



NmetS - Metodika schválená příslušným orgánem státní správy)

Technické řešení, požadavky a uplatnění ekoduktů z UHPC

CL01000102-V1



2026

Číslo projektu: CL01000102

Název projektu: Optimalizace výstavby ekoduktů, s využitím nového kompozitního řešení pro aplikaci UHPC a běžných betonů, mineralizovaných příměsí a druhotných materiálů

Předkládá: HOCHTIEF CZ a.s. a ČVUT v Praze

Název organizace: HOCHTIEF CZ a.s., ČVUT v Praze

Jméno řešitele: Ing. Petr Vítek, Ph.D., Ing. Šárka Pešková, Ph.D.

Autoři: Ing. Petr Vítek, Ph.D., Doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., Ing. Pavel Růžička, Ph.D, Ing. Marcel Jogl, Ph.D., Prof. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D., DSc., Ing. Martin Válek, Ph.D, Mgr. Jan Albert Šturma, RNDr. Ondřej Sedláček, Ph.D., prof. Ing. Bc. Radoslav Sovják Ph.D., LL.M., Ing. Michal Mára, Ph.D, prof. Ing. Petr Konvalinka CSc., FEng.

Projekt CL01000102: „Optimalizace výstavby ekoduktů s využitím nového kompozitního řešení s aplikací UHPC a běžných betonů, mineralizovaných příměsí a druhotných materiálů“ je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva dopravy ČR v rámci Programu DOPRAVA 2030 z finančních prostředků EU v rámci Národního plánu obnovy (Nástroje pro oživení a odolnost / Recovery and Resilience Facility).

Obsah

1.	Současný stav problematiky ekoduktů.....	4
2.	Ekodukty v dopravní infrastruktuře.....	5
2.1	Typy ekoduktů a jejich funkce	5
2.2	Ekodukty v České republice	6
3.	Ekologické požadavky na návrh ekoduktu.....	7
3.1	Vegetace a zoologie ekoduktu.....	7
3.2	Cílové skupiny organismů	8
4.	Prostorové uspořádání ekoduktu v krajině	10
4.1	Svah vedoucí na ekodukt.....	10
4.2	Napojení ekoduktu na krajinné struktury.....	11
5.	Krajinářský design ekoduktu.....	13
5.1	Ekodukt jako hodnotný biotop	14
5.2	Typové situace ekoduktů v krajině	15
5.3	Protihlukové a protisvětelné bariéry	18
6.	Vegetační řešení a dlouhodobý management ekoduktu	18
6.1	Výběr vegetačního typu.....	18
6.2	Řízená sukcese	19
7.	Efektivita ekoduktů v krajině	20
8.	Praktické aspekty řešení ekoduktů z UHPC	22
8.1	Konstrukční princip ekoduktu.....	22
8.2	Příklady realizací konstrukcí z UHPC.....	23
8.3	Mechanické chování UHPC konstrukcí	24
8.4	Vazba konstrukce na ekologické požadavky.....	24
9.	Materiálové řešení ekoduktu – návrh a experimentální ověření.....	25
9.1	Návrh směsi a její optimalizace z pohledu uhlíkové stopy	25
9.2	Vlastnosti čerstvé betonové směsi	26
9.3	Zkoušky pevnosti v jednoosém tlaku.....	26
9.4	Pevnost v tahu za ohybu, lomová energie a houževnatost	28
9.5	Pevnost v prostém tahu.....	29
9.6	Stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku.....	30
9.7	Rázová zkouška	30
9.8	Odolnost betonu proti CHRL.....	32
10.	Vzorové technické řešení ekoduktu z UHPC.....	33
10.1	Konstrukční koncepce a statické působení.....	33
10.2	Předběžný statický návrh pro přemostění komunikace kategorie D 27,5.....	34

10.3	Konstrukční uspořádání a prefabrikace prvků	34
10.4	Předběžný statický výpočet pro přemostění kategorie D 27,5.....	36
10.5	Modifikace návrhu pro komunikaci kategorie D 33,5.....	42
10.6	Ekonomické aspekty řešení	42
10.7	Technologie výstavby.....	44
11.	Mock-up experiment ekoduktu z UHPC	46
11.1	Úvod a cíl experimentu.....	46
11.2	Materiál mock-up experimentu.....	46
11.3	Geometrie, výroba a montáž redukováného modelu	47
11.4	Experimentální uspořádání a numerická simulace.....	50
12.	Závěr	56
	Použité zkratky	56
	Literatura	57
	Legislativní rámec dotčené problematiky	62

1. Současný stav problematiky ekoduktů

Ekodukt (zelený most) je cíleně vybudovaný migrační objekt, který umožňuje živočichům bezpečně překonat liniovou dopravní infrastrukturu, typicky silnici, dálnici nebo železnici (Anděl et al. 2005, Hlaváč et al. 2020). Migrační trasa je vedena nad liniovou stavbou, nejčastěji prostřednictvím přesypaného mostu nebo tunelu s vegetačním krytem. Při návrhu ekoduktu je kladen důraz na zachování přirozeného charakteru migrační trasy a její návaznosti na okolní krajinu. Typické řešení ekoduktu je schematicky znázorněno na obr. 1.



Obr. 1: Ekodukt Mladotice přes silnici I/20. Zdroj: Mapy.cz.

Rozvoj dopravní infrastruktury představuje významný faktor fragmentace krajiny, který negativně ovlivňuje pohyb volně žijících živočichů a kontinuitu jejich migračních tras. Jak uvádí Hlaváč et al. (2020), liniové stavby mohou vést ke zvýšené mortalitě živočichů, omezení genového toku mezi populacemi a k postupné izolaci jednotlivých skupin organismů. Tyto dopady se projevují napříč různými taxonomickými skupinami, od velkých saveců až po drobné obratlovce a bezobratlé.

Ekodukty představují jedno z klíčových technických opatření ke zmírnění negativních vlivů liniových staveb na krajinu a živočichy. Ve srovnání s jinými typy migračních objektů umožňují zachování přirozeného charakteru migrační trasy, kontinuitu vegetačního krytu a lepší návaznost na okolní habitaty. Jejich funkčnost je však podmíněna vhodným návrhem, zejména z hlediska šířky objektu, struktury vegetace, způsobu napojení na okolní krajinu a míry rušení z dopravy (Clevenger & Huijser, 2011, Hlaváč et al., 2020).

2. Ekodukty v dopravní infrastruktuře

Ekodukty realizované na české dálniční síti jsou ve většině případů navrženy jako masivní železobetonové konstrukce. Převážná část těchto objektů byla realizována současně s výstavbou dopravní infrastruktury, zatímco dodatečná výstavba nad provozovanými komunikacemi je technologicky i organizačně výrazně náročnější.

Z tohoto důvodu se v posledních letech objevují snahy o návrh konstrukčních systémů, které by umožnily výstavbu ekoduktů i nad plně provozovanou komunikací, při současném snížení spotřeby konstrukčního materiálu, omezení dopravních omezení a minimalizaci environmentálních dopadů výstavby. Příkladem alternativního přístupu jsou dřevěné ekodukty realizované ve Švýcarsku, které těží z nízké hmotnosti a rychlé montáže prefabrikovaných prvků. Jejich nevýhodou je však omezená životnost, nižší požární odolnost a zvýšené nároky na ochranu konstrukce proti vlhkosti a vodě.

Jako základní konstrukční materiál byl zvolen UHPC (Ultra-High Performance Concrete), který se vyznačuje vysokou pevností, velmi nízkou propustností a dlouhodobou trvanlivostí. Tyto vlastnosti umožňují návrh subtilních prefabrikovaných prvků s vysokou odolností vůči vodě a agresivním látkám a současně umožňují omezení některých konstrukčních vrstev běžných u klasických mostních objektů.

Návrh ekoduktu je v této práci pojímán komplexně. Vedle konstrukčních a materiálových aspektů jsou zohledněny také ekologické souvislosti, zejména požadavky na migraci živočichů, charakter vegetačního pokryvu a návaznost objektu na okolní krajinu. Na řešení se proto podíleli odborníci z oblasti stavebnictví, botaniky a zoologie, aby byl návrh funkční nejen z hlediska statického a technologického, ale i z hlediska ekologické konektivity krajiny.

Základním konstrukčním principem navrženého řešení je jednopólový obloukový systém, který překlenuje komunikaci v jednom rozpětí bez podpěr ve středním dělicím pásu. Tento přístup odpovídá současným trendům v návrhu dálniční infrastruktury a minimalizuje zásahy do provozu komunikace. Uvažovány jsou varianty pro čtyřpruhové i šestipruhové dálnice s rozpětím přibližně 30 až 40 m. Vodorovné síly vyvolané obloukem jsou v základní variantě zachyceny táhlem, což umožňuje realizaci objektu i v málo únosných zeminách. V případě příznivých geotechnických podmínek, například při umístění ekoduktu v horninovém zářezu, lze přenos vodorovných sil zajistit přímo do podloží bez použití táhla.

Nosná konstrukce ekoduktu je navržena jako prefabrikovaný systém s variabilní šířkou, umožňující přizpůsobení objektu konkrétním požadavkům lokality. Na horní povrch nosné konstrukce je přímo ukládána zemina, která vytváří příznivé trvalé zatížení z hlediska statického působení oblouku. Ve statickém návrhu je současně uvažováno zatížení stavebními a údržbovými mechanismy, zatímco zatížení běžnou silniční dopravou se vzhledem k funkci objektu neuvažuje.

Povrch ekoduktu je navržen s ohledem na charakter okolní krajiny a osázen vhodnou vegetací. Součástí řešení jsou rovněž opatření ke snížení hlukového a světelného zatížení, která zvyšují funkčnost objektu z hlediska migrace živočichů. Podrobné konstrukční, materiálové, technologické a krajinářské řešení navrženého ekoduktu je dále rozpracováno v následujících kapitolách této metodiky.

2.1 Typy ekoduktů a jejich funkce

Ekodukty propojují habitaty a krajinu tím, že přemostí liniovou bariéru bez jejího přerušení (Smith et al., 2015). Ve srovnání s jinými typy migračních objektů umožňují zachovat okolní podmínky, v ideálním případě včetně vegetačních struktur, a přispívají k lepšímu začlenění stavby do krajiny (Smith et al., 2015). S rostoucí šířkou ekoduktu se zvyšuje účinnost tohoto propojení, což má přímý vliv na spektrum

organismů, které objekt využívají. V anglicky psané literatuře se proto nadzemní migrační objekty rozlišují na „ecoducts“ (též „land bridges“ nebo „green bridges“) a tzv. „wildlife overpasses“ (Smith et al., 2015). Zatímco ekodukty by měly mít šířku alespoň 50 m, wildlife overpasses mohou být užší, přibližně 20 m. Toto rozlišení však není v české praxi oficiálně zavedeno.

Jak uvádí Hlaváč et al. (2020), jednoznačné vymezení účelu ekoduktů je obtížné, přesto lze shrnout jejich hlavní přínosy. Základní funkcí je umožnění bezpečného pohybu živočichů přes bariéru, ať už se jedná o sezónní migraci, pohyb za potravou, rozmnožování, únik před disturbancemi nebo predátory (Anděl et al., 2005). Významným přínosem ekoduktů je rovněž snížení mortality živočichů na komunikacích (Gloyne & Clevenger, 2001). V tomto ohledu však existuje relativně málo studií a jejich výsledky nejsou jednotné (Sijtsma et al., 2020; Rietz & Strömngren, 2023; Sugiarto, 2023). Některé studie z České republiky sice zahrnují data o mortalitě živočichů v okolí ekoduktů, avšak bez srovnání stavu před a po jejich realizaci, což neumožňuje jednoznačné vyhodnocení jejich efektivity (Vajgantová, 2011).

Dalším významným přínosem ekoduktů je funkce migračních koridorů propojujících habitaty, čímž dochází ke zvětšení areálů dostupných pro jednotlivé populace, například při hledání potravy (Land, 1996). Ekodukt může zároveň plnit roli sekundárního habitatu, například v podobě mokřadních stanovišť zakládáných na zelených mostech v Nizozemsku za účelem umožnění bezpečného přechodu silnice pro obojživelníky (Van der Grift et al., 2009).

Realizace ekoduktů může mít přímý vliv na životaschopnost populací v dané lokalitě. Jedním z klíčových mechanismů je zajištění genového toku mezi populacemi, který u malých a izolovaných populací přispívá ke zmírnění genetických problémů, jako je například inbrední deprese (Ovaskainen, 2013). Ani v tomto případě však nejsou závěry studií jednoznačné, neboť některé práce potvrzují umožnění genového toku, zatímco jiné poukazují na nedostatek dat pro spolehlivé vyhodnocení (Corlatti et al., 2009; Sawaya et al., 2014).

Bezpečné překonání bariéry a rozšíření prostoru využitelného pro daný druh může ovlivnit i mezidruhové interakce, například vztahy predátora a kořisti. Velké šelmy jsou obzvláště citlivé na bariérový efekt způsobený liniovými stavbami (Sweaner et al., 2000). Umožnění jejich pohybu napříč krajinou může přispět k lepšímu udržení rovnováhy mezi populacemi predátorů a kořisti (Gloyne & Clevenger, 2001).

2.2 Ekodukty v České republice

V České republice je v současnosti v provozu 33 ekoduktů a dalších 5 je ve výstavbě (viz obr. 2). První ekodukt byl realizován v roce 1999 na dálnici D35 u Dolního Újezdu (Libosvár, 2016). Studie hodnotící umístění a konstrukční řešení 14 ekoduktů vybudovaných do roku 2013 dospěla k závěru, že pouze dva z nich, Dolní Újezd a Voleč, lze považovat za vyhovující (Špitálník, 2013). Další studie zaměřená na sedm ekoduktů dokončených do roku 2014 na Pražském okruhu upozorňuje na problematiku množství objektů, jejich šířku, hloubku, kvalitu půdy i stav vegetace, přesto však připouští, že ekodukty mohou alespoň částečně plnit svou funkci (Čánská, 2014). Kritizováno je rovněž neefektivní využití finančních prostředků. Monitoring ekoduktu Nová Hospoda v jižních Čechách zaznamenal převážně výskyt menších savců, například lišek a zajíců, přičemž větší savci se objektu pravděpodobně vyhýbali z důvodu otevřené krajiny a rušení v okolí (Vajgantová, 2011). Naopak ekodukty na úseku dálnice D1 jsou využívány savci většími než lasice kolčava, což je v rozporu s některými dřívějšími hodnoceními jejich efektivity (Jurečka, 2017; Špitálník, 2013).



Obr. 2: Ekodukty na silniční a dálniční síti v ČR (stav 01/2025).

Náklady na výstavbu ekoduktu v České republice se bez započtení budoucí údržby pohybují přibližně okolo 130 mil. Kč, přičemž v některých případech mohou být až dvojnásobné (Vajgantová, 2011). Tento údaj je však již zastaralý. Studie hodnotící náklady na ekodukty v Nizozemsku uvádí průměrné investiční náklady přesahující 5,7 mil. EUR na jeden objekt (Sijtsma et al., 2020). Přestože jsou ekodukty z ekologického hlediska považovány za nejpřínosnější typ migračního objektu, z hlediska nákladové efektivity vykazují horší výsledky než jiné typy opatření. Vzhledem k vysokým investičním nákladům je proto zásadní zajistit jejich co nejvyšší funkčnost.

Biologická hodnota ekoduktů v České republice je podle dostupných studií často nízká a je ovlivněna řadou faktorů, včetně fyzických parametrů objektu, jako jsou šířka, sklon a materiálové řešení povrchu, ale také jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Podle Rotha (2017) jsou biodukty v České republice často příliš úzké, mají nevhodnou strukturu a nejsou dostatečně napojeny na okolní krajinnou zelenou infrastrukturu, tedy rozsáhlejší hodnotné krajinné celky.

3. Ekologické požadavky na návrh ekoduktu

3.1 Vegetace a zoologie ekoduktu

Vegetace a zoologické aspekty návrhu ekoduktu jsou zásadní pro jeho funkčnost z hlediska migrace živočichů i dlouhodobé ekologické stability. Vegetace na ekoduktu musí odpovídat ekologickému kontextu okolní krajiny a současně splňovat nároky cílových druhů organismů.

Vegetace na ekoduktu musí splňovat následující základní požadavky:

- vegetace musí odpovídat okolním biotopům (např. les–les, step–step),
- vegetace musí splňovat biotopové nároky cílových druhů,
- vegetace musí být heterogenní tak, aby vyhovovala nárokům širokého spektra organismů,
- okraje ekoduktu by měly být porostlé hustší a vyšší vegetací za účelem odstínění světla a hluku, střední část by měla být rozvolněnější,
- vegetace by měla být navržena s cílem minimalizovat nároky na dlouhodobou údržbu.

Vhodná vegetace na ekoduktu může u některých druhů živočichů částečně kompenzovat jeho méně vyhovující rozměry (Corlatti et al., 2009). Zároveň je však zásadní zejména pro menší druhy, pro které může být nevhodný nebo příliš otevřený povrch ekoduktu nepřekonatelnou bariérou (Iuell et al., 2003). Tyto druhy často vyžadují specifické mikroklimatické podmínky a vegetační kryt, pod kterým se mohou ukrýt a snížit tak riziko predace. Naopak větší živočichové, například kopytníci, preferují ekodukty s nižší vegetací, která jim umožňuje dobrý přehled o okolí a včasnou identifikaci potenciálního nebezpečí (Sawyer et al., 2016). Vegetace na ekoduktu by proto měla kombinovat různé typy porostů a plynule navazovat na okolní krajinu, aby umožnila jeho využití více skupinami organismů (Myslajek et al., 2020). Důležitý je rovněž vývoj vegetace v čase, se kterým se mění i spektrum druhů, jež ekodukt využívají (Georgii et al., 2011); tomuto tématu se věnuje samostatná kapitola.

3.2 Cílové skupiny organismů

Podle Georgii et al. (2011) musí vegetace na ekoduktu respektovat požadavky cílových druhů. Například lesní brouci se vyskytují spíše na zakrytých ekoduktech, na kterých rostou stromy a vysoké keře, jež jim slouží jako orientační prvky při pohybu přes objekt (Zinner et al., 2018). Netopýři k orientaci využívají stromy a keře vysazené v liniových strukturách (Georgii et al., 2011; Martínez-Medina et al., 2022). Z výzkumů rovněž vyplývá, že lesní druhy ptáků se zdráhají přelétat otevřené úseky bez stromového krytu delší než 45 m, a vyžadují proto zalesněné ekodukty (Tremblay & St. Clair, 2009).

Hustší a nižší vegetace na migračních objektech zvyšuje jejich vhodnost zejména pro malé savce (McDonald et al., 2004). Například myšice křovinné, rejsky a hraboši se vyskytují především v částech ekoduktů s vysokými travami a keři, které jim poskytují úkryt (Van Wieren & Worm, 2001). Podle D'Amico et al. (2015) byl v Kanadě ekodukt porostlý trávou a řídkými mladými stromy a keři využíván křečkem dlouhoocasým, norníkem rudohřbetým i hrabošem pensylvánským, a to častěji než podchody. Studie tak potvrzuje význam vegetace jako ochrany před predátory.

Naopak u velkých šelem může nízká vegetace představovat limitující faktor. Výzkum Gloyne & Clevenger (2001) ukázal, že pumy americké preferují zelené mosty s možností dostatečného krytu. Na zkoumaných ekoduktech byly vysázeny původní trávy a dřeviny nižší než 2 m, například hlošina stříbrná (*Elaeagnus commutata*), růže jehličková (*Rosa acicularis*) a vrby (*Salix* sp.), přesto byly tyto objekty využívány pouze omezeně. Autoři jako možné vysvětlení uvádějí kombinaci nízké vegetace, která neposkytovala dostatečný úkryt, a prudkého vstupu na ekodukt, jenž omezoval výhled na objekt i za něj.

Studie provedené v Německu ukázaly, že některé skupiny bezobratlých, zejména plchovití, střevlíkovití, pavouci a sarančata, kladou na habitaty na ekoduktech vysoké nároky (Georgii et al., 2011). Přestože se v dané oblasti vyskytují převážně druhy otevřené krajiny, byla sarančata často zaznamenána i na lesnatých ekoduktech, přičemž objekty s otevřeným a sušším habitatem plnily funkci refugií. U motýlů bylo pozorováno, že vyhledávají keře a místa vhodná k vyhřívání a výskyt byl nejvyšší na ekoduktech s přítomností nektarodárných rostlin (Zinner et al., 2018).

Pro malé živočichy může i relativně úzký pás nevhodné vegetace představovat nepřekonatelnou bariéru. Na ekoduktu v Německu, který byl převážně porostlý stromy typickými pro danou oblast, se téměř nevyskytovali lesní brouci rodu *Abax*, ačkoliv jsou pro lokalitu charakterističtí (Zinner et al., 2018). Autoři tento jev vysvětlili přítomností pásu husté trávy na vstupu na ekodukt, který brouci s redukovanými křídly nebyli schopni překonat. Pro ještěrky však podobná bariéra nepředstavovala zásadní problém.

Na otevřenějších částech ekoduktů byli ve studiích ze západní Evropy zaznamenáni zajáci, jezevci a lišky (Georgii et al., 2011). Vyšší vegetace na vstupu na ekodukt ani na samotném objektu nevyhovuje kopytníkům, kteří ji mohou vnímat jako riziko z hlediska detekce predátorů (Denneboom et al., 2021). Výsledky studií z USA tento závěr potvrzují, přičemž jelenci ušatí i vidlorozi američtí preferovali ekodukty porostlé nízkými travami, jejichž okraje byly tvarovány zemními valy omezujícími výhled na komunikaci (Simpson et al., 2016; Sawyer et al., 2016).

Vhodné propojení habitatů na obou koncích ekoduktu a vegetace poskytující potravu a úkryt přecházejícím živočichům je považováno za klíčový faktor jeho funkčnosti (Mysłajek et al., 2020). Na ekoduktech v Polsku, které byly porostlé hustými keři a mladými borovicemi lesními (*Pinus sylvestris*), byla pozorována široká škála druhů včetně velkých kopytníků a menších šelem. Také na ekoduktu v Kanadě byla vysázena vegetace typická pro danou oblast, zahrnující keře a mladší stromky, které ještě nedosáhly plné výšky (Gunson et al., 2015). Tento ekodukt byl nejčastěji využíván jelenci běloocasými, dále losy evropskými, medvědy baribaly, liškou obecnou, vlky lesními (*Canis lycaon*) a kojoty prérijními. Rys byl zaznamenán pouze v okolí ekoduktu, nikoliv přímo na něm. Zatímco kopytníci byli častěji pozorováni přímo na ekoduktu, šelmy se vyskytovaly převážně na přístupových cestách.

Autoři tento trend blíže nekomentují, přestože se částečně odlišuje od výsledků jiných studií, podle nichž jsou mírně zarostlé a méně přehledné ekodukty využívány spíše šelmami, zatímco kopytníci se jim vyhýbají. Jedním z možných vysvětlení může být šířka ekoduktu, která je pro šelmy významným faktorem (viz předchozí kapitola). Studovaný zelený most byl široký 30 m a ani relativně vhodná vegetace pravděpodobně nezajistila dostatečný pocit bezpečí pro tuto skupinu. Přestože byl objekt vybaven protihlukovými bariérami, nelze vyloučit ani vliv dopravního ruchu, který mohl šelmy od využívání ekoduktu odrazovat více než kopytníky.

Velmi specifický ekodukt byl realizován v Nizozemsku za účelem zajištění bezpečného přechodu silnice pro obojživelníky. Z tohoto důvodu byla na objektu uměle vytvořena kaskáda jezírek, do nichž je přiváděna voda z okolních mokřadů (Van der Grift et al., 2009). Součástí ekoduktu je rovněž nepodmáčená zóna. Monitoring výskytu obojživelníků ukázal, že tyto živočichové jednoznačně preferovali podmáčené části ekoduktu. Přestože jezírka během sledování opakovaně vysychala, obojživelníci setrvali převážně v podmáčené části, pravděpodobně i díky vyšší vegetační pokrývnosti, která jim poskytovala lepší úkryt (Van der Grift et al., 2009). Zřízení umělých vodních prvků na ekoduktech je finančně náročné a zpravidla se nevyplácí, pokud obojživelníci nejsou cílovou skupinou. Studie však naznačuje, že pro výskyt této skupiny organismů může být dostačující i udržování vlhčí půdy. V případě plánování ekoduktu v lokalitě významné pro jarní migraci obojživelníků tak může vytvoření podmáčené zóny významně zvýšit jeho funkčnost.

Vegetace na ekoduktu by měla v první řadě odpovídat charakteru okolního prostředí a současně reflektovat požadavky druhů, pro které je objekt navrhován. V případě tzv. vlajkových druhů, mezi které často patří kopytníci a šelmy, je obtížné navrhnout ekodukt vyhovující oběma skupinám současně. Jako jedno z možných řešení se proto nabízí realizace dvou typů ekoduktů. Ekodukty určené primárně pro kopytníky mohou být užší a porostlé nízkou vegetací umožňující dobrý výhled, zatímco ekodukty pro šelmy by měly být výrazně širší (přibližně 50 m) a porostlé hustší vegetací poskytující dostatečný úkryt. Vzhledem k nižší plachosti kopytníků se v jejich případě nabízí rovněž využití víceúčelových nadchodů.

Vedle velkých savců mohou ekodukty využívat i menší živočichové, včetně drobných savců, ptáků a bezobratlých. Druhy velikostně srovnatelné s hraboši vyžadují možnost úkrytu pod keři či vyšší vegetací. Totéž platí i pro menší šelmy, například lišky nebo jezevce, které rovněž vyhledávají kryt. Netopýři využívají keře a stromy vysazené v liniích jako orientační prvky při letu. Savci větší než zajíc, s výjimkou šelem, naopak preferují otevřenější zelené mosty, které jim umožňují přehled o okolí a potenciálních predátorech. Jak však ukazují některé studie, ani optimální vegetační skladba nemusí zajistit využívání ekoduktu náročnějšími druhy, pokud je objekt příliš úzký.

Bezobratlí jsou často výrazně specializovaní na konkrétní typy habitatů, a proto je v jejich případě nezbytné znát druhové složení dané lokality a tomu přizpůsobit návrh ekoduktu. Vytvoření vhodných mikrohabitatů, například na okrajích objektu, může být pro zajištění jeho funkčnosti pro tuto skupinu dostačující. Je však nutné počítat s tím, že i relativně úzké pásy nevhodné vegetace mohou pro bezobratlé představovat nepřekonatelnou bariéru.

Ptáci jsou na ekoduktech dosud studováni jen omezeně. Je však známo, že lesní druhy ptáků nepřelétají delší otevřené úseky bez stromového krytu. Požadavky ptáků otevřené krajiny na strukturu ekoduktů nejsou dosud dostatečně popsány, lze však předpokládat určitou podobnost s nároky malých savců otevřené krajiny.

4. Prostorové uspořádání ekoduktu v krajině

4.1 Svah vedoucí na ekodukt

Obecně se doporučuje, aby stoupání na ekodukt bylo pozvolné; ideálně by měl mít svah sklon přibližně 12 % a neměl by přesáhnout 15 % (Jedrzejewski et al., 2009). Pro dodržení těchto hodnot je zejména v plochých lokalitách nutné navrhovat dlouhé náběhy na zelené mosty, které mohou výrazně zasahovat do okolní krajiny. Studie z Polska však ukázaly, že ekodukty se sklonem přibližně 25 %, tedy výrazně vyšším, než je běžně doporučeno, byly využívány živočichy častěji než ekodukty se sklonem okolo 12 % (Mysłajek et al., 2020). Zároveň bylo pozorováno, že ekodukty s prudším svahem byly méně využívány lidmi, a nelze proto jednoznačně určit, zda vyšší frekvence výskytu živočichů nebyla ovlivněna právě nižší mírou antropogenní disturbance.

V Bulharsku byl z konstrukčního hlediska za vyhovující označen svah na ekoduktu se sklonem až 30°, což odpovídá přibližně 57,7% stoupání (Stoilova et al., 2018). Tento závěr byl však učiněn výhradně na základě konstrukčních kritérií a není dán do souvislosti s využíváním ekoduktu živočichy. Pokud by se nicméně strmější ekodukty ukázaly jako ekologicky funkční, mohlo by jejich využití představovat výhodu z hlediska nižších nákladů na výstavbu.

Z hlediska chování živočichů preferují například jelenci zelené mosty s mírnějším sklonem na vstupu, a to zejména z důvodu lepšího výhledu na druhou stranu objektu (Simpson et al., 2016). U malých savců bylo naopak zjištěno, že jim nevyhovuje již přibližně třímetrové stoupání na vstupu na ekodukt, pravděpodobně v důsledku vyšších energetických nároků a zvýšeného rizika predace (Diffendorfer et al., 1995). Přítomnost vzrostlé vegetace na vstupu na ekodukt však může tyto negativní faktory částečně eliminovat, neboť poskytuje kryt před predátory, a umožnit tak využívání ekoduktu i při méně příznivém sklonu.

Celkově lze konstatovat, že počet dostupných studií zabývajících se vlivem sklonu svahu na využívání ekoduktů je omezený a jejich závěry se v řadě případů liší. Výsledky jsou navíc ovlivněny dalšími faktory, zejména strukturou vegetace na svahu, způsobem napojení na okolní krajinu a mírou využívání ekoduktu lidmi.

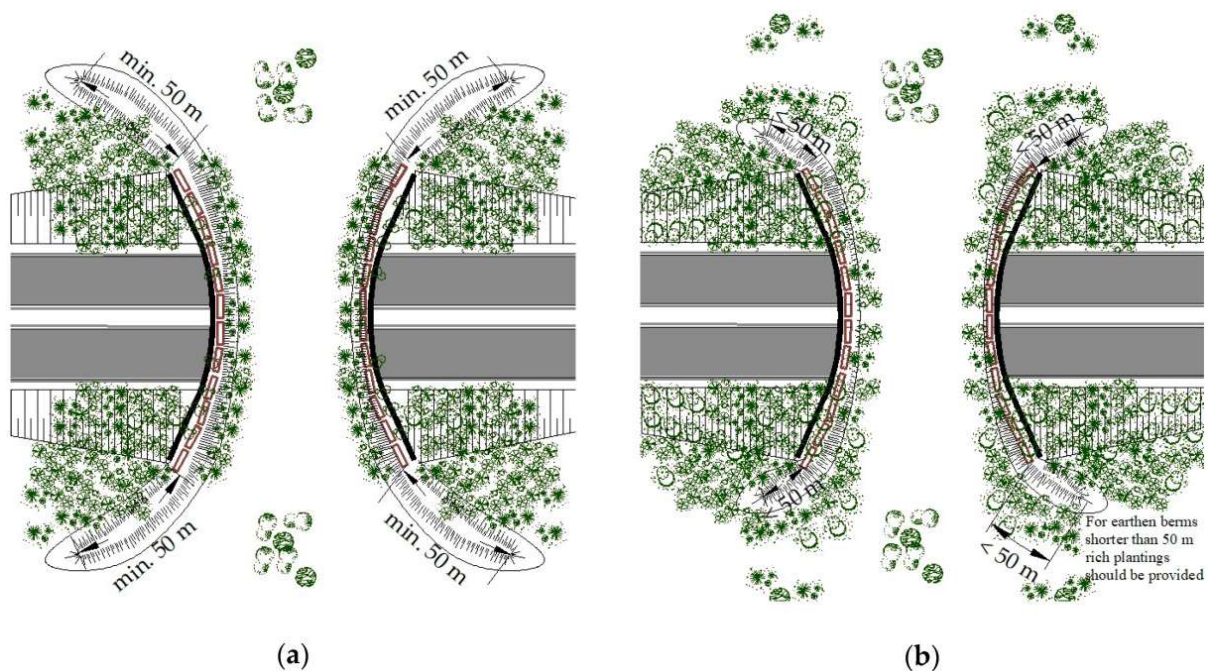
4.2 Napojení ekoduktu na krajinné struktury

Napojení současných ekoduktů na okolní krajinu je v řadě případů nedostatečné. Výjimkou nejsou ani ekodukty typu „pole–pole“, které neposkytují vhodné podmínky pro migraci ani běžným druhům živočichů typickým pro současnou kulturní krajinu.

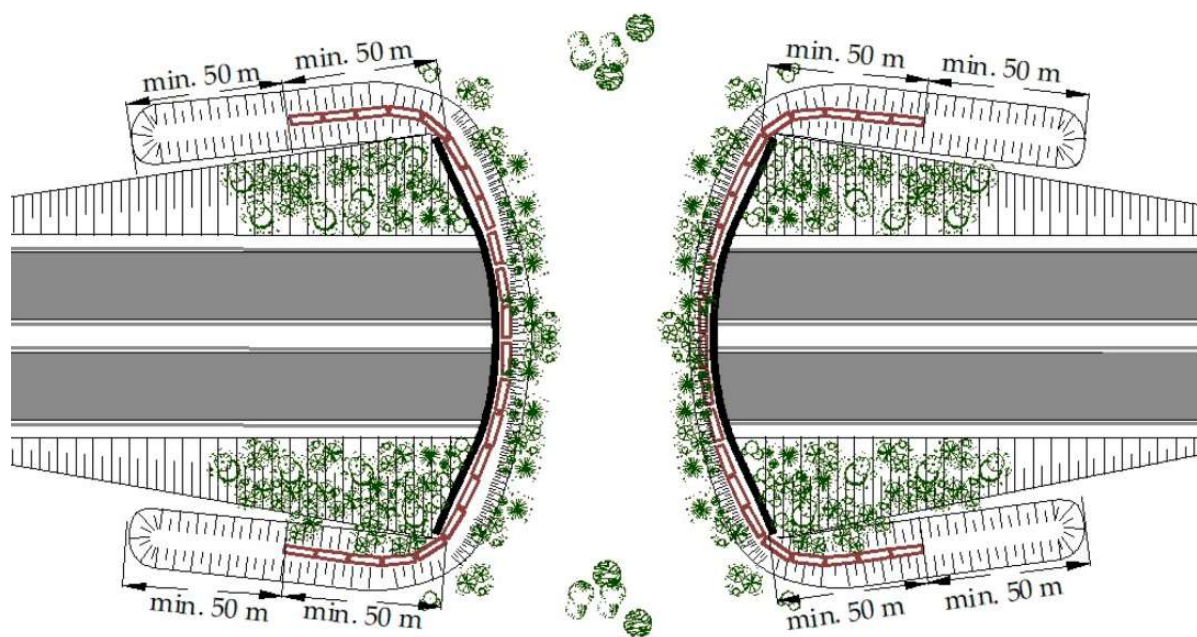
Základním aspektem plánování ekoduktu, stejně jako jiných migračních objektů, je jeho umístění do migračního koridoru využívaného cílovými druhy (Clevenger & Ford, 2010). Současně je nezbytné, aby okolí zeleného mostu poskytovalo živočichům vhodné podmínky. Prudké svahy, nedostatek úkrytů v blízkosti ekoduktu nebo přítomnost alternativního, výhodnějšího migračního objektu v okolí mohou využívání konkrétního ekoduktu významně omezit.

Jak uvádějí Georgii et al. (2011), efektivita ekoduktů je úzce spjata s krajinou v jejich okolí, neboť ekodukty jsou funkční pouze do té míry, do jaké je funkční jejich krajinné napojení (Clevenger & Waltho, 2005). Mezi krajinné faktory ovlivňující intenzitu pohybu živočichů přes ekodukt patří zejména variabilita krajiny, terénní konfigurace a charakter okolních habitatů (Clevenger & Huijser, 2011). Sołowczuk (2020) se zabývala vlivem krajinných prvků na hluk na ekoduktech, který může negativně ovlivňovat jejich využívání živočichy. Jedním z jejích zjištění je pozitivní vliv symetricky zarostlého okolí ekoduktu, které významně snižuje hladinu hluku na objektu. Takové řešení je však finančně náročné a vyžaduje pravidelnou údržbu vzrostlé vegetace. Jako alternativní přístup se proto nabízí výsadba menšího počtu mladších dřevin na vstupu na ekodukt, které se postupně rozrostou a vytvoří refugium pro přecházející jedince.

Uměle vytvořené vodní plochy v blízkosti ekoduktu, sloužící jako napajedla, mohou podle Sołowczuk (2020) rovněž zvýšit frekvenci pohybu živočichů přes ekodukt. Mezi krajinné prvky s významným pozitivním vlivem na snížení hluku patří také kameninové valy, které lze vytvořit z odpadového materiálu ze stavby ekoduktu nebo přilehlé komunikace. Tyto valy by měly dosahovat výšky přibližně 3 m a délky minimálně 50 m podél komunikace. Důležitý je jejich parabolický tvar, který přispívá ke snížení hluku nejen na samotném ekoduktu, ale i na jeho vstupu a v bezprostředním okolí (viz obr. 3). Toto řešení je výrazně ekonomicky efektivnější než symetrické osázení okolí ekoduktu a je zvláště vhodné v případech, kdy je objekt obklopen zvyšujícím se terénem. V otevřeném a plochém terénu se naopak doporučuje tvarování valů do podoby podkovy (viz obr. 4). Účinnost těchto opatření se dále zvyšuje postupným zarůstáním vegetací, a to jak na valech, tak v jejich okolí. Konkrétně je doporučováno osázení rakytníkem řešetlákovým (*Hippophae rhamnoides*), zejména v případech, kdy není možné realizovat dostatečně dlouhé valy (Sołowczuk, 2020).



Obr. 3: Krajinné prvky a struktury doporučené pro ekodukt umístěný v nerovném a otevřeném terénu.
 (a) příklad krajinných prvků a struktur doporučených pro valy delší než 50 m;
 (b) příklad krajinných prvků a struktur doporučených pro valy kratší než 50 m, kde je doporučeno husté osázení koncových částí valů (Sołowczuk, 2020).



Obr. 4: Doporučené terénní úpravy a tvarování krajinných prvků pro ekodukt umístěný v ploché a otevřené krajině (Sołowczuk, 2020).

Aby byl ekodukt zpřístupněn i pro hmyz, je nezbytné vytvořit návazné koridory stanovišť, které umožní šíření jedinců přes objekt (Reck et al., 1997, 2023). Zalesněné okolí ekoduktu je preferováno lesními druhy ptáků, které obvykle nepřekonávají bezlesé úseky delší než 45 m. Pokud je tedy vzdálenost mezi lesním porostem a ekoduktem větší, je pravděpodobné, že se tyto druhy na zeleném mostě budou vyskytovat pouze omezeně (Tremblay & St. Clair, 2009). Blízkost lesa pozitivně korelovala s

využíváním migračních objektů vlky, jeleny wapiti a jelenci v Kanadě (Clevenger & Waltho, 2005). Také šelmy, například puma americká nebo rys červený, stejně jako zajícovci, preferují zarostlé okolí zelených mostů, které jim poskytuje kryt a možnosti lovu (Clevenger & Waltho, 2005; Hamilton et al., 2024). Tento závěr podporují i výsledky studie z Kanady, kde ryši překonávali silnice především v místech s blízkým úkrytem v podobě stromového porostu (Baigas et al., 2017). Na lesním ekoduktu v Belgii byli kromě uvedených druhů zaznamenáni také kočky divoké, lišky a zajícovci (Polman, 2014).

Podle Hamilton et al. (2024) naopak predované druhy, například kopytníci, častěji využívají ekodukty umístěné v otevřené krajině, kde mají lepší přehled o okolí a potenciálních predátorech. Studie ze Španělska však neprokázala vliv vzdálenosti nejbližšího úkrytu na frekvenci využívání ekoduktů jeleny, zajícovci ani velkými šelmami (Mata et al., 2005). Autoři tento výsledek vysvětlují tím, že v okolí většiny studovaných migračních objektů byla přítomna vegetace vhodná k úkrytu a případné drobné rozdíly nebyly statisticky průkazné.

Ekologie jednotlivých druhů je klíčová pro pochopení toho, které ekodukty budou konkrétní živočichové využívat. Ve Spojených státech bylo například zjištěno, že ovce tlustorohá (*Ovis canadensis*) využívá ekodukty v horských oblastech, zatímco kojoti a zajícovci byli zaznamenáváni především na ekoduktech v nížinách (Hamilton et al., 2024). Jelenci a vidlorozi rovněž výrazně častěji využívali ekodukty umístěné v údolích, kde byl zajištěn dobrý výhled na objekt i za něj (Sawyer et al., 2016; Simpson et al., 2016). Tento výsledek může být částečně ovlivněn blízkostí zimních areálů některých druhů. Nevýhodou ekoduktů obklopených zvyšujícím se terénem je naopak vyšší hluková zátěž, která byla na těchto objektech naměřena (Sołowczuk, 2020).

Ze studií vyplývá, že predované druhy, zejména kopytníci, preferují otevřené prostředí v blízkosti ekoduktů, které jim umožňuje včasnou detekci nebezpečí. Současně však vyžadují přítomnost refugií v okolí objektu, například v podobě vhodné vegetace na vstupu na ekodukt, což platí i pro hmyz. Naproti tomu druhům z vyšších pater trofické kaskády, zejména šelmám, vyhovuje zalesněné okolí zelených mostů, které poskytuje úkryt a příležitosti k lovu. Kameninové valy, zejména pokud jsou porostlé vegetací, mohou díky snížení hlukové zátěže významně přispět ke zpřístupnění ekoduktů širokému spektru živočichů. Při navrhování ekoduktu je proto nezbytné vycházet z druhového složení dané lokality a jasně definovat cílové skupiny organismů; nelze například očekávat výskyt nížinných druhů na ekoduktu situovaném v horské oblasti.

5. Krajinářský design ekoduktu

Navrhované řešení vychází z koncepce nového ekologického a krajinářského designu ekoduktů, jehož cílem je přiblížit tyto objekty charakteru polopřirozených biotopů. ekodukty by měly být koncipovány jako sukcesní mozaiky s jemným prostorovým měřítkem, tedy s rychlým střídáním různých typů vegetace a mikrohabitatů.

Důležitá není pouze horizontální „zrnitost“ této mozaiky, ale také její vertikální struktura. Ideální ekodukt by měl obsahovat celé spektrum vegetačních forem, od nízkých porostů mechorostů a lišejníků, přes bylinnou vegetaci, keřové patro a nižší stromy až po vyšší dřeviny. Přítomnost vzrostlých, starších stromů může být z hlediska nosnosti konstrukce problematická a zároveň představuje dlouhodobý proces. V těchto případech je proto vhodné využívat alternativní prvky, jako jsou torza kmenů, pařezy či jiné strukturální prvky, které zvyšují heterogenitu povrchu, podporují mikrohabitatovou rozmanitost a urychlují vznik mozaikovitého biotopu.

Základním principem navrhovaného řešení je využití řízené sukcese, která spočívá v cílených zásazích do sukcesních procesů s rámcovou představou jejich dlouhodobého vývoje (např. Prach, 2009). Důraz není kladen na okamžitý výsledný vzhled ekoduktu, který se bude v průběhu času přirozeně měnit, ale

na vhodně nastavený ekologický a krajinářský management. Ekodukt je v tomto pojetí chápán jako dynamický prvek krajiny, jehož podoba se vyvíjí v čase.

Nedílnou součástí realizace ekoduktu by měl být pravidelný monitoring jeho ekologických parametrů. Ten může zahrnovat například využití fotopastí pro sledování migrace živočichů nebo zřízení trvalých monitorovacích ploch určených ke sledování změn biodiverzity. Krajinné zásahy by měly být prováděny v návaznosti na výsledky monitoringu v rámci tzv. adaptivního ekologického managementu (Rist et al., 2012), který umožňuje pružně reagovat na neočekávané ekologické jevy, jako jsou invaze nepůvodních druhů nebo expanze některých vegetačních složek.

- **Umístění bioduktu v krajině:**

Současná praxe napojování ekoduktů na biokoridory vymezené v systému ÚSES je často problematická a v mnoha případech nepřispívá ke zlepšení ekologické konektivity krajiny. Síť biokoridorů ÚSES je mnohdy nefunkční, založená na teoretických předpokladech, které se v reálné krajině nenaplnují, nebo vykazuje nevhodný prostorový a krajinářský design, jenž neumožňuje efektivní migraci cílových druhů.

- **Respektování geologického a geomorfologického kontextu:**

Ekodukt by měl respektovat geologické složení okolní krajiny, například nepoužívat horniny s výrazně odlišnou chemickou reakcí, a měl by odpovídat geomorfologickému kontextu daného území. V dlouhodobém horizontu jsou fyzikální a chemické vlastnosti ekoduktu klíčové pro jeho schopnost přirozeně „zapadnout“ do okolní krajiny a nepůsobit jako umělý biotop.

Stejně důležité je geomorfologické členění ekoduktu. Nově vznikající půdní pokryv by měl být pestrý a mozaikovitý, přičemž je žádoucí, aby podloží ekoduktu nebylo homogenní. Naopak by se mělo lišit hloubkou, zrnitostí i složením v jednotlivých částech objektu, čímž se podpoří vznik rozmanitých mikrohabitátů.

- **Vhodné parametry bioduktu a strategie jeho umístování:**

Biodukty je vhodné umístovat do tras přirozeně fungujících biokoridorů, nikoliv pouze do koridorů formálně vymezených v plánovacích dokumentech. Jedná se zejména o dlouhodobě funkční krajinné struktury, jako jsou rozsáhlé a vzájemně propojené lesní komplexy, stepní ekosystémy ve sprašových nebo vulkanických krajinách, případně rozsáhlé mokřady a lužní lesy. Umístění bioduktu v těchto reálně fungujících koridorech výrazně zvyšuje pravděpodobnost jeho dlouhodobé ekologické funkčnosti.

5.1 Ekodukt jako hodnotný biotop

Kromě výše uvedených principů je při návrhu ekoduktu nezbytné vyvarovat se některých, bohužel stále typických, scénářů, které významně snižují jeho migrační funkci a ekologickou hodnotu:

- **umístování cest a komunikací přes ekodukt**, a to i v podobě prašných nebo lesních cest; jakýkoliv průjezd vozidel přes ekodukt je z hlediska jeho funkce nepřijatelný,
- **používání technických nebo zahradnických povrchů**, jako jsou kůrový mulč, asfalt, beton či jiné umělé materiály, které na ekodukty nepatří,
- **výsadba vegetace v pravidelném, technickém sponu**; cíleně vysazovaná vegetace by měla napodobovat strukturu biotopů vzniklých spontánní sukcesí,
- **lemování úzkých ekoduktů vysokými bariérami**, které mohou u migrujících živočichů vyvolávat stres a bariérový efekt; ekodukty je nutné navrhovat s ohledem na chování a „psychologii“ cílových druhů tak, aby se jimi nebály procházet.

5.2 Typové situace ekoduktů v krajině

Součástí metodiky jsou řešení čtyř základních typů ekoduktů, které odpovídají nejčastějším krajinným situacím v České republice:

A. rovina – rovina (ekodukt v ploché a převážně bezlesé krajině) (Obr. 5 a 6).

- **potenciální lokality:** jižní Morava, Polabí, Poohří
- **klíčové aspekty:** napojení na krajinné struktury (často nutnost rozsáhlých úprav širšího kontextu ekoduktu); vytvoření vhodného biotopu na povrchu ekoduktu (např. lesostep, teplomilné trávníky),
- **časté chyby:** vytváření lesního charakteru v nelesní krajině,
- **doprovodná opatření:** dlouhé naváděcí migrační bariéry podél komunikace, směřující živočichy k ekoduktu.



Obr. 5: Typ edoduktu: rovina – rovina. Biotop - kulturní step. Zdroj: AI animace.

B. rovina – svah (ekodukt přecházející z bezlesé roviny do zalesněného svahu)

- **potenciální lokality:** úpatí horských masivů (České středohoří, Krušné hory), úsek dálnice D11 směrem k polské hranici,
- **klíčové aspekty:** propojení rozdílných krajinných typů v kombinaci s vhodně navrženým povrchem ekoduktu,
- **časté chyby:** nevhodný úhel náběhu na svah, nevhodně zvolený typ biotopu na povrchu ekoduktu.



Obr. 6: Typ edoduktu: rovina – rovina. Biotop – les. Zdroj: AI animace.

C. hluboký zářez mezi dvěma svahy (ekodukt procházející zalesněným hlubokým údolím) (Obr. 7)

- **potenciální lokality:** hraniční pohoří České republiky, části Českomoravské vrchoviny,
- **cílové skupiny:** velcí obratlovci a vrcholoví predátoři (např. vlk obecný, medvěd hnědý, kočka divoká),
- **specifika:** vhodné je řešení typu „*Landschaftstunnel*“, tedy co nejširší ekodukt; šelmy jsou mimořádně citlivé na lidské rušení,
- **časté chyby:** nevhodný úhel náběhu a nedostatečná šířka objektu.



a)

b)

Obr. 7: Typ edoduktu: zářez mezi dvěma svahy. Biotop – a) les, b) kulturní step. Zdroj: AI animace.

D. svah – svah (ekodukt procházející prudkým svahem s mozaikovitou krajinou, lesní i bezlesní části, na obou stranách). (Obr. 8)

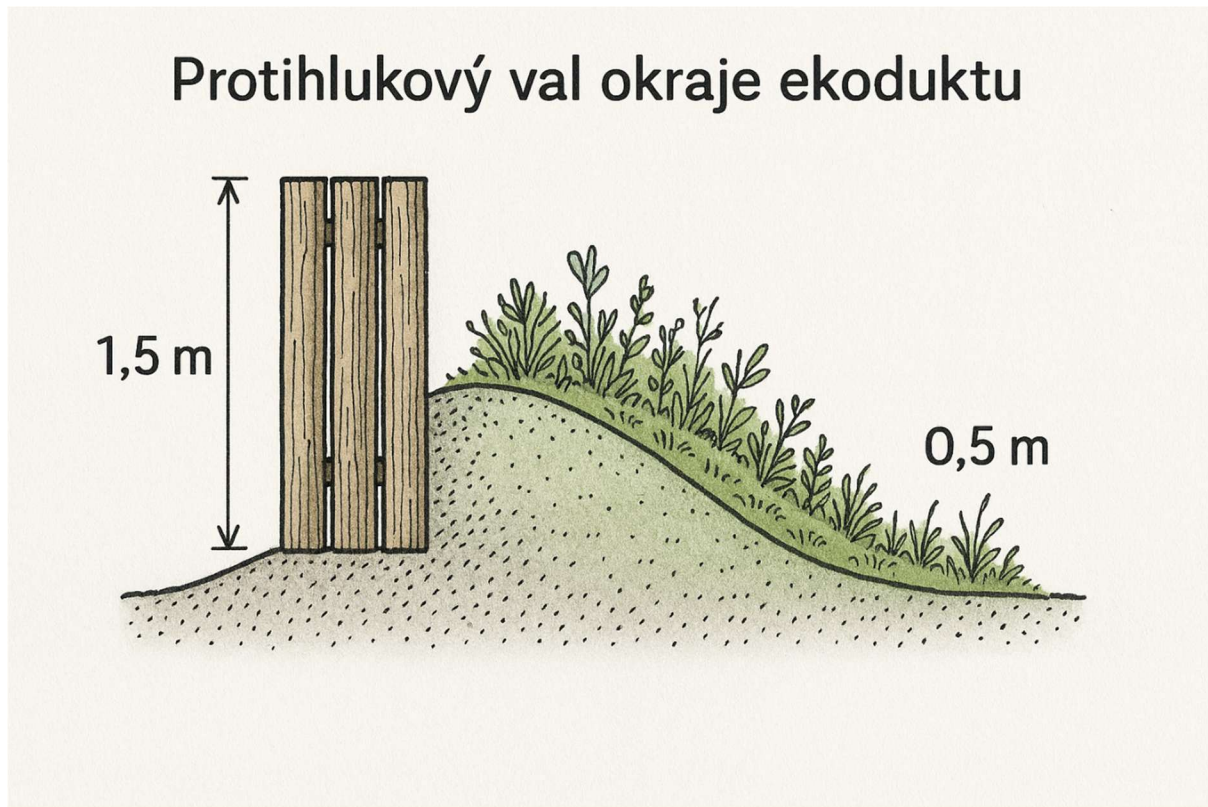
- **potenciální lokality:** úbočí velkých pohoří (Beskydy, Krušné hory, Moravská brána),
- **specifika:** povrch ekoduktu by měl co nejvěrněji kopírovat okolní terén a krajinu; konstrukce musí být navržena s ohledem na možné svahové pohyby.



Obr. 8: Typ edoduktu: svah - svah. Biotop - les. Zdroj: AI animace.

5.3 Protihlukové a protisvětelné bariéry

Zásadním prvkem pro funkčnost ekoduktu je jeho účinné odstínění od silničního provozu. Navrhovaným řešením je protihluková a protisvětelná bariéra ve formě zemního valu porostlého vegetací, viz obr. 9. Toto opatření přispívá ke snížení hlukové zátěže, omezuje osvit od projíždějících vozidel a zároveň podporuje začlenění ekoduktu do okolní krajiny.



Obr. 9: Protihlukový val ekoduktu. Okraj ekoduktu vlevo. Zdroj: AI animace.

6. Vegetační řešení a dlouhodobý management ekoduktu

6.1 Výběr vegetačního typu

Výběr vhodného vegetačního typu na ekoduktu musí vycházet z ekologického kontextu okolní krajiny a z požadavků cílových druhů organismů. Tento proces probíhá ve dvou základních fázích: rešerši dostupných podkladů a terénním průzkumu lokality.

- **Rešerše zdrojů a mapových podkladů**

Pro stanovení vhodného vegetačního řešení ekoduktu jsou považovány za směrodatné zejména následující mapové a datové podklady:

Geologická mapa ČGS v měřítku 1 : 50 000

(<https://mapy.geology.cz/geocr50/>)

Slouží k určení odpovídajícího geologického podloží a k návrhu skladby půdního profilu ekoduktu.

Mapa půdních typů VÚMOP

(<https://mapy.vumop.cz/mapa.php>)

Umožňuje identifikovat převládající půdní typy v území a jejich využití při modelaci svrchních vrstev půdního profilu ekoduktu.

Mapování biotopů České republiky

(<https://aopkcr.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=c38db59779714a78acc4c731152b0290>)

Poskytuje přehled o stávajících biotopech v okolí plánovaného ekoduktu, jejich zachovalosti a druhové pestrosti, a slouží jako podklad pro návrh vegetace odpovídající místnímu ekologickému kontextu.

• Terénní průzkumy

Rešeršní fázi musí vždy doplnit terénní průzkumy, které umožní ověřit a zpřesnit informace získané z mapových podkladů:

- **Botanický a zoologický průzkum okolí plánovaného ekoduktu**, zaměřený zejména na:
 - výskyt invazních, vzácných a ohrožených druhů,
 - převažující vegetační typy a jejich sukcesní stadia,
- **Dlouhodobý zoologický monitoring**, jehož cílem je:
 - identifikace hlavních skupin migrujících živočichů,
 - stanovení jejich migračních tras a intenzity využívání krajiny v okolí plánovaného ekoduktu.

• Výběr vhodné varianty ekoduktu

Na základě rešeršních podkladů a terénních průzkumů jsou vymezeny cílové skupiny organismů, pro jejichž migraci bude ekodukt v dlouhodobém horizontu určen. Tyto skupiny následně určují:

- tvar a šířku ekoduktu,
- krajinářský a vegetační design povrchu ekoduktu,
- cílové vegetační typy a jejich prostorové zastoupení,
- strategii následné údržby a managementu vegetace.

Ekodukt je v tomto pojetí chápán jako funkční prvek krajiny s jasně definovaným ekologickým účelem, nikoliv pouze jako univerzální technická stavba.

6.2 Řízená sukcese

Po dokončení konstrukce ekoduktu a založení půdního profilu na betonovém skeletu dochází k zahájení procesu řízené sukcese. Jejím cílem je postupný vývoj vegetace směrem k cílovému stavu při zachování ekologické funkčnosti objektu.

V rámci dlouhodobého monitoringu jsou sledovány zejména tyto parametry:

- **migrační tok živočichů přes ekodukt**, monitorovaný pomocí fotopastí,
- **sukcesní změny vegetace** na trvalých monitorovacích plochách, jejichž velikost je přizpůsobena rozměrům ekoduktu, minimálně však 100 m²,
- **výskyt invazních a expanzivních druhů**, které mohou negativně ovlivnit ekologickou funkci ekoduktu.

K regulaci rychlosti sukcese a udržení žádoucí struktury vegetace mohou být aplikovány následující postupy pravidelné údržby:

- sečení s odstraňováním biomasy,
- řízené vypalování (tam, kde je to ekologicky i legislativně přípustné),
- výběrové kácení nežádoucích dřevin,
- cílené mechanické disturbance podporující diverzitu mikrohabitátů.

Po dosažení cílového vegetačního stavu následuje fáze **udržovacího managementu**, jehož cílem je zachování ekologické funkčnosti ekoduktu a prevence degradace vegetační struktury v dlouhodobém časovém horizontu.

7. Efektivita ekoduktů v krajině

Z dostupných analýz, rešerší a diplomových prací vyplývá, že ekodukty realizované v České republice mají v současné podobě často jen omezenou, případně téměř žádnou schopnost účinně zprostředkovávat migraci živočichů přes bariéry v krajině. Tento stav je problematický zejména s ohledem na skutečnost, že ekodukty představují obecně velmi silný nástroj ke zmírnění tzv. bariérového efektu, který je jednou z hlavních příčin i důsledků intenzivní fragmentace krajiny.

Efektivita ekoduktu však není dána pouze jeho samotnou existencí, ale především souborem vzájemně provázaných faktorů. Zásadní roli hraje zejména jeho umístění v krajině, šířka objektu a jeho dlouhodobá funkčnost. Platí, že s rostoucí šířkou ekoduktu se zvyšuje jeho využitelnost širším spektrem druhů a současně roste pravděpodobnost jeho přijetí cílovými organismy. Stejně tak je významná časová dimenze – čím déle je ekodukt součástí krajiny, tím větší počet druhů se jej postupně naučí využívat.

Běžné druhy velkých savců, jako jsou srnec obecný nebo zajíc polní, tedy druhy často zahrnované pod pojem myslivecky chápané „zvěře“, jsou schopny využívat i méně vhodně navržené ekodukty. Naproti tomu cílové a klíčové druhy české fauny, mezi něž patří zejména velké šelmy, los evropský, některé druhy netopýrů nebo specializované skupiny bezobratlých, kladou na návrh ekoduktů výrazně vyšší nároky. Tyto druhy vyžadují sofistikovanější konstrukční, vegetační i krajinářské řešení, které zohledňuje jejich specifické ekologické požadavky.

Zajištění vysoké efektivity ekoduktů proto vyžaduje komplexní přístup, který kombinuje vhodné technické řešení, promyšlený krajinářský design a dlouhodobý management. Bez splnění těchto podmínek zůstává potenciál ekoduktů jako nástroje pro zlepšení ekologické konektivity krajiny využit pouze částečně.

Přehled hlavních silných a slabých stránek navrženého konceptu ekoduktů z modulární konstrukce z UHPC, včetně příležitostí a potenciálních rizik, je uveden v tabulce 1 – SWOT analýza ekoduktů z modulární konstrukce založené na UHPC betonu.

Tab. 1: SWOT analýza ekoduktů z modulární konstrukce založené na UHPC betonu.

Kategorie	Lehké ekodukty (UHPC, modulární, montáž za provozu)	Konvenční ekodukty
S – strengths (silné stránky)	Možnost výstavby za plného provozu dálnice → významně vyšší pravděpodobnost realizace (odpadá hlavní bariéra pro realizaci na provozované síti)	Ověřená technologie vhodná pro novostavby
	Modularita → prakticky neomezená šířka (snadné dosažení >50 m) → vyšší ekologická funkčnost	Variabilita při výstavbě na nové komunikaci – monolit, prefabrikát z konvenčního betonu
	Vyšší efektivita pro cílové druhy (široké profily = vyšší využívání, včetně velkých savců)	Umístění na komunikacích v době výstavby, obtížné změny, doplnění dalších staveb
	Dlouhá životnost (≥ 100 let) → stabilní ekologická funkce v čase (starší ekodukty = často funkčnější)	Krátkodobá životnost izolací, nutno počítat se sanací
	Nízké nároky na údržbu	Údržbové nároky izolací, standardní životnost nosné konstrukce
	Rychlá realizace (prefabrikace, montáž)	Realizace v rámci výstavby komunikaci, případně během uzavírky z jiného důvodu
W – weaknesses (slabé stránky)	Nižší míra historického ověření (nová technologie)	Nutnost omezení nebo přerušení provozu při výstavbě → často hlavní důvod, proč se nerealizují
	Potenciální nedůvěra investorů / úřadů	Zavedené zvyklosti, často v rozporu se současnou úrovní poznání, zejména v umístování
	Vyšší technologická náročnost návrhu (UHPC)	Nutnost výroby a manipulace s velkoobjemovými prvky, nebo velkou kubaturou materiálu
	Nutnost pilotních projektů a monitoringu	Delší doba výstavby
O – opportunities (příležitosti)	Masivní zvýšení počtu realizovaných ekoduktů (klíčový dopad!)	Postupné zlepšování návrhových parametrů
	Plnění cílů EU (Nature Restoration Law, TEN-T, biodiverzita)	Možnost retrofitů / doplnění prvků
	Integrace do ESG strategií developerů a investorů (v případě soukromoprávních subjektů)	Obtížnější plnění ESG strategií

	Ekonomické vyčíslení přínosů (ecosystem services):	
	– snížení fragmentace	DTTO - Týká se zejména novostaveb
	– obnova metapopulací	DTTO - Týká se zejména novostaveb
	– zvýšení genového toku	DTTO - Týká se zejména novostaveb
	– snížení mortality (dopravní kolize)	DTTO - Týká se zejména novostaveb
	– zvýšení ekologické odolnosti (resilience)	DTTO - Týká se zejména novostaveb
	Export technologie (know-how)	Standardní technologie
	Napojení na zelenou infrastrukturu v krajině i městech	Napojení na zelenou infrastrukturu v krajině i městech u novostaveb
T – threats (hrozby)	Greenwashing (špatně navržené „pseudo-ekodukty“)	Nízká realizovatelnost (kvůli dopravním omezením) → projekty nevznikají
	Podcenění ekologických parametrů (např. vegetace, klid)	Systematické poddimenzování šířky → nižší funkčnost
	Nedostatečné zakotvení v legislativě	Fragmentace krajiny pokračuje navzdory plánům

8. Praktické aspekty řešení ekoduktů z UHPC

V této kapitole jsou shrnuty praktické aspekty návrhu a realizace prefabrikovaných ekoduktů z ultravysokopevnostního betonu (UHPC), se zaměřením na technické parametry konstrukce a jejich vazbu na návrh vegetace a dlouhodobou ekologickou funkčnost objektu. Uvedené zásady vycházejí z vlastností použitého materiálu a z požadavků na udržitelný provoz ekoduktu v průběhu jeho životnosti.

8.1 Konstrukční princip ekoduktu

Z hlediska konstrukčního řešení je šířka ekoduktu prakticky variabilní a je dána skládáním prefabrikovaných modulů o šířce 2 m. Tento modulární princip umožňuje přizpůsobit výslednou šířku ekoduktu konkrétním podmínkám lokality, cílovým druhům i prostorovým možnostem dopravní stavby, nad kterou je objekt veden. Zároveň umožňuje optimalizovat výrobu, dopravu a montáž prefabrikovaných prvků.

Maximální výška půdního profilu ukládaného na nosnou konstrukci je uvažována přibližně 1,0 m. Tato hodnota představuje kompromis mezi požadavky na vytvoření dostatečného vegetačního substrátu a

omezením zatížení nosné konstrukce. Vlastnosti UHPC umožňují přímé uložení zeminy na konstrukci bez nutnosti dodatečné hydroizolace, což zjednodušuje konstrukční řešení a snižuje nároky na údržbu v průběhu životnosti stavby.

Při návrhu půdního profilu je nutné zohlednit nejen jeho celkovou mocnost, ale také jeho skladbu, propustnost a schopnost zadržovat vodu. Rovnoměrné rozložení zeminy na povrchu ekoduktu je klíčové z hlediska statického působení i z hlediska rovnoměrného vývoje vegetace.

8.2 Příklady realizací konstrukcí z UHPC

Ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) byl v posledních dvou desetiletích úspěšně použit při realizaci řady mostních konstrukcí po celém světě. Mezi významné realizace patří například most Sunyudo Footbridge v Jižní Koreji z roku 2002, Fuzhou University Landscape Bridge v Číně z roku 2015, most Baqitian v Číně nebo Wild Bridge v Rakousku z roku 2010 (Zhou et al., 2018).

Sunyudo Footbridge představuje prefabrikovaný segmentový obloukový most z UHPC o rozpětí 120 m. Konstrukce využívá subtilní prefabrikované segmenty s vysokou únosností a nízkou vlastní hmotností (Behloul et al., 2003).

Most Baqitian je příkladem využití UHPC v konstrukci s důrazem na udržitelnost a dlouhodobou životnost. Konstrukce využívá prefabrikované segmenty spojené suchými styky, čímž dochází ke snížení smršťovacích napětí a urychlení výstavby. Most je navržen jako bezespárny, což omezuje nároky na údržbu a eliminuje poruchy typické pro dilatační závěry (Chen et al., 2023).

Wild Bridge v Rakousku představuje pilotní projekt segmentového obloukového mostu z UHPFRC. Konstrukce o celkové délce 157 m zahrnuje segmentový oblouk o rozpětí přibližně 70 m (Reichel et al., 2011).

UHPC byl v posledních letech použit také v České republice, zejména u lávek pro pěší a cyklisty. Mezi významné realizace patří lávka přes řeku Lubinu v Příboře, lávka v Táboře nebo lávka ve Vrapicích u Kladna (Marek et al., 2019).

Přestože jsou zkušenosti s použitím UHPC v mostním stavitelství již poměrně rozsáhlé, aplikace tohoto materiálu pro konstrukce ekoduktů představuje nový typ využití. Ekodukty se od běžných mostních konstrukcí liší zejména velkou šířkou, specifickým charakterem zatížení a požadavky na dlouhodobou odolnost vůči působení zeminy, vody a kořenových systémů vegetace.

Z konstrukčního hlediska se proto jako vhodné řešení jeví oblouková konstrukce s tákem, která umožňuje efektivní využití vysoké tlakové pevnosti UHPC. Významnou výhodou je také možnost prefabrikace jednotlivých segmentů a montáže nad provozovanou dopravní infrastrukturou při omezených výlukách.

Použití UHPC současně umožňuje:

- snížení spotřeby konstrukčního materiálu,
- realizaci subtilnějších prefabrikovaných prvků,
- omezení potřeby hydroizolačních vrstev,
- zvýšení životnosti konstrukce,
- snížení nároků na údržbu během životního cyklu stavby.

Environmentální studie současně ukazují, že i přes vyšší uhlíkovou stopu UHPC na jednotku objemu může být výsledná environmentální bilance příznivější díky nižší spotřebě materiálu a delší životnosti konstrukce (Kravanja et al., 2024, Alsaman et al., 2025). Další optimalizace je možná využitím alternativních pojiv nebo druhotných surovin (Liu et al., 2025).

8.3 Mechanické chování UHPC konstrukcí

Mechanické chování UHPC konstrukcí je významně ovlivněno vysokou pevností cementové matrice a přítomností rozptýlené vláknové výztuže. Ocelová vlákna zvyšují tahovou pevnost, houževnatost a smykovou únosnost prvků a současně ovlivňují charakter porušení konstrukce.

Experimentální studie ukazují, že objemový podíl vláken představuje jeden z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících mechanické chování UHPC nosníků (Li et al., 2025, Bae et al., 2021). Při nižším obsahu vláken dochází častěji ke smykovému porušení, zatímco vyšší podíl vláken vede k duktilnějšímu ohybovému porušení a vyšší zbytkové únosnosti po vzniku trhlin.

Významný vliv má rovněž geometrie průřezu, poměr smykového rozpětí a úroveň předpětí konstrukce. U subtilních tenkostěnných prvků může docházet k lokálnímu vzniku štěpných trhlin, přesto však předpětí obecně přispívá ke zvýšení tuhosti a omezení šířky trhlin (Hammerl et al., 2022).

Výsledky rozsáhlých experimentálních databází ukazují, že běžné návrhové vztahy často podhodnocují skutečnou smykovou únosnost UHPC prvků (Huang et al., 2024). Současně se potvrzuje, že rozptýlená vláknová výztuž může v některých případech částečně nahrazovat klasickou smykovou výztuž.

Většina publikovaných experimentů byla provedena na relativně malých laboratorních vzorcích. Studie realizované na konstrukcích větších rozměrů však potvrzují možnost použití UHPC i pro rozsáhlé mostní konstrukce (Graybeal et al., 2005, Zhou et al., 2025).

Pro konstrukce ekoduktů je důležitá zejména:

- vysoká tlaková pevnost,
- zvýšená tahová odolnost,
- vysoká houževnatost,
- nízká propustnost,
- vysoká odolnost proti degradačním vlivům,
- a možnost realizace subtilních prefabrikovaných segmentů.

Přestože numerické modelování umožňuje poměrně přesně simulovat elastické chování UHPC konstrukcí, experimentální ověření zůstává nezbytné zejména pro posouzení porušování konstrukce a chování v postkritické oblasti. Z tohoto důvodu byl v rámci metodiky realizován experimentální mock-up model obloukové konstrukce ekoduktu z UHPC.

8.4 Vazba konstrukce na ekologické požadavky

Návrh vegetace na ekoduktu musí být úzce provázán s technickými limity konstrukce a současně respektovat ekologické požadavky cílových druhů. Základním principem je využití řízené sukcese, která umožňuje postupný vývoj vegetačního krytu při omezení nároků na údržbu.

Při výběru vhodných dřevin a dalších rostlinných druhů je nutné zohlednit zejména jejich maximální výšku v dospělosti, aby nedocházelo k neúměrnému zatěžování konstrukce ani k omezení rozhledových poměrů u druhů citlivých na otevřenost prostoru. Významným kritériem je rovněž charakter kořenového

systemu a jeho pravděpodobná interakce s nosnou konstrukcí ekoduktu. Preferovány by měly být druhy s mělkým nebo středně hlubokým kořenovým systémem, které minimalizují riziko lokálního zatížení a

Z ekologického hlediska je nezbytné posuzovat status jednotlivých dřevin, zejména z pohledu jejich původu. Upřednostňovány by měly být autochtonní druhy odpovídající přirozenému druhovému složení dané oblasti, zatímco využití invazních nebo potenciálně expanzivních druhů by mělo být vyloučeno. Vhodně zvolené spektrum dřevin a bylinné vegetace může podpořit stabilitu vegetačního krytu, zvýšit biodiverzitu ekoduktu a zároveň přispět k jeho postupnému začlenění do okolní krajiny.

9. Materiálové řešení ekoduktu – návrh a experimentální ověření

Pro stanovení materiálových charakteristik nosné konstrukce ekoduktu byl realizován rozsáhlý experimentální program zkoušek zaměřený na UHPC. Cílem tohoto programu bylo nejen ověřit mechanické vlastnosti navržené betonové směsi, ale také optimalizovat její složení s ohledem na dlouhodobou životnost konstrukce, technologickou zpracovatelnost a environmentální dopady, zejména uhlíkovou stopu.

Návrh betonové směsi vychází z požadavků kladených na ekodukty jako specifický typ mostní konstrukce, u níž je klíčová vysoká únosnost při relativně malých konstrukčních tloušťkách, vodonepropustnost a odolnost vůči agresivnímu prostředí. Současně je kladen důraz na minimalizaci množství použitého materiálu a snížení environmentální zátěže spojené s výrobou cementu a ostatních složek betonu.

Experimentální program zahrnoval zkoušky vlastností čerstvé betonové směsi, stanovení mechanických charakteristik v tlaku, tahu i ohybu, posouzení lomových vlastností a houževnatosti materiálu, dále rázové zkoušky, stanovení statického modulu pružnosti a ověření odolnosti betonu vůči chemickým rozmrazovacím látkám. Výsledky těchto zkoušek slouží jako podklad pro posouzení vhodnosti navržené směsi pro použití v konstrukci ekoduktů a pro celkové vyhodnocení jejího technického a environmentálního přínosu.

9.1 Návrh směsi a její optimalizace z pohledu uhlíkové stopy

Navrhovaná technologie provádění ekoduktů je založena na využití prefabrikovaných prvků z UHPC. Tento materiál se vyznačuje velmi vysokými pevnostmi v tlaku i v tahu za ohybu, přičemž jeho klíčovou předností je mimořádná trvanlivost, zejména v prostředí mrazových cyklů za přítomnosti chemických rozmrazovacích látek.

UHPC má při vztažení na jednotku objemu relativně vysokou uhlíkovou stopu, která se u běžných receptur pohybuje nad hodnotou 700 kg CO₂/m³. Pro srovnání, běžně používané betonové směsi pevnostní třídy C30/37 určené pro prostředí XF4 vykazují uhlíkovou stopu přibližně 370 kg CO₂/m³ (hodnoty na základě dostupných LCA studií). Díky výrazně vyšším pevnostem UHPC je však pro dosažení stejné únosnosti konstrukčního prvku zapotřebí výrazně menší objem materiálu a současně lze očekávat podstatně delší životnost konstrukce. Při zohlednění celého životního cyklu konstrukce tak vychází uhlíková stopa prvků z UHPC příznivěji než u prvků z běžného betonu.

Jedním z hlavních cílů projektu byla optimalizace složení UHPC z hlediska snížení uhlíkové stopy. Tato optimalizace nebyla provedena na základě kompletní analýzy životního cyklu (LCA), ale zjednodušeným způsobem, a to zejména redukcí obsahu portlandského slínku v betonové směsi. Optimalizovaná směs byla nejprve navržena a ověřena bez rozptýlené ocelové výztuže. Po potvrzení jejích základních parametrů byla receptura znovu namíchána s předepsanou dávkou ocelových mikrovláken. Složení výsledné směsi je uvedeno v tabulce 2 pod označením **PZ-UHPC-78**.

Tab. 2: Složení původní a optimalizované betonové směsi.

Označení	TC133S70.8	PZ-UHPC-78
Poznámka	Původní směs	Optimalizovaná směs
Portlandský slínek (kg/m ³)	600	550
CO ₂ ze slínku	432	396
snížení uhlíkové stopy	-	-8,3
Mikrosilika	Ano	Ano
vodní součinitel	0,15	0,13
Dmax	8 mm	8 mm
Konzistence	SF2	SF1
Ocelové drátky (kg/m ³)	1,50%	1,50%
CO ₂ ze slínku (kg/m ³)	432	396
Snížení uhlíkové stopy	-	-8,3%

9.2 Vlastnosti čerstvé betonové směsi

Navržená směs UHPC byla vyrobena na betonárně společnosti TBG METROSTAV s.r.o. v Praze-Libni, která je technologicky uzpůsobena pro výrobu UHPC. Na betonárně byly provedeny základní zkoušky čerstvé betonové směsi a současně byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušky ve ztvrdlém stavu.

Pro potřeby projektu byla směs dále testována v laboratořích FSv ČVUT v Praze. Zkoušky byly provedeny na směsi uvedené v tabulce 1 pod označením PZ-UHPC-78. Naměřené parametry čerstvé betonové směsi, charakterizující její konzistenci a zpracovatelnost, jsou shrnuty v tabulce 3.

Tab. 3: Parametry čerstvé optimalizované betonové směsi PZ-UHPC-78.

Označení	PZ-UHPC-78
Rozlití Abramsova kužele	550 mm
Teplota betonu	25,1°C
Čerstvá objemová hmotnost	2408 kg/m ³

9.3 Zkoušky pevnosti v jednoosém tlaku

V úvodní fázi experimentálního programu byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku na krychlích o rozměrech 100 × 100 × 100 mm. Zkušební tělesa byla testována ve stáří 7, 28, 56 a 90 dnů. Veškeré zkoušky byly provedeny v souladu s normou ČSN EN 12390-3.

Tab. 4: Pevnost v tlaku betonové směsi PZ-UHPC-78 stanovená na krychlích v různém stáří.

Krychle o rozměrech: 100 mm × 100mm × 100 mm	Obj. hm.	$f_{c,cube}$
	[kg/m ³]	[MPa]
Stáří vzorků - 7 dnů		
Průměrná hodnota	2471	100,4
Směrodatná odchylka	4,2	1,2
Stáří vzorků - 28 dnů		
Průměrná hodnota	2461	109,0
Směrodatná odchylka	16,1	8,8
Stáří vzorku - 56 dnů		

Průměrná hodnota	2441	142,9
Směrodatná odchylka	14,8	4,2
Stáří vzorků - 90 dnů		
Průměrná hodnota	2444	144,6
Směrodatná odchylka	27,7	1,4

Dále byly provedeny tlakové zkoušky na válcích o průměru 100 mm a výšce 200 mm a na dvou válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm, a to ve stáří 28 dnů, za účelem vzájemné komparace výsledků.

Tab. 5: Pevnost v tlaku betonové směsi PZ-UHPC-78 stanovená na válcových zkušebních tělesech po 28 dnech.

Válce	Obj. hm.	$f_{c,cyl}$
	[kg/m ³]	[MPa]
Průměr Ø 100 a výška 200 mm		
Průměrná hodnota	2434	111,8
Směrodatná odchylka	1,5	2,6
Průměr Ø 150 a výška 300 mm		
Průměrná hodnota	1750	98,5
Směrodatná odchylka	83,9	9,6

Pro ověření konzistence naměřených hodnot byly tlakové zkoušky provedeny také na fragmentech zbylých po zkouškách v tahu za ohybu. Jednalo se o poloviny trámů zatěžované přes plochy 100 × 100 mm a 40 × 40 mm. Tyto fragmenty byly testovány ve stáří 28 a 90 dnů. Z výsledků uvedených v tabulce 6 je patrné, že dosažené pevnosti fragmentů dobře korespondují s výsledky zkoušek na krychlích (tabulka 4) i válcích (tabulka 5).

Tab. 6: Pevnost v tlaku stanovená na fragmentech zkušebních těles po zkoušce tahu za ohybu.

Trámce	Obj. hm.	$f_{c,fr}$
	[kg/m ³]	[MPa]
Zatěžovací plocha 40 mm × 40 mm, stáří vzorků 28 dní		
Průměrná hodnota	2463	129,8
Směrodatná odchylka	9,5	2,5
Zatěžovací plocha 100 mm × 100 mm, stáří vzorků 28 dní		
Průměrná hodnota	2428	121,5
Směrodatná odchylka	20,8	2,1
Zatěžovací plocha 100 mm × 100 mm, stáří vzorků 90 dní		
Průměrná hodnota	2427	142,1
Směrodatná odchylka	43,6	3,0

9.4 Pevnost v tahu za ohybu, lomová energie a houževnatost

Současně s tlakovými zkouškami byly provedeny zkoušky pevnosti v tahu za ohybu na trácích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm a $100 \times 100 \times 400$ mm v souladu s normou ČSN EN 12390-5. Zkoušky byly provedeny ve stáří 28 dnů a výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7: Pevnost v tahu za ohybu betonové směsi PZ-UHPC-78 po 28 dnech.

Trámce	Obj. hm.	Obj. hm.	$f_{ct,fl,3B}$
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[MPa]
Rozměry vzorku $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$			
Průměrná hodnota		2463	25,6
Směrodatná odchylka		9,5	1,7
Rozměry vzorku $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$			
Průměrná hodnota		2428	18,9
Směrodatná odchylka		20,8	1,4

Lomová energie byla stanovena na základě tříbodové ohybové zkoušky na tělesech s koncentrátorem napětí. Testovací tělesa byla tvořena trácí o rozměrech $150 \times 150 \times 700$ mm s vrubem o výšce 50 mm. V dalším kroku byly provedeny zkoušky čtyřbodovým ohybem na tělesech bez vrubu. Dosažené hodnoty pevností a lomových houževnatostí jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9.

Tab. 8: Lomová energie betonové směsi PZ-UHPC-78 stanovena při zkoušce tříbodovým ohybem po 28 dnech.

Trámce $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$	$f_{ct,fl,3B}$	G_F
	[MPa]	[J/m ²]
Průměrná hodnota	20,9	13102
Směrodatná odchylka	0,9	799,3

Pro záznam deformační křivky byla provedena zkouška tříbodovým ohybem na trácích s koncentrátorem napětí. Schéma uspořádání zkoušky je znázorněno na obr. 10. Tato zkouška umožnila sledovat průběh zatěžování a chování materiálu po vzniku trhliny a stanovit lomovou energii betonu.



Obr. 10: Uspořádání zkoušky tříbodovým ohybem pro záznam deformační křivky betonu.

V následném kroku byly vzorky testovány bez vrubu pomocí zkoušky čtyřbodovým ohybem. Tato konfigurace umožňuje rovnoměrnější rozdělení ohybového momentu v zatěžované oblasti a poskytuje doplňující informace o pevnosti v tahu za ohybu a lomové houževnatosti materiálu. Dosažené hodnoty pevností a lomových houževnatostí jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9: Pevnost v tahu za ohybu a lomová houževnatost betonové směsi PZ-UHPC-78 stanovené při zkoušce čtyřbodovým ohybem po 28 dnech.

Trámce 150 mm × 150 mm × 700 mm	$f_{ct,fl,4B}$	K_{IC}
	[MPa]	[kNm ^{-3/2}]
Průměrná hodnota	19,8	2559
Směrodatná odchylka	1,8	231,3

9.5 Pevnost v prostém tahu

Pro stanovení pevnosti v jednoosém tahu byla vyrobena speciální zkušební tělesa typu „dog-bone“. Tato tělesa byla upnuta pomocí speciálních čelistí do trhacího stroje a zatěžována až do porušení (viz obr. 11). Maximální dosažená síla byla zaznamenána a na základě průřezové plochy v místě porušení byla stanovena tahová pevnost betonu.

Naměřené hodnoty pevnosti v prostém tahu ve stáří 28 dnů jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 10: Pevnost v prostém tahu betonové směsi PZ-UHPC-78 ve stáří 28 dnů.

Dog-bone	Plocha průřezu	f_t
	[m ²]	[MPa]
Průměrná hodnota	0,00508	6,8
Směrodatná odchylka	0,000084	0,4



Obr. 11: Porušení zkušební tělesa typu „dog-bone“ po zkoušce pevnosti v prostém tahu.

9.6 Stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku

Statický modul pružnosti v tlaku E_c představuje základní deformační charakteristiku betonu, která popisuje vztah mezi napětím a odpovídající deformací materiálu v oblasti pružného chování. Tento parametr je klíčový zejména pro posouzení tuhosti konstrukce, stanovení průhybů, redistribuce vnitřních sil a pro posouzení mezních stavů použitelnosti betonových konstrukcí. V případě konstrukcí z UHPC je znalost statického modulu pružnosti zvláště důležitá vzhledem k vysokým pevnostem materiálu a odlišnému poměru mezi pevností a deformovatelností oproti běžným betonům.

Stanovení statického modulu pružnosti bylo provedeno na základě měření podélných deformací zkušebních těles při postupném zatěžování v tlaku, přičemž vyhodnocení vychází z lineární části napětí-deformační křivky v souladu s Hookovým zákonem. Zkoušky byly provedeny na válcových zkušebních tělesech o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Měření deformací bylo realizováno pomocí snímacích zařízení upevněných na povrchu vzorku tak, aby byly minimalizovány vlivy excentricity zatížení a lokálních nerovnoměrností.

Zatěžování probíhalo řízeným způsobem v definovaném rozsahu napětí, s opakovanými zatěžovacími cykly, jejichž cílem bylo stabilizovat odezvu materiálu a eliminovat vliv počátečních nelinearit. Po ustálení odezvy byl statický modul pružnosti stanoven z poměru přírůstku napětí a odpovídajícího přírůstku poměrného přetvoření mezi dolní a horní úrovní zatížení.

Podrobný postup zkoušky, včetně požadavků na centrování zkušebního tělesa, rychlosti zatěžování a vyhodnocení naměřených deformací, odpovídá příslušným normovým požadavkům. Naměřené hodnoty statického modulu pružnosti betonu v tlaku jsou uvedeny v tabulce 11 a slouží jako vstupní parametr pro následné statické a deformační posouzení konstrukčního řešení ekoduktu.

Tab. 11: Statický modul pružnosti betonu v tlaku betonové směsi PZ-UHPC-78 po 28 dnech.

Válce	Obj. hm.	E_c
Průměr Ø 150 a výška 300 mm	[kg/m ³]	[GPa]
Průměrná hodnota	2419	42,7
Směrodatná odchylka	24,1	1,2

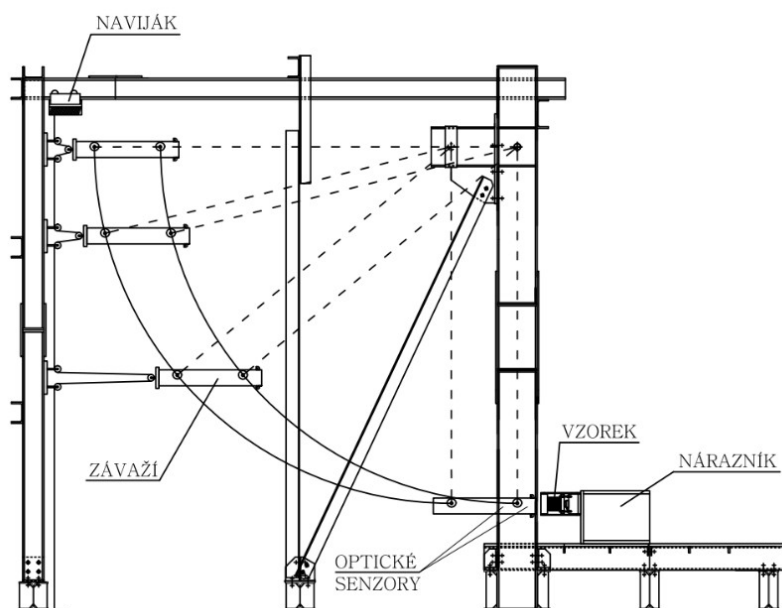
9.7 Rázová zkouška

Rázová zkouška byla provedena na zařízení znázorněném na obr. 12, jehož schematické uspořádání je uvedeno na obr. 13. Zkušební trámec o rozměrech 100 × 100 × 550 mm byl uložen na dvou podporách s rozpětím 300 mm, čímž vzniklo uspořádání odpovídající tříbodovému ohybu. Na střed rozpětí působilo ocelové závaží o hmotnosti 37 kg (viz obr. 14).

Závaží bylo pomocí elektromagnetu vyzdviženo do požadované výšky a následně uvolněno jeho deaktivací. Výška pádu byla stanovena jako rozdíl mezi výškou závaží před uvolněním a základní polohou při kontaktu se vzorkem. Měření bylo spuštěno aktivací optických senzorů. Na závaží i na konstrukci byly umístěny akcelerometry umožňující vyhodnocení průběhu nárazu.



Obr. 12: Zařízení pro provádění rázové zkoušky betonových zkušebních těles.

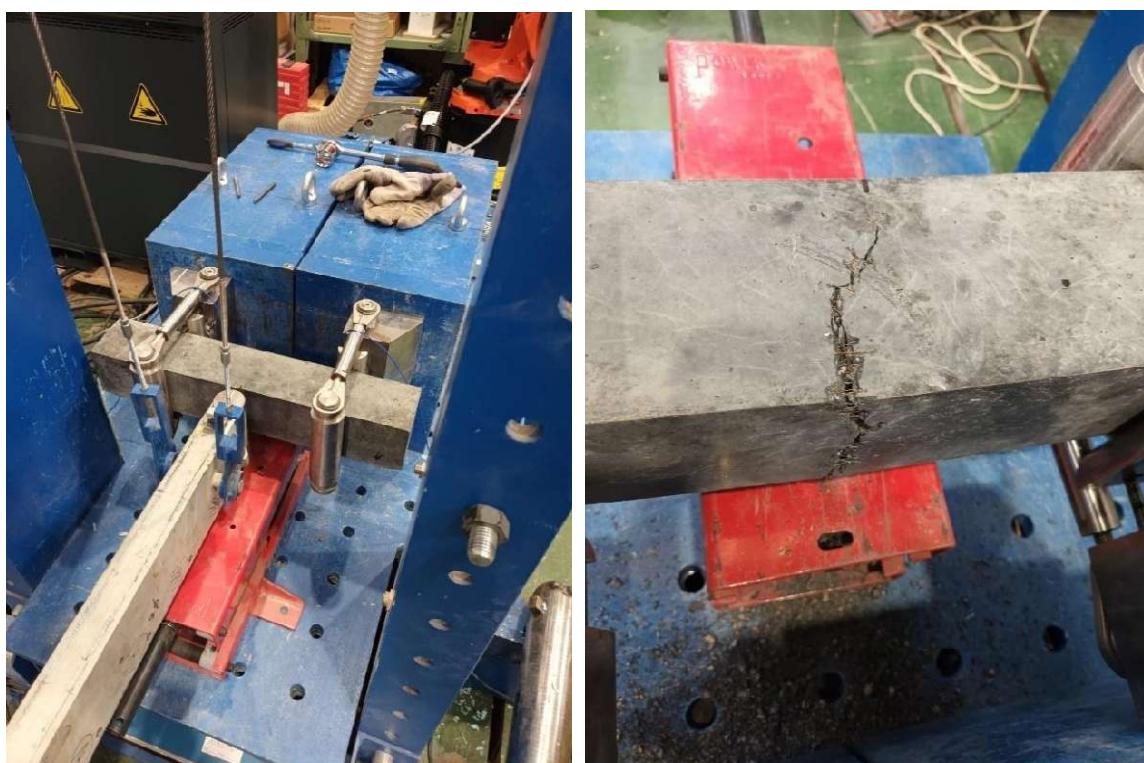


Obr. 13: Schématické uspořádání rázové zkoušky včetně měřicích prvků.

V rámci vyhodnocení byly použity výhradně hodnoty naměřené siloměry tvořícími podpory zkušebního tělesa. Tyto siloměry zaznamenávají reakce podpor, jejichž součtem byla na základě rovnováhy sil stanovena výsledná síla působící na vzorek během nárazu. Tento postup umožňuje nepřímé určení zatěžující síly bez nutnosti přímého měření kontaktního zatížení. Naměřené hodnoty rázové pevnosti vzorků jsou shrnuty v tabulce 12.

Tab. 12: Rázová pevnost betonové směsi PZ-UHPC-78 stanovena rázovou zkouškou po 28 dnech.

Trámce 100 mm × 100 mm × 550 mm	Obj. hm. [kg/m ³]	$f_{ct,im}$ [MPa]
Průměrná hodnota	2453	31,6
Směrodatná odchylka	11,6	1,5



Obr. 14: Uspořádání zkušebního tělesa při rázové zkoušce v konfiguraci třibodového ohybu.

9.8 Odolnost betonu proti CHRL

Odolnost UHPC proti působení chemických rozmrazovacích látek byla ověřena podle normy ČSN P 73 1326, metodou A s automatickým cyklováním. Zkoušky byly provedeny na válcových vzorcích o průměru 150 mm, výšce 125 mm a stáří 28 dnů.

Vzorky byly částečně ponořeny do 3% roztoku NaCl a podrobeny střídavému zmrazování a rozmrazování v rozsahu teplot od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po každých 25 cyklech byly uvolněné částice odstraněny, vysušeny a zváženy. Celkem bylo provedeno 100 cyklů. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 13.

Tab. 13: Úbytek hmotnosti betonové směsi PZ-UHPC-78 při zkoušce odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL).

Označení a číslo vzorku		Petriho miska (prázdná)	Petriho miska (s odštěpkou)	Hmotnost odštěpků	ρ_a^*
		[g]	[g]	[g]	[g/m ²]
Odřezek	1	7,57	7,80	0,232	13,15

*Určeno dle vzorce

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A}$$

Kde Σm je součtový odpad a „A“ je zkušební plocha včetně smáčené plochy po obvodu tělesa.

Dle normy ČSN 73 1326 jsou vzorky zaříděny do kategorie **1 – Nenarušený** (odpad do 50 g/m²).

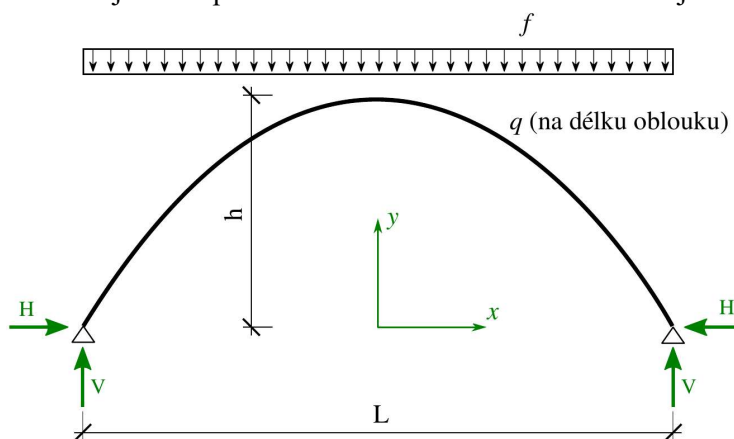
10. Vzorové technické řešení ekoduktu z UHPC

10.1 Konstrukční koncepce a statické působení

Vzorové technické řešení ekoduktu je založeno na statickém systému bezmomentového oblouku, u něhož je efektivně využita vysoká tlaková pevnost betonu UHPC. Při rovnoměrném spojitém zatížení působícím na vodorovný průmět oblouku vychází ideální tvar střednice ve tvaru paraboly. Vodorovná reakce oblouku je v tomto případě dána vztahem:

$$H = \frac{fL^2}{8h}$$

kde L je rozpětí oblouku a h jeho vzepětí. Základní statické schéma oblouku je znázorněno na obr. 15.



Obr. 15: Statické schéma bezmomentového oblouku.

Při uvažování vlastní tíhy oblouku q vede bezmomentové řešení k obecnějšímu tvaru střednice, který lze odvodit z podmínky nulové posouvající síly:

$$0 = \frac{1}{\sqrt{1+y'^2}} \left[Hy' + fx + q \int_0^{c(x)} ds \right]$$

kde y' je derivace střednice oblouku, $c(x)$ je funkce délky oblouku měřená od vrcholu. Při nahrazení derivace diferencí lze přibližně nalézt tvar polygonu pomocí vektorového skládání sil na jednotlivých segmentech oblouku. Účinek pohyblivého zatížení od dopravy vede často na tvar střednice dle Chambauda, která je lineární kombinací polynomu druhého a čtvrtého stupně a poskytuje kompromis mezi tvarem a ohybovým momentem oblouku.

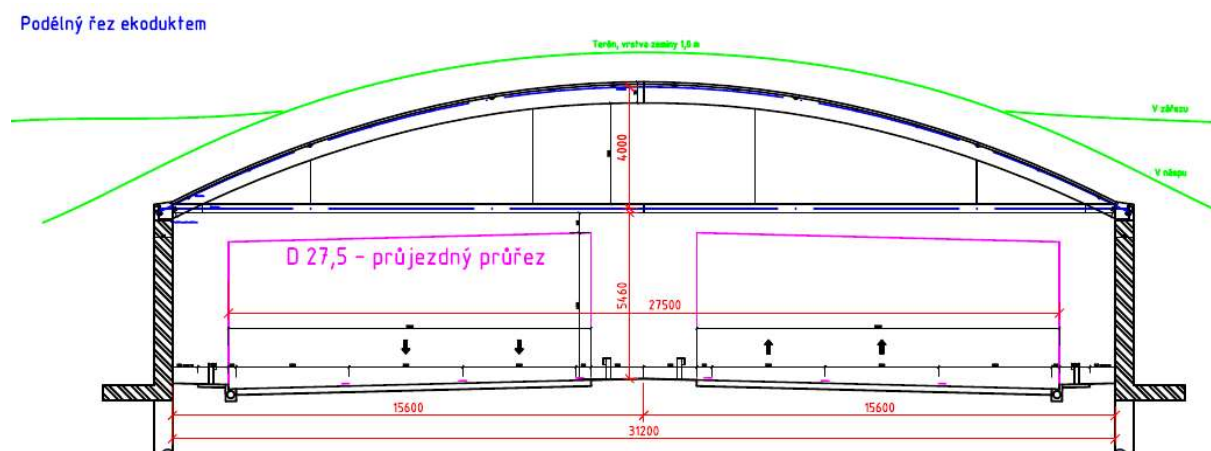
Vodorovnou reakci H lze zachytit buď kloubovými podporami nebo táhlem. Zářez komunikace v (polo)skalních horninách dává obecně dobré podmínky pro přenos reakce H do okolního masivu bez nutnosti táhla. Ekodukt je však častěji budován v částečném náspu či málo únosném podloží, kdy zachycení vodorovné reakce H by znamenalo velké přetváření zemin. Pro tyto případy je výhodnější použít vodorovné táhlo, které má definovanou tuhost v tahu a únosnost.

10.2 Předběžný statický návrh pro přemostění komunikace kategorie D 27,5

Primární návrh ekoduktu uvažuje přemostění dálnice kategorie D 27,5, situované v násypu nebo zářezu, jak je znázorněno na obr. 16. Rozpětí oblouku činí 31,6 m, světlost 31,2 m a vzezpetí oblouku 4,0 m. Střednice oblouku je navržena ve tvaru paraboly popsané rovnicí:

$$y = \frac{4h}{L^2} \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 - x^2 \right]$$

Oblouk s táhlem je uložen na opěrách tloušťky 600 mm, které mohou být založeny plošně nebo hlubinně na pilotách v závislosti na geotechnických podmínkách. Nosný systém ekoduktu je tvořen dvěma symetrickými polovinami oblouku a předepnutým vodorovným táhlem.



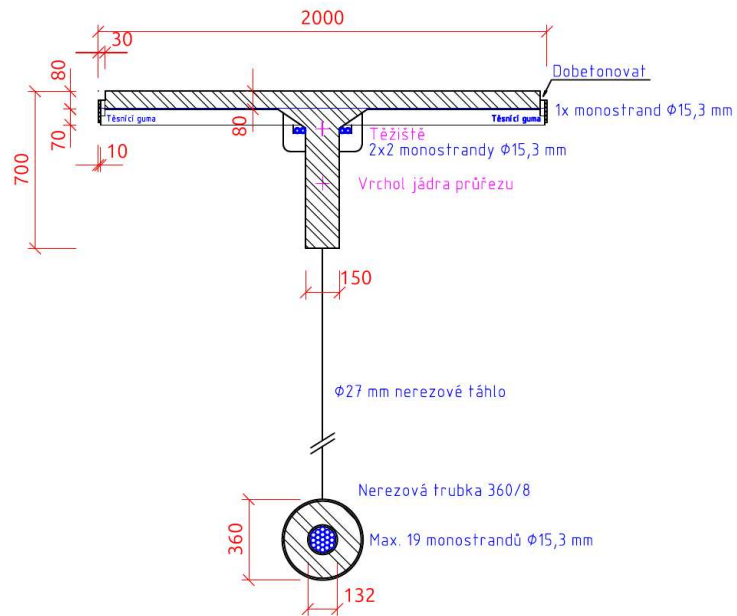
Obr. 16: Podélný řez ekoduktem pro kategorii komunikace D 27,5.

10.3 Konstrukční uspořádání a prefabrikace prvků

Táhlo oblouku je navrženo jako nerezová ocelová trubka vyplněná UHPC, v jejímž vnitřním kanálku je vedeno 19 předpínacích lan typu monostrand o průměru 15,3 mm. Z důvodu postupné montáže je táhlo zavěšeno na čtyřech nerezových závěsech.

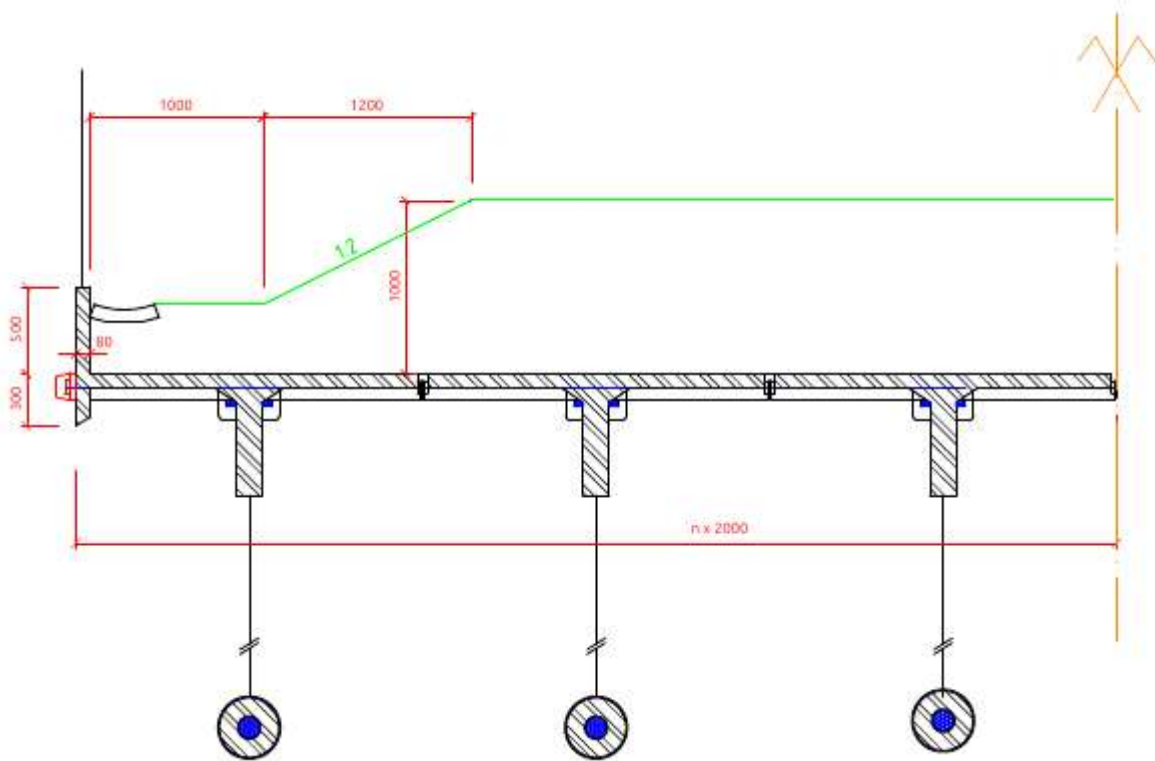
Vzorový ekodukt je tvořen prefabrikovanými segmenty z UHPC skladebné šířky 2,0 m, viz obr. 17. Výška průřezu oblouku činí v patě 500 mm a ve vrcholu 700 mm. Tloušťka horní desky je 80 mm a je lokálně zesílena v místech příčného předpětí. Do střednice oblouku je vneseno podélné předpětí pomocí čtyř monostrandů, které zajišťují těsnost spojů a dostatečnou tlakovou rezervu v oblasti dobetonovaných spár.

V příčném směru jsou segmenty osazeny na těsnicí pás a spáry jsou následně dobetonovány UHPC. Pro zajištění spolupůsobení segmentů jsou použity příčné předpínací monostrandy v rozteči přibližně 2,0 m. Šířku ekoduktu lze volit modulárně bez omezení, přičemž po každých 30–40 m je nutné navrhnout dilatační spáru.

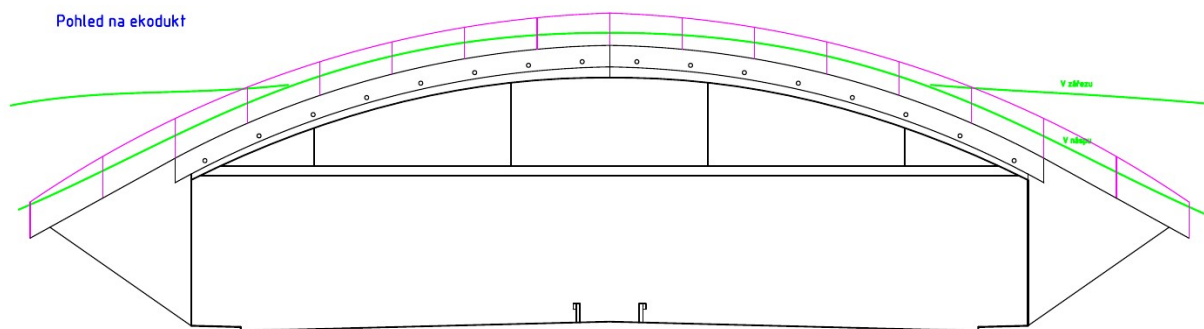


Obr. 17: Příčný řez ve vrcholu oblouku ekoduktu.

Krajní oblouk je vyroben monoliticky včetně integrované římsy, čímž se eliminuje problematické napojování a utěšňování, viz obr. 18. Pohledové uspořádání konstrukce je znázorněno na obr. 19.



Obr. 18: Ukončení ekoduktu římsou s úpravou terénu.



Obr. 19: Pohled na ekodukt pro kategorii komunikace D 27,5.

10.4 Předběžný statický výpočet pro přemostění kategorie D 27,5

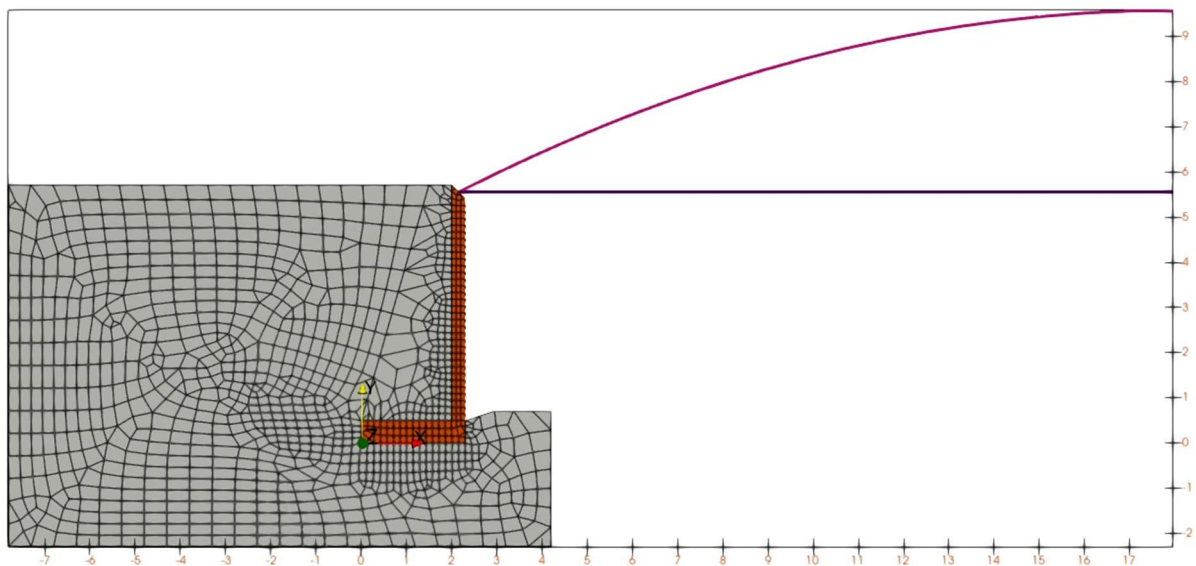
Statický výpočet dokládá proveditelnost navrhovaného řešení. Zatížení pro 1 m šířky oblouku je shrnuto v tabulce 14.

Tab. 14: Zatížení pro 1 m šířky oblouku.

Stálé	f_k (kN/m ²)	γ_F	f_d (kN/m ²)
Zemina, tl. 1 m ($\gamma = 20$ kN/m ³)	20	1,35	27
Beton, průměrná tl. 0,3 m ($\gamma = 24$ kN/m ³)	7,2	1,35	9,72
Celkem	27,2	1,35	36,72
Nahodilé plošné			
f_k (kN/m ²)	γ_F	f_d (kN/m ²)	
Vegetace (odhad)	5	1,50	7,5
Sníh	1	1,50	1,5
Celkem	6	1,50	9
Plošné zatížení celkem			
f_k (kN/m ²)	γ_F	f_d (kN/m ²)	
Stálé	27,2	1,35	36,72
Nahodilé plošné	6	1,50	9
Celkem plošné	33,2	1,377	45,72
Nahodilé bodové			
F_k (kN)	γ_F	F_d (kN)	
Mechanizace (bagr 7 t, 3,5 t / m šíře oblouku)	35	1,5	52,50

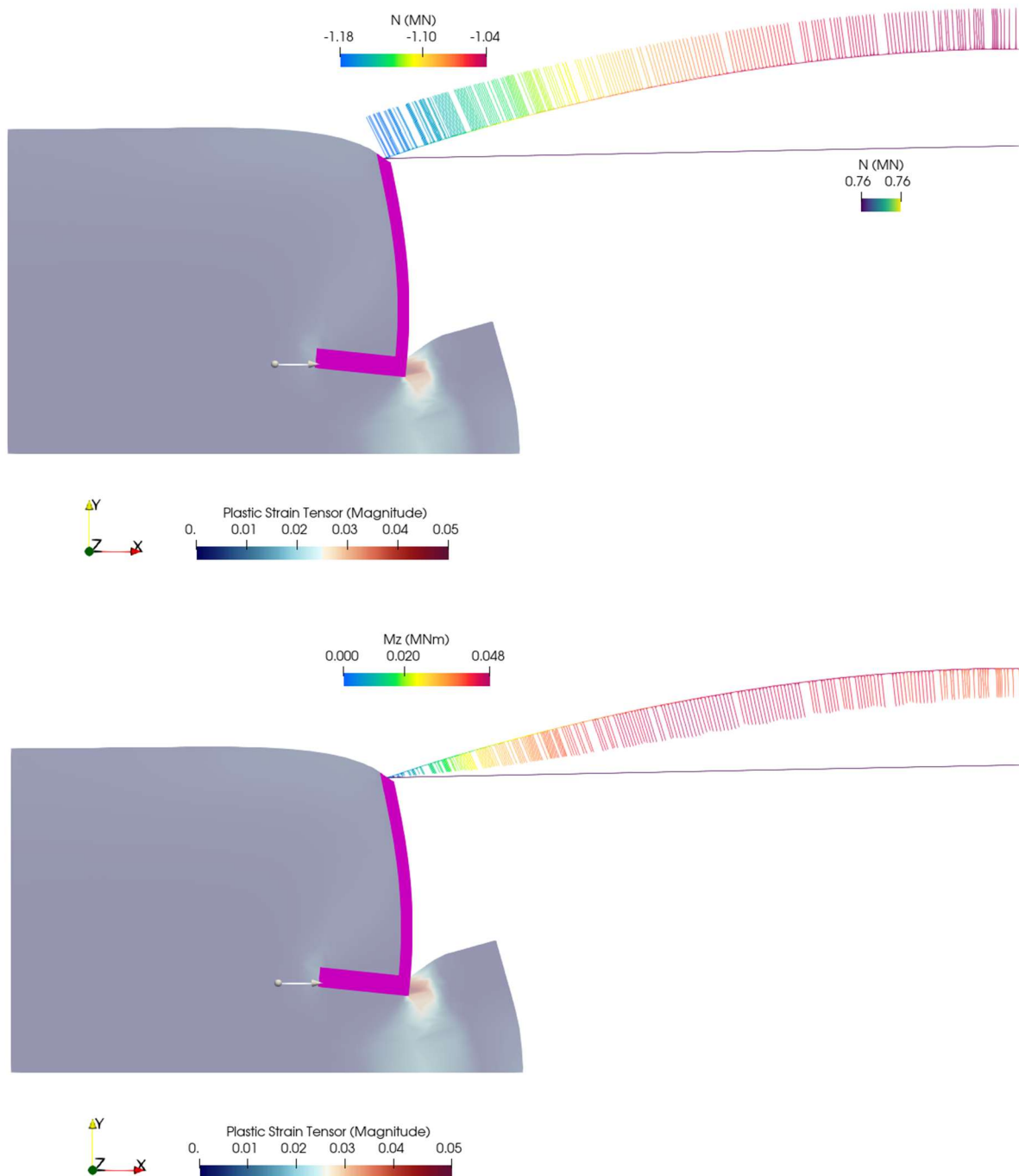
Konečně-prvkový dvourozměrný model byl vytvořen v programu Salome 9.6, přičemž fyzikálně nelineární výpočet byl proveden v softwaru OOFEM. Počáteční konfigurace výpočtového modelu je znázorněna na obr. 20. Vzhledem k symetrii konstrukce byla modelována pouze symetrická polovina ekoduktu.

Oblouk byl modelován jako lineárně elastický materiál s modulem pružnosti $E = 40 \text{ GPa}$. Táhlo bylo uvažováno jako ideální tahový prvek bez vlastní ohybové tuhosti. Opěry byly modelovány pomocí dvourozměrných konečných prvků ve stavu rovinné deformace s lineárně elastickým materiálem o parametrech $E = 30 \text{ GPa}$ a $\nu = 0,20$. Zemina za opěrou byla uvažována jako písčítá zemina s modulem pružnosti $E = 80 \text{ MPa}$ a Poissonovým číslem $\nu = 0,35$. Pro její popis byl použit konstitutivní model Drucker–Prager s úhlem vnitřního tření 35° , soudržností 1 kPa a asociovanou plasticitou. Zemina byla do výpočtu zahrnuta pouze pro simulaci hypotetického scénáře přerušení táhla; ve všech ostatních případech je vodorovná reakce oblouku přenášena dominantně prostřednictvím táhla.



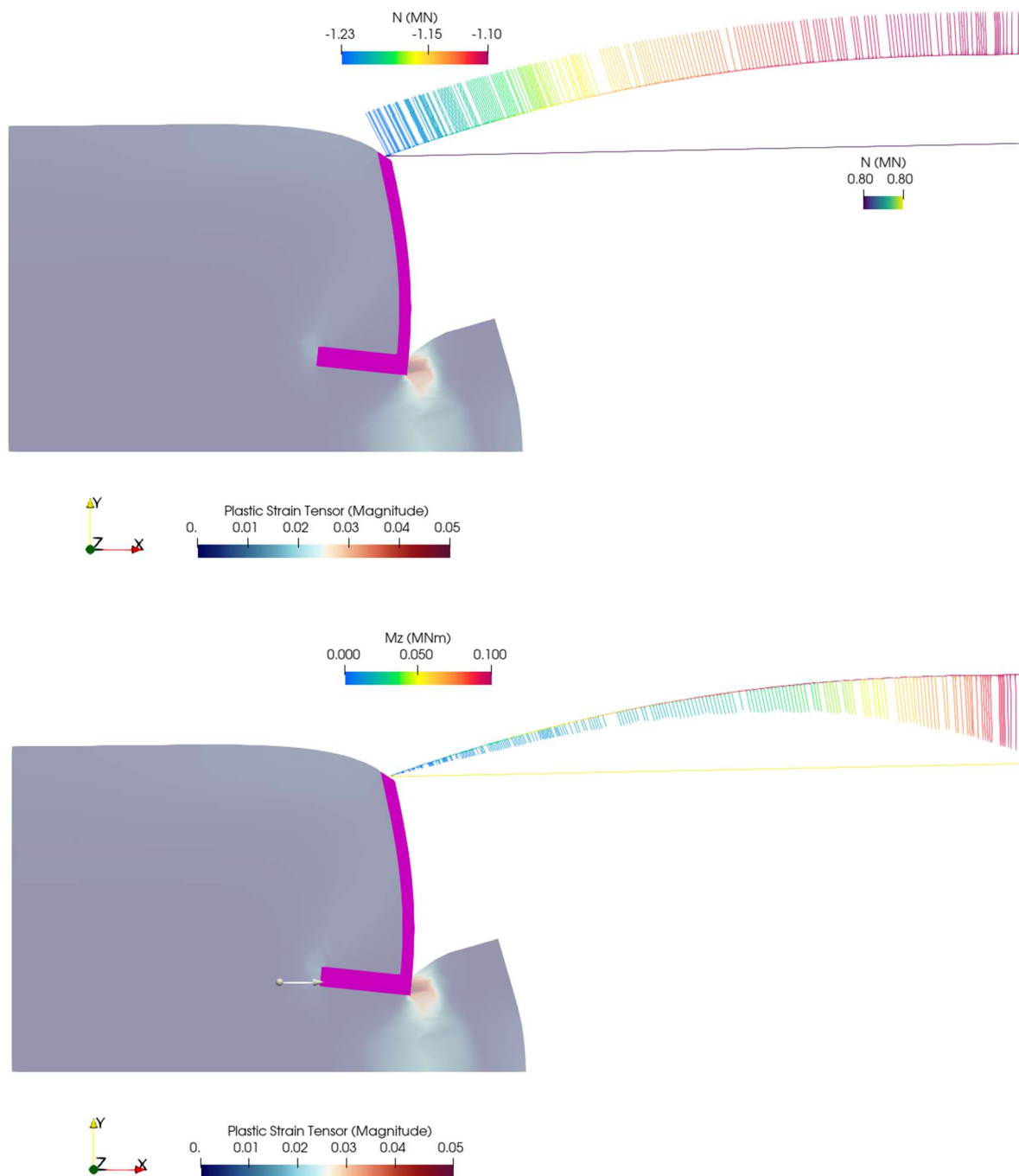
Obr. 20: Konečně-prvkový 2D model levé poloviny ekoduktu.

Účinky charakteristického rovnoměrného plošného zatížení jsou shrnuty na obr. 21. Oblouk je v tomto zatěžovacím stavu namáhán maximální normálovou silou $N = -1,18 \text{ MN/m}$ a maximálním ohybovým momentem $M_z = 0,038 \text{ MNm/m}$. Souhrnné výsledky pro všechny uvažované zatěžovací stavy jsou uvedeny v tabulce 15.



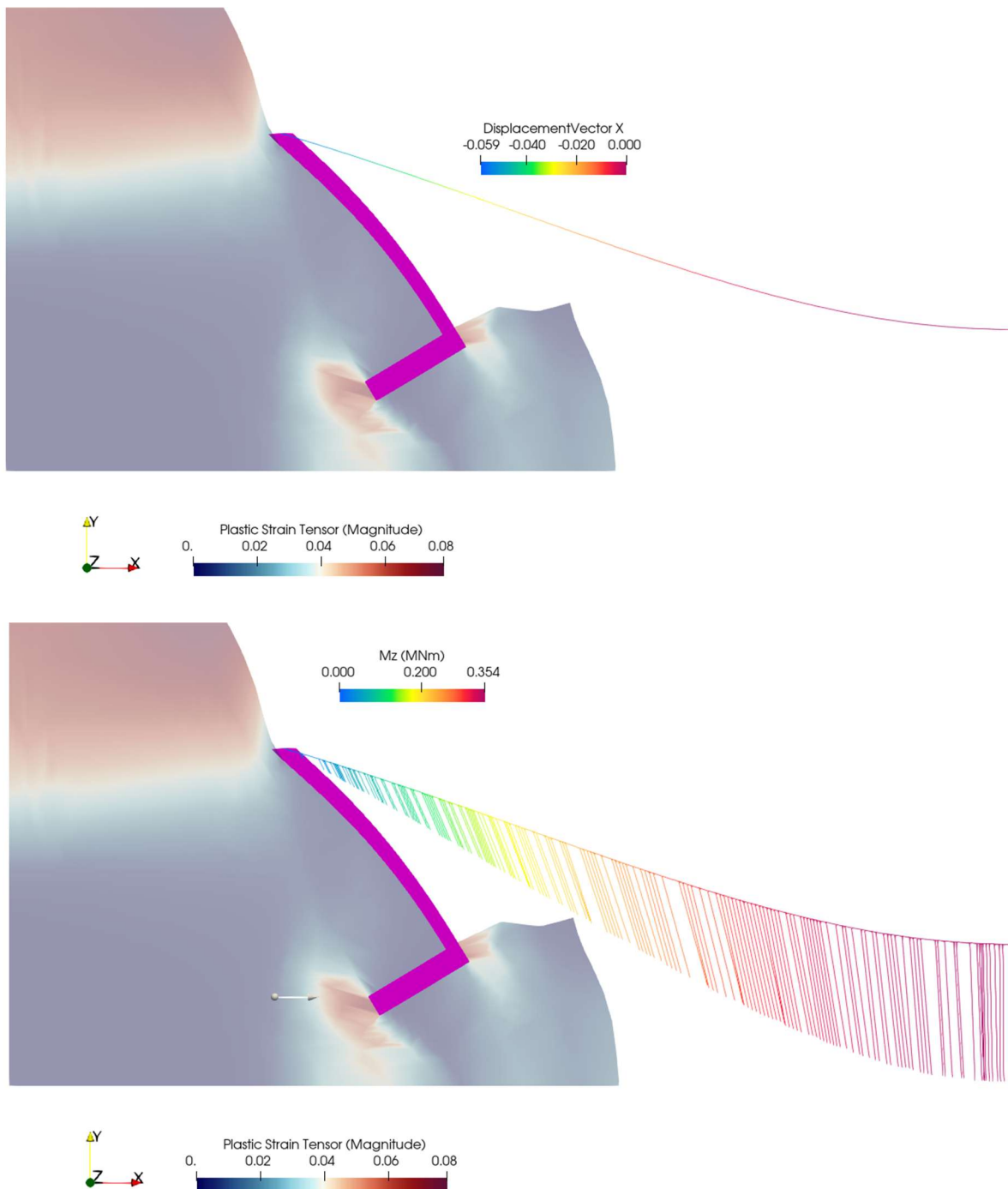
Obr. 21: Vnitřní síly pro oblouk a táhlo N a M_z pro 1 m šířky. Charakteristické rovnoměrné zatížení, deformace zvětšeny 50 \times .

Další uvažovaný zatěžovací stav je znázorněn na obr. 22 a představuje charakteristické plošné zatížení doplněné o účinek stavebního stroje (bagru) umístěného uprostřed ekoduktu. V místě působení zatížení vzniká maximální ohybový moment $M_z = 0,085$ MNm/m a dochází k mírnému nárůstu normálové síly v oblouku.



Obr. 22: Vnitřní síly pro oblouk a táhlo N a M_z pro 1 m šířky. Charakteristické rovnoměrné zatížení s rypadlem, deformace zvětšeny 50 \times .

Posledním hypotetickým scénářem je stav bez táhla, kdy je vodorovná reakce oblouku přenášena výhradně prostřednictvím opěr a přilehlé zeminy, viz obr. 23. V tomto případě dochází k vodorovnému posunu uložení oblouku do zeminy o 59 mm a ke svislému posunu středu oblouku o 160 mm. Ve střední části oblouku vzniká maximální ohybový moment $M_z = 0,35$ MNm/m.



Obr. 23: Deformace oblouku bez táhla. Charakteristické rovnoměrné zatížení, deformace zvětšeny 50×.

Tabulka 15 shrnuje charakteristické hodnoty vnitřních sil pro tři uvažované zatěžovací stavy vztažené na 1 m šířky oblouku. Návrhové hodnoty byly stanoveny zjednodušeným způsobem na základě kombinace zatížení. V případě betonu je uvažována pevnostní třída C110/130, která se vymezuje jako UHPC.

Tab. 15: Výsledky třech zatěžovacích stavů pro 1 m šířky ekoduktu.

Veličina / Varianta zatížení	Charakteristické rovnoměrné zatížení	Charakteristické rovnoměrné zatížení s bagrem	Charakteristické rovnoměrné zatížení bez táhla
Max. vodorovný posun opěry (mm)	7,6	8,0	59
Max. průhyb oblouku (mm)	31	35	164
N táhlo (MN)	0,76	0,80	-
N oblouk, max. (MN)	-1,18	-1,23	-1,10
N oblouk, vrchol, max. (MN)	-1,04	-1,10	-0,96
$ V_{y,max} $ (MN)	0,017	0,025	0,051
$M_{z,max}$ (MNm)	0,048	0,100	0,354

• **Posouzení táhla:**

V táhle působí maximální normálová síla (ze šířky oblouku 2 m)

$$N_{Sk} = 0,80 \cdot 2 = 1,60 \text{ MN}$$

Táhlo je tvořeno vnější nerezovou trubkou 360/8, do které je vložena trubka chráničky předpínací výztuže 132/8. Po osazení je mezikruží vyplněno UHPC o ploše $\pi \cdot (0,344^2 - 0,132^2) / 4 = 0,07926 \text{ m}^2$.

Předpětí táhla zajišťuje 19 monostrandů $\varnothing 15,3 \text{ mm}$, které jsou předpjaty na napětí 800 MPa. Výsledná síla předpětí je $140 \cdot 19 \cdot 800 \cdot 10^{-6} = 2,218 \text{ MN}$. Do UHPC je vneseno napětí $\sigma_{ck} = -2,218 / 0,07926 = -27,984 \text{ MPa} > -66,0 \text{ MPa} = -0,6 \cdot 110 \text{ MPa} \dots$ Vyhovuje v tlaku.

Po aktivaci táhla silou $N_{Sk} = 1,60 \text{ MN}$ dojde k přerozdělení napětí na předpínací výztuž $\sigma_{pk} = 86,466 \text{ MPa}$ a UHPC $\sigma_{ck} = 17,285 \text{ MPa}$. Výsledná napětí dosahují

$$\sigma_{pk} = 800 + 86,466 = 886,466 < 1100 \text{ MPa} \dots \text{ Vyhovuje pro předpínací lana } \sigma_{ck} = -27,984 + 17,285 = -10,699 < 0 \text{ MPa} \dots \text{ Vyhovuje pro dostatečnou tlakovou rezervu betonu}$$

Pro zajištění malých vodorovných posunů v patě oblouku je třeba zajistit velikou osovou tuhost táhla, kterou určuje zejména plocha tlačенého UHPC. Táhlo má tak relativně velké dimenze průřezové plochy.

• **Posouzení oblouku ve vrcholu:**

T průřez (výška 700 mm)

$$A = 2,0 \cdot 0,08 + 0,15 \cdot 0,62 = 0,253 \text{ m}^2$$

$$z_T = (2,0 \cdot 0,08 \cdot 0,04 + 0,15 \cdot 0,62 \cdot 0,39) / 0,253 = 0,168 \text{ m}$$

$$I_y = 1/12 \cdot 2,0 \cdot 0,08^3 + 2,0 \cdot 0,08 \cdot 0,128^2 + 1/12 \cdot 0,15 \cdot 0,62^3 + 0,15 \cdot 0,62 \cdot 0,222^2 = 0,0103 \text{ m}^4$$

$$i_y^2 = 0,0103 / 0,253 = 0,0407 \text{ m}^2$$

$$\text{Vrchol jádra pod těžištěm: } z_c = 0,0407 / 0,168 = 0,242 \text{ m}$$

Oblouk je centricky předepnut 4 monostrandy a vzniká napětí (součinitel 0,9 od příznivého zatížení) $\sigma_{xd} = -4 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 1100 / 0,253 \cdot 0,9 = -2,191 \text{ MPa}$

Největší vnitřní síly ve vrcholu oblouku s táhlem

$$N_{sk} = -1,10 \cdot 2 = -2,200 \text{ MN}$$

$$M_{sd} = 0,100 \cdot 2 = 0,200 \text{ MNm}$$

Napětí v oblouku ve vrcholu dle mezního stavu omezení napětí

$$\begin{aligned} \sigma_{xd,h} &= -2,191 - 2,200 / 0,253 + 0,200 / 0,0103 \cdot (-0,168) = \\ &= -14,148 \text{ MPa} > -66,0 \text{ MPa} = -0,6 \cdot 110 \text{ MPa} \dots \text{ Vyhovuje v tlaku} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{x,d,d} &= -2,191 - 2,200 / 0,253 + 0,200 / 0,0103 * 0,532 = \\ &= -0,557 \text{ MPa} > -66,0 \text{ MPa} \dots \text{ Vyhovuje v tlaku}\end{aligned}$$

Beton UHPC třídy C110/130 dosahuje běžně $f_{ctm} = 15 \text{ MPa}$, je zde značná rezerva i pro tahové namáhání oblouku.

- **Posouzení mostovky oblouku tloušťky 80 mm**

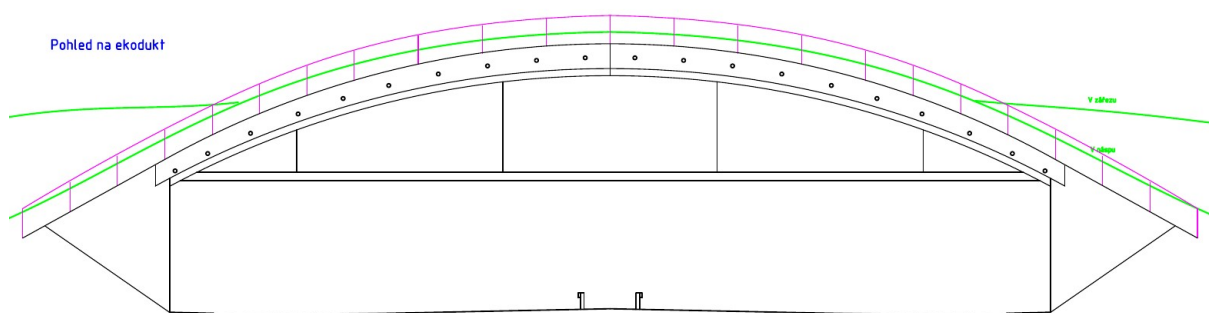
Návrhové zatížení plošné $f_d = 27 + 0,08 * 24 * 1,35 + 9 = 38,592 \text{ kN/m}^2$

Konzola délky 0,80 m

$M_{Sd} = 1/2 * 38,592 * 0,8^2 = 12,350 \text{ kNm/m} < 14,219 \text{ kNm/m} \dots$ Vyhovuje ($M_{rd} = 14,219 \text{ kNm/m}$ pro krytí 30 mm a ocel B500B, 10 \varnothing 10/m)

10.5 Modifikace návrhu pro komunikaci kategorie D 33,5

Navržený systém lze upravit i pro přemostění komunikace kategorie D 33,5, viz obr, 24. V tomto případě činí rozpětí oblouku 37,6 m a vzepětí 4,9 m. Výška průřezu oblouku se zvětšuje na 600 mm v patě a na 850 mm ve vrcholu. Základní konstrukční princip a technologický postup zůstávají zachováni.



Obr. 24: Podélný řez ekoduktem pro kategorii komunikace D 33,5.

10.6 Ekonomické aspekty řešení

Výrazné snížení spotřeby materiálu

- Spotřeba materiálu je přibližně o **50 % nižší** než u běžných konstrukcí, což vede k přímé úspoře na nákupu surovin.
- Výroba nosníků vyžaduje pouze **20 % materiálu** oproti monolitické deskové konstrukci, což snižuje nejen náklady na beton, ale i na výztuž, formy a výrobní energii.
- Menší objem materiálu znamená nižší náklady na skladování, manipulaci a logistiku v průběhu celé výstavby.

Níže je uveden zjednodušený výpočet porovnání standartní konstrukce s UHPC řešením.

Tab. 16: Ekonomické porovnání standartní konstrukce s UHPC v Kč/m²

	Standard C40/50	UHPC
Nosná konstrukce – spotřeba na 1 m ²	1	0.2

Cena materiálu za 1 m ³	5 000	35 000
Cena materiálu za 1 m ²	5 000	7 000
Cena izolace za 1 m ²	1 000	
Cena celkem za 1 m²	6 000	7 000

Eliminace nákladů na izolaci a doplňkové vrstvy

- Díky vysoké odolnosti materiálu odpadá potřeba **celoplošné hydroizolace**, což představuje významnou úsporu nejen na materiálu, ale i na montážních pracích.
- Odstranění izolace eliminuje také budoucí náklady spojené s její degradací, opravami či výměnou.
- Zjednodušení konstrukční skladby vede k nižším technologickým nárokům a kratší době realizace.

Úspory ve spodní stavbě

- Subtilnější konstrukce s nižší hmotností umožňuje zmenšit rozsah spodní stavby (základy, opěry, piloty).
- Menší zatížení znamená méně výkopů, méně betonu a méně výztuže, což se přímo promítá do **nižších investičních nákladů**.
- Úspory vznikají i v dopravně-inženýrských opatřeních, protože menší zásahy do terénu znamenají méně komplikací a kratší dobu výstavby.

Nižší logistické a montážní náklady

- Prefabrikované prvky mají výrazně nižší hmotnost, což snižuje náklady na dopravu, manipulaci i jeřábové práce.
- Rychlá montáž zkracuje dobu výstavby, což vede k úsporám na pracovní síle, stavebním strojích i zázemí stavby.
- Možnost montáže nad **provozovanou komunikací** minimalizuje dopravní omezení a snižuje tak i nepřímé ekonomické ztráty spojené s omezením provozu.

Dlouhodobě minimální provozní náklady

- Extrémně dlouhá životnost konstrukce (až **200 let**) výrazně snižuje potřebu rekonstrukcí a obnovy.
- Materiálová odolnost eliminuje nákladné zásahy spojené s korozí, degradací betonu či poruchami izolace.
- Nízké nároky na údržbu znamenají **stabilně nízké provozní výdaje** po celou dobu životního cyklu stavby.

Celková ekonomická bilance

- Přestože je vstupní cena UHPC vyšší než u běžného betonu, úspory v dalších fázích výstavby tuto investici plně kompenzují.
- Díky kombinaci úspor materiálu, rychlejší montáže a minimální údržby jsou **celkové náklady na výstavbu a provoz srovnatelné nebo nižší** než u tradičních konstrukcí.
- V dlouhodobém horizontu se řešení stává **výrazně ekonomicky výhodnějším**, protože eliminuje náklady na rozsáhlé opravy a rekonstrukce.

10.7 Technologie výstavby

Popsaná technologie výstavby vychází z realizace ekoduktu nad provozovanou dálnicí (viz obr. 25). V případě novostavby komunikace je možné zvolit technologicky jednodušší postup bez nutnosti etapizace provozu.

V první fázi, během záboru odstavných pruhů, jsou zhotoveny základy opěr. Pokud není možný jiný přístup než z prostoru dálnice, je výhodné využít zakládání na mikropilotách. Následně jsou realizovány dřívky opěr, které lze provést jako monolitické konstrukce do systémového bednění.

Po dokončení opěr jsou jízdní pruhy přikloněny k opěrám a ve středním dělicím pásu (SDP) je z inventárního materiálu zřízena dočasná montážní stojka, založená například na prefabrikovaných panelech.

Následuje montáž prefabrikovaných segmentů tvořících polovinu oblouku. Každý segment je ukládán na opěru a dočasnou stojku v SDP. Montáž probíhá postupně v nočních výlukách, kdy je uzavřen jeden jízdní pás, ve kterém je ustaven jeřáb a probíhá manipulace se segmenty. V protisměrném pásu je doprava vedena v nočním režimu 1+1. Tímto způsobem lze během jedné noční výluky (cca 20.00–6.00) osadit přibližně 8 segmentů, což odpovídá šířce ekoduktu přibližně 16 m.

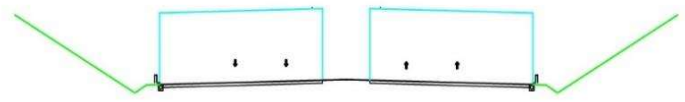
Obdobným postupem je následně provedena montáž segmentů nad druhým jízdním pásem.

Po osazení všech segmentů dochází za plného provozu k vyplnění příčných i podélných spár mezi segmenty. Spáry jsou před betonáží utěsněny tak, aby nedocházelo k úkapům směsi na vozovku. Současně je injektováno mezikruží v táhle.

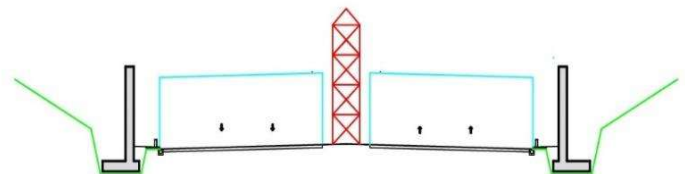
Po zatvrdnutí zálivky je provedeno podélné a příčné předepnutí konstrukce, včetně napnutí táhla. Následují dobetonávky v oblasti opěr.

Po dokončení předpínacích prací je odstraněna dočasná montážní stojka ve středním dělicím pásu, což vyžaduje krátkodobá noční omezení provozu.

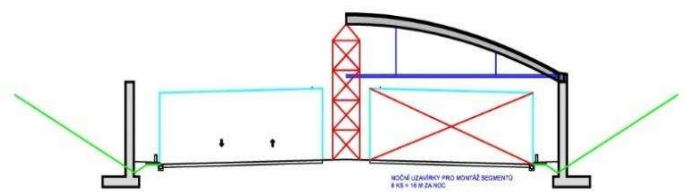
V závěrečné fázi je na konstrukci ekoduktu navedena a rovnoměrně rozprostřena zemina, je provedeno osazení vegetací a jsou realizovány dokončovací terénní úpravy.



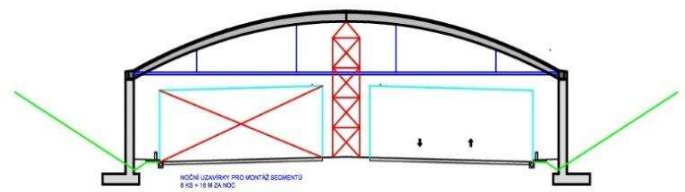
OPĚRY A DOČASNÁ STOJKA VE STŘEDNÍM PÁSU



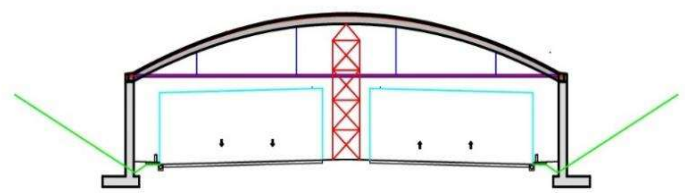
MONTÁŽ SEGMENTŮ PŘES PRVNÍ PÁS



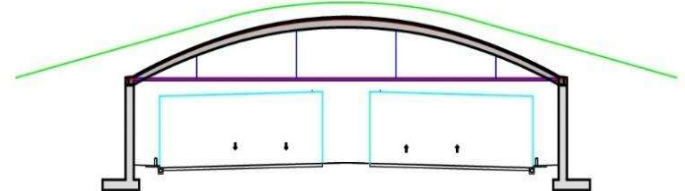
MONTÁŽ SEGMENTŮ PŘES DRUHÝ PÁS



ZMONOLITNĚNÍ A PŘEDEPNUTÍ OBLOUKŮ A TÁHLA



ZÁSYP ZEMINOU A DOKONČOVACÍ PRÁCE



Obr. 25: Postup výstavby ekoduktu nad provozovanou dálnicí.

11. Mock-up experiment ekoduktu z UHPC

11.1 Úvod a cíl experimentu

Cílem mock-up experimentu je ověřit proveditelnost a vhodnost navrženého konstrukčního systému pro stavbu ekoduktů. Konstrukci ekoduktu tvoří samokotvený oblouk s mostovkou sestavenou ze dvou dílů spojených styčným spojem. Spára mezi nosníky je monoliticky provedena pomocí UHPC a nosníky jsou předpnuty v podélném i příčném směru za účelem zajištění vodotěsnosti monolitického spoje. Jedná se o mock-up experiment ekoduktu v měřítku 1:3 - 1:4 oproti reálnému ekoduktu, který má rozpětí 30 až 40 m.

11.2 Materiál mock-up experimentu

Složení směsi UHPC je shrnuto v tabulce 17. Materiálové charakteristiky vycházejí z experimentálního programu uvedeného v kapitole 9 a jsou zde uvedeny tak, aby byly s kapitolou 9 konzistentní.

Tab. 17: Složení směsi UHPC.

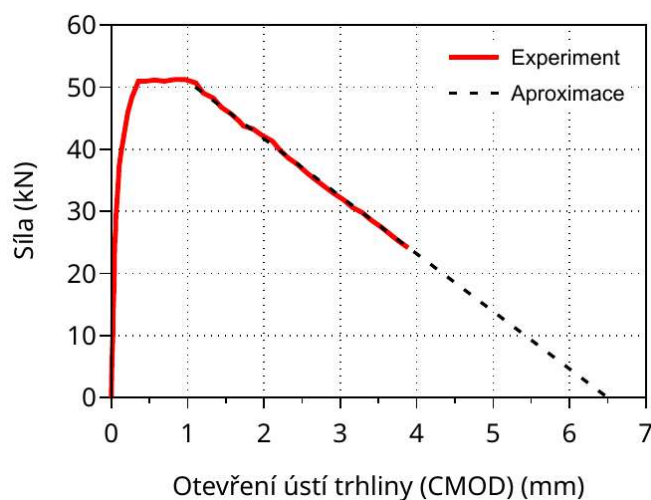
Složka	Obsah [kg/m ³]
Portlandský cement	550
Mikrosilika	Ano
Voda	72
Kamenivo	1785
Mikrovlákna	37

Tlakové zkoušky byly provedeny na krychlích o rozměrech 100 × 100 × 100 mm. Krychle byly testovány ve stáří 7, 28, 56 a 90 dnů. Všechny zkušební procesy byly provedeny v souladu s požadavky normy ČSN EN 12390-3. Průměrná pevnost po 7 dnech byla 100,4 MPa, po 28 dnech 109,0 MPa, po 56 dnech 142,9 MPa a po 90 dnech 144,6 MPa.

Pevnost v prostém tahu byla testována na vzorcích typu „dog-bone“ ve stáří 28 dnů a průměrně činila 6,8 MPa.

Nosník o rozměrech 150 × 150 × 700 mm se zářezem byl testován ve stáří 28 dnů podle EN 14651+A1. Závislost otevření ústí trhliny (CMOD) na zatěžující síle je uvedena na obr. 26. Za předpokladu lineárního změkčení byla mezní hodnota CMOD uvažována jako 6,5 mm.

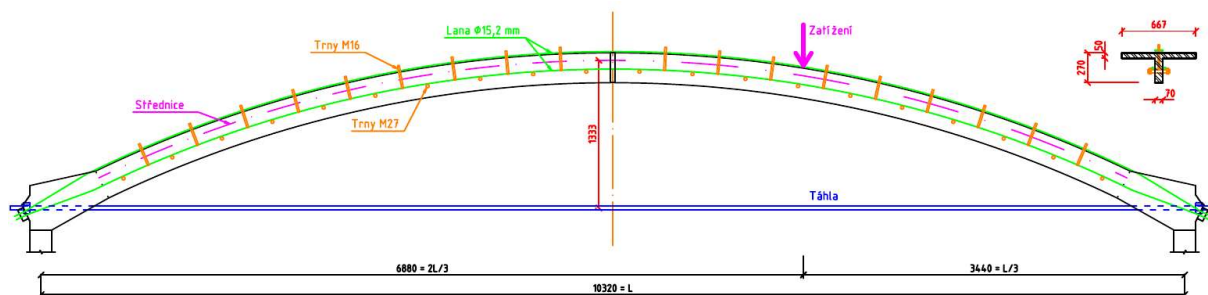
Youngův modul pružnosti byl pro účely numerických simulací uvažován $E = 46$ GPa (v souladu s měřeními a přijatým modelovým zjednodušením), Poissonovo číslo bylo uvažováno $\nu = 0,20$. Objemová hmotnost po 28 dnech byla 2460 kg/m³ na vzorcích vyzrálých ve vodě.



Obr. 26: Graf otevření ústí trhliny v závislosti na zatížení.

11.3 Geometrie, výroba a montáž redukováného modelu

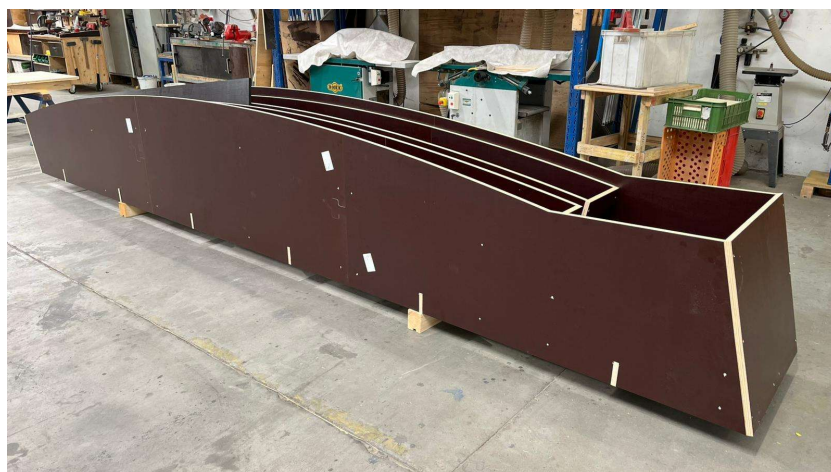
Pro experiment byl zvolen redukováný model konstrukce v přibližném měřítku 1 : 3 (viz obr. 27). Délka jednoho polooblouku byla 5,26 m, což vedlo k celkovému rozpětí 10,32 m. Oblouk měl průřez ve tvaru T s tloušťkou příruby 50 mm, šířkou stojiny 70 mm a celkovou hloubkou průřezu 270 mm. Geometrie makety byla navržena tak, aby realisticky reprezentovala strukturální chování oblouku ekoduktu v plném měřítku a zároveň zůstala vhodná pro laboratorní testování.



Obr. 27: Geometrie makety experimentu: podélný pohled na oblouk z UHPC a průřez nosníku ve tvaru T (rozměry v mm).

Pro výrobu segmentů nosníku z UHPC byla vyrobena čtyři identická bednění. Bednění byla zhotovena z hladkých překližkových desek, CNC frézována na jednotlivé komponenty a následně sestavena do finální zakřivené geometrie (viz obr. 28). Před betonáží bylo bednění umístěno vodorovně v otevřeném prostoru betonárny, aby bylo možné plnění přímo z autodomíhávače. Hřeben bednění byl lokálně vyztužen ocelovými čepý M16 s roztečí 500 mm.

Na vnitřní povrch bednění byla přilepena drenážní textilie z jemných polypropylenových vláken (Formtex). Textilie umožnila řízený odtok přebytečného vzduchu a vody během betonáže, čímž se lokálně snížil poměr voda/cement v povrchové vrstvě a vznikla hutnější betonová vrstva se sníženou pórovitostí. V bednění byly připraveny otvory pro instalaci ocelových vodicích čepů pro předpínací kabely ve stojině, spolu s kanály a kotvami pro vedení a napínání kabelů.



Obr. 28: Bednění obráběné CNC frézku z hladkých překližkových panelů pro betonářské segmenty UHPC.

Betonáž probíhala ve svislé poloze přes dva betonářské otvory. Zpočátku byl UHPC lit do bednění v patě nosníku, kde se nacházely lokální výztužné a kotevní prvky pro přenos předpínací síly. Po úplném vyplnění této sekce byl spodní otvor uzavřen a betonáž pokračovala druhým otvorem umístěným v nejvyšším bodě bednění. Proces plnění byl průběžně sledován kontrolními otvory ve vrcholu bednění, které zároveň sloužily jako odvodušňovací otvory (viz obr. 29).

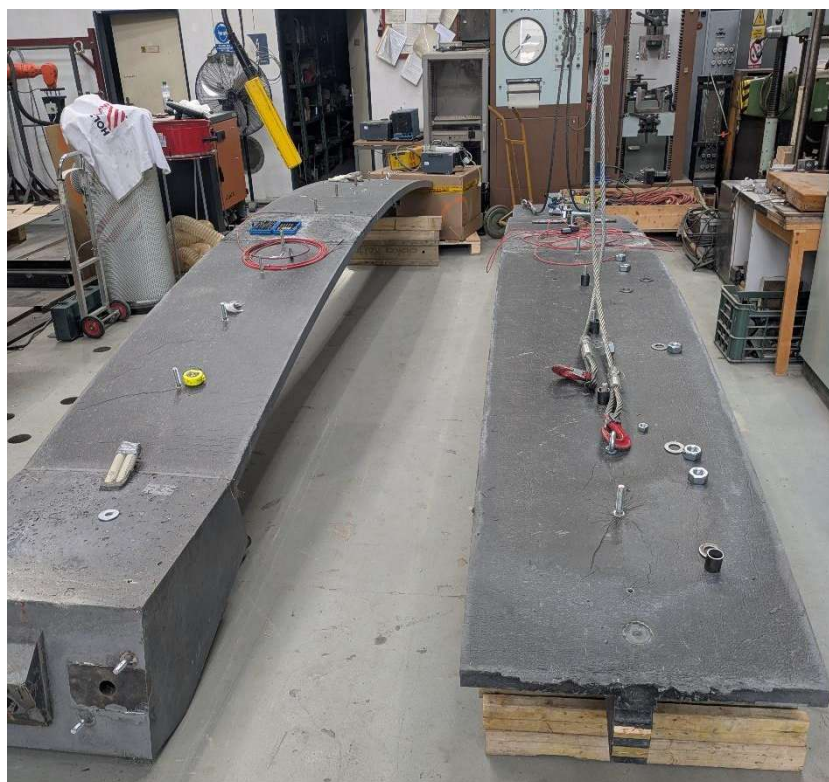
Po vytvrzení byly segmenty přepraveny do laboratoře Experimentálního centra Fakulty stavební ČVUT. Pro zajištění stability a ochrany betonových prvků během přepravy bylo vyformování provedeno až po umístění segmentů v laboratoři. Následně byly do stojiny instalovány vodící čepy M27 s roztečí 500 mm.



Obr. 29: Odlévání UHPC do bednění; plnění probíhalo po etapách a bylo monitorováno kontrolními a odvodušňovacími otvory.

Segmenty nosníku byly umístěny zrcadlově na vyvýšených plošinách pro usnadnění montáže a předpínání (viz obr. 30). Protilehlé plochy T-profilů byly tvarovány pomocí negativních smykových per, aby se umožnila kloubová interakce a přesné vyrovnání obou segmentů. Byla vytvořena spára o šířce přibližně 40 mm, dočasně utěsněná bedněním a vyplněná čerstvým UHPC. Po vytvrzení spoje byly oba oblouky dodatečně předepnuty pomocí čtyř vnějších předpínacích kabelů o průměru 15,2 mm, ukotvených kotvami typu VSL E a napnutých na 1100 MPa.

Oproti skutečné konstrukci bylo rozložení předpínacích kabelů upraveno z důvodu geometrických omezení redukovaného průřezu. Průměr kabelových kanálků nebylo možné úměrně zmenšit bez rizika oslabení stojiny; proto byly kabely vedeny vně na obou stranách stojiny. Předpínací síla byla přenesena do stojiny UHPC ocelovými spojkami instalovanými v pravidelných intervalech 500 mm.



Obr. 30: Sestavování dvou segmentů UHPC před zmonolitněním a vnesením předpětí.

Výsledné rovnoměrné tlakové napětí v oblouku dosáhlo 12,64 MPa, zatímco kritické napětí ve vzpěru bylo vypočítáno na 67,0 MPa, což indikuje dostatečnou rezervu proti globální nestabilitě. Primárním cílem předpětí bylo uzavřít potenciální vlasové trhliny ve spoji a zajistit vodotěsnost sestaveného oblouku. Vzhledem k zakřivení vnějších předpínacích lan bylo zavedeno radiální zatížení 57,7 kN/m, které významně překročilo očekávané rovnoměrné zatížení od zeminy a vegetace v reálné konstrukci. Horizontální axiální síly byly zachyceny dvojicí ocelových táhel se závitem M36 instalovaných na opěrách. Popsaná geometrie, výrobní proces a uspořádání předpětí definovaly okrajové podmínky a rozložení vnitřních sil experimentálního vzorku a byly explicitně zohledněny v numerickém modelu popsaném v následující části.

11.4 Experimentální uspořádání a numerická simulace

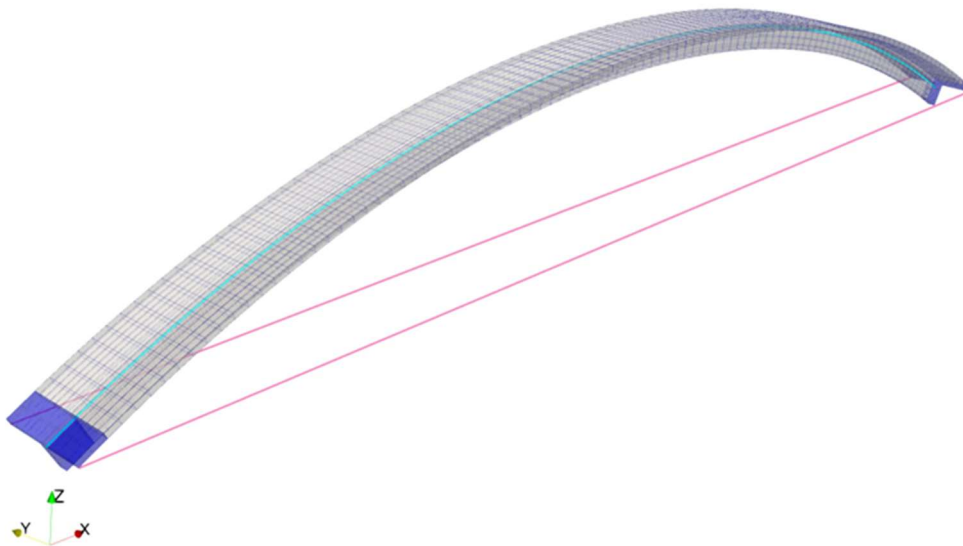
Experimentální model testoval dva předpjaté oblouky z UHPC s rozpětím 10,32 m až do bodu porušení. Každý oblouk se skládal ze dvou polooblouků, které byly spojeny a mírně předepnuty, aby byla zajištěna vodotěsnost spoje. Zatížení působilo v jedné třetině rozpětí a vyvolalo deformace odpovídající dominantnímu vlastnímu tvaru. První tahová trhлина se objevila přibližně při zatížení 60 kN, následovaly smykové trhliny a tahové porušení v přibližně protilehlém průřezu. Maximální zatížení dosáhlo přibližně 170 kN s následným křehkým porušením. Chování bylo validováno pomocí 3D analýzy konečných prvků a materiálového modelu s ohledem na poškození a plasticitu.

První vlastní tvar oblouku je podobný bodovému zatížení v 1/3 rozpětí a tato konfigurace byla použita pro mock-up test. Byly měřeny čtyři posuny v 1/3 a 2/3 rozpětí; vliv kroucení byl během testování zanedbatelný. Čtyři odporové tenzometry zaznamenávaly deformace v táhlech, jejich vzájemné hodnoty byly srovnatelné.

Zkouška s řízeným posunem byla prováděna hydraulickým válcem 3 MN s maximálním zdvihem 300 mm. Zatěžování probíhalo rychlostí 5 mm/min do průhybu 40 mm a poté bylo uručeno až na 20 mm/min.

Pro numerické ověření experimentálních dat byl vytvořen 3D konečněprvkový model. Síť se skládala ze 14 866 uzlů, 2200 dvacetiužlových kvadratických prvků, 60 příhradových prvků pro předpínací kabely a 2 příhradových prvků pro táhla. Přehled geometrie, sítě a přiřazení materiálů je uveden na obr. 31. Řešení využívalo open-source FEM kód OOFEM (Patzák, 2012). Úloha se skládala ze 40 kroků řízených posunutím; doba řešení byla přibližně 22 minut na jednom CPU.

Tři přiřazené materiály byly uvažovány jako lineárně elastické: předpínací kabely, táhla a konce oblouku, aby se zabránilo lokalizovanému poškození vlivem podpěr.



Obr. 31: Geometrie modelu.

Pro UHPC (Grassl et al., 2013) byl použit plastický model betonu s poškozením. Konstitutivní model popisuje nepružnou odezvu při obecném triaxiálním napětí. Efektivní napětí se vypočítá z plastické deformace jako:

$$\bar{\sigma} = D_e : (\varepsilon - \varepsilon_p)$$

kde D_e je tenzor elastické tuhosti. Rozdělení efektivního napětí na kladnou část $\underline{\sigma}_t$ a zápornou část $\underline{\sigma}_c$ umožňuje použít dvě nezávislé proměnné poškození, ω_t a ω_c , pro tah a pro tlak. Jmenovité napětí se pak vypočte jako

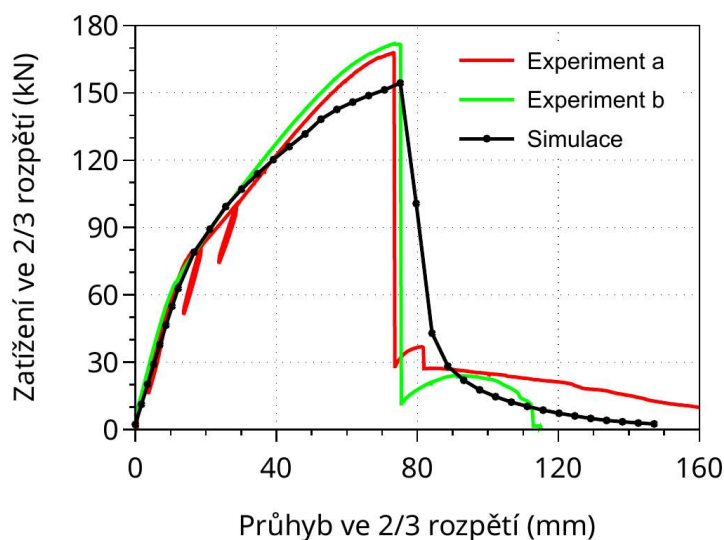
$$\sigma = (1 - \omega_t)\underline{\sigma}_t + (1 - \omega_c)\underline{\sigma}_c$$

První simulace ukázaly, že tahové změkčení je nejrelevantnějším jevem pro simulaci oblouku. Tahové poškození se iniciuje, když ekvivalentní deformace dosáhne prahové hodnoty $\varepsilon_p = f_t/E$, což odpovídá maximální elastické deformaci při jednoosém tahu. Vývoj tahového poškození závisí na třech vnitřních proměnných κ_{dt} , κ_{dt} , κ_{dt2} , které jsou spojeny s elastickými deformacemi, plastickými deformacemi a plochou plasticity.

Plastický model s poškozením má 15 parametrů. Experimentální data z testů UHPC poskytla pět parametrů, tj. $E = 46$ GPa, $\nu = 0,20$, $f_c = 109$ MPa, $f_t = 6,8$ MPa („dog-bone“). Na základě obr. 26 se lineární změkčení jeví jako dobrá aproximace a protíná osu CMOD v bodě $w_f = 6,5$ mm.

Pilotní simulace ukázala, že je nutné mírně upravit chování UHPC v tlaku. Z tohoto důvodu byl parametr ε_{fc} snížen z 15 na 4 a zbytek parametrů byl ponechán na výchozích hodnotách. Pro kalibraci zbývajících parametrů pro materiál UHPC by bylo nutné provést další testy.

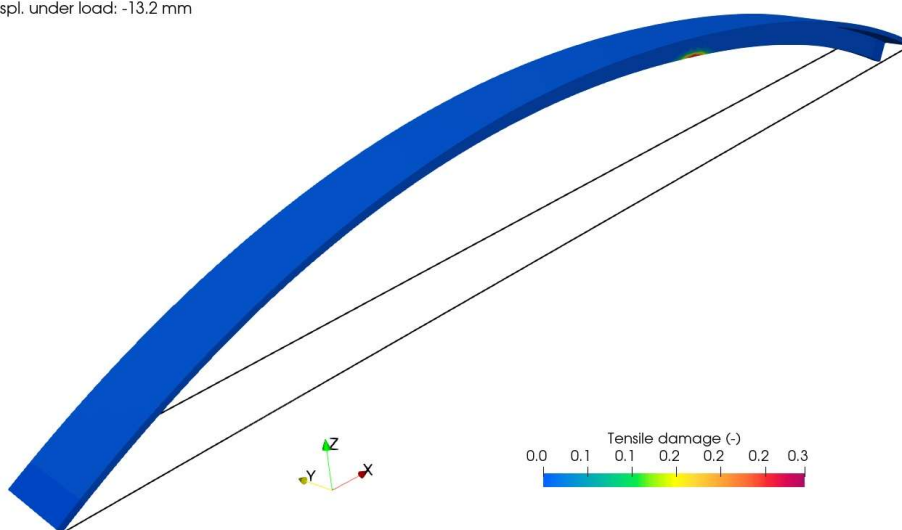
Grafy síla-posun na obr. 32 ukazují, že oba oblouky se chovaly podobně. Elastická část až do zatížení 54,9 kN dokazuje, že model má správnou elastickou tuhost při zatížení ve 2/3 rozpětí.



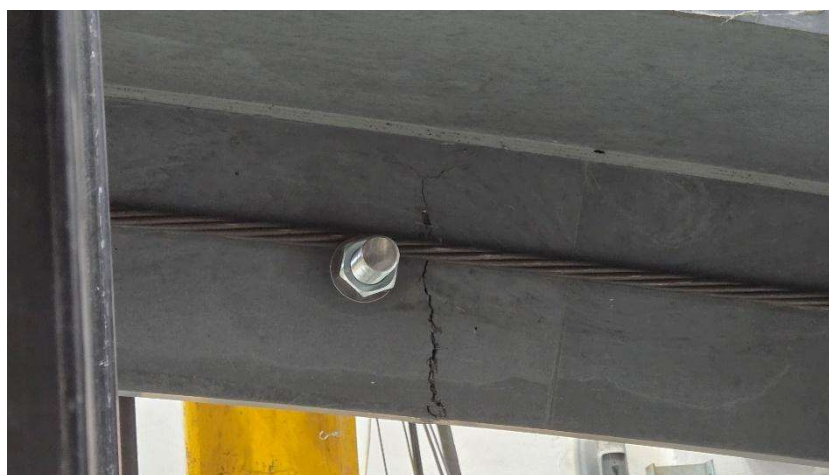
Obr. 32: Graf síla průhyb pro oba experimenty i modely.

K prvnímu poškození v tahu dochází v kroku 9, (viz obr. 33 a 34). Zatížení 54,9 kN ve 1/3 rozpětí vyvolává ohyb dosahující pevnosti v tahu. První tlakové poškození dochází v kroku 15 v blízkosti zatížení a pomalu roste s postupujícím smykovým poškozením mezi stojinou a přírubou. Taková smyková trhлина nebyla experimentálně pozorována, pravděpodobně kvůli její malé šířce, ale tečná tuhost se oproti diagramu zatížení snížila. Krok 22 při zatížení 148,8 kN je prvním krokem, kdy je tahové poškození zavedeno do protilehlého průřezu, který se nachází ve 1/3 rozpětí.

Step: 9
Load: 54,9 kN
Displ. under load: -13,2 mm



Obr. 33: Krok 9, poškození tahem při 54,9 kN. Posuny 8 x zvětšeny.

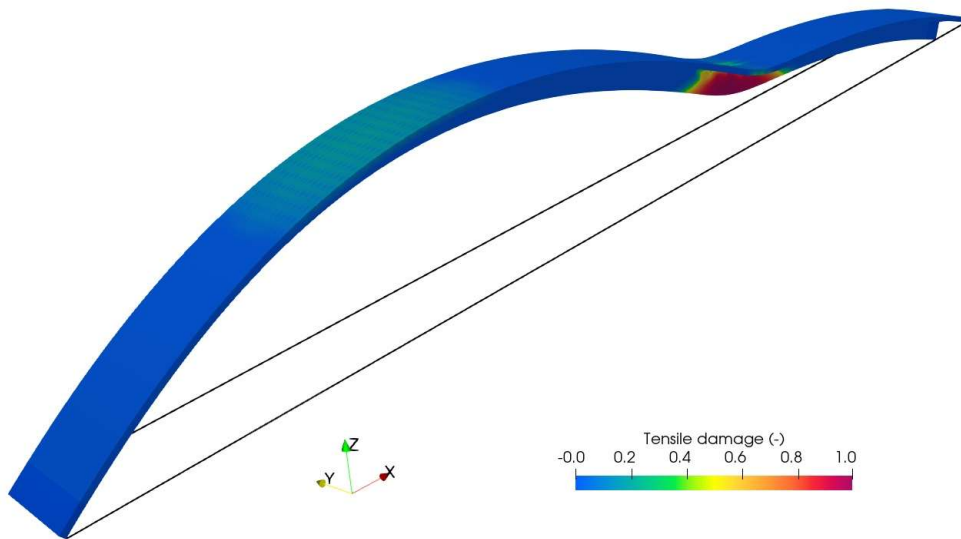


Obr. 34: Poškození v tahu pod zatížením.

Maximální zatížení 154,4 kN se vyskytuje v kroku 24, což udržuje poškození tahem kolem 0,4 na horní ploše v 1/3 rozpětí. Zatímco oblast pod zatížením je silně poškozena (viz obr. 35), opačný průřez je stále schopen odolat vysokému ohybovému momentu.

Poškození tlakem pomalu roste (viz obr. 36). Maximální zatížení z experimentů přinesla 167,9 a 172,0 kN, což představuje relativní chybu až 11 %. Tento nesoulad pravděpodobně pramení z odlišného vývoje tlakového změkčení, které je v simulaci příliš vysoké. Formulace modelu poškození-plasticity zabraňuje křehkému porušení a simulace ukazuje postupné změkčení po dosažení vrcholu.

Step: 24
Load: 154.4 kN
Displ. under load: -78.3 mm



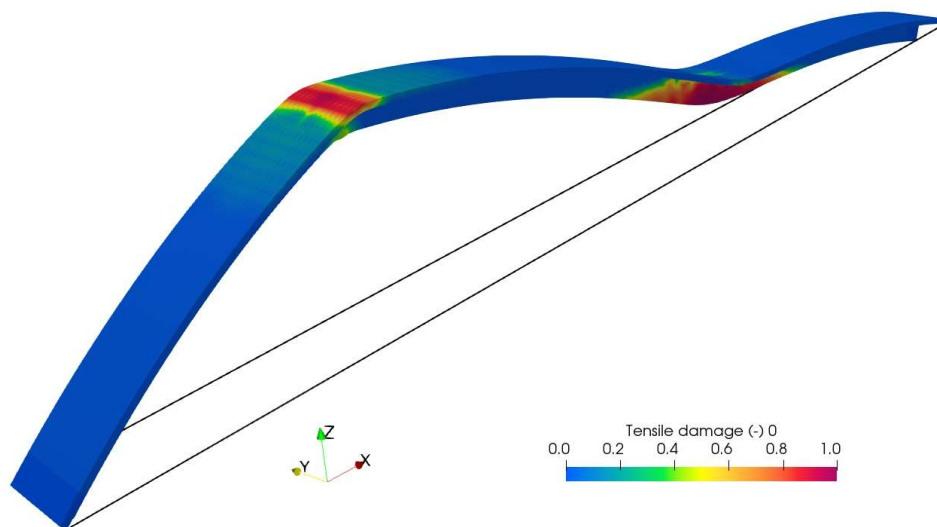
Obr. 35: Krok 24, tahové poškození, maximální zatížení 154,4 kN.



Obr. 36: Poškození tahem a smykem.

Obr. 37 a 38 ukazují geometrii po maximální zatížení, když je oblouk rozlomen na tři části. Pod zatížením a v protilehlém průřezu se vytvoří dva klouby. V stojině se nachází významné tlakové poškození. V *Experimentu a* skutečně vystřelil kus dlouhý přibližně 0,5 m oddělený šikmými smykovými trhlinami (viz obr. 39). V *Experimentu b* však stojina zůstala celistvá a v obou průřezích vykazovala pouze významné tahové trhliny (viz obr. 40).

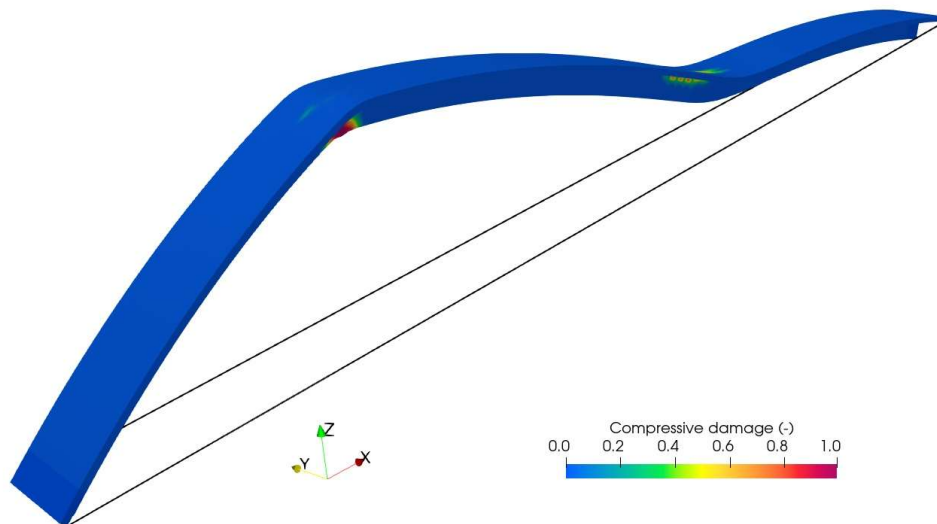
Step: 26
Load: 42.1 kN
Displ. under load: -87.4 mm



Obr. 37: Krok 22, stav po maimálním zatížení, poškození tahem, zatížení 42,1 kN.

Obr. 41 demonstruje ověření deformace v táhlech, které se nacházejí ve spodní části oblouku. Experiment ukazuje nižší deformace v důsledku částečného podepření základovými bloky.

Step: 26
Load: 42.1 kN
Displ. under load: -87.4 mm



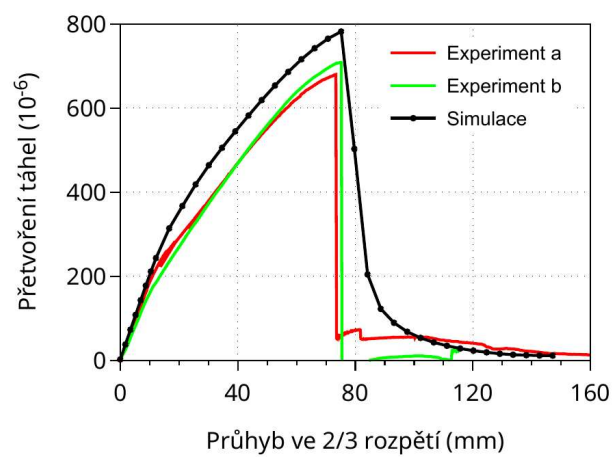
Obr. 38: Krok 26, stav po vrcholu zatížení, poškození tlakem, zatížení 42,1 kN.



Obr. 39: Porušení ve smyku a oddělení tlačené části.



Obr. 40: Porušení tahem, smykem a delaminace tlačené části.



Obr. 41: Přetvoření v táhlech během zatěžování.

12. Závěr

Výzkum a vývoj nových ekoduktů z UHPC vede k následujícím závěrům:

- Nově navržený koncept ekoduktů představuje významný posun v možnostech zajištění ekologické konektivity krajiny a zmírnění bariérového efektu dopravní infrastruktury. Výsledky projektu ukazují, že modulární ekodukty z UHPC mohou díky nižší hmotnosti konstrukce, možnosti prefabrikace a montáže za provozu výrazně rozšířit možnosti realizace migračních objektů i na stávající dálniční síti. Právě omezená možnost dodatečné výstavby nad provozovanými komunikacemi představovala dosud jednu z hlavních překážek rozvoje ekologických migračních opatření v krajině.
- Z ekologického hlediska se jako zásadní ukazuje možnost navrhovat širší (až desítky metrů) a krajinářsky kvalitnější ekodukty s vyšší heterogenitou vegetace a lepším napojením na okolní biotopy. Projekt potvrdil význam komplexního přístupu, který kombinuje konstrukční řešení s ekologickými a krajinářskými požadavky. Funkčnost ekoduktů je významně ovlivněna nejen samotnou konstrukcí, ale i charakterem vegetace, návazností na krajinné struktury, geomorfologií terénu a dlouhodobým managementem. Modulární systém zároveň umožňuje větší flexibilitu při návrhu konkrétního prostorového uspořádání ekoduktu podle charakteru lokality a cílových skupin organismů.
- Pro ověření chování skutečného ekoduktu by zhotoven zmenšený mock-up experiment v měřítku přibližně 1 : 3. Odlévání a výroba oblouků je technologicky možná s použitím vysoce přesných bednění. Tvar štíhlého oblouku ve tvaru T umožňuje efektivní využití UHPC díky vodotěsnosti, vysoké tlakové pevnosti a rozptýlené vláknité výztuži. Numerický model pro mock-up experiment vykazuje velmi dobrou predikci elastické části odezvy a podhodnocení maximální síly až o 11 %. Model postihl základní módy poškození v tahlových oblastech UHPC.

Použité zkratky

UHPFRC	Ultra vysokopevnostní beton vyztužený ocelovými drátky
UHPC	Ultra vysokopevnostní beton
SCC	Samozhutňovací beton
FRC	Drátkobeton
HPC	Vysokopevnostní beton
NC	Normální beton
OOFEM	Objektově orientované metoda konečných prvků
CPU	Procesor
MSWIFA	Popílek ze spalování tuhého komunálního odpadu

Literatura

- Akeed, M.H.; Qaidi, S.; Ahmed, H.U.; Faraj, R.H.; Mohammed, A.S.; Emad, W.; Tayeh, B.A.; Azevedo, A.R. (2022) *Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part I: Developments, principles, raw materials*. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01290>.
- Als Salman, A.; Assi, L.; Carter, K.; Mousa, M.A.; Dang, C.N.; Hale, W.M.; Al-Yousuf, A. (2025). *Comparative Sustainability Assessment of Proprietary and Non-Proprietary Ultra-High Performance Concrete Mixtures*. *Infrastructures* 10. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10090245>.
- AOPK ČR. (b.r.). *TA ČR Tripass Ekodukty*. <https://nature.cz/ta-cr-tripass-ekodukty>.
- Association Française de Génie Civil, (2002). *A. French interim recommendations of ultra-high performance Fiber reinforced concrete (UHPFRC)*.
- Anděl, P., Gorčicová, I., Hlaváč, V., Miko, L., & Andělová, H. (2005). *Assessment of Landscape Fragmentation Caused by Transport Systematic guide*. Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, Praha.
- Azmeem, N.; Shafiq, N. (2018). *Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications*. *Case Studies in Construction Materials* 9, e00197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>.
- Bae, B.I.; Lee, M.S.; Choi, C.S.; Jung, H.S.; Choi, H.K. (2021). *Evaluation of the Ultimate Strength of the Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams*. *Applied Sciences* 11. <https://doi.org/10.3390/app11072951>.
- Baigas, P. E., Squires, J. R., Olson, L. E., Ivan, J. S., & Roberts, E. K. (2017). Using environmental features to model highway crossing behavior of Canada lynx in the Southern Rocky Mountains. *Landscape and Urban Planning*, 157, 200–213.
- Barrueto, M., Ford, A. T., & Clevenger, A. P. (2014). Anthropogenic effects on activity patterns of wildlife at crossing structures. *Ecosphere*, 5(3), 1–19.
- Beben, D. (2012). Crossings for animals - an effective method of wild fauna conservation. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 20(1), 86–96.
- Behloul, M.; Lee, K.C. (2003). *Ductal® Seonyu footbridge*. *Structural Concrete* 4, 195–201, [<https://www.emerald.com/jstco/article-pdf/4/4/195/2569522/stco200344195.pdf>]. <https://doi.org/10.1680/stco.2003.4.4.195>.
- Brennan, L., Chow, E., & Lamb, C. (2022). Wildlife overpass structure size, distribution, effectiveness, and adherence to expert design recommendations. *PeerJ* 10, 1-19.
- Chen, B.; Shi, Z.; Luo, X.; Huang, Q.; Han, Y. A (2023). *Sustainable Arch Bridge of UHPC Ribs and Jointless Deck*. In Proceedings of the Proceedings of ARCH; Briseghella, B.; Contento, A.; Liu, J., Eds., Cham, 2025; pp. 341–350.
- Clevenger, A. P., & Ford, A. T. (2010). Wildlife crossing structures, fencing, and other highway design considerations. In Beckmann, J. P., Clevenger, A. P., Huijser, M. P., & Hilty, J. A. (Eds.), *Safe Passages—Highways, Wildlife, and Habitat Connectivity* (pp. 17-50). Island Press, Washington, D.C.

- Clevenger, A. P., & Huijser, M. P. (2011). *Wildlife crossing structure handbook: design and evaluation in North America*. United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division, Lakewood.
- Clevenger, A. P., & Waltho, N. (2005). Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals. *Biological Conservation*, 121(3), 453–464.
- Corlatti, L., Hackländer, K., & Frey-Roos, F. (2009). Ability of wildlife overpasses to provide connectivity and prevent genetic isolation. *Conservation Biology*, 23(3), 548–556.
- Čánská, K. (2016). *Ekodukty pražského okruhu a jejich pedogeografické aspekty*. [Master's thesis, Charles University, Faculty of Science].
- D'Amico, M., Clevenger, A. P., Román, J., & Revilla, E. (2015). General versus specific surveys: Estimating the suitability of different road-crossing structures for small mammals. *Journal of Wildlife Management*, 79(5), 854–860.
- Denneboom, D., Bar-Massada, A., & Shwartz, A. (2021). Factors affecting usage of crossing structures by wildlife – A systematic review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 777(1).
- Diffendorfer, J. E., Gaines, M. S., & Holt, R. D. (1995). Habitat Fragmentation and Movements of Three Small Mammals (Sigmodon, Microtus, and Peromyscus). *Ecology*, 76(3), 827-839.
- Georgii, B., Keller, V., Pfister, H. P., Reck, H., Peters-Ostenberg, E., Henneberg, M., Herrmann, M., Mueller-Stiess, H., & Bach, L. (2011). Use of wildlife passages by invertebrate and vertebrate species. *Wildlife passages in Germany, 2011*, 1-27.
- Gloyne, C. C., & Clevenger, A. P. (2001). Cougar Puma concolor use of wildlife crossing structures on the Trans-Canada highway in Banff National Park, Alberta. *Wildlife Biology*, 7(2), 117-124.
- Grassl, P.; Xenos, D.; Nyström, U.; Rempling, R.; Gylltoft, K. (2013). *CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete*. International Journal of Solids and Structures 50, 3805–3816. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008>.
- Graybeal, B. (2005). *Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete*.
- Gunson, K., & Healy, A. (2015). Monitoring effectiveness of road wildlife mitigation for large animals in Ontario, Canada. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Ecology and Transportation*, Raleigh, North Carolina.
- Hamilton, K. M., Bommarito, T., & Lewis, J. S. (2024). Spatial and temporal factors influencing wildlife use of overpass crossing structures and landscape siphons along a major canal. *Biological Conservation*, 292(1).
- Hammerl, M.; Kromoser, B. (2022). *Bending Behaviour of Prestressed T-Shaped Concrete Beams Reinforced with FRP—Experimental and Analytical Investigations*. Materials 15. <https://doi.org/10.3390/ma15113843>.
- Hlaváč, V., Anděl, P., Pešout, P., Libosvár, T., Šikula, T., Bartonička, T., Dostál, I., Strnad, M., & Uhlíková, J. (2020). *Doprava a ochrana fauny v České republice: metodika AOPK ČR*. Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, Praha.
- Huang, Y.; Yao, G. (2024). *Shear Strength of Ultra-High-Performance Concrete Beams without Stirrups—A Review Based on a Database*. Buildings 14. <https://doi.org/10.3390/buildings14051212>.

- Iuell, B., Bekker, H., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlavac, V., Keller, V., Rosell, C., Sangwine, T., Torslov, N., & Wandall, B. (2003). *Wildlife and traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions*. KNNV Publishers, Zeist.
- Jedrzejewski, W., Nowak, S., Mysłajek, R. W., & Stachura, K. (2009). *Animals and roads. Methods of mitigating the negative impact of roads on wildlife*. Mammal Research Institute, Polish Academy of Sciences, Białowieża.
- Jurečka, M. (2017). Prostupnost dálnice D1 pro savce v úseku Lipník nad Bečvou-Studénka. [Bachelor's thesis, Masaryk University, Faculty of Science].
- Kravanja, G.; Mumtaz, A.R.; Kravanja, S. A (2024). *Comprehensive Review of the Advances, Manufacturing, Properties, Innovations, Environmental Impact and Applications of Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. Buildings 14. <https://doi.org/10.3390/buildings14020382>.
- Land, D., & Lotz, M. (1996). Wildlife crossing designs and use by florida panthers and other wildlife in southwest Florida. In *Transportation and Wildlife: Reducing Wildlife Mortality and Improving Wildlife Passageways Across Transportation Corridors*, Orlando, Florida (pp. 323-328).
- Li, J.; Yin, Y.; Yan, J. (2023). *Experimental and Numerical Study on the Mechanical Performance of Ultra-High-Performance Concrete T-Section Beams*. Sustainability 15. <https://doi.org/10.3390/su15129849>.
- Libosvár, T. (2016). *Pojem „ekodukt“*. ceskedalnice.cz. <https://www.ceskedalnice.cz/dalnicni-sit/ekodukty/>.
- Liu, F.; He, Y.; Liu, J.; Zhang, F.; Hao, X.; Liu, C. (2025). *Performance Research of Ultra-High Performance Concrete Incorporating Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash*. Materials 18. <https://doi.org/10.3390/ma18194623>.
- Marek, J.; Kolísko, J.; Tej, P.; Čítek, D.; Komanec, J.; Kalný, M.; Vráblík, L. (2019). *New UHPFRC bridges in the Czech Republic*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 596, 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012011>.
- Martínez-Medina, D., Ahmad, S., González-Rojas, M. F., & Reck, H. (2022). Wildlife crossings increase bat connectivity: Evidence from Northern Germany. *Ecological Engineering*, 174.
- Mata, C., Hervás, I., Herranz, J., Suárez, F., & Malo, J. E. (2008). Are motorway wildlife passages worth building? Vertebrate use of road-crossing structures on a Spanish motorway. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 407–415.
- McDonald, W., & St. Clair, C. C. (2004). Elements That Promote Highway Crossing Structure Use by Small Mammals in Banff National Park. *Journal of Applied Ecology*, 41(1), 82-93.
- Mysłajek, R. W., Olkowska, E., Wronka-Tomulewicz, M., & Nowak, S. (2020). Mammal use of wildlife crossing structures along a new motorway in an area recently recolonized by wolves. *European Journal of Wildlife Research*, 66(5).
- Ovaskainen, O. (2013). How to develop the nature conservation strategies for The Netherlands. *De Levende Natuur*, 114(2), 59–62.
- Patzák, B. (2012). *OOFEM-anobject-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures*. Acta Polytechnica 52, 59–66.

- Polman, E. (2014). *Crossing possibilities for wildcats at a highway in Belgium*. [Master's thesis, University Utrecht, Environmental Biology].
- Prach K. et al. (2009): Ekologie obnovy narušených míst I.–VI. – *Živa* 2009: 22–24, 68–72, 165–168, 212–215, 262–264.
- Reck, H., Rieze, J., & Hermann, G. (1997). Insect communities on green bridges in Germany and France. In Pfister, H. P., Keller, V., Reck, H., & Georgii, B. (Eds.) *Bio-ökologische Wirksamkeit von Grünbrücken über Verkehrswege – Hauptbericht* (pp. 469-492), Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn.
- Reck, H., Hlaváč, V., Strein, M., & Böttcher, M. (2023). *Thresholds for the dimension and for maximum distances of fauna passages or ecoducts at strong barriers including an approach to the definition of the term strong barrier and a compilation of related research and development needs*. A contribution to deliverable 5.3 of the Horizon 2020 BISON project.
- Reichel, M.; Freytag, B.; Sparowitz, L. (2011). *Road Bridge “Wild”: Application of the UHPFRC Precast Segmental Construction Method for an Arch Structure*. In *Design- ing and Building with UHPFRC*; John Wiley Sons, Ltd.; chapter 14, pp. 209–220, [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118557839.ch14>]. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118557839.ch14>.
- Rietz, A. (2023). *Wildlife-vehicle collisions: An evaluation of the mitigation effect by ecoducts and fauna bridges in Sweden*. [Master's thesis, Umeå University, Faculty of Social Sciences].
- Rist, Campbell B. M. & Frost P. (2012) Adaptive management: where are we now? *Environmental Conservation*, 1-14.
- Roth, P. (2017) Ekodukty v ČR - smysluplné řešení nebo nesmyslný luxus? *Ochrana přírody* 2/2017: 25-29.
- Sawaya, M. A., Kalinowski, S. T., & Clevenger, A. P. (2014). Genetic connectivity for two bear species at wildlife crossing structures in Banff National Park. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1780).
- Sawyer, H., Rodgers, P. A., & Hart, T. (2016). Pronghorn and mule deer use of underpasses and overpasses along U.S. Highway 191. *Wildlife Society Bulletin*, 40(2), 211–216.
- Sijtsma, F. J., van der Veen, E., van Hinsberg, A., Pouwels, R., Bekker, R., van Dijk, R. E., Grutters, M., Klaassen, R., Krijn, M., Mouissie, M., & Wymenga, E. (2020). Ecological impact and cost-effectiveness of wildlife crossings in a highly fragmented landscape: a multi-method approach. *Landscape Ecology*, 35(7), 1701–1720.
- Simpson, N. O., Stewart, K. M., Schroeder, C., Cox, M., Huebner, K., & Wasley, T. (2016). Overpasses and underpasses: Effectiveness of crossing structures for migratory ungulates. *The Journal of Wildlife Management*, 80(8), 1370–1378.
- Smith, D. J., Van Der Ree, R., & Rosell, C. (2015). Wildlife Crossing Structures: An Effective Strategy to Restore or Maintain Wildlife Connectivity Across Roads. In Van der Ree, R., Smith, D. J., & Grilo, C. (Eds.), *Handbook of Road Ecology* (pp. 172–183), Wiley, Hoboken.
- Sołowczuk, A. (2020). Effect of landscape elements and structures on the acoustic environment on wildlife overpasses located in rural areas. *Sustainability*, 12(19).

- Stoilova, N., Popova, E., & Bogoev, V. (2018). Effectiveness and suitability of defragmentation and fencing facilities on struma motorway, LOT 1 (Preliminary results). In *Youth Scientific Conference "Kliment's Days"* (pp. 133-144), Sofia.
- Sugiarto, W. (2023). Impact of wildlife crossing structures on wildlife–vehicle collisions. *Transportation Research Record*, 2677(2), 670–685.
- Sweanor, L. L., Logan, K. A., & Hornocker, M. G. (2000). Cougar Dispersal Patterns, Metapopulation Dynamics, and Conservation. *Conservation Biology* 14(3), 798-808.
- Špitálník, L. (2013). *Minimalizace dopadů fragmentace krajiny výstavbou ekoduktů*. [Bachelor's thesis, University of Pardubice].
- Tremblay, M. A., & St. Clair, C. C. (2009). Factors affecting the permeability of transportation and riparian corridors to the movements of songbirds in an urban landscape. *Journal of Applied Ecology*, 46(6), 1314–1322.
- Vajgantová, M. (2011). *Uměle vytvořené migrační přechody živočichů a jejich efektivnost*. [Master's thesis, University of South Bohemia in České Budějovice].
- Van der Grift, E., Ottburg, F., & Snep, R. (2009). Monitoring wildlife overpass use by amphibians: Do artificially maintained humid conditions enhance crossing rates? In Wagner, P. J., Nelson, D., & Murray, E. (2010) (Eds.), *Proceedings of the 2009 International Conference on Ecology and Transportation* (pp. 341-347), Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Van Wieren, S. E., & Worm, P. B. (2001). The use of a motorway wildlife overpass by large mammals. *Netherlands Journal of Zoology*, 51(1), 97-105.
- Zhou, C.; Wu, S.; Wu, K.; Mo, F.; Jiang, H.; Tian, Y.; Fang, J. (2025). *Experimental and Numerical Investigation on Flexural Behaviors of a 30 m Full-Scale Prestressed UHPCNC Composite Box Girder*. Buildings 15. <https://doi.org/10.3390/buildings15173089>.
- Zhou, M.; Lu, W.; Song, J.; Lee, G.C. (2018). *Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering*. Construction and Building Materials 186, 1256–1267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036>.
- Zinner, F., Heinrich, R., & Richter, K. (2018). *Efficiency of wildlife overpasses for small animals and their habitats*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Abteilung Straßenbau, Bonn.

Legislativní rámec dotčené problematiky

ČSN EN –197 – 1. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití, ÚNMZ, Praha, 2012.

ČSN EN 206+A2. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, ÚNMZ, Praha, 2021.

ČSN EN 12620 + A1. Kamenivo do betonu, ÚNMZ, Praha, 2008.

ČSN EN 13263. Křemičitý úlet do betonu, ÚNMZ, Praha, 2009.

ČSN EN 15167. Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty, ÚNMZ, Praha, 2006.

ČSN 72 1220. Mleté vápence a dolomity, Český normalizační institut, Praha, 1983.

ČSN EN 14889-1. Vlákna do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace a shoda, ÚNMZ, Praha, 2007.

Kalný M., et al. METODIKA 2: Metodika pro navrhování prvků z UHPC, Kloknerův ústav v Praze, Praha, 2015.

Kolísko, J., et al. METODIKA 1: Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky, Kloknerův ústav v Praze, Praha, 2015.

Realizace územního systému ekologické stability a dopravní infrastruktury.

Hlaváč a kol. (2020), strany 98-108.

“Stát nemá přímou povinnost stavět ekodukty, přechody pro zvířata nebo biodukty na rozsáhlých liniových stavbách, jako jsou dálnice nebo železniční tratě. Nicméně, v případě některých staveb, jako jsou novostavby, rozšiřování a přeložky dálnic a silnic pro motorová vozidla, mohou být tyto stavby podléhat proceduře EIA (Environmental Impact Assessment - Posouzení vlivů na životní prostředí). V rámci tohoto procesu mohou být identifikovány potřeby ochrany přírody a krajiny, včetně zajištění prostupnosti krajiny pro zvířata.

V některých případech mohou být ekodukty, přechody pro zvířata nebo biodukty zahrnuty do projektů jako součást opatření na ochranu přírody a krajiny. Orgány územního plánování a stavební úřady by měly vykonávat svou působnost tak, aby byly zachovány a vytvářeny optimální ekologické funkce zvláště chráněných území a jejich ochranných pásem, prostupnost krajiny a aby byla zachována a podporována biologická rozmanitost.”

Stavební zákon (č. 183/2006 Sb.)

Tento zákon upravuje podmínky pro výstavbu a povolování staveb. Ekodukt, jako součást dopravní infrastruktury, podléhá režimu povolení stavebních záměrů. Při výstavbě ekoduktu je nutné provést posouzení vlivů na životní prostředí, což je součástí procesu posuzování vlivů na životní prostředí (EIA), pokud se jedná o větší záměr.

Územní plánování

Při plánování výstavby ekoduktů se také zohledňuje územní plán obce nebo kraje. Ekodukt může být zahrnut do územního plánu, pokud je považován za nutné opatření pro zajištění ekologických koridorů a ochranu přírody. Územní plánování musí zajistit soulad výstavby ekoduktů s ochranou krajinného rázu a dalších přírodních hodnot.

Zákon o ochraně přírody a krajiny (č. 114/1992 Sb.)

Tento zákon stanoví povinnost zajištění ochrany přírody a krajiny a zahrnuje i opatření k ochraně volně žijících živočichů a rostlin, včetně zajištění jejich migrace. Ekodukty jsou jedním z nástrojů k zajištění bezpečné migrace zvířat přes komunikace, železnice a další dopravní infrastrukturu. Zákon může vyžadovat provedení takovýchto opatření v oblastech, které jsou významné pro ochranu přírody.

Zákon o ochraně zemědělského půdního fondu (č. 334/1992 Sb.)

Při výstavbě ekoduktů, které mohou zasahovat do zemědělské půdy, je třeba také zohlednit ochranu zemědělského půdního fondu, což znamená nutnost získání příslušných povolení a souhlasů.

Zákon o silničním provozu (č. 361/2000 Sb.)

Tento zákon se zaměřuje na bezpečnost silničního provozu a zahrnuje i povinnosti týkající se ochrany zvířat při pohybu po silnicích. Ekodukty, jako zařízení zajišťující bezpečný přechod zvířat přes silnice, mohou být součástí opatření pro zajištění bezpečnosti silničního provozu a ochrany přírody.

TKP 18. Betonové konstrukce a mosty, PJKP, Praha, 201

TP ČBS 07. Ultra vysokohodnotný beton (UHPC), Česká betonářská společnost ČSSI, Praha, 2022.