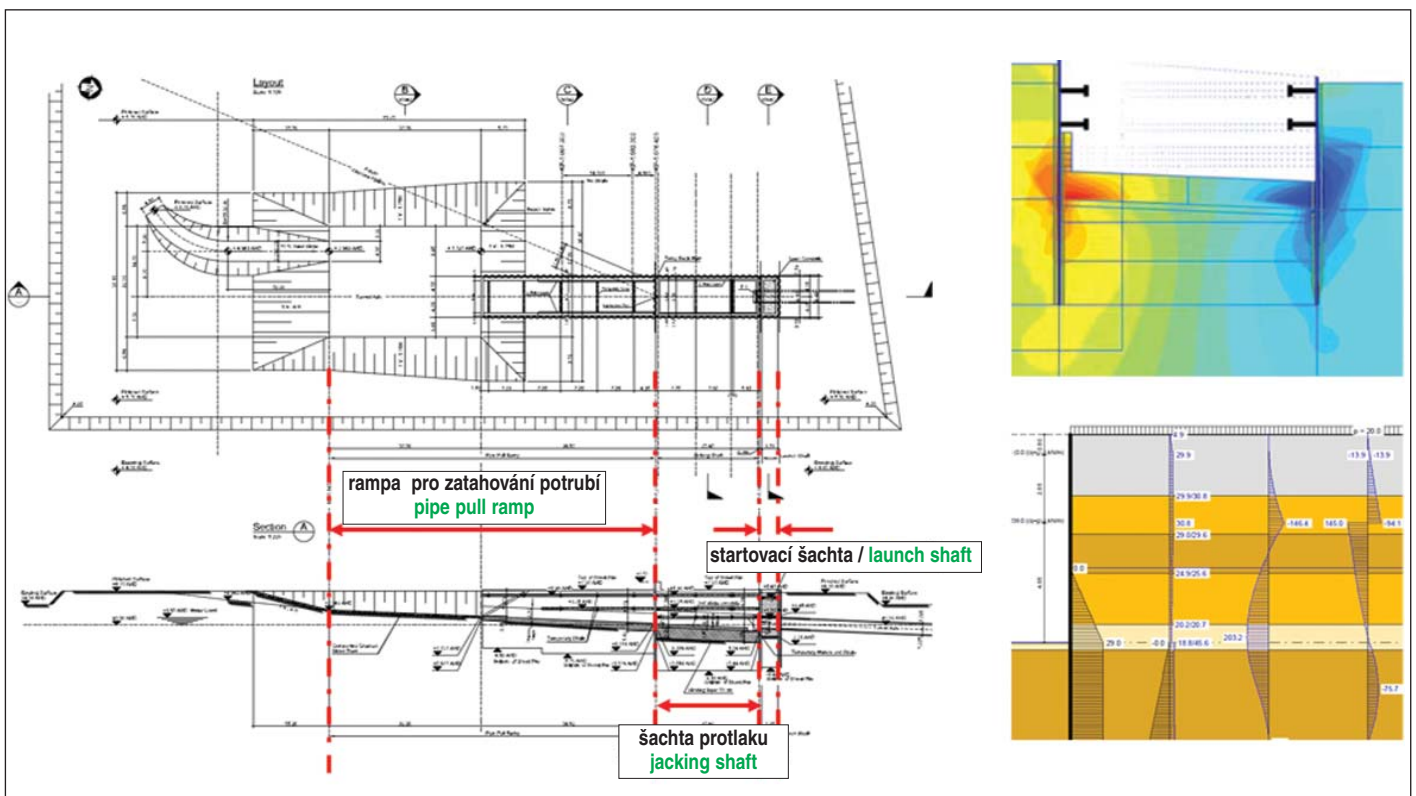
- k určení tlaku zatížení zeminou a z protlačování;
- k podrobnému ověření tloušťky stěny potrubí, respektive kontrole zatížení při protlačování, a to při uvážení:

best design basis and principles for the jacking pipes and is the more current between the Australian and German guidelines.

The DWA guideline takes account of the special effect of the thrust transfer ring deformation and its effect on the concrete pipe. The behavior of these load transfer rings has a significant impact on the peak stresses acting on the pipe joints during the jacking operation (cf. Fig. 5). In the past, overstressing has resulted in concrete cover spalling in the joints. This is an important design consideration as the compression rings show a significant non-linear material behavior during the compression and de-compression phases.

The DWA guideline was used in the design in particular:

- for the determination of forces from ground load and jacking;



Obr. 7 Návrh a podélný řez šachtami na pevnině (vlevo), příklad z 2D analýzy konečných prvků a analýzy metodou mezní rovnováhy (vpravo)

Fig. 7 Layout and Longitudinal Section of the Onshore Shafts (left) / Exemplary Calculation Plots from 2D-FE and Limit Equilibrium Analyses (right)

- sil protlačování a výsledných tlaků a rozložení tlaku na spojích potrubí;
- úhlových odchylek mezi sousedními trubkami kvůli projektované trase;
- nezáměrných odchylek mezi sousedními trubkami způsobenými korekcemi řízení;
- chování materiálu prstence přenášejícího tlakovou sílu.

Komplexní interakce zeminy a konstrukce, zejména zvláštní působení nelineárního chování materiálu prstence přenášejícího tlakovou sílu a jeho vliv na betonové potrubí, byly zanalyzovány pomocí trojrozměrných (3D) numerických metod konečných prvků. Výpočet ze 3D analýzy konečných prvků názorně ukazuje obr. 6. Je možné na něm vidět, že zátěž z protlačování má značný vliv na potrubí.

Celkově je na trase 422 trubek sedmi různých typů včetně ocelových trubek mezilehlých tlačných stanic. Obecně je rozměr veškerého potrubí (s výjimkou potrubí u mezilehlých tlačných stanic) s vnitřním průměrem 2 m a s tloušťkou stěny 225 mm.

Prefabrikované železobetonové protlačované potrubí je vyprojektováno s životností 30 let. Stanovená minimální pevnost betonu u tohoto potrubí je 65 MPa. Ocelové objímky, které pomáhají směrovému vedení potrubí, zamezují bočním posunům sousedních trubek v průběhu protlačování a fixují těsnění po dobu provozního životního cyklu projektu, jsou vyrobeny ze žárově pozinkované oceli. Zdvihací kotvy jsou Reid 10T. Každá trubka má tři průchodky pro injektáž bentonitu.

Stavební jámy na pevnině

Stavební jámy na pevnině jsou trojího typu: startovací jáma, protlačovací jáma a stavební jáma s rampou pro zatahování potrubí (obr. 7). Protlačovací stavební jáma je hlavní jámou pro razící práce. Startovací jáma je pouze malá komora před protlačovací jámou k umožnění zahájení činnosti štítu. Rampa pro zatahování plynového potrubí byla vybudována po dokončení prací na mikrotunelování.

Společnost THIESS, v úzké spolupráci s experty HOCHITEF Infrastructure, vypracovala klíčové pokrokové opatření v technologii protlaku, jímž byla dvojitá protlačovací stanice, která byla schopna záběru o celkové délce 10 metrů a její výkon je 1400 tun tlakové síly. Má dvoufázové fungování, dvoufázové teleskopické rámy pracují se dvěma tlačnými prstenci, které se pomocí horizontálních hydraulických válců odtlačují jeden od druhého. Toto umožnilo, aby byly v jednom cyklu nainstalovány a zatlačeny tři trubky. Válce měly kulaté montážní desky na obou koncích, čímž se omezilo vychylování, aniž by to vyžadovalo jakoukoli další podporu, když došlo k plnému roztahení. Má se za to, že tak došlo ke zkrácení doby protlačování o dvě třetiny.



Obr. 8 Fotografie zobrazující vytažení štítu
Fig. 8 Exemplarily Picture Showing a TBM Recovery

- for detailed verification of the pipe wall thickness respectively a design check for the jacking loads, by taking into account:
 - pipe jacking forces and resulting stresses and stress distribution in the pipe joint;
 - angular deflection between adjacent pipes due to the design alignment;
 - unintentional deflection between adjacent pipes due to steering corrections;
 - material behavior of the thrust transfer ring.

The complex soil-structure-interaction, in particular the special effect of the non-linear material behavior of the thrust transfer ring and its effect on the concrete pipes, has been analyzed utilizing three dimensional (3D) finite element (FE) numerical methods. Figure 6 shows shows exemplarily a calculation plot from a 3D-FE analysis; it can be seen that the jacking load has a notable effect on the pipe.

In total there are 422 pipes along the alignment, with seven (7) different types, including the inter-jack station steel pipes. The general layout for all the pipes (except for the inter-jack station pipes) is an internal diameter of 2 meters with a wall thickness of 225 millimeters.

The precast concrete jacking pipes are designed for a lifetime of 30 years. The specified minimum concrete strength for the jacking pipes is 65MPa. Steel collars, to help guide the pipes and avoid lateral displacements of adjacent pipes during the pipe jacking operation and to hold the sealing gasket in place during operational lifetime of the project, are constructed from hot dipped galvanized steel. The lifting anchors are Reid 10T foot anchors. There are 3 bentonite nozzles in each pipe.

Onshore Shafts

The onshore shafts comprise three sections: The launch shaft, the jacking shaft and the pipe pull ramp (cf. Fig. 7). The jacking shaft is the central shaft for the tunneling process. The launch shaft is only a small chamber in front of the jacking shaft to facilitate the starting procedure for the TBM. The pipe pull ramp was constructed subsequent to completion of the micro-tunneling works.

THIESS, in close cooperation with HOCHITEF's experts had worked out a key advance in the jacking operation, which was the double jacking station. The double jacking system was capable of a total stroke length of 10 meters with a capability of 1,400 tones jacking force. The dual acting, two stage telescopic rams operated through two thruster rings, one pushing off the other. This allowed for three pipes to be installed and pushed in one cycle. The cylinders had spherical mounting plates at each end that allowed for limited misalignment without requiring any intermediate support when fully extended. It is considered that this reduced the jacking operation timeframe by two-thirds.

The shafts were designed with the use of sheet piles. This provided flexibility with the design and construction methodology. The sheet piles ranged in length from 11m to 18m.

The purpose of the launch shaft was to provide suitable ground condition and sealing to commence tunneling. The launch shaft was excavated first, in three stages and back-filled with stabilized sand, before the excavation of the jacking shaft commenced.

The jacking shaft was 20m in length. The jacking shaft was excavated in four stages utilizing a combination of



Obr. 9 Letecký pohled na místo stavby
Fig. 9 Aerial View of the Project Site

zdroj:source: Chevron Australia

Jámy byly vyprojektovány za použití štětovic. To umožnilo flexibilitu projektu a stavebních postupů. Délka štětovic se pohybovala mezi 11 a 18 m.

Účelem startovací jámy bylo poskytnout vhodnou ochranu vůči geologickým podmínkám tak, aby bylo možné zahájit ražby. Startovací jáma byla vykopána nejdříve, a to ve třech fázích, a zpětně zasypána stabilizovaným pískem před tím, než se začalo s výkopem protlačovací jámy.

Délka protlačovací jámy byla 20 m. Protlačovací jáma byla vykopána ve čtyřech fázích za pomoci kombinace dočasného a trvalého pažení a podpěr, přičemž dočasné podpěry mohly být odstraněny poté, co získala požadovanou pevnost vybetonovaná základová deska. Pro postup výkopových prací bylo kritické odvodňování a hlídání hladiny podzemní vody. To proto, aby nedošlo k trhlinám a/nebo zvedání způsobené tlakem vody. Dno jámy bylo vyztuženo betonovou deskou o tloušťce 2 m. Funkcí této základové desky bylo:

- utěsnit dno jámy před možným průsakem spodní vody, kde vnější úroveň spodní vody byla výše než základová deska;
- přenést vztakové síly spodní vody na štětovicovou stěnu;
- poskytnout podpěru v rámci projektu štětovicové stěny;
- poskytnout základ pro protlačovací práce a rozložit tlaky související s protlačováním v průběhu ražeb.

Úspěch protlačovací jámy závisel na správném projektu. Vzájemné působení štětovicových stěn a základové desky muselo být vyprojektováno tak, aby konstrukce odolaly vysokým silám při protlačování potrubí (1400 tun). Nesměla být také překročena únosnost zeminy za čelní stěnou a/nebo dovolená/přípustná míra posunutí stěny. Na projektu Wheatstone Shore Crossing byl využit důmyslný systém, přední stěna s bočními stěnami, kde projekt protlačovací jámy předpokládal, že se zatížení vzniklé protlačováním rozloží mezi železobetonovou přední stěnu a základovou desku v poměru 50/50 %. To znamená, že se zátěž rozkládá a přenáší do země u přední stěny a u bočních štětovicových stěn protlačovací šachty.

Demontážní jáma štítu v moři

Demontážní jáma v moři se nachází na konci trasy mikro-tunelu a sloužila jako cílová jáma pro štít po dokončení protlačovacích prací. Tato jáma bude rozšířena, aby se do ní vešel přechodový výkop pro instalaci plynového potrubí. Jakmile se plynovod zatáhne dovnitř, bude výkop včetně vyústění tunelu zpětně zasypán a zakryt vhodným materiálem pro dlouhodobou ochranu.

Podle technologického postupu z nabídky se k vytažení štítu měla použít nákladní loď s jeřábem a podpůrnými plavidly.

temporary and permanent walers and struts; with the temporary props able to be removed after the concrete base slab has been poured and gained the structurally required compressive strength. Dewatering and water control was critical to the excavation sequence. This was so that hydraulic cracking and/or uplift did not occur. The base within the shaft was a reinforced 2m thick concrete slab. The function of the base slab was to:

- seal up the bottom of the shaft from possible groundwater ingress, where the outside groundwater level is higher than the base slab;
- transfer the uplift forces from the groundwater to the sheet pile wall;
- provide a brace within the design of the sheet pile wall;
- provide a foundation for the jacking operation and to distribute the jacking forces during tunneling.

The success of the jacking shaft hinged on the proper design of the thrust reaction system. The thrust reaction system – in interaction with sheet pile wall and base slab – had to be designed to withstand the high jacking forces (1,400 tons) required to push the pipes through the ground, without exceeding the bearing capacity and/or allowable/tolerable amount of displacement. The Wheatstone Shore Crossing Project utilized a sophisticated thrust reaction system, a headwall with wing-walls, where the jacking shaft design assumed that the jacking loads are shared between the reinforced concrete headwall and base slab in the order of 50-50%. That is, loads are shared with and transferred to the ground at the headwall and at the side sheet pile walls of the jacking shaft.

Offshore TBM Retrieval Pit

The offshore TBM Retrieval Pit is located at the end of the micro-tunnel alignment and served as reception pit for the TBM at the completion of pipe jacking operation. The Pit will be expanded to include a transition trench for the gas trunkline installation. Once the trunkline has been pulled in, the trench including the tunnel exit will be backfilled and covered by appropriate material for long term protection.

The tender methodology involved the use of a barge, with a crane and support vessels to recover the TBM. The material above the TBM was going to be removed by spreading the material away from the machine with a Rotec R2000. Two hydraulic lines are attached to the machine to operate the hydraulic rams so that machine is separated from the first pipe. A lifting beam would be attached to the TBM, lifted to the surface and towed into harbor for removal with a 450 ton crane.

THIESS together with their offshore specialty sub-contractors have developed a new methodology. One of the main drivers for the new methodology is reducing the risk regarding unavailability of barges and tugs due to the offshore work currently being undertaken in Western Australia and Queensland. The new methodology relates to how the TBM is retrieved from the exit pit and brought to the surface. Therefore the excavation of the machine and push off from the first pipe remains the same.

HOCHTIEF Engineering provided a design for the offshore TBM Retrieval Pit including the stabilization measures around the micro-tunnel exit, while accounting for the new methodology utilized by THIESS for the TBM recovery. The stabilization was required to protect the integrity of the

Materiál nad štítem se měl rozprostřít mimo tento razicí stroj za použití Rotecu R2000. Na štít se měla připevnit dvě hydraulická zařízení, pomocí kterých by se oddělil od první trubky. Ke štítu se pak mělo připoutat vahadlo, které by jej vyzvedlo na povrch a dotáhlo do přístavu k demontáži za pomoci 450tunového jeřábu.

Společnost THIESS však společně se subdodavateli specializovanými na tento typ prací vypracovala nový technologický postup. Jedním z hlavních důvodů bylo snížení rizika týkajícího se nedostupnosti nákladních lodí a remorkerů kvůli jiným projektům v moři, které se v té době realizovaly v Západní Austrálii a Queenslandu. Tento nový technologický postup se týkal způsobu vytažení štítu z koncové jámy na povrch. Proto vykopání stroje a oddělení od první trubky zůstalo stejné.

Projekt demontážní jámy poskytla společnost HOCHTIEF Engineering, a to včetně stabilizačních opatření u ústí mikrotunelu, při uvážení nového postupu použitého společností THIESS k vytažení štítu. Byla vyžadována stabilizace k ochraně neporušeného stavu protlačovaného potrubí u ústí mikrotunelu a také jako opatření po jednu sezonu cyklónů včetně zatížení vyplývajícího z instalace plynového potrubí. Projekt obsahoval specifikaci materiálů určených ke zpětnému zásypu.

Technické řešení vzalo v úvahu různé stavební fáze a různá zatížení:

- A. *Předvykopání zóny koncové jámy:*
koncová jáma se vykope o rozměrech přibližně 60x40x6 m, aby umožnila řízené vytažení štítu.
- B. *Zpětný zásyp a dočasná ochrana zóny koncové jámy:*
aby se ochránil svahy nad a okolo ústí mikrotunelu před erozí a destabilizací až do příjezdu razicího stroje a jeho opětovného vytažení, bude koncová jáma zpětně zasypána navrženou zásypovou vrstvou/vrstvami.
- C. *Vykopání zásypového materiálu:*
navržená zásypová vrstva/vrstvy se vykopou a stroj se vytáhne z koncové jámy.
- D. *Zpětný zásyp a ochrana zóny koncové jámy pro případné období cyklónů:*
aby se ochránila neporušenost protlačovaného potrubí u ústí mikrotunelu před možným obdobím cyklónů až do instalace plynovodu, bude koncová jáma zpětně zasypána navrženou zásypovou vrstvou/vrstvami.
- E. *Vykopání materiálu pro zpětný zásyp po instalaci plynovodu a dlouhodobá ochrana:*

jacking pipes at the micro-tunnel exit and did account for one cyclone season including loads from the gas trunkline installation. The design also included the specification for the engineered backfill materials.

The design solution accounted for various construction and loading phases:

- A. *Predredging of Exit Pit Zone:*
exit Pit will be excavated in the limits of approx. 60m x 40m x 6m to allow for a controlled TBM recovery.
- B. *Backfilling and Temporary Protection of Exit Pit Zone for TBM Arrival:*
in order to protect the slopes over and around the micro-tunnel exit from erosion and destabilization up to TBM arrival and recovery the Exit Pit will be back-filled with engineered backfill layer(s).
- C. *Excavation of Backfill Material for TBM Recovery:*
the engineered backfill layer(s) will be excavated and the TBM will be recovered from the Exit Pit.
- D. *Backfill and Protection of Exit Pit Zone for Potential Cyclone Season:*
in order to protect the integrity of the jacking pipes at the micro-tunnel exit from a potential cyclone season up to trunkline installation the Exit Pit will be back-filled with engineered fill layer(s).
- E. *Excavation of Backfill Material for Trunkline Installation and Long-term Protection:*
in the last phase a transition trench will be excavated for gas trunkline installation. The trunkline will be pulled into the flooded but not back filled tunnel.

The composition and thickness of the backfill layers, as well as the grading of the engineered backfill materials were driven by the specific requirements of each phase of the construction sequence, e.g. material to be suitable as backfill and adequate for protection of the Exit Pit zone during micro-tunneling operation, material to be suitable for suction dredging and material to be suitable for re-use, and material to be adequate for the protection of the Exit Pit zone during a potential cyclone season. To address these specific requirements, erosion stability and filter stability analyses were performed. Based on the performance requirements, geometrical and mechanical specifications for the backfill materials have been developed.



Obr. 10 Betonové protlačované potrubí (vnější průměr = 2,45 m) dodané na stavbu
Fig. 10 Concrete Jacking Pipes (OD=2.45m) being delivered to the Project Site



Obr. 11 Bentonitový štít Herrenknecht AVND 2000 AB na stavbě
Fig. 11 Herrenknecht AVND 2000 AB TBM at the Project Site

v poslední fázi se vykope přechodový výkop pro instalaci plynovodu. Ten se zatáhne do zaplaveného, ale ne zpětně zasypaného tunelu.

Složení a mocnost zásypových vrstev a také frakce navržených zásypových materiálů byly určeny specifickými požadavky na každou fázi stavebního postupu, například materiál vhodný ke zpětnému zásypu a k ochraně zóny koncové jámy v průběhu mikrotunelování, materiál vhodný k odtěžení pomocí sacího bagru a vhodný k opětovnému použití a adekvátní materiál k ochraně zóny koncové jámy v průběhu možného období cyklonů. Aby se těmto konkrétním požadavkům vyhovělo, byly provedeny analýzy erozní stability a stability při průsaku vody. Na základě výkonových požadavků byly vypracovány granulometrické a mechanické specifikace zásypových materiálů.

POSTUP STAVBY A SHRNUTÍ

Tento článek obsahuje shrnutí projektu Wheatstone Shore Crossing, představuje jeho hlavní rysy a zabývá se hlavními aspekty projektu mikrotunelování.

V roce 2013 postavila společnost THIESS Pty Ltd protlačovaný mikrotunel za pomoci technologie štítování o délce 1242 m, o vnějším průměru 2,45 m a vnitřním průměru 2 m včetně veškerých podpůrných systémů pro ražby, tj. čistírny odpadních vod, separačních zařízení a usazovacích nádrží. Přes tento tunel pod oceánem a pod pobřežím se spojí velkopřůměrový (44") plynovod z plošiny nacházející se v moři se zařízením LNG v oblasti Ashburton North, která je na severozápadě Západní Austrálie poblíž města Onslow.

Poté, co nezávislý expert společnosti Chevron posoudil a schválil projekční balíčky, získala společnost THIESS vyžadovaná povolení ke stavbě. Stavební práce spočívající v mikrotunelování byly zahájeny na začátku března roku 2013. Místo stavby z leteckého pohledu je na obr. 9. Výroba prefabrikovaného betonového protlačovaného potrubí začala také zkraje března roku 2013. Dodání prvních trubek na stavbu je na obr. 10.

Stavba protlačovací a startovací jámy pomocí štětovic (obr. 12) probíhala do konce července roku 2013, kdy byl štít spuštěn do protlačovací jámy (obr. 14). Následně byla na začátku srpna zahájena ražba, prorážka do koncové jámy proběhla na začátku října. Následovalo vytažení razičského stroje a rozšíření stavební jámy na pevnině rampou pro zatahování potrubí (obr. 13). Předmět díla společnosti THIESS byl finálně dokončen na konci listopadu 2013.



Obr. 12 Zajištění stavební jámy štětovicovými stěnami
Fig. 12 Sheet-Piling Works

CONSTRUCTION PROGRESS AND SUMMARY

This paper provides an overview of the Wheatstone Shore Crossing Project, presents the key features, and discusses the main aspects of the micro-tunneling design.

In 2013 THIESS Pty Ltd constructed a 1,242m TBM pipe jacked micro-tunnel with an external diameter of 2.45m, an internal diameter of 2.0m, including all support systems for the tunneling works, which consists of a water treatment plant, slurry plants and sediment ponds. The tunneled shore crossing under the ocean will connect a large diameter (44") gas pipeline from the an offshore platform in Australia with the Wheatstone LNG Plant at Ashburton North located in the north west of Western Australia near the town of Onslow.

Upon a review and acceptance of the design packages by Chevron's independent reviewer, THIESS received the required construction certificates. The micro-tunneling on-site construction works commenced in early May 2013. Figure 9 shows an aerial view of the project site. The production of the precast concrete jacking pipes had commenced earlier in March 2013. Figure 10 shows the delivery of the first pipes to the project site.

Construction of the Jacking- and Launch Shaft, by means of sheet-pile driving works (refer to Fig. 12), took place until end of July 2013, when the TBM was lowered into the



Obr. 13 Hloubení stavební jámy
Fig. 13 Shaft Excavation Works



Obr. 14 Protlačovací stanice, pohled zevnitř tunelu
Fig. 14 Double Jacking Station / View Inside the Tunnel

Projekt na tuto technicky náročnou stavbu dodala společnost HOCHTIEF Engineering. Společnost THIESS, patřící do holdingu HOCHTIEF, realizovala tuto stavbu a ukázaly se zde výhody plynoucí ze vzájemné spolupráce firem uvnitř holdingu, zejména s ohledem na realizovatelnost projektu a využití inovativního projekčního přístupu k náročným požadavkům stavby. To prakticky není možné, pokud projektant i zhotovitel mají jiný systém řízení s rozdílnou strategií a výsledným cílem.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři by chtěli poděkovat zhotoviteli – společnosti THIESS Pty Ltd – za pomoc s publikací tohoto článku. Zvláštní poděkování patří Andreasi Lehrovi a Danielu Backhouseovi z THIESS a Carstenu Schulte z projekčního týmu HOCHTIEF Engineering za jejich revize a konstruktivní komentáře.

TANER AYDOGMUS, taner.aydogmus@hochtief.de,
TAydogmus@flatironcorp.com,
HOCHTIEF Engineering GmbH,
Flatiron Constructors, Inc.,
CARSTEN SCHULTE,
carsten.schulte@hochtief.de,
HOCHTIEF Engineering GmbH

Recenzovali: Ing. Karel Franczyk, Ph.D., Ing. Tomáš Zítka

Jacking Shaft (refer to Fig. 14). Subsequently the tunneling commenced at the beginning of August and the TBM reached the Exit Pit at the beginning of October. Recovery of the TBM and extension of the Onshore Shafts with the Pipe Pull Ramp (refer to Fig. 13) followed, before construction of THIESS' scope was finally completed at the end of November 2013.

The design of this exciting and technically challenging project was delivered by HOCHTIEF Engineering. THIESS has commented on numerous occasions of their satisfaction with the design work performed and noted the key benefits of partnering with HOCHTIEF Engineering as being their design focus on constructability and their innovative design approach for challenging construction demands.

The successful completion of the Wheatstone Shore Crossing design would not have been possible without THIESS's support and professional excellence. Through an innovative approach that made the Wheatstone Microtunnel Project achieve excellence.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Contractor THIESS Pty Ltd for their support in publishing this paper. Special thanks goes to Andreas Lehr and Daniel Backhouse of THIESS for their reviews and constructive comments.

TANER AYDOGMUS, taner.aydogmus@hochtief.de,
TAydogmus@flatironcorp.com,
HOCHTIEF Engineering GmbH,
Flatiron Constructors, Inc.,
CARSTEN SCHULTE,
carsten.schulte@hochtief.de,
HOCHTIEF Engineering GmbH

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Unpublished Project Design Documents. HOCHTIEF Engineering GmbH, Consult Infrastructure, 2012/2013
- [2] Geological Survey of Western Australia (1982). Geological Series, 1:250 000, Onslow Sheet
- [3] DWA-A 161 – Entwurf: Statische Berechnung von Vortriebsrohren – Entwurf (September 2010) – in German. *Structural Calculation of Jacking Pipes – Draft (September 2010)*