

NÁVRH, KONSTRUKCE A PROVOZ MOBILNÍHO BEDNĚNÍ PRO HLOUBENÉ TUNELY

DESIGN, STRUCTURE, AND OPERATION OF MOBILE FORMWORK FOR CUT-AND-COVER TUNNELS

PETR BORTLÍK

ABSTRAKT

Tento článek popisuje vývoj, návrh a realizaci mobilního bednění pro hloubený tunel v rámci rekonstrukce dopravní infrastruktury. Bednění bylo navrženo jako zcela nový prvek („z čistého stolu“) s cílem výrazně urychlit výstavbu a zároveň splnit specifické požadavky zadavatele. Hlavním cílem návrhu bylo minimalizovat potřebu ruční manipulace, zvýšit efektivitu práce a umožnit snadný přesun zařízení mezi jednotlivými úseky tunelu bez nutnosti demontáže. Po dokončení návrhu následovala výroba, funkční zkoušky a uvedení zařízení do provozu. V rámci provozního ověření byla potvrzena únosnost jednotlivých prvků v souladu se statickým výpočtem. Součástí projektu byla také montáž zařízení přímo na místě instalace a jeho přesun do druhého tunelového tubusu. Celý proces – od návrhu přes výrobu až po instalaci – byl realizován v časovém horizontu přibližně 8–10 měsíců, což představuje mimořádně rychlou realizaci vzhledem k rozsahu a technické náročnosti zařízení.

ABSTRACT

This article describes the development, design, and realisation of mobile formwork for a cut-and-cover tunnel within the reconstruction of transportation infrastructure. The formwork was designed as an entirely new component (“a blank canvas”) with the goal of significantly improving the speed of construction and also to meet the specific requirements of the client. The main goal of the design was to minimise the need for manual manipulation, increase work effectiveness, and facilitate easy relocation of the device between individual sections of the tunnel without the need for disassembly. Following the completion of the design, the fabrication, functional tests, and launching of the device ensued. Within operational verifications, the load-bearing capacity of individual elements was confirmed to correlate with the static design. Also, a part of the project was the assembly of the device directly at the site of installation and its relocation into the second tunnel tube. The entire process – from design, through fabrication to assembly – was realised in a time frame of approximately 8–10 months, which represents an exceptionally fast realisation regarding the extent and technical nature of the device.

ÚVOD

V posledních letech dochází v oblasti podzemního stavitelství k výraznému posunu směrem k vyšší efektivitě, bezpečnosti a technologické flexibilitě. Zvláště v městském prostředí, kde je výstavba často omezena prostorem, časem a přísnými bezpečnostními předpisy, je nezbytné hledat inovativní řešení, která umožní zrychlení stavebních procesů bez kompromisů v oblasti kvality a provozní spolehlivosti.

Jedním z takových projektů je vývoj mobilního bednění pro hloubený tunel v norském Oslu, který je součástí rozsáhlé modernizace dopravní tepny E18. Jedná se o tunel dlouhý 460 m s dvěma tunelovými tubusy v každém směru se čtyřmi jízdními pruhy. Zadání, které obdržela společnost OSTROJ a.s., představovalo komplexní technickou výzvu – navrhnout zařízení, které bude plně přizpůsobeno specifickým podmínkám stavby, umožní rychlou a bezpečnou betonáž stěn i stropu v jednom kroku a zároveň bude snadno přemístitelné bez nutnosti demontáže.

Projekt byl od počátku koncipován jako vývoj „z čistého stolu“, bez použití existujících systémových řešení. To umožnilo navrhnout zařízení přesně podle potřeb zákazníka, ale zároveň kladlo vysoké nároky na konstrukční kreativitu, výpočtovou přesnost a důsledné testování. Výsledkem je mobilní bednicí systém s výškovou variabilitou v rozsahu 6–8 m, šířkovou roztažitelností a celkovými půdorysnými rozměry jednoho bloku 20 × 20 m,

INTRODUCTION

In recent years, a distinct shift towards higher efficiency, safety, and technological flexibility has been happening in the field of underground construction. Especially in urban areas, where construction is often constricted by space, time, and stringent safety regulations, it is vital to seek innovative solutions that facilitate the acceleration of construction processes without compromises in the areas of quality and operational reliability.

One of these projects is the development of a mobile formwork system for a cut-and-cover tunnel in Oslo, Norway, which is a part of an in-depth modernisation of the E18 arterial road. In question is a 460m long tunnel with two tunnel tubes and four driving lanes in each direction. The assignment received by the OSTROJ a.s. Company posed a complex technical challenge – design a device that will be fully adapted to specific conditions of the construction, it will allow fast, safe concreting of the walls and even ceiling in one step, and simultaneously it will be easily movable without the need for disassembly.

The project was conceived from the get-go as a “blank canvas” design without using existing system solutions. That made it possible to design a device to precisely fit the needs of the customer. However, it also made demands on construction creativity, computing accuracy, and thorough testing. The result is a mobile formwork system with vertical variability in the range of 6–8m, lateral extendibility, and overall ground plan dimensions

kteřý byl navržen s důrazem na minimalizaci ruční manipulace a optimalizaci pracovních procesů.

Veškerá projektová dokumentace tunelu byla zpracovávána v prostředí 3D modelování s online přístupem pro všechny zúčastněné strany. Tento přístup umožnil průběžné sledování vývoje návrhu technologického zařízení a operativních reakcí na jeho změny. Významně tak přispěl ke zvýšení efektivity projektových činností a ke zlepšení komunikace mezi projektantem a investorem.

Tento článek popisuje celý proces návrhu, výpočtového ověření a provozního testování zařízení. Důraz je kladen na problémy, které bylo nutné překonat, a na inovativní přístupy, které umožnily realizaci zařízení v rekordně krátkém čase. Projekt je příkladem úspěšného propojení tradičních technologií s moderními požadavky na efektivitu a bezpečnost v oblasti výstavby hloubených tunelů.

KDYŽ SE TECHNIKA POTKÁ S INSPIRACÍ Z PODZEMÍ – NÁVRH KONSTRUKCE

V rámci návrhu mobilního bednění pro hloubený tunel v Oslu bylo zvoleno konstrukčně promyšlené a zároveň praktické řešení, které vycházelo z požadavků na snadnou manipulaci, provozní flexibilitu a bezpečnost. Základní koncepce spočívala v rozdělení bednění na dva samostatné díly, které při betonáži fungují jako jeden celek. Toto rozhodnutí bylo učiněno na základě technických a logistických omezení – konstrukce o půdorysných rozměrech 20 × 20 m by jako jeden celek nebyla efektivně manipulovatelná ani přepravitelná.

Po definování základní koncepce následovala konstrukční fáze, která se zaměřila na návrh nosné struktury a její podepření. Vzhledem k délce zařízení bylo nutné navrhnout podpěrný systém, který by minimalizoval potřebu ruční práce a zároveň zajistil dostatečnou stabilitu. Inspirace byla převzata z důlního průmyslu, konkrétně z technologie hydraulických stojek, které OSTROJ a.s. vyrábí již po několik desetiletí. Tyto prvky byly adaptovány pro použití v bednicím systému, což představovalo inovativní přístup v oblasti tunelového stavitelství. Na základě výpočtů bylo stanoveno, že pro celý systém bude zapotřebí 88 hydraulických podpěr.

of one block of 20 × 20m, which was designed with the aim of minimising manual manipulation and optimising work processes.

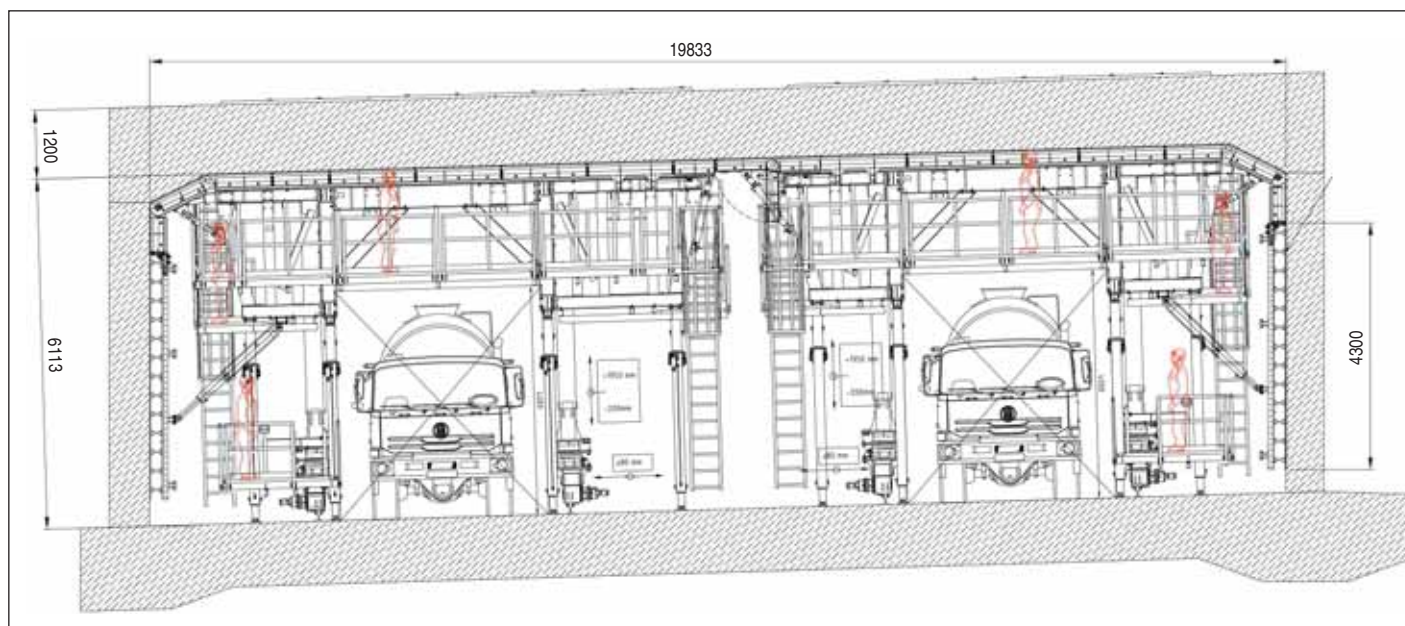
The entire project documentation for the tunnel was made in a 3D modelling environment with online access to all the parties involved. This access allowed continuous monitoring of the developing design of the technological device and operational reactions to its changes. Therefore, it significantly contributed to the increase in effectiveness of project activities and to the improvement of communication between the designer and the customer.

This article describes the entire design process, calculation verification, and operation testing of the device. Emphasis is put on problems that needed to be overcome, and on innovative approaches, which facilitated the realisation of the device in record time. The project is a case of a successful connection of traditional technologies with modern requirements for efficiency and safety in the area of cut-and-cover tunnel construction.

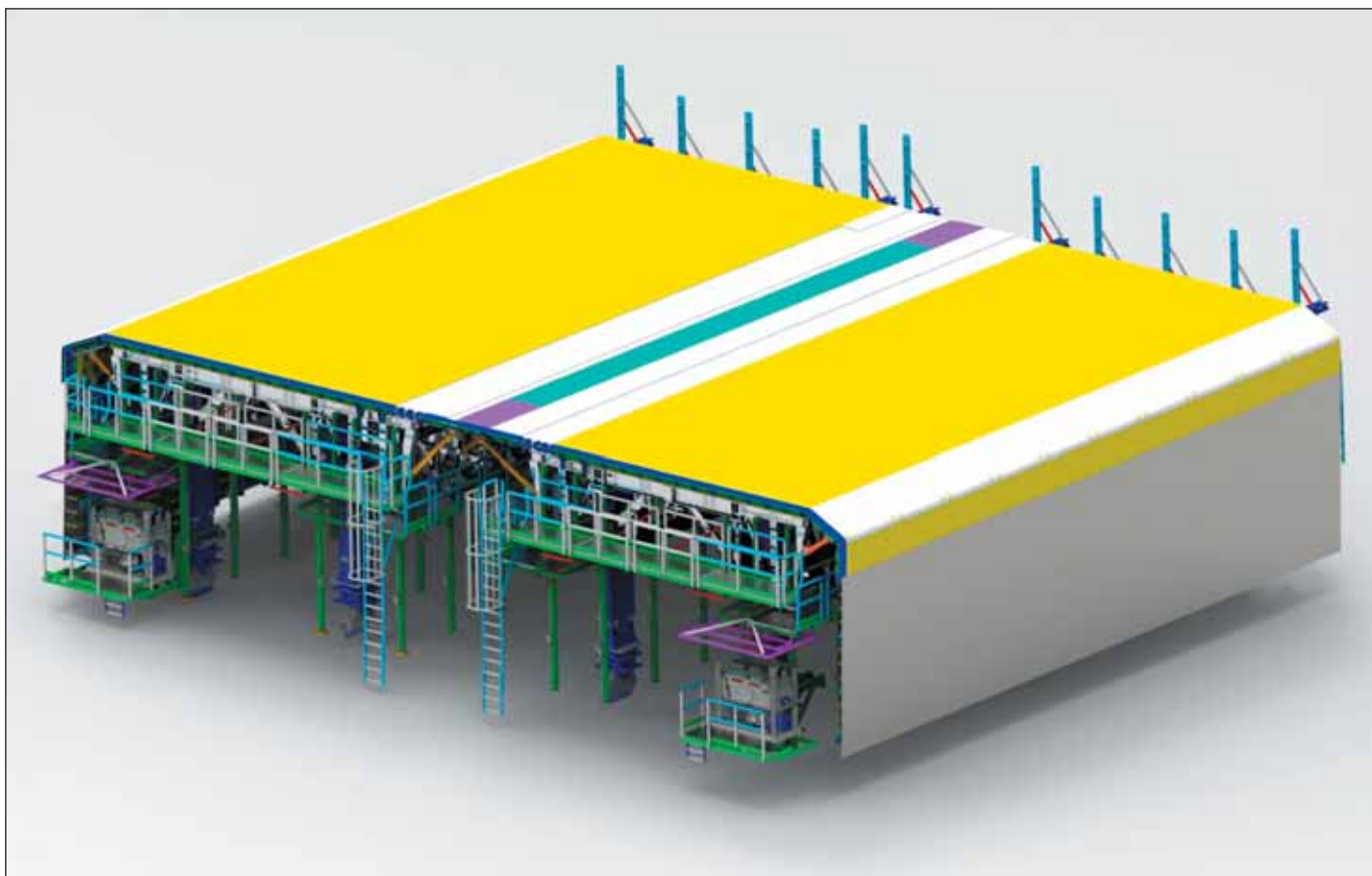
WHEN TECHNOLOGY MEETS INSPIRATION FROM THE UNDERGROUND – STRUCTURE DESIGN

The chosen design for mobile formwork for a cut-and-cover tunnel in Oslo was a structurally elaborate as well as practical solution, which was based on the requirements for easy manipulation, operational flexibility, and safety. The fundamental conception resides in the separation of the formwork into two standalone parts, which work as one unit during concreting. This decision was made on the basis of technical and logistical constraints – the structure with ground plan dimensions of 20 × 20m would not be effectively controllable or movable as a whole.

After defining the basic conception, the construction phase followed, which focused on the design of the load-bearing structure and its support. Regarding the length of the device, it was necessary to design a supporting system that would minimise the need for manual labour, together with securing sufficient stability. Inspiration was borrowed from the mining industry, specifically from the technology of hydraulic struts, which OSTROJ a.s. has already been producing for decades. These components were adapted for use in the formwork system, which represented an innovative approach in the area of tunnel construction. Determined



Obr. 1 Návrhový koncept bednění
Fig. 1 Formwork design concept



Obr. 2 3D model zařízení
Fig. 2 3D model of the device

Zařízení bylo navrženo s výškovou variabilitou v rozsahu 6–8 m, kterou zajišťují hydraulické válce. Šířková roztažitelnost byla realizována pomocí výsuvných stropnic podle mechanizovaných výztuží běžně používaných v důlním prostředí v České republice, Polsku a na Slovensku. Tato konstrukční flexibilita umožňuje přizpůsobení zařízení různým geometriím tunelového profilu.

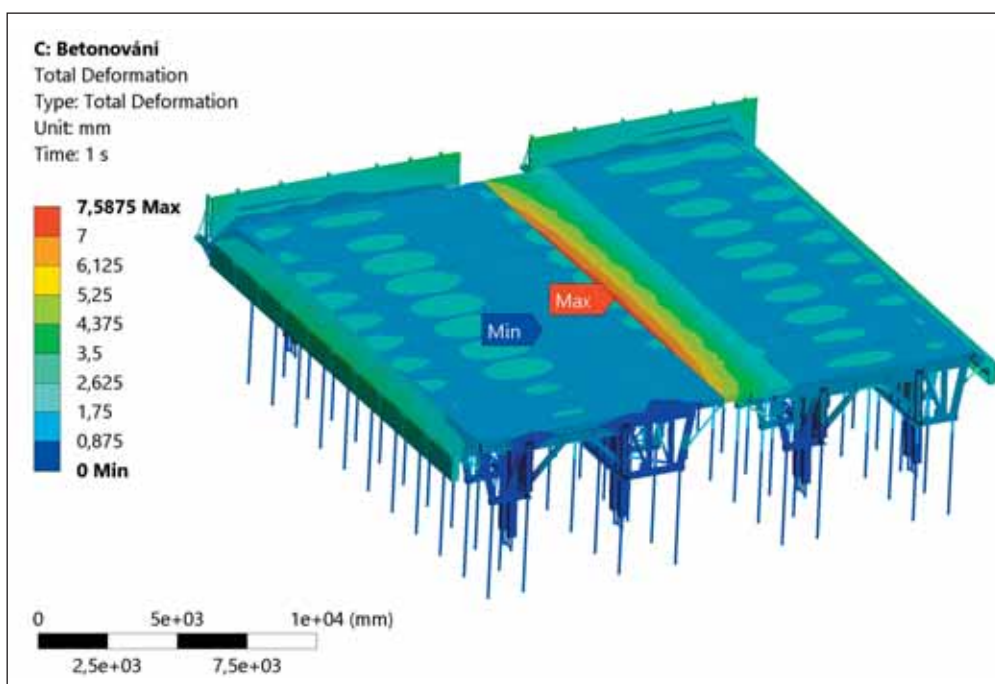
Dalším technickým oříškem bylo zavěšení stěnového bednění, neboť zákazník požadoval možnost současné betonáže stěn i stropu, což není běžným standardem. Po sérii konzultací bylo zvoleno řešení kombinující systémové bednění ovládané hydraulickými válci. Toto řešení je konstrukčně jednoduché, avšak vykazuje nižší tuhost, což bylo zohledněno v návrhu a výpočtech bednění.

Pohon zařízení zajišťuje hydraulický agregát vybavený bezpečnostními prvky a možností vzdáleného monitorování a programování. Zařízení bylo navrženo tak, aby bylo plně funkční i v zimních podmínkách, což bylo nezbytné vzhledem k lokalitě stavby.

Výsledkem konstrukčního návrhu je mobilní bednění tvořené dvěma

on the basis of a calculation was, that for the entire system, 88 hydraulic struts will be needed.

The device was designed with a vertical variability ranging from 6 to 8m, which is provided by hydraulic cylinders. Width extendibility was realised thanks to girders telescoping along powered roof supports commonly used in the mining environment



Obr. 3 Max. deformace při betonování – 8 mm
Fig. 3 Max. deformation during concreting – 8mm

samostatnými vozíky pohybujícími se po kolejích (obr. 1 a 2). Celý systém byl navržen v souladu s platnými evropskými normami a standardy, prošel analýzami rizik a byl doplněn o veškerou potřebnou dokumentaci pro vydání ES prohlášení o shodě. Součástí dodávky je také návod k použití, seznam náhradních dílů a kompletní výkresová dokumentace.

VÝPOČTOVÉ ŘEŠENÍ BĚDNĚNÍ

S ohledem na rozsah a komplexnost navrženého zařízení bylo rozhodnuto provést dva nezávislé výpočty, které by vzájemně ověřily správnost návrhu a poskytly relevantní výsledky odpovídající reálnému provozu. Prvním krokem byl klasický statický posudek, který sloužil jako základní ověření únosnosti a stability konstrukce. Druhým, paralelně vedeným přístupem, byla numerická simulace pomocí metody konečných prvků (MKP) v programu ANSYS (obr. 3), která umožnila detailní analýzu napětí a deformací v jednotlivých částech konstrukce.

Výpočtová fáze byla mimořádně náročná jak z hlediska výpočetního času, tak i volby vhodné velikosti výpočetních elementů. Kvůli k velkému množství konstrukčních prvků bylo nezbytné optimalizovat síť tak, aby výsledky nebyly zkresleny, ale zároveň bylo možné je získat v rozumném čase.

Vzhledem k umístění zařízení v městském hloubeném tunelu bylo nutné zohlednit komplexní zatěžovací stavy. Kromě vlastní tíhy konstrukce a zatížení čerstvým betonem (cca 1200 tun) bylo nutné uvažovat také zatížení od armatury (cca 100 tun), zatížení větrem a sněhem, které jsou v dané lokalitě významné, a dále provozní zatížení vznikající při manipulaci a přesunu zařízení. Všechny tyto hodnoty byly dále násobeny bezpečnostním koeficientem 1,5, což vedlo k velmi vysokým návrhovým hodnotám.

Cílem výpočtové části bylo získat výsledky, které se budou shodovat v obou metodách výpočtu a potvrdí tak správnost návrhu. Po zadání všech okrajových podmínek a zatěžovacích stavů byly výsledky napětí a deformací v obou výpočtech téměř totožné, což potvrdilo správnost modelu i vstupních parametrů.

Zvláštní pozornost byla věnována zatížení podpěrných stojek v maximálně vysunutém stavu, neboť právě zde je konstrukce nejvíce náchylná ke ztrátě stability. Výsledky výpočtů umožnily přesné dimenzování také těchto prvků a ověření jejich bezpečnosti.

Zařízení nebylo dimenzováno pouze na statické zatížení během betonáže, ale také na stabilitu při přesunu a při provozu ve výškových úrovních 6 a 8 m. V těchto případech bylo nutné zohlednit boční zatížení větrem působící na velké plochy stěnového bednění, které by mohlo ovlivnit stabilitu celého systému.

in the Czech Republic, Poland, and Slovakia. This design flexibility enables the device to adapt to different tunnel profile geometries.

Another technical challenge was the suspension of wall formwork, since the customer required an option of concurrent concreting of the walls and the ceiling, which is not common practice. After a series of consultations, a solution combining system formwork controlled by hydraulic cylinders was chosen. This solution is simple construction-wise, although it shows lower stiffness, which was taken into account in the design and calculations of the formwork.

Propulsion of the device is provided by a hydraulic generator fitted with safety components and the option of remote monitoring and programming. The device was designed so that it would be fully functional even in winter conditions, which was indispensable in regard to the location of the construction site.

The result of the construction design is a mobile formwork system made up of two standalone carts moving on rails (Fig. 1 and 2). The entire system was designed in accordance with valid European norms and standards. It passed risk analysis and was supplemented by all the necessary documentation for the release of a CE Conformity Declaration. The delivery also contains a user manual, a list of spare parts, and the complete drawing documentation.

FORMWORK COMPUTATIONAL SOLUTION

Regarding the extent and complexity of the designed device, it was decided to carry out two independent calculations, which would reciprocally verify the correctness of the design and provide relevant results correlating to actual use. The first step was a classic static analysis, which served as a fundamental verification of the load-bearing capacity and stability of the structure. Second,



Obr. 4 Zkouška podstavného válce na vzpěr a zkouška těsnosti
Fig. 4 Buckling test of a pedestal cylinder and tightness test



Obr. 5 Kontrolní montáž a funkční zkoušky v OSTROJ a.s.
Fig. 5 Inspection assembly and functional tests at OSTROJ a.s.

FUNKČNÍ ZKOUŠKY ZAŘÍZENÍ

Před samotným uvedením zařízení do provozu byla provedena řada funkčních a zátěžových zkoušek, jejichž cílem bylo ověřit konstrukční návrh, provozní spolehlivost a bezpečnost jednotlivých komponent. Zvláštní pozornost byla věnována podpěrným stojkám, které byly testovány na vzpěr v maximálně vysunutém stavu. Tato zkouška byla klíčová pro ověření jejich nadimenzování vzhledem k očekávanému zatížení (obr. 4).

Další zkoušky se zaměřily na pokles při maximálním zatížení po dobu ustavení zařízení a na těsnost systému. Tyto parametry jsou zásadní pro zajištění dlouhodobé funkčnosti a bezpečnosti zařízení v provozu (obr. 4).

Zkušební montáž zařízení (obr. 5) probíhala ve dvou fázích. V první fázi byla zkompletována jedna polovina bednění, následně

a parallel run approach was a numerical simulation using the Finite Element Method (FEM) in the ANSYS program (Fig. 3), which facilitated detailed analysis of stress and deformation in individual sections of the structure.

The computation phase was exceptionally demanding not only from the viewpoint of computing time, but also due to the choice of appropriate sizes of computing elements. Regarding the large amount of structural elements, it was necessary to optimise the mesh such that the results would not be distorted, but simultaneously, that the calculations would be carried out in a reasonable time.

Given that the device was located in an urban cut-and-cover tunnel, it was necessary to take into consideration complex load states. Besides the dead load of the

structure and loading by fresh concrete (ca 1200 tons), it was also vital to take into account reinforcement loads (ca 100 tons), wind and snow loads, which are significant in the area, and then live loads that arise during the manipulation and moving of the device. All of these values were then multiplied by a factor of safety of 1.5, which led to very high design values.

The goal of the computational part was to gather results that would correlate in both of the calculation methods and would therefore confirm the correctness of the design. After inputting all of the boundary conditions and load states, the results of stresses and deformations in both calculations were nearly identical, confirming the correctness of the model and even the input parameters.

Extra attention was given to loads of supporting struts in the maximally extended state, since exactly here the structure is



Obr. 6 Zařízení při betonáži tunelu Høvik v rámci projektu modernizace silnice E18 v norském Oslu
Fig. 6 The device during concreting of the Høvik tunnel within the E18 road modernisation project in Norwegian Oslo



Obr. 7 Zařízení při betonáži ve výšce 8 metrů – tunel Høvik v rámci projektu modernizace silnice E18 v norském Oslu

Fig. 7 The device during concreting at a height of 8 metres – the Høvik tunnel within the E18 road modernisation project in Norwegian Oslo

demontována a nahrazena druhou polovinou. Tento postup byl zvolen z důvodu prostorových omezení v montážní hale, které neumožňovaly kompletní sestavení celého systému najednou. Po každé montáži byla provedena komplexní funkční zkouška, zahrnující ověření všech klíčových funkcí – pojezdu, zvedání, stability a ovládání.

Celý proces montáže probíhal za přísného dohledu technického týmu, který kontroloval, aby nedošlo k záměně jednotlivých dílů, dále přesnost spojů a kompatibilitu komponent. Zařízení bylo následně rozloženo na transportní celky, které byly navrženy tak, aby vyhovovaly rozměrovým a hmotnostním limitům pro kamionovou dopravu. Po přepravě byly jednotlivé části připraveny k finální montáži přímo na staveništi.

UVEDENÍ DO PROVOZU A OVĚŘENÍ V REÁLNÝCH PODMÍNKÁCH

Po přepravě jednotlivých částí zařízení na staveniště v Oslu proběhla finální montáž dle předem stanoveného technologického postupu. Vzhledem k přísným bezpečnostním standardům platným v severských zemích, a zejména v Norsku, byla kladena mimořádná pozornost na každý detail montáže, manipulace i následného provozu. Řada požadavků byla řešena již v přípravné fázi projektu tak, aby byl zajištěn (plný) soulad s místními předpisy a očekávanými investora.

Než mohlo být zařízení uvedeno do provozu, bylo nutné absolvovat tři klíčové kroky, které představují nezbytnou podmínku pro legální a bezpečný provoz bednicího systému:

- kontrola výkresové dokumentace;
- ověření statického výpočtu;
- fyzická kontrola na místě montáže, zda zařízení odpovídá schválené dokumentaci a kontrola provozní dokumentace.

Všechny tyto kroky byly kontrolovány nezávislou třetí stranou a po jejich úspěšném absolvování bylo zařízení uvedeno do provozu (obr. 6). První betonážní blok byl podroben pečlivému

most prone to loss of stability. The calculation results enabled precise design even of these elements and the verification of their safety.

The device was designed not only for static loads during concreting but also for stability during relocation and during operations in 6 and 8-metre vertical levels. In these scenarios, it was necessary to take into account lateral wind loads acting on large areas of the formwork wall, which could have affected the stability of the entire system.

DEVICE FUNCTIONAL TESTS

Before putting the device into operation, a range of functional and stress tests were carried out, their goal being to confirm the structural design, operational reliability, and safety of individual components. Particular attention was given to the supporting struts, which were tested for buckling in the maximally extended state. This test was pivotal for the verification of

their design regarding the expected loads (Fig. 4).

Further tests focused on the deflection during maximum loading throughout device stabilisation and on the tightness of the system. These parameters are essential for long-term functionality and safety of the device in operation (Fig. 4).

Trial assembly of the device (Fig. 5) was carried out in two stages. In the first stage, one half of the formwork was completed, subsequently dismantled, and replaced by the second half. This procedure was chosen due to spatial constraints in the assembly hall, which did not enable a complete assembly of the entire system all at the same time. After each assembly, a complex functional test was carried out, including verification of all key functions – travelling, hoisting, stability, and controls.

The entire assembly process took place under strict supervision of the technical team, which checked that a mix-up of individual parts would not occur, then the precision of joints, and compatibility of components. The device was then taken apart into transport units, which were designed so that they would meet dimensional and mass limits for lorry transport. After transport, individual parts were prepared for final assembly directly on the construction site.

COMMISSIONING AND VERIFYING IN REAL CONDITIONS

After transporting individual parts of the device to the construction site in Oslo, final assembly took place according to a previously determined technological procedure. In regard to strict safety standards valid in Nordic countries, and in particular in Norway, extraordinary attention was given to each assembly detail, manipulation, and even ensuing operation. A plethora of requirements was addressed already in the preparation phase of the project to secure (complete) concord with local regulations and investor expectations.

Before the device could be put in service, three key steps that pose an essential requirement for legal and safe operation of



Obr. 8 Průjezd bednicího zařízení pod mostem – příčný přesun zařízení – v pozadí tunel Høvik v rámci projektu modernizace silnice E18 v norském Oslu

Fig. 8 Passing of the formwork device beneath a bridge – transverse relocation of the device – in the background, the Høvik tunnel within the E18 road modernisation project in Norwegian Oslo

sledování s cílem ověřit, zda skutečné chování konstrukce odpovídá výpočtovým předpokladům. Zvláštní pozornost byla věnována zatížení podpěrných stojek a průhybu konstrukce. Výsledky byly velmi uspokojivé – rozdíl mezi výpočtem (8 mm – obr. 3) a skutečností (5 mm) činil pouhé 3 mm, což je na délce 20 m zcela zanedbatelná odchylka. I zatížení podpěr odpovídalo předpokládaným hodnotám, čímž byl návrh jednoznačně potvrzen.

Jedním z významných technických úkolů byla realizace efektivního přesunu zařízení mezi jednotlivými betonovacími pozicemi. Přesun byl realizován dvojicí pracovníků a zahrnoval odbednění, transport a přesné ustavení zařízení v nové pozici. Tento proces se podařilo standardizovat tak, že doba od odbednění po ustavení zařízení do nové pracovní polohy činila přibližně 8 hodin. Tento časový rámec byl dosažen díky důsledné koordinaci činností, optimalizaci pracovních postupů a plnému využití možností stroje. Při přesunu zařízení není potřeba lidské síly a vše se děje pomocí hydraulického systému bez další pomocné mechanizace.

V následujících fázích projektu bylo zařízení podrobeno dalšímu ověření – tentokrát při betonáži o 2 m výše, tzn. ve výšce 8 m (obr. 7). I v tomto případě byla konstrukce zkontrolována a výsledky opět potvrdily shodu mezi výpočtem a skutečností. Zařízení tak prokázalo svou variabilitu, stabilitu a provozní spolehlivost i při změnách podmínek.

PŘESUN ZAŘÍZENÍ DO DRUHÉHO TUNELOVÉHO TUBUSU

Vzhledem k celkové hmotnosti zařízení, která činí přibližně 300 tun, bylo nezbytné již v rané fázi návrhu zohlednit také způsob jeho přesunu mezi jednotlivými tunelovými tubusy. Zadáání investora znělo na první pohled jednoduše – po dokončení betonáže v první tunelové trubě mělo zařízení projet zpět tunelem, následně být příčně přesunuto pod mostní konstrukcí a poté najet do připraveného druhého tunelového tubusu. V praxi však

the formwork system needed to be completed:

- drawing documentation checks;
- stress analysis verification;
- physical field inspection to determine whether the device corresponds to the approved documentation and operation documentation checks.

All of these steps were verified by an independent third party, and after their successful completion, the device was put into service (Fig. 6). The first concreting block was subject to thorough monitoring with the goal of checking, whether the actual behaviour of the structure corresponds to calculated assumptions. Extra attention was dedicated to loads of the supporting struts and deflection of the structure. Results were highly satisfactory – the variance between the calculation (8mm – Fig. 3) and reality (5mm) added up to only 3mm, which is an

entirely inconsequential deviation at a length of 20m. Even the loading of struts corresponded to assumed values, thereby unequivocally confirming the design.

One of the significant technical tasks was the realisation of an effective relocation of the device between individual concreting positions. The relocation was realised by a couple of workers and it included formwork striking, transportation, and precise setup of the device in a new position. It was managed to standardise this process such that the time from striking to device set up in a new working location added up to approximately 8 hours. This timeframe was achieved thanks to a thorough coordination of operations, optimisation of working procedures, and utilising the full potential of the machine. During relocations of the device, human strength is not needed, and everything happens thanks to a hydraulic system without the need for further supplementary mechanisation.

In further phases of the project, the device was put through additional verifications – this time during concreting 2 metres higher, i.e. at a height of 8m (Fig. 7). Even in this instance, the structure was checked and the results once again validated an agreement between the calculation and reality. The device therefore proved its variability, stability, and operational reliability even during altered conditions.

DEVICE RELOCATION INTO A SECOND TUNNEL TUBE

Given the fact that the total weight of the device amounts to approximately 300 tons, it was necessary to take into account the means of its transport between individual tunnel tubes already in the early phases of the design. The task of the investor looked simple at first glance – after completing concreting in the first tunnel tube, the device was supposed to travel backwards through the tunnel, transversely move beneath a bridge structure, and finally drive into the prepared second tunnel tube. However, in practice, this assignment posed a significantly complicated logistical and technical operation.

tento úkol představoval značně složitou logistickou a technickou operaci.

Před samotným přesunem bylo nutné zpracovat detailní projekt přesunu zařízení, který zohledňoval nejen prostorové možnosti staveniště, ale také aktuální dopravní situaci v okolí, statické parametry mostní konstrukce a bezpečnostní opatření. Během přípravy a realizace přesunu projektanti čelili několika komplikacím, které bylo nutné řešit operativně přímo na místě.

Největší výzvou bylo průjezdné místo pod mostem, kde byla mezi horní částí zařízení a spodní hranou mostní konstrukce mezera pouze cca 10 mm (obr. 8). Vzhledem k této minimální vůli a omezenému manipulačnímu prostoru v okolí nebylo možné zařízení výrazněji posouvat či výškově upravovat – celý manévr tak probíhal doslova s milimetrovou přesností.

Samotný přesun trval přibližně tři dny. Celkem bylo s oběma zařízeními ujetu cca 1,2 km (dohromady tři pracovníci, z důvodu posunu kolejí). Přesun zahrnoval nejen přejezd, ale také následné dokončovací montáže a ustavení zařízení v nové poloze. Díky důkladné přípravě, přesné koordinaci a zkušenostem realizačního týmu proběhl celý proces bez komplikací a v souladu s harmonogramem stavby.

Výhody oproti systémovému bednění:

- rychlost pracovního cyklu (1 blok);
- jednoduchost obsluhy;
- výrazně menší potřeba pracovníků;
- menší nároky na strojní mechanizaci;
- kvalita povrchu betonu – ocelová obálka;
- eliminace nutnosti výměny překližky po několika betonovacích cyklech;
- odbourání nákladů na opravu a čištění bednění.

ZÁVĚR

Projekt vývoje a realizace mobilního bednění pro hloubený tunel v Oslu představuje příklad úspěšného spojení inženýrské kreativity, technické preciznosti a schopnosti přizpůsobit se specifickým požadavkům náročného stavebního prostředí. Od počátečního návrhu „z čistého stolu“ až po uvedení zařízení do provozu a jeho následný přesun do druhého tunelového tubusu byl celý proces veden s důrazem na bezpečnost, efektivitu a provozní spolehlivost.

Zařízení bylo navrženo jako plně variabilní systém s možností výškového a šířkového nastavení a snadného přesunu bez nutnosti demontáže. Statické posouzení provedené dvěma nezávislými metodami potvrdilo správnost návrhu a umožnilo přesné dimenzování všech klíčových prvků.

Funkční zkoušky a provozní ověření pak prokázaly, že zařízení splňuje nejen technické, ale i provozní a bezpečnostní požadavky v plném rozsahu.

Úspěšné zvládnutí tohoto projektu potvrzuje, že i v oblasti tunelového stavitelství je možné hledat nová, efektivní a inovativní řešení, která přinášejí přidanou hodnotu jak z hlediska času, tak i nákladů a bezpečnosti. Mobilní bednění vyvinuté společností OSTROJ a.s. tak může sloužit jako inspirace pro další projekty v oblasti podzemních staveb nejen v českých zemích, ale i v širším evropském kontextu.

*Ing. PETR BORTLÍK, Ph.D.,
petr.bortlik@ostroj.cz, OSTROJ a.s.*

Recenzoval / Reviewed by: *Ing. Miroslav Lipka*

Before the relocation itself, a detailed project needed to be created for the relocation of the device, which took into account not only the spatial capabilities of the construction site but also the current traffic situation in the area, static parameters of the bridge structure, and safety measures. During preparations and realisation of the relocation, the designers were confronted by several complications, which had to be dealt with operatively directly on site.

The greatest challenge was the clearance area beneath the bridge, with a gap of only ca 10mm (Fig. 8) between the upper section of the device and the lower edge of the bridge structure. Due to this minimal clearance and limited manipulation space in the area, it was not possible to substantially move or vertically adjust the device – the entire manoeuvre therefore went on with literally millimetre precision.

The relocation itself took approximately three days. In total, with both devices, approximately 1.2km was travelled (altogether three workers due to the moving of rails). The relocation included not only the crossing but also the subsequent finishing of assembly and setting the device up in a new position. Thanks to thorough preparation, precise coordination, and experience of the implementation team, the entire process was carried out without complications and in conformity with the time schedule of the construction site.

Benefits compared to system formwork:

- speed of the work cycle (1 block);
- ease of use;
- significantly smaller need for workers;
- lesser requirements for machine mechanisation;
- concrete surface quality – steel skin;
- eliminated the need to replace plywood after multiple concreting cycles;
- axed costs for formwork repair and cleaning.

CONCLUSION

The project for the development and implementation of mobile formwork for a cut-and-cover tunnel in Oslo represents an example of a successful connection of engineering creativity, technical precision, and the ability to adapt to the specific requirements of a demanding construction environment. From the initial “blank canvas” design to commissioning of the device and its subsequent relocation into the second tunnel tube, the entire process was led with an emphasis on safety, efficiency, and operational reliability.

The device was designed as a fully variable system with an option of vertical and lateral adjustment and easy relocation without the need for disassembly. Structural analysis carried out by two independent methods verified the correctness of the design and facilitated precise dimensioning of all key elements.

Functional tests and operational checks then proved that the device adheres not only to technical, but also operational and safety requirements to the highest degree.

Successfully handling this project confirms that even in the field of tunnel construction, it is possible to seek new, effective, and innovative solutions that bring added value not only from the viewpoint of time, but also costs, and safety. Mobile formwork developed by the OSTROJ a.s. Company therefore can serve as an inspiration for other projects in the area of underground constructions not only in the Czech Republic, but also in a broader European context.

*Ing. PETR BORTLÍK, Ph.D.,
petr.bortlik@ostroj.cz, OSTROJ a.s.*