



DARWINOVO CENTRUM PŘÍRODOVĚDNÉHO MUZEA V LONDÝNĚ, 2. FÁZE PROJEKTU | DARWIN CENTRE PHASE TWO, NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON

ED CLARK, ED NEWMAN-SANDERS

Článek popisuje budování nové části Přírodovědného muzea v Londýně od prvních vizí, přes projekt úzce související s vyřešením otázky volby technologie výstavby a její optimalizace z hlediska nákladů, času výstavby, kvality budoucího vnitřního prostředí a inovativnosti stavebních postupů. Výsledná konstrukce samonosné prostorové skořepiny ze stříkaného betonu s leštěným povrchem získala řadu významných ocenění. | The article describes construction of the new part of the Natural History Museum in London from the first visions over the choice of technology of construction solution, its optimization re costs, time of construction, quality of the future interior and innovative construction procedures. The final self-bearing construction of space shell from sprayed concrete with polished surface won a number of significant awards.

„Postavení Darwinova centra představuje jeden z nejdůležitějších počínů Přírodovědného muzea od jeho přestěhování na současnou adresu v roce 1881.“ – slova Sira Neila Chalmerse, emeritního ředitele Přírodovědného muzea v Londýně.

ZROD VIZE

Budova Přírodovědného muzea (National History Museum – NHM) navržená vynikajícím architektem viktoriánského období Alfredem Waterhousem a v současnosti uváděná na seznamu nejpozoruhodnějších památek Londýna, byla na Exhibition Road otevřena v roce 1881. Původně přitahovala pozornost návštěvníků na sbírky z Britského muzea, které nyní přesahují 70 miliónů položek v pěti hlavních odděleních: botanika, entomologie, mineralogie, paleontologie a zoologie. Nové Darwinovo centrum nabídlo rozšíření prostor sbírek; v budově Phase One je vystavováno 22 milionů vzorků uchovávaných v alkoholu, zatímco ve Phase Two je umístěno 17 milionů entomologických a 3 miliony botanických vzorků. Phase One je otevřena veřejnosti od září 2002 a hned v prvním roce uvítala 320 000 nadšených návštěvníků. Budova „Phase Two“, předmět této kapitoly, byla otevřena v září 2009 jeho královskou výsostí Princem Williamem, který při této příležitosti řekl: *„Jak je na nejnovějším vybavení nového Darwinova centra vidět, Přírodovědné muzeum je na samé špičce výzkumu a jeho úžasné nové křídlo posouvá jeho jedinečnou pověst ještě dál.“*

NHM připravilo unikátní koncept nového způsobu přístupu veřejnosti do rozsáhlých muzejních sbírek a přímo k vědeckému výzkumu. Sir Neil Chalmers, bývalý ředitel NHM to vyjádřil

slovy: *„Je to výzva pro architekty a celý projektový tým: vyřešení otázek, jak umožnit přístup veřejnosti do míst, kde běžně pracují vědci a badatelé, a zajistit, aby se obě skupiny vzájemně nerušily. Naším cílem je zaujmout, povzbudit, vzdělávat a současně umožňovat více lidem než kdykoliv předtím dosáhnout opravdového pochopení přírody a světa kolem nás.“*

V listopadu 2001 byl dánský architektonický ateliér CF Moller Architects vyzván, aby s podporou inženýrské kanceláře Arup rozpracoval svou vizi Musea do třech základních částí projektu.

Ochrana

Základní funkcí budovy je ochrana, konzervace a zajištění existence suchých entomologických a botanických sbírek v prostorách odolných plísním a se stabilními podmínkami z hlediska teploty, výměny vzduchu a vlhkosti, kde je riziko vzniku požáru a jakýchkoliv jiných poškození sbírek skutečně minimální.

Přístup veřejnosti

Od počátku bylo zřejmým záměrem celého projektu zvyšování veřejného povědomí o sbírkách a jejich důležitosti pro výzkum, což mělo být realizováno prostřednictvím nápadité architektury, která umožní větší interakci návštěvníků, badatelů a sbírek. Tradiční koncept muzea jako instituce vystavující historické artefakty byl zamítnut.

Výzkum

Bylo důležité, aby světově uznávaní odborníci dostali pro svou práci flexibilní, funkční, architektonicky zajímavé a uživatelsky příjemné prostory laboratoří a pracoven se snadným přístupem ke sbírkám.



Obr. 1



Obr. 2

POPIS KONSTRUKCE

NHM je jeden z kulturních drahokamů Anglie, jeho žluto-modrohnědá budova je uznávanou architektonickou památkou Londýna, **obr. 1**. Zatím co Phase One Darwinova centra byla postavena jako samostatná budova za severozápadním rohem původní budovy nazývané „Waterhouse“, Phase Two nyní završila původní schéma z roku 1868 doplněním západního křídla současnou architekturou, která propojuje viktoriánskou budovu s Phase One, **obr. 2**.

Architektonický ateliér odpověděl na předloženou výzvu návrhem minimalistické devítipodlažní skleněné vitríny, která uvnitř chrání a současně vystavuje ohromný kokon – zámotek. Je to

ten zámotek, který symbolicky i skutečně uvnitř chrání prostředí sbírkových fondů. Hlavním inženýrským úkolem pro Arup tedy bylo navrhnout efektní a realizovatelné konstrukční řešení pro zámotek elegantního geometrického tvaru délky 65 m, šířky 12 m a výšky přes osm podlaží, **obr. 3**.

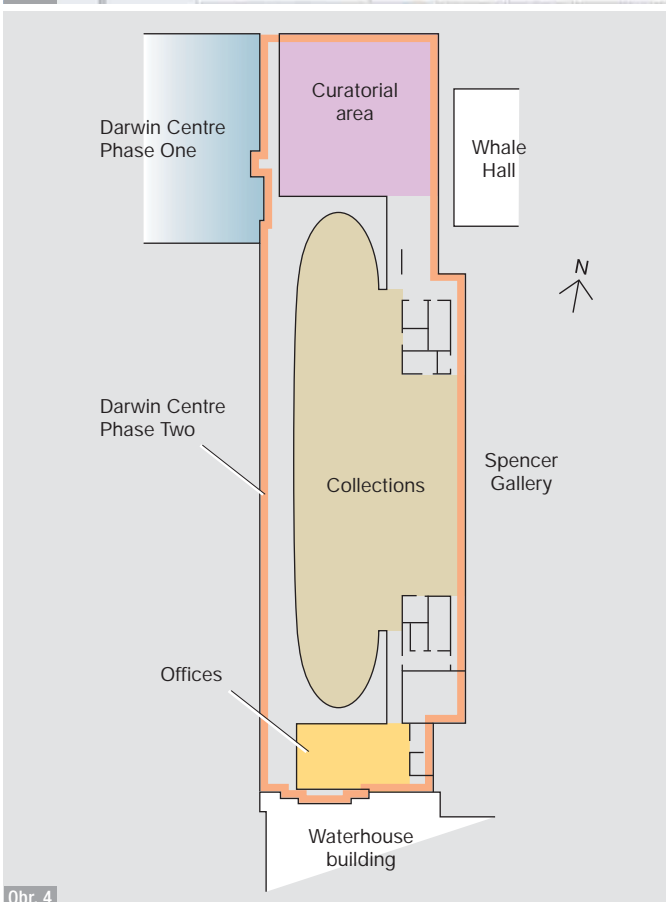
„Suché“ sbírky jsou uchovávány v mobilních regálech, z nichž je do stropních konstrukcí přenášeno předpokládané zatížení 12,5 kPa. Nosná železobetonová konstrukce, jejíž obvod má v půdoryse tvar písmene C, **obr. 4**, sestává z plochých desek podpíraných sloupy a stěnami. Základová deska a opěrné suterénní stěny jsou také železobetonové, založené na základových nosnících uložených přes hlavice vrtaných pilot. V jednopodlažním suterénu je umístěno technické vybavení zodpovědné za udržování předepsaných vnitřních podmínek v celém zámotku. Za zámotkem je ještě severní křídlo, v kterém jsou umístěny další pracovny vědců a samostatná devítipodlažní kurátorská budova s pracovny zaměstnanců a sociálním zázemím.

Hlavní nosná konstrukce atria ze svařovaných ocelových profilů nese především skleněnou fasádu a třívrstvé průsvitné ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) střešní „polštář“. Konstrukce atria je nezávislá samostatně stojící, pouze v horní části západní a východní fasády je propojena prefabrikovaným nosníkem spojovacího průchodu s železobetonovou konstrukcí kokonu, **obr. 5** až **obr. 7**.

Vnější konstrukci zámotku tvoří stříkaná železobetonová sko-



Obr. 3



Obr. 4



Obr. 5

řepina tloušťky 250 mm vzepřená vnitřními plochými stropními deskami. Zvolené řešení maximalizovalo užité plochy bez nutnosti vnitřních sloupů, tepelnou setrvačností hmoty betonu je zajištěna stálá teplota uvnitř zámotku a dispozice konstrukce poskytuje flexibilitu všem službám a minimalizuje místa nepřístupná nebo špatně dostupná pro úklid. Budova je příčně stabilizována svislými železobetonovými jádry, chovajícími se jako konzoly, a smykovými stěnami. Příčné zatížení je do těchto konstrukcí přenášeno stropními deskami působícími jako tuhá diafragmata. Skořepina zámotku získala stabilitu natažením přes desky stropů, které jsou rozpírány tuhými jádry.

Obr. 1 Pohled ze zahrady muzea na dokončené Darwin Centre Phase Two stojící vedle Viktoriánské architektury původní Waterhouse Building (fotografie CFM Arch.) |

Fig. 1 Viewed from the Museum's Wildlife Garden, the completed Darwin Centre Phase Two complements the Victorian architecture of the original Waterhouse Building (Photo courtesy of CFM Arch.)

Obr. 2 Letecký pohled na komplex budov Přírodovědného muzea, Blue Sky Google Earth, a – Darwin Centre Phase One, b – Darwin Centre Phase Two; c – Waterhouse Building |

Fig. 2 Aerial view of the Natural History Museum showing Blue Sky Google Earth, a – Darwin Centre Phase One; b – Darwin Centre Phase Two; c – Waterhouse Building

Obr. 3 Podélný řez budovou Darwin Centre Phase Two | **Fig. 3** Longitudinal section through Darwin Centre Phase Two

Obr. 4 Typické podlaží | **Fig. 4** Typical floor plan

Obr. 5 Pohled z vnitřku atria na dokončený zámotek | **Fig. 5** Internal view of the completed cocoon



Obr. 6



Obr. 7

ZÁMOTEK, KUKLA – COCOON

Koncept

Zámotek je normálně místem, kde se larva hmyzu přeměňuje v dospělého jedince. Architekt rozšířil tuto analogii na představu, že zámotek je vhodné místo, které chrání tělo, které v něm původně vzniklo, před poškozením i po smrti. Hlavními příčinami škod na sbírkách byly v předchozí budově muzea plísňe, které rostly na jednotlivých botanických a entomologických exponátech a neustále se obnovovaly a šířily.

Zámotek je ikonické centrum budovy a svou stříkanou betonovou skořepinou, v bezprecedentní velikosti, formuluje přesnou odpověď na otázky průniku architektonické formy a požadavků prostředí. Dilatační spáry v leštěné omítce vnější plochy zámotku rozšiřují tuto analogii na představu hedvábného vlákna křížícího se na povrchu kukly, **obr. 7**.

Potřeba formovat náročnou geometrii konstrukce bez devastujících nákladů na její realizaci byla jednou z nejnáročnějších výzev celého projektu. Zámotek mění svou křivost a její nepravidelná změna znemožňuje konvenční přístup s užitím efektivního dělení na opakované konstrukční prvky nebo bednění. Dodavatel hledal nějakou homogenní a inovativní stavební technologii. Byly zkoušeny různé možnosti, např. ocelová podpurná konstrukce panelů bednění, prefabrikovaný beton, monolitický beton formovaný bedněním vyřezaným pomocí NC strojů z polystyrénu, ale postupně byly všechny zamítnuty ve prospěch stříkaného betonu.

Stříkaný beton může být nejen tvarován do požadované geometrie při udržení stálé tloušťky a s leštěným konečným povrchem, ale může být nastříkáván po vrstvách tak, aby byl sám schopen udržet svůj tvar a přenášet vodorovná zatížení s omezeným počtem dočasných podpor. Proto se toto elegantní inženýrské řešení stalo nejvhodnějším a nejrychlejším způsobem výstavby. Použití ocelové podpurné konstrukce či výroba složitě tvarovaného bednění by byly časově výrazně náročnější a vedly by ke zpoždění termínů dokončení stavby. Dalším významným faktorem, který působil pro zvolenou technologii výstavby, byl požadavek na vestavěné zařízení pro

ochranu proti plísním (IPM – Integrated Pest Management), které zajistí, aby živé plísňe nezničily mrtvý hmyz a suché rostliny ve sbírkách. Toho je dosaženo řízením teploty vnitřního prostředí pomocí tepelné setrvačnosti hmoty betonu a její schopnosti akumulovat tepelnou energii a hladkým, snadno udržovatelným a čistitelným vnitřním povrchem bez spár, trhlin a pórů, kde by se spóry plísní mohly usazovat a bujet.

Idea použít pro výstavbu obtížně tvarované konstrukce stříkaný beton přišla od inženýrské organizace Arup, která už měla zkušenost s touto technologií v podobném měřítku, a to na fasádě, dnes již ikonického, obchodního domu Selfridges v anglickém Birminghamu [1] (arch. Jan Kaplický, pozn. redakce). Zámotek je další generace evolučního vývoje této technologie. Skořepina zde tvoří část základní vislé nosné konstrukce, v které byly eliminovány všechny pohyblivé spoje. Očekávalo se, že použitá technologie nepochybně vyvolá reakci, která se projeví „převzetím“ technologie také pro jiné navrhované budovy – očekávání se potvrdila a amorfnní tvary konstrukcí se rychle staly architektonickou normou.

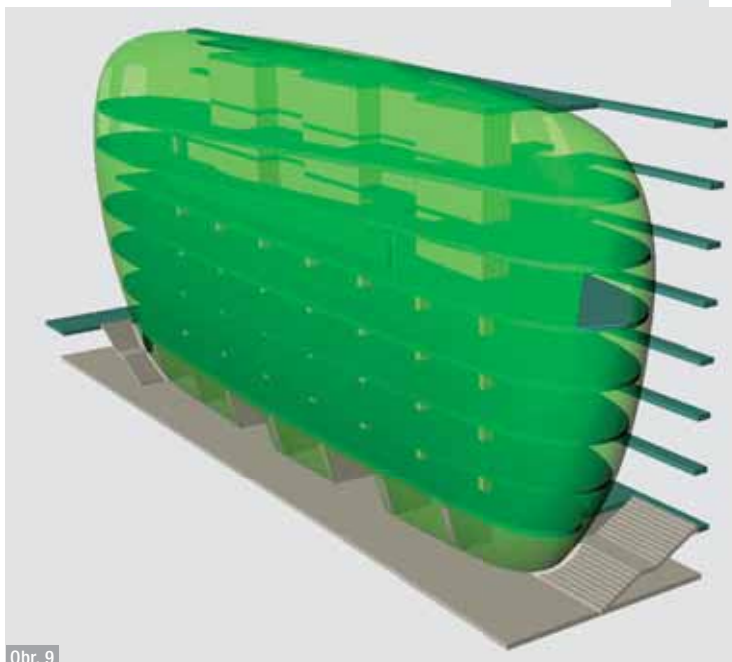
Geometrie

Filozofie architektonického návrhu může být chápána následovně: „*Je to otázka zázraku, nikdy neuvidíte najednou celý zámotek.*“ Sděluje nám zprávu, poselství, ideu o svém účelu, smyslu, zejména, že uvnitř skrývá dvacet miliónů sbírkových položek, **obr. 8**. 90 % všech světových druhů však přesto stále ještě čeká na své objevení a klasifikování. To ukazuje, jak je příroda nesmírně rozmanitá a že nemůže být nikdy viděna v celé své šíři. Podobně, nedá se najít žádné výhodné místo, z kterého by byl vidět zámotek celý.

Klíčovým bodem k úspěšnému návrhu z inženýrsko-konstrukční perspektivy byla spolupráce architekta s konstruktéry ústící do tvaru, který uspokojil ambice projektu a dle pozorování by se měl chovat jako skutečná konstrukční skořepina. Po nalezení odpovídajícího tvaru mohla být skořepina hned v raných stádiích projektu rozvržena na tenké stěnové prvky a volné otvory s vědomím, že konstrukční celistvost nebude kompromisem. V takovém stavu (tvaru) mohla být počáteč-



Obr. 8



Obr. 9

ní analýza jednoduchá a intuitivní a nemusela se už v raných fázích spoléhat na užití sofistikovaného softwarového systému, založeného na MKP metodě.

Pro jemné úpravy tvaru amorfního povrchu a vytvoření digitálního modelu celé budovy včetně všech vnitřních a základových konstrukcí byl použit software Rhinoceros. Z tohoto modelu byly přímo generovány výkresy, podle kterých dodavatel budovu postavil. Bez znalosti použité stavební technologie by však nebylo možné správně určit, kudy mají procházet generované řezy a které svislé a vodorovné rozměry mají být na výkresové dokumentaci uvedeny, **obr. 9**.

ANALÝZA A NÁVRH KONSTRUKCE

Skořepina zámotku byla navrhována s užitím široké škály různých postupů analýzy konstrukcí, inženýrské intuice a zkušeností z realizací. Výstavba skořepiny s dvojitou křivostí byla velkou výzvou sama o sobě, proto bylo od počátku cílem návrhu vytvořit typický, obecně použitelný, příčný řez s konstantní tloušťkou a zejména způsobem vyztužení, který by byl použitelný pro většinu skořepiny. Po přijetí strategie minimalizace materiálových nákladů se přínosy zjednodušeného návrhu procesu výstavby brzy projeví v úsporách materiálů.

Výsledný tvar konstrukce umožňuje rovnoměrné rozdělení namáhání po celé skořepině, takže ani při zvolené konstantní tloušťce konstrukce a stejnoměrně rozdělené výztuži nedochází ke vzniku míst se špičkami hodnot napětí, které by dosahovaly materiálových pevností.

Návrh střední části konstrukce

Skořepina konstrukce zámotku-kokonu má dvojitou křivost ve všech bodech svého povrchu, ale protažení skořepiny podél severo-jihní osy umožňuje řešit její střední část alespoň v počátečních analýzách jako rovinný rám s hlavní křivostí ve svislém směru, **obr. 10**.

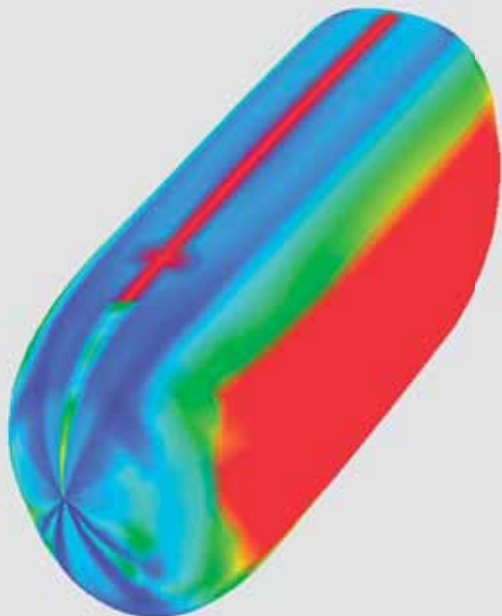
V příčném řezu působí skořepina ve střední části jako jednoduchý oblouk výšky cca 8 m nad stropní deskou 6. NP (5. patrem). Na východní straně je oblouk opřený do sloupů v 6. NP a vodorovná síla je tak přenášena stropní deskou

6. NP. Na opačné, západní, straně nepřenáší síly z oblouku stejná stropní deska, ale jsou zachyceny řadou vnitřních ramp, které je přenášejí do konstrukce stropní desky 5. NP, **obr. 11**. Rampy a desky jsou uspořádány tak, aby přenášely síly do řady vnitřních tuhých konstrukcí. Protože tahové reakce z oblouku působí na stropní desky v různých úrovních, bylo třeba k jejich přenesení navrhnout mezi obě desky smykové stěny.

Západní strana oblouku pokračuje dále dolů až na úroveň 1. NP (přízemí), kde stěna skořepiny přenáší síly do kolmých suterénních stěn a dále do základů. Přenos síly ze skořepiny do stěnových pilířů probíhá přes vysoké smykové stropní nosníky nepřímo přes malé dosedací plochy, kde by docházelo k obrovské koncentraci napětí. Takto je možno zachovat konstantní tloušťku skořepiny po celé výšce. Na úrovni přízemí bylo také možno navrhnout dle požadavků výstavních prostor v příčných stěnách velké otvory. Prvotní návrh otvorů byl počítán pomocí strut-and-tie metody ručně, po té byl ověřen MKP analýzou a vyřešen do všech detailů.

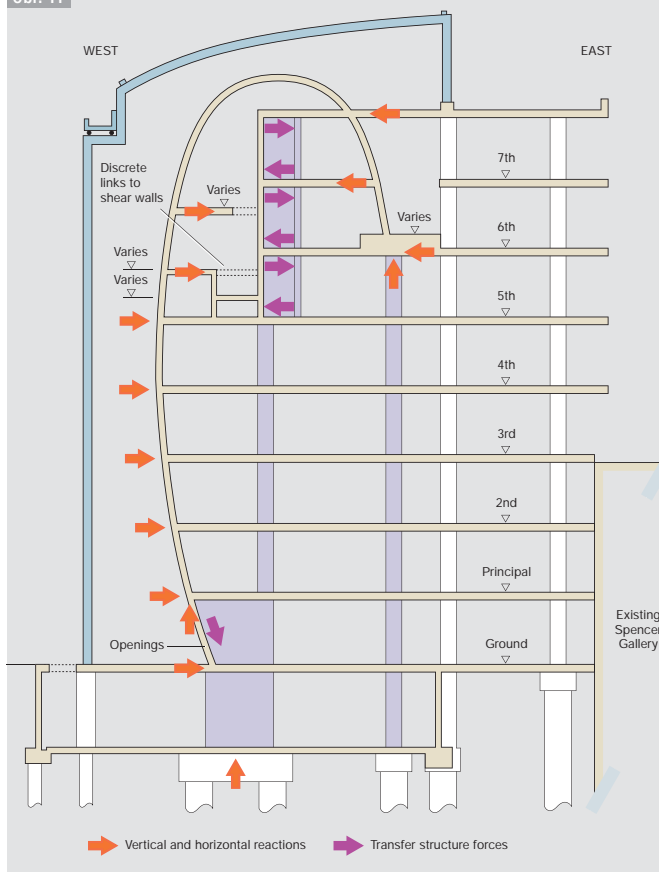
Oblouk zámotku nad 6. NP je tvarován tak, že v příčném řezu vzniká malé ohybové namáhání konstrukce; největší ohybové momenty působí rampy a desky, které jsou se stěnami spojeny a někde přímo z nich vykonzolovány. Stěna zámotku je ve svislém směru mezi stropními deskami ve všech bodech zakřivená, což v ní vyvolává ohybové namáhání, ale největší

- Obr. 6** Ocelová konstrukce atria | **Fig. 6** Atrium steelwork
Obr. 7 Leštěná omítka na zaoblených koncích zámotku dělená dilatačními rýhami |
Fig. 7 Cocoon end showing polished plaster finish with expansion joints
Obr. 8 Darwin Centre Phase Two zabezpečuje 20 mil. sbírkových prvků |
Fig. 8 The Darwin Centre Phase Two houses 20M specimens
Obr. 9 Digitální model konstrukce zámotku, sw Rhino | **Fig. 9** Cocoon structure modelled using Rhino



Obr. 10

Obr. 11



Obr. 12



momenty vznikají v místech připojení 350 mm silných stropních desek. Osově zatížení ve stěně pomáhá při řešení těchto spojů.

Předpokládáme-li, že konstrukce se chová ve svislém řezu jako rovinný rám, ohybové momenty lze určit z poměrně jednoduchého statického modelu ručním výpočtem. Výztuž byla navržena na pokrytí těchto momentů a jejich interakci s osovou silou a po té byl návrh kontrolován pomocí 3D modelové analýzy. Výsledkem byl návrh „základního“ uspořádání výztuže, ke kterému byly místně přidávány další pruty k zesílení tam, kde si to vyšší momentové namáhání vyžádalo.

Návrh konců zámotku

Vyšší křivost v obou směrech v koncových částech zámotku je příčinou toho, že konstrukční analýza těchto částí je náročnější a jejich ohybové namáhání nelze určit jednoduchými metodami. Avšak, detailní sledování tvaru a chování konstrukce pomohlo i zde ke ztužení stěn a snížení ohybových momentů. Pro určení namáhání skořepiny byla použita analýza 3D modelu a konečný návrh výztužných prutů byl proveden individuálně „ručně“.

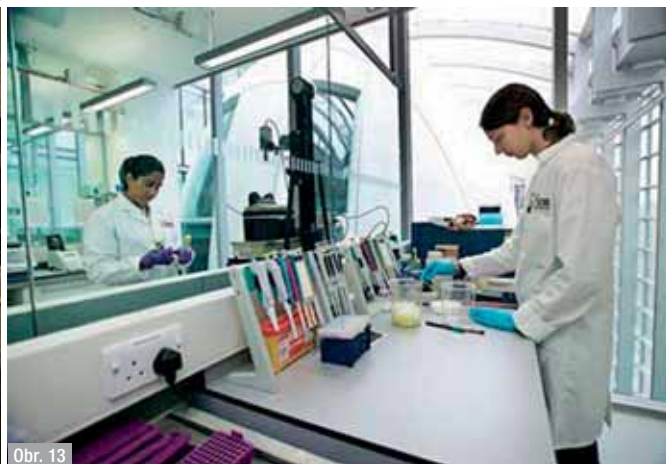
Nejvíce namáhanými oblastmi konstrukce zámotku je spodní část stěny skořepiny, kde je křivost v obou směrech největší. Zde vyšší vodorovná křivost stěny způsobuje vyšší vodorovné napětí, které pomáhá vodorovnému sevření, které přenáší tahové síly vyvolané svislým zakřivením. Silnější stěnové sekce s vyšším vyztužením jsou odpovědí na vyšší namáhání této oblasti.

Výkresy rozdělení osových sil a momentů (kladné i záporné) v obou směrech působení byly použity pro racionální vytvoření skupin oblastí plochy s dvojitou křivostí, kde namáhání je obdobné a jejich vyztužení může být určitým způsobem zohledněno. Souběžně byl vytvořen 3D model výztuže celé konstrukce, který byl podroben kontrolní analýze.

Chování betonu bylo simulováno s použitím nelineárního materiálového modelu včetně simulace vzniku trhlin na skořepině. Výsledky ukázaly, že vzniklé trhliny jsou jen malé, protože převážná část skořepiny je namáhána tlakem a působící ohybové momenty jsou malé a jen v omezeném počtu míst.

Analytický model

Tvar konstrukce vyžadoval vytvořit plně 3D FE model, který by umožňoval přesně určit síly a zkontrolovat „ruční“ výpočty vnitřních sil a momentů působících ve skořepině a deskách



Obr. 13

a výpočty namáhání od smršťování betonu. Dlouhodobé působení dotvarování na šikmých plochách spolu s možným rozdílným osovým zkrácením tuhé skořepiny a připojených sloupů bylo také analyzováno.

Tvar zámotku byl odvozen z a dále existuje jako soubor NURBS¹ ploch v *Rhino* modelu. Připojené konstrukce byly modelovány jako střednicové plochy desek nebo stěn a osy sloupů pomocí software *Rhino*. Projektanti pečlivě a trpělivě hledali optimální průtnutí jednotlivých os a střednicových ploch tak, aby FE model konstrukce byl přiměřeně jednoduchý a zabránilo se vytvoření oblastí s vysokou koncentrací malých prvků i za cenu občasných malých odchylek od její skutečné geometrie. Části konstrukce, které bezprostředně nesouvisely s konstrukcí zámotku, byly modelovány v hrubším měřítku, takže jejich geometrie byla více zjednodušena. Stěny vnitřních jader byly modelovány jako 1D prvky s přiřazenou odpovídající tuhostí, která byla určena samostatnou analýzou. To výrazně pomohlo velmi zjednodušit 3D model a umožnilo tak určit smykové síly a ohybové momenty působící ve stěnách vnitřních jader.

Střednicová plocha celého zámotku byla rozdělena na čtyřúhelníkové prvky napojené na střednice desek a sloupů. Geometrický model byl importován ze software *Rhino* do *AutoCadu* a plochy byly předefinovány a rozděleny na síť v požadované hustotě pomocí samostatného modulu *Sofistik's*, **obr. 14**.

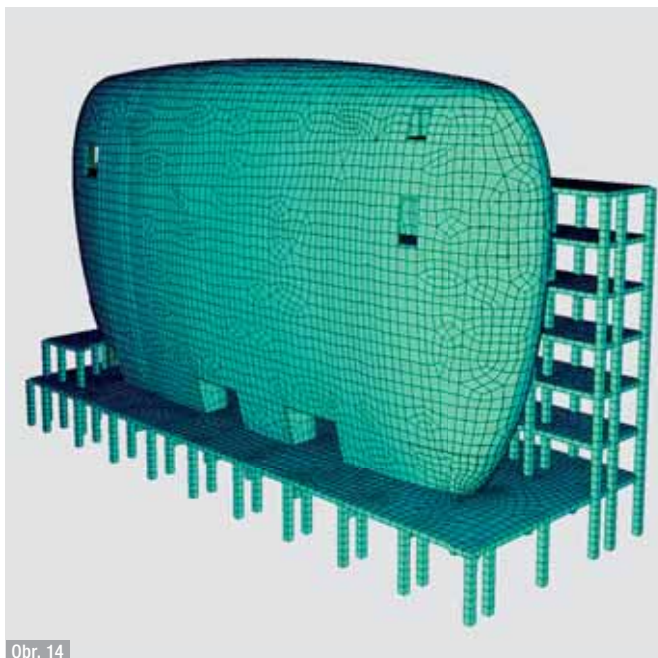
Pro popsání modelu, vlastností prvků, specifikaci zatížení, postupů analýzy, zadání kombinací zatěžovacích stavů, návrh a určení parametrů výztuže a extrakci výsledků byly opakovaně používány textové interfaces FE programu. Místo plošné grafické prezentace výsledků, která byla vzhledem k velikosti analyzované konstrukce poněkud zdouhavá a nepřehledná, byla dáována přednost přehledným tabulkám vloženým přímo do textových souborů, kde byly výsledky diskutovány. Vícenásobné opakované analýzy a návrhy jednotlivých částí byly pouštěny automaticky přes noc bez nutnosti otvírání základního velkého modelu.

Návrh výztuže

Racionalizace návrhu výztužných prutů byla klíčová pro jednoduchost, efektivnost a úspěch projektu i realizace konstrukce. Rozložení výztužných sítí bylo vyřešeno na počátku projektového procesu ještě před tím, než bylo známo konečné množství nutné výztuže. Dvojitá křivost vyžadovala, aby výztužné pruty byly umístěny pečlivě a zamezilo se zbytečnému překrývání jednotlivých vrstev v místech, kde se orientace prutů na povrchu měnila a naopak se dosáhlo pravidelného rovnoběžného uspořádání ve svislém a vodorovném směru ve středové části skořepiny.

Radiální uspořádání bylo zvoleno pro severní a jižní konec skořepiny. Zde vodorovné pruty v konstantních vzdálenostech tvoří rovnoběžky, zatímco svislé pruty se rozbíhají jako poledníky a mezi ně byly vkládány přidavné pruty, aby byla zajištěna

1 NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) jsou matematické reprezentace 3D geometrie, pomocí kterých lze přesně popsat jakýkoliv tvar od jednoduché 2D linie, kruhu, oblouku nebo křivky až po komplexní 3D organické tvary ploch či těles. Vzhledem k jejich flexibilitě a přesnosti jsou NURBS modely užívány v různých procesech pro popsání ploch a těles nebo animaci jejich výroby.



Obr. 14



Obr. 15



Obr. 16

Obr. 10 Vyznačení ploch stejných křivostí na povrchu zámotku | Fig. 10 Cocoon curvature contours

Obr. 11 Síly v konstrukci | Fig. 11 Forces in the cocoon

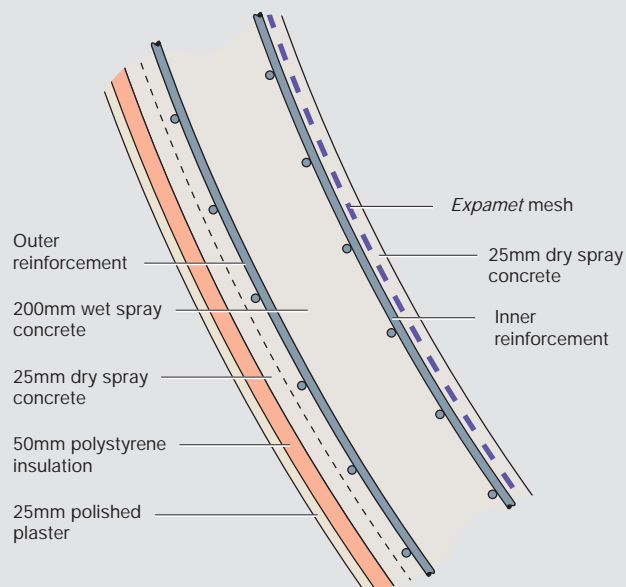
Obr. 12 Návštěvnický prostor | Fig. 12 Visitor space in the cocoon

Obr. 13 Badatelé z molekulární laboratoře mají výhled na celý zámotek, archiv NHM | Fig. 13 Scientists in the molecular laboratory looking over the cocoon, courtesy of NHM

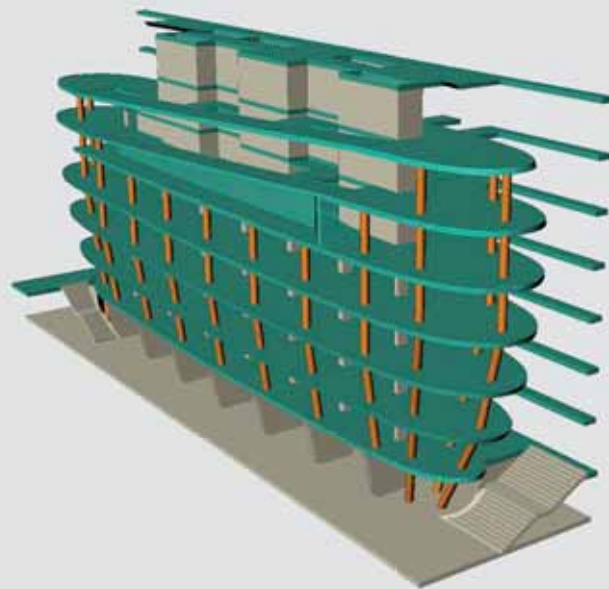
Obr. 14 MKP model v sw Sophistik | Fig. 14 Sophistik FE model

Obr. 15 Výztuž prostorové skořepiny | Fig. 15 Cocoon reinforcement

Obr. 16 Povrch dokončené betonové konstrukce | Fig. 16 Completed concrete structure surface



Obr. 17



Obr. 18



Obr. 19a



Obr. 19b



Obr. 20a



Obr. 20b



Obr. 21

minimální požadovaná vzdálenost výztužných prutů. V horní a spodní části na koncích plochy byly použity pruty o menším průměru, aby je bylo možno snadněji ohýbat přímo na místě a zjednodušilo se řešení jejich vzájemných překryvů, [obr. 15](#). Skořepina byla rozdělena do malých ploch určených dle studia předběžných výsledků analýzy 3D modelů. Plochy byly setříděny do skupin podle podobné úrovně namáhání a byla pro ně navržena výztuž tak, aby individuální úpravy na jednotlivých plochách byly co nejvíce minimalizovány. Z jednotlivých skupin výztuže byl sestaven 3D FE model a pomocí MKP analýzy bylo provedeno jeho posouzení. Tak byl vytvořen jednoduchý referenční systém pro realizaci.



Obr. 22



Obr. 23

METODIKA VÝSTAVBY

Betonová skořepina

Dočasné šikmé železobetonové sloupy, které byly umístěny po obvodu zámotku a podpíraly jednotlivé stropní desky, byly po dokončení skořepiny a dosažení navrhované pevnosti betonu demolovány. Na počátku byly obavy, že tento přístup nesplní očekávání do něj vkládaná, ale výsledné úspory oproti použití obvyklých ocelových podpůrných konstrukcí odpovídaly úvodním propočtům, [obr. 19b](#) a [obr. 21](#).

Dle původního návrhu dodavatele měly být dočasné sloupy demolovány pomocí malých pneumatických kladiv. To však bylo po stížnostech vědců z přilehlých budov na vysokou míru hluku zamítnuto a nahrazeno rozřezáním sloupů na kusy a odstraněním po částech. Stropní desky byly dočasně místně podepřeny, aby kusy betonu mohly být po deskách převáženy velkými vysokozdviznými vozíky.

Vzhledem k neobyčejně složité geometrii konstrukce bylo použití běžných 2D výkresů pro její realizaci nepřehledné a časově velmi náročné. Místo toho dodával projektant dodavateli informace o konstrukci ve formě souborů 3D modelů. Tak měl dodavatel možnost si kdykoliv dle svých potřeb vyextrahovat z konstrukce potřebné řezy, půdorysy, pohledy i 3D detaily všech problematických míst, jak aktuální potřeby realizace vyžadovaly.

Tvar zámotku byl definován pro každé podlaží v úrovni hrany stropní desky a průřezy svislé výztuže byly navrženy tak, aby nebylo třeba výztuž skořepiny předem ohýbat. Ploché oblouky prutů mezi jednotlivými deskami bylo možno vytvořit až na místě uchycením k okrajům stropních desek a vypnutím do požadovaného tvaru. Před montáží svislých prutů musely být ohnuty přesahy výztuže stropních desek dle předepsané geometrie skořepiny, [obr. 19](#) a [obr. 20](#).

Na svislé pruty vnitřního systému výztuže byla upevněna síť z tahokovu, [obr. 20](#). Z vnější strany byla přímo na síť stříkána střední 200 mm tlustá vrstva vlhké betonové směsi – jádro stěny skořepiny, [obr. 17](#) a [obr. 22](#). Na něj bylo z vnější i vnitřní strany nastříkáno dalších 25 mm suché betonové směsi.

Z vnější strany byla dále připevněna 50mm izolační vrstva polystyrénu a na něj byla nanесena konečná leštěná omítka. Mokrý betonová směs byla na místo použita pumpována, zatímco suchá směs s jemnějším kamenivem byla dodávána v pytlích. Použití suché betonové směsi s přidáváním vody až do trysky stříkací pistole umožnilo věnovat uhlazení konečného povrchu dostatek péče bez časového tlaku, který by určitě vznikl, pokud by dole stál mix s mokrou betonovou směsí, která se čerpáním musí včas dopravit na místo spotřeby, [obr. 23](#).

Leštěná omítka

Dilatační spáry vytvářejí na bílém leštěném povrchu vzor připomínající vlákno namotávané na zámotek. Nekonečná linie je přímá, nikde není „zvlněná“, opakovaně se protíná a „krájí“ omítku až k polystyrenové izolační vrstvě na množství nepravidelných různě velkých prostorově zakřivených trojúhelníků, čtyřúhelníků a pětiúhelníků.

Omezujícími požadavky na výsledný vzor na vnější ploše zámotku byly velikost plochy a délkový rozměr mnohoúhelníků, jejichž největší hodnota byla určena z podmínky, že v povrchu cementové omítky nesmí vzniknout žádné trhliny od smršťování, [obr. 24](#).

Realizace skořepiny ze stříkaného betonu proběhla během

[Obr. 17](#) Řez betonovou skořepinou | [Fig. 17](#) Section through cocoon shell

[Obr. 18](#) Vnitřní betonové konstrukce a dočasné sloupy | [Fig. 18](#) Internal cocoon structure and temporary columns

[Obr. 19](#) a) Výztuž trámu ve stropní desce, b) dočasné sloupy | [Fig. 19](#) a) Reinforced girder inside of floor slab, b) temporary columns

[Obr. 20](#) a) Přesahy výztuže stropní desky, ohnuté a napojené na výztuž skořepiny, b) detail | [Fig. 20](#) a) Expanded metal mesh connected to the inner shell reinforcement, b) detail

[Obr. 21](#) Realizace skořepiny ze stříkaného betonu, v popředí dočasné železobetonové sloupy | [Fig. 21](#) Temporary columns with spraying of the concrete shell in progress

[Obr. 22](#) Stříkaný beton, mokrá technologie | [Fig. 22](#) Wet spraying the cocoon

[Obr. 23](#) Dokončený povrch mokrého stříkaného betonu nahoře a suchého stříkaného betonu dole | [Fig. 23](#) Finished surface of the wet sprayed concrete above, and the dry sprayed concrete below



Obr. 24a



Obr. 24b



Obr. 24c



Obr. 24d

dvaceti dvou týdnů, o dva týdny rychleji než předpokládal původní plán a mnohem rychleji než jinými zvažovanými technologiemi. Každý týden bylo dokončeno 130 m² plochy. Cena za 2 800 m² betonové skořepiny nepřekročila rozpočet a opět to bylo významně méně než ceny ostatních uvažovaných technologií.

ZÁVĚR

Darwinovo Centrum a zejména zámotek, kokon, představuje efektivní realizaci vysoce funkční a geometricky nesmírně náročné konstrukce. Projektanti navrhli a vyřešili metodiku použití inovativní technologie v nebyvalém rozsahu – nová

muzejní budova je dokonalou syntézou neobvyklé formy, výborné funkčnosti, vhodného materiálu, pokročilých stavebních postupů a přesného předávání detailních informací. Projekt demonstruje, že těsná spolupráce všech zúčastněných spojená s inovativním návrhem a konstrukčními technologiemi může vyústit v elegantní a přesto vysoce funkční a k prostředí citlivou budovu.

Přínos Přírodovědného Muzea pro společnost v poznávání, rozšiřování a prohlubování našich znalostí o přírodě a k jejímu komplexnímu chápání je obrovský.

Ředitel projektu NHM Richard Toy k tomu řekl: „*Arup šel ve svém počínání ještě za náročné požadavky navrhnout*



Obr. 24e



Obr. 24f



Obr. 25

a realizovat inovativní a cenově efektivní konstrukční řešení pro tuto významnou a neobyčejně složitou budovu a umožnil tak Muzeu maximálně využít vyhrazené finanční prostředky. Projekt byl oceněn řadou uznání. V roce 2009 vyhrál „Cenu pro nejlepší stavbu pro umění a zábavu“ udělovanou Institutem konstrukčních inženýrů a ve stejném roce se stal celkovým vítězem soutěže o „Nejlepší betonovou stavbu“, kterou každoročně vyhlašuje britská Betonářská společnost (*Posudek poroty viz Beton TKS 4/2009, pozn. redakce*).

Ed Clark, senior engineer, Arup, New York office

Ed Newman-Sanders, Associate Director, Arup, Buildings London 5 Group

Literatura:

- [1] Clark E., Gilpin D.: Selfridges, Birmingham, The Arup Journal, 40(1), 1/2005, pp. 2–10
- [2] <http://www.rhino3d.com/nurbs.htm>
- [3] Clark E., Newman-Sanders E.: Darwin Centre Phase Two, Natural history Museum, London, The Arup Journal, (44), 3/2009, pp. 44–51

Fotografie: 5, 6, 8, 12, 24a, b, c, e Torben Eskerod, 7, 15, 16, 19a, b, 20a, b, 21, 22, 23, 24d, f archiv Arup, Výkresy a schémata 3, 4, 9, 10, 11, 14, 17, 18 archiv Arup | Photos: 5, 6, 8, 12, 24a, b, c, e Torben Eskerod, 7, 15, 16, 19a, b, 20a, b, 21, 22, 23, 24d, f courtesy of Arup, Drawings and schemes 3, 4, 9, 10, 11, 14, 17, 18 courtesy of Arup
Úvodní fotografie: Torben Eskerod

Klient	Natural History Museum (NHM)
Architekt	CF Moller Architects, www.cfmoller.com
Statický návrh	Arup – R. Buffat, N. Chadwick, M. Clark, J. Correnza, I. Feltham, M. Gallo, F. Gamester, J. Lange, B. Marsh, E. Newman-Sanders, H. Nuttall, K. Tanikawa
Hlavní dodavatel	HBG BAM Construct UK
Subdodavatelé	Westpile (piloty), Getjar (betonová rámová konstrukce), Shotcrete (stříkané betony), Watsons (ocelová konstrukce), Covertex (ETFE zastřešení), Armourcoat (leštěná omítka)
Soutěž	2001
Realizace	2002 až 2009

Obr. 24 Dokončená konstrukce zámotku s leštěným povrchem | Fig. 24 Completed cocoon end showing the polished plaster finish

Obr. 25 Výstavní sál, úvodní skica, archiv CFM Arch. | Fig. 25 Exhibition hall, design sketch, courtesy of CFM Arch.