



FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE

Technická správa komunikací, a.s.

Využití UHPC betonu při rekonstrukci Barrandovského mostu a v mostním stavitelství

Robert Coufal, TBG Metrostav, s.r.o.

Lukáš Vráblík, ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Jan L. Vítek, ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Obsah

- UHPC – Materiál
 - Složení, vlastnosti
 - Výroba, doprava
 - Zkoušení
 - Aplikace na opravy mostů v USA
- Barrandovský most
 - Popis konstrukce
 - Stav před rekonstrukcí
 - Průzkumy a jejich výsledky
 - Postup opravy (4 etapy)
 - Oprava spodní stavby
 - Oprava nosné konstrukce
 - Instalace dodatečného předpětí
 - Zesílení mostovky pomocí UHPC – statická funkce
- UHPC – možnosti použití pro zesilování mostů
- Barrandovský most
 - UHPC pro opravy mostů
 - Aplikace UHPC v 1. etapě
 - Aplikace UHPC ve 2. etapě
 - Aplikace UHPC ve 3.a 4. etapě
 - Pracovní spáry – experimentální ověření
 - Pracovní spáry realizované řešení
 - Zabetonované prvky – (odvodnění)
 - Vyhodnocení a doporučení
- Další příklady aplikací UHPC nejen na mostech
- Další možné aplikace v ČR

UHPC – Materiál, složení, vlastnosti, výroba, zkoušení

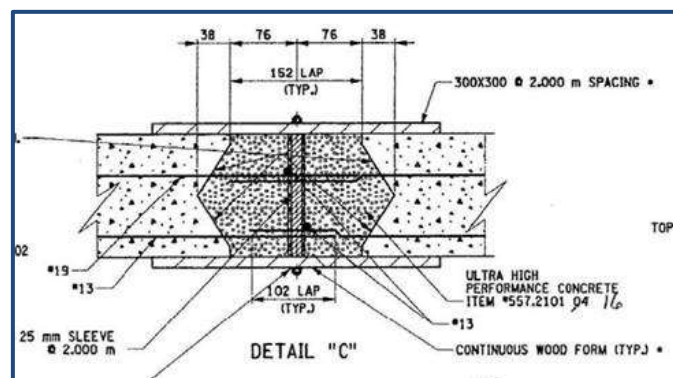
Robert Coufal

UHPC – úvod a terminologie

- **Ultra-vysokohodnotný beton (UHPC)** dle TP 267 (technické podmínky ministerstva dopravy) – Kompozitní materiál s cementovou matricí, jemným plnivem a rozptýlenou výztuží, s charakteristickou pevností v tlaku ≥ 110 MPa
- **Beton mimo rozsah normy pro výrobu betonu** – ČSN EN 206+A2
 - Pro výrobu využívány doplňkové informace z TP 267 (TP ČBS 07) a ČSN P 73 2404
- **Základní parametry UHPC**
 - Velmi vysoká pevnost v tlaku (≥ 110 MPa)
 - Vysoká míra vyztužení ocelovými mikrodrátky (min. 120 kg/m^3)
 - Vysoká pevnost v tahu
 - Velmi vysoká odolnost vůči vlivům prostředí
 - Jemnozrnná struktura

Základní využití UHPC

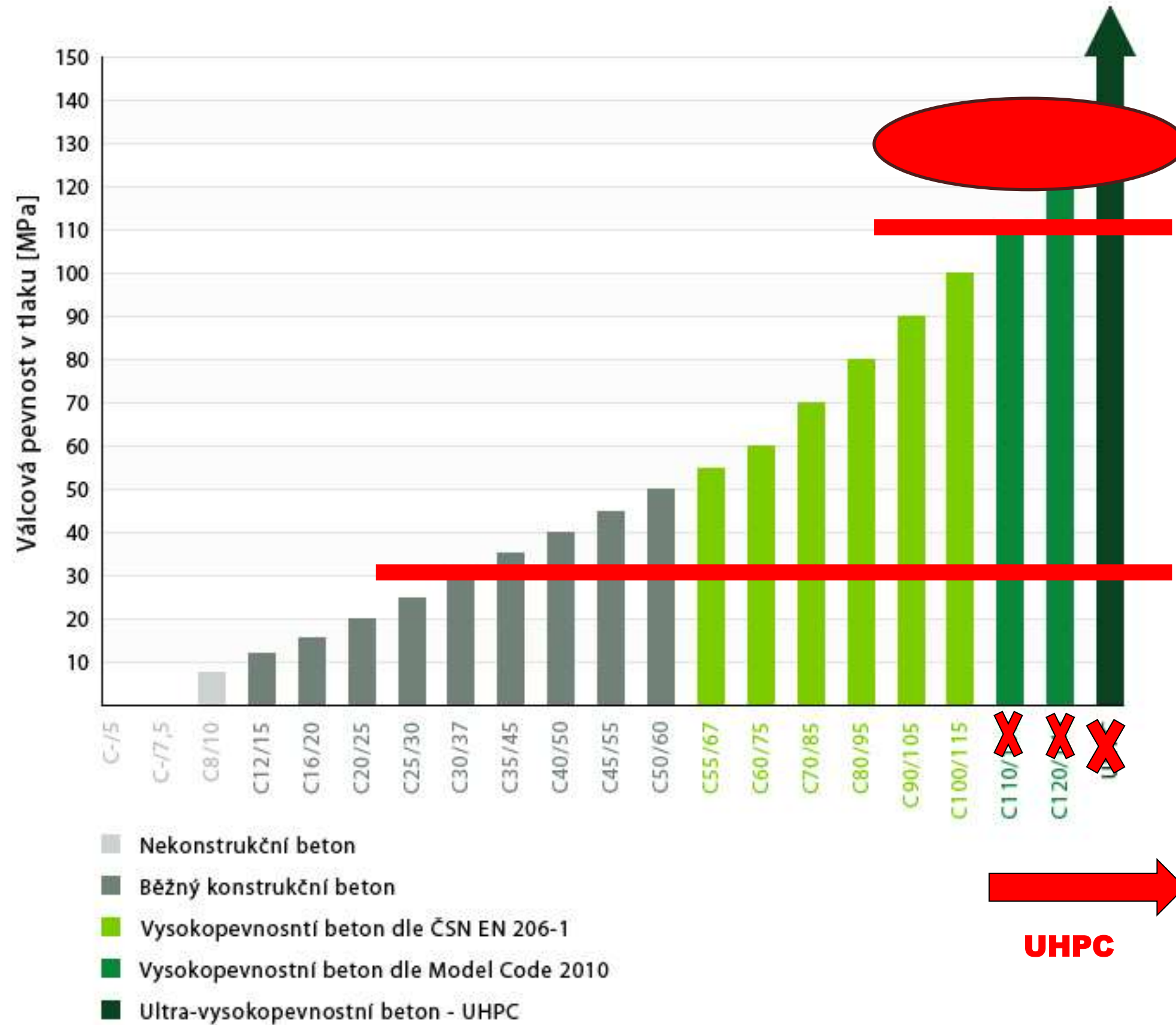
- Fasádní prvky
- Lávky a mosty
- Spoje prefabrikovaných konstrukcí
- Sanace a zesilování



UHPC – úvod a terminologie



UHPC – válcová pevnost v tlaku



Reálné hodnoty pevností z rekonstrukce Barrandovského mostu

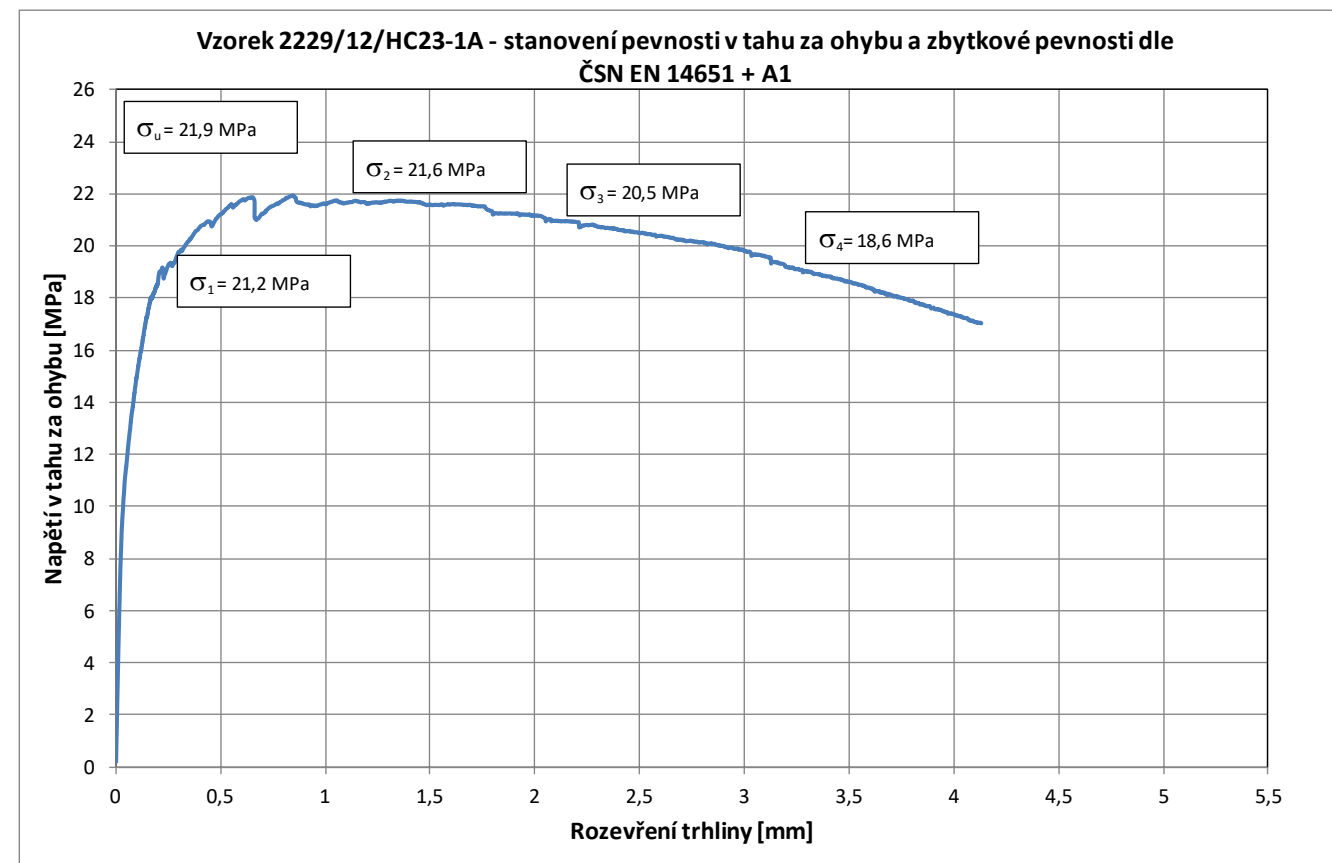
Zaručená pevnost pro rekonstrukci Barrandovského mostu

Pevnost standardního betonu pro mosty



UHPC – pevnost v tahu za ohybu

- Základní parametr UHPC
- Vliv vysokého vyztužení mikrodrátky



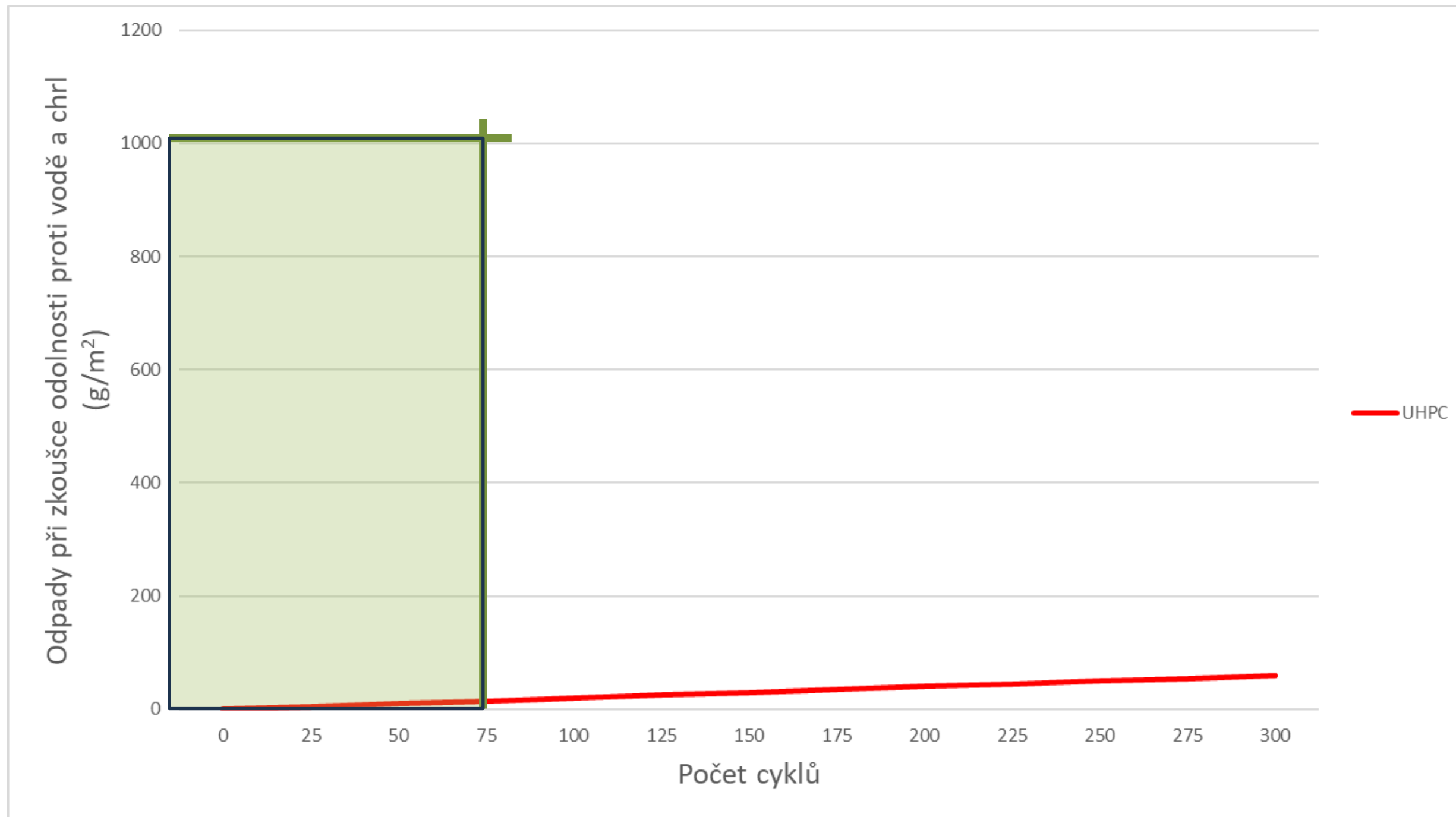
UHPC - Třídy pevnosti v prostém tahu

Třída pevnosti v prostém tahu	Charakteristická pevnost betonu v prostém tahu $f_{ctk} = 0,5 \times f_{ctk,f}$ [N/mm ²]	Charakteristická pevnost betonu v tahu za ohybu $f_{ctk,f} = 0,7 \times f_{R1m}$ [N/mm ²]	Odpovídající průměrná hodnota zbytkové pevnosti betonu (UHPC) v tahu za ohybu při rozevření vrubu (trhliny) $CMOD_1 = 0,5$ mm f_{R1m} [N/mm ²]
FR4	4	8	11,4
FR5	5	10	14,3
FR6	6	12	17,1
FR7	7	14	20,0
FR8	8	16	22,9
FR9	9	18	25,7
FR10	10	20	28,6

Třída pevnosti v tahu pro rekonstrukci
Barrandovského mostu

UHPC – odolnost vůči vlivům prostředí (CHRL)

- Odolnost proti ch.r.l. dle ČSN 73 1326
- Zeleně oblast vyhovujících výsledků pro XF4



UHPC – konzistence a viskozita

- Volba správné **konzistence** je klíčová pro úspěšnou ukladku
- **UHPC do spádu** nelze udělat pouze ubráním záměsové vody, nutno vyvinout speciální recepturu
- Vysoká **viskozita** (medovitost) je základním znakem UHPC



UHPC – konzistence a viskozita

- Sednutí rozlitím 690 mm
- T500 = 8s



- Sednutí rozlitím 390 mm



UHPC – konzistence a viskozita

- Samozhutnitelná varianta UHPC pro sanace



- Varianta UHPC pro ukládku do spádu

UHPC - složení



- **Běžný beton**
- **Kamenivo**
 - Lokální zdroje, volba dle ceny a dostupnosti
 - Maximální zrnitost 22 mm
- **Cement**
 - Běžné cementy dle použití betonu
- **Příměsi**
 - Nejčastěji popílek nebo vápenec
- **Vodní součinitel**
 - Vodní součinitel běžně 0,45 – 0,6
- **Rozptýlená výztuž**
 - Běžně se nepoužívá

- **UHPC**
- **Kamenivo**
 - Čisté drobné kamenivo, ideální křivky zrnitosti
 - Maximální zrnitost 8 mm, často ale 4 mm nebo méně
- **Cement**
 - Nejčastěji portlandské cementy
- **Příměsi**
 - Základní příměsí mikrosilika
- **Vodní součinitel**
 - Vodní součinitel běžně 0,13 – 0,25
- **Rozptýlená výztuž**
 - Velmi vysoké dávky mikrodrátků

UHPC – výroba a doprava

- Betonárna TBG METROSTAV - Libeň
- Výroba logisticky i časově náročná
- Chlazení záměsové vody
- V termínech betonáží **vyčleněno** pouze pro výrobu UHPC
- Úpravy betonárny pro skladování a dávkování drátků
- Doprava autodomíchačem
- Rekordní dodávka **63,75 m³/den**



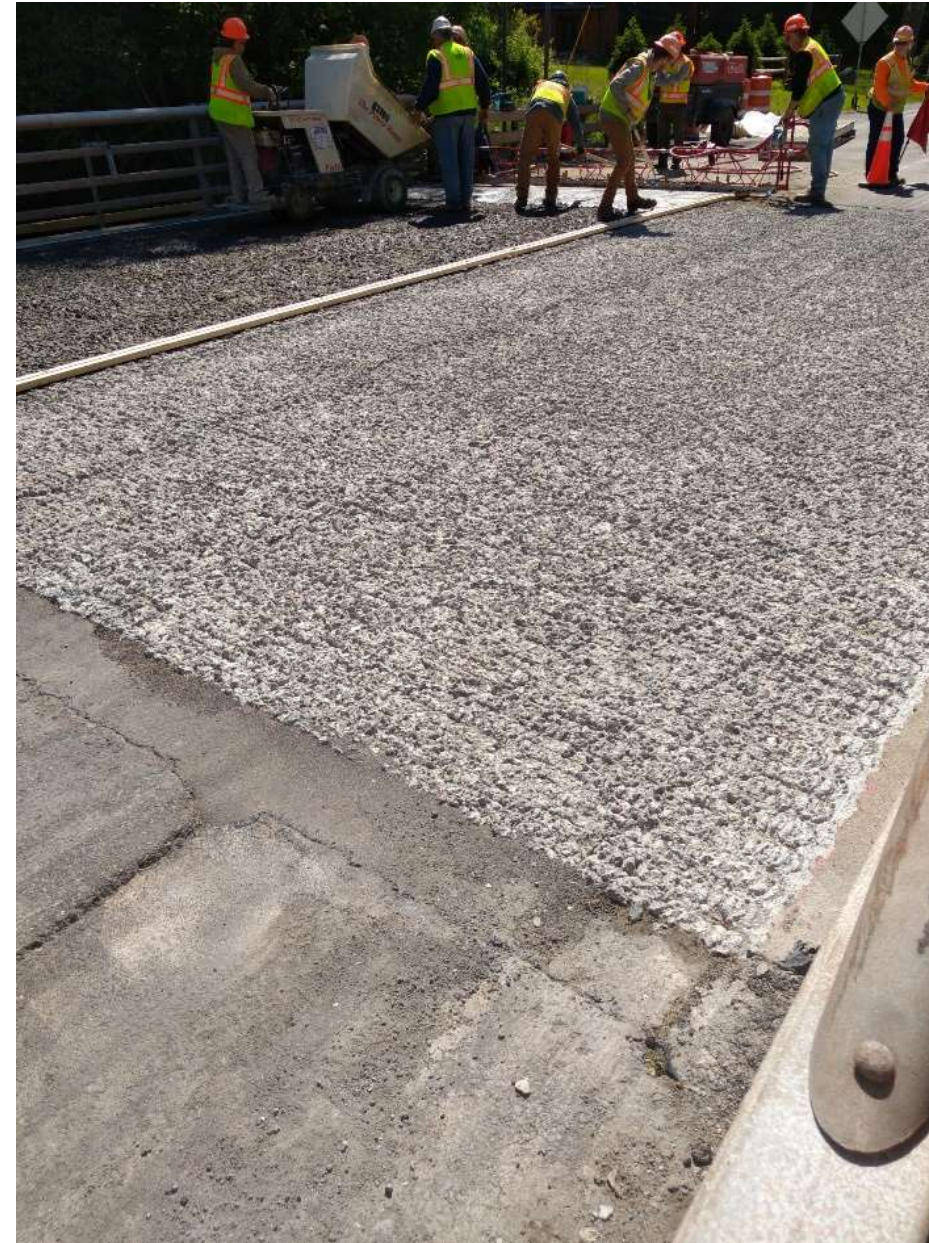
Přímo pojížděné sanační přibetonávky z UHPC v USA

- Rychle se rozmáhající způsob opravy malých i velkých mostů v USA
- Oprava často probíhá **za provozu**
- Vysoce **odolný povrch** proti mechanickému namáhání
- Předpokládaná **vysoká trvanlivost** opravených mostů
- Účel – ochrana a zesílení staré konstrukce



Přímo pojížděné sanační přibetonávky z UHPC v USA

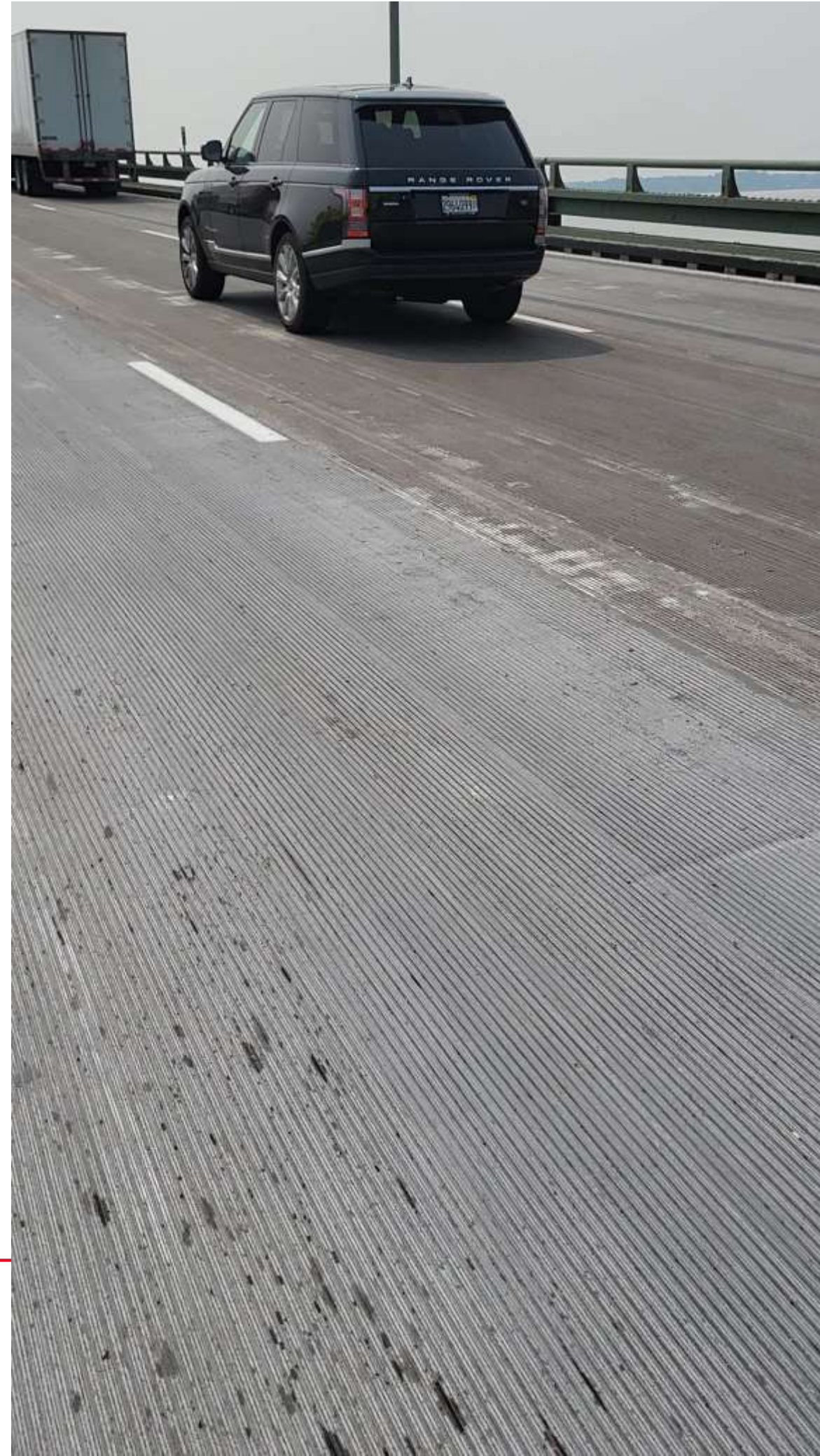
- Otryskání povrchu
- Provedení přibetonávky
- Ošetřování povrchu
- Frézování povrchu
- Kromě frézování povrchu stejný postup jako na Barrandovském mostě



Přímo pojížděné sanační přibetonávky z UHPC v USA



Přímo pojížděné sanační přibetonávky z UHPC v USA



Barrandovský most – komplexní rekonstrukce

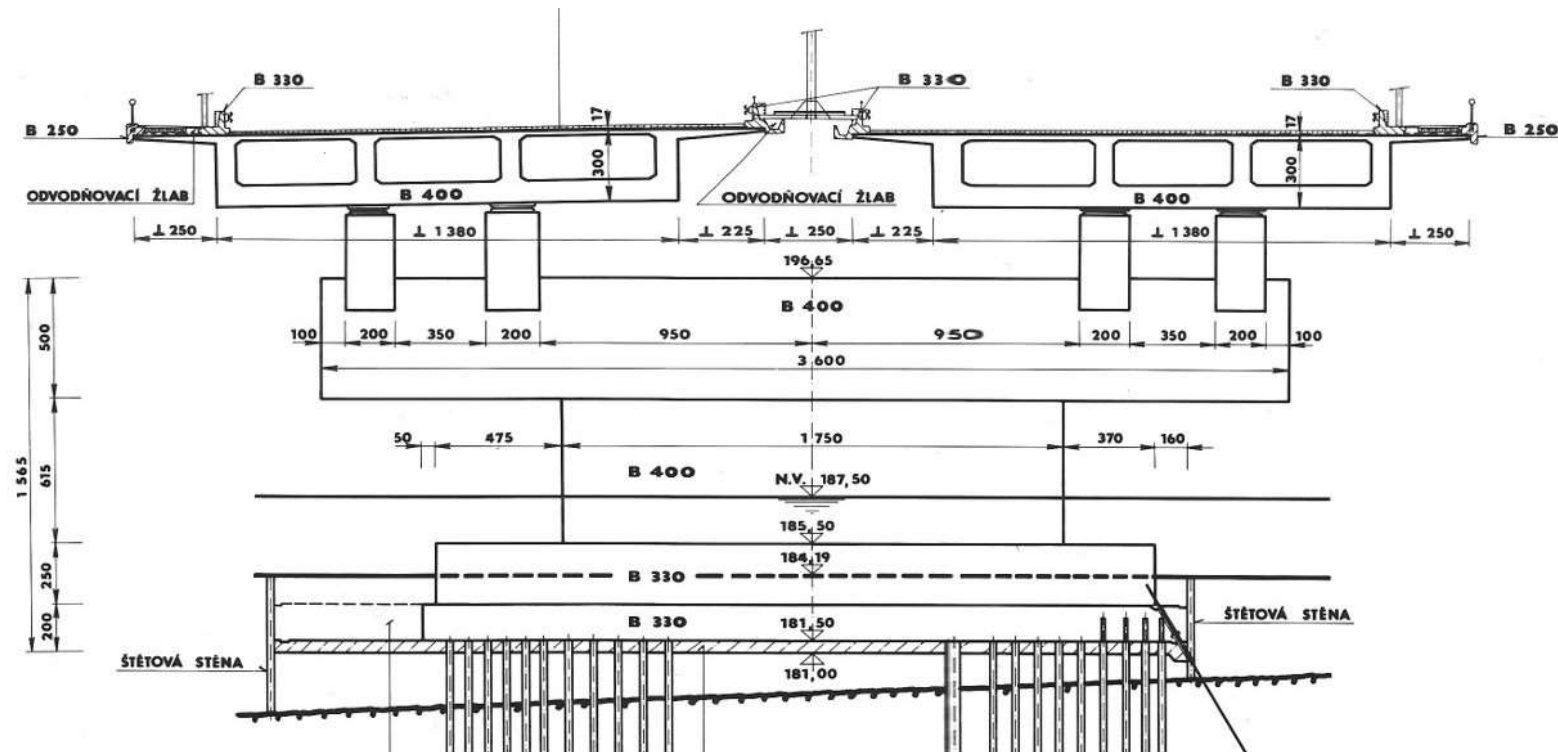
Lukáš Vráblík

Barrandovský most v Praze

Barrandovský most – Velký provoz – více než
140 000 vozidel / den (měřeno 2017)

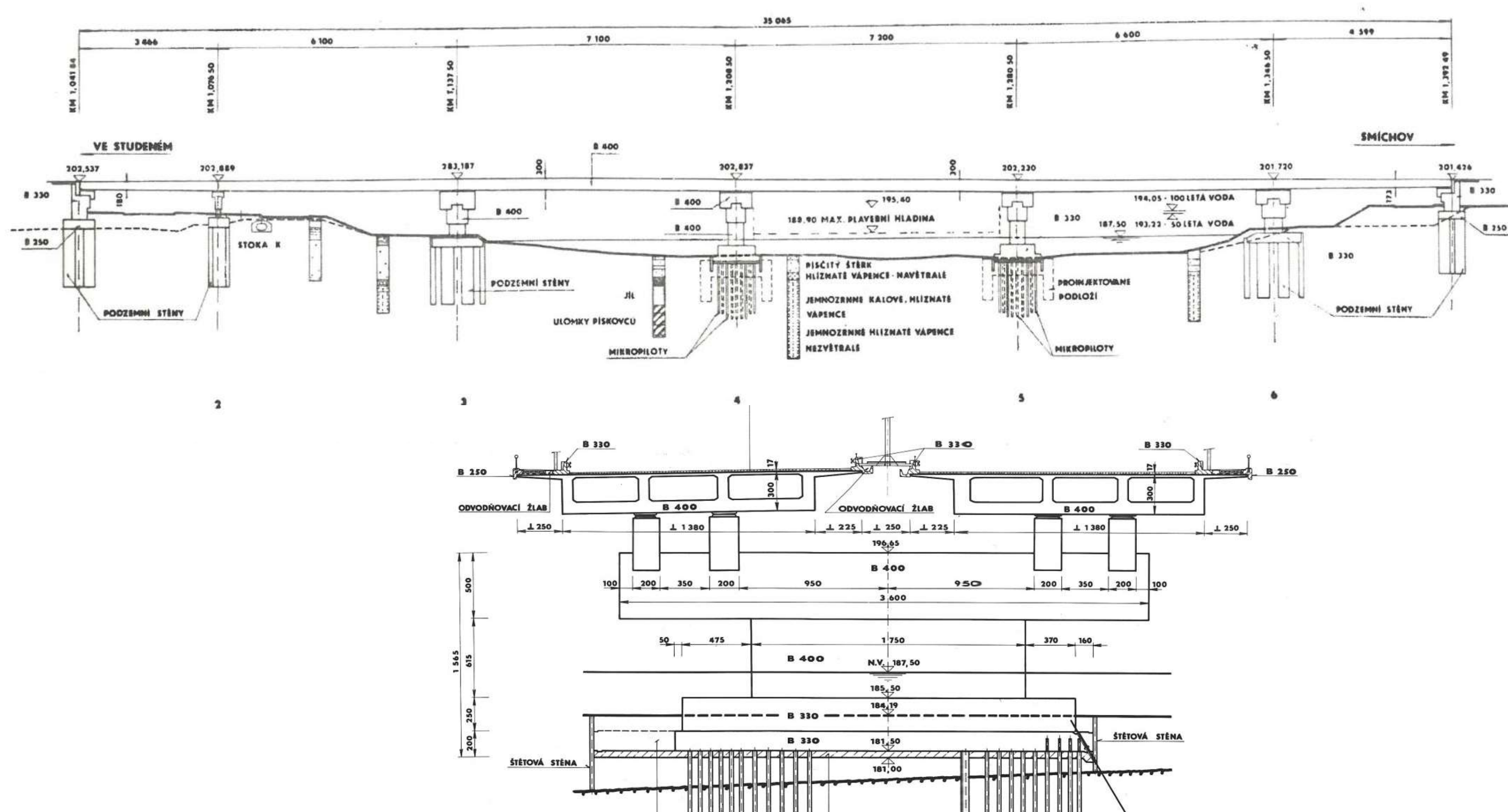
2 nezávislé konstrukce

- Jižní most 1983 (4 jízdní pruhy)
- Severní most 1988 (4 jízdní pruhy)
- Předpjatý beton, 6 polí, max. rozp. 72 m

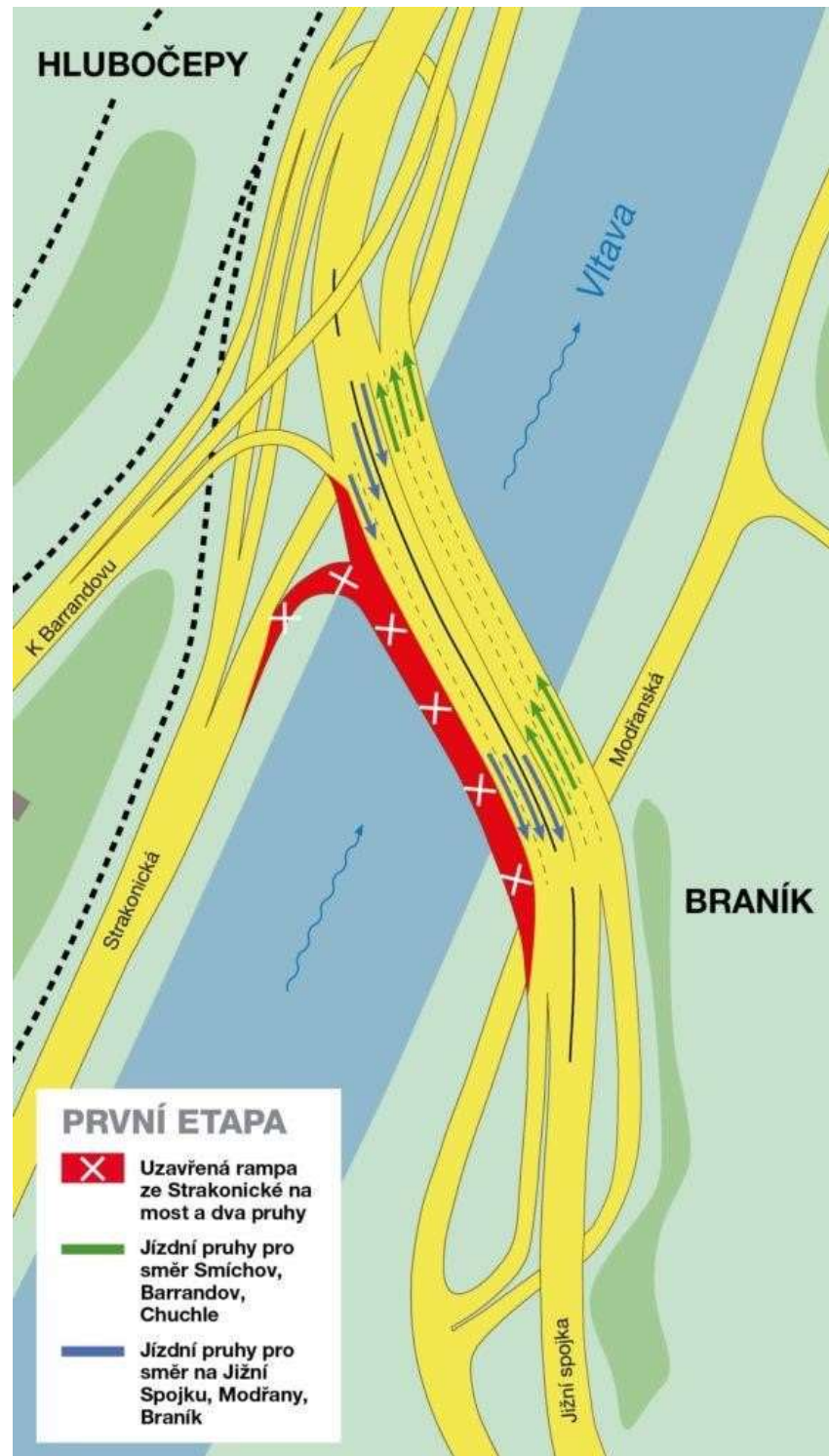


Barrandovský most v Praze

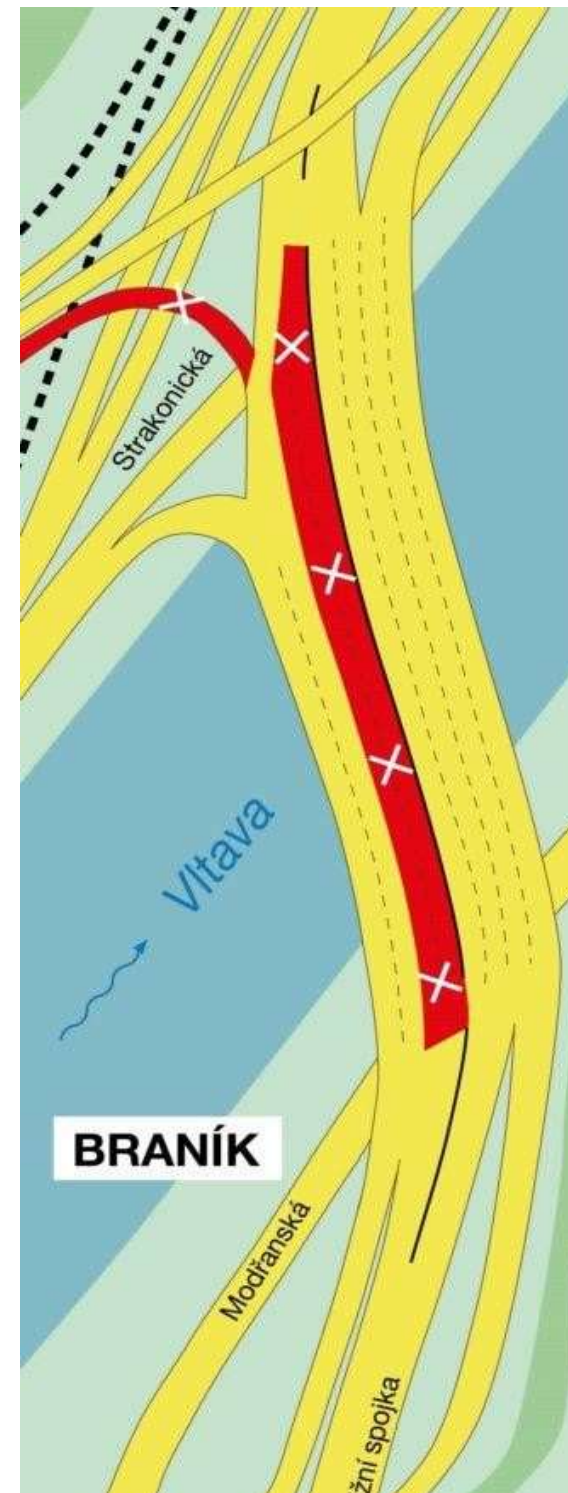




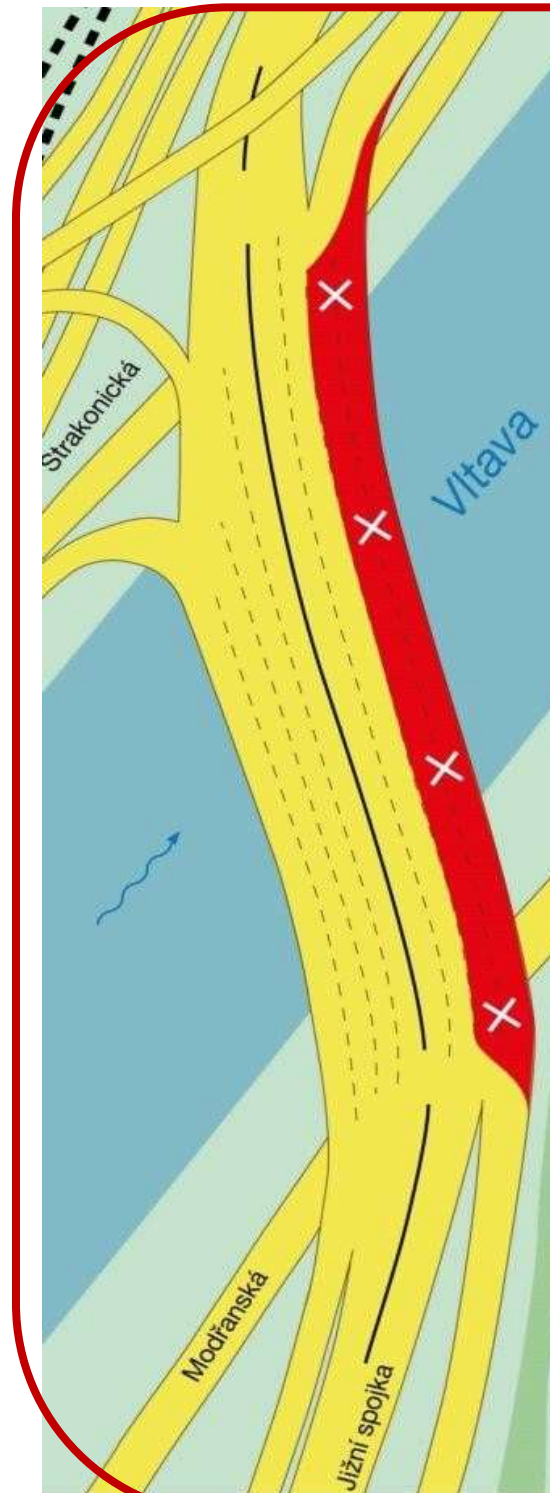
Aktuální stav rekonstrukce – dokončena 3. a 4. etapa



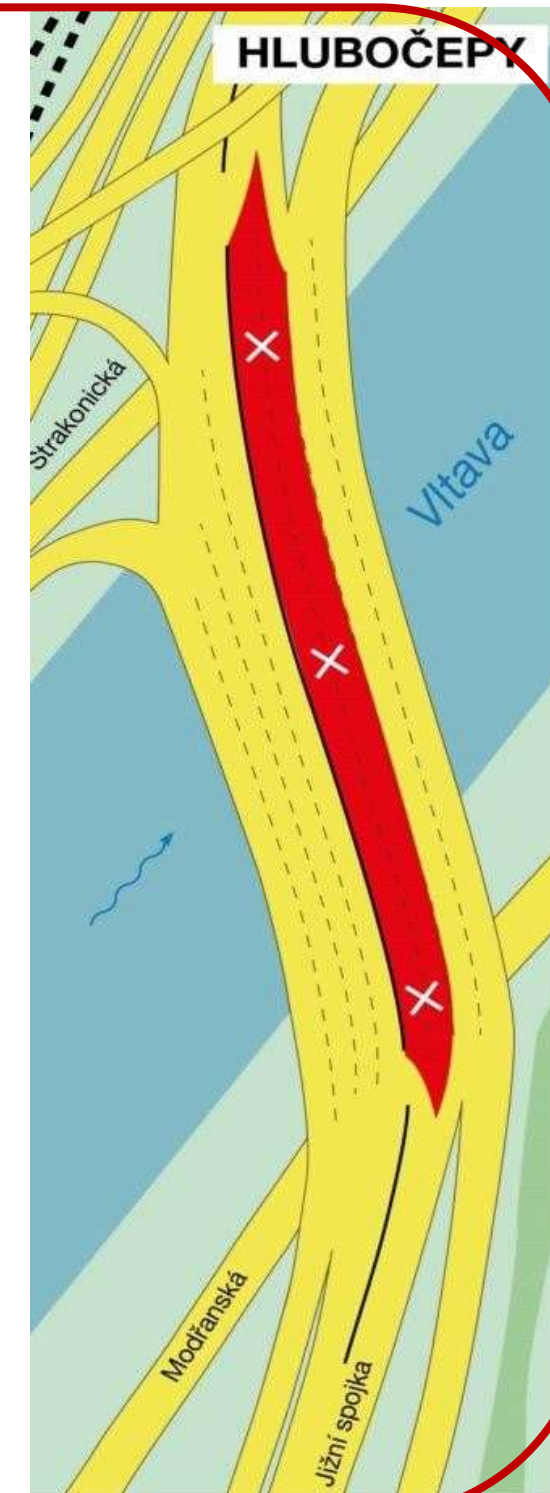
1. Etapa – 2022



2. Etapa 2023



3. Etapa 2024

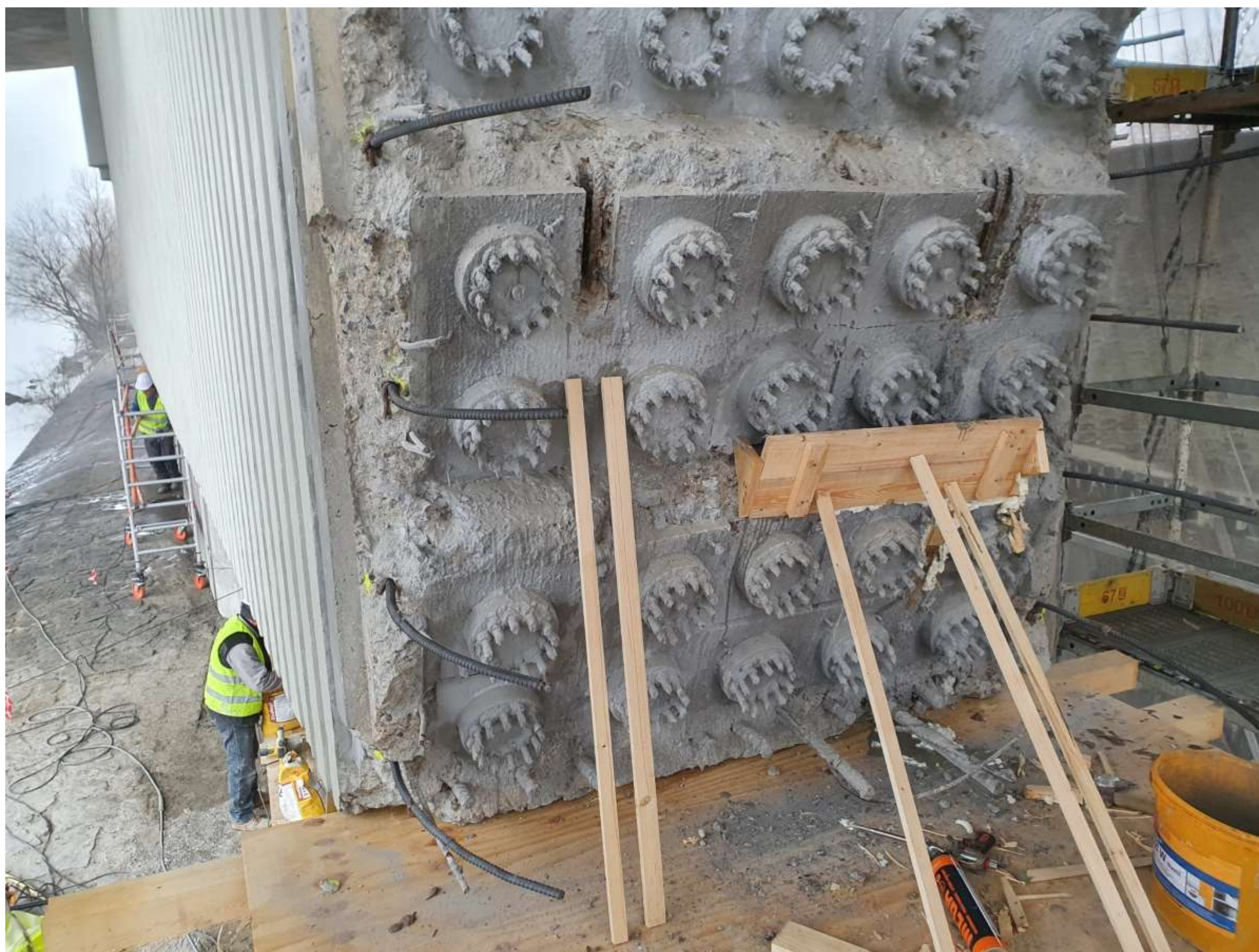


4. Etapa 2024

3. + 4. Etapa - 2024

- Oprava spodní stavby byla rozdělena do dvou etap. Od roku 2020 probíhala oprava dvou pilířů č. 2 a 3 na branické straně a v roce 2021 probíhala oprava návodních pilířů č. 4 a 5 a pobřežních pilířů č. 6 a 9 na smíchovské straně.
- Oprava spodní stavby nevyvolala žádná dopravní opatření, kromě pilíře P2 a malých omezení na cyklostezkách vedoucích pod mostem podél břehů Vltavy.
- U spodní stavby byla předmětem opravy zejména sanace jejích povrchů. Všechny vodorovné plochy na pilířích byly nově upraveny tak, aby srážková voda nestékala po jejich lících, ale odkapávala z okapních nosů vyspádované přebetonávky. U sdružených pilířů byla obnažena čela příčných stativ a kontrolován stav kotev předpínacích kabelů. Kromě ojedinělých případů, kdy bylo třeba doinjektovat podkotevní oblasti předpínacích kabelů a ošetřit povrch roznášecích a kotevních desek, nebyly na spodní stavbě objeveny závady většího rozsahu.

Sanace spodní stavby



Výměna ložisek



Nová rampa do Strakonické ulice



- Cíl rekonstrukce nosné konstrukce mostu - odstranění zjištěných závad, prodloužení jeho životnosti spolu s vyšší zatížitelností.
- Výměna mostního svršku a vybavení mostu; zesílení nosných konstrukcí pomocí instalace přídatného volného podélného předpětí.
- Římsy na mostě byly celkově přepracovány; výška zábradlí byla zvýšena ze současných 1,1 m na 1,3 m s ohledem na vedení cyklostezek na chodnících.
- Stávající systém odvodňovacích žlabů byl změněn na systém s obručníkovými odvodňovači;
- Diagnostický průzkum mostu prokázal na některých místech korozní oslabení podélných předpínacích kabelů uložených ve stěnách komorového průřezu mostu. Proto byla celá nosná konstrukce obou mostů zesílena přídatnými volnými podélnými kabely vedenými vnitřním prostorem nosné konstrukce podél stěn na celou délku mostu v jejích krajních komorách. Kolem každé stěny bylo navrženo **6 kabelů složených ze 7 mi lan Ø15,5 mm**.
- Kabely procházejí všemi podporovými příčnicími mostu a jsou zakotveny v koncových příčnicích nad opěrami a nad příčnicí pilíře 4 ve středu mostu. Veškeré přídatné předpínací kabely a jejich kotvení bylo dodáno v elektroizolační úpravě.
- S ohledem na životnost byla provedena výměna všech ložisek (nově kalotová).
- Vzhledem k opotřebení stávajících mostních závěrů byly všechny vyměněny za nové

Inspekce a monitoring původních předpínacích kabelů



Koroze a poškození stávajících soudržných kabelů



Magneto-elastické senzory pro měření napětí v předpínacích kabelech

Vrtání příčníků



Nové deviátory vnějšího předpětí



Nové deviátory vnějšího předpětí

Monitoring předpětí



Statická zatěžovací zkouška



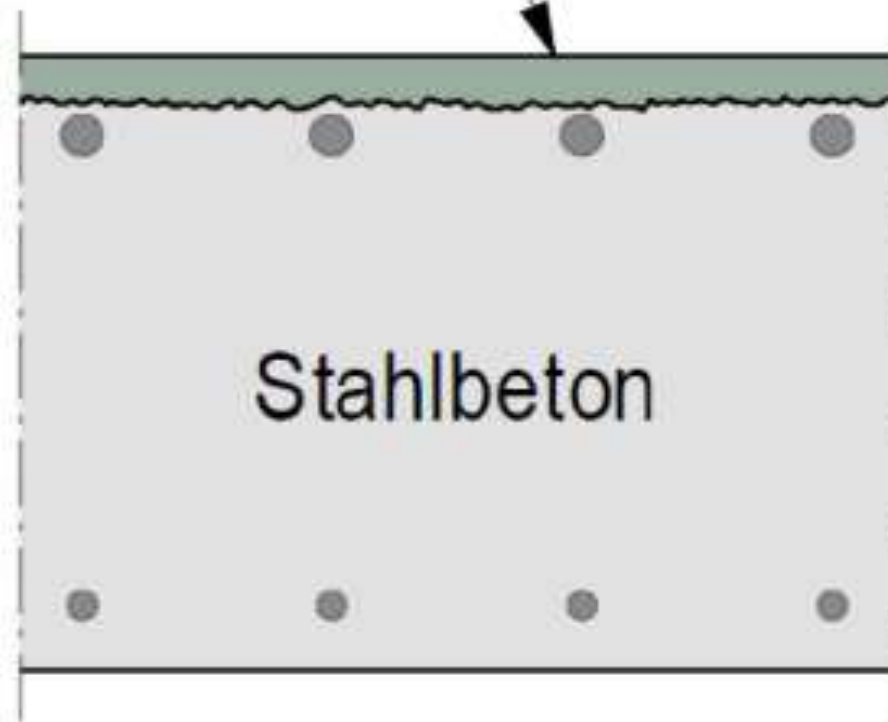
Barrandovský most – aplikace UHPC

Jan L. Vítek

Princip zesílení mostní desky (zdroj CH)

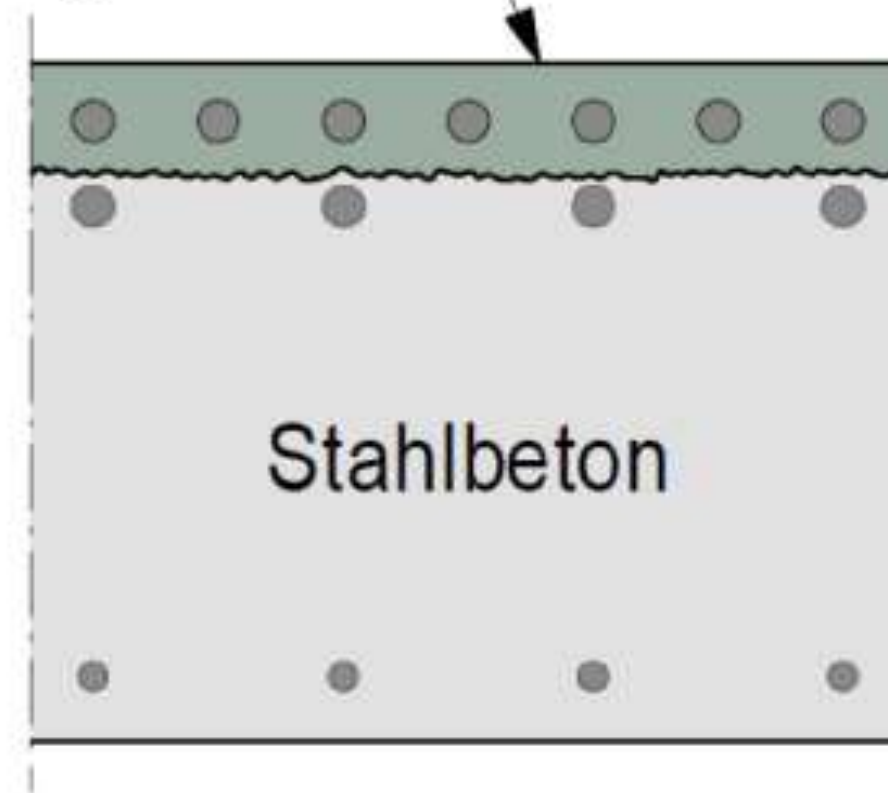
a)

UHFB
 $h_U \geq 25 \text{ mm}$



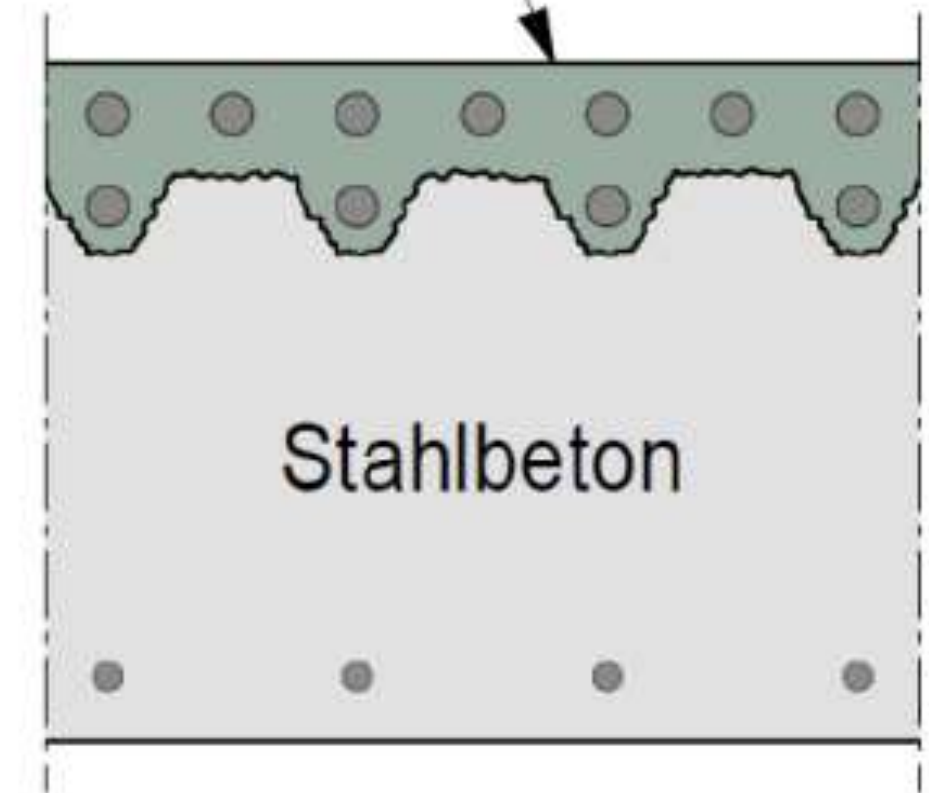
b)

Stahl-UHFB
 $h_U \geq 40 \text{ mm}$

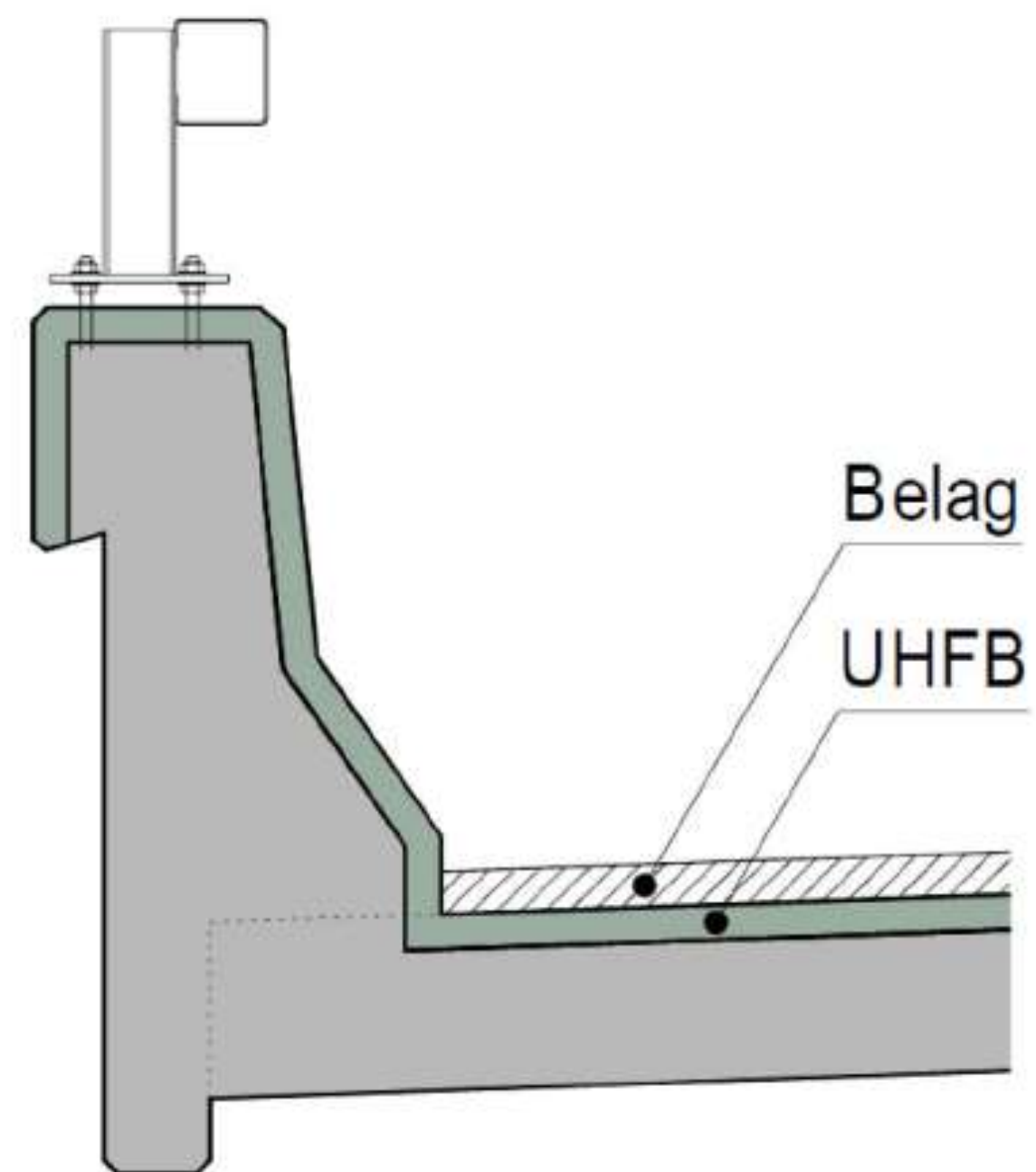
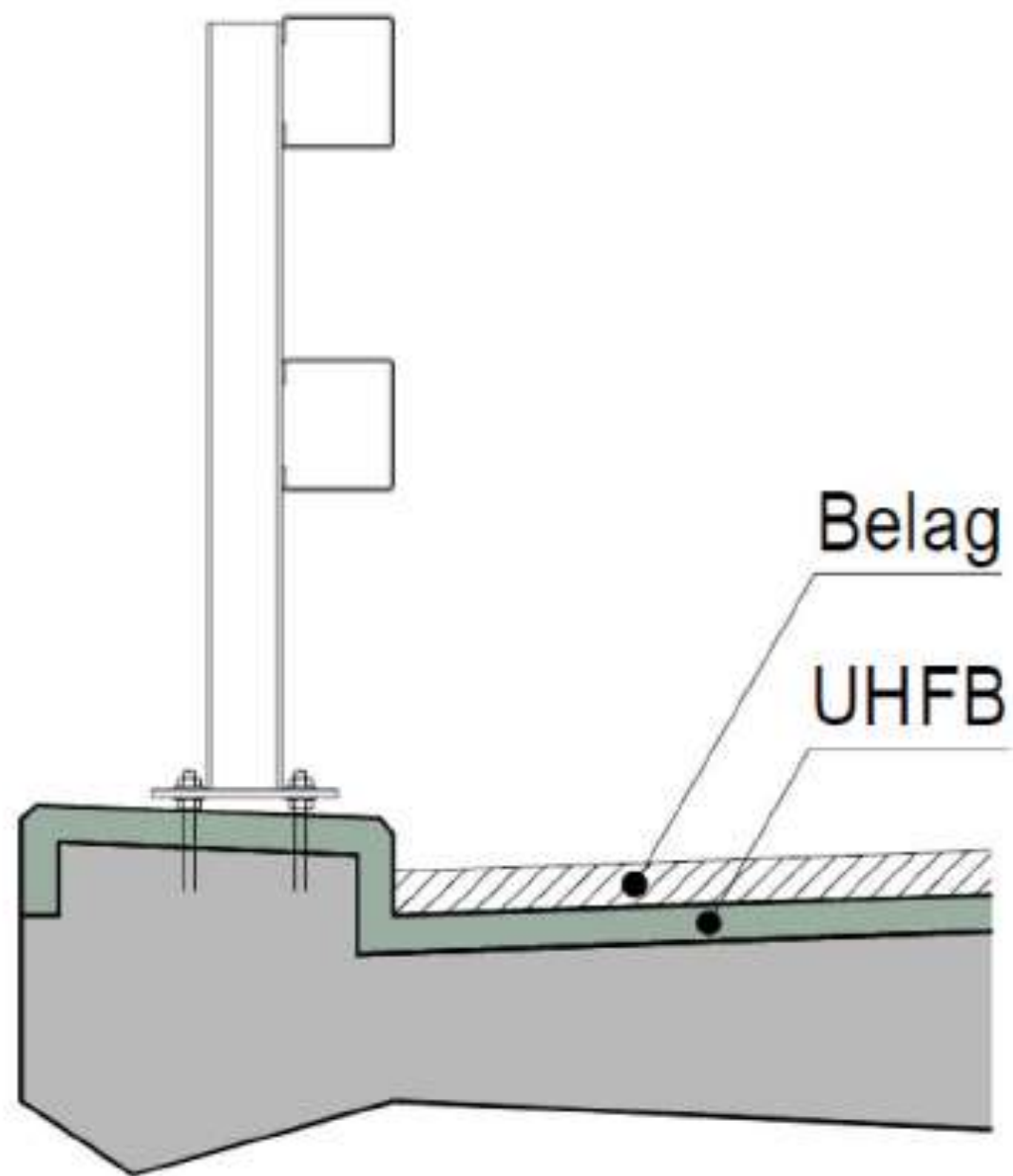


c)

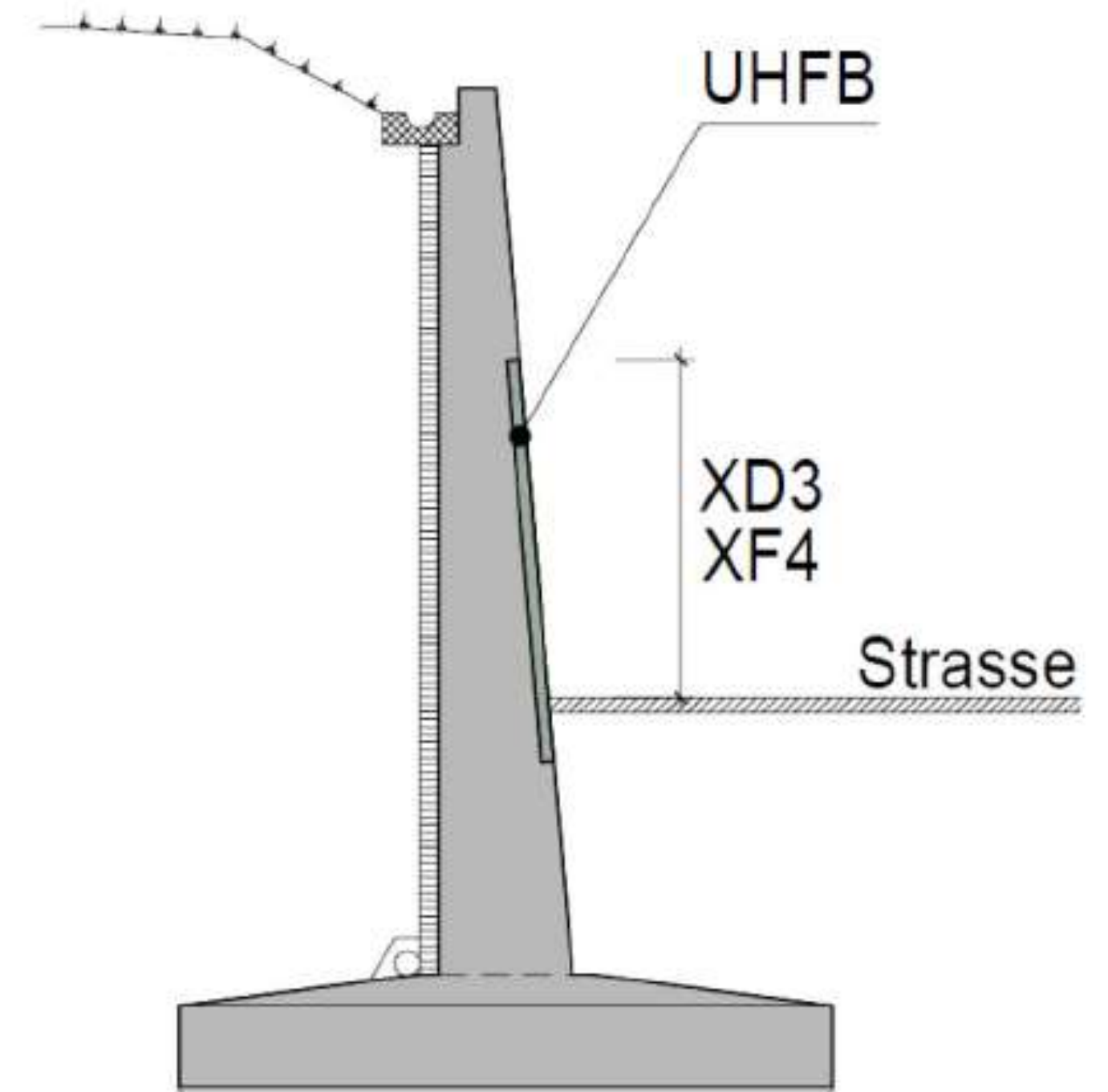
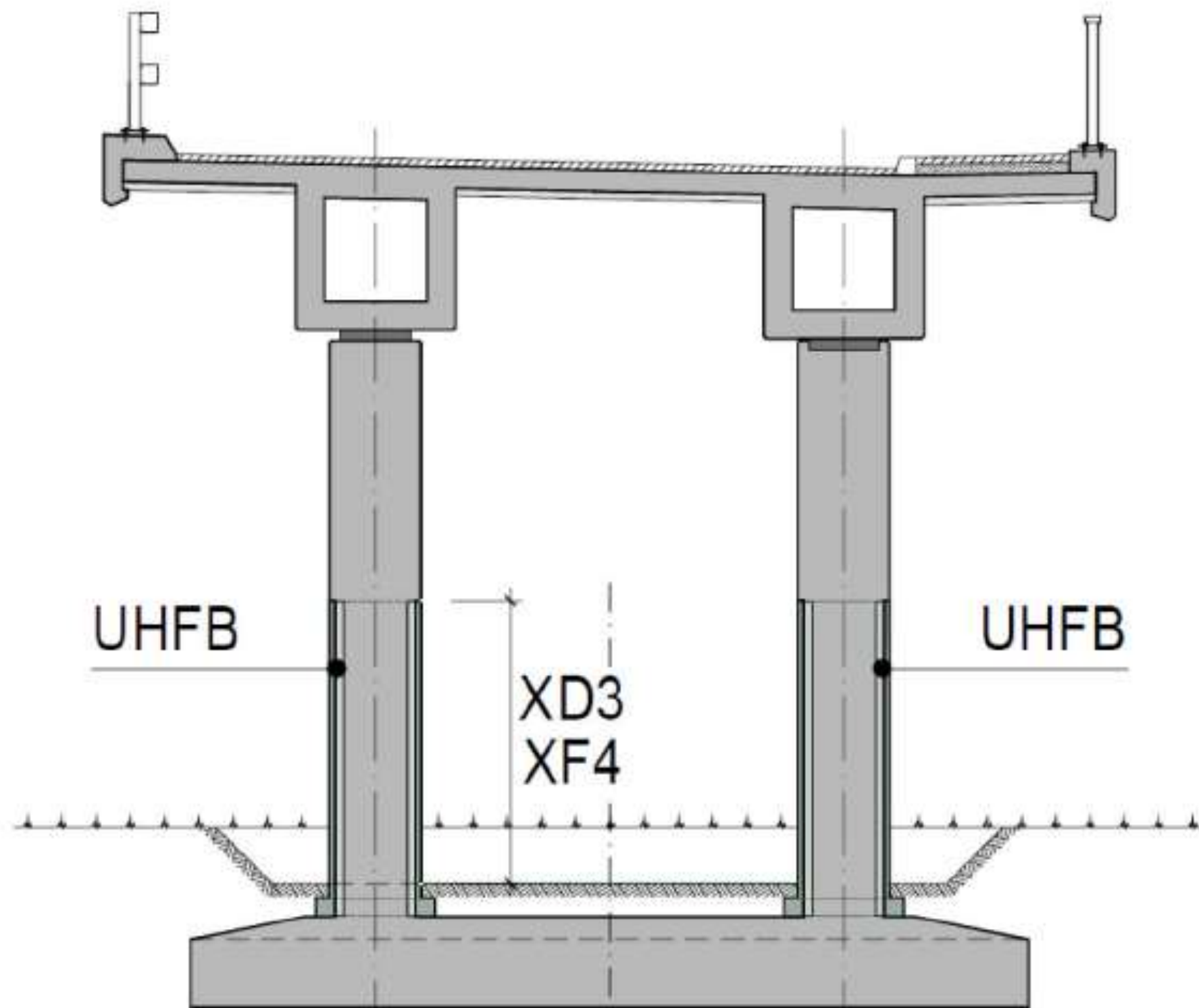
Stahl-UHFB



Princip zesílení konzol a říms (zdroj CH)



Princip zesílení a ochrany svislých prvků (zdroj CH)



UHPC pro zesilování mostů

UHPC:

- **Nosná funkce** – zesílení zejména desky mostu
- **Vyrovnávací funkce** – vyrovnání povrchu nosné konstrukce, zajištění odvodnění povrchu, rovnoměrná tloušťka vozovky
- **Hydroizolační funkce** – UHPC tvoří těsnou vrstvu – **nebyla využita v etapě 1 a 2**

Zvláštní požadavky na UHPC

- Možnost **ukládání do spádu** – zde cca 6% - tixotropní vlastnosti
- Vysoká **pevnost v tahu** – omezení trhlin → vysoký obsah vláken – zde cca 3% (obj.)

Požadavky na konstrukci mostu

- Dostatečná kvalita betonu (pokud je, nejsou třeba spřahovací prvky)
- Kvalitní příprava povrchu

Zesílení mostovky 1. etapa (2022) – jižní most

Příprava povrchu – Tryskání vodním paprskem 2 500 bar

Prům. tahová pevnost (odtrhy) +1.7 MPa

Ve střední části – po frézování

Na konzole



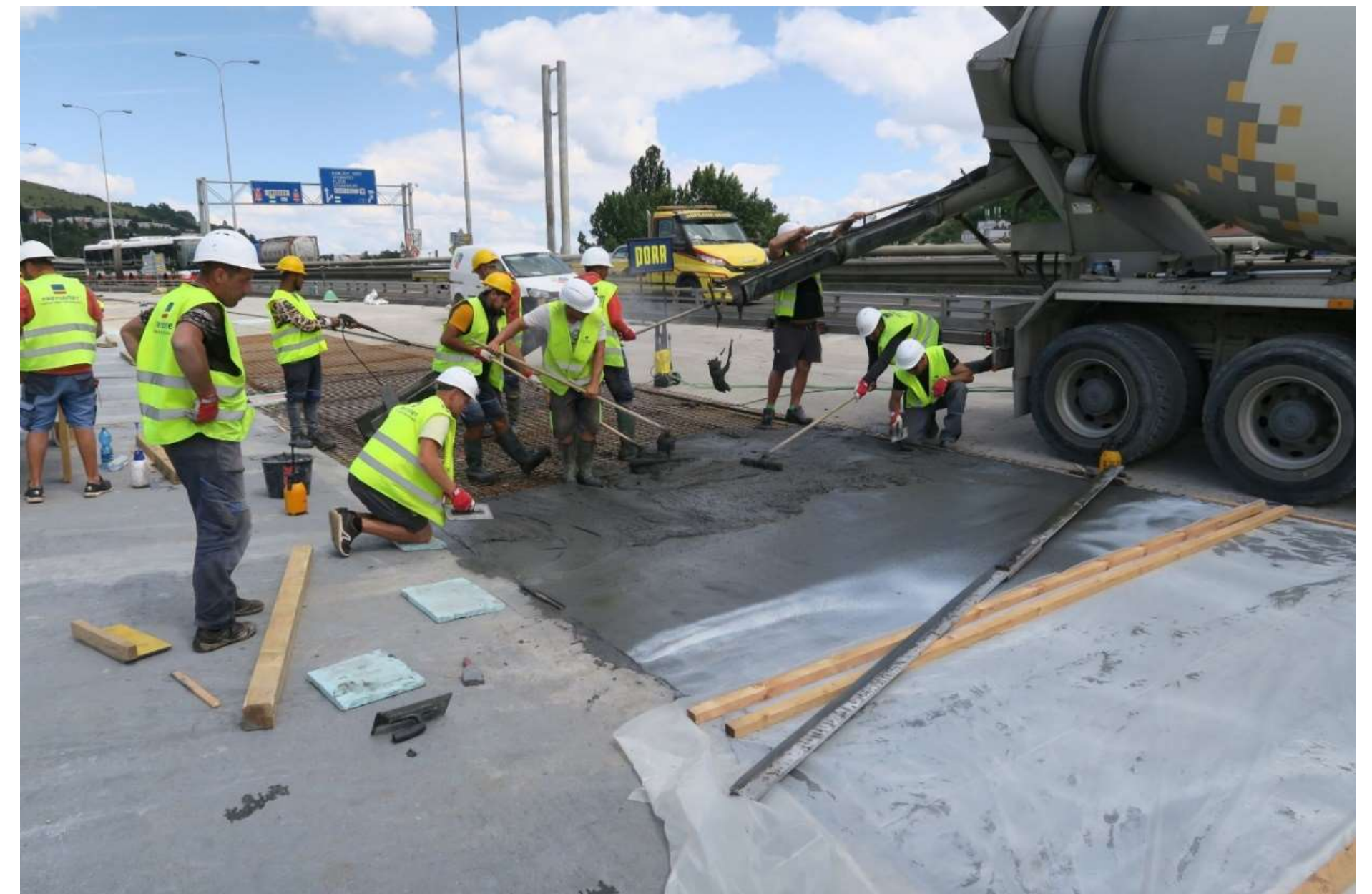
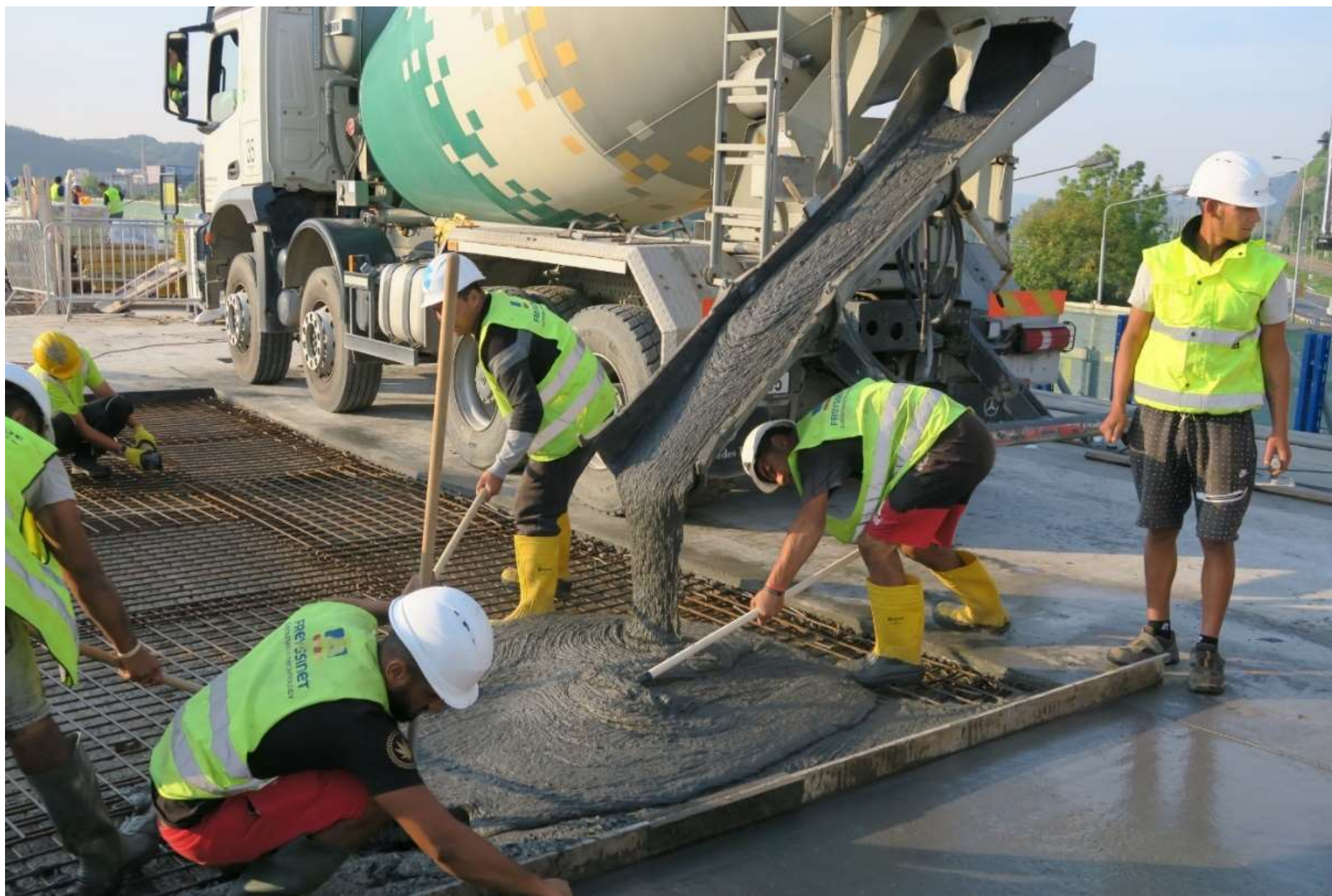
Ukládka UHPC 1. etapa (2022) – jižní most

Tloušťka UHPC 25 – 40 mm – jen vlákna

Tloušťka UHPC > 40 mm – výztužná síť a vlákna

Bez spřahovacích trnů

Obsah vláken	3% (obj.)
Válc. pevnost v tlaku. 28 d.	127 MPa
Pev. v tahu za ohybu 28 d.	$f_{R1} = 22 \text{ MPa}$
Modul pružnosti	44 GPa

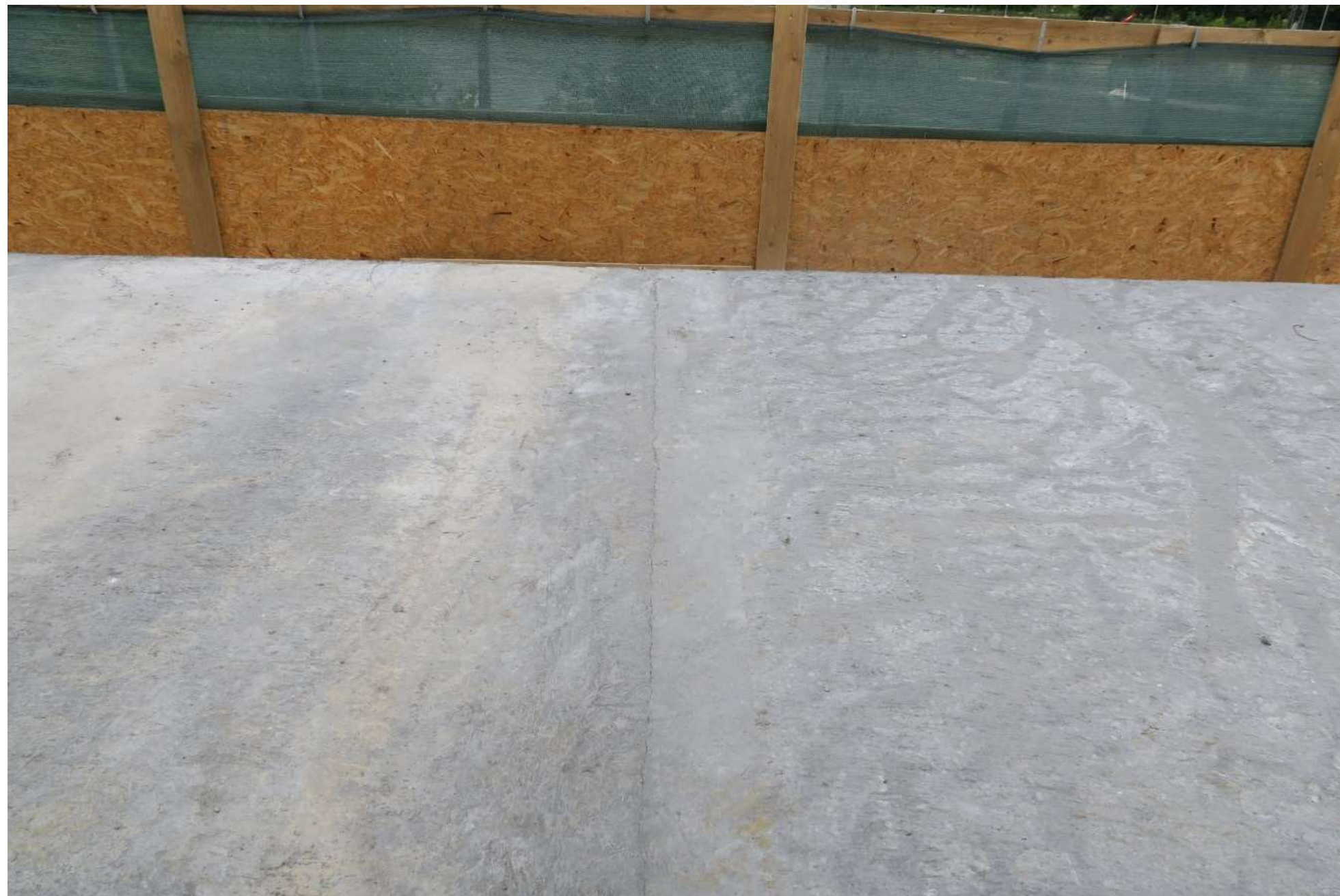


Ukládka UHPC 1. etapa (2022) – jižní most



Ukládka UHPC 1. etapa (2022) – Defekty

Trhliny – pouze v pracovních spárách
cca 0.4 mm



Delaminace – v blízkosti spár
Selhání většinou v původním materiálu



Zesílení mostovky 1. etapa (2022) – Doporučení

1. Doplnění kotvení podél okrajů betonážních úseků
2. Výztuž v horní části vrstvy
3. Zajistit dokonalé podbetonování výztuže
4. Zlepšená kvalita úpravy původního povrchu



Zesílení mostovky 1. etapa (2022) – Doporučení

Injektáž spáry pod UHPC



Doplnění kotvení podél okrajů bet. úseků



Zesílení mostovky 1. etapa (2022)

Dokončený chodník s
odvodněním
Bude následovat položení
vozovky

Položeno
4000 m²
(450 m³ UHPC)



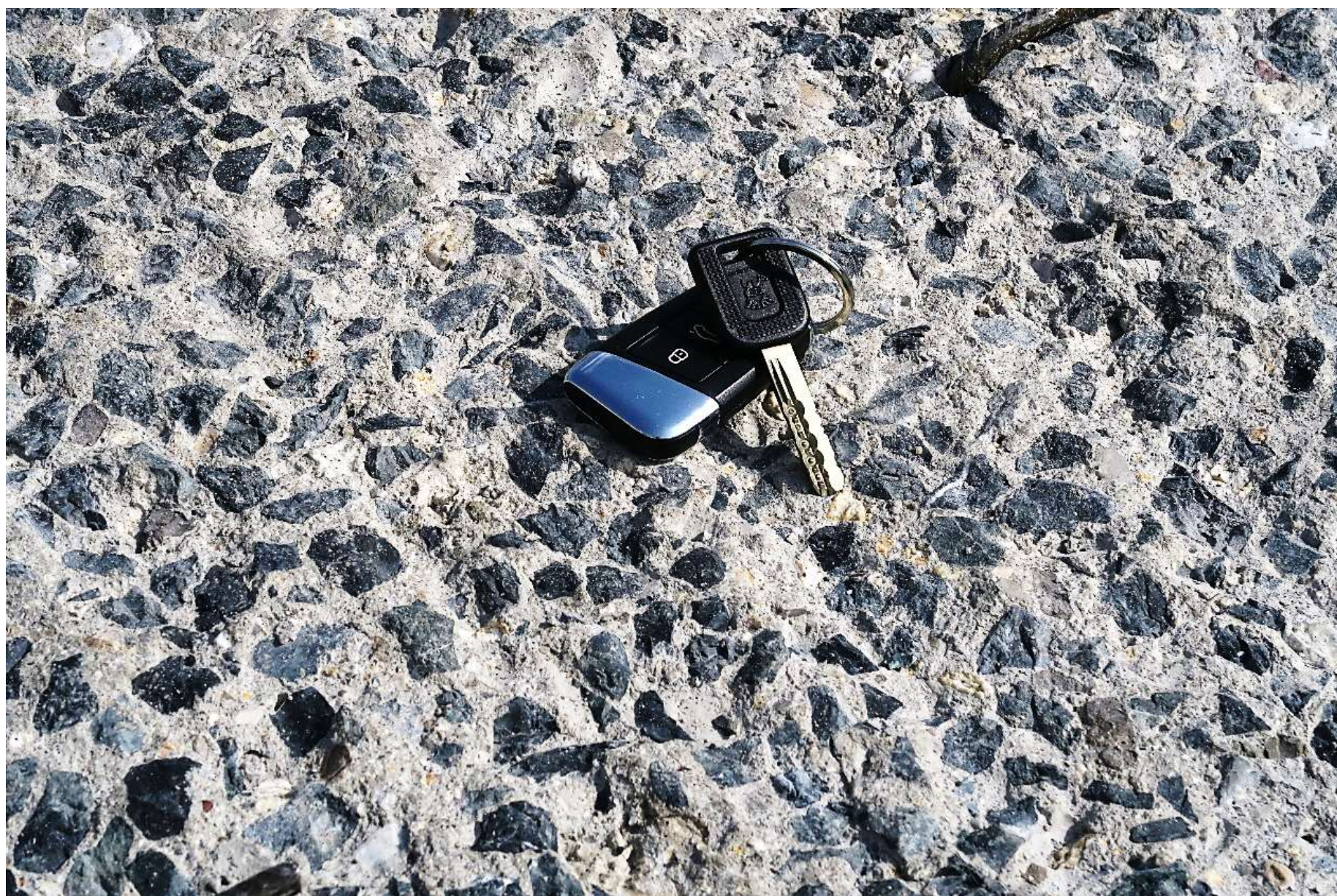
Zesílení mostovky 2. etapa (2023)

Tloušťka UHPC > 40 mm vyztužená sítí

Zlepšená úprava povrchu (frézování a tryskání vodním paprskem)

Kotvy podél okrajů betonovaných dílů

Hutnění malými vibrátory



Zesílení mostovky 2. etapa (2023)

Žádné defekty nebyly zjištěny
Zrychlení realizace
Uloženo cca 220 m³ UHPC



Zesílení mostovky 3. a 4. etapa (2024)

Konec 2023 – rozhodnutí:

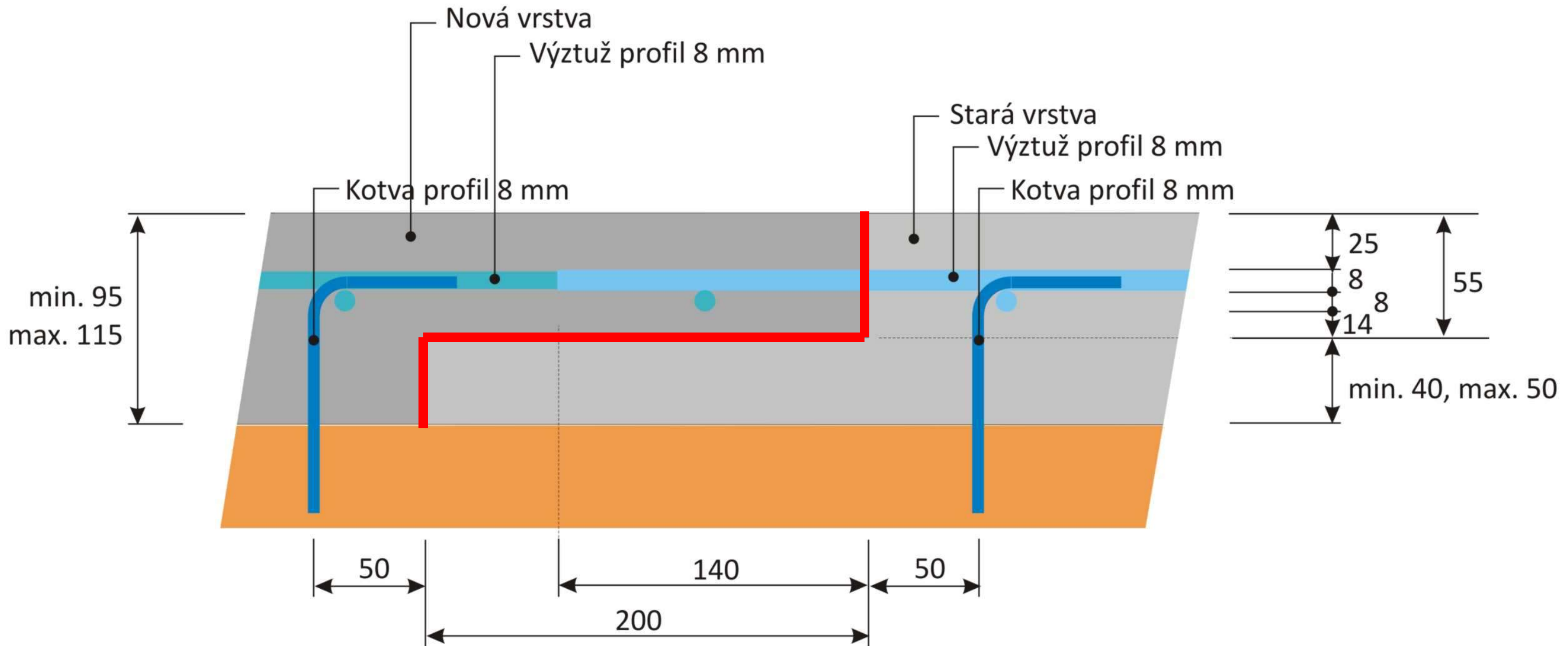
2. Etapa bez závad a proto možnosti:

- a) Vrstva UHPC též jako vodonepropustná → vývoj detailů spár a průchodů
- b) Sloučení etapy 3. a 4. do jednoho roku → začátek prací už v březnu 2024

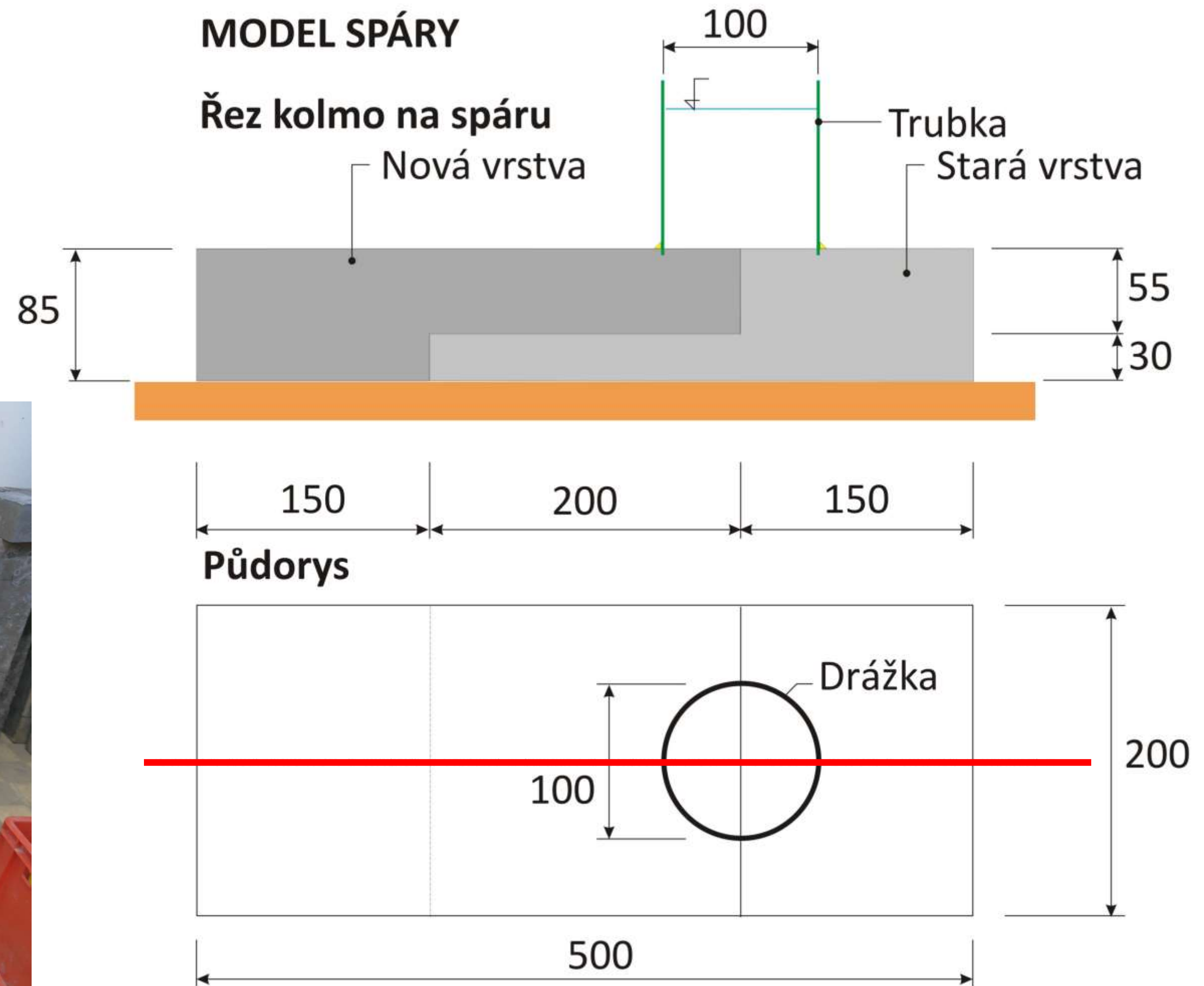
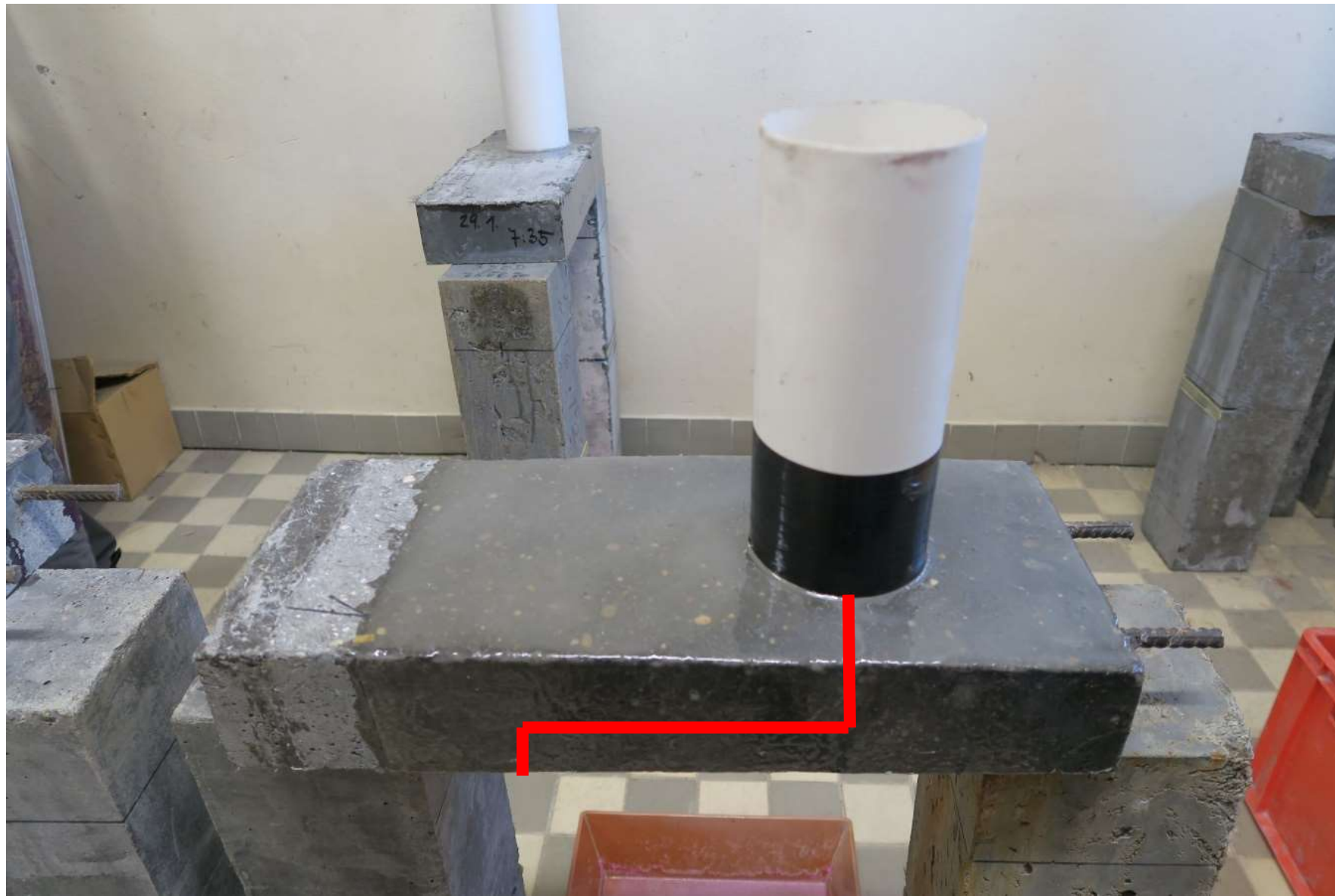
Detail pracovní spáry předpokládaný pro aplikaci

Řez kolmo na pracovní spáru

Nutnost experimentálního ověření !



Model pro ověření funkce spáry



Model pro ověření funkce spáry

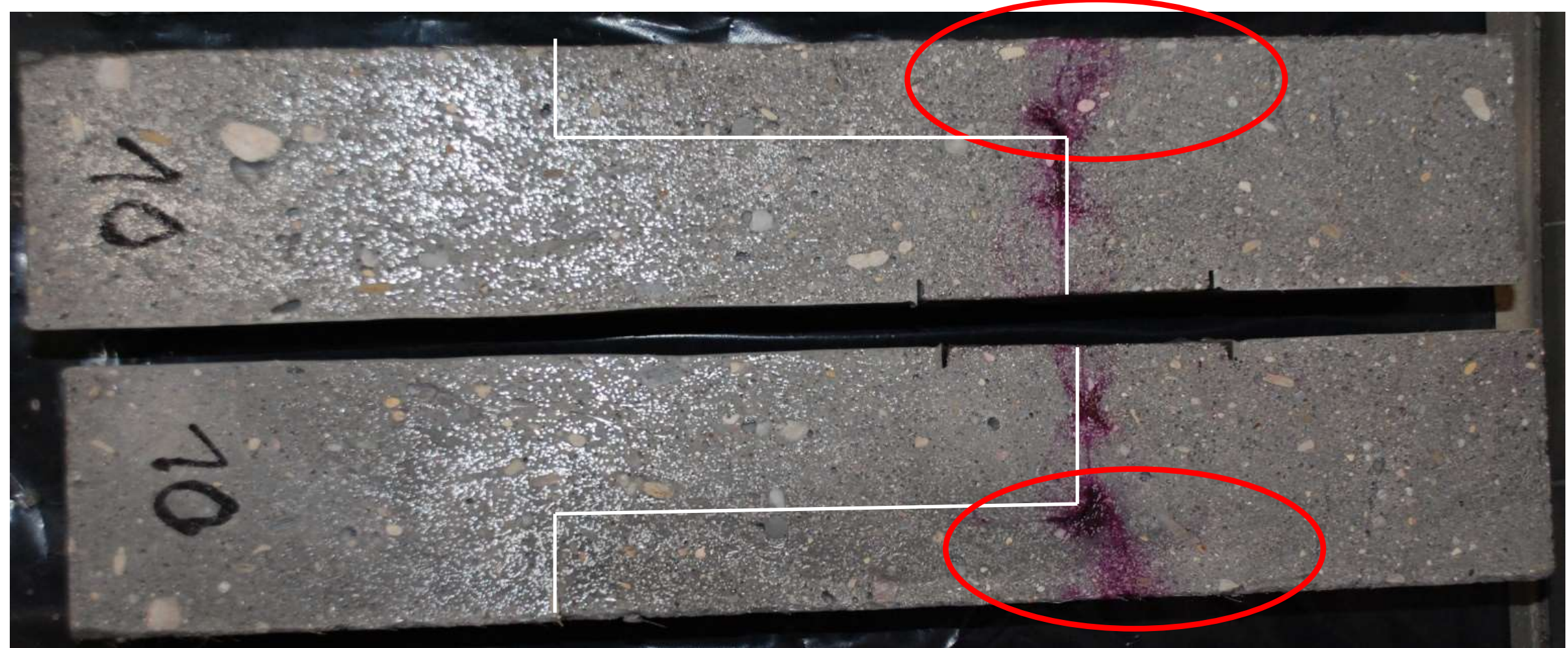
Model pracovní spáry - dobré výsledky



Model pro ověření funkce spáry

Průnik vody betonem

Podél. řez



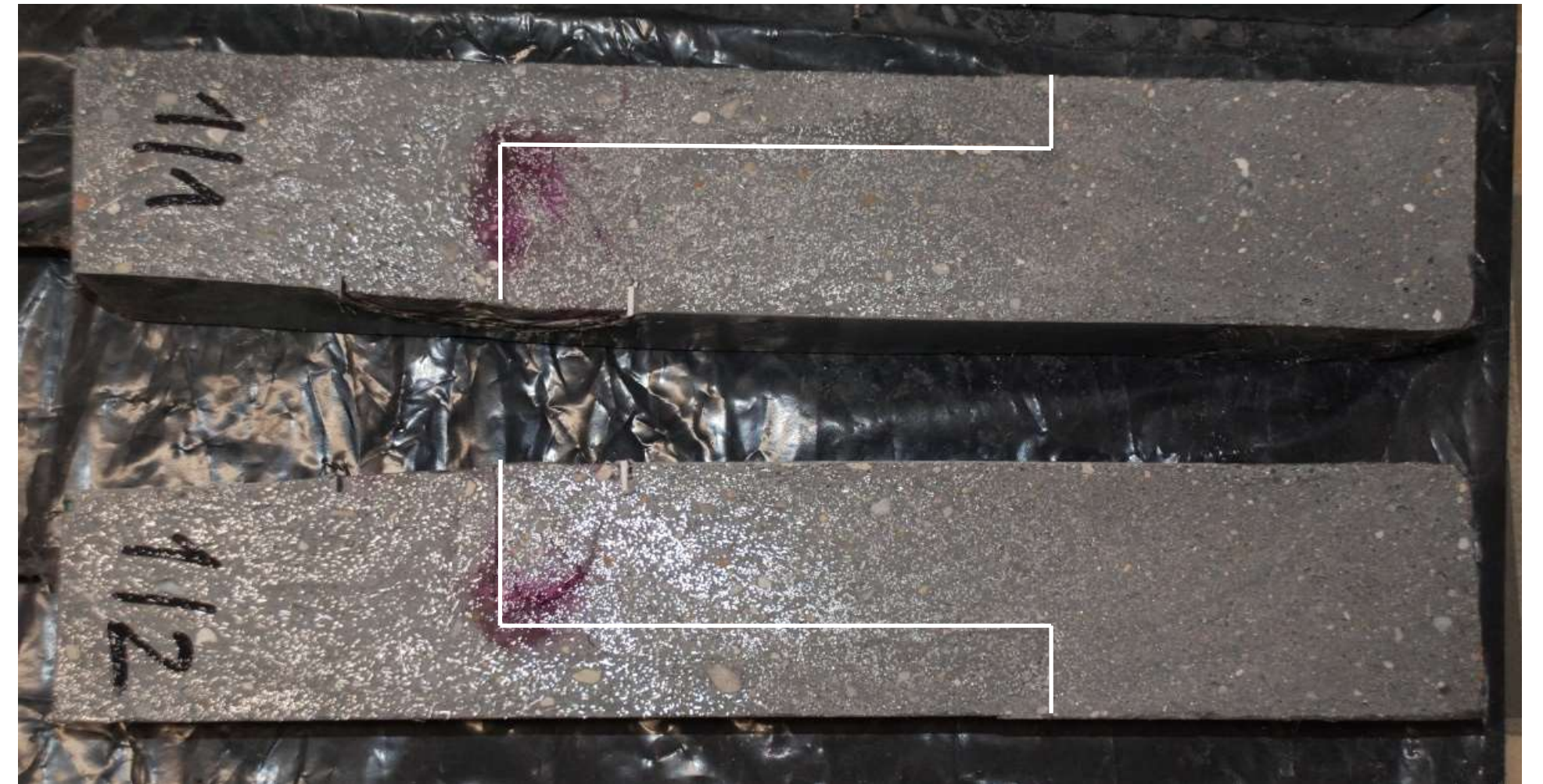
Spodní povrch



Model pro ověření funkce spáry

Průnik vody
mikrotrhlinou

Podél. řez



Spodní povrch



Místo spáry
na spodním
povrchu

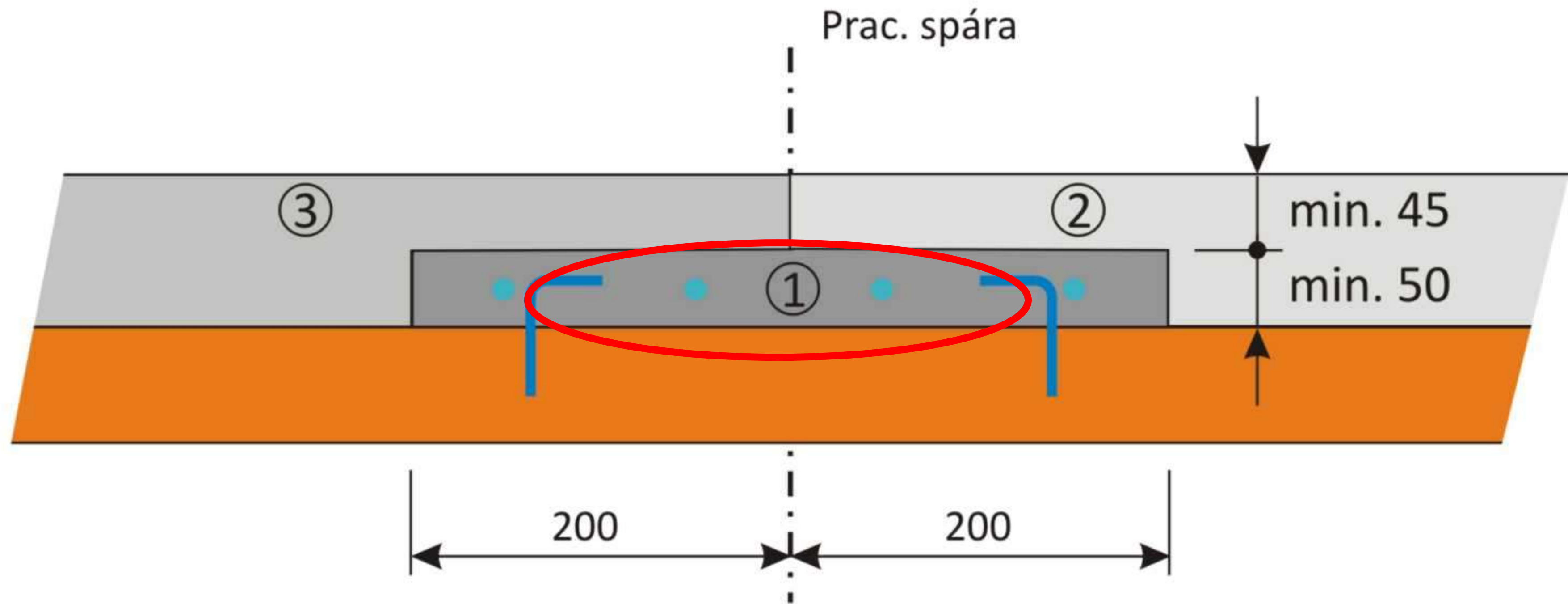
Model pro ověření úpravy povrchu v úžlabí



Model 5 x 5 m
povrch
ve sklonu 6%

Modifikované uspořádání pracovní spáry

Zlepšení přístupu k betonáži kritické oblasti a zlepšení kvality zhutnění



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Vodonepropustná pracovní spára



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Vodonepropustná pracovní spára



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

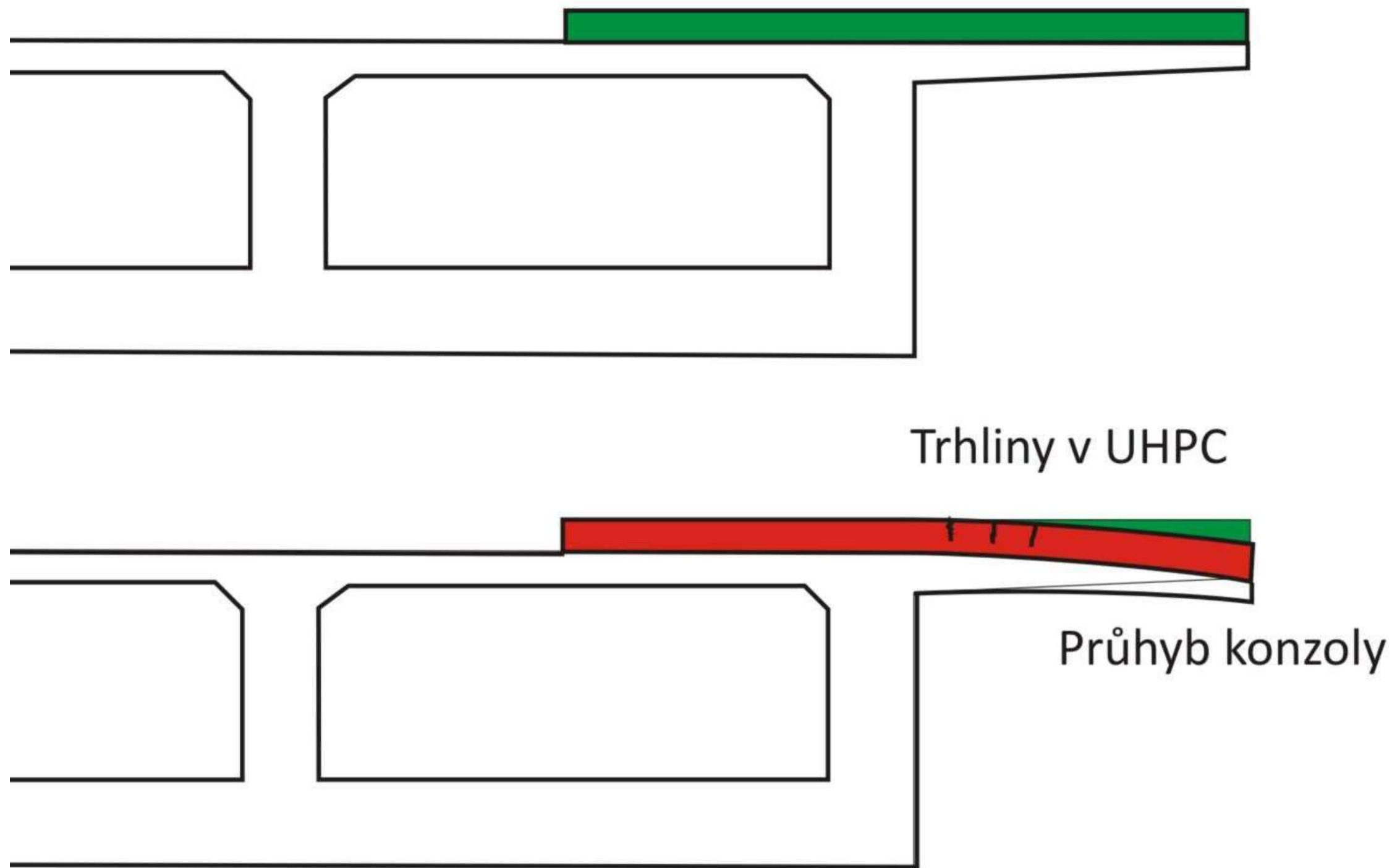


Odvodnění –
průchodky,
kotvení říms



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

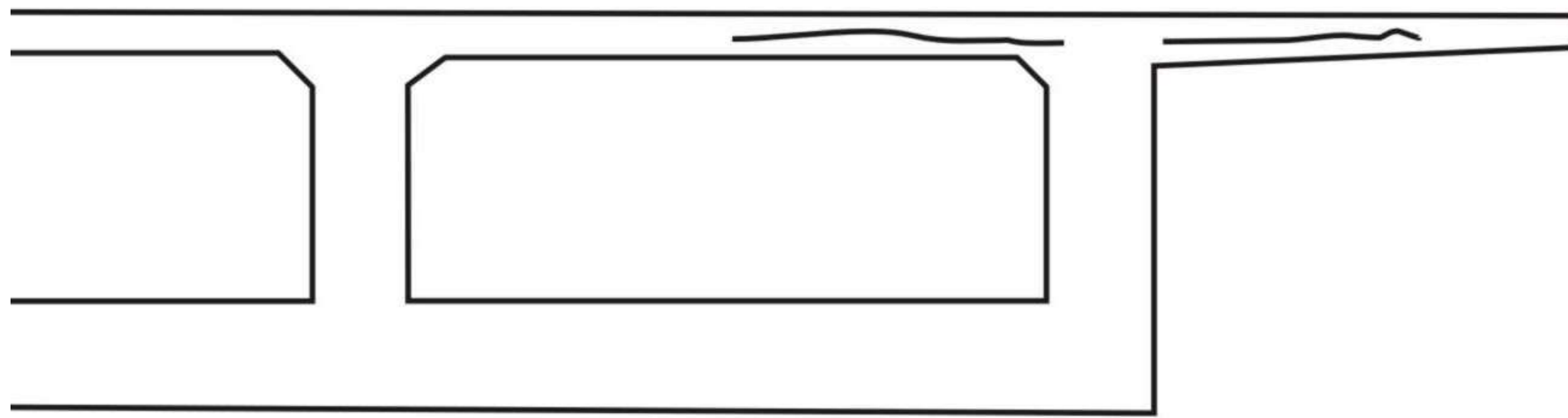
Dodatečně zjištěné poruchy původní konstrukce



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Dodatečně zjištěné poruchy původní konstrukce

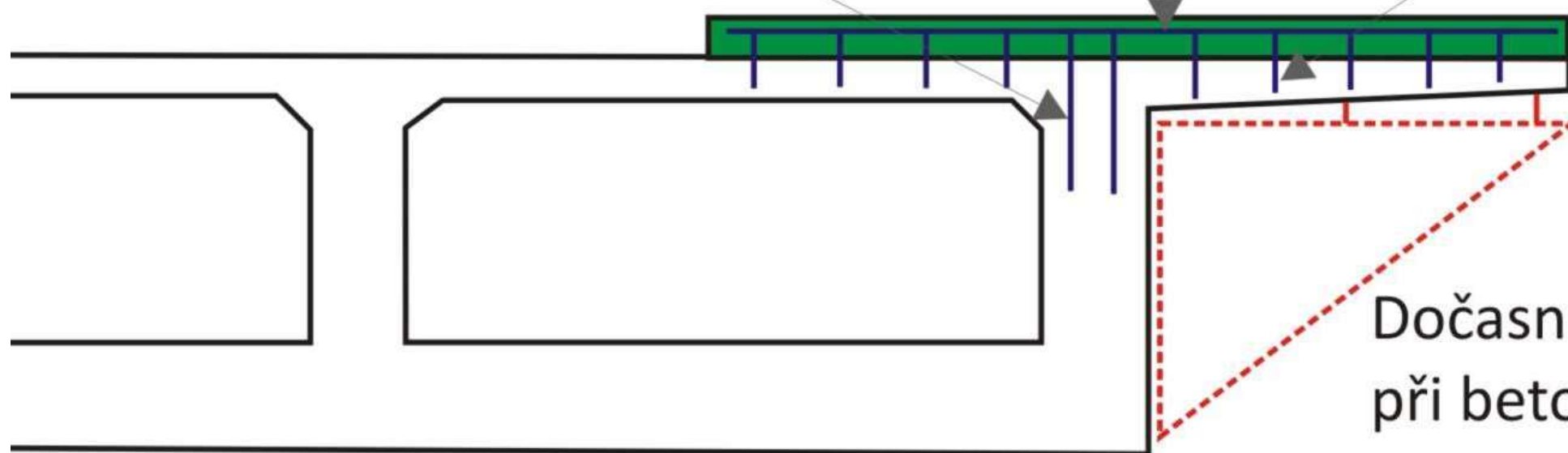
Vnitřní trhliny v konzole
a horní desce



Vyztužení konzoly/desky
na ohyb

Přikotvení vrstvy UHPC
k trámu

Přikotvení vrstvy UHPC
ke konzole/desce



Dočasné podepření
při betonáži



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Zesílená výztuž a kotvení

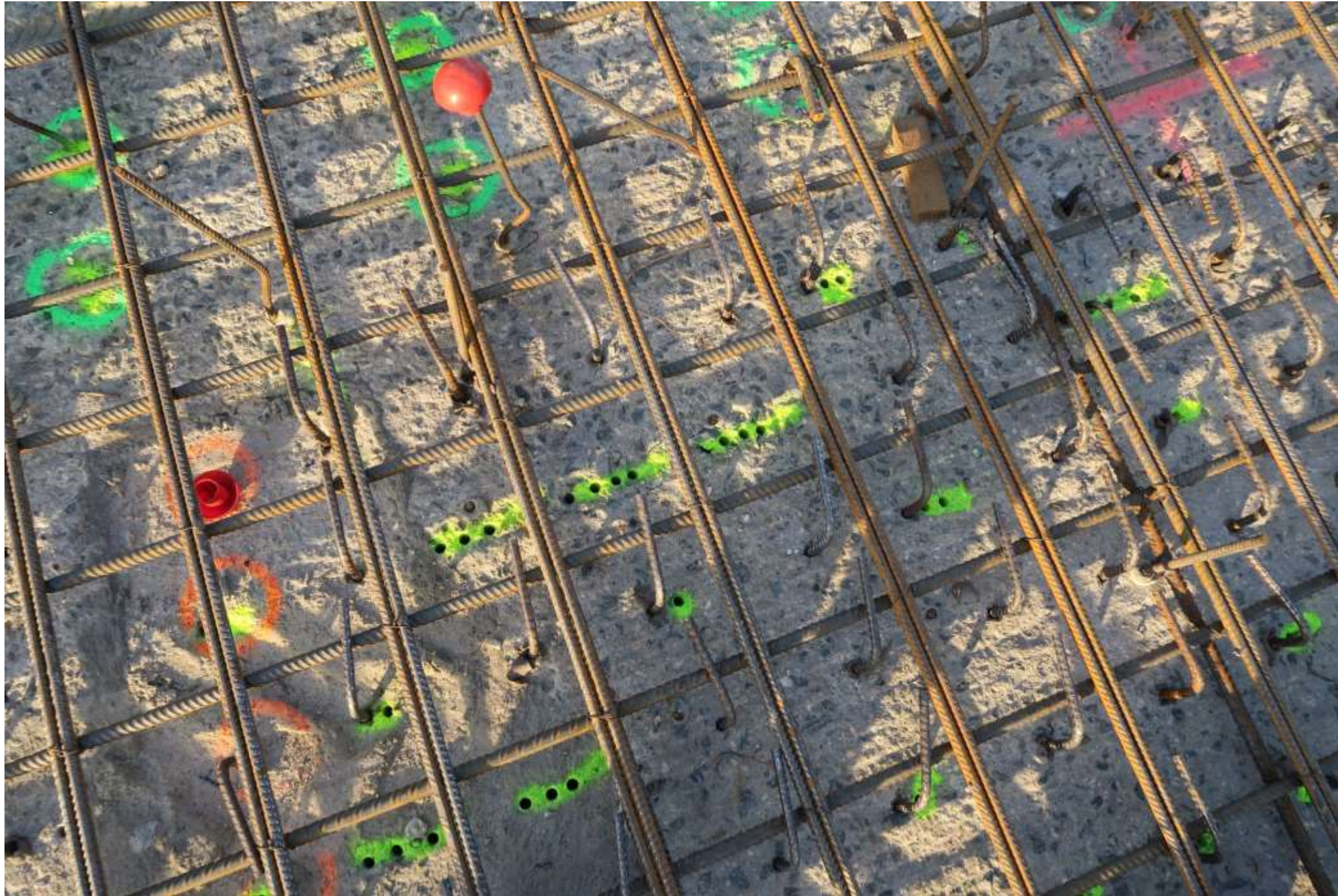


Dočasné podepření



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Obtížné vrtání kotvení



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Zlepšení technologie
ukládky
Pásky až 6 m široké



Zesílení mostovky – etapa 3 a 4 (2024)

Zlepšení technologie
úpravy povrchu
Vibrační lišta



Použití UHPC na Barrandovském mostě - Závěry

- Etapa 1 – byla získána zkušenost – drobné nedostatky odstraněny
- Etapa 2 – úspěšná aplikace zesílení, ale vodotěsná funkce UHPC nebyla využita
- Etapa 3 a 4 – nutnost zrychlení prací, spáry a úprava povrchu ověřeny experimentálně – vodotěsnost UHPC je využita
- Je požadována mimořádná pečlivost práce na staveništi
- Oslabení konstrukce trhlinami zjištěné v etapě 3 – UHPC → efektivní způsob řešení
- Celkem lze hodnotit použití UHPC jako velmi účinný prostředek k prodloužení životnosti mostu a zajištění těžkého provozu

Použití UHPC na Barrandovském mostě

Otevření do provozu 24.11.2024



Účastníci výstavby

- TSK Praha a.s. - investor
- Valbek, Pontex, SHP – projekt
- ČVUT – technická podpora investora
- PORR – generální dodavatel
- VSL – předpínání
- Freyssinet – subdodavatel vrstvy UHPC
- TBG Metrostav – vývoj a výroba UHPC



Další možné aplikace

Autobusové zastávky (experiment Německo)

Extrémní zatížení kolovými tlaky, stání, brzdné a rozjezdové síly

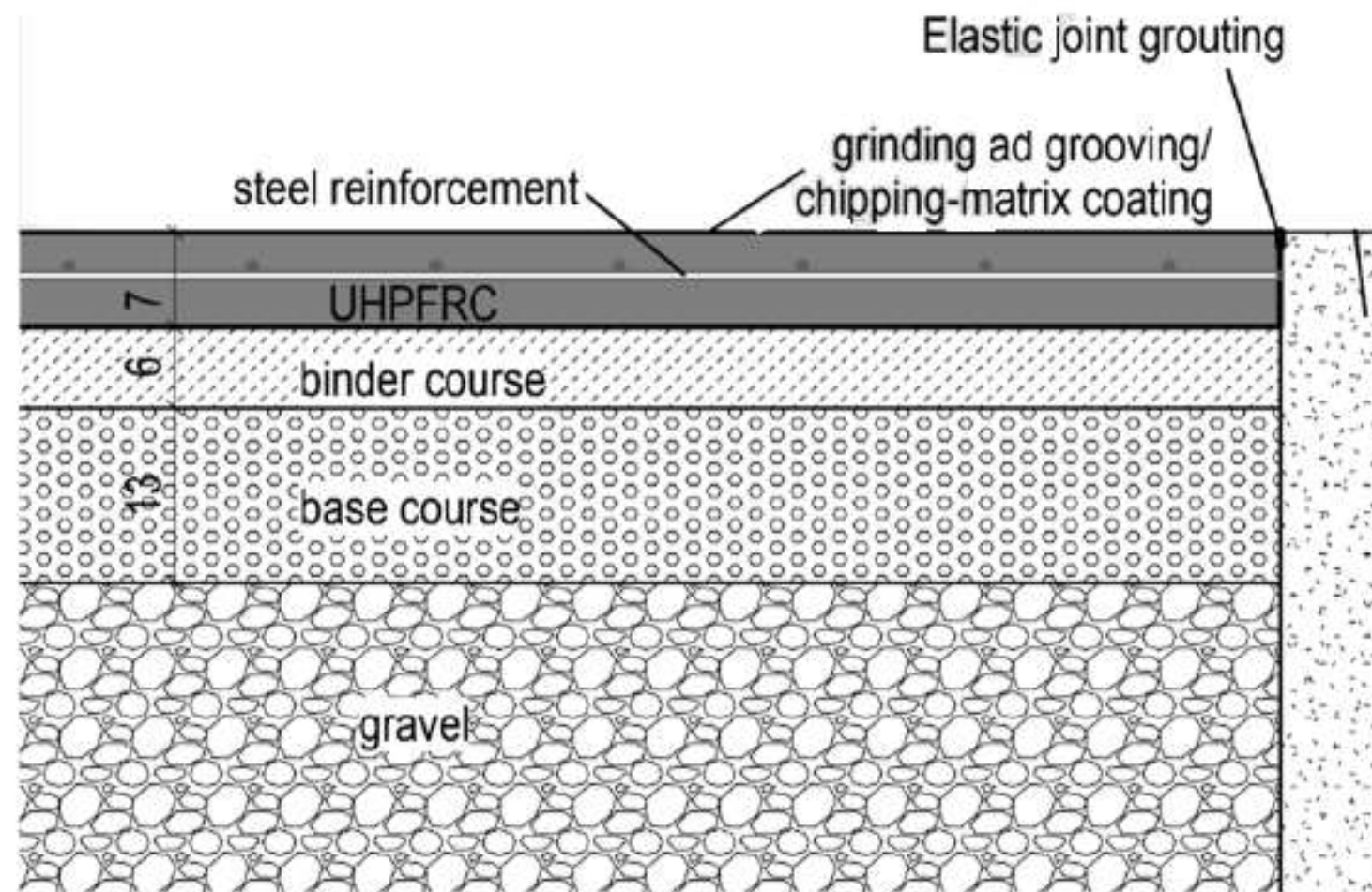


Figure 1: Cross section of the bus lane

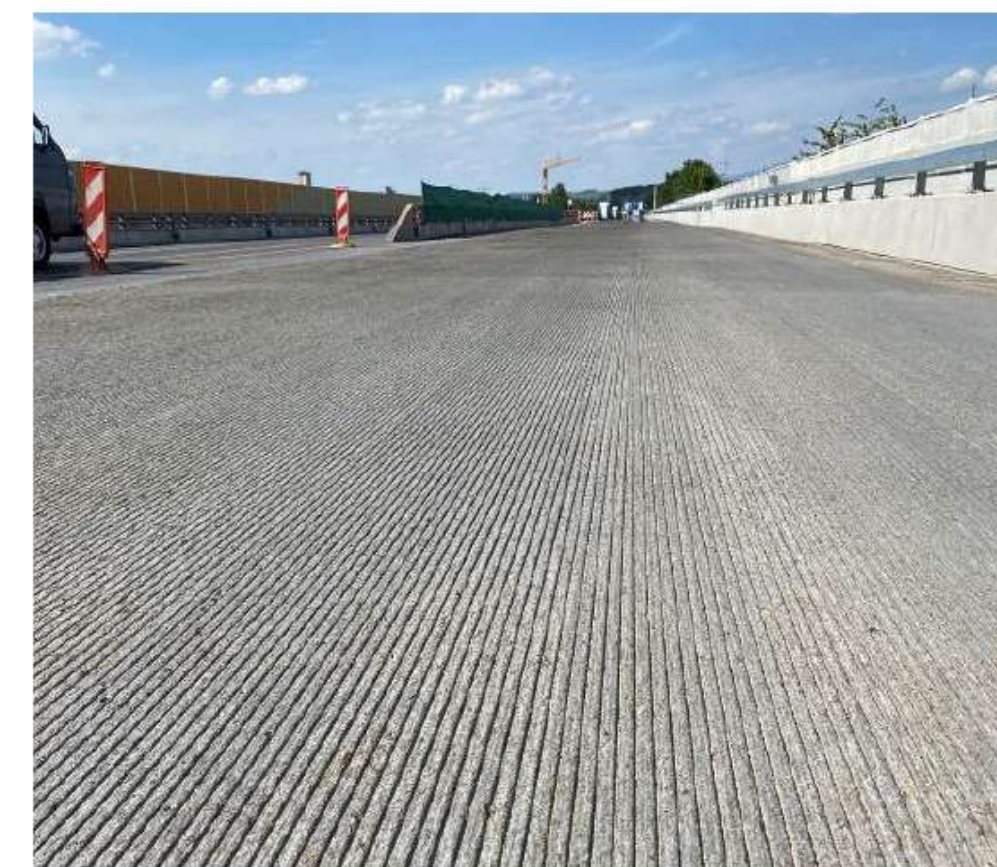
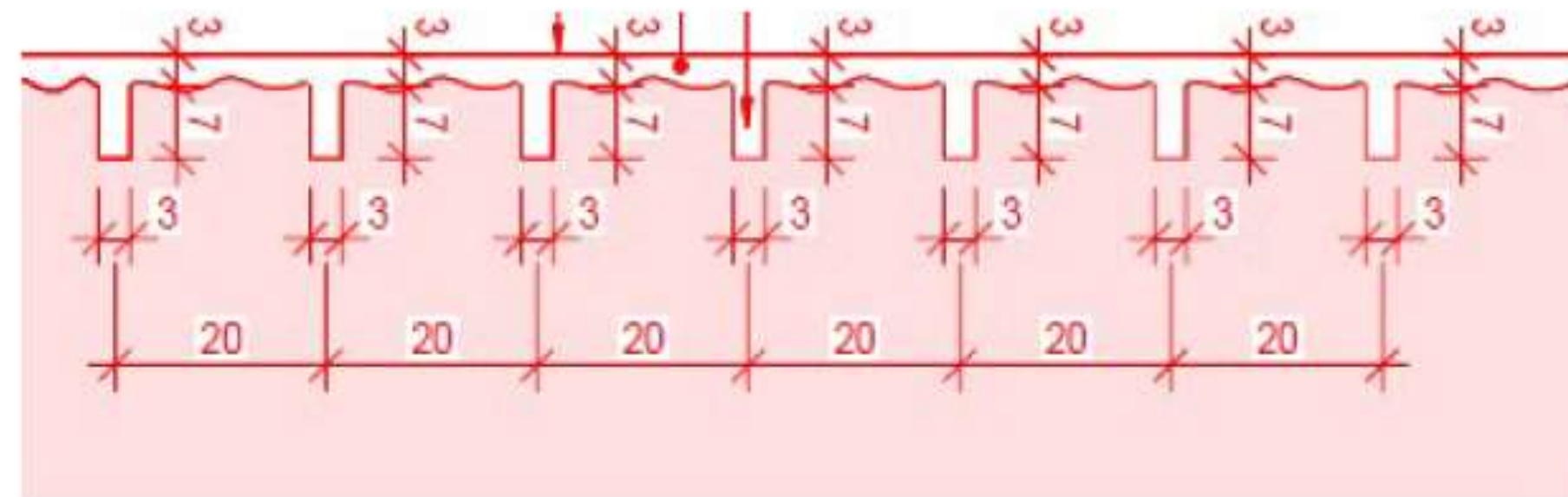


Figure 3: Surface preparation by a) grinding and grooving and b) chipping-matrix

Pokládka finišerem – opravy mostů, vozovky

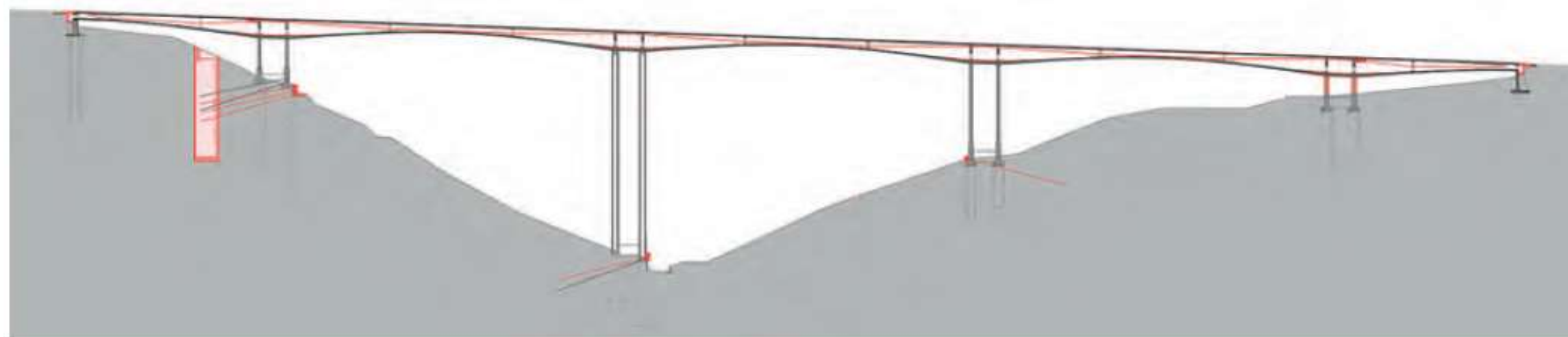


Přímo pojížděné povrchy



Viaduct Paudeze (CH)

Postaven 1973
Max. rozp. 104 m
Dl. mostu 404 m (sev.)
422 m (již.)



Viaduct Paudeze (CH)

Předmět oprav

- Rozšíření na 3 pruhy
- Oprava geometrie - pozorován nárůst průhybů
- Zesílení předpětí
- Trhliny ve stěnách za kotvami pův. předpětí

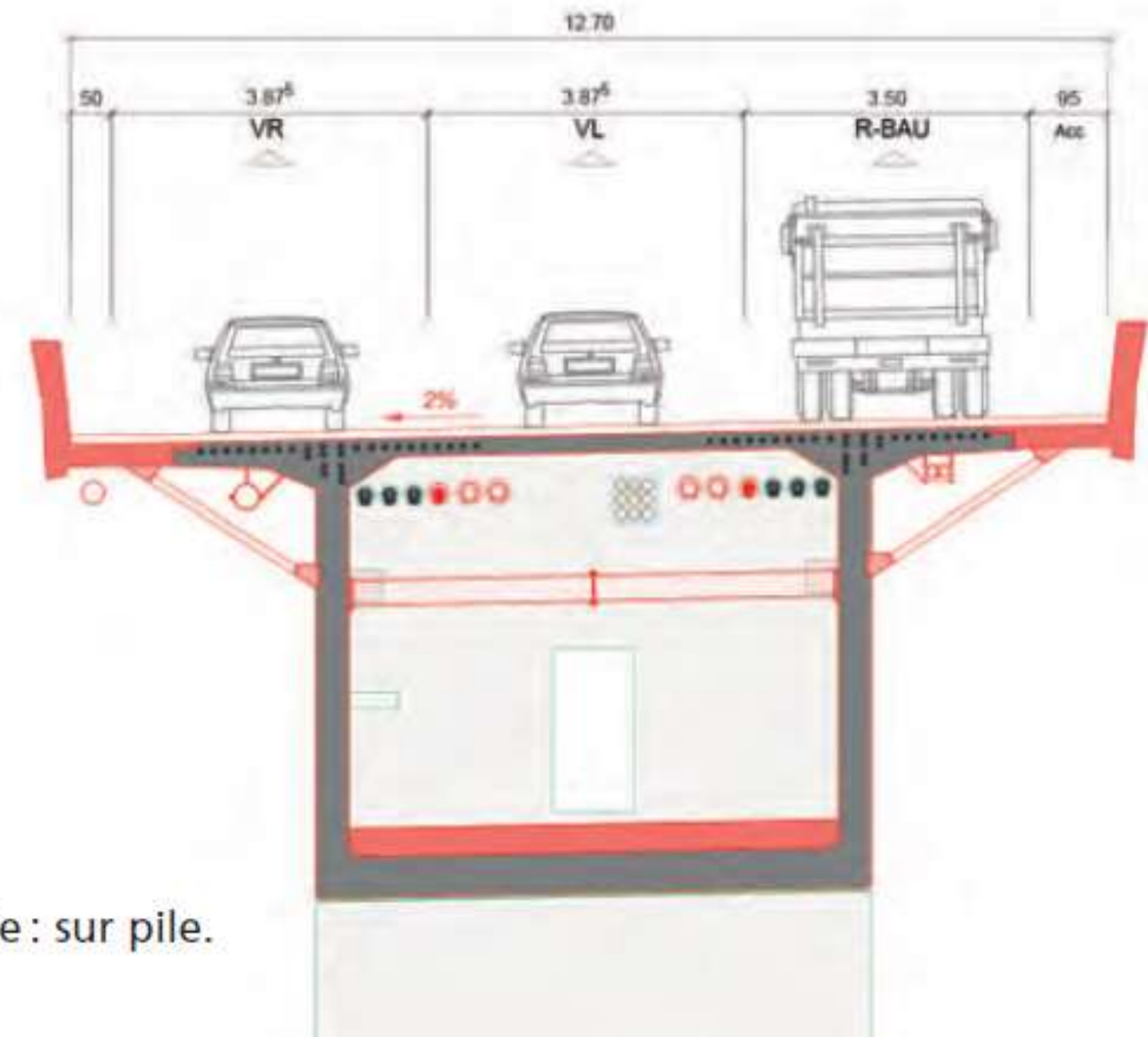
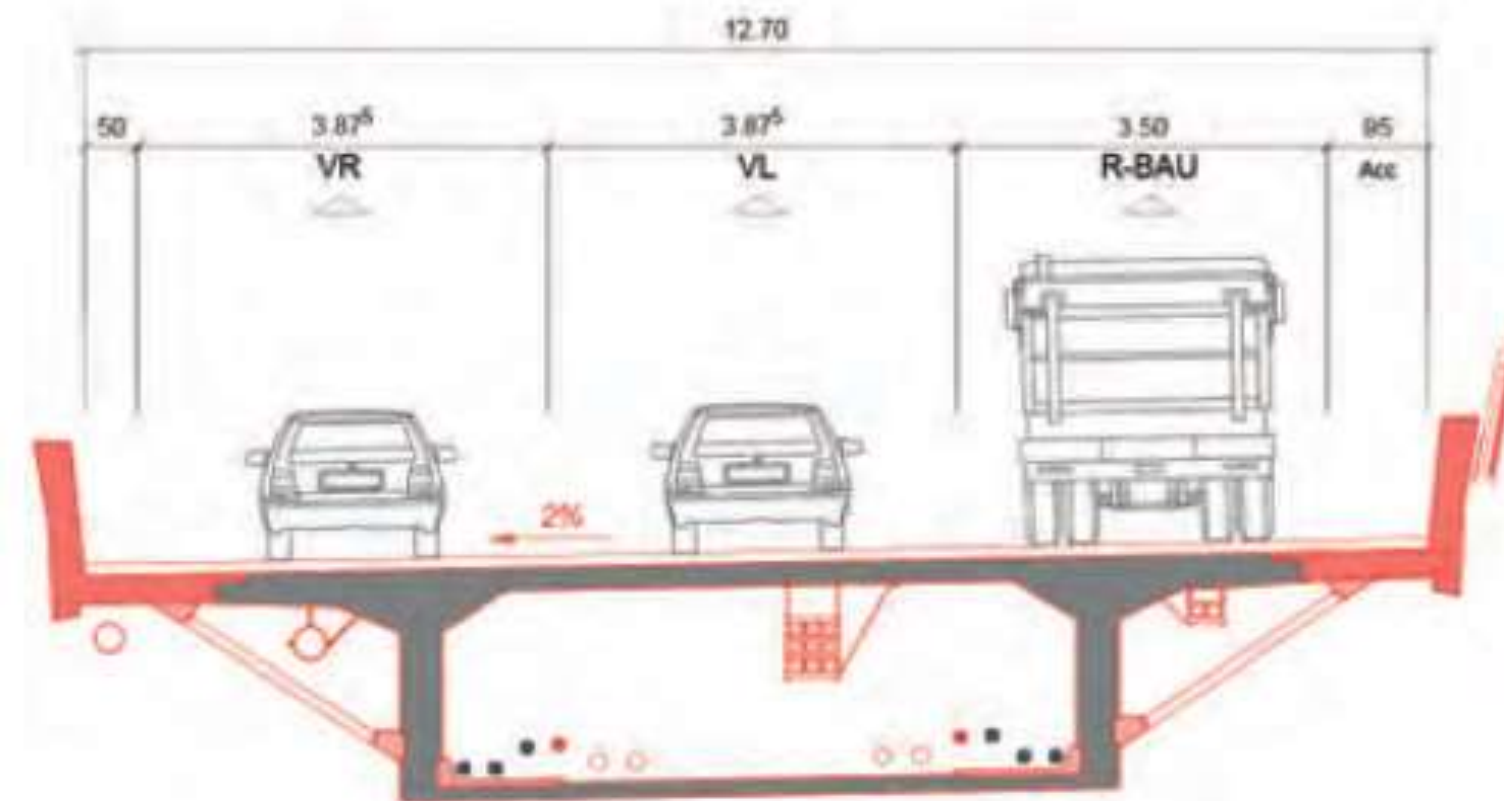
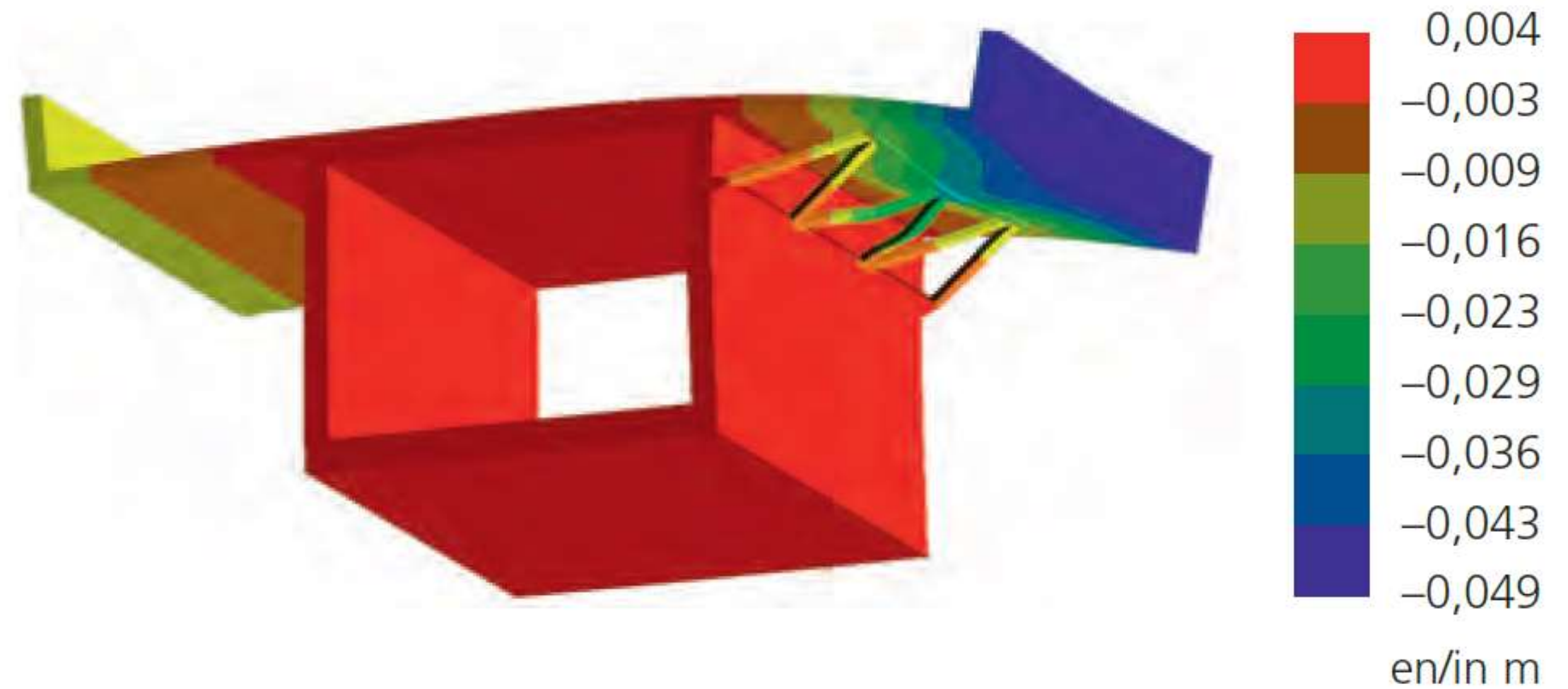
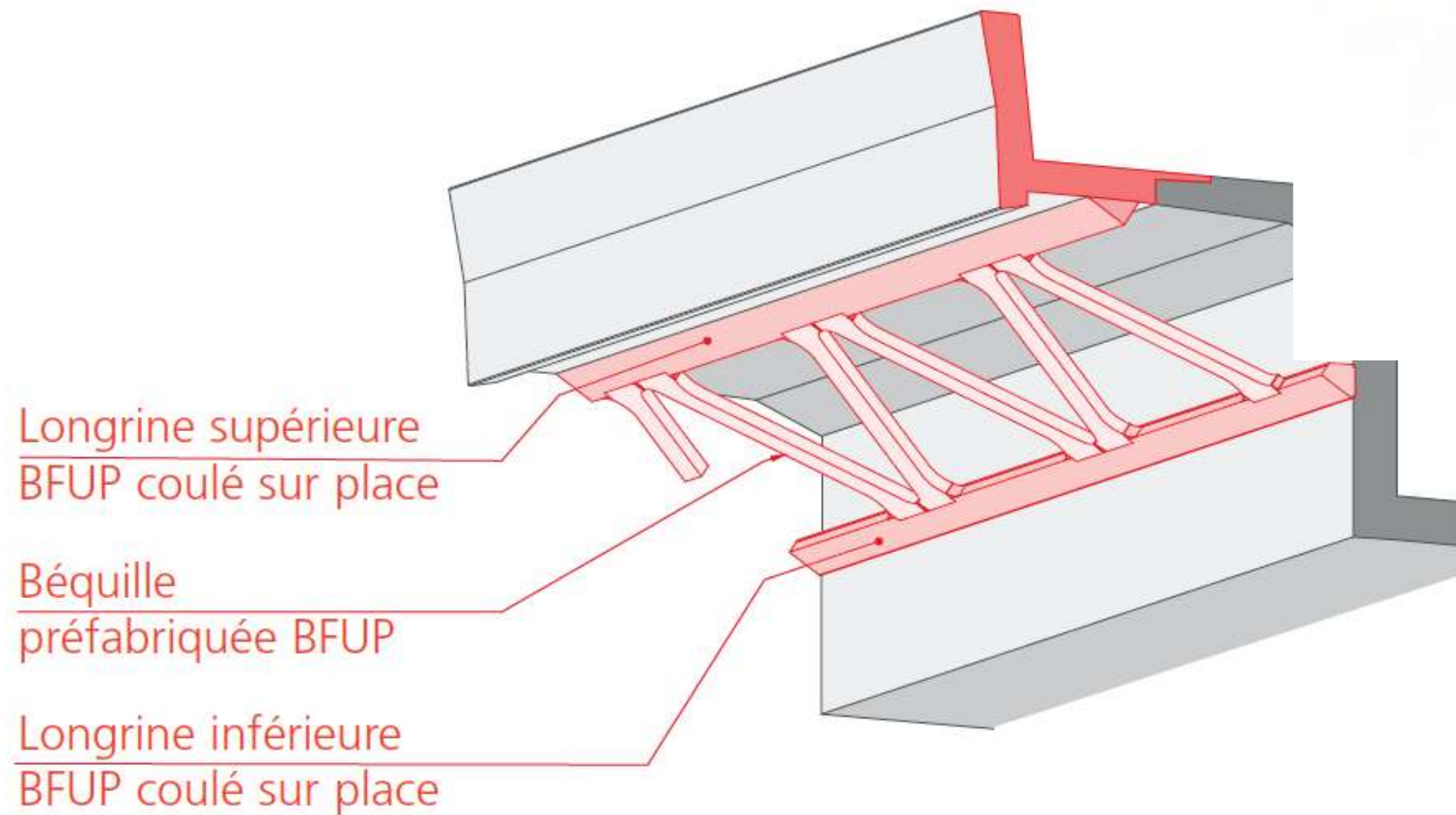


Fig. 3

Coupe transversale des interventions ; gauche: mi-travée, droite: sur pile.
Cross-section of interventions; left: mid-span, right: on pier.

Viaduct Paudeze (CH)

Rozšíření konzol



Model ATENA – svislé průhyby

Stabilita vzpěr byla testována experimentálně

Viaduct Pauzeze (CH)

Hotová oprava



Viaduct Paudexe (CH)

Hotová oprava

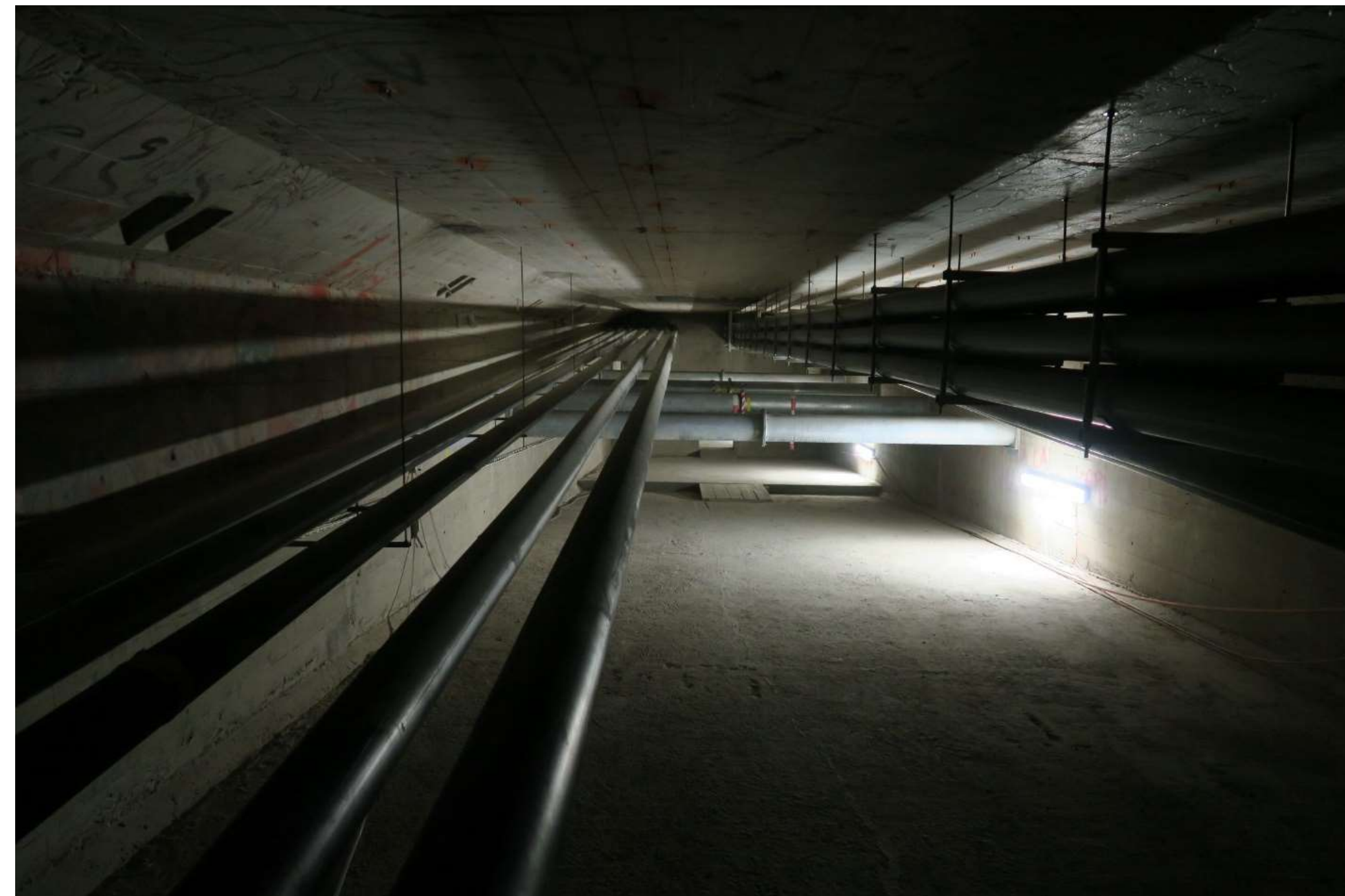


Ocelové deviátory v polích



Viaduct Pauzeze (CH)

Volné předpínací kabely a rozpěry stěn



Viaduct Paudeze (CH)

Hotová oprava



Hydrostatická nivelace



The project in figures

Length of the bridges: 404 m and 422 m

Maximum span: 104 m

Construction cost: CHF 35 million

Project years: 2012–2017;
completion: 2017–2020

Number of UHPFRC supports: 816 pcs

Volume of UHPFRC: 600 m³

Volume of concrete: 2500 m³

Length of prestressed cables: 4200 m

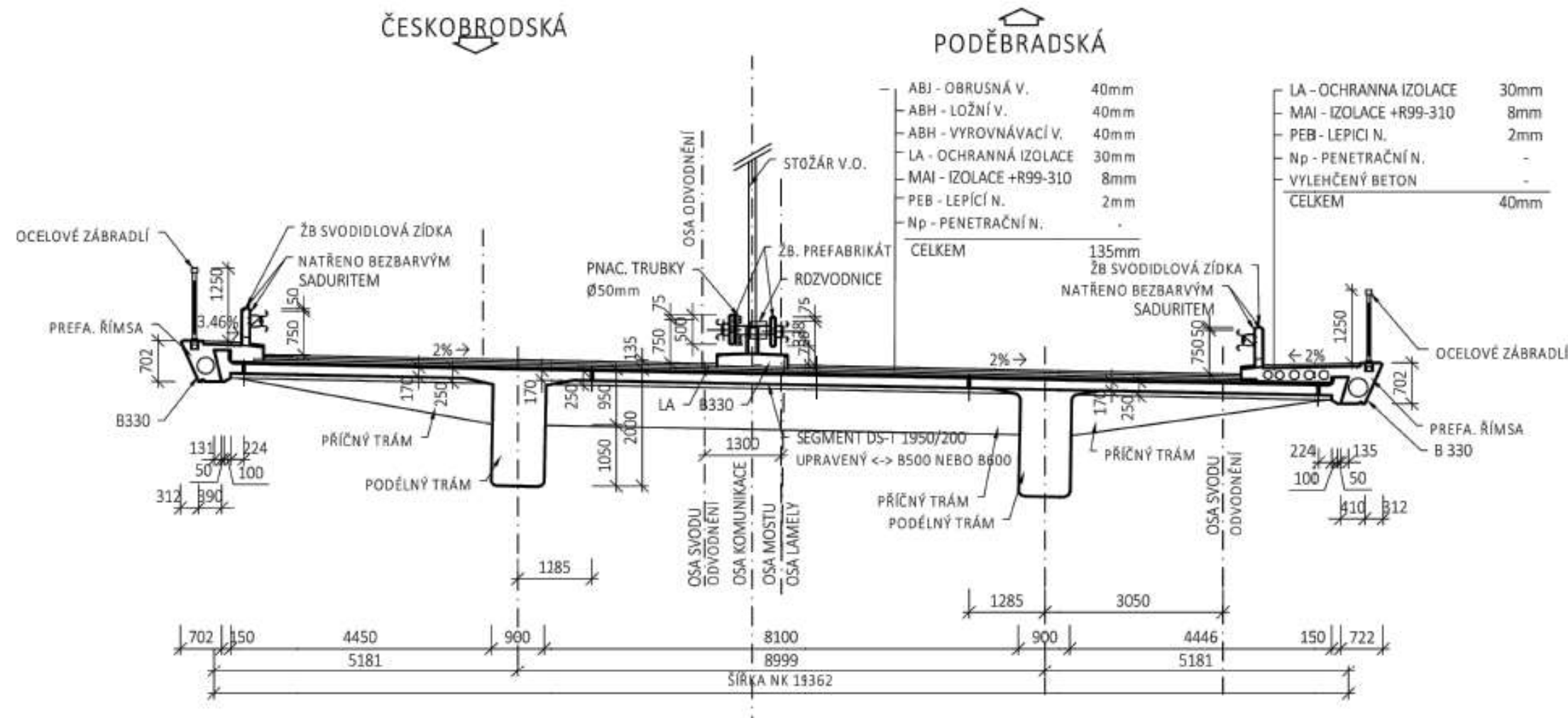
Waterproofing surface: 11,000 m²

Použití UHPC na mostě přes Rokytku

Most o 12 polích – max. rozpětí 36 m, dl. $\approx$ 400 m



Použití UHPC na mostě přes Rokytku



- Potřeba opravy stav N.K.
poměrně dobrý
- Instalace protihlukových stěn
- Zvýšení zatížitelnosti
- Řešení cyklistické dopravy

Použití UHPC

- Zesílení s malým přetížením
- Řešení hydroizolace
- Rychlá výstavba
- Dlouhá životnost

Závěry

- UHPC – vhodný materiál pro nové konstrukce i pro rekonstrukce
- U rekonstrukcí mostů plní funkce statické, hydroizolační i konzervační
- Pro opravy spodní stavby i nosné konstrukce
- Použití i pro opravy ocelových ortotropních mostovek
- Je trvanlivý – oprava na celou dobu zbytkové životnosti
- Umožňuje rychlé obnovení provozu
- Vyžaduje pečlivý návrh i provádění
- Vyšší náklady na materiál jsou vyrovnány omezením následných oprav



**FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE**

Děkujeme za pozornost