

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební



HABILITAČNÍ PRÁCE

Aplikace cementových a betonových kompozitů
v konstrukčních prvcích

Praha 2017

Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

Abstrakt

Práce se zabývá využitím betonových a cementových kompozitů v konstrukčních prvcích a konstrukcích. Popisuje pokročilé materiály na bázi cementu, jejich parametry a výhody pro použití v konstrukčních prvcích. Jednotlivé kapitoly se věnují vláknobetonům, ultra-vysokohodnotnému betonu a vláknobetonu s recyklovaným kamenivem. Jsou prezentovány postupy používané při návrhu konstrukcí z těchto materiálů. Jsou uvedeny příklady aplikací materiálu v konstrukčních prvcích. Závěrečná kapitola se věnuje aspektům udržitelného stavebnictví v návrhu betonových konstrukcí.

Abstract

The work deals with utilisation of concrete and cement composites in structural members and structures. It describes advanced cement based materials, their parameters and advantages for application in structural members. Particular chapters focus in fibre reinforced concretes, ultra-high performance concretes and fibre reinforced concrete with recycled aggregate. Procedures used in design of structures from these materials are presented. Examples of application of these materials in structural members are shown. The closing chapter addresses sustainable aspects in design of concrete structures.

Obsah

1	Úvod	7
2	Vláknobetony.....	9
2.1	Vláknobetony podle typu vláken.....	9
2.1.1	Drátkobeton.....	9
2.1.2	Vláknobeton se skelnými vlákny	11
2.1.3	Vláknobeton se syntetickými vlákny	12
2.2	Třídění vláknobetonů podle chování v tahu	14
2.3	Některé další typy vláknobetonů	15
2.3.1	SIMCON, SIFCON	15
2.3.2	Textilní beton.....	16
2.3.3	Kompozity s přírodními vlákny	17
2.4	Aplikace vláknobetonů	18
2.4.1	Kanalizační trouby z vláknobetonu.....	21
2.4.2	Segmenty tunelového ostění.....	34
2.4.3	Vláknobetonová mostní římsa.....	38
2.4.4	Plovoucí vláknobetonová plošina.....	43
2.4.5	Obkladové desky z vláknobetonu	51
2.4.6	Prefabrikovaný vláknobetonový prvek opěrné stěny	55
2.4.7	Předpjatý prvek systému protihlukových stěn	62
2.4.8	Předpjatá lávka z drátkobetonu	74
2.5	Závěry, komentář	81
3	Ultra-vysokohodnotný beton	83
3.1	Návrh směsi	83
3.1.1	Vodní součinitel.....	83
3.2	Kamenivo.....	84
3.2.1	Jemné částice.....	84
3.2.2	Vlákna	85
3.2.3	Přísady	85
3.3	Technologie výroby	86
3.3.1	Míchání směsi	86
3.3.2	Ošetřování	86
3.3.3	Příklady složení směsí.....	87

3.4	Aplikace UHPC v konstrukcích	90
3.4.1	Mosty a lávky.....	91
3.4.2	Střešní konstrukce	96
3.4.3	Schodiště	97
3.4.4	Štíhlé sloupy.....	99
3.4.5	Architektonické využití UHPC	101
3.5	Cyklopoint z UHPC	103
3.5.1	Návrh konstrukce	105
3.5.2	Nelineární numerická simulace.....	106
3.5.3	Stochastická analýza	108
3.5.4	Výroba, montáž.....	110
3.5.5	Závěry, komentář	111
4	Recyklace	112
4.1	Kamenivo z recyklovaného betonu	112
4.2	Beton vyrobený z recyklátu.....	113
4.3	Inverzní návrhový přístup	114
4.3.1	Kamenivo	115
4.3.2	Cement	116
4.3.3	Vlákna	116
4.3.4	Výroba směsi	116
4.3.5	Materiálové vlastnosti	117
4.4	Použití mezerovitého kompozitu s recyklovaným betonem	118
4.4.1	Vyztužení zemního tělesa.....	118
4.4.2	Zpevnění sypané hráze.....	118
4.4.3	Svislé nosné prvky	119
4.4.4	Protihlukové stěny	130
4.4.5	Zpevněné plochy	131
4.4.6	Prvky k usměrnění vodního toku	131
4.5	Shrnutí	132
5	Hodnocení konstrukcí z materiálů na bázi betonu z hlediska udržitelné výstavby	133
5.1	Udržitelnost, udržitelná výstavba	133
5.2	Hodnocení životního cyklu	133
5.2.1	Metodologie hodnocení životního cyklu podle ISO	134

5.2.2	Nástroje pro LCA	135
5.3	Environmentální dopady výroby betonu a betonových konstrukcí	136
5.4	Resilience.....	139
5.5	Závěr.....	139
6	Závěry, shrnutí	141
	Literatura	142

1 Úvod

Beton je nejdůležitějším a nejrozšířenějším konstrukčním materiálem pro výstavbu budov i inženýrských staveb a jeho potřeba bude v 21. století narůstat v souvislosti se zvyšujícím se počtem světové populace a požadavky na růst standardů života.

Dlouhou dobu se beton měnil jen minimálně. V posledních desetiletích došlo k překotnému rozvoji – k vývoji nových materiálů, pro výrobu betonu jsou používány netradiční materiály a technologie, nebo jsou známé materiály použity netradičním způsobem.

Pod pojmem beton se dnes neskrývá jen konvenční materiál, jak ho známe více než století. Použití a složení betonu se v současnosti upravuje a přizpůsobuje pro různé potřeby – od běžných konstrukcí a konstrukčních prvků, přes mosty na velká rozpětí, speciální využití betonu v architektuře, betonové prefa výrobky až po předměty běžné denní potřeby (např. nábytek, užité umění). Pečlivým návrhem složek a struktury kompozitního materiálu je možné dosahovat nejrůznějších požadovaných vlastností materiálu tak, že výsledný beton má odlišné vlastnosti a využití ve srovnání s běžným betonem. Na některých pracovištích dokáží manipulovat částmi hmoty takřka až na atomické úrovni. Jsou zkoumány způsoby uspořádání částic v nanovlákních a nanotubicích a modifikovány tak, aby výsledná struktura měla požadované vlastnosti. Jsou zkoušeny nové směsi, obsahující aditiva a plniva velmi malých rozměrů, která mohou ovlivnit jak pevnosti (v tlaku i tahu), tak i další vlastnosti výsledného betonu. Cílené úpravy míří k získání požadovaných speciálních vlastností, např. vodivý beton, beton se samočisticí schopností nebo tzv. antibakteriální beton, beton odpuzující nečistoty včetně mastnot, betony odolné proti otěru a poškrábání.

V trendech vývoje cementových kompozitů existuje několik hlavních oblastí.

Vláknobeton má dnes zcela jasnou pozici v betonovém stavitelství. Rozšiřuje se využití dosud známých typů vláknobetonu a dochází k dalšímu rozvoji a vývoji cementových kompozitů vyztužených vlákny, použití speciálních způsobů vyztužování – vedle vláken rozptýlených v cementové matici se používají vlákna uspořádaná (textil beton).

Význačným trendem je vývoj vysokohodnotných a ultra-vysokohodnotných cementových kompozitů (HPC, UHPC). To jsou materiály např. s vysokými pevnostmi nebo jinými vynikajícími vlastnostmi.

Velký důraz je kladen na využití odpadních materiálů ve výrobě cementových kompozitů a vývoj nových technologií, které budou minimálně zatěžovat životní prostředí.

Ve všech oblastech je kladen důraz na zvyšování trvanlivosti a životnosti; upřednostňuje se navrhování a výroba podle zásad udržitelného rozvoje ve výstavbě.

Práce se zaměřuje především na využití betonových a cementových kompozitů v konstrukcích a konstrukčních aplikacích. Shrnuje stav problematiky a uvádí příklady

konstrukčních aplikací. V závěru práce je kapitola zabývající se aspekty udržitelné výstavby v navrhování betonových konstrukcí.

2 Vláknobetony

Jak název napovídá, je vláknobeton materiál na bázi betonu. Základní betonová matrice je doplněna vlákny, která ztužují strukturu vláknobetonu, což vede k vylepšení některých vlastností, zpravidla pevnosti v tahu, houževnatosti, duktility, odolnosti proti otěru a obrusu, zvýšení trvanlivosti, odolnosti proti nárazu apod.

Vlákna mohou být z různých materiálů, různých tvarů a rozměrů, mohou být v betonové matici náhodně rozptýlena nebo různým způsobem uspořádána ve formě textilií nebo rohoží.

Vláknobetony jsou vyráběny různými technologiemi – jako monolitické, dodávané na stavbu v autodomíchávacích i jako prefabrikované prvky.

2.1 Vláknobetony podle typu vláken

Historicky prvním a v současnosti nejběžněji používaným vláknobetonem je vláknobeton s ocelovými drátky, tzv. drátkobeton. Drátkobetonů je široká škála; drátky jsou vyráběny z ocelí různých pevností a v různých tvarech. Existují však vláknobetony i s jinými typy vláken: skelnými, syntetickými, přírodními.

2.1.1 Drátkobeton

Pro vláknobeton s ocelovými vlákny je používán název drátkobeton. Ocelová vlákna používaná pro výrobu drátkobetonů mají relativně vysokou pevnost a dobře spolupůsobí s betonovou maticí. Vyrábějí se z taženého drátu nebo stříháním z plechu. Štíhlost drátků (poměr délky ku průměru drátku) se pohybuje od 20 do 100. Mohou mít hranatý, kruhový, polokruhový průřez, tvar po délce rovný nebo profilovaný. Jejich soudržnost s betonovou maticí se vylepšuje zdrsněním povrchu a mechanickým kotvením – drátky mohou být zvlněné nebo mají na koncích háky nebo kuličky.

Míchání drátkobetonu vyžaduje dobrou techniku a vhodnou technologii. Je nutný správný návrh drátkobetonové směsi, nelze pouze do běžné směsi zamíchat drátky. Drátkobeton s vodním součinitelem vhodným pro běžné betonové směsi je hůře zpracovatelný ve srovnání s obyčejným betonem. Proto se zpracovatelnost drátkobetonu vylepšuje přísadami.

Problémem výroby drátkobetonu je také rovnoměrné rozptýlení vláken ve směsi. Vlákna delší než 100 mm často vytvářejí shluky při míchání směsi. Vlákna s menší štíhlostí (do 50) se dobře rozmísí, ale mohou nepříznivě ovlivnit pevnosti kompozitu. Při nesprávném návrhu směsi dojde k tzv. nakypření, které snižuje pevnost výsledného kompozitu.

Pro vmíchání drátků do směsi není jednotný postup: podle různých typů se drátky přidávají do hotové směsi nebo do kameniva na dopravním pásu.

Drátkobeton přinesl značná vylepšení oproti běžnému betonu: je houževnatý, duktilní, lépe odolává dynamickému zatížení a únavě.

Problémem může být koroze vláken. Ve správně navržené konstrukci bez trhlin korodují pouze vlákna v povrchové vrstvě. Při větších šířkách trhlin může koroze proniknout i hlouběji pod povrch a vést k předčasné poruše konstrukce.

Nejrozšířenější je využití drátkobetonů v podlahách, používají se v mostovkách, při výstavbě letištních ploch. Stříkané drátkobetony jsou převážně využívány pro tunelová ostění. Výhodné je použití drátkobetonu pro výrobu prefabrikátů.



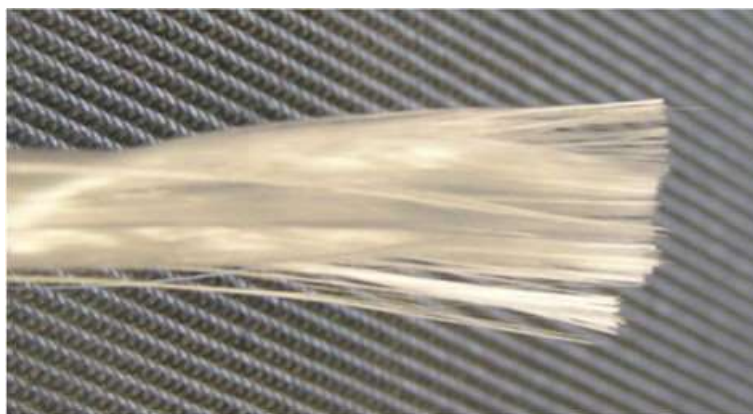
Obrázek 2-1 Drátky Dramix



Obrázek 2-2 Krátké drátky z vysokopevnostní oceli

2.1.2 Vláknobeton se skelnými vlákny

Sklovláknobeton se vyrábí z cementopískové malty vyztužené skleněnými vlákny. Váhový poměr písku, resp. kameniva jemných frakcí ku obsahu cementu je 0,5 až 1,5. Technologie jeho výroby umožňuje vytvářet rozmanité tvary, povrchové úpravy a různé barvy výrobků. Předností je, že produkty ze sklovláknobetonu mohou mít malou tloušťku (od 8-15 mm). Ze sklovláknobetonu se vyrábějí fasádní panely, dekorativní fasádní prvky, protihlukové bariéry, ztracené bednění na mostní římsy a pilířové hlavice, odvodňovací žlaby, kabelové kanály, odpadní potrubí, drenáže. Používá se při rekonstrukcích historických staveb a pro výrobu tenkých obkladových desek.



Obrázek 2-3 Svazek skelných vláken

Zpočátku se k výrobě vláknobetonu používala vlákna z konvenčních skel. To ovšem vedlo k předčasným ztrátám pevnosti vláknobetonu způsobených alkalicko-křemičitou reakcí. Tato nepříznivá okolnost byla vyřešena používáním skelných vláken s nižším podílem křemíku a vyšším podílem zirkonia, která mají vyšší odolnost v alkalickém prostředí. Dlouhodobá trvanlivost sklovláknobetonu může být zajištěna buď použitím vláken odolných vůči alkáliím, nebo aplikací pojiv se sníženou alkalitou.

Vláknobeton se skelnými vlákny se vyrábí buď torkretováním, kdy jsou do předem smíchané směsi ve stříkáci pistoli prameny vláken kráceny na požadovanou délku, nebo se směs zpracovává běžným postupem. Skleněná vlákna přidávaná do směsi jsou obvykle v pramenech po 100 až 400 jednotlivých vláknech tloušťky asi 13 μm . Obrázek 2-4 ukazuje příklad na cívce navinutých skelných vláken, která jsou na stavbě nasekána podle potřeby. Ze sklovláknobetonů se zpravidla vyrábějí tenké průřezy. Proto je nutné dobré ošetřování čerstvé směsi. Doporučuje se min 7 dní vlhčit. Místo vlhčení lze přidat do směsi 5% akrylových polymerů.

Stříkané vláknobetony se skelnými vlákny (s objemovým obsah vláken 5%) nabývají pevností 15 ÷ 30 MPa, vláknobetony vyráběné klasickým mícháním 10 ÷ 15 MPa.

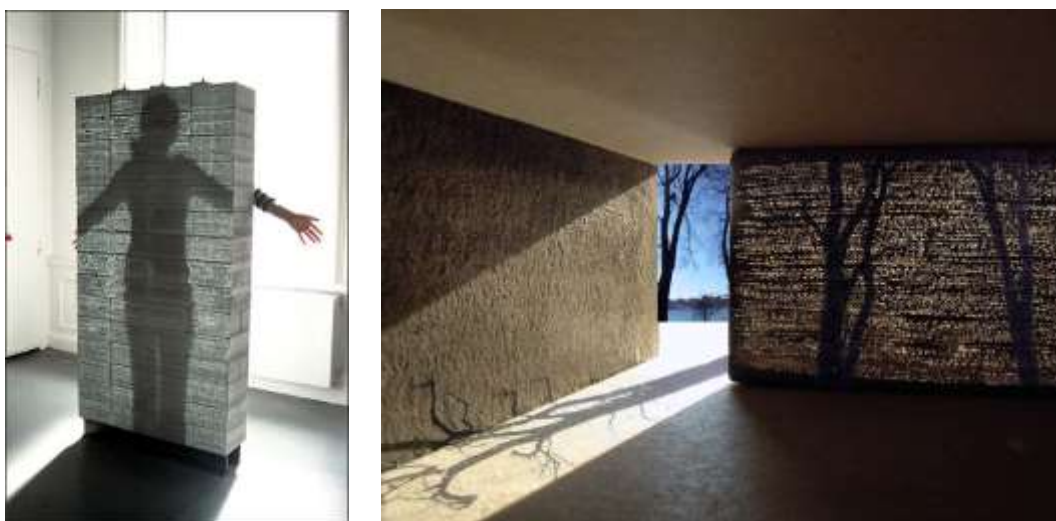
Kvůli poměrně vysokému obsahu cementu mění se mikrostruktura s vlhkostí prostředí více než u obyčejných betonů. Ve venkovním prostředí povedou tyto změny ke snížení tahové a ohybové pevnosti. Toto zkrěhnutí či stárnutí může vést až ke čtyřicetiprocentnímu snížení celkové pevnosti a dvacetiprocentnímu snížení mezního přetvoření.

Pro lepší kontrolu rozmístění a orientace vláken v betonové směsi jsou vlákna uspořádána do formy z netkaných rohoží a skelných tkanin ještě před betonáží. Víz dále kapitola 2.3.2 Textilní beton.



Obrázek 2-4 Skelné vlákno Anti-Crak® HP Roving [25]

Zajímavé je použití skelných vláken na výrobu průsvitného betonu. Efektní účinek je dán paralelním uspořádáním optických vláken v jemnozrnné cementové matrici. Z průsvitného betonu se vyrábějí stavební prefabrikáty a různé interiérové prvky s působivými světelnými efekty (obrázek 2-5).



Obrázek 2-5 Prvky z průsvitného betonu

2.1.3 Vlákno-beton se syntetickými vlákny

Syntetická vlákna se vyrábějí z organických polymerů a zahrnují široké spektrum materiálů různých vlastností. Pro výrobu vláknobetonu se používají: vlákna akrylová, aramidová, nylonová, polyesterová, polyetylenová, polypropylenová, polyvinylalkoholová. Do skupiny syntetických vláken se zpravidla řadí i vlákna uhlíková. Syntetických vláken je velmi mnoho druhů; mají různé tvary, délky, štíhlostní

poměr, uspořádání, velmi variabilní materiálové parametry a používají se v mnoha aplikacích a k různým účelům.

Tahové pevnosti syntetických vláken dosahují hodnot až 3 000 MPa (aramidová vlákna). Vlákná se vyrábějí v délkách od cca 10 mm až po cca 55 mm, tloušťky jsou od několika mikrometrů až po cca 1 milimetr. Krátká vlákna se zpravidla využívají pro kontrolu reologických jevů (smršťování). Díky vysokému štíhlostnímu poměru jsou už v malém množství (do 0,5% objemu) schopna podstatně redukovat trhliny v počátečních fázích tuhnutí a tvrdnutí betonu.

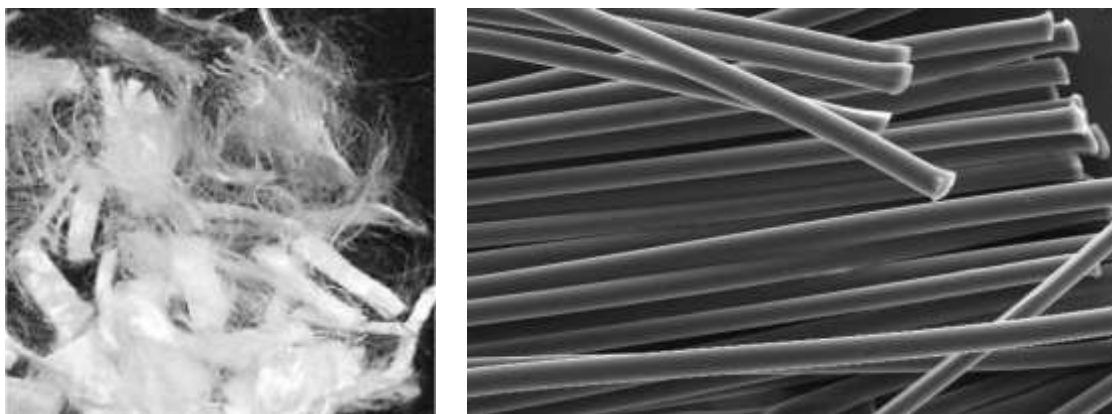
Delší vlákna zvyšují houževnatost a duktilitu vláknobetonu; v některých případech je jim přisuzována i statická funkce.

Mechanické vlastnosti vláknobetonu se syntetickými vlákny jsou velmi proměnné v závislosti na typu a obsahu vláken. Vláknobetony s některými syntetickými vlákny dosahují podobných pevností jako ostatní vláknobetony i při nižším objemu vláken ve směsi.

Do této kategorie řadíme i textiliemi a sítěmi z vláken vyztužené cementové kompozity, vhodné pro zhotovení velmi tenkých desek. (Viz kapitola 2.3.2 Textilní beton.)



Obrázek 2-6 Různé typy polypropylenových vláken



Obrázek 2-7 Polypropylenová vlákna [23]



Obrázek 2-8 Syntetická vlákna ze speciální směsi polypropylénu a polyetylénu [24]

2.2 Třídění vláknobetonů podle chování v tahu

Vláknobetony lze rozdělit do dvou skupin podle jejich chování v jednoosém tahu. První skupina je charakterizována lokalizací přetvoření a změkčením, které odpovídá rozvoji jedné hlavní trhliny. Toto chování je zpravidla spojeno s vláknobetony, které mají nižší obsah vláken než 1% objemu. Lokalizuje se jedna trhlina a podle délky vláken je obvykle její maximální rozevření cca 3-4mm; za touto hranicí je reziduální pevnost rozhodující měrou ovlivněna úplným vytažením vláken z betonové matrice, a proto není vhodné tuto mezní šířku trhlín překročit. Kompozity charakterizované zpevněním v tahu jsou označovány jako vysokohodnotné vláknobetonové materiály. Vyrábějí se z kvalitních cementů a vláken s vysokými pevnostmi a vysokým modulem pružnosti (např. z vláken PVA s pevnostmi až 1600 MPa) a zpravidla neobsahují hrubé frakce kameniva nebo jsou vlákna rozptýlena pouze v cementové matrici.



Obrázek 2-9 Vlákna z PVA [23]

Vykazují násobnou lokalizaci, přestože zóna poškození zasahuje často pouze malou oblast a jejich chování lze přirovnat k chování kovů. O ultravysokohodnotných cementových kompozitech podrobněji pojednává kapitola 3.

2.3 Některé další typy vláknobetonů

2.3.1 SIMCON, SIFCON

SIFCON (slurry-infiltrated fibre concrete) je speciálním druhem vláknobetonu s vysokým obsahem vláken. Materiál je vytvořen jinou technologií než klasické vláknobetonu: forma je vyplněna volně sypanými vlákny a tento základ je následně prostoupen cementovou kaší. Takto se dosahuje až 20% obsahu vláken v cementové matrici. Většinou se používají ocelová vlákna (drátky); byly provedeny zkoušky i s aramidovými vlákny. Využití SIFCONU by mělo být vyhrazeno na aplikace, kde bude využit potenciál tohoto materiálu – jeho vysoké pevnosti v tahu (20 až 50 MPa), pevnosti v tlaku (při velkém obsahu vláken až 160 MPa) a současně velká duktilita při působení tlaku, odolnost proti obrusu, nárazu, houževnatost při únavovém namáhání a cyklickém zatěžování. SIFCON je vhodný pro opravy mostovek, ranvejí, konstrukcí vystavených seismickému zatížení a/nebo ohrožených výbuchem, bezpečnostní prostory, trezory a sejfy, pro nosné prvky v ohnivzdorných konstrukcích, ve vojenských ochranných konstrukcích – protiraketových krytech a podzemních bunkrech, jako obálka kontejnmentu jaderných elektráren ap.

SIMCON (Slurry Infiltrated Mat Concrete) je vytvořen na stejném principu jako SIFCON. Odlišnost je v tom, že vlákna nejsou v celém objemu prvku, ale ve formě rohoží umístěvaných po obvodě průřezu. Spotřeba drátků je asi o čtvrtinu menší než u SIFCONu při dosažení 75% pevnosti SIFCONu. SIMCON je aplikován ve vojenských konstrukcích nebo průmyslových aplikacích vyžadujících vysokou pevnost a duktilitu materiálu. Materiál byl použit v experimentální montované rámové konstrukci. Sloupy rámu mají ocelový plášť obalený rohoží z ocelových vláken prostoupenou cementovou kaší. Rámové příčle jsou tvořeny ztraceným bedněním ve tvaru U také ze SIMCONu a vyplněny lehčeným drátkobetonem. Prvky byly spojovány na stavbě sešroubováním. Rychlost výstavby byla srovnatelná s ocelovými skelety. Rám ze SIMCONu má menší přetvoření oproti srovnatelnému železobetonovému rámu a lépe působí při zemětřesení. Případná poškození by nastala ve styčnicku rámu a byla by snadno opravitelná. [30].

2.3.2 Textilní beton

Textilní beton je tvořen jemnozrnnou matricí na bázi cementu vyztuženou plošnou nebo prostorovou textilií. Materiály používané pro textilie jsou alkalirezistentní sklo, uhlík, aramid, polypropylén, polyetylen, polyvinylalkohol. [3][24][25]. [23]. Vlákná jsou v textiliích uspořádána ve formě útku a osnovy, nebo je textilie netkaná s vlákny náhodně uspořádanými v rovině. V rohožích jsou vlákna uspořádána prostorově.

Výhodou textilních betonů je to, že je dána pozice vláken a nehrozí nebezpečí vytváření jejich shluků. S tím souvisí lépe definované vlastnosti textilních betonů a menší rozptyl materiálových parametrů.

Jedním ze způsobů výroby je vstřikování jemnozrnného cementu do textilní matrice. Další možné technologie jsou výroba v kalandrech nebo formování textilie a cementové matrice na kopytech. Obrázek 2-10 ukazuje příklad výroby modulárního městského mobiliáře (Dune, architekt Rainer Mutsch) z vláknocementu s celulózovými vlákny na kopytech.

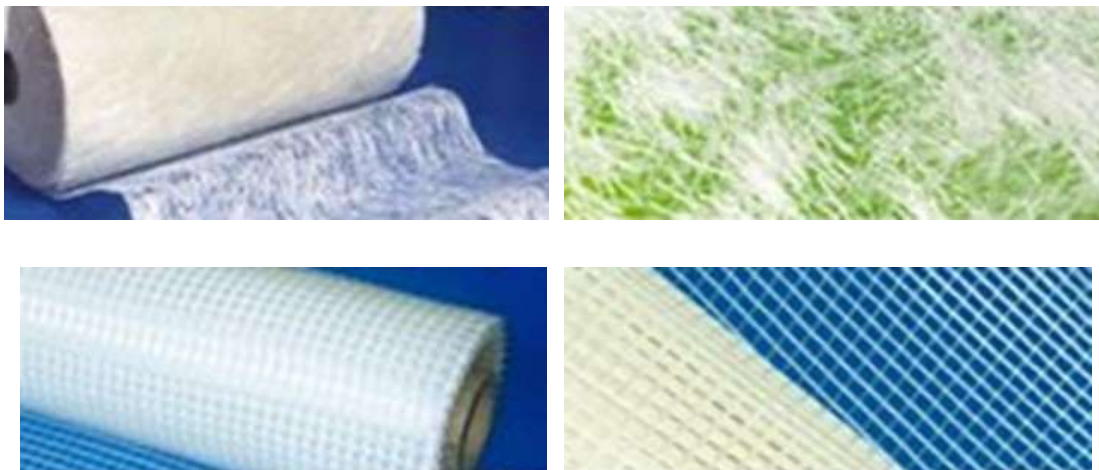
Textilní betony jsou nejčastěji využívány pro tenkostěnné prvky, jako jsou fasádní a obkladové panely, balkónové prefabrikáty a další speciální aplikace.

Chování prvků z textilních betonů závisí především na druhu materiálu použitého pro výrobu textilie. Textilie s vysokou pevností a modulem pružnosti vykazují vznik násobných trhlin. Textilie s nižším modulem pružnosti (polypropylen, sisal) se mohou porušovat i jednotlivou trhlinou. [7, 28, 32, 33, 35, 36, 40, 41].

Rohože jsou trojrozměrné tkaniny, kde je dopředu přesně definována pozice a vzdálenost vláken. (viz Obrázek 2-12) Pro tyto textilní rohože se používají vlákna skelná, uhlíková a aramidová. [25]



Obrázek 2-10 Vytváření prvku na formě



Obrázek 2-11 Textilie ze skelných vláken pro vyztužení betonu [25]



Obrázek 2-12 Textilní rohož

2.3.3 Kompozity s přírodními vlákny

Důraz kladený v posledních letech na ekologická témata přinesl návrat k vláknům, která se již v historii používala a osvědčila. Jsou navrhovány a zkoušeny vláknobetony s vlákny z přírodních materiálů jako konopná, rýžová, celulózová, sisalová vlákna, vlákna z agáve atd.

2.4 Aplikace vláknobetonů

Vlákna se pro různé aplikace ve stavebnictví používala v průběhu celé historie. Osvědčila se jako výborný prostředek pro vyztužení struktury materiálu, zabraňovala vzniku a rozvoji trhlin, zlepšovala vlastnosti základního materiálu (matrice). V nejstarších dobách šlo především o vlákna organického původu – sláma, rákos, pazdeří, zvířecí chlupy.

V 19. století byla objevena technologie průmyslového zpracování azbestu a výroby azbestových vláken. To umožnilo vývoj azbestocementu, který se jako první cementový kompozit s rozptýlenými vlákny široce prosadil. Z azbestocementu se vyráběla široká škála výrobků pod různými obchodními značkami. Poté, co byl zjištěn karcinogenní účinek azbestových vláken, byla výroba azbestocementových prvků postupně utlumena. V Evropě se azbestocement již nevyrábí.

Na tuto tradici navázal vývoj současných typů vláknobetonů od druhé poloviny minulého století. Dnes je vláknobeton již etablovaným moderním konstrukčním materiálem se značnými možnostmi dalšího rozvoje. Používá se pro aplikace v obou technologických variantách – v monolitických konstrukcích i pro výrobu prefabrikátů.

V počátečních fázích vývoje byl vláknobeton používán pro drobné prvky a malé konstrukce. Jednou z prvních velkých aplikací byla realizace zátek plynového zásobníku u Příbrami technologií stříkaného drátkobetonu. Dnes je drátkobeton běžně používán na průmyslové podlahy, mostovky a letištní plochy, tunelová ostění.

V názoru na využití a možné aplikace vláknobetonu došlo také k vývoji. Původní názor, že rozptýlená výztuž může zcela nahradit klasickou prutovou, je překonán. Dnes se prosazuje směr, který chápe vláknobeton jako svébytný specifický materiál, který využívá synergie vlastností betonové matrice a vláken k získání mimořádných vlastností kompozitu. Vynikající vlastnosti vláknobetonu jsou využity pro vylepšení působení konstrukce (konstrukčního prvku), nebo získání dalších kvalit, které by konstrukce bez rozptýlené výztuže neměla.

Vláknobetony jsou používány pro omezení vzniku trhlin, zvyšují houževnatost prvku, odolnost vůči rázu, trvanlivost, požární odolnost konstrukce.

Vláknobeton má vysoký inovační potenciál především pro prefabrikované prvky. Použití vláknobetonu umožní snížit tloušťku prvků a množství betonářské výztuže, což přináší snížení spotřeby materiálu a druhotné úspory při dopravě, manipulaci a skladování.

Vyšší úroveň kontroly při výrobě prefabrikátů vede k efektivnímu využití vlastností vláken. Volba určitého typu vlákna cíleně modifikuje parametry prefabrikovaného prvku. Například krátká polymerová vlákna s vysokým štíhlostním poměrem zabrání vzniku smršťovacích trhlin a tím se dosáhne lepšího vzhledu a vyšší trvanlivosti výrobku. Delší typy vláken zvýší houževnatost kompozitu a zamezí poškození hran prvků při transportu a manipulaci. Velmi výhodné a efektivní je použití drátkobetonu v předpjatých prefabrikátech. Aplikací drátkobetonu v prvku dojde ke zvýšení soudržnosti, takže lze snížit kotevní délky předpínací výztuže a zlepši se kotvení zvedacích a manipulačních úchytů. V některých případech může drátkobeton nahradit tradiční smykovou výztuž.

Ve spolupráci s několika firmami při vývoji a zkouškách prvků z vláknobetonu se podařilo navrhnout a prosadit několik úspěšných aplikací vláknobetonu. Při přípravě a projektování vláknobetonových prvků se osvědčil a časem prověřil tento postup:

- Vytipování prvku, kde je aplikace vláknobetonu vhodná.
- Předběžné statické posouzení.
- Výběr vláknobetonu a ověření jeho parametrů.
- Podrobná analýza únosnosti a chování prvku.
- Eventuální zkoušky prvku ve skutečné velikosti.

Vytipování prvku

Aplikace vláknobetonu nemá být samoúčelná. Prvek, kde má být vláknobeton použit, se má vybrat tak, aby použití vláknobetonu vedlo k úsporám a (nebo) vylepšení vlastností a chování prvku.

Aplikace vláknobetonu je výhodná pro prvky složitějších tvarů a prvky tenkostěnné vystavené tahovému namáhání. V tenkostěnných prvcích je použití klasické betonářské výztuže problematické, protože není možné zajistit dostatečnou tloušťku krycí vrstvy. Vláknobeton v těchto případech obvykle vyhoví nejen z hlediska přenášení tahových napětí ale i na odolnost proti vlivům vnějšího prostředí.

Statické posouzení

Statický výpočet má zhodnotit odezvu prvku na zatížení a stanovit namáhání prvku. Výsledná napětí jsou jedním z podkladů pro volbu vhodného vláknobetonu. Může se jednat o „ruční“ výpočet s výpočtem základních veličin a napětí nebo o numerickou simulaci s vlivem nelineárního chování materiálu, která může kromě výpočtu napětí v prvku popsat vznik a rozvoj trhlin.

Výběr vláknobetonu

Součástí návrhu vláknobetonu pro vytipovaný prvek jsou laboratorní zkoušky. Ty mají prokázat, že pevnost daného vláknobetonu odpovídá napětí v navrhovaném prvku a ověřit další požadované vlastnosti. Součástí návrhu vhodného vláknobetonu může být i výroba zkušební dávky vláknobetonu přímo ve výrobě, která má prokázat zpracovatelnost vláknobetonové směsi ve stávajícím výrobním zařízení firmy a ověřit technologické postupy v reálných podmínkách výrobního podniku.

Podrobná analýza

Význačným rysem všech vláknobetonů je duktilita. Chování prvků z vláknobetonu je silně nelineární, proto je vhodným nástrojem pro analýzu nelineární analýza. Nelineární numerická simulace chování může poskytnout relevantní informace tehdy, je-li vytvořen odpovídající numerický model. Stěžejním úkolem numerického modelování vláknobetonových konstrukcí je nalezení materiálového modelu. Neexistuje univerzální model pro vláknobeton; tak jak má každý vláknobeton odlišné parametry, tak i

materiálové modely se od sebe liší. Pro každou aplikaci je hledán a validován příslušný materiálový model a s ním pak provedena nelineární analýza.

Zkoušky ve skutečné velikosti

Prefabrikované prvky se vyrábějí ve velkých sériích; změna vyztužení prvku provázená někdy i změnou celkových rozměrů je větším zásahem do výrobního procesu. Proto často bývají požadovány zkoušky prvku ve skutečné velikosti.

Zkušenosti s praktickou aplikací vláknobetonů v podmínkách výroby prefabrikátů prokázaly, že u vybraných prefabrikátů může být použití vláknobetonu přínosné. Při výběru prefabrikátů pro aplikaci vláknobetonu je nutno analyzovat všechny potenciální výhody i omezení, a to jak při výrobě, tak i při dopravě prefabrikátu a jeho zabudování do konstrukce. Zároveň je nutno zvážit zlepšení životnosti a spolehlivosti prefabrikátu z vláknobetonu, zejména z hlediska snížení rizika případných reklamací. V neposlední řadě může použití vláknobetonu přinést novou, dříve nedosahovanou kvalitu či vlastnost prefabrikátu, což se může stát konkurenční výhodou.

Hlavní výhody, které přináší vláknobeton ve výrobě prefabrikátů, lze shrnout do následujících bodů:

- Vláknobeton může být částečnou nebo úplnou náhradou ocelové výztuže.
- Použití vláknobetonu může snížit cenu prefabrikátu.
- Díky použití vláknobetonu lze vyrobit subtilnější prvek.
- Druhotné snížení nákladů je dáno snížením váhy výrobku – prefabrikáty s nižší hmotností mají menší nároky na dopravu a manipulaci.
- Použití vláknobetonu snižuje pracnost při výrobě.
- Vláknobeton omezuje vznik a rozvoj trhlin, což přinese kvalitnější výrobek.
- Zvýší se spolehlivost a trvanlivost dílce.
- Eliminuje se poškození prefabrikátů při dopravě, manipulaci a montáži.
- Při použití vláknobetonu se syntetickými vlákny se zvýší požární odolnost.

Úspora nákladů samozřejmě závisí i na ceně, za kterou jsou vlákna do betonu komerčně nabízena. Ekonomická rozvaha je obvykle jedním z rozhodujících kritérií pro přijetí a praktické použití vláknobetonu pro výrobu prefabrikovaného prvku.

2.4.1 Kanalizační trouby z vláknobetonu

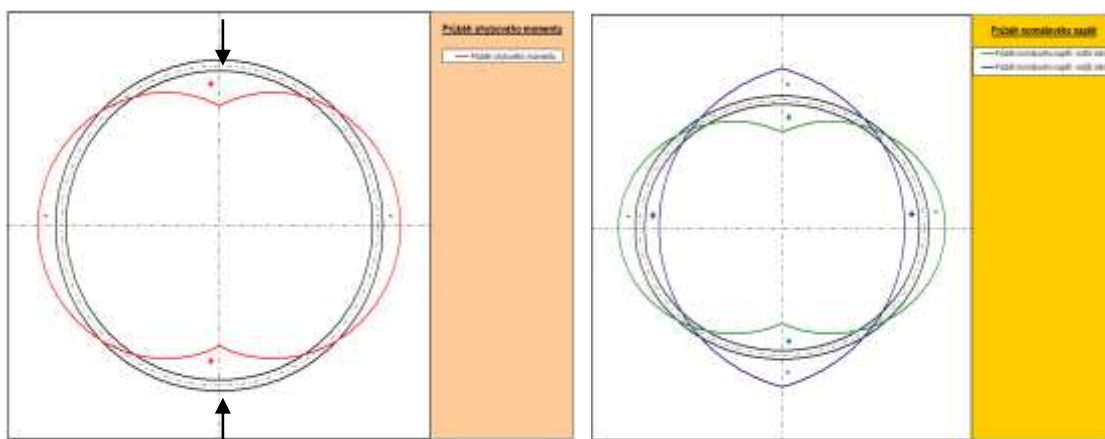
Tato aplikace vznikla ve spolupráci katedry betonových a zděných konstrukcí Stavební fakulty ČVUT v Praze, firmy Betotech, s.r.o a některých výrobců vláken. Aplikace vláknobetonu ve výrobě kanalizačních trub byla motivována snahou zefektivnit, zjednodušit a zlevnit výrobu.

Podnik vyrábí kanalizační trouby kruhového průměru v různých velikostech. Tradičně jsou trouby vyráběny ze železobetonu. Vyztužení je provedeno armokošem tvořeným spirálovitě stočenou výztuží, která je fixována podélnými pruty. Výroba armokoše je prováděna na bodové svářečce a je poměrně pracná.

Profily trub 300 – 1200 mm se vyztužují jednou vrstvou výztuže umístěnou ve středu tloušťky stěny. Z hlediska požadovaných vlastností a fungování prvku není betonářská výztuž v prvku nutná, neboť průřez kanalizační trouby není namáhán tahovým napětím. Betonářská výztuž je vkládána z důvodů zabránění havárie trub při manipulaci a dopravě a kvůli technologii výroby. Trouby jsou vyráběny ve svislé poloze a odbedňovány okamžitě po vybetonování; výztuž tvoří kostru, díky které čerstvý beton zůstane v požadovaném tvaru.

Ve výzkumném programu byla zkoumána možnost nahrazení klasické betonářské výztuže výztuží rozptýlenou a byl hledán vhodný typ vláken, která zajistí dostatečnou houževnatost výrobku, aby odolával zatížení při manipulaci a dopravě. Zároveň obsah a typ vláken měl být takový, aby čerstvá vláknobetonová směs snesla brzké odbednění.

V lineárním výpočtu byly zjištěny požadované základní hodnoty napětí, podle kterých byly navrhovány vláknobetonové receptury pro další testování.



Obrázek 2-13 Výsledky lineární analýzy kanalizačních trub (levý obrázek – uvažované zatížení a průběh ohybových momentů, pravý obrázek – průběh normálových sil)

Únosnost kanalizačních trub se ověřuje zkouškou spočívající v účinku vrcholového liniového zatížení. Proto byla provedena lineární analýza prvku, spočívající ve výpočtu mezikruží zatíženého podobně jako při skutečné zkoušce trub. Tento výpočet poskytuje základní informace o vznikajících napětích ve vláknobetonovém materiálu roury a

umožňuje vytipovat vláknobetony vhodné pro aplikaci v tomto prvku. Na obrázku (obrázek 2-13) je uvažované mezikruží s příčnými ohybovými momenty a normálovými silami vykreslenými podél obvodu prvku.

Pro testování byly vybrány dva druhy vláknobetonu – vláknobeton s 0,5% obsahem syntetických vláken a drátkobeton s drátky o délce 50 mm a průměru 1 mm s pevností cca 1000 MPa. Vláknobetony byly vyráběny z kameniva do velikosti zrn 16 mm v zavhlé konzistenci (index zhutnění 1,5 – 1,6). Pro zkoušky byla vyrobena referenční záměs z prostého betonu a záměsi s vlákny. V případě ocelových vláken byla zvolena dávka 40 kg/m³ a syntetická vlákna byla dávkována v množství 4,6 kg/m³.

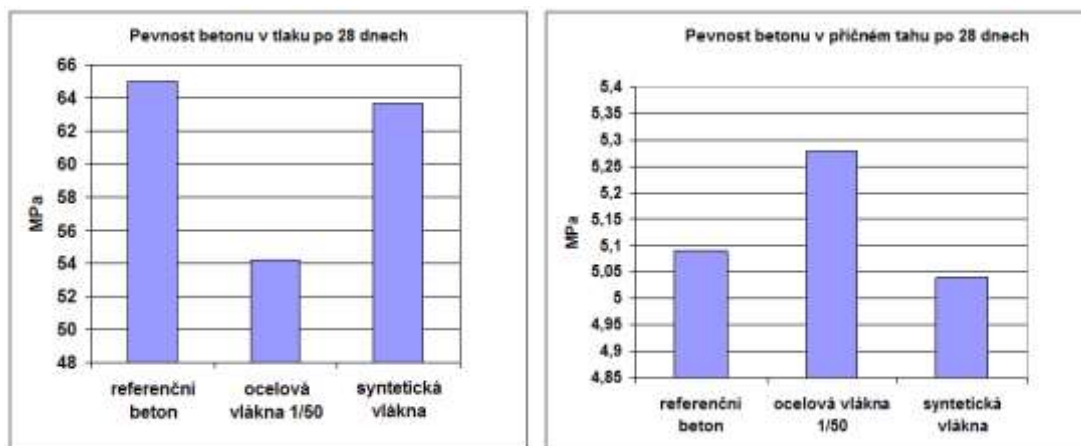
Pro oba vláknobetony byly provedeny zkoušky v tahu za ohybu, příčném tahu a tlaku. Výsledky zkoušek jsou patrné z tabulek a grafů. Ocelová vlákna snižovala pevnost betonu v tlaku, syntetická vlákna vykazovala menší pevnost betonu v příčném tahu (obrázek 2-14).

Tabulka 2-1 Výsledné pevnosti v tlaku zkušebních krychlí po 28 dnech

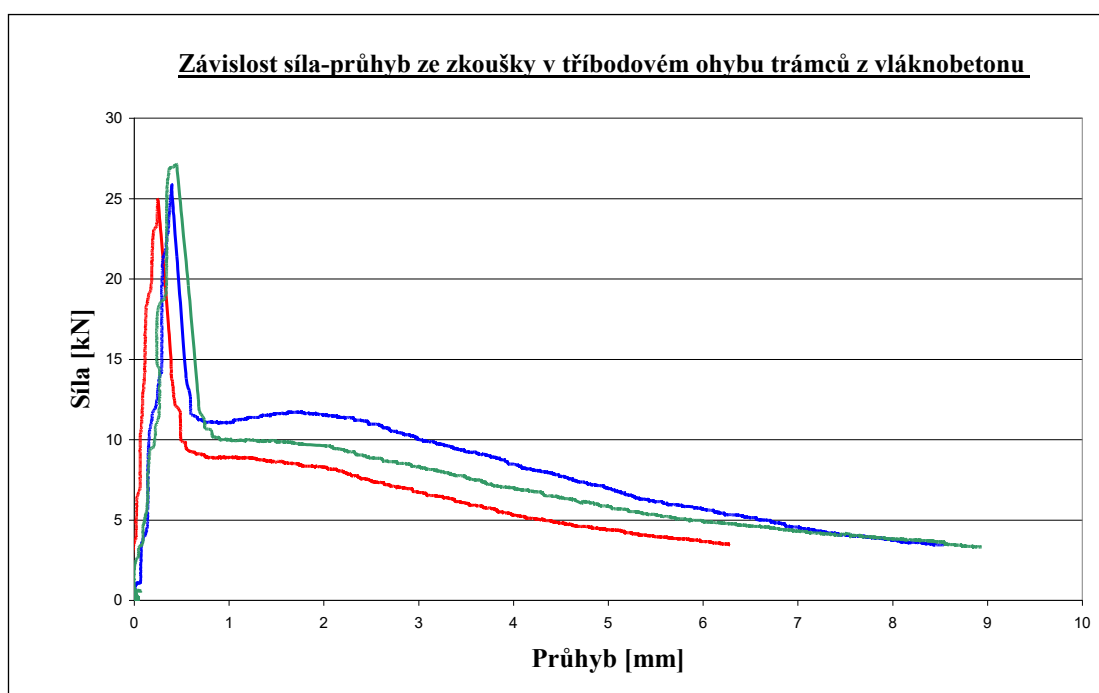
	č. prvku	pevnost v tlaku	průměr
		(MPa)	(MPa)
Prostý beton	L 01	64	65
	L 02	67,5	
	L 03	63,5	
Drátkobeton (Arcelor)	L 16	54	54,17
	L 17	54	
	L 18	54,5	
Vláknobeton (Forta Ferro)	L 46	61,5	63,67
	L 47	64,5	
	L 48	65	

Tabulka 2-2 Výsledné pevnosti v příčném tahu zkušebních krychlí po 28 dnech

	č. prvku	pevnost v tahu	průměr
		(MPa)	(MPa)
Prostý beton	L 13	5,036	5,093
	L 14	5,121	
	L 15	5,121	
Drátkobeton (Arcelor)	L 28	5,602	5,272
	L 29	5,461	
	L 30	4,753	
Vláknobeton (Forta Ferro)	L 58	5,093	5,037
	L 59	4,867	
	L 60	5,15	

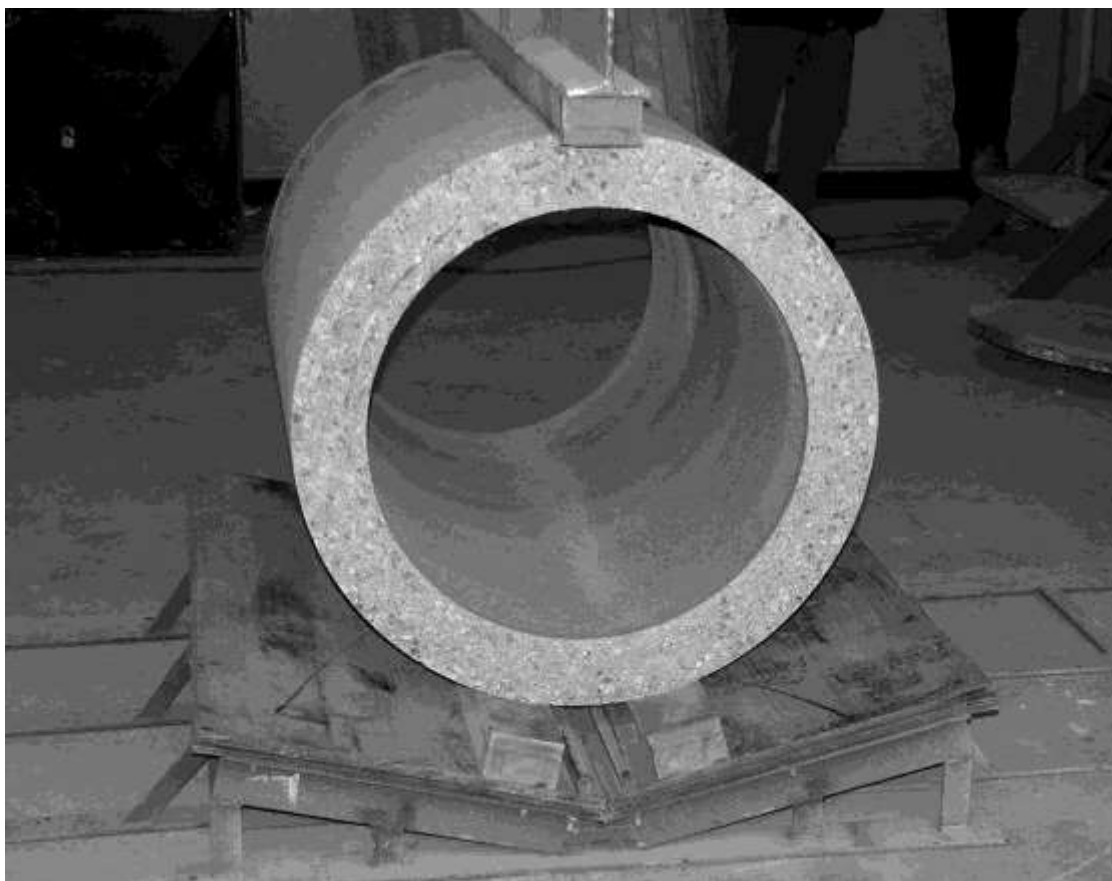


Obrázek 2-14 Porovnání pevností v tlaku a příčném tahu



Obrázek 2-15 Závislost síla-průhyb ze zkoušky v tříbodovém ohybu trámů z vláknobetonu se syntetickými vlákny Forta Ferro

Před zavedením trub z vláknobetonu do výroby bylo třeba ověřit vyrobiteľnost prvků a únosnost trub ve skutečné velikosti.



Obrázek 2-16 Uspořádání zkoušky trub ve vrcholovém tlaku

Byly vyrobeny celkem čtyři dvojice zkušebních trub o světlosti 600 mm z prostého betonu, železobetonu, z vláknobetonu a z drátkobetonu. Zkušební tělesa o délce 1 m byla zatěžována liniovým zatížením ve vrcholu. Sestava zkoušky ve vrcholovém tlaku je patrna z obrázku (obrázek 2-16).

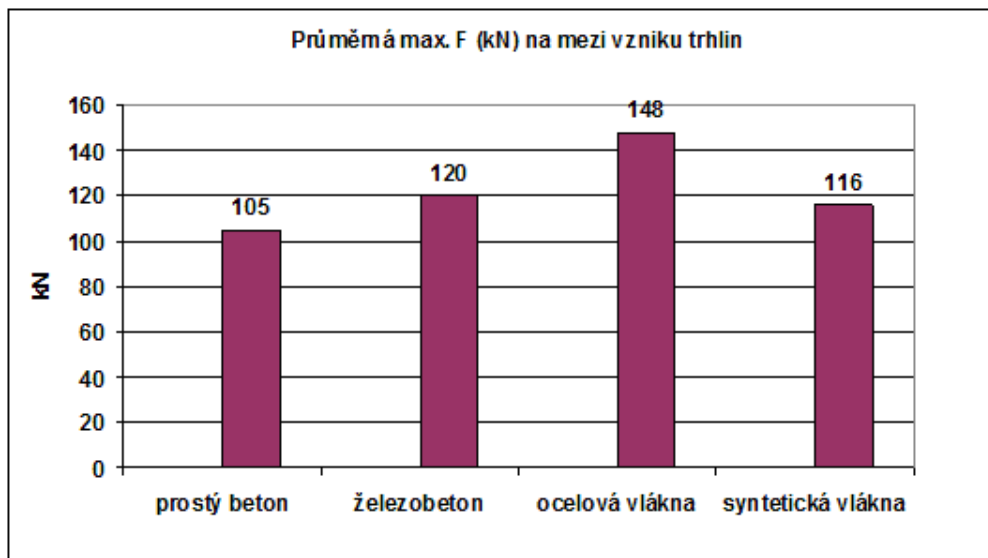
Tabulka 2-3 Výsledné síly v lisu při zatěžování zkušebních trub o průměru 600 mm

Materiál	maximální síla F (kN)		Průměr (kN)
	při vzniku trhlin	po vzniku trhlin	
prostý beton	104,0	kolaps	105
prostý beton	106,0	kolaps	
železobeton	118,0	134,0	120
železobeton	122,0	156,0	
drátkobeton	152,0	122,0	148
drátkobeton	144,0	124,0	
vláknobeton	120,0	není	116
vláknobeton	112,0	není	

Při zatěžovací zkoušce byly měřeny mezní síly v lisu, a to na mezi vzniku trhlin a na mezi únosnosti po vzniku trhliny vždy na dvou zkušebních tělesech z příslušného druhu

betonu. Bylo sledováno, zda při dosažení meze trhlin dojde k porušení prvku, nebo zda je prvek schopen přenést zatížení i po případném vzniku trhlin.

Naměřené síly pro trouby o průměru 600 mm s tloušťkou stěny 100 mm jsou v tabulce (tabulka 2-3). Porovnání výsledků je v grafu (obrázek 2-17).



Obrázek 2-17 Průměrná zjištěná síla F (kN) na mezi vzniku trhlin

2.4.1.1 Analýza, výpočty

Experimentální část programu byla doprovázena výpočty a modelováním chování trub pomocí nelineární numerické analýzy.

Vláknobetonové konstrukce mají nelineární chování, a proto je pro popis jejich zatěžování a odezvy nelineární simulace vhodná. Cílem bylo nalezení materiálových modelů pro vláknobetony použité při výrobě trub, ověření možností numerické a stochastické analýzy.

Numerické analýzy vycházely z klasických materiálových zkoušek pevností materiálů. Na základě výsledků zkoušek v tříbodovém ohybu (obrázek 2-15) byla provedena inverzní analýza. Výsledkem inverzní analýzy jsou obecně takové materiálové charakteristiky a takový materiálový model, které dostatečně přesně aproximují experimentálně zjištěné ohybové namáhání prvku. Nalezený materiálový model byl pak použit pro simulaci zatěžování trouby vrcholovým liniovým zatížením a materiálové parametry tohoto modelu jako střední hodnoty pro pravděpodobnostní analýzu.

2.4.1.2 Pravděpodobnostní analýza kanalizačních trub z vláknobetonu

Materiálové vlastnosti vláknobetonu mají stochastický charakter. Pravděpodobnostní výpočet měl ověřit možnosti, jak vystihnout nejistoty a náhodnost materiálových parametrů, a jejich vliv na výsledek numerické simulace.

V tabulkách 2-4 a 2-5 je přehled statistických parametrů stanovených na základě laboratorních měření pro vláknobeton s polypropylenovými vlákny použitý pro výrobu trub.

Tabulka 2-4 Statistické parametry vláknobetonu s vlákny Forta Ferro pro hodnoty pevnosti v příčném tahu

	Pevnost v příčném tahu [MPa]	odchylka	rozptyl	střední kvadratická odchylka	variační koeficient
1. měření	5,093	-0,056	0,003		
2. měření	4,867	0,1697	0,029		
3. měření	5,15	-0,113	0,013		
Průměr	5,037		0,015	0,122	2,4 %

Tabulka 2-5 Statistické parametry vláknobetonu s vlákny Forta Ferro pro hodnoty pevnosti v tlaku

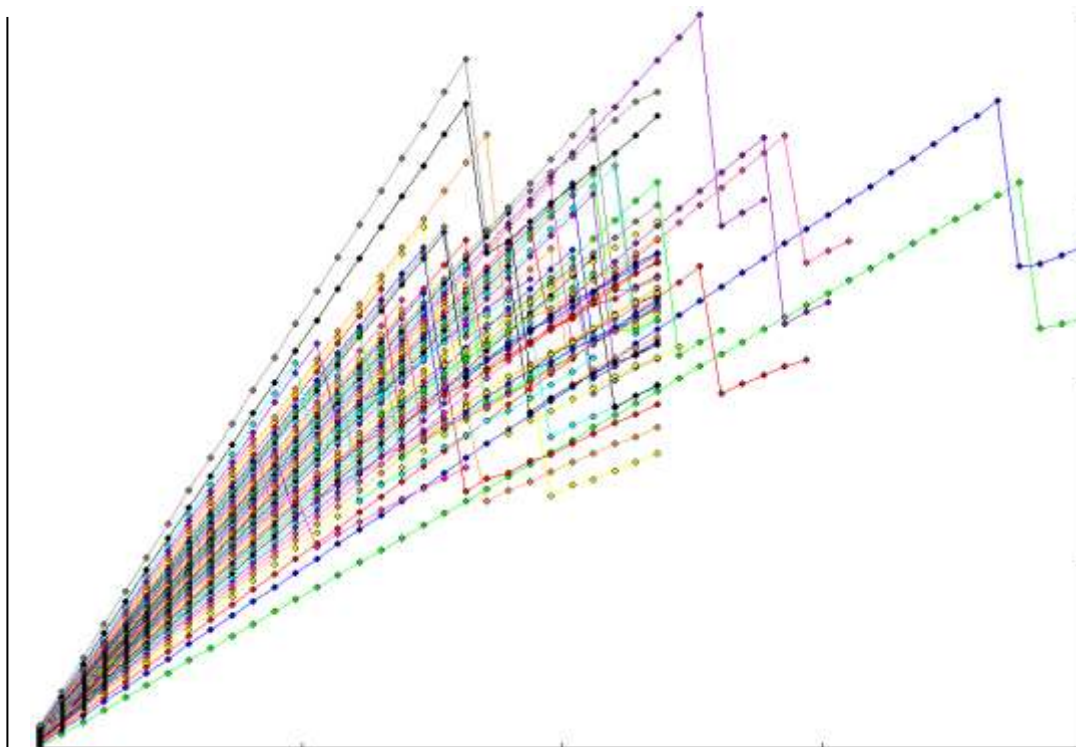
	Pevnost v tlaku [MPa]	odchylka	rozptyl	střední kvadratická odchylka	variační koeficient
1. měření	61,5	2,167	4,694		
2. měření	64,5	0,833	0,694		
3. měření	65	1,333	1,778		
Průměr	63,67		2,389	1,55	2,4%

Jako náhodné proměnné byly zvoleny tyto materiálové charakteristiky vláknobetonu:

- modul pružnosti
- pevnost v tlaku
- pevnost v tahu
- parametry popisující tahové chování vláknobetonu: lomová energie a koeficienty c_1 a c_2 .

Středními hodnotami byly hodnoty materiálových vlastností určené v inverzní analýze, bylo zvoleno normální pravděpodobnostní rozdělení náhodných proměnných.

Rozhodujícím hlediskem při posuzování trub je vznik trhliny. Vznik trhlín byl tedy kritériem i v pravděpodobnostní analýze. Na obrázku (obrázek 2-18) je svazek výsledných závislostí průhyb – síla z 50 simulačních úloh.



Obrázek 2-18 Svazek L-d diagramů ze simulace

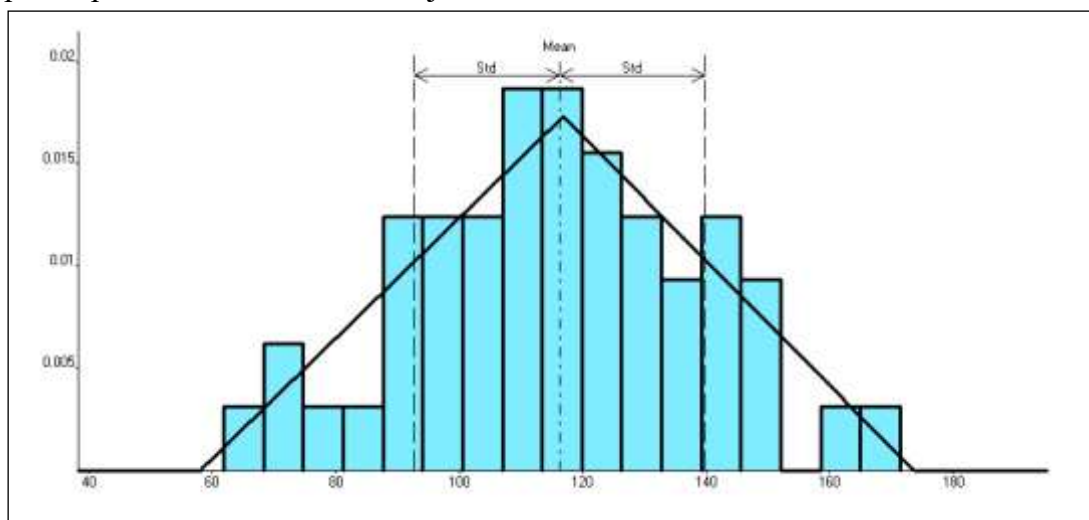
Mezní únosnost trub při zatížení vrcholovou silou vyšla v pravděpodobnostní analýze takto:

střední hodnota síly při vzniku trhlin: 116 kN

variační koeficient: 0,2

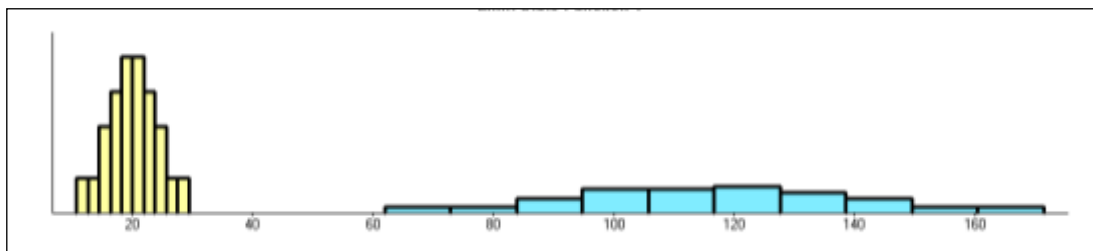
střední kvadratická odchylka: 23,6 kN

pravděpodobnostní rozložení: trojúhelníkové

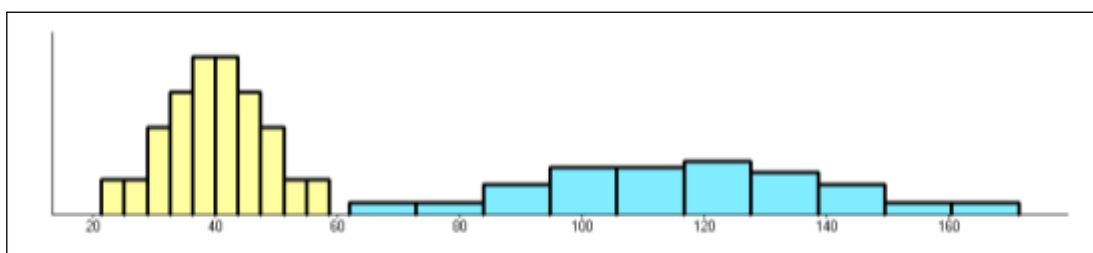


Obrázek 2-19 Pravděpodobnostní rozložení únosnosti trub pro liniové zatížení ve vrcholu
(na vodorovné ose hodnota mezní síly v kN, na svislé ose četnost)

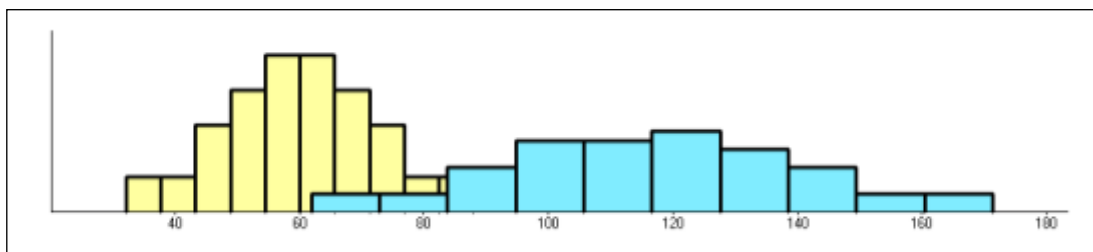
Na obrázcích (obrázek 2-20 až obrázek 2-23) je porovnání únosnosti (modré histogramy) a odezvy konstrukce na různá zatížení ve vrcholu trouby (žluté histogramy) od nejnižšího $F_1 = 20$ kN (obrázek 2-20) až k nejvyššímu $F_5 = 160$ kN (obrázek 2-23)



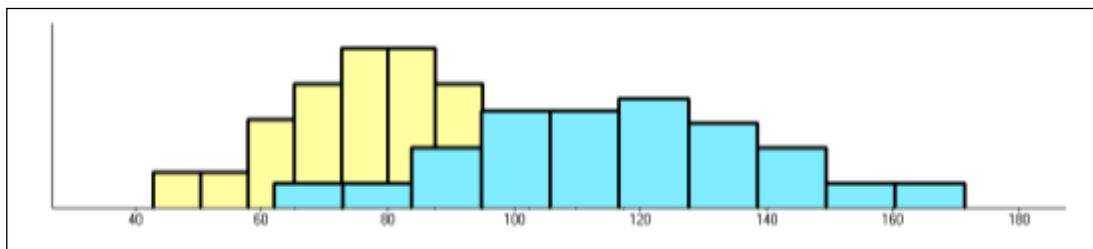
Obrázek 2-20 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_1 = 20$ kN



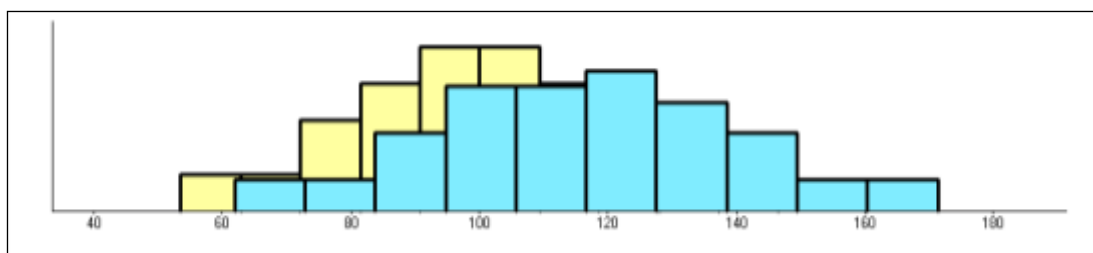
Obrázek 2-21 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_2 = 40$ kN



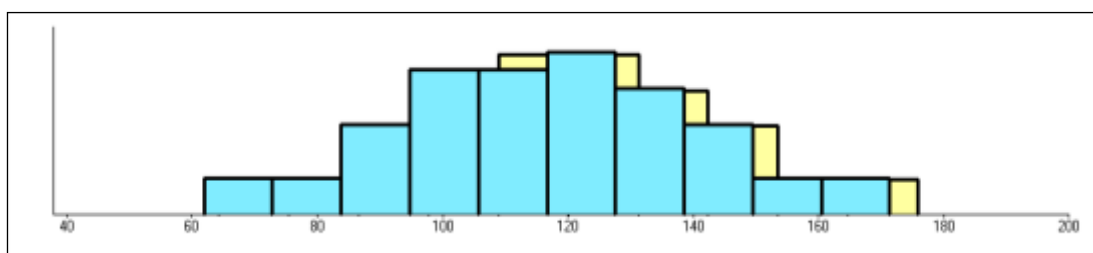
Obrázek 2-22 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_3 = 60$ kN



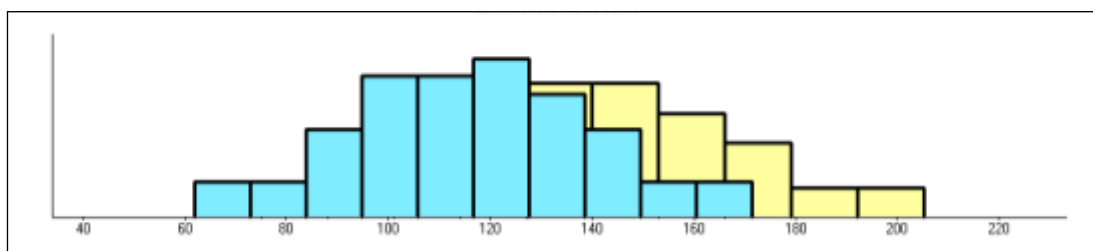
Obrázek 2-23 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_4 = 80$ kN



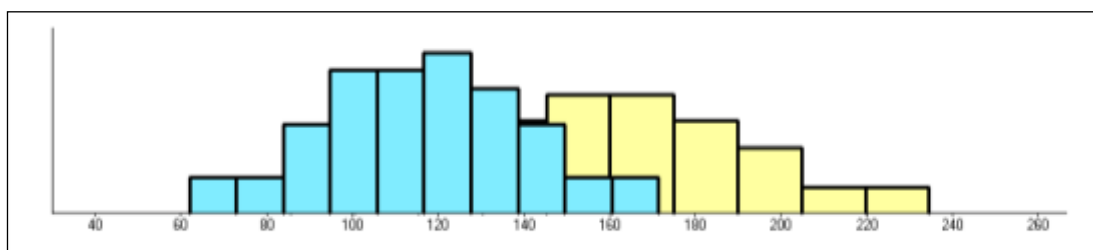
Obrázek 2-24 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_5 = 100$ kN



Obrázek 2-25 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_6 = 120$ kN



Obrázek 2-26 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_7 = 140$ kN



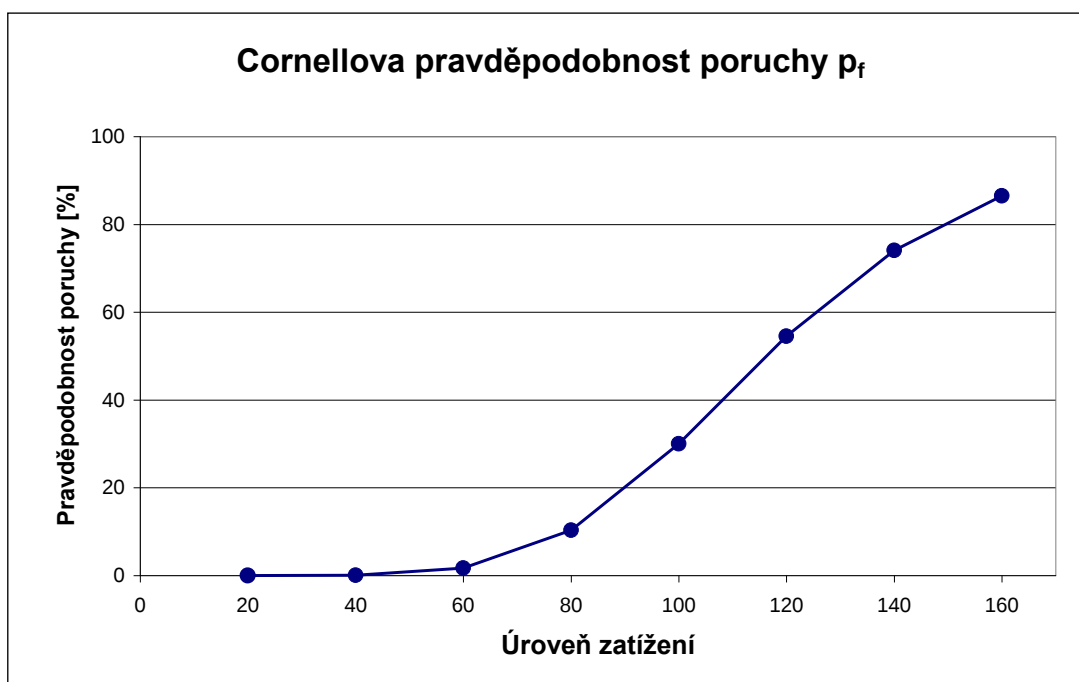
Obrázek 2-27 Porovnání únosnosti a odezvy konstrukce pro $F_8 = 160$ kN

Tabulka 2-6 Výsledné hodnoty pravděpodobnostních parametrů pro uvažované hodnoty vrcholové síly

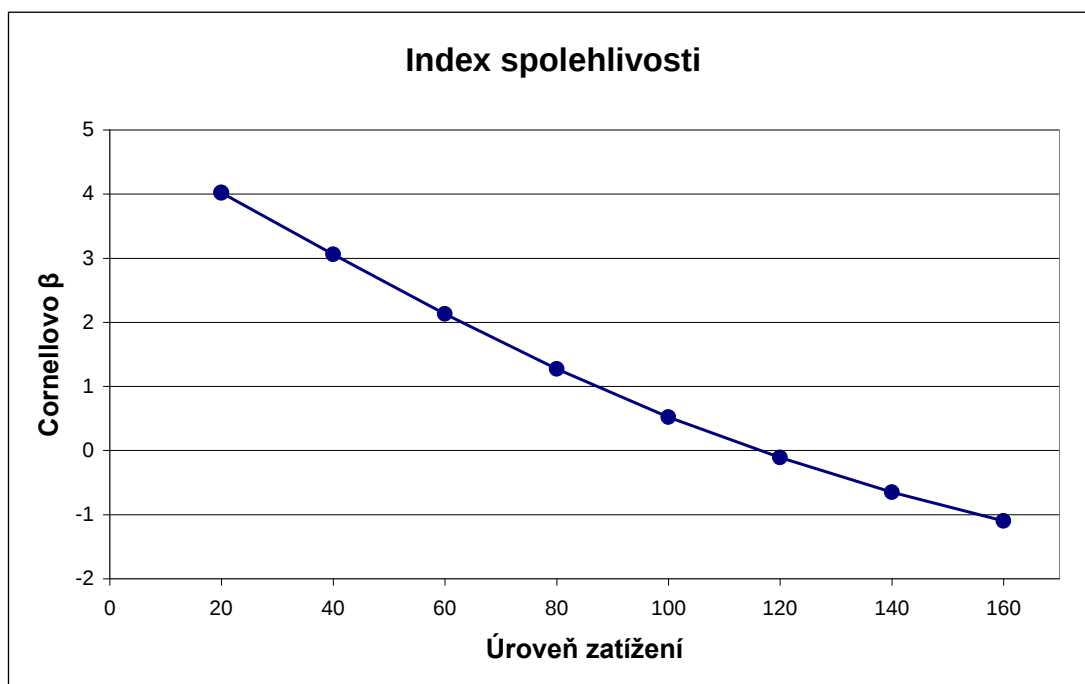
Úroveň zatížení F [kN]	20	40	60	80	100	120	140	160
Variační koeficient pravděpodobnosti poruchy	0,25	0,33	0,47	0,79	1,9	8,8	1,55	0,91
Cornellovo β	4,02	3,06	2,13	1,27	0,52	-0,11	-0,65	-1,1
Cornellova pravděpodobnost poruchy %	0,003	0,1	1,7	10,3	30	54,5	74,1	86,5
Klasická pravděpodobnost poruchy N_F / N_{tot} %	0	0	0	14	24	52	70	90

V tabulce jsou zaznamenány hodnoty Cornellova indexu spolehlivosti β .

Grafy (obrázek 2-28 a obrázek 2-29) zobrazují, jak roste pravděpodobnost poruchy, resp. klesá index spolehlivosti pro vzrůstající zatížení.



Obrázek 2-28 Pravděpodobnost poruchy v % pro různé úrovně zatížení



Obrázek 2-29 Index spolehlivosti

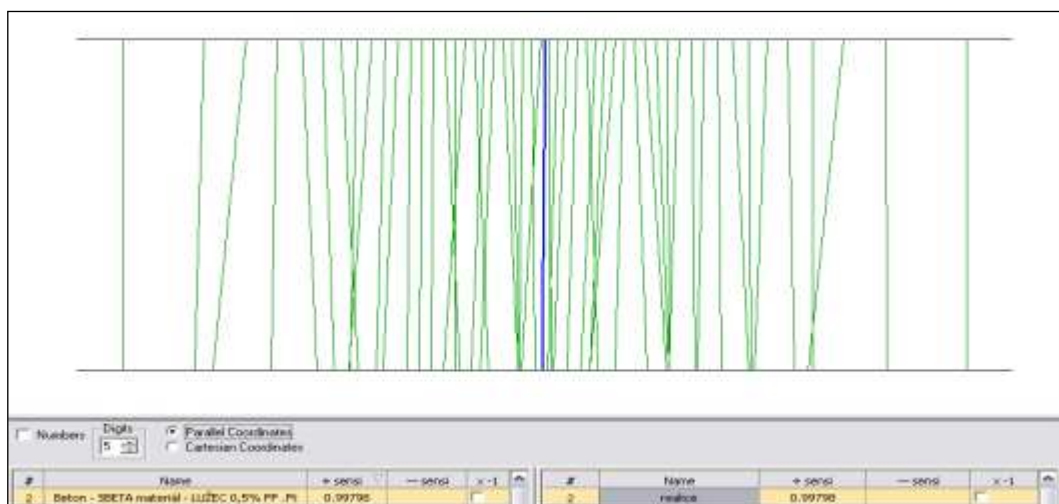
2.4.1.3 Citlivostní analýza kanalizačních trub z vláknobetonu

Citlivostní analýza může podat informaci o vlivu jednotlivých parametrů na únosnost prvku (lze určit, které proměnné jsou nejdůležitější – více ovlivní např. celkovou únosnost prvku).

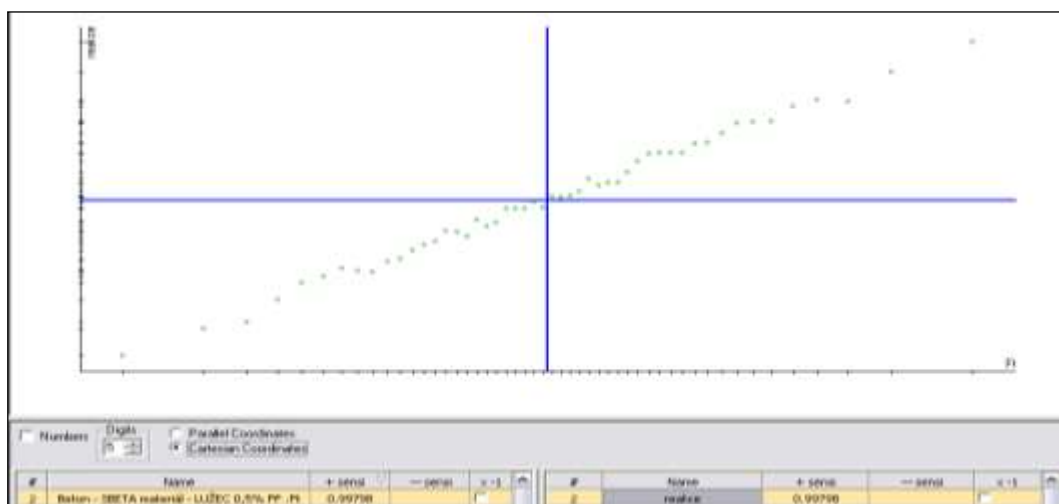
Citlivostní analýza je založena na předpokladu, že náhodná proměnná, která ovlivňuje významně proměnnou odezvy (kladně i záporně) bude mít vyšší korelační koeficient než jiné proměnné. V případě velmi malého vlivu je korelační koeficient skoro nulový. Přístup využívá neparametricky seřazené statistické korelace mezi základními náhodnými proměnnými a proměnnými z odezvy prvku. Vysoký kladný korelační koeficient (např. 0,8) značí, že odezva konstrukce nebo LSF (Limit State Function) jsou velmi citlivé na tuto proměnnou. Naopak záporný korelační koeficient znamená, že odezva konstrukce je nepřímo úměrná velikosti proměnné.

Citlivostní analýza potvrdila celkem evidentní fakt, že únosnost trub silně závisí na tahové pevnosti vláknobetonu, což ilustrují obrázky 2-30 a 2-31. Hodnota korelačního koeficientu je 0,998.

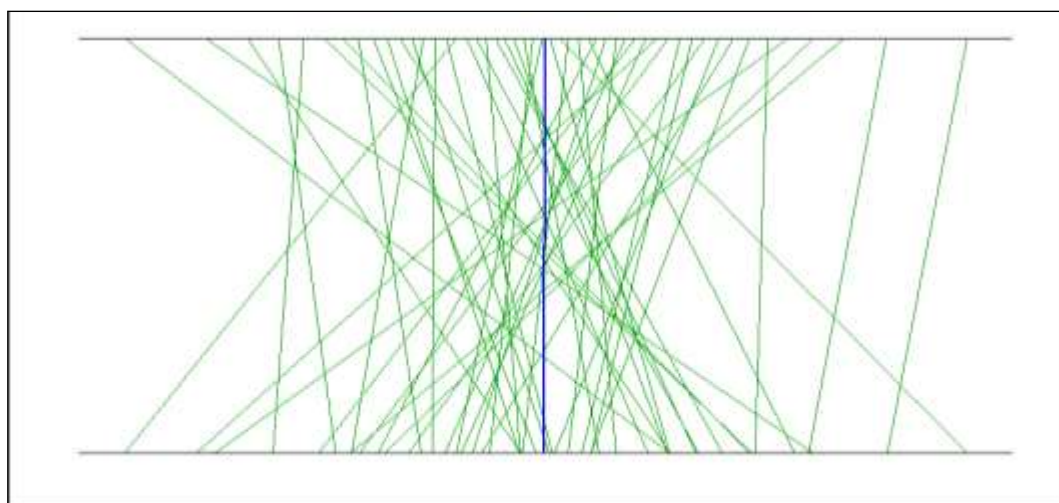
Naopak podle výsledků citlivostní analýzy změna modulu pružnosti a tlakové pevnosti ovlivní výslednou únosnost trub jen málo. Korelační koeficient pro vliv modulu pružnosti 0,08. Korelační koeficient pro vliv tlakové pevnosti 0,02.



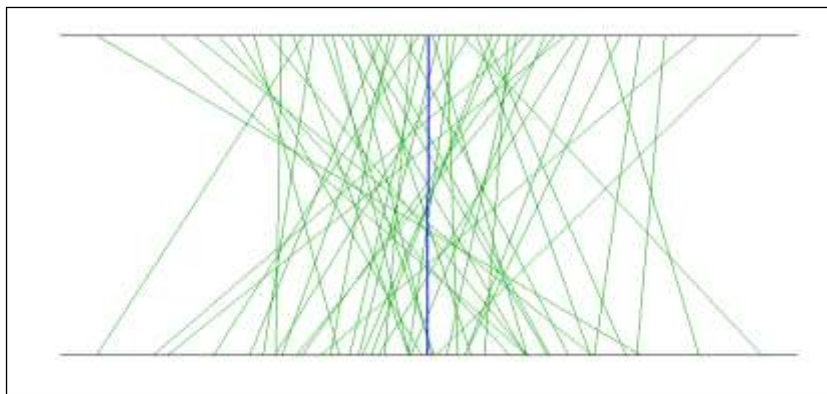
Obrázek 2-30 Zobrazení vlivu tahové pevnosti na únosnost trub v paralelních souřadnicích



Obrázek 2-31 Zobrazení vlivu tahové pevnosti na únosnost trub v kartézských souřadnicích



Obrázek 2-32 Zobrazení vlivu modulu pružnosti na únosnost trub v paralelních souřadnicích



Obrázek 2-33 Zobrazení vlivu tlakové pevnosti na únosnost trub v paralelních souřadnicích

2.4.1.4 Závěry, komentář

Hlavním cílem výzkumu bylo ověření možnosti nahradit betonářskou výztuž v troubách výztuží rozptýlenou – vlákna a stanovit vhodný typ a množství vláken. Pro danou aplikaci se nejlépe hodila vlákna ocelová, tj. drátky. Rozptýlená výztuž může v tomto prvku zcela nahradit klasickou vázanou výztuž. Výrobní postup drátkobetonových trub je jednodušší, časově méně náročný a levnější.

Obecně lze po provedeném výzkumu konstatovat, že některé vláknobetony mohou klasickou výztuž nahradit; je však nezbytné zvolit vhodný typ vláken a navrhnout vhodné složení směsi pro danou aplikaci.

Příprava aplikace byla využita k ověření možností nelineární numerické simulace pro navrhování vláknobetonových prvků a hodnocení konstrukčních prvků pravděpodobnostními metodami. Nelineární numerická simulace je efektivní nástroj v návrhu konstrukcí. Při běžném navrhování jsou materiálové nelinearity buď zanedbány, nebo uvažovány přibližně pomocí zjednodušujících předpokladů, součinitelů a empirických metod. Uvážením plastického chování a jeho správným popisem je lépe vystiženo skutečné chování prvku a konstrukce a také může takový návrh přinést materiálové úspory a ekonomický profit.

Vláknobeton je duktilní materiál se silně nelineárním chováním. Proto je vhodné pro navrhování vláknobetonových konstrukcí nelineární numerické metody využívat. Jedním ze vstupů do numerického výpočtu musí být popis materiálových parametrů, tzv. materiálový model.

V rámci výzkumu byly na základě materiálových zkoušek určeny materiálové modely pro použité vláknobetony. Nalezené materiálové modely byly pak validovány pomocí zkoušek trub ve skutečné velikosti.

Současné přístupy v navrhování a posuzování spolehlivosti stavebních konstrukcí jsou převážně založeny na polopravděpodobnostních metodách. Rozvoj výpočetní techniky a potenciál dnešních softwarů poskytují projektantům možnost uplatnit v návrhu a posouzení spolehlivosti konstrukcí plně pravděpodobnostní metody, založené na simulačních technikách. V materiálových parametrech vláknobetonů se vyskytují náhodnosti a nejistoty, které lze vyjádřit pomocí náhodných proměnných a spolehlivost návrhu pak je možné vyčíslit pomocí indexu spolehlivosti nebo pravděpodobnosti poruchy. Tento způsob navrhování byl v rámci projektu také ověřen.

2.4.2 Segmenty tunelového ostění

Pro výstavbu tunelů je drátkobeton využíván ve dvou formách – jako stříkaný a v podobě prefabrikovaných dílců tunelových ostění. Každá z technologií má své přednosti a uplatnění pro konkrétní realizaci. Tunelová ostění jsou po osazení a dokončení stavby namáhána především tlakovým namáháním. Při návrhu prefabrikátů je třeba posoudit všechna zatěžovací stádia, tedy výrobu, zvedání z formy, manipulaci, skladování, osazení dílce a pak teprve působení prvku v konstrukci. Při navrhování v různých zatěžovacích situacích vycházejí v prvku tahová napětí. Proto jsou segmenty tunelových ostění vyráběny většinou ze železobetonu. V řadě aplikací byl pro výrobu segmentů tunelových ostění s výhodou použit drátkobeton.

V České republice to bylo při výstavbě tunelů pražského metra. Tunely byly raženy metodou TBM (tunnel boring machine). Při ní jsou segmenty dopravovány k razicímu štítu a jsou strojem osazovány. Přitom se lis opírá o hranu segmentu. V místě opření lisu o segment dochází k velkým lokálním namáháním a hrozí vznik trhlin od příčných tahů. Ostění tunelů metra je složeno z šesti prefabrikovaných segmentů (tzv. tybinků), rozdílného tvaru tak, aby z nich bylo možné vytvářet tunel přímý i zakřivený. Dílce vytvářejí uzavřený prstenec s vnitřním průměrem 5300 mm. Při výrobě segmentů musí být dodržovány přísné výrobní odchylky: $\pm 0,5$ mm v šířce, $\pm 2,0$ mm v tloušťce a $\pm 0,6$ mm v délce po oblouku. Po sestavení tybinků je prostor za vnějším lícem segmentů zainjektován. Díky tomu dojde ke spolupůsobení ostění s okolní horninou a k vyrovnání zatížení na něj působících. K injektáži slouží zařízení na konci razicího štítu, výplňová malta je tlakově injektována zároveň s postupující ražbou.

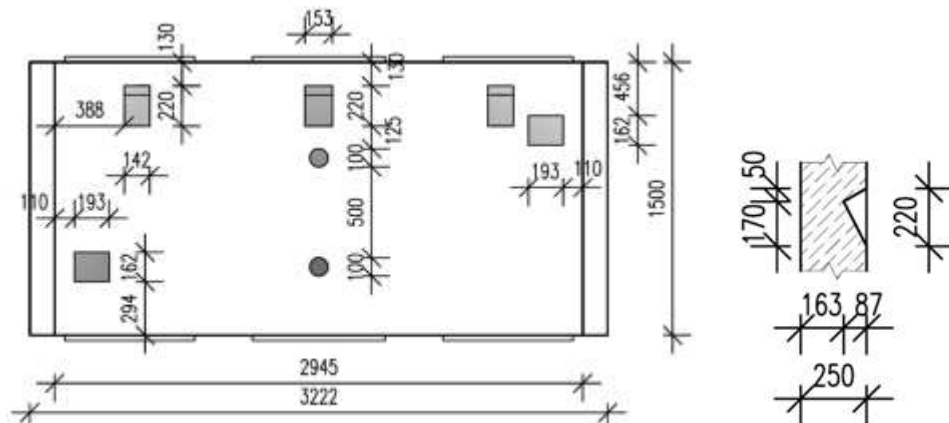
Pro výrobu části segmentů byl použit drátkobeton. Dodavatel zvolil drátkobeton s obsahem drátků 40 kg/m^3 . Pevnost v tlaku určená na krychlich o rozměru 150/150/150 mm dosahovala hodnoty 67,3 MPa.

V Kloknerově ústavu ČVUT v Praze byly provedeny zkoušky segmentu ve skutečné velikosti. Byly provedeny tři základní druhy zkoušek, zkouška v tlaku, ohybová zkouška, kdy segment byl zatěžován jako klenba a ohybová zkouška uspořádaná jako konzola.

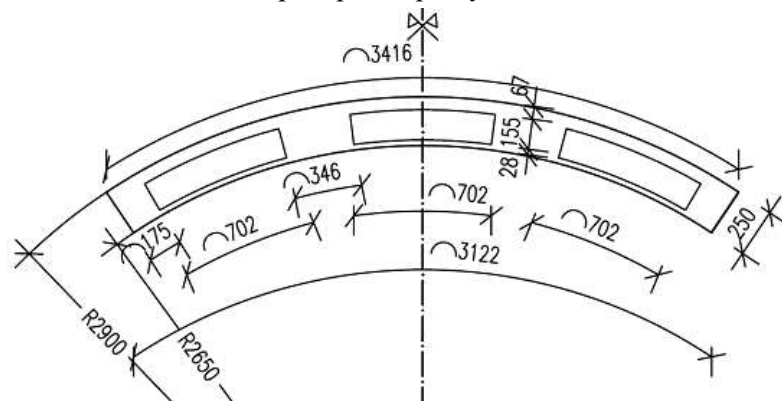
Vývoj a zkoušky tybinků doprovázela řada diskuzí a mnoho výpočtů a analýz. Jedna z provedených numerických analýz je zde popsána. Výpočetní model byl vytvořen na základě projektové dokumentace. Materiálové parametry pro numerickou simulaci byly stanoveny na základě inverzní analýzy.

Modelován byl segment A1, jehož zjednodušená geometrie je zobrazena na obrázcích (obrázek 2-34 a obrázek 2-35).

Délka prstence (tj. rozměr rovnoběžný s podélnou osou tunelu) je 1500 mm, tloušťka stěny je 250 mm a vnější poloměr je 2900 mm. Stěny tybinků jsou zeslabeny kapsami sloužícími pro zapuštění spojovacích prvků, které tybinky spínají ve vodorovném i příčném směru.



Obrázek 2-34 Zjednodušená geometrie segmentu – pohled na vnitřní stranu a řez kapsou pro spínací prvky



Obrázek 2-35 Zjednodušená geometrie segmentu

V numerické simulaci je modelována ohybová zkouška prováděná v Kloknerově ústavu. Cílem numerického výpočtu bylo určení mezní únosnosti segmentu ostění a stanovení vývoje a rozložení trhlin v závislosti na zatížení. Během experimentů byla odečítána hodnota průhybu uprostřed rozpětí a velikost zatížení. Zatěžovací křivky jsou porovnány s výsledky simulace.

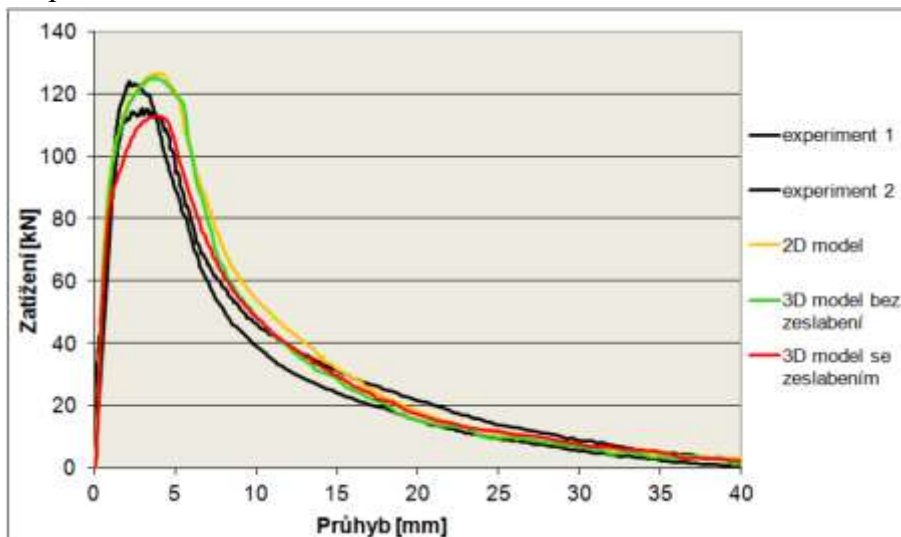
V první fázi byl vytvořen model segmentu v rovině za účelem ověření stanovených parametrů drátkobetonu. Porovnání zatěžovacích diagramů na obrázku (Obrázek 2-36) ukazuje, že únosnost 2D modelu je vyšší než únosnost segmentu zjištěná experimentem. Důvodem je zřejmě to, že rovinný model nezahrnoval zeslabená místa. Lze předpokládat nižší únosnost prostorového modelu vzhledem k oslabeným místům ve střední části segmentu.

V druhé fázi byl experiment modelován jako prostorová úloha (3D). Cílem bylo srovnání dvou a třírozměrné úlohy a jejich porovnání s realitou. Při modelování segmentu bylo problematické dosáhnout stejné sítě konečných prvků v rovině i prostoru, jelikož pro zakřivený tvar tunelového ostění se ve 2D nedá vytvořit pravidelná síť složená z totožných prvků jako je tomu ve 3D. Proto byl model vytvořen tak, aby alespoň ve střední části segmentu, kde dochází k porušení konstrukce, byla síť složená ze stejně velkých a shodně orientovaných prvků.

Výpočet v prostoru proběhl nejprve pro segment bez zeslabených míst a jeho výsledek byl porovnán s konstrukcí v rovině. Jelikož je odezva obou modelů obdobná, byl

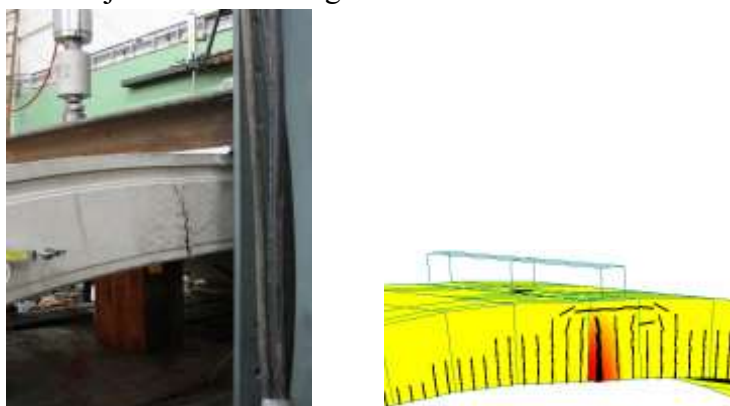
prostorový model vytvořen správně a bylo možné s ním pracovat dál. Poté byl model tunelového ostění doplněn o kapsy pro sepnutí segmentů.

Únosnost výsledného prostorového modelu se zeslabením je shodná s experimentem 1 a zatěžovací křivka má stejný charakter. Trhlina v segmentu se lokalizuje v podobné pozici jako při zkouškách v laboratoři.



Obrázek 2-36 Zatěžovací diagramy experimentů v porovnání s 2D a 3D modelem segmentu

Porovnání ohýbaného segmentu z železobetonu a drátkobetonu ukazuje, že únosnost ostění vyztuženého ocelovými vlákny je nižší. Drátkobetonový prvek však vykazuje duktilnější chování a má vyšší deformační kapacitu. Z hlediska mezního stavu použitelnosti, jmenovitě šířky trhlin, se pozitivně projevuje působení ocelových vláken. Vzniká méně trhlin, tvoří se širší pásy porušení a šířka jednotlivých trhlin při srovnatelném zatížení je menší než u segmentu železobetonového.



Obrázek 2-37 Porovnání experimentu a trhlin stanovených v počítačové simulaci [46]

2.4.2.1 Závěry, komentář

Zkoušky i numerické analýzy potvrdily, že aplikace drátkobetonu v segmentech tunelového ostění je možná. Aplikace drátkobetonu přináší výhody nejen v podobě

okamžitých ekonomických úspor, snížení pracnosti při přípravě a výrobě armokošů, ale též vyšší spolehlivost a trvanlivost konstrukce.

Při výstavbě prodloužení trasy A metra mezi stanicemi Dejvická a Motol bylo použito 15 drátkobetonových segmentů. V budoucnosti se nepochybně dočkáme využití drátkobetonu i v dalších tunelech ražených metodou TBM.

2.4.3 Vláknobetonová mostní římsa

Aplikace vláknobetonu v mostním římsovém prefabrikátu vznikla ve spolupráci katedry betonových a zděných konstrukcí Stavební fakulty ČVUT v Praze a společnosti SMP CZ, a.s. Prvotním cílem projektu bylo ověření možností výroby vláknobetonového prvku v podmínkách výroby prefabrikátů na stávajícím výrobním zařízení bez nutnosti náročnějších změn v technologii výroby nebo nároků na dodatečné vybavení výrobních linek. Výrobním podnikem byly samozřejmě pozorně sledovány ekonomické ukazatele; vyhodnocení z více hledisek ukázalo, že zavedení výroby vláknobetonového prefabrikátu přinese kromě zvýšené životnosti prvku i okamžité zisky.

2.4.3.1 Popis prvku

Na některých typech mostů tvoří mostní římsa boční pohledový líc nosné konstrukce mostu.

Mostní římsy nejsou vždy součástí nosných konstrukcí, přesto mohou být vystaveny značnému namáhání, nepříznivému působení atmosférických vlivů a rozmrazovacích solí a musejí si zachovat dokonalý vzhled při dlouhodobém působení všech vnějších vlivů včetně počasí. V našich podmínkách má mít mostní římsa životnost minimálně 50 let. Působení degradačních vlivů je velmi intenzivní; může beton výrazně narušit během poměrně krátké doby několika let.

U prvku je třeba eliminovat vznik a rozvoj trhlin, které jsou způsobené především objemovými a teplotními změnami. A to z důvodu esteticky – pohled na římsy často ovlivňuje vzhled celého mostu. Druhým důvodem je soudržnost kotev říms, zabránění korozi úchytných prvků a eliminaci nebezpečí vytržení kotev. Prvek musí být odolný proti vzniku trhlin a poškození hran a rohů, a dalším typům porušení prvku při transportu, aby nedošlo k odlomení částí prvku nebo celé římsy po osazení. Všechny tyto poruchy mohou být zdrojem úrazů chodců a poškození projíždějících vozidel.

2.4.3.2 Vývoj a laboratorní zkoušky betonu se syntetickými vlákny

Po zvážení všech těchto požadavků na mostní římsy byl jako nejvhodnější materiál určen vláknobeton se syntetickými vlákny. Nejprve proběhl návrh vláknobetonové směsi. Na základě analýzy potřeb výrobního závodu bylo rozhodnuto vyvinout recepturu vláknobetonu betonu C 30/37 XF4. Tato třída betonu je velmi často používána v rámci výroby prefabrikátů pro objekty pozemních komunikací, jako jsou například prvky mostních konstrukcí, protihlukové stěny a silniční svodidla. Byl navržen samozhutnitelný beton.

Praktická využitelnost betonu pro výrobu prefabrikátů v podmínkách konkrétního výrobního závodu byla v popředí zájmu. Proto základním požadavkem bylo využití složek pro výrobu betonu, které byly ve výrobním závodě již zavedeny.

Hlavní problematikou, kterou bylo nutno řešit při návrhu receptury, bylo dosažení reologických vlastností čerstvého betonu vyhovujících pro samozhutnitelný beton. Pro zamýšlenou výrobu byla důležitá nízká viskozita čerstvého betonu, což si vyžádalo relativně vysokou dávku vody v receptuře. Pro zajištění požadované odolnosti pro stupeň vlivu prostředí XF4 bylo vedle provzdušnění nutno použít i mikrosiliku.

Seznam použitých složek vláknobetonu je v tabulce 2-7.

Tabulka 2-7 Složení vláknobetonu pro mostní římsu

cement	CEM I 52.5 R
fíler	mletý vápenec
kamenivo	těžené kamenivo frakcí 0-4 a 4-8 mm
	drcené kamenivo frakce 8-16 mm
plastifikátor	2 typy plastifikátorů na bázi karboxylátů
přísky	provzdušňovací přískada
	stabilizační přískada
	křemičitý úlet (mikrosilika)
	syntetická vlákna Forta Ferro délky 54 mm

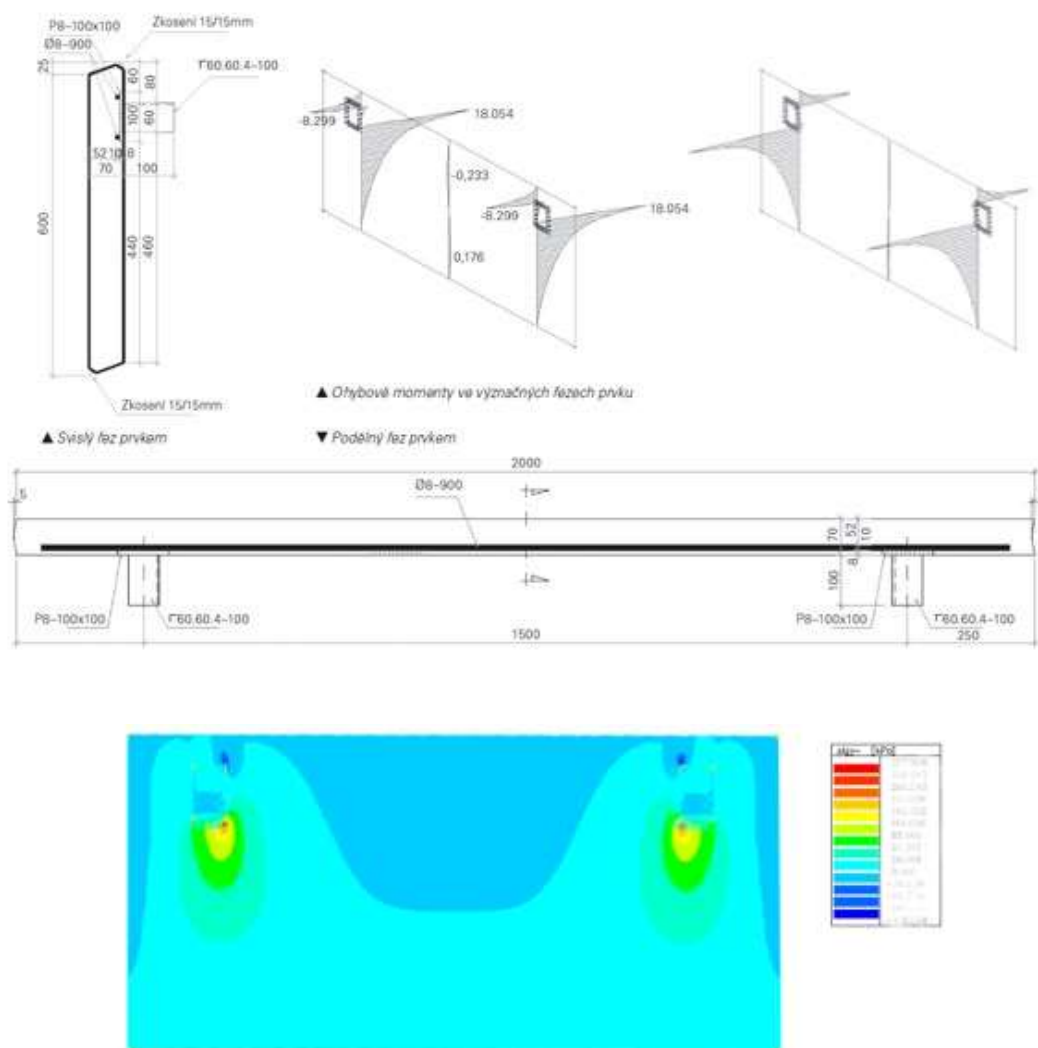
Mostní římsa byla prvním prefabrikátem, kde byla vyvinutá receptura použita pro hromadnou výrobu. Provozní zkoušky ukázaly, že samozhutnitelné vlastnosti betonu lze v daných podmínkách zachovat při dávce syntetických vláken přibližně do 4 kg/m^3 . Při vyšší dávce již vlákna ovlivňovala reologické vlastnosti čerstvého betonu do té míry, že beton vyžadoval hutnění. Na základě provozních zkoušek byla stanovena definitivní receptura s dávkou vláken $3,5 \text{ kg/m}^3$. Standardní průkazní zkoušky vláknobetonu ukázaly průměrnou pevnost 52 MPa při směrodatné odchylce 2,99 MPa. Rovněž odolnost betonu proti působení vody, mrazu a chemických rozmrazovacích látek byla s rezervou vyhovující, průměrná hodnota odpadu byla 100 g/m^2 po 75 cyklech metodou C dle ČSN 73 1326 změna 1, což je hluboko pod maximální přípustnou hodnotou odpadu 1000 g/m^2 .

2.4.3.3 Provozní zkoušky a výroba

Vláknobeton byl vyráběn v mísicím centru standardním postupem – zamísila se základní betonová matrice a do ní byla přidána dávka vláken. Vyrobená směs byla dobře zpracovatelná, vlákna v ní byla rovnoměrně rozptýlena a dařilo se ji bez problémů čerpat. Proběhly první zkušební záměsi čerstvých vláknobetonů přímo ve výrobně prefabrikátů, která disponuje kvalitním mísicím centrem, ovládaným pomocí výpočetní techniky. Běžné složky byly váženy a dávkovány standardním způsobem a vlákna byla přidávána do míchačky ručně obsluhou mísicího centra. Výhodou je, že vlákna Forta Ferro jsou dodávána v balení po 1 kg v rozpustitelných papírových sáčcích. Ruční dávkování přímo do míchačky je tedy velmi snadné. Z hlediska dostatečného rozptýlení vláken je rozhodující dodržení jejich včasného dávkování do suchých složek před dávkováním záměsové vody. Doba míchání pro spolehlivé rozptýlení vláken je 90 až 120 sekund. Čerstvý beton ve výrobě byl dopravován pomocí jeřábu a bádii a ukládán do forem.

2.4.3.4 Výpočetní analýza

Modelové simulace a nelineární výpočty byly využity k získání štíhlejšího prvku. Účelem bylo optimalizovat tloušťku prvku a vyztužení klasickou betonářskou výztuží. Analýza vycházela z lineárního numerického výpočtu, v kterém byla stanovena základní napjatost v prvku především v oblastech kotev římsy. V další fázi byly provedeny nelineární numerické simulace, které mohou lépe popsat chování vláknobetonu při mezním namáhání. Ukázalo se, že díky ověřenému duktilnímu chování vláknobetonu, které zajistí příznivý charakter porušení prvku a zamezí nebezpečnému porušení křehkým lomem, je možné snížit množství klasické betonářské výztuže.



Obrázek 2-38 Tvar a napětí mostní římsy

Výsledkem optimalizace byl nový produkt, který byl dále ověřován z hlediska dlouhodobého chování. Uskutečnila se řada dalších zkoušek, potom výroba první větší série, následovala výroba upravené série.

Prvky byly umístěny na několik mostních objektů s cílem ověřit užité vlastnosti v delším časovém horizontu při působení teplotních změn a rozmrazovacích solí. Prvky jsou dále sledovány a je hodnocen stav jejich povrchu.



Obrázek 2-39 Vláknobetonové mostní římsy

2.4.3.5 Závěry, komentář

Mostní římsové prefabrikáty se staly standardní součástí výrobního sortimentu a běžnou součástí vybavení některých mostů. Inovace spočívá v nahrazení části ocelové výztuže původního prefabrikátu z běžného betonu polypropylenovými vlákny rozptýlenými v betonu.

Užití polypropylenových vláken v betonu změnilo chování prvku v houževnatější a odolnější vůči nárazům, s většími deformačními schopnostmi. Umožnilo úsporu ocelové výztuže o 42 % a zmenšilo spotřebu samotného betonu o 27 %, protože prvek díky novým vlastnostem může mít menší tloušťku při zachování všech funkcí. Zmenšená spotřeba materiálů a menší tloušťka snížila hmotnost prvku o 25 %. Jeho cena se tím snížila o 10 %. Nepřímé úspory představují snížení nákladů na dopravu, manipulaci ve výrobě i při osazování. Převážně se menší náklad a více prvků najednou a manipulace je snadnější, případně se též zmenší nároky na skladovací plochy. Vlákná dále přispívají k větší trvanlivosti a životnosti prvku, čímž se mohou snížit náklady na údržbu. Tím, že je materiál houževnatější a prvek díky tomu lépe odolává nárazům, nehrozí již otlučení a olámaní hran a rohů prvku a snížil se počet reklamací.

Vývoj, laboratorní a provozní zkoušky vláknobetonu se syntetickými vlákny prokázaly možnost průmyslové výroby prefabrikátů z vláknobetonu bez nutnosti úprav stávajícího výrobního zařízení i bez nutnosti změn v systému řízení kvality výroby. Zároveň se v praxi úspěšně podařilo eliminovat některé omezující vlastnosti vláknobetonu, jako například vliv vláken na reologii čerstvého betonu a relativně vyšší náklady na 1 m³ vláknobetonu v porovnání s běžným betonem.

Užití vláknobetonu se syntetickými vlákny zvýší životnost a trvanlivost, takže prvek je vhodný též z hlediska udržitelného stavění a environmentálního hodnocení – šetří primární zdroje – ocel a cement – a tím snižuje energetickou náročnost. Je ekologicky nezávadný a má vyšší požární odolnost.

Při optimalizaci se osvědčila nelineární numerická simulace jako výborný nástroj pro popis chování vláknobetonového prvku.

Produkt je příkladem dobré spolupráce akademické sféry s průmyslem a byl ohodnocen Cenou Inovace 2008.

2.4.4 Plovoucí vláknobetonová plošina

Příkladem použití vláknobetonu v neobvyklém prvku je plovoucí plošina. Projekt plovoucích ostrůvků pro silně ohrožený druh ptáka rybáka obecného byl realizován ve spolupráci společnosti Českomoravský štěrk, a.s., Betoniky s.r.o. a katedry betonových a zděných konstrukcí ČVUT.

Motivací celého projektu byla snaha firmy Českomoravský štěrk prezentovat se ekologickými počiny.



Obrázek 2-40 Rybák obecný

Rybáci obecní (Obrázek 2-40) jsou ptáci podobní rackům, v České republice hnízdí pouze na několika lokalitách, a to v počtu asi jen 400 - 600 párů. Ze zákona 114/92 Sb. o ochraně přírody jsou chráněni jako silně ohrožený druh, jsou též zařazeni do Červené knihy ČR a v rámci Evropy jsou chráněni v rámci seznamu Směrnice Rady EU č. 79/409/EEC o ochraně volně žijících ptáků. Rybáci jsou ohroženi zejména úbytkem jejich přirozených hnízdišť. Hnízdí na štěrkových nebo hliněných místech bez vegetace, ta však kvůli regulaci vodních toků z volné přírody mizí. Na štěrkopískových jezerech u Tovačova jsou vytvářena pro rybáky umělá hnízdiště. V oblasti Tovačova bylo spuštěno na vodu několik plovoucích ostrůvků pro hnízdění ohroženého ptačího druhu. Ostrůvky byly původně vyráběny ze dřeva a plastových barelů. Firma ČMŠ a.s. přišla s návrhem, aby byl ostrůvek vyroben z materiálu, který je jejich hlavním výrobním produktem – z betonu.

Realizace projektu byla rozdělena do dílčích etap:

- návrh konstrukce a tvaru ostrůvku, specifikace požadavků na beton
- návrh složení vhodného betonu a jeho testy
- návrh technologie výroby a výroba prototypu
- test výrobku v praxi

2.4.4.1 Volba tvaru a materiálu

Pro návrh tvaru a rozměrů plovoucího ostrůvku byla stanovena následující kritéria jako podklad pro návrh:

- ostrůvek musí plavat ve stabilní poloze
- tvar má být takový, aby bylo možné spojit několik ostrůvků a vytvořit „ptačí kolonii“
- plocha pro ptáky má být odvodňována
- ostrůvek bude ukotven na dno jezera
- rozměry mají umožnit transport na běžných nákladních automobilech
- hmotnost má být taková, aby bylo možné ostrůvek transportovat běžnými autojeřáby.

Jako materiál pro výrobu plovoucího ostrůvku byl zvolen vláknobeton.

Předpokládala se výroba většího počtu ostrůvků, proto dalším požadavkem byla snadná vyrobitelnost a jednoduchost tvaru.

Půdorysný tvar prvku byl odvozen z požadavku na spojování jednotlivých ostrůvků. Ostrůvky s půdorysem ve tvaru pravidelného šestiúhelníku lze spojovat do útvaru, který připomíná včelí plástev.

Tvar v řezu byl určen na základě požadavků, že horní plocha bude mít zvýšený okraj a deska, která horní plochu tvoří, bude pokryta šterkem. Této hmotnější horní části prvku bylo nutné vytvořit protiváhu, aby plošina plavala v požadované stabilní poloze.

Celkové rozměry a hmotnost plovoucí plošiny byly omezeny tím, aby bylo možné plošinu převážet na plochách nákladních automobilů, vyloučit nadrozměrný náklad a transportovat plošinu na vodní hladinu pomocí běžně dostupného jeřábu.

Výsledkem optimalizace rozměrů je prvek ve tvaru šestibokého hranolu o výšce cca 2m vepsaný do kružnice o průměru 2m, se stěnami o tloušťce 60mm a dnem o tloušťce 200mm, s vnitřní dutinou vyplněnou „jádre“ z polystyrenu.

Nad hladinou je vytvořena odvodňovaná plocha s vyvýšeným okrajem. Pěticentimetrová vrstva betonu odděluje tuto plochu a vnitřní dutinu, která je vyplněna tvrzeným polystyrenem. Do stěn horní části jsou osazeny odvodňovací kanálky, aby byla plocha pro hnízdění trvale odvodňována.

Do dna jsou osazeny transportní úchyty (plošina se vyrábí a transportuje v poloze dnem vzhůru). Úchyty po osazení na vodu slouží k ukotvení prvku na dno jezera.

Celková hmotnost je necelé tři a půl tuny. Plošinu lze převážet na ložné ploše běžných nákladních automobilů.

2.4.4.2 Specifikace betonu, návrh jeho složení a výsledky testů

Pro výrobu plovoucí plošiny byl navržen vysokopevnostní vláknobeton se syntetickými (polymerovými) vlákny; obsah vláken je 0,55% objemu. Byla použita jemná frakce kameniva s velikostí zrn do 8mm. Navržený vláknobeton je velmi lehce zhutnitelný a má vysokou odolnost proti průsaku vodou. Složky jsou uvedeny v tabulce 2-8.

Tabulka 2-8 Složení vláknobetonu pro plovoucí ostrůvky

Složka	Popis / hodnota
Cement	CEM I 42,5 R
Kamenivo	frakce 0 / 4
	frakce 4 / 8
Příměs	Mikrosilika
Vodní součinitel	0,48
Superplastifikační přísada	polykarboxylát éter s dlouhou dobou udržení konzistence
Rozptýlená výztuž	Syntetická makrovlákna

Pokusně byla vybetonována stěna o tloušťce 60 mm, aby se ověřilo, že takto tenká stěna prvku bude dostatečně probetonována a nebudou v ní vznikat vzduchové bubliny a nedostatečně zhutněná místa. Bylo ověřeno, že ztvrdlý vláknobeton ve stěně je velmi hutný.



Obrázek 2-41 Ostrůvky spojené do většího útvaru



Obrázek 2-42 Transport tělesa jeřábem na vodu



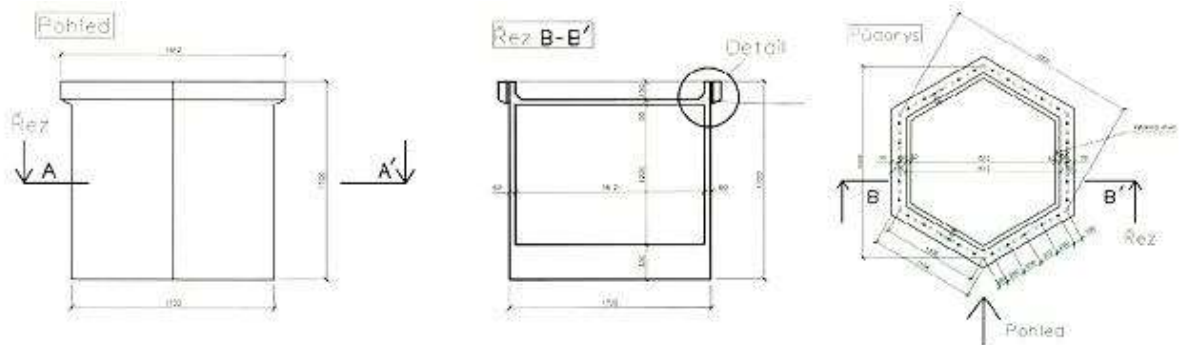
Obrázek 2-43 Samovolné otočení tělesa ve vodě



Obrázek 2-44 Rybáci obecní na plovoucím ostrůvku

2.4.4.3 Návrh technologie výroby a výroba prototypu

Návrh technologie výroby prvku byl proveden s uvažáním možností zvolené výrobní prefabrikátů s moderním mísícím jádrem, neobvyklého tvaru prvku, vysokým požadavkům na kvalitu betonu a na přesnost výroby.



Obrázek 2-45 Tvar plovoucího ostrůvku

Pro výrobu byla zvolena opakovatelně použitelná dřevěná forma ze systémového bednění (obrázek 2-46), která umožňuje vysokou přesnost výroby a její opakovatelnost. Výroba byla zvolena v obrácené poloze dnem vzhůru tak, aby beton lépe zatekl do složitějších detailů okrajového horního lemu a aby bylo možné vytvořit masivní dno. Horní plocha s vyvýšeným lemem je vytvořena pomocí polystyrénové vložky. Do okrajového lemu jsou vloženy odvodňovací plastové trubky.



Obrázek 2-46 - Bednění okrajového lemu a pláště



Obrázek 2-47 Okrajový horní lem



Obrázek 2-48 Osazení polystyrénového jádra

Betonáž probíhá ve dvou fázích. Nejprve je zaformován okrajový horní lem (obrázek 2-47). Do pracovní spáry se vkládají profily betonářské výztuže, aby bylo zajištěno propojení horní a spodní části prvku. Po betonáži se do čerstvého betonu osadí vlastní polystyrénové jádro (obrázek 2-48). Následuje technologická přestávka cca $\frac{1}{2}$ dne tak, aby dostatečně zavadla a zatvrdla spodní vrstva betonu. Poté je osazeno bednění pláště a prvek je dobetonován. Do dna jsou osazena oka, sloužící pro manipulaci a transport a pro ukotvení plošiny v jezeře (obrázek 2-50).



Obrázek 2-49 Betonáž dna ve formě



Obrázek 2-50 Pohled na odformovaný prefabrikát

První plošina byla spouštěna na vodu v červenci 2009. Prvek byl autojeřábem přenesen do vody, ve vodě se plošina sama otočila (obrázek 2-43) do požadované stabilní polohy dnem dolů. Byla odstraněna polystyrénová vložka, která sloužila jako bednění pro horní plochu ostrůvku. Ostrůvek byl odtažen dál od břehu (obrázek 2-51) a byl ukotven třemi kotvami. Již druhý den po spuštění na vodu byli na ostrůvku spatřeni rybáci obecní (obrázek 2-51).



Obrázek 2-51 Doprava ostrůvku na vodní ploše

2.4.4.4 Závěry, komentář

K dnešnímu dni bylo vyrobeno již 40 plovoucích ostrůvků. Jsou osazeny na vodních plochách v České republice a v Polsku a rybáci na nich vyvedli již několik generací mláďat.

Vytvořená plovoucí plošina může sloužit nejen pro osídlení vodní faunou a flórou, ale např. i jako přístávací molo pro malá plavidla nebo jiným účelům, ať už sportovním nebo hospodářským.

Úspěšná realizace plovoucí vláknobetonové plošiny dosáhla vysokého ocenění v rámci prestižní soutěže INOVACE ROKU 2009.

2.4.5 Obkladové desky z vláknobetonu

Povrchové úpravy tunelových ostění se provádějí torkretováním, přibetonováním vyztužené vrstvy betonu do bednění nebo obkladem. Motivací při návrhu tenkých obkladových desek z vláknobetonu bylo zrychlení výstavby a prodloužení životnosti sekundárního ostění tunelu.

V tunelovém komplexu Blanka v oblasti Špejchar jsou osazeny desky jako pohledová konstrukce v horní části tunelového ostění. V této části je hloubený tunel prováděný metodou milánské stěny; na ty je třeba provést povrchové úpravy. Zde prezentované řešení je výhodné z hlediska rychlosti provádění a odstranění mokřých procesů in situ.

Navržené desky mají rozměry $1,6 \times 2,4$ m a tloušťku 45 mm. Na výrobu byl použit samozhutitelný vláknobeton s maximální velikostí zrna 8 mm. V 1 m^3 jsou 2 kg polypropylenových mikrovláken o délce 12 mm a $\phi 0,018$ mm. Do střednicové plochy obkladových desek se vkládají výztužné sítě z důvodů bezpečnosti při manipulaci s obkladovými deskami. Bylo navrženo několik variantních řešení pojistné výztužné sítě – síť z čedičové tkaniny, vyztužení skelnou rohoží a sítěmi z ocelovými pruty. Pro realizaci byla vybrána varianta sítě z pozinkovaného drátu o profilu 2,8 mm.

Do monolitické stěny jsou obkladové desky kotveny pomocí závitových tyčí a kotevních šroubů. Ty umožňují jejich rektifikaci v obou směrech zaručující dosažení dokonale rovného povrchu obkladu. Mezi obkladovými panely a milánskou stěnou zůstává vzduchová mezera 6 až 20 cm podle nerovností monolitické stěny.

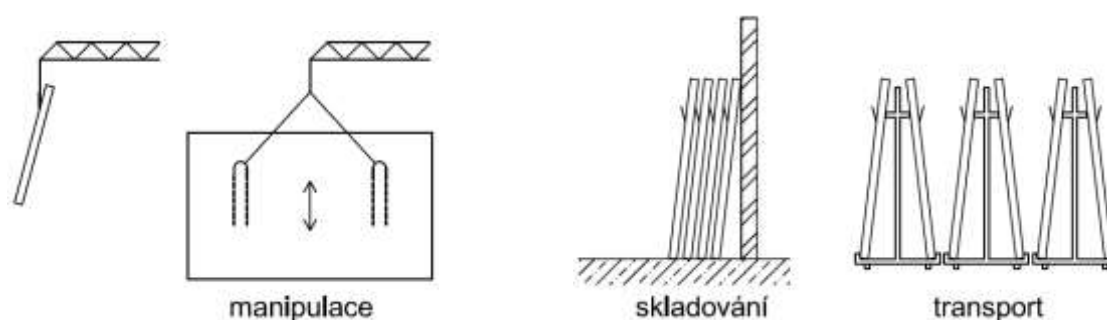


Obrázek 2-52 Osazování obkladových desek v tunelu [4]

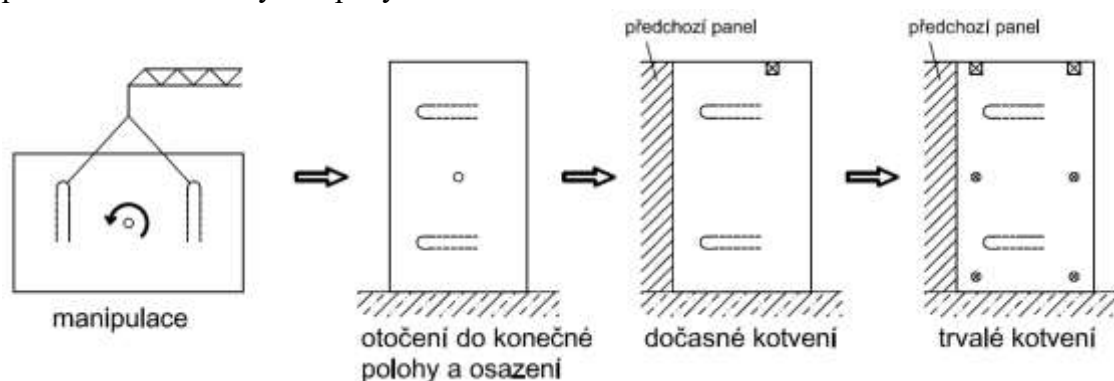
Betonáž obkladových desek se provádí ve vodorovné poloze na sklopných vibračních stolech. Při betonáži je potřeba dodržet schválený technologický postup a zároveň je

nutné věnovat zvýšenou pozornost ošetřování prvku. Vznik poruch již v prvotních fázích životnosti (např. rozvoj mikrotrhlin z důvodu nadměrného smršťování) by vedl k výraznému snížení odolnosti hotového prvku. Před odbedněním je vibrační stůl překlopen do téměř svislé polohy, takže při vyzvedávání prvku z bednění dochází k minimálnímu namáhání betonového dílce (přenos vlastní tíhy). Nejvíce namáhanými částmi dílce v této fázi je dvojice manipulačních ok, umístěných na rubové straně desky. Prvek je tedy transportován téměř ve svislé poloze, při tomto procesu je namáhám tahem vyvolaným vlastní tíhou, exponovanými místy jsou oblasti zakotvení manipulačních úchytů. Při manipulaci s prvkem běžně hrozí poškození hran a rohů desek (kontakt s okolními předměty). V případě prvku z vláknobetonu je toto nebezpečí minimalizováno.

Panely jsou skladovány a přepravovány ve svislé poloze.



Při osazení panelu na konečné místo v konstrukci je třeba ho otočit o 90° oproti poloze, ve které je transportován. Pro otočení desky kolem středové horizontální osy a uložení do konečné polohy je využíván manipulační otvor ve středu panelu. Deska je otvorem osazena na otočný čep, umístěný na manipulačním stroji, za pomoci montážních otvorů rozmístěných po panelu otočena do správné polohy a v té osazena na konečné místo. Montážní otvor je následně zaslepen. Po osazení je deska nejprve stabilizována montážní mechanickou úderovou kotvou a následně zakotvena do milánské stěny pomocí šesti trvalých lepených kotev.



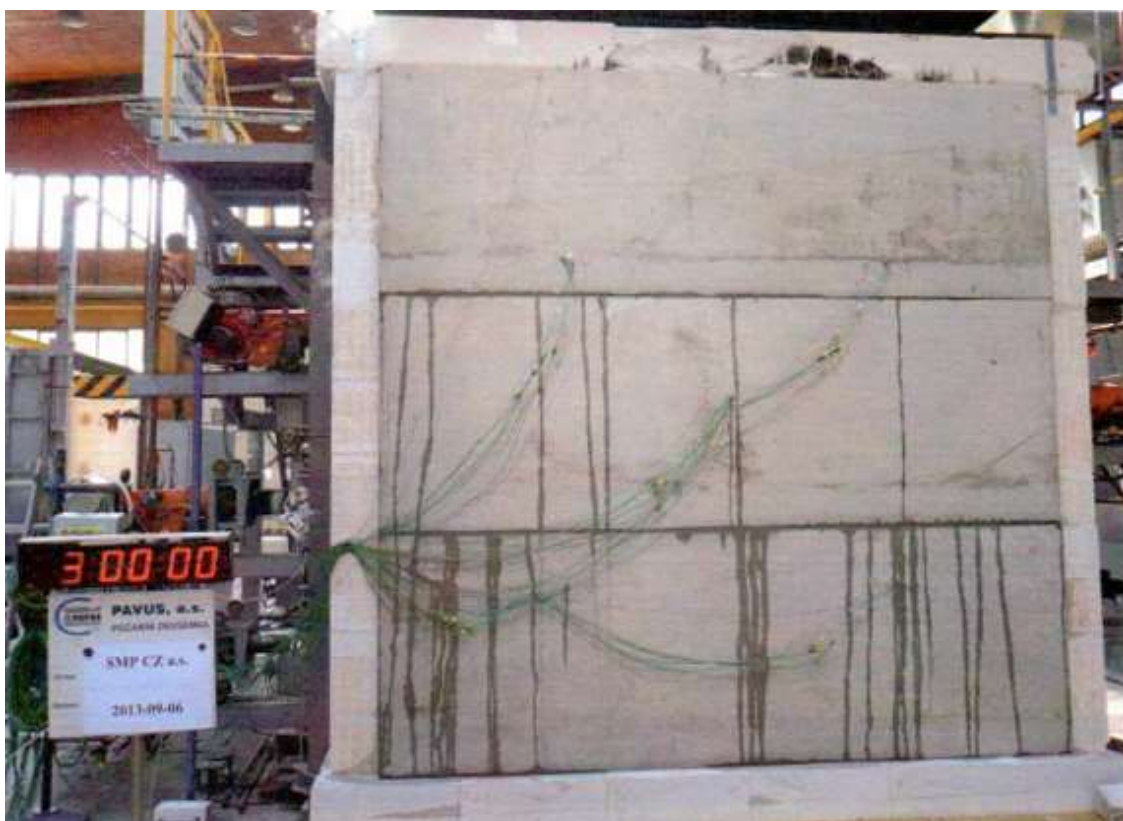
Styčná spára mezi panely je po celé své délce těsněna samolepícím pryžovým těsněním, které je vždy součástí spodní desky. Ložná spára mezi obkladovými deskami a spodní monolitickou deskou je opatřena páskem 5×30 mm z kompaktní pryže.

V tunelu mohou být obkladové panely vystaveny mimořádným zatížením jako požár, výbuch nebo náraz.

Příznivý účinek na požární odolnost konstrukce mají polypropylenová vlákna, která při vysokých teplotách sublimují, vytvářejí v betonové matici vzduchové kapsy a snižují tak pórový tlak, takže nedochází k explozivnímu odlučování krycích vrstev. Další příznivou okolností z hlediska odolnosti prvku při požáru je malá tloušťka průřezu. V takto subtilním prvku nedochází při požáru k vyvození nadměrných napětí vlivem teplotního gradientu, které by mohly konstrukční prvek porušit.

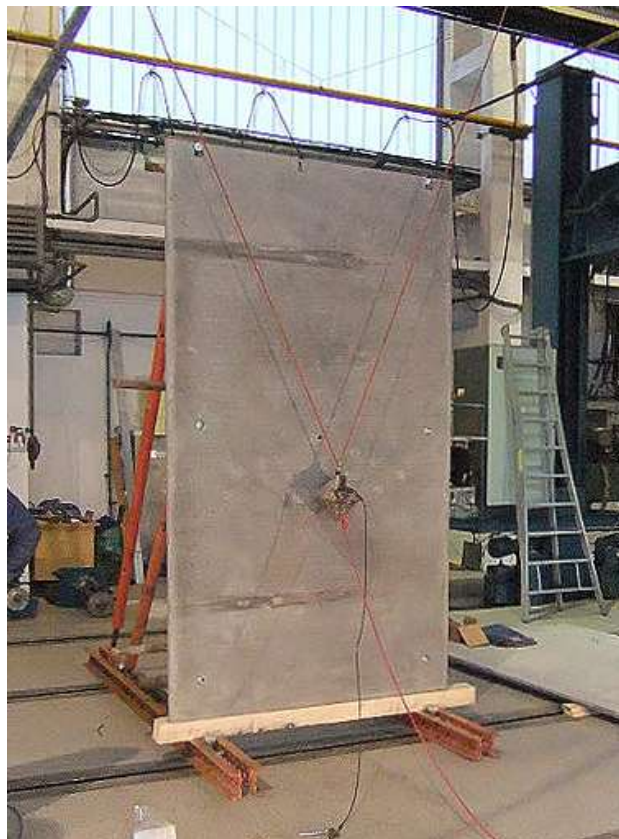
Požární odolnost obkladových panelů byla testována v požární zkušebně PAVUS, a.s., ve Veselí nad Lužnicí. Zkouška simulovala situaci v tunelech, kde je nosná část tunelové trouby z milánských stěn obkládána tenkostěnnými panely z vláknobetonu a mezi těmito konstrukcemi je vzduchová mezera. Zkoušce byl vystaven vzorek o rozměru 3 x 3 m, odpovídající skladbě tunelového ostění. Teplotní křivka měla rychlý nárůst – během deseti minut byla dosažena teplota 1014 °C a pak po dobu 180 minut byla udržována konstantní teplota 1080 °C.

Ve zkoušce byly hodnoceny mezní stav požární odolnosti a vzhled obkladových panelů. Kritéria požární odolnosti, tj. celistvost, izolace a radiace byla splněna po celou dobu testu, tj. 180 minut. Na rubové straně panelu byla dosažena maximální teplota do 500 °C. Povrchová teplota na vzorku nosné stěny byla nižší než 300 °C. Po zkoušce a po vychladnutí byl hodnocen vzhled panelů. Obkladové panely byly mírně vyboulené, jejich povrch zůstal neoprýskaný, byl pouze nepravidelně popraskaný.



Obrázek 2-53 Požární zkouška obkladových desek (180 minuta expozice) [4]

V případě výbuchu či nárazu vznikají síly, jež obkladové desky nejsou schopny přenést, a dojde k jejich poškození. Důležitým požadavkem je zachování kompaktnosti dílců do té míry, aby nedošlo při mimořádném zatížení k neřízenému uvolňování částí prvků (např. roztříštění desky). To je zajištěno výztužnou sítí ve střednicové rovině prvku a charakteristikami použitého vláknobetonu. Předpoklady prokázala zkouška rázem (obrázek 2-54).



Obrázek 2-54 Rázová zkouška obkladové desky [4]

2.4.5.1 Závěry, komentář

Tento prvek je mimořádně úspěšnou realizací. Použití vláknobetonu umožnilo navrhnout velmi tenký panel. Díky tomu i při navržené výšce a šířce jsou obkladové panely lehké, snadno se s nimi manipuluje a jejich montáž je snadná a rychlá. Větší rozměry panelu vedou ke zmenšení počtu styků a zrychlí výstavbu. Současně odpadají mokré procesy při výstavbě. Vlastnosti vláknobetonu jako jsou houževnatost a duktilita zvyšují odolnost proti otlučení hran a rohů při manipulaci a montáži a bezpečnost prvku při nárazu vozidla.

Subtilní vláknobetonový panel má rovněž velmi dobrou odolnost při požáru. V tenkém panelu nedochází k velké napjatosti od teplotního gradientu, proto panel odolává požáru po dlouhou dobu expozice. Pokles teploty z lícové strany panelu vystavené expozici k rubové straně panelu odvrácené od expozice je dostatečně velký, aby bylo ochráněno primární tunelové ostění před účinkem požáru a souvisejícím poškozením.

Výhoda je i v ekonomické rovině. Tato povrchová úprava tunelového ostění je o 25% resp. 15% levnější než klasické metody jako torkretování nebo obetonování pomocí bednění.

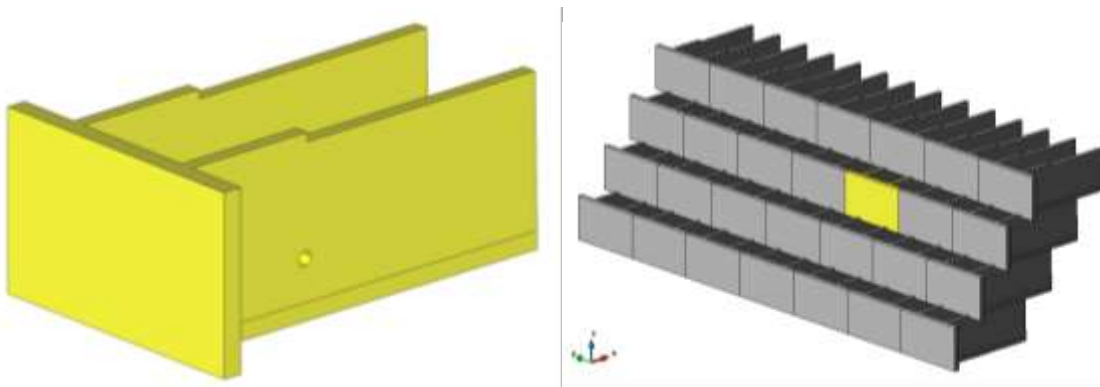
2.4.6 Prefabrikovaný vláknobetonový prvek opěrné stěny

Vláknobeton se syntetickými vlákny byl použit pro prefabrikované prvky opěrných stěn. Opěrné stěny byly postaveny pro zpevnění a zajištění svahu nad vodní plochou přehrady v Lánské oboře. Před výstavbou proběhla studie proveditelnosti prefabrikovaných prvků z vláknobetonu s polypropylenovými vlákny a s minimálním množstvím konvenční výztuže.

Při vývoji prvku byl použit již popsáný postup od návrhu a ověření samotného vláknobetonu a technologie výroby, přes statický návrh prvku až k numerické simulaci působení prefabrikovaného prvku metodou konečných prvků.

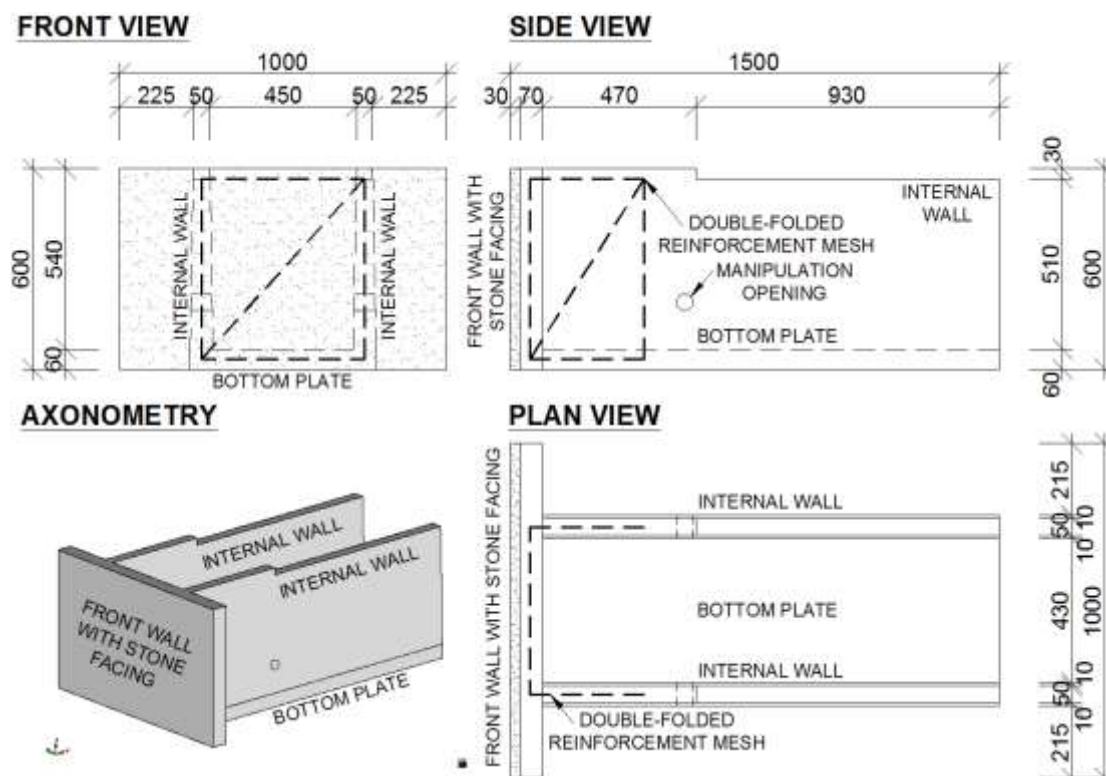
2.4.6.1 Popis konstrukce

Opěrná stěna je skládána z jednotlivých dílců. Stěna se skládá z několika řad prvků, které spolu s výplňovou zeminou tvoří konstrukci spolupůsobící s neporušenou zeminou za ní. Samotný prefabrikovaný prvek sestává z přední pohledové plochy (s kamenným obkladem), vnitřních stěn a spodní desky. Všechny části jsou vyrobeny z vláknobetonu s polypropylenovými vlákny s minimálním množstvím betonářské konvenční výztuže, ta slouží pouze pro spojení odděleně vyráběných součástí.



Obrázek 2-55 Prefabrikovaný PFRC prvek (vlevo) opěrné zdi (vpravo)

Prefabrikovaný prvek je 600 mm vysoký a sestává ze čtyř základních částí - přední stěny (s kamenným lícem), dvou stěn a spodní desky. Tloušťka částí je v rozmezí od 50 mm do 70 mm. Jako první je vyráběna přední – pohledová stěna prefabrikátu s kamenným obkladem; a to v horizontální poloze ve dvou technologických krocích. Do bednění jsou do pískového lože vyskládány kamenné valouny a ty jsou zality čerstvým vláknobetonem. Variantně byl vyzkoušen i postup, kdy do bednění byly vloženy ploché kameny, spáry mezi nimi vysypány pískem a takto připravený líc přední části prvku byl zalit vláknobetonem. Do čerstvého vláknobetonu předního dílce je osazen armokoš z betonářské sítě o profilu Ø 4 mm pro připojení stěn prefabrikátu. Ostatní části prvku se betonují v jednom pracovním záběru. Svislé stěny a vodorovné dno dílce jsou spojeny s čelní stěnou pomocí výztužné sítě zabetonované v lícové čelní stěně. Hotový dílec váží pouhých 450 kg a manipuluje se s ním pomocí závlače provlečené otvory v bočních stěnách.



Obrázek 2-56 Rozměry prefabrikovaného prvku

2.4.6.2 Složení vláknobetonu

Pro výrobu prefabrikátu byl navržen samozhutňující vláknobeton s polypropylenovými vlákny v dávce $3,5 \text{ kg/m}^3$. Jednotlivé složky jsou uvedeny v tabulce (tabulka 2-9).

Tabulka 2-9 Složky vláknobetonu pro výrobu prvku opěrné stěny

cement CEM I 52.5 R
těžené kamenivo frakcí 0-4 a 4-8 mm
drcené kamenivo frakce 8-16 mm
polypropylénová vlákna
plastifikátor na bázi karboxylátů
křemičitý úlet (mikrosilika)
provzdušňovací přísada

Byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušky materiálových parametrů. Testy byly provedeny za účelem ověření mechanických vlastností použitého vláknobetonu. Tlakové zkoušky a zkoušky v příčném tahu byly provedeny na krychlech $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ ve stáří 28 dnů. Zkouška ve čtyřbodovém ohybu byla provedena na hranolech $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$. Přehled výsledků orientačních zkoušek je uveden v tabulce (tabulka 2-10).

Tabulka 2-10 Mechanické charakteristiky použitého vláknobetonu

Mechanické vlastnosti	Zkušební vzorek	Pevnost [MPa]	Průměrná hodnota pevnosti [MPa]
Tlaková pevnost	1	49,5	47,3
	2	43,9	
	3	48,6	
Pevnost v příčném tahu	1	3,2	3,1
	2	3,0	
	3	3,1	
Pevnost v tahu za ohybu	1	6,2	5,4
	2	5,1	
	3	4,8	

2.4.6.3 Technologie výstavby

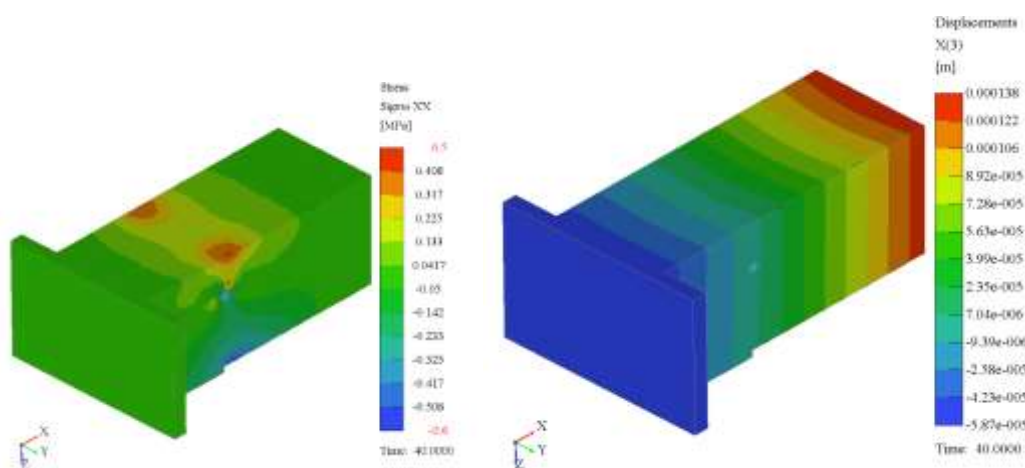
Opěrnou stěnu tvoří řada prefabrikovaných prvků, které jsou postupně kladeny vedle sebe. Spodní řada je uložena přímo na průběžný betonový základ. Potom je každý prvek naplněn do úrovně jeho horní hrany zeminou, která je důkladně zhutněna postupně po obou stranách boční stěny prefabrikátu. V prostoru za řadou prvků je zásyp též hutněn. Po montáži první řady je na spodní řadě umístěna druhá řada prvků, vyplněna zeminou a ta opět zhutněna. Tento celý postup se opakuje, dokud není dosaženo zamýšlené výšky opěrné stěny. Stěna může být případně i kotvena do svahu.

2.4.6.4 Analýza prefabrikovaného prvku

Návrh prvku byl proveden běžnými metodami pro navrhování betonových konstrukcí. Byly uvaženy tyto návrhové situace: odformování prvku a manipulace s ním, hutnění zeminy ve svahu a konečné působení dílce. Prvek je betonován v obrácené pozici a zdvihán a transportován pomocí závlačové tyče provlečené dvěma otvory v bocích prvku. Prvky jsou po vybetonování uloženy dva dny ve výrobně. Ve fázi manipulace bezprostředně po odbednění je nutno vzít v úvahu mechanické vlastnosti betonu ve stáří 2 dny. Byla respektována obecná pravidla pro navrhování; adheze betonu a inerciální a dynamické účinky vyvolané vertikálním zrychlením při manipulaci. Hodnota koeficientu adheze betonu byla stanovena s ohledem na druh použitého bednění, který byl hladký, před betonováním naolejovaný. Hodnota faktoru dynamického zatížení byla uvažována pro manipulace s rychlostí ne větší než 1 m/s.

Podrobnější výpočet byl proveden metodou numerické simulace, v níž byly analyzovány tři zatěžovací stavy – odbednění, doprava a manipulace, osazování dílce a namáhání dílce zabudovaného v opěrné stěně.

Numerická simulace na trojrozměrném nelineárním modelu potvrdila, že prefabrikovaný prvek splňuje kritéria mezních stavů, jak ukazuje rozložení napětí na ploše pod maximálním uvažovaným zatížením (obrázek 2-57). Napětí v tahu je rozloženo v horní části prvku, přičemž maximální hodnoty 0,5 MPa se nacházejí v oblasti nad manipulačními otvory. Tlakové napětí je pouze v dolní části segmentu, zejména pod otvory. Vzhledem k rozložení napětí a svislé deformaci je poloha manipulačních otvorů optimální.

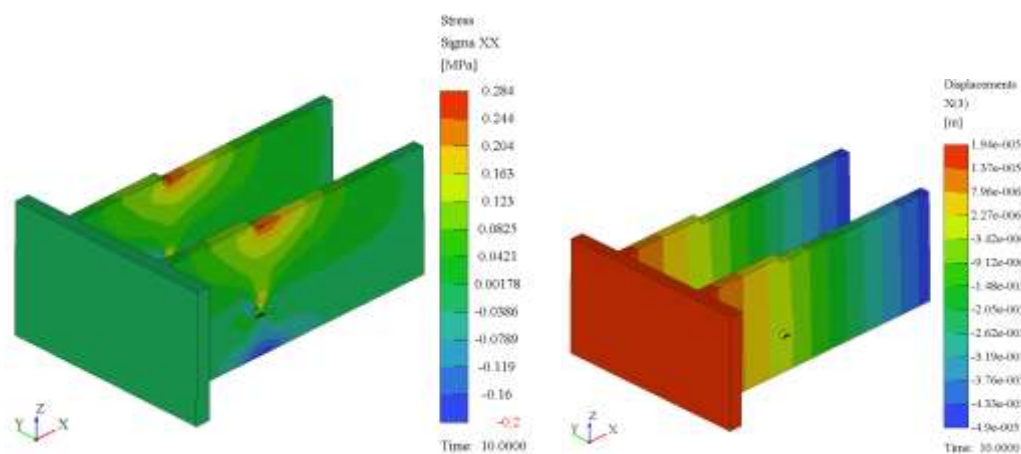


Obrázek 2-57 Rozložení napětí (vlevo) a svislé posuny (vpravo)

2.4.6.5 Doprava

Prefabrikované prvky jsou přepravovány na staveniště ve stáří betonu 28 dní. Dva otvory ve vnitřních stěnách slouží pro manipulaci. Dynamické účinky a účinky setrvačných sil způsobené vertikálním zrychlením byly v numerické simulaci analyzovány v trojrozměrném nelineárním modelu.

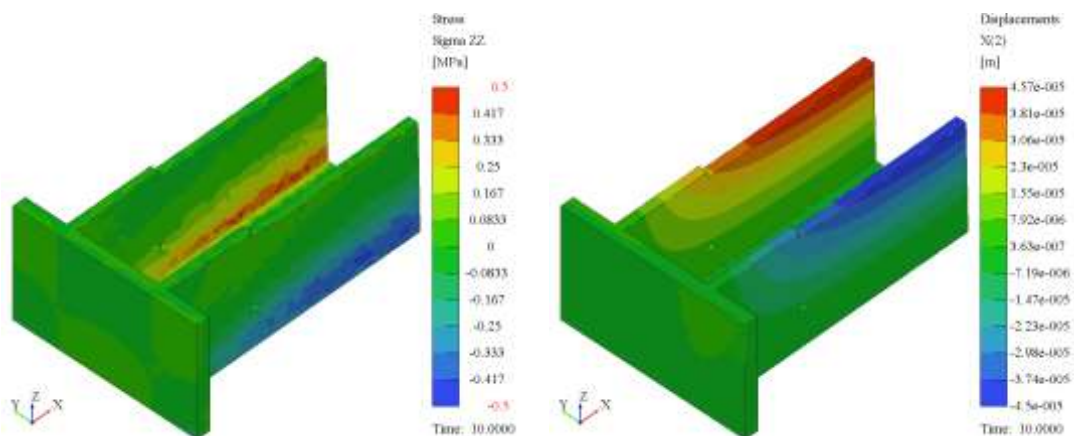
Napětí (obrázek 2-58) stanovená pomocí numerické analýzy prokázala, že v prvku nedojde ke vzniku trhlin. Prvek vyhověl i při ověření stability v průběhu manipulace pomocí závlačové tyče.



Obrázek 2-58 Rozložení napětí (vlevo) a svislé posuny (vpravo)

Prvek zabudovaný v konečné poloze, vystavený bočnímu tlaku zeminy a zatížení vyvolanému zhutňováním výplňové zeminy byl posledním ověřovacím stavem. Během výstavby opěrné stěny má být výplňová zemina zhutňována postupně po obou stranách vnitřní stěny pro zamezení nadměrného jednostranného zatížení. V analýze byl uvažován nejhorší scénář, kdy výplňová zemina je zhutňována pouze mezi stěnami. V analýze byly uvažovány mechanické vlastnosti běžného zásypu a charakteristická hodnota zatížení od zhutňování 2 kN/m^2 . Působení hydrostatického tlaku nebylo uvažováno; předpokládá se, že navržený drenážní systém je schopen hydrostatický tlak eliminovat.

Rozložení napětí a vodorovné deformace prvku (Obrázek 2-59) odpovídají uvažovanému zatížení. Maximálního tahového napětí je dosaženo v dolní části stěn na jejich vnitřních stranách. Maximální hodnota je přibližně $0,5\text{ MPa}$, což je podstatně méně než tahová pevnost betonového kompozitu.



Obrázek 2-59 Rozložení napětí (vlevo) a vodorovné posuny (vpravo)

Pilotní výroba prvku opěrné zdi byla uskutečněna v květnu roku 2015 ve standardní výrobě pro prefabrikované betonové prvky. Míchání betonových složek a ukládání čerstvého betonu bylo provedeno běžným způsobem na výrobním zařízení firmy. Betonová směs byla transportována 50 m od míchacího zařízení do připravené dřevěné formy. Pilotní betonáž ověřila, že navržený vláknobeton vyhovuje pro subtilní stěny dílce. Kontrola prefabrikovaných prvků po odbednění potvrdila, že všechny části jsou řádně probetonovány a nevyskytují se žádné kaverny ani jiné vady.



Obrázek 2-60 Kamenné obložení umístěné do formy (vlevo) a čelní stěna pilotního dílce po betonování (vpravo)



Obrázek 2-61 Vláknobetonový prefabrikovaný prvek



Obrázek 2-62 Sériová výroba dílců opěrné stěny – příprava pohledové strany



Obrázek 2-63 Smontovaná stěna

2.4.6.6 Závěry, komentář

Realizace prefabrikovaného prvku opěrné stěny prokázala výhody aplikace vláknobetonu v tomto prvku. Oproti železobetonovému prvku je výrobní technologie jednodušší a výroba je rychlejší. Vláknobetonové prvky mají vyšší trvanlivost a vykazují lepší odolnost vůči dynamickým zatížením, smršťování a cyklickému zmrazování. Minimalizací tloušťek stěn prvku byla snížena hmotnost dílce, což snížilo dopravní náklady a zjednodušilo montáž na staveništi. V numerických simulacích bylo prokázáno, že prefabrikované vláknobetonové prvky splňují požadovaná kritéria všech fází života; namáhání dílce bylo pro většinu návrhových situací podstatně nižší než odolnost prvku. Žádný vyrobený prvek nevykazoval viditelné trhliny nebo jiné vady. Inovační potenciál prefabrikovaného prvku skládané opěrné stěny byl oceněn v soutěži Inovace roku 2015.

2.4.7 Předpjatý prvek systému protihlukových stěn

Protihlukové stěny zabraňují šíření hluku obvykle z dopravy do klidových zón zastavěných oblastí. Úkolem protihlukových stěn je buď hluk odstínit, tj. odrazit nebo pohltit.

V České republice je nejčastěji používán systém sestávající z odrazivých nebo pohltivých panelů, soklových panelů a sloupků o průřezu H osazených do základových patek. Panely jsou z různých materiálů – betonu, dřeva, skla nebo plexiskla, keramiky, plastů, kovů. Sloupky o průřezu H jsou z oceli nebo betonu.

Akustické stěny musí splňovat řadu přísných požadavků nejen z hlediska akustiky. Jde o konstrukce, které stojí volně v terénu, takže musí být schopny přenést účinky extrémních nárazů větru. Nacházejí se nejčastěji u rychlostních komunikací, takže musí vykazovat vhodnou odezvu při nárazu vozidla. Při transportu musí mít dostatečnou odolnost vůči poškození otlukem z důvodu zachování trvanlivosti i estetických kvalit. Z hlediska splnění požadavků na trvanlivost konstrukce je žádoucí také eliminovat šířku trhlin v betonu, protože sloupky jsou vystaveny působení agresivního prostředí (zejména solí) a narušený povrch samozřejmě usnadňuje průnik těchto látek do konstrukce, což urychluje degradaci prvku.

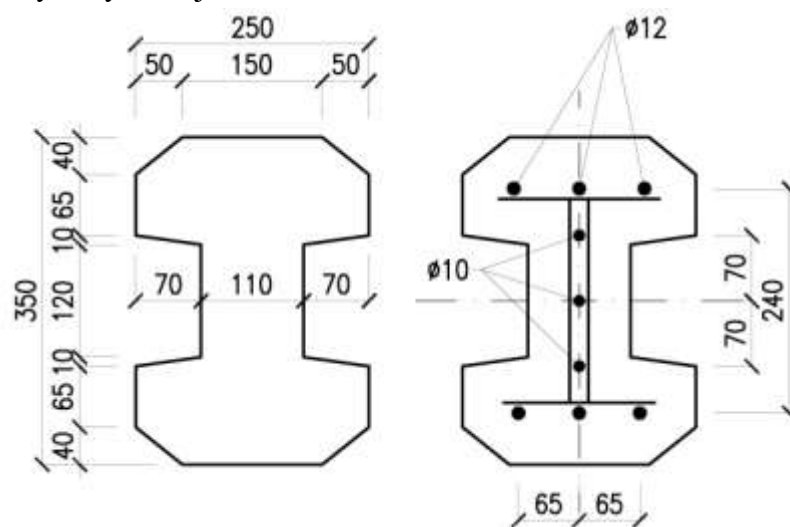


Obrázek 2-64 Protihluková stěna

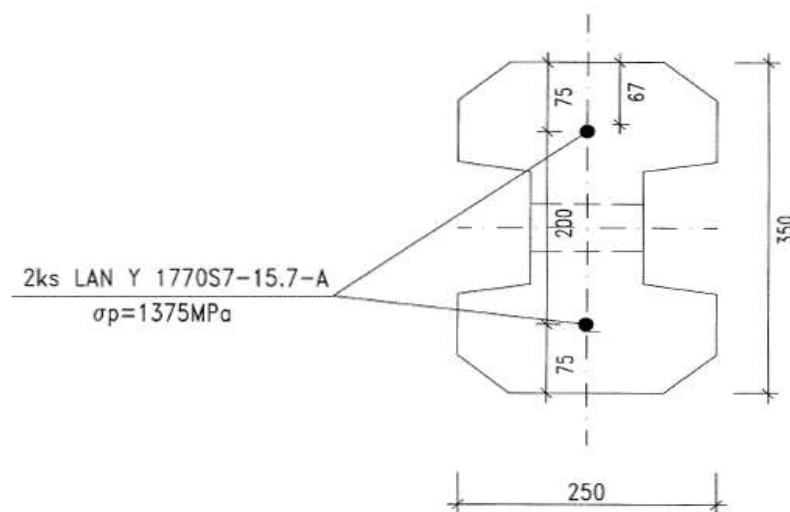
Ve spolupráci několika subjektů byl vyvinut nový typ nosných sloupků pro protihlukové stěny. Tradičně se sloupek vyrábí buď jako předpjatý s klasickou třmínkovou výztuží

nebo jako železobetonový s vyztužením ve formě podélných prutů a třmínků. Nový typ sloupku byl navržen jako předem předpjatý prvek pouze s předpínací výztuží. Předpětí zajišťují dva podélné předpínací kabely. Vzniku trhlin od příčných tahů a vzniku smykových trhlin brání rozptýlená výztuž z ocelových vláken (drátkobeton). Drátkobetonová směs je navržena tak, aby bylo možné drátkobeton vyrábět na stávajícím míchacím zařízení výroby prefabrikátů. Nová technologie výroby nosných sloupků protihlukových stěn zjednodušila výrobu a snížila pracnost při výrobě. Hlavní výhodou navrženého řešení je to, že prvek je vyztužen pouze předpínacími kabely a vlákny rozptýlenými v betonu; je zcela vyloučena klasická betonářská výztuž.

V průběhu vývoje nového řešení sloupku protihlukových stěn došlo k návrhu nevhodného upnutí sloupku pro zkoušky prvku ve skutečné velikosti. Provedené experimenty pak vykazovaly nečekaně nízké únosnosti. Musel být proveden rozbor zkoušek a analýza vysvětlující tuto skutečnost.



Obrázek 2-65 Schéma průřezu a vyztužení stávajícího železobetonového sloupku protihlukových stěn

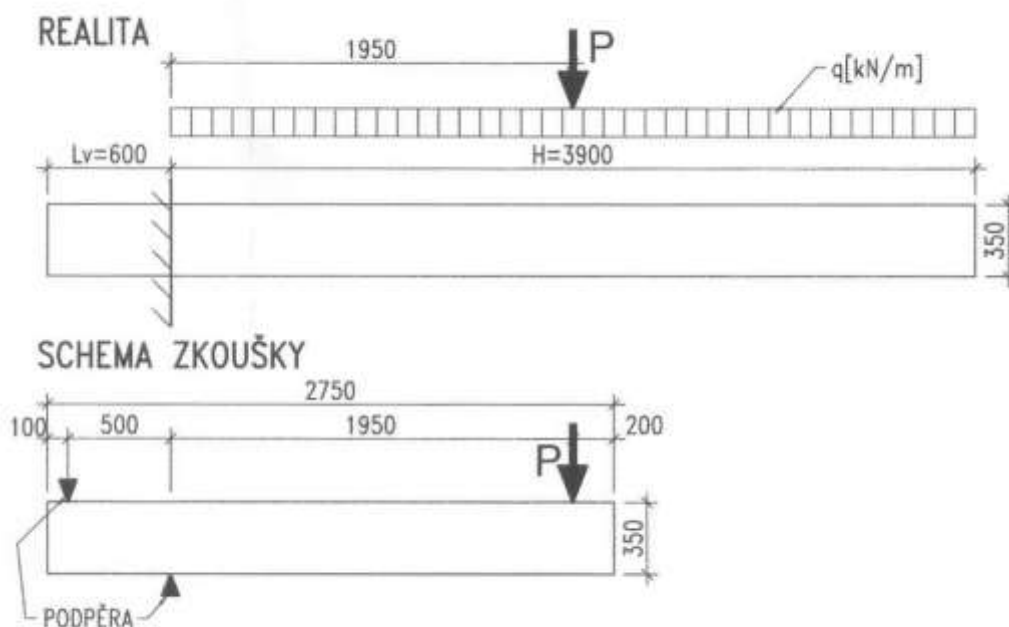


Obrázek 2-66 Schéma průřezu předpjatého drátkobetonového sloupku protihlukových stěn

2.4.7.1 Zkoušky

Pro aplikaci vláknobetonu ve sloupku protihlukových stěn byla nejprve provedena analýza, jaký z materiálů by se měl uplatnit. Zvažovány byly tři typy drátků a vlákna syntetická. Po úvodních materiálových zkouškách a kalkulaci cen byly pro další zkoušky prvků ve skutečné velikosti zvoleny drátky i syntetická vlákna. V rámci testů byl zkoušen referenční sloupek s klasickým vyztužením betonářskou výztuží.

In situ jsou sloupky ukládány do kalichových patek a uložení je zabetonováno. Sloupky jsou tedy vetknuté. Bylo navrženo, aby vetknutí sloupků při zkoušce bylo simulováno dvojicí sil a sloupky byly upnuty do zkušební stolice ocelovými pásky ve vzdálenosti 0,5 m. Schéma navrženého uložení při laboratorní zkoušce je patrné z obrázku (Obrázek 2-67).

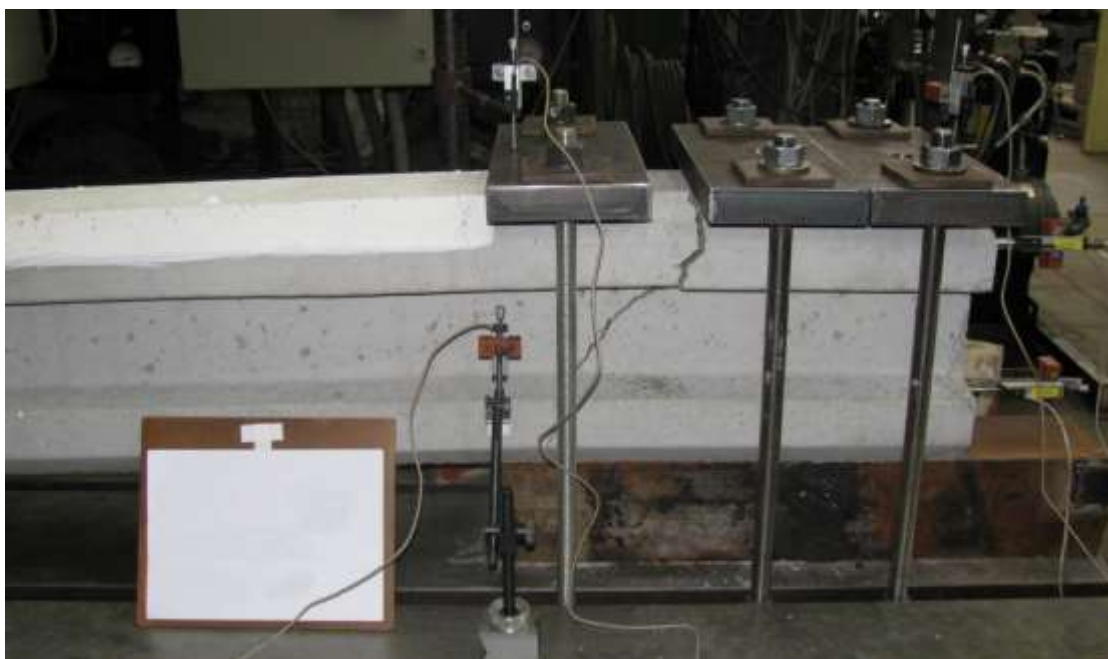


Obrázek 2-67 Návrh prvotního uspořádání zkoušky sloupků protihlukové stěny.

Po provedení první série zkoušek se ukázalo, že při laboratorním zatěžování zkušební sloupky vykazují menší únosnosti, než byly teoretické únosnosti stanovené výpočtem. Teoretický předpoklad byl, že sloupky přenesou zatěžovací sílu 32 kN v případě předpjatých sloupků a 22 kN pro sloupek s tradičním vyztužením měkkou betonářskou výztuží. Předpjaté sloupky přenesly zatížení třetinové, sloupek s měkkou výztuží asi poloviční.

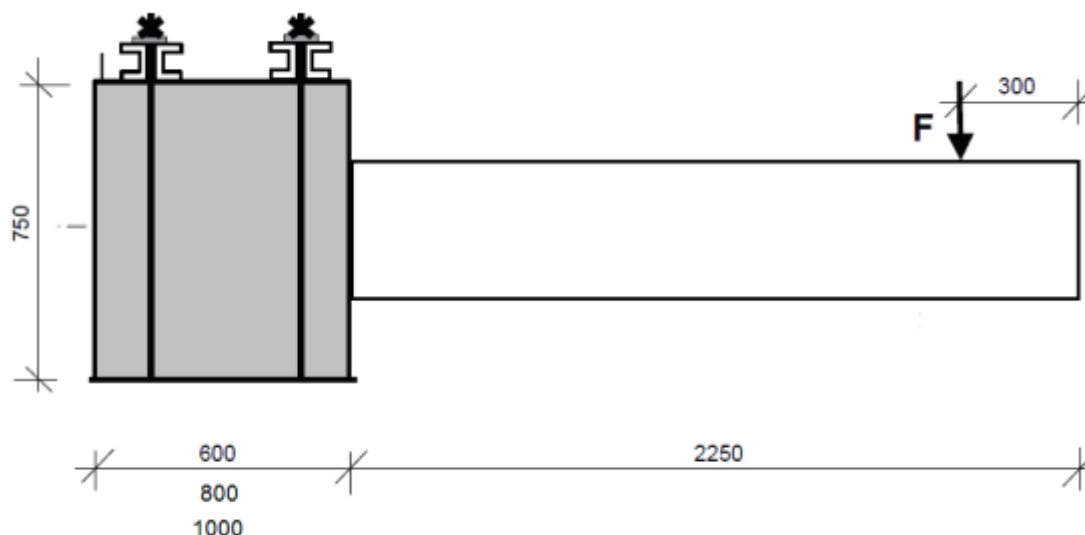
Rozdíly mezi hodnotami teoretické únosnosti a hodnotami naměřenými v zatěžovacích zkouškách bylo nutné vysvětlit. Byly analyzovány výsledky a průběh zkoušek, průběh trhlin a způsob porušení zkušebních těles. Příčina byla nalezena v nevhodném uchycení zkoušeného tělesa. Uchycení do zkušební lisu tvořily vlastně dvě podpory s velmi malým rozponem. K porušení zkušebních těles došlo v místě uložení, kde je v tomto případě maximální moment i posouvající síla. Pro nosníky běžných rozpětí je zpravidla

poměr mezi ohybovou a smykovou tuhostí podstatně větší než jedna a v běžných výpočtech se smyková tuhost při výpočtu zanedbává. Ale pro nosníky krátkých rozpětí je tzv. smyková štíhlost větší než štíhlost ohybová a dochází ke vzniku příčných tahových napětí zvyšujících smykové účinky, která mohou vést až ke smykovému porušení. K tomu došlo i u testovaných sloupků, kdy se mnohé z prvků se viditelně porušily smykově (obrázek 2-68). Situaci zhoršoval i tvar průřezu sloupku, neboť obecně se prvky s tenkými stojinami (I, H, T) vyznačují velkými hodnotami smykového napětí ve stojinách.



Obrázek 2-68 Smykové porušení sloupku v oblasti kotvení.

Pro další etapu zkoušek bylo doporučeno nové uchycení zkušebních těles, které lépe odpovídalo ukotvení sloupků do patek v reálné aplikaci. Sloupky byly zabetonovány do železobetonových tuhých patek. Bylo rozhodnuto zkoušet tři varianty obetonování sloupků – patky o délce 600 mm, 800 mm a 1 000 mm. Obrázek 2-69 ukazuje nově navržené uspořádání zkoušky sloupku.



Obrázek 2-69 Nově navržené uspořádání zkoušky

Zkoušky prefabrikátů sloupků ve skutečné byly provedeny ve zkušebně Kloknerova ústavu ČVUT; byly sledovány hodnoty zatěžovací síly při vzniku mikrotrhliny šířky 0,2 mm a mezní síla odpovídající únosnosti prvku. Pro porovnání byl zkoušen i původně používaný železobetonový sloupek SL.

Zkušenosti z projektu znovu poukázaly na okolnost, že zanedbávání smykových účinků může být chybné a nebezpečné. To, a skutečnost, že drátky mají v předpjatém prvku převzít funkci smykové výztuže, vedly k analýze vlivu drátků na únosnost. S navrhováním a zkoušením předpjatých drátkobetonových konstrukcí není obecně mnoho zkušeností. Příspěvek vláken k únosnosti a chování prvku je nutné vyšetřit i z těch důvodů, že pro předpjaté prvky, které se primárně nenavrhují na mezní stav únosnosti, jsou otázky vzniku trhliny a další aspekty mezních stavů použitelnosti významnější.

2.4.7.2 Analýza vlivu drátků

Užití ocelových drátků Krampe DE 50/0,8 v množství 50 kg/m³ zvýšilo únosnost ve smykové trhlíně kotevní oblasti oproti sloupkům bez vláken. Vlákná tak zřejmě přenášejí ve smykové trhlíně jak podélné ($F_{fc,h}$), tak svislé ($F_{fc,v}$) mikrosíly. Na mezi únosnosti lze uvažovat:

$$F_{fc,h} = 0,9 A_{fc} f_{fc,eq}$$

$$F_{fc,v} = 0,3 h b_w f_{fc,eq}$$

kde: A_{fc} je průřezová plocha sloupku,

b_w je šířka stěny sloupku,

$f_{fc,eq}$ je ekvivalentní pevnost v tlaku vláknobetonu odpovídající napjatosti přenášené vlákny

Pro zkoušený sloupek je:

$$A_{fc} = 2(200 \cdot 400 + 250 \cdot 70 + 110 \cdot 65) = 65300 \text{ mm}^2$$

$$0,9A_{fc} = 58770 \text{ mm}^2$$

$$h = 350 \text{ mm}$$

$$b_w = 110 \text{ mm}$$

$$hb_w = 38500 \text{ mm}^2$$

$$0,3hb_w = 11550 \text{ mm}^2$$

Pak platí:

$$F_{fc,h} = 58770 f_{fc,eq} [N]$$

$$F_{fc,v} = 11550 f_{fc,eq} [N]$$

$$F_{fc,v} = 0,1965 F_{fc,h}$$

Lze dopočítat průměrnou únosnost sloupků SL02 s drátky $P_2 = 12,2 \text{ kN}$ a sloupků SL03 bez drátků $P_3 = 10,6 \text{ kN}$. Drátky tedy zvyšují únosnost konzoly o hodnotu $\Delta P_{fc,3}$:

$$\Delta P_{fc,3} = P_2 - P_3 = 12,2 - 10,6 = 1,6 \text{ kN}$$

Lze konstatovat, že vlivem přítomnosti drátků došlo ke zvýšení únosnosti prvku cca o 15,1 %.

Dále lze stanovit hodnotu ekvivalentní pevnosti vláknobetonu odpovídající napjatosti přenášené vlákny ($f_{fc,eq}$). Stanovme nejprve momentový příspěvek:

$$\Delta M_{fc} = \Delta P_{fc,3} \cdot r = 1,6 \cdot 2,15 = 3,44 \text{ kNm}$$

Lze odvodit:

$$M_{P_2} = M_{P_3} + \Delta M_{fc} = P_3 \cdot r + \Delta M_{fc} = 10,6 \cdot 2,15 + 3,44 = 26,24 \text{ kNm}$$

$$\Delta M_{fc} = F_{fc,h} \cdot 0,5h = 58770 f_{fc,eq} \cdot 175 = 10,285 \cdot 10^6 f_{fc,eq}$$

Srovnáním dvou vztahů pro ΔM_{fc} konečně obdržíme:

$$f_{fc,eq} = \frac{3,44}{10,285} = 0,3345 \text{ MPa}$$

Druhý přístup k výpočtu vede přes posouvající sílu. Je-li:

$$F_{fc,v} = 11550 f_{fc,eq} = \Delta P_{fc,3} = 1,6 \text{ kN}$$

vychází:

$$f_{fc,eq} = \frac{1600}{11550} = 0,1385 \text{ MPa}$$

Zjevně je tato metoda pro daný případ rozhodující a ekvivalentní pevnost vláknobetonu daná vlákny je 0,1385 MPa.

Prefabrikované sloupky zkoušené v první etapě bez kotevní patky zatěžované jako konzoly silou F u konce konzoly a vetknuté do zkušebního zařízení realizovaného dvojicí sil na rameni $z \approx 0,4 \text{ m}$ se porušily smykem při vzniku mikrotrhliny 0,2 mm ($F_{cr,m} = 4,0 \text{ kN} < F_{cr,m,d} = 12,4 \text{ kN}$), kde $F_{cr,m,d} = 12,4 \text{ kN}$ je síla při stejném způsobu zatížení,

ale u železobetonového sloupku zakotveného do betonové patky výšky $h = 600$ mm. Zatížení mezní silou F_{um} železobetonového sloupku bez patky, opět při porušení v oblasti zakotvení, je $F_{um} = 14,6 \text{ kN} < F_{um,d} = 36,3 \text{ kN}$, kde $F_{um,d} = 36,3 \text{ kN}$ je opět mezní síla u železobetonového sloupku s patkou $h = 600$ mm, což vyhovuje návrhové požadované max. síle $P = 22 \text{ kN}$ (viz. tab.3) s mírou spolehlivosti $\gamma_F = 36,3 / 22,0 = 1,65$.

Po změně uspořádání zkoušky ve druhé etapě výzkumného programu byl analyzován vliv délky uložení sloupku. Také byly řešeny související otázky – nutná přenášečí délka předpínací výztuže a vliv přenášečí délky předpětí na celkovou únosnost sloupku.

2.4.7.3 Analýza zkoušek sloupků protihlukových stěn uložených do patek

Pro zjištění odolnosti a trvanlivosti betonu sloupků protihlukové stěny byly odzkoušeny ve druhé etapě sloupky při vzniku vlasových trhlin šířky $0,2 \text{ mm}$ a při mezní únosnosti sloupků.

Byly analyzovány sloupky následujících typů:

Typ A – železobetonové tlakové pevnostní třídy C 35/45, (označení sloupku SL11)

Typ B – betonové z předem předpjatého betonu (označení sloupku SL12, SL13, SL14)

Typ DF – drátkobetonové z předem předpjatého betonu (označení sloupku SL15, SL16)

Typ C – vláknobetonové (syntetická vlákna) z předem předpjatého betonu (označení sloupku SL17)

Všechny předpjaté sloupky (B, DF a C) byly vyrobeny z betonu tlakové pevnostní třídy C 55/67. Tato vysoká tlaková pevnostní třída betonu je volena pro omezení ztrát předpětí a zlepšení soudržnosti předpínacích lan s kvalitním betonem.

Pro mezní stav vzniku vlasové trhliny $0,2 \text{ mm}$ a mezní stav únosnosti sloupků jsou uvedeny hodnoty odpovídajícího zatížení pro tři typy sloupků v procentech vztažených k sloupkům ze železobetonu typu A (viz tabulka 2-11) při výšce patky $h = 600 \text{ mm}$.

Tabulka 2-11 Porovnání zatěžovací síly při vzniku vlasové trhliny a únosností sloupků

		Typ A	Typ B	Typ C
Vlasová trhlina	$F_{cr,m}$	100%	226%	266%
	$F_{cr,k}$		274%	341%
Únosnost sloupku	$F_{u,m}$		118%	117%
	$F_{u,k}$		112%	109%

V tabulce značí:

$F_{cr,m}$ střední hodnotu síly při vzniku vlasové trhliny

$F_{cr,k}$ charakteristickou hodnotu síly při vzniku vlasové trhliny

$F_{u,m}$ střední hodnotu mezní zatěžovací síly

$F_{u,k}$ charakteristickou hodnotu mezní zatěžovací síly

Z tabulky 2-11 je patrné, že vliv předpětí zvyšuje u typu B mez vzniku vlasové trhliny, která je v průměru vyšší o 126% a při charakteristické hodnotě je zvýšení dokonce o 174%. U vláknobetonu typu DF s objemovým stupněm vyztužení $\rho_v = 0,5\%$ je zvýšení meze vzniku vlasové trhliny vyšší o 166% (vliv vláken se uplatní hodnotou + 40%) a pro charakteristickou hodnotu je mez vzniku trhlin zvýšena o 241% (vliv vláken se uplatní hodnotou + 67%). U meze únosnosti je průměrná hodnota nárůstu únosnosti menší (18%) a charakteristická hodnota jen 10%, a to u obou typů B a DF.

2.4.7.4 Analýza kotevní délky předem předpjatých sloupků

Tato část výzkumu se zaměřila na vliv rozptýlené výztuže na potřebnou přenášecí délku předpínací výztuže a utnou délku uložení předpjatého prefabrikovaného sloupku v základové patce. V textu jsou porovnávány tři varianty provedení sloupků – předpjaté sloupky bez rozptýlené výztuže, předpjaté sloupky se syntetickými vlákny a předpjaté sloupky s drátky. V tabulce 2 – 12 je přehled porovnávaných sloupků, příslušných mezních únosností ($F_{uk,i}$) a jejich odchylek ($s_{k,i}$), spolu s vzájemně si odpovídajícími hodnotami vetknutí v patce (h_i).

Tabulka 2-12 Porovnání jednotlivých typů předpjatých sloupků

Typ beton	Označení sady	$F_{uk,i}$ [kN]	$s_{k,i}$ [kN]	h_i [m]	Vlákna	Poznámka
Předpjatý beton	SL 14	41,5 (100%)	2,0	1000	-	
Předpjatý vláknobeton	SL 15	43,3	0,1	800	Ocelová vlákna	
	SL 17	14,4	0,9	800	Syntetická vlákna	

Sloupek z drátkobetonu SL 15:

$$F_{uk,15} / F_{uk,14} = 43,3 / 41,5 = \underline{1,045}$$

Kotevní délka: $h_{15} / h_{14} = 0,8 / 1,0 = \underline{0,8}$

Charakteristická odchylka:

$$s_{k,15} / s_{k,14} = 0,1 / 2,0 = \underline{0,05}$$

Zakotvení v drátkobetonu při $h_{15} = 800$ mm je o 4,5% lepší než zakotvení v prostém betonu při $h_{14} = 1000$ mm.

Sloupek z vláknobetonu se syntetickými vlákny SL 17:

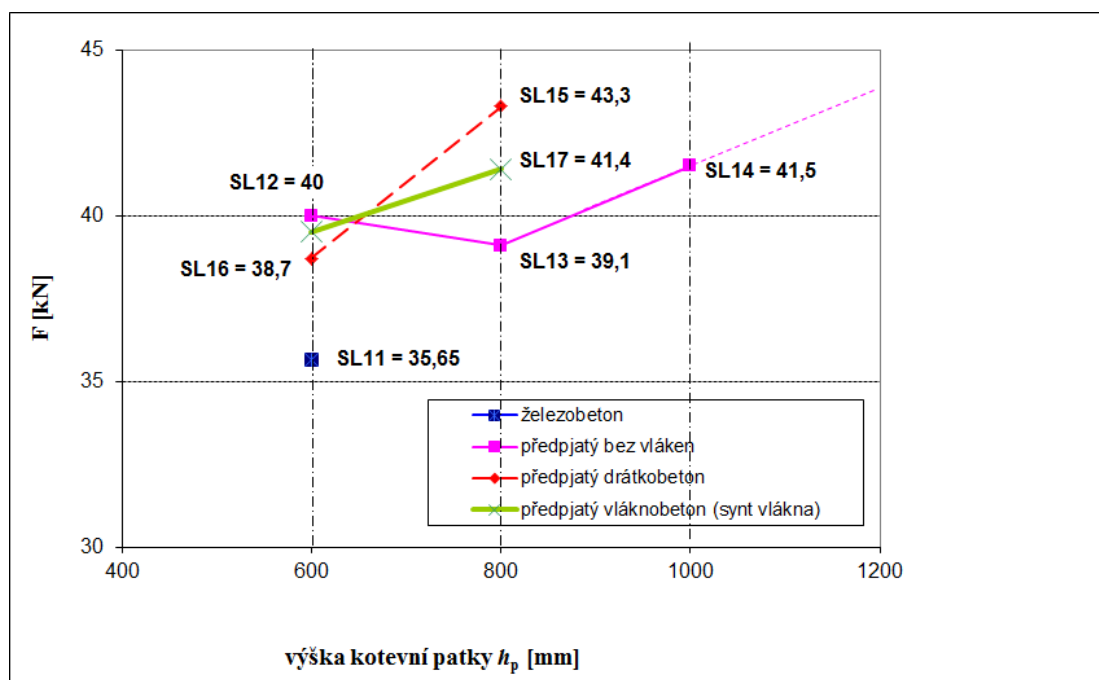
$$F_{uk,17} / F_{uk,14} = 41,4 / 41,5 = \underline{0,998 \approx 1,0}$$

Kotevní délka: $h_{17} / h_{14} = 0,8 / 1,0 = \underline{0,8}$

Charakteristická odchylka:

$$s_{k,15} / s_{k,14} = 0,9 / 2,0 = \underline{0,45}$$

Zakotvení ve vláknobetonu se syntetickými vlákny při $h_{17} = 800$ mm je prakticky stejné jako zakotvení v předpjatém betonu bez rozptýlené výztuže při $h_{14} = 1000$ mm.



Obrázek 2-70 Vliv délky uložení sloupku do patky h_p na celkovou únosnost sloupku

Tabulka 2-13 Porovnání celkových únosností jednotlivých typů sloupků při délce uložení v patce 600 a 800 mm

$\gamma_F = F_{um} / 32,0$		
Typ	Výška patky h_p	
	600 mm	800 mm
B	42,7 / 32,0 = 1,33	41,7 / 32,0 = 1,30
DF	42,4 / 32,0 = 1,32	43,3 / 32,0 = 1,35
C		41,4 / 32,0 = 1,29

Rozdíly mezi sloupky s různou délkou uložení (zabetonování v patce) nejsou podstatné. První trhлина se pro uložení 600, 800 a 1000 mm vytvoří pro téměř stejnou úroveň zatížení a průhybu. I maximální přenesené zatížení je takřka totožné.

2.4.7.5 Numerické simulace

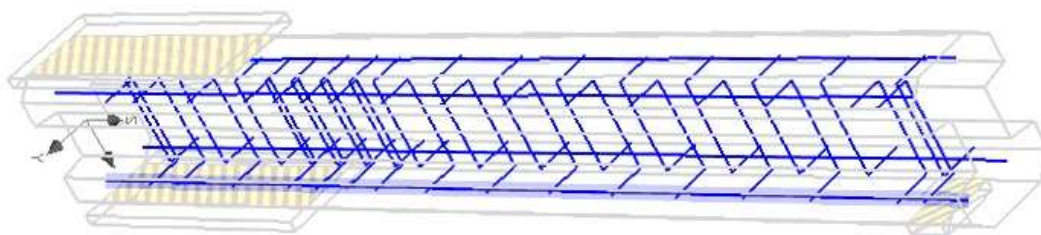
Pro sloupek byla provedena řada numerických simulací s cílem ověřit chování prvku s různým typem vyztužení a obecně ukázat možnosti numerické simulace předpjatého drátkobetonového prvku.

Simulace ve 3D verzi programu ATENA využily materiálový model Nonlinear Cementitious 2 upravený tak, aby odpovídal skutečně použitým materiálům.

Byly vytvořeny modely sloupku železobetonového i předpjatého včetně různých velikostí kotevní patky. Železobetonové sloupky jsou vyztuženy podélnými pruty profilu 12 a 10 mm a příčnými třmínky tvaru C profilu 8 mm a tomu odpovídá i numerický model. Model předpjatého sloupku je vyztužen pouze dvěma předpínacími lany.

Jako materiálové modely byly použit implementovaný model pro beton třídy C35/45 pro popis základové patky, a materiál Nonlinear Cementitious 2 pro popis drátkobetonu. Po fitování materiálových charakteristik drátkobetonu byla konečná simulace provedena s těmito materiálovými parametry: modul pružnosti $E_c = 39$ GPa, tlaková pevnost $f_c = 80,5$ MPa, tahová pevnost $f_t = 2,6$ MPa, lomová energie $G_f = 9\,900$ N/m, hodnota kritické tlakové deformace $w_d = 0,0125$, koeficient redukce tlakové pevnosti 0,8.

Numerické modely odpovídaly chování skutečných prvků při laboratorních testech.



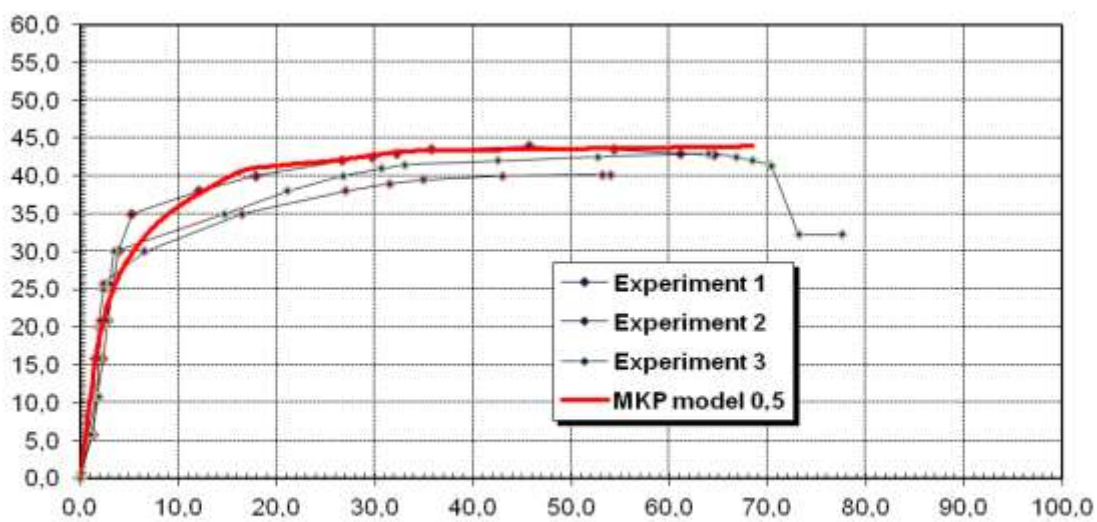
Obrázek 2-71 Model sloupku s diskrétně modelovanou klasickou výztuží ohybovou i smykovou



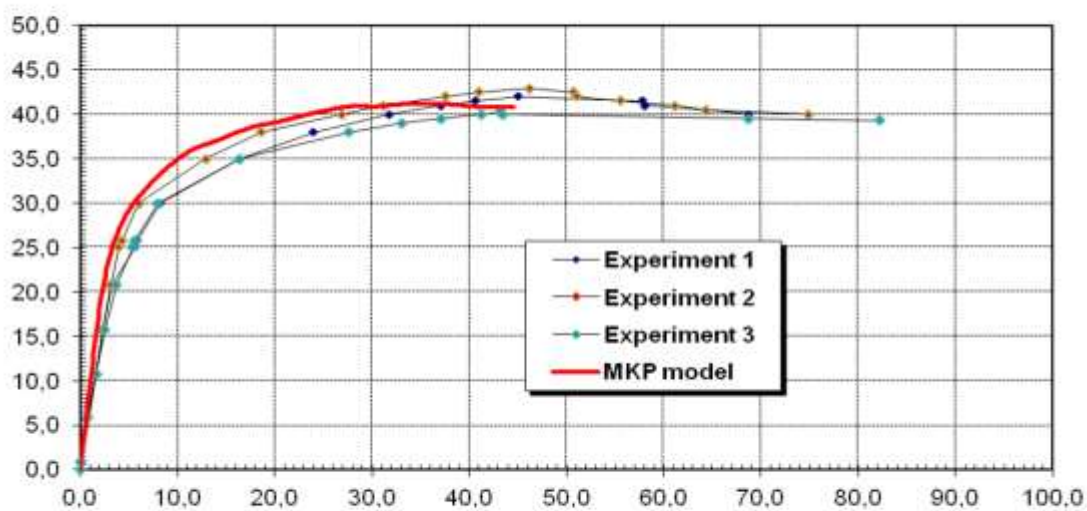
Obrázek 2-72 Trhliny při mezním zatížení spočítané v numerickém modelu železobetonového prvku



Obrázek 2-73 Trhliny při mezním zatížení spočítané v numerickém modelu předpjatého prvku



Obrázek 2-74 Porovnání výsledků numerické simulace chování sloupku vetknutého do patky o délce 600 mm při zatěžování v laboratoři



Obrázek 2-75 Porovnání výsledků numerické simulace chování sloupku vetknutého do patky o délce 800 mm při zatěžování v laboratoři

2.4.7.6 Závěry, komentář

Vývoj a realizace této aplikace vláknobetonu prokázala vysokou efektivitu použití rozptýlené výztuže v předpjatém prvku. Drátkobetonové předpjaté sloupky mají lepší užité vlastnosti ve srovnání s klasickým řešením s vázanou výztuží.

Analýzy a zkoušky prokázaly vyšší celkovou únosnost předpjatých sloupků oproti sloupkům železobetonovým. Také se zvýšila úroveň zatížení, při kterém vzniká první trhлина.

Použití vláknobetonu/drátkobetonu příznivě ovlivňuje potřebnou délku kotvení. Díky vysoké lomové energii vláknobetonu je snížen vznik a rozvoj trhlin; nejsou-li v prvku trhliny, je soudržnost vyšší. Kvalita soudržnosti je ve vláknobetonech lepší i při menších krycích vrstvách.

Použití drátkobetonu je efektivní i z hlediska ekonomického. Předpětí sloupků a užití vláknobetonu zvyšuje podstatně provozní životnost sloupků a trvanlivost betonu, takže je vhodné i z hlediska hodnocení životního cyklu konstrukcí a udržitelné výstavby.

Pokrokovost řešení byla oceněna v prestižní soutěži. Prvek získal cenu Inovace roku.

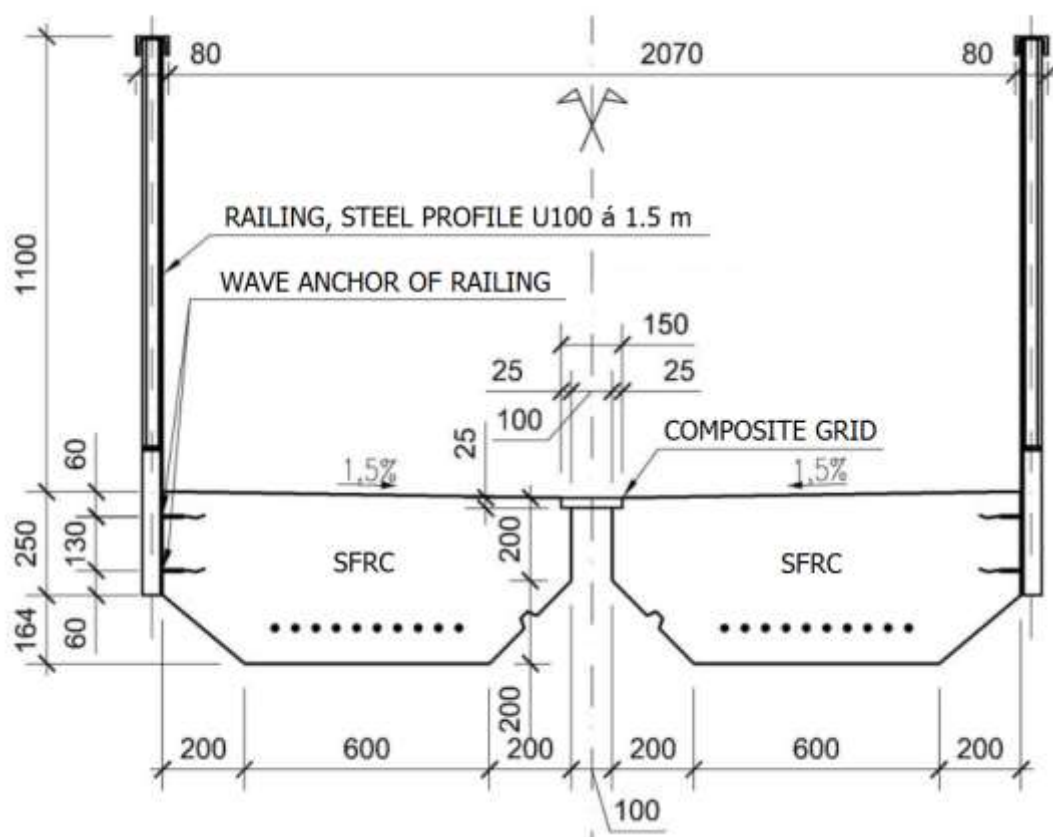
2.4.8 Předpjatá lávka z drátkobetonu

Lávka byla vyvíjena pro oblasti v severních Čechách zasažené bleskovou povodní pro přemostění malých vodních toků. Pro takovéto konstrukce se obvykle navrhují předpjaté konstrukce s tenkostěnným průřezem. V tomto případě bylo zvoleno jiné řešení vzhledem k požadavku na zachování maximálního průtočného profilu pod lávkou, potřebě minimalizovat výšku průřezu a záměru vytvořit jednoduchý prvek s dobrou odolností a vysokou trvanlivostí, který bude moci co nejrychleji nahradit lávky a mostky stržené povodní.

Lávka je navržena výhradně s předpínací výztuží bez doplňkové betonářské výztuže. Minimalizace konvenční výztuže snižuje pracnost a časovou náročnost výroby a snižuje celkovou cenu výrobku. Pěší lávku tvoří dva paralelní nosníky plného průřezu o rozměrech cca 400 mm x 1000 mm, mezi nimiž je mezera. Tyto dva nosníky jsou na koncích – v místě podpory spojeny monolitickými příčnicí. Délka nosníků je 14 metrů; výška průřezu je navržena jako $1/35$ délky, tj. 0,4 m.

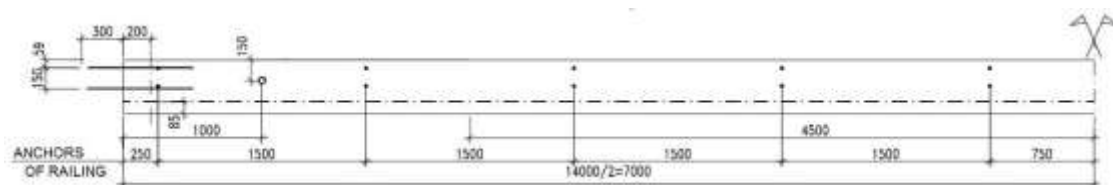
Střední spára šířky 100 mm je kryta kompozitním roštem a slouží pro přímé odvodnění povrchu lávky. Pochozí hydroizolace mostu se předpokládá na bázi asfaltu. Vnitřní strany nosníků jsou opatřeny okapovou lištou, aby voda nestékala dolů po bocích nosníků.

Mostní zábradlí je zakotveno na vlnové kotvy do vnějších boků nosníků.



Obrázek 2-76 Příčný řez pěší lávky

Pro manipulaci s nosníky jsou na koncích osazena lanová oka. Oka jsou zakotvena v drátkobetonu. Pro pojištění jejich zakotvení je oky protažena kotevní výztuž (jediná betonářská výztuž v nosníku), která vyčnívá z čela nosníků a je využita pro zakotvení nosníků do koncových příčníků.



Obrázek 2-77 Schéma podélného uspořádání nosníku

Nosník je předem předpjatý a to deseti lany $\varnothing 15,7$ mm pevnosti 1570/1770 MPa. Část lan je u podpor postupně separována.

Nosníky mají průřez ve tvaru nepravidelného šestiúhelníku (obrázek 2-76, obrázek 2-78). Jsou vyrobeny z drátkobetonu s pevností v tlaku, která odpovídá třídě betonu C 55/67 - XF4, XD3, XC4 s 40 kg drátků na metr krychlový. Drátky o průměru 0,8 mm jsou 60 dlouhé; jejich pevnost v tahu je 1200 MPa. Složení drátkobetonové směsi je v tabulce (tabulka 2-14).

Betonáž nosníků byla prováděna směrem od čel nosníků.

Tabulka 2-14 Složení drátkobetonu

Složka	
Cement CEM I 52.5	400 kg/m ³
Jemná složka 0-4	700 kg/m ³
Kamenivo 4-8	290 kg/m ³
Hrubé kamenivo 8-16	750 kg/m ³
Voda	167 kg/m ³
Drátky	40 kg/m ³
Vápenec	
Microsilika	
Plastifikátor	



Obrázek 2-78 Koncový průřez nosníku s deseti předpínacími lany a betonářskou výztuží pro zakotvení nosníku do monolitického příčnicku



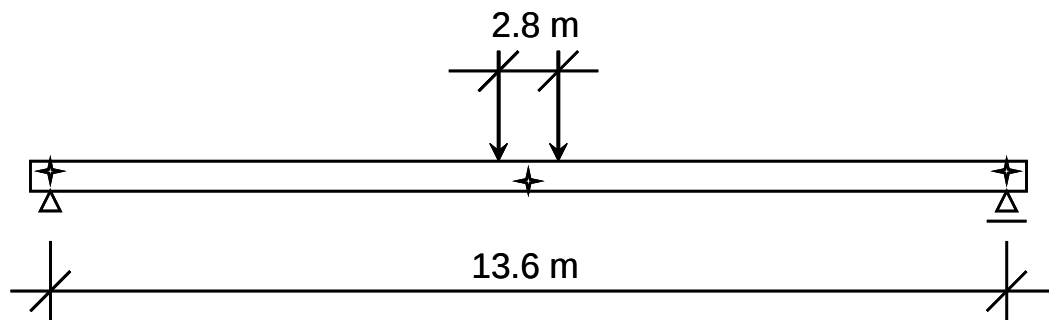
Obrázek 2-79 Čelo prefabrikátu a zvedací oko

2.4.8.1 Zatěžovací zkoušky ve skutečné velikosti

Nosník byl testován v zatěžovací zkoušce podle předpisů pro mostní konstrukce. Zatížení při zkoušce bylo vyvozeno čtyřmi železobetonovými silničními panely (o rozměrech 3x1,2x0,22m). Tíha jednoho panelu odpovídala hmotnosti cca 2000kg tj. 20kN. Panely byly na zkoušený nosník lávky postupně uloženy na podkladky ve středu

rozpětí ve vzdálenosti 1,4 m od středu rozpětí nosníku. Zatížení od prvních dvou panelů odpovídá namáhání, které se blíží běžnému zatížení lávky. Při přitížení dalšími dvěma panely bylo sledováno chování konstrukce při značném přetížení, při kterém se napětí na spodní straně průřezu blíží pevnosti betonu v tahu.

Při zkoušce byly měřeny deformace ve třech příčných řezech – pod vnášeným zatížením a u podpor nosníku. V každém řezu byly umístěny dva senzory, tj. celkem 6 senzorů. Při zatěžovací zkoušce byl sledován a kontrolován stav nosníku. Při obhlídce nebyl zjištěn výskyt trhlin ani jiné nežádoucí jevy.



Obrázek 2-80 Rozmístění měřicích čidel (jsou osazena vždy dvě čidla – na levé a pravé straně nosníku)

Naměřené deformace byly porovnány s teoreticky spočtenými hodnotami průhybů. Porovnání je v grafu (obrázek 2-88) a v tabulce 2-15.



Obrázek 2-81 Osazování čtvrtého panelu při zatěžovací zkoušce

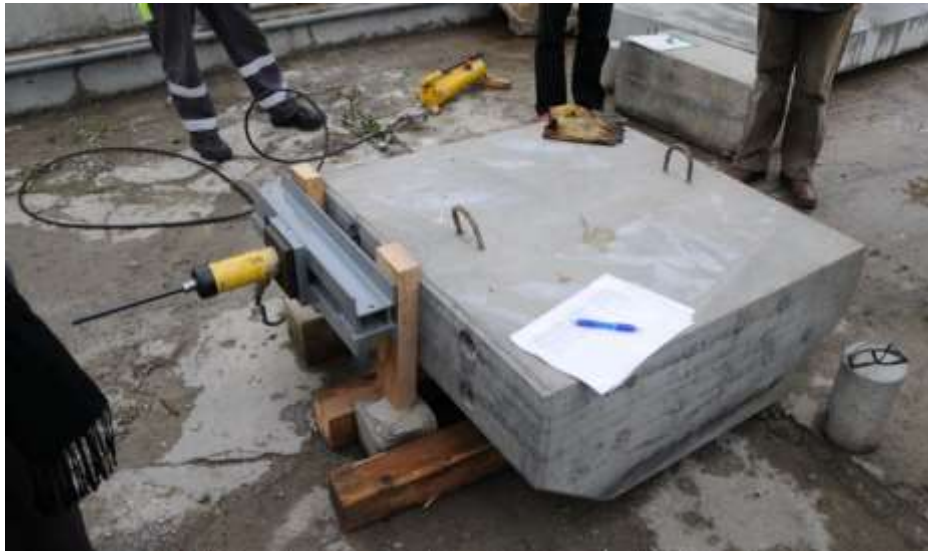
2.4.8.2 Pull-out testy kotevních prvků zábradlí

Zábradlí lávky je ukotveno na vnějších stranách nosníků. Kotevní prvky zábradlí byly testovány v pull-out testu. Zkoušky porovnávaly chování kotevního prvku v drátkobetonu a v referenčním klasickém betonu.

U první tahové zkoušky došlo k porušení při maximálním tlaku v hydraulickém lisu 500 barů, čemuž podle kalibračního listu odpovídá tahová síla 90 kN. Při zkoušce byla porušena ocelová kotva zábradlí přetržením betonářské výztuže kotvy.

U druhé tahové zkoušky došlo k porušení při maximálním tlaku v hydraulickém lisu 520 barů, čemuž podle kalibračního listu odpovídá tahová síla v kotvě 92 kN. Při zkoušce byla porušena ocelová kotva zábradlí přetržením v místě napojení závitového pouzdra na betonářskou výztuž kotvy.

Zkouška prokázala, že k porušení kotvení nedošlo porušením drátkobetonu, jak se před zkouškou očekávalo, ale selháním ocelových částí kotvy. K porušení kotvy došlo při dvojnásobném zatížení, než byl předpoklad před provedením zkoušky a při sedmiapůlnásobku garantované tahové únosnosti kotvy zábradlí, která činí 12 kN.



Obrázek 2-82 Zkouška kotevních prvků zábradlí



Obrázek 2-83 Přetržená výztuž po zkoušce kotevních prvků zábradlí

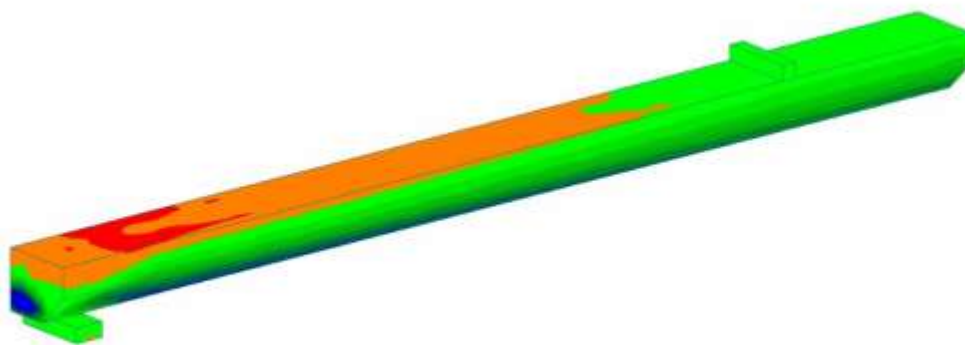
2.4.8.3 Analýza nosníku lávky

Nosník lávky byl navržen metodami lineární pružnosti. Chování prvku při zatěžování, napětí vláknobetonového prvku i předpínací výztuže bylo dále analyzováno pomocí nelineárních výpočtů metodou konečných prvků. Nelineární numerická simulace byla provedena v programu ATENA.

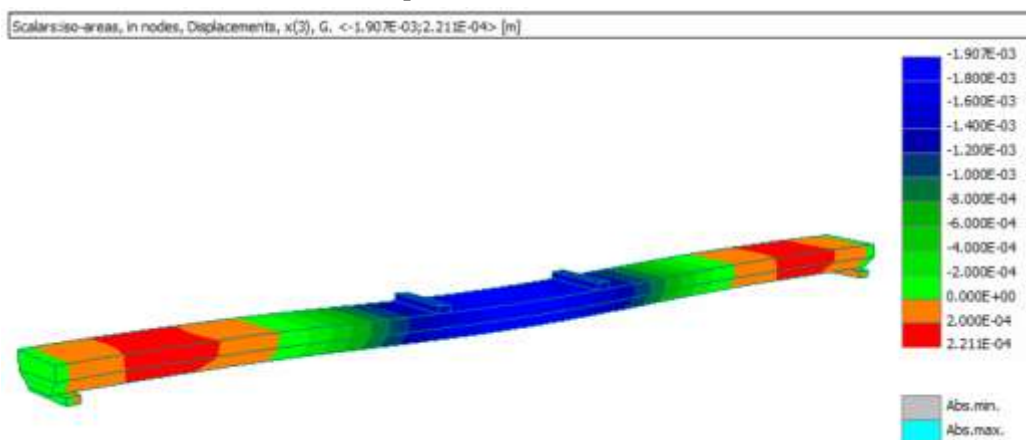
V nelineárním výpočtu byla simulována zatěžovací zkouška. V programu byla modelována čtvrtina nosníku. Podepření bylo voleno tak, aby model podepření simuloval skutečné podpory a podmínky symetrie nosníku a zatížení. Předpínací výztuž byla modelována diskretně. Beton s rozptýlenou výztuží byl zadán jako homogenní materiál s vlastnostmi odpovídajícími chování drátkobetonu. Materiálové parametry drátkobetonu byly určeny na základě běžných materiálových zkoušek na krychlích a trámečcích v tlakových zkouškách, zkouškách v tahu za ohybu na trámčích a inverzní analýzy.

Materiálový model drátkobetonu byl fitován podle materiálových parametrů stanovených v laboratorních testech, ocel pro předpínací kabely má bilineární pracovní diagram. Hodnota meze kluzu je 1570 MPa a velikost modulu pružnosti 200 GPa. V první fázi zatěžování je zadáno předpětí nosníku. Výztuž je s uvažováním ztrát předepnuta na napětí o velikosti 1350 MPa. Separace výztuže je v počítačovém modelu zohledněna různou délkou lan (obrázek 2-86).

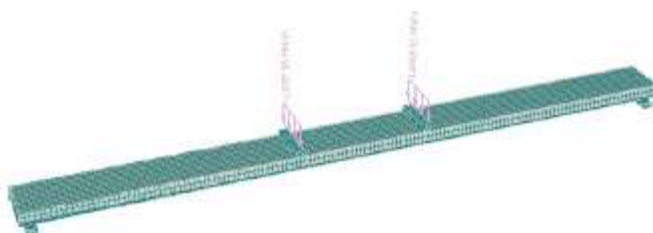
Numerická simulace zatěžovací zkoušky potvrdila výsledky skutečného zatěžování (tabulka 2-15). Bylo spočteno, že vzniká malé množství trhlin do tloušťky 0,05 mm – tj. vlasových trhlin, které okem nejsou patrné.



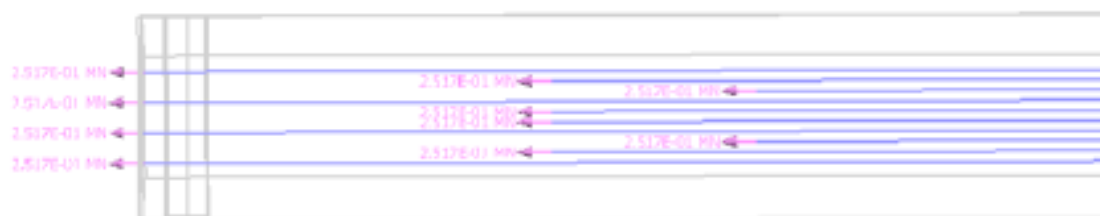
Obrázek 2-84 Napětí nosníku v zatěžovací zkoušce



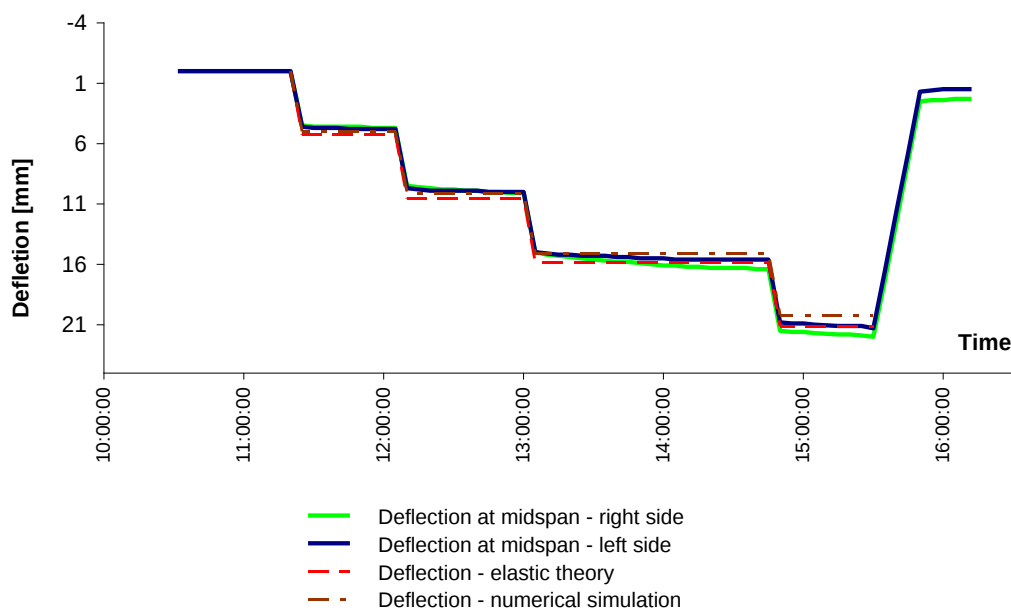
Obrázek 2-85 Vykreslení průhybu po zatížení 4. panelem, deformace nosníku je zvětšena



Obrázek 2-86 Model nosníku se zobrazenou sítí konečných prvků a zatížení



Obrázek 2-87 Separovaná předpínací lana (pohled shora na model lávky)



Obrázek 2-88 Porovnání teoretických průhybů s hodnotami naměřenými při zkoušce nosníku [2, 8, 27, 28, 42]

Tabulka 2-15 Porovnání průhybů naměřených v zatěžovací zkoušce, spočtených ručně a v numerické simulaci

Zatížení	Změřený průhyb [mm]	Průhyb vypočtený „ručně“ [mm]	Průhyb stanovený v numerické simulaci [mm]
1 panel [20 kN]	4.7	5.3	5.0
2 panely [40 kN]	10.0	10.6	10.1
3 panely [60 kN]	16.4	15.8	15.1
4 panely [80 kN]	22.0	21.1	20.2

2.5 Závěry, komentář

Příklady aplikací ukazují, že vláknobeton je výhodný pro použití v prvcích nevyztužených, prvcích, kde je kombinována výztuž rozptýlená s výztuží prutovou, i v prvcích předpjatých. Je možné navrhovat konstrukce prováděné in-situ i ve výrobnách. Zvláště výhodné je použití vláknobetonu v prefabrikátech, kde houževnatost vláknobetonu snižuje nebezpečí poškození dílců při dopravě a manipulaci. Současně je díky vysokému stupni kontroly technologie výroby a jakosti dosahováno vyšší kvality samotného vláknobetonu i kvalitnějšího povrchu prvků. Prvky z vláknobetonu mohou být ve srovnání s prvky z tradičního betonu subtilnější, případně je možné redukovat množství betonářské výztuže. Bylo prokázáno, že vyšší lomová energie vláknobetonu zajišťuje lepší kotvení výztuže a manipulačních úchytů. Vliv rozptýlené výztuže se projeví ve zlepšené soudržnosti podélné betonářské výztuže i pro menší krycí vrstvy. Ve

srovnání s klasickým betonem bez rozptýlené výztuže, kde se při kotvení soudržností šíří radiální trhliny a snižují soudržnost podélné výztuže v betonu, je ve vláknobetonech vznik a rozvoj trhlin podstatně omezen a tím dochází ke zlepšení soudržnosti podélné výztuže. Ze stejných důvodů by měly být zváženy i předpisy pro požadované krycí vrstvy a předepsané krytí pro vláknobetonové konstrukční prvky snížit.

Numerická simulace je silný nástroj v návrhu konstrukcí. Použití nelineárního numerického modelování v návrhu konstrukcí dává projektantovi další možnosti vedoucí k lepšímu návrhu. Nelinearity v materiálových vlastnostech jsou v běžných výpočtech zanedbány zcela, nebo uváženy jen přibližným způsobem a nedostatečně. Pro silně nelineární chování vláknobetonových konstrukcí je nelineární numerická simulace jednak hospodárnější a jednak poskytne lepší informace o rozvoji trhlin v konstrukci, o způsobu porušení a celkové únosnosti.

Pro určitý typ konstrukcí může být vhodný pravděpodobnostní přístup k návrhu konstrukce, který současný stav výpočetní techniky a software pro navrhování již umožňuje. Pro vláknobeton jsou vzhledem k povaze materiálu pravděpodobnostní metody návrhu velmi vhodné.

3 Ultra-vysokohodnotný beton

UHPC (Ultra-High-Performance Concrete – ultra-vysokohodnotný beton) je cementový kompozit s vynikajícími vlastnostmi. Zpravidla je definován jako materiál s tlakovými pevnostmi vyššími než 150 MPa, vysokými tahovými pevnostmi (uvádí se pevnost o osovém tahu minimálně 7 MPa, v některých pramenech nad 15 MPa), velkou duktilitou a vynikající trvanlivostí.

Názvosloví není dosud pevně ustálené. Často jsou v zásadě shodné materiály označovány různě podle návrhu pracoviště, které je vyvinulo. V literatuře se objevují značky UHPFRC (Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete), v amerických zdrojích i RPC (Reactive Powder Concrete). Reactive Powder Concrete je betonový kompozit na bázi reaktivních práškových složek, kde je kamenivo tvořeno drceným křemenným práškem tak jemným (0 – 0,6 mm), že získá i pucolánové vlastnosti. Pevnost RPC dosahuje hodnot až 200 – 800 MPa. Označení CRC (Compact Reinforced Composite) je použito pro cementový kompozit s vysokým obsahem krátkých tuhých vláken. Patentován byl i materiál MSFRCC (Multiscale Fibre Reinforced Cement Composite), který vysokých pevností a duktility dosahuje díky užití několika typů vláken. Označení MDF (Macro Defect Free Concrete) popisuje obecnou vlastnost vysokohodnotných kompozitů – materiál se porušuje vytvořením mnoha drobných mikrotrhlin a nikoli velké makrotrhliny. Ke skupině vysokohodnotných betonů by se dal přiřadit i materiál označovaný ECC (Engineered Cementitious Composite), jemnozrnný cementový kompozit charakterizovaný především vysokými pevnostmi v tahu a vysokou duktilitou. [5]

3.1 Návrh směsi

Mimořádné vlastnosti UHPC jsou dosahovány návrhem hutné struktury kompozitu bez pórů a speciální technologií výroby. Nepravidelné dutiny, póry a trhlinky jsou místa, ve kterých se koncentruje napětí při zatěžování a zde začíná proces porušování betonu. Všechny složky i technologie výroby jsou voleny tak, aby výsledkem byl kompozit s minimem pórů. Materiál UHPC se vyrábí z cementu, jemnozrnného kameniva a dalších plniv a vláken, vody a dalších složek, které snižují vodní součinitel a zlepšují zpracovatelnost.

3.1.1 Vodní součinitel

V běžných betonech má vodní součinitel hodnotu cca 0,5. Vodní součinitel vysokohodnotných betonů (HPC – high performance concrete) musí být snížen na hodnotu pod 0,4. Snížení vodního součinitele je dosaženo použitím superplasifikátoru, který zabraňuje shlukování cementových zrn a upraví konzistenci směsi (ztekucuje směs). Vodní součinitel UHPC má mít hodnotu nižší než 0,25; jsou dosahovány hodnoty mezi 0,16 a 0,2. Takto nízká hodnota je dána jednak podstatně vyšším obsahem pojiva,

jednak použitím nejefektivnější přísady nové generace superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů.

3.2 Kamenivo

Vlastnosti kameniva jsou důležité pro získání vysoké pevnosti a modulu pružnosti. Pevnost kameniva by měla být vyšší než požadovaná pevnost výsledného kompozitu. Tabulka 3-1 uvádí pevnosti a moduly pružnosti některých druhů hornin používaných pro výrobu betonu.

Tabulka 3-1 Porovnání vlastností přírodního kameniva

Hornina	pevnost v tlaku [MPa]	modul pružnosti [GPa]
žula, syenit	160 – 280	40 – 75
diorit, gablo	170 – 300	40 – 100
křemenný porfyr, andezit	180 – 300	25 – 65
čedič, melafyr	290 – 400	55 – 115
diabas	180 – 250	70 – 90
křemenec, droby	150 – 300	60 – 75
křemenný pískovec	120 – 200	10 – 45
vápenec, dolomity	80 – 180	20 – 85
rula	160 – 280	10 – 30
amfibilit	170 – 280	45 – 50

Velikost zrn (frakce kameniva) se volí podstatně menší než kamenivo pro běžný beton. Obvykle se nepoužívají zrna větší než 4 nebo 8 mm.

Kamenivo musí mít vhodný tvarový index; měl by se blížit hodnotě jedna. Nejvhodnější jsou zrna kulového tvaru. Plochá, podlouhlá a zrna jsou nevhodná, protože způsobují značnou mezerovitost.

V návrhu směsi se sleduje i rozložení jednotlivých frakcí v čáře zrnitosti, aby základní struktura tvořená kamenivem a drátky byla bez pórů.

3.2.1 Jemné částice

K dosažení ideální čáry zrnitosti a dokonalému vyplnění struktury kompozitu se používá velké množství jemných částic. Jemné částice představuje mikrosilika resp. křemičitý úlet. Byly zkoušeny i směsi s popílkem. Mezi jemné částice můžeme zahrnout i nezhydratovaný cement, který se tím z pojiva mění na plnivo.

Křemičitý úlet je vedlejším produktem výroby čistého křemíku nebo slitin obsahujících křemík. Křemičité úlety jsou tvořeny zejména sklovitou silikou. Částice jsou dokonalého kulovitého tvaru o průměru 0,1 µm do 1 µm. Objemová hmotnost se

pohybuje okolo 2200 kg/ m³. Křemičité úlety mají velký měrný povrch. Patří mezi tzv. aktivní příměsi; vysoký obsah SiO₂ jim dodává pucolánové vlastnosti.

Popílek je vedlejším produktem spalování v tepelných elektrárnách. Jeho použití v UHPC je sporné, protože vlastnosti popílků jsou velmi nestálé a značně závisejí na způsobu spalování a typu spalovaných materiálů. Obecně popílků zpomalují hydrataci cementu, snižují vývin hydratačního tepla a zlepšují reologické vlastnosti směsi, což je pro výrobu UHPC zpravidla přínosem.

3.2.2 Vlákná

Zvyšování tlakové pevnosti běžného betonu vede k jeho vyšší křehkosti. Vysokopevnostní betony se při tlakové zkoušce porušují explozivně. Vlákná přidaná do směsi jednak zvyšují tahové pevnosti kompozitu a jednak snižují křehkost, resp. zvyšují duktilitu materiálu. Běžná dávka vláken v UHPC je 2 až 3% (tj. např. 160 až 240 kg drátků na metr krychlový kompozitu), ale obsah vláken může být i podstatně vyšší (u některých materiálů až 6%), pokud je požadována vysoká tahová pevnost UHPC.

Rozměr vláken má odpovídat velikosti kameniva. Používají se vlákna o délce 12 až 20 mm s profilem 0,1 až 0,3 mm. Některé kompozity UHPC obsahují kombinace několika typů vláken. Odlišné typy vláken přinášejí různé výhody a různě ovlivňují výsledné vlastnosti kompozitu.

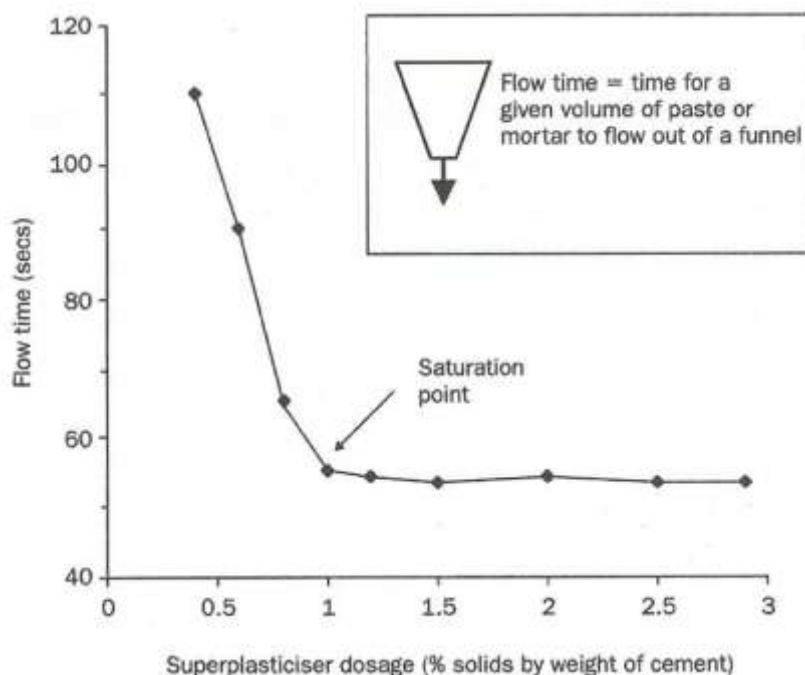
3.2.3 Přísady

Plastifikační přísady jsou pro výrobu UHPC nezbytné. Snižují množství vody potřebné pro ztekucení čerstvé směsi. Dosahuje se tím žádaného snížení vodního součinitele a nárůstu pevností výsledného kompozitu. Do UHPC se přidávají tzv. superplastifikátory, které jsou ve srovnání s plastifikátory účinnější a mají méně druhotných nepříznivých vlivů. Nejčastěji se jako superplastifikátory používají polykarboxyláty a polykarboxylátétery. Bývají nazývány i superplastifikátory nové generace.

Superplastifikátory se dávkují ve velmi malém množství; zvýšení dávky superplastifikátoru nad určitou mez nepřinese další snížení vodního součinitele, naopak může zhoršit výsledné vlastnosti UHPC. V této souvislosti se používá termín „bod nasycení“ (saturation point) udávaný jako poměr plastifikátoru a cementu, za kterým již nedochází k dalšímu ztekucení směsi.

Plastifikátory snižují tendenci zrn vytvářet shluky a zvyšují tekutost směsi tím, že způsobují vzájemné odpuzování cementových zrn a prostorovou blokaci cementových zrn molekulami vody.

Působení superplastifikátorů je časově omezené. Také proto je UHPC používán především pro výrobu prefabrikátů.



Obrázek 3-1 Bod nasycení uvedený v literatuře (na svislé ose je doba ztekucení směsi, na vodorovné ose dávkování superplastifikátoru)

3.3 Technologie výroby

3.3.1 Míchání směsi

Technologie míchání směsi je zásadní součástí výrobního procesu UHPC. Kompozit má vysoký obsah jemných částic nutných kvůli hutné struktuře kompozitu. Jemné částice mají tendenci vytvářet shluky; shluky nerozmíchaných částic by v hotovém kompozitu zhoršovaly materiálové charakteristiky, proto je třeba vytváření shluků zabránit – vhodným návrhem směsi a také vhodnou technologií při zpracování směsi. Nejprve se smíchají nasucho kamenivo, cement a jemné složky, pak je přidána záměsová voda se superplastifikátorem. Vlákná jsou přidávána zpravidla až jako poslední složka. Doba míchání a přesný postup přidávání složek se může u jednotlivých UHPC lišit a je zpravidla chráněn a utajován jako know-how firmy nebo laboratoře.

A. E. Naaman [54] popisuje výrobu jedné z laboratorních směsí takto: Nejprve byla nasucho míchána silika s veškerým pískem po dobu 5 minut. Pak byl přidán cement a křemičitý prach suchá směs byla míchána nejméně dalších 5 minut. Pak byla přidána voda. Všechny plastifikátory byly přidány najednou po dávce vody. Po zhruba 5 minutách míchání směs ztekutěla. Vlákná byla přidávána po následujících 5 minutách. Byla použita horizontální míchačka (1,8 kW) o kapacitě 60 litrů a konstantní rychlostí 60 rpm.

3.3.2 Ošetřování

Speciálními způsoby ošetřování lze dosáhnout dalšího zvýšení pevnosti UHPC. Hutnost čerstvé směsi v prvku může být zvýšena aplikací tlaku během vibrování nebo hutněním pomocí centrifugy. Aby bylo zabráněno vzniku smršťovacích trhlin bezprostředně po

odlití do formy, může být prvek během tuhnutí vlhčen vytvářením vodní mlhy nebo páry za teplot 30 – 40 °C. Po ztuhnutí kompozitu lze prvek ošetřovat za vysokých teplot a tlaku např. v autoklávu nebo propařováním.

Zahřívání prvku na teplotu kolem 90 °C a velmi vysoká relativní vlhkost po dobu cca 48 hodin mohou podstatně zvýšit trvanlivost a omezit smršťování a dotvarování. Ošetřování parou za nižších teplot kolem 40 až 50°C v počátečním stádiu tuhnutí může tuhnutí urychlit; ovlivnění dlouhodobého chování (dotvarování, smršťování) je méně výrazné.

3.3.3 Příklady složení směsí

Na základě zásad popsaných v předchozím odstavci vyvinuli různí výrobci ultra-vysokohodnotné kompozity, které jsou nabízeny pod různými obchodními názvy. Detailní informace o složení a technologii výroby nejsou v literatuře běžně k dispozici. Přehled nejznámějších značek UHPC spolu s dostupnými informacemi uvádí následující text.

3.3.3.1 Ductal®

Materiál Ductal vyvinutý firmou Lafarge je pravděpodobně nejznámější a nejrozšířenější ultra-vysokohodnotný betonový kompozit. Je používán po celém světě – v Evropě, v Severní Americe, v Japonsku, v Korei.

Tabulka 3-2 Příklad složení materiálu Ductal

Složky	Směs I		Směs II
	kg/m ³	% hmotnosti	kg/m ³
Portlandský cement	712	28,5	710
Mikrosilika	231	9,3	230
křemičitý písek	1 020	40,8	1020
jemně mletý křemičitý písek	211	8,4	210
drátky	156	6,2	160
superplastifikátor	30,7	1,2	13
urychlovač	30	1,2	
voda	109	4,4	140

3.3.3.2 CRC

Materiál CRC [38] byl vyvinutý laboratoří Cement and Concrete Laboratory firmy Aalborg Portland v roce 1986. Nyní ho nabízí firma CRC Technology z Dánska. V kompozitu je vysoký obsah drátků – od dvou do šesti objemových procent, velké množství siliky; vodní součinitel je nižší než 0,16. Jako kamenivo jsou používány křemičité či korundové písky do velikosti zrn 4 mm.

Materiál dosahuje pevností 140 až 400 MPa v tlaku, 10 až 30 MPa v tahu za ohybu. Objemová hmotnost je 2600-3000 kg/m³. [6]

Tabulka 3-3 Příklad složení směsi kompozitu CRC

Složky	Hmotnostní dávka
Portlandský cement	1
Mikrosilika	0,92
křemičitý písek	0,25
vodu redukující přísada	0,0108
drátky	0,22 až 0,3
voda	0,18 až 0,2

Tabulka 3-4 Materiálové charakteristiky CRC

objemová hmotnost	2 600 – 3 500 kg/m ³
tlaková pevnost (28 dní)	140 – 400 MPa
ohybová pevnost	100 - 300 MPa
modul pružnosti	40 – 100 GPa

3.3.3.3 BSI/Ceracem (Eiffage a Sika)

Kompozit BSI-Ceracem®, vyvinutý firmou ve spolupráci firem Sika a skupiny Eiffage dosahuje průměrných pevností 190 MPa. Materiál je nabízen jako suchá směs, do které se přidává superplastifikátor, voda a drátky o délce 20 mm a průměru 0,16 až 0,3 mm. Z kompozitu se vyrábějí prefabrikované dílce.

Tabulka 3-5 Dávkování pro výrobu kompozitu BSI-Ceracem®

Složky	
Suchý premix	2 360 kg
Superplastifikátor	45 kg
voda	195 l
drátky	200 kg

3.3.3.4 CEMTEC^{multiscale}

CEMTEC^{multiscale}® byl vyvinut a patentován laboratořemi Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Paříž, Francie). V kompozitu může být až 11 objemových procent vláken tří různých typů.

Tabulka 3-6 Příklad složení směsi kompozitu CEMTEC

Složky	Dávka kg/m ³	
Portlandský cement	1 050	1051
silika	268	273
písek	514	733
superplastifikátor	44	35

drátky	858	468
voda	180	165

3.3.3.5 BCV (Vicat a Vinci)

Materiál BCV® (Béton Composite Vicat) vyvinula firma Vicat a skupina VINCI v roce 2005. [45]

Tabulka 3-7 Příklad složení směsi kompozitu BCV®

Složky	Dávka
cement CEM I 52,5	700 kg/m ³
písek	
silika	
vodní součinitel	< 0,25
drátky 10 – 20 mm dlouhé (kombinace různých typů), průměr 0,1 – 0,3 mm	2 – 3% objemu
polymerová vlákna (požární odolnost)	
superplastifikátor	

Tabulka 3-8 Materiálové charakteristiky kompozitu BCV®

objemová hmotnost	2 480 kg/m ³
tlaková pevnost (28 dní)	130 – 150 MPa
tlaková pevnost (24 hodin)	50 MPa
tahová pevnost	8 MPa
ohybová pevnost	30 MPa
statický modul pružnosti	44 GPa

Kompozit UHPC je vyvíjen na mnoha pracovištích, na univerzitách a vědeckých institutech i v laboratořích velkých firem.

Jsou zkoumány možnosti různých kombinací složek, např. náhrady mikrosiliky mletým popílkem, mikroplynivem na bázi vápence, křemičitými mikroplynivými, mikromletým znělcem, mikroplynivými organického původu (popílek z rýžových slupek).

Jedna z významných univerzitních laboratoří zabývajících se vysokohodnotným betonem je na univerzitě v Kasslu. Prof. Schmidt s kolektivem mimo jiné navrhli směsi pro dvě lávky. Jejich složení je v tabulce 3-9.

Tabulka 3-9 Příklady dvou směsí navržených prof. Schmidtem a Teichmannem

Složky	Směs I	Směs II
	kg/m ³	kg/m ³
cement	733	580
mikrosilika	230	177
jemně mletý křemičitý písek 1	183	131
jemně mletý křemičitý písek 2	-	325
superplastifikátor	32,9	33,4
křemičitý písek (8 mm)	1 008	354
čedič (8 mm)	-	711
drátky	194	192
voda	271	141
vodní součinitel	0,19	0,21

3.4 Aplikace UHPC v konstrukcích

UHPC kompozity mají mimořádné vlastnosti – vedle vysokých pevností a modulu pružnosti i velkou duktilitu, dlouhodobou životnost, mrazuvzdornost, odolnost při cyklickém namáhání. Díky nim mohou být UHPC kompozity použity ve speciálních konstrukcích, kde je požadována minimální tloušťka prvků a jejich vysoká trvanlivost a odolnost.

Vzhledem k náročnosti technologie výroby UHPC, nutnosti pečlivé kontroly při výrobě je kompozit UHPC využíván především pro výrobu prefabrikovaných dílců. Využití jako kompozitu vyráběného in-situ je dále limitováno vysokou rychlostí hydratace kompozitu. UHPC byl v monolitické formě využit pro opravy a rekonstrukce některých mostních objektů, kanálů a přepadů malých vodních děl.

V současnosti se z UHPC provádějí především mostní konstrukce, speciální konstrukční prvky a konstrukce a dekorativní architektonické prvky.

Z mostních konstrukcí lze jmenovat Bourg-lès-Valence ve Francii, most Wapello County v USA. Častější je použití UHPC pro pěší lávky – např. Sherbrooke (Quebec), Seonyu (Jižní Korea), Kassel (Německo).

Mezi speciální konstrukční prvky můžeme zařadit zastřešení mýtné brány mostu Millau, zastřešení zastávky v Shawnessy (Kanada), střešní panely čistírny odpadních vod v Acheres (Francie).

Široké využití nachází UHPC v architektonických aplikacích od různě ztvárněných fasádních panelů, přes akustické obkladové panely, městský mobiliář (lavičky, stoly) až k interiérovému nábytku.

3.4.1 Mosty a lávky

3.4.1.1 Most míru - Seonyu Bridge

Pěší lávka přes řeku Han na ostrov Suyudo v Soulu (Korea) od francouzského architekta Rudy Ricciottiho byla uvedena do provozu v dubnu 2002 v souvislosti s konáním světového pohár ve fotbalu. Použití UHPC (Ductalu) umožnilo navrhnout oblouk na rozpětí 120 m o šířce 4,3 m. Oblouk je extrémně tenký – jeho horní deska má největší tloušťku 3 cm.



Obrázek 3-2 Pěší lávka „Most míru“



Obrázek 3-3 Pěší lávka „Most míru“ s provizorním podepřením při výstavbě

Konstrukce lávky je z ocelových prvků a středního UHPC oblouku na rozpon 120 m. Oblouk tvoří šest zakřivených segmentů o délce 20 až 22 metrů. Segmenty byly po

vyrobení dovezeny na stavbu, sepnuty dohromady a předepruty. Nakonec byly spojeny dohromady dvě poloviny oblouku monolitickým prvkem z Ductalu ve vrcholu oblouku. Konstrukce je natolik subtilní, že bylo nutné vložit do ní tlumič kmitání s přidavnou hmotností na utlumení otřesů.

Na výrobu segmentů byl použit materiál s obchodní značkou Ductal. V tomto UHPC byla použita ocelová vlákna 13 – 15 mm dlouhá o průměru 0,2 mm v dávce 2 objemových procent. Ductal pro výrobu jednoho segmentu byl míchán celkem pět a půl hodiny. Aby byly eliminovány trhliny od smršťování, byl vybetonovaný segment v bednění po dobu 48 hodin zahříván na teplotu 35°C. Další ošetřování probíhalo po zatuhnutí směsi v zahřívací komoře při teplotě 90°C po dobu 48 hodin.

Po úspěšné aplikaci na Mostu Míru byl Ductal použit pro další lávky i mosty po celém světě. V práci je uvedeno několik dalších příkladů.

Pěší lávku k zastávce Papatoetoe v Aucklandu na Novém Zélandu tvoří spínané nosníky TT průřezu s vylehčenými stěnami.



Obrázek 3-4 Lávka s nosníky z UHPC

3.4.1.2 Pěší lávka Sakata Mirai

Na této lávce byl poprvé použit materiál UHPC v Japonsku. Nosnou konstrukci lávky Sakata Mirai tvoří komorový nosník na rozpětí 50 metrů. Tloušťka horní desky nosníku je pouhých 5 cm stěny mají tloušťku 8 cm. Šířka lávky je 2,4 m, výška nosníků je 0,55 m až 1,56 m. [51]



Obrázek 3-5 Lávka Sakata Mirai



Obrázek 3-6 Sestavování Lávky Sakata Mirai

Architekt Ricciotti navrhl dvě lávky podobného konstrukčního uspořádání – Pont du Diable a lávku k nové budově muzea Mucem v Marseille. Zábradlí lávky je současně nosným prvkem lávky; je provedeno pomocí sepnutých prefabrikátů z UHPC, mezi nimiž jsou desky tvořící mostovku.



Obrázek 3-7 Forma nosníků pro lávku Pont du Diable



Obrázek 3-8 Lávka k muzeu Mucem v Marseille

Z materiálu vyvinutého kolektivem prof. Schmidta na univerzitě v Kasslu byla postavena lávka přes řeku Fuldu v Kasslu. Hybridní nosná konstrukce kombinuje použití oceli a UHPC. Lávka o délce 132 m má 6 polí.



Obrázek 3-9 Lávka vyvinutá ve spolupráci s univerzitou v Kasslu

V rámci přípravných prací byly postaveny dva mostky v Niestetalu blízko Kasslu z dodatečně předpjatého prefabrikátu na rozpon 8 resp. 12 m. Vyztužení prefabrikátů tvoří pouze rozptýlené vyztužení drátky a předpínací výztuž (krom betonářské výztuže v kotevních oblastech).

3.4.1.3 Pěší lávka přes Labe v Čelákovících

V červnu 2014 byla otevřena lávka přes Labe v Čelákovících, pro jejíž mostovku byl použit ultravysokohodnotný beton. Zavěšená konstrukce lávky je z UHPC prefabrikátů.



Obrázek 3-10 Lávka z UHPC v Čelákovících [19]

3.4.2 Střešní konstrukce

3.4.2.1 Zastřešení zastávky v Shawnessy (Kanada)

Konstrukce byla oceněna jako vynikající konstrukce cenou fib.

Zastřešení je provedeno z 24 UHPC prefabrikátů. Jednotlivé segmenty přístřešku zastřešují plochu 5,5 x 6m. Mají tloušťku 20 mm.



Obrázek 3-11 Zastřešení zastávky Shawnessy

3.4.2.2 Zastřešení mýtné brány u mostu Millau

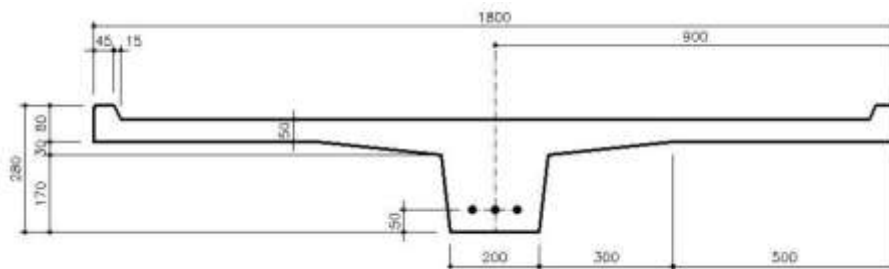
Mýtná brána je zastřešena „betonovým baldachýnem“ o rozměrech 100 x 28 m, který je sestaven z 53 prefabrikátů. Prefabrikáty jsou z UHPC s vysokým obsahem drátků.



Obrázek 3-12 Zastřešení mýtné brány

3.4.2.3 Zastřešení čistírny odpadních vod v Achères

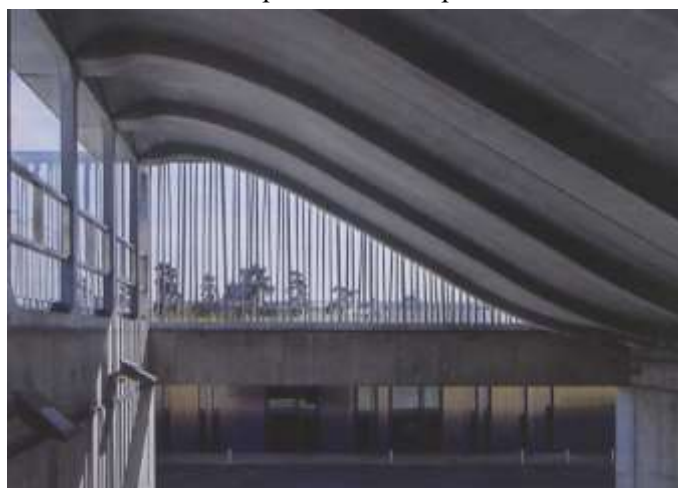
Prefabrikované střešní dílce byly použity ve Francii pro čistírnu odpadních vod. Plocha 3 500 m² je zastřešena 18 předpjatými UHPC skořepinami ve tvaru vlny.



Obrázek 3-13 Průřez skořepiny



Obrázek 3-14 Manipulace se skořepinou na stavbě



Obrázek 3-15 Střešní konstrukce čistírny v Achères, Francie

3.4.3 Schodiště

Z materiálu CRC [21] jsou vyráběny a firmou Hi-con komerčně využívány různé prefabrikované prvky – schodiště, balkony, sloupy. Konstrukce jsou sestavovány ze segmentů; jednotlivé segmenty jsou lepeny materiálem CRC s obsahem vláken 6%.

Schodiště ve firmě Bellinger in Risikov ve městě Aarhus je z roku 2007. Schodiště s třemi rameny a dvěma podestami navrhli projektanti Kersten & Westphal a architekti Smærup & Wessman. Tloušťka schodišťové desky je 80 mm. [21]



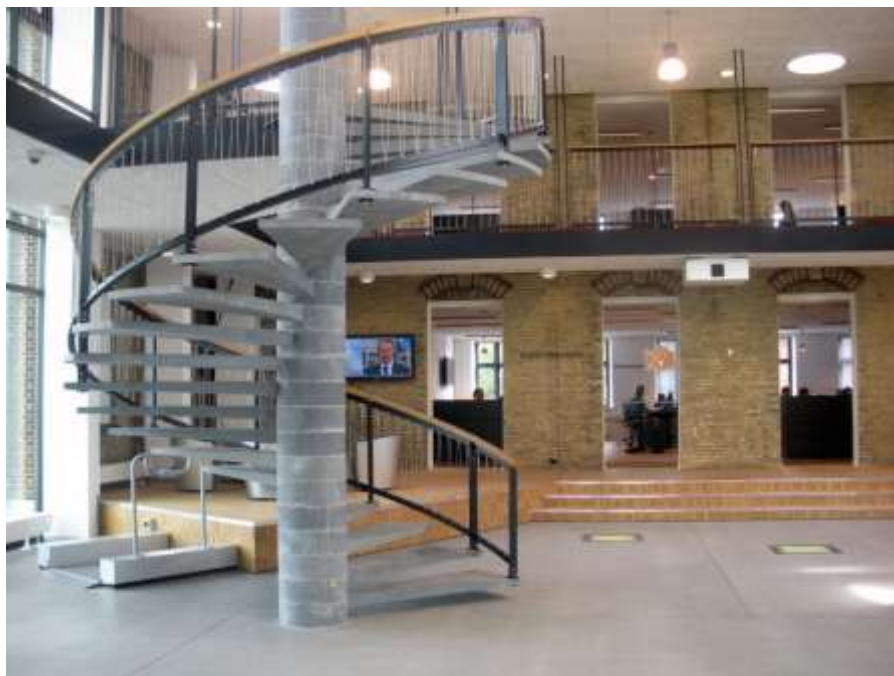
Obrázek 3-16 Schodiště z materiálu CRC, Brunsbjergvej, Århus, Dánsko

Architektzy oblíbený tvar schodišťových ramen byl navržen i pro schodiště ve škole Sydhavnsskolen v Kodani v roce 2013. Schodišťová ramena o šířce 1,6 metru mají tloušťku 13 cm.



Obrázek 3-17 Schodiště ve škole Sydhavnsskolen, Kodaň, Dánsko

Jedno ze spirálových schodišť bylo instalováno v bance Max Bank, Næstved. Schodiště je sestaveno z jednotlivých prefabrikátů. Vnější průměr schodiště je 3,5 metru.



Obrázek 3-18 Spirálové schodiště v Max Bank

3.4.4 Štíhlé sloupy

Rozměry běžných betonových sloupů jsou dány nároky na únosnost, z kterých vychází požadovaný rozměr průřezu, a dále konstrukčními zásadami, které předepisují krytí betonářské výztuže a omezují minimální rozměr betonových sloupů. Při použití UHPC lze dosáhnout velmi podstatně subtilnějších prvků.

Při rozšíření Muzea královny Sofie v Madridu byly navrženy sloupy kruhového průřezu 32 cm o výšce 16 m. Sloupy měly být ocelobetonové. Při těchto rozměrech by byl problém osadit do ocelového pláště betonářskou výztuž. Proto bylo zvoleno řešení s rozptýlenou výztuží a ocelový plášť byl vyplněn ultra-vysokohodnotným betonem Ductal. Šlo o ojedinělou výrobu UHPC in-situ, kdy celý sloup musel být vyplněn betonem při kontinuální betonáži.



Obrázek 3-19 Betonáž ocelobetonových sloupů z Ductalu



Obrázek 3-20 Muzeum královny Sofie v Madridu se štíhlými ocelobetonovými sloupy z UHPC



Obrázek 3-21 Štíhlé sloupy v Musée Toulouse Lautrec v Albi

3.4.5 Architektonické využití UHPC

Jako jeden z příkladů architektonického využití UHPC jsou zde uvedeny fasádní panely muzea středozezemních kultur v Marseille MuCEM (Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée). Cílem architekta Ricciotiho, který je autorem muzea, bylo vytvořit náhodný nepravidelný vzhled fasády s opakujícími se prvky. Bylo navrženo šest různých typů prefabrikátů a z nich byla fasáda smontována.



Obrázek 3-22 Pohled na lávku z UHPC a UHPC fasádní panely muzea MuCEM



Obrázek 3-23 Fasáda sestavená z UHPC perforovaných panelů

3.5 Cyklopoint z UHPC

Na katedře betonových a zděných konstrukcí se podařilo vyvinout vlastní recepturu materiálu UHPC, který se vyrábí z místních surovin. Ve spolupráci s firmou SMP byl materiál použit pro konstrukci. Při budování naučné stezky poblíž Blovic vznikla netradiční konstrukce z UHPC. Na stezce mělo vzniknout odpočinkové místo pro pěší a cyklisty – tzv. Cyklopoint. Architektonickým záměrem bylo vytvoření jednoduché, ale nápadné konstrukce, která měla být subtilní a současně odolná a trvanlivá. Architektonický tým s ing. arch Šikolou v čele navrhl přístřešek s lavičkami a stolem a vedle něj stojan pro kola (Obrázek 3-24). Ve spolupráci s týmem katedry betonových a zděných konstrukcí byly pro konstrukci zvoleny materiály – na nosné prvky byl použit ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) a pro lavičky vláknobeton s polymerovými vlákny.



Obrázek 3-24 Cyklopoint u rybníka Výsovák – architektonická studie [50]

Pro nosné prvky konstrukce byla vyvinuta originální receptura UHPC založená na použití místních surovin a odpovídající technologický postup přípravy směsi. Během vývoje nové receptury byly sledovány fyzikálně-mechanické parametry vyráběného kompozitu. Základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3-10. Zobrazené výsledky jsou vždy průměry minimálně, ze šesti vzorků. Tlaková a tahová pevnost jsou uvedeny v charakteristické hodnotě. Charakteristická hodnota byla získána při statistickém vyhodnocení zkoušky podle ČSN EN 1990, příloha D.

Tabulka 3-10 Vlastnosti použitého UHPC

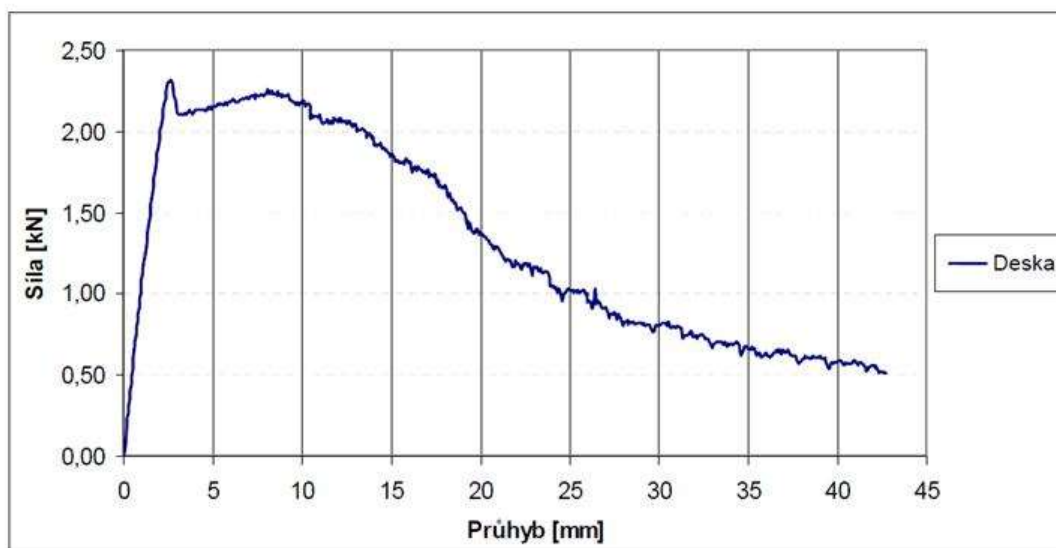
Objemová hmotnost	ρ	2850 kg/m ³
Tlaková pevnost	f_{ck}	165,5 MPa
Tah za ohybu ^[5]	f_{ctk}	15,3 MPa
Příčný tah	f_{ct}	13,2 MPa
Modul pružnosti	E	44,5 GPa
Konzistence		F6
Hloubka průsaku tlakovou vodou		12 mm

Pro ověření chování konstrukce byly vyrobeny nejvíce namáhané prvky (obrázek 3-25) a jejich odolnost byla laboratorně ověřena.



Obrázek 3-25 Výroba desky pro experimentální ověření únosnosti

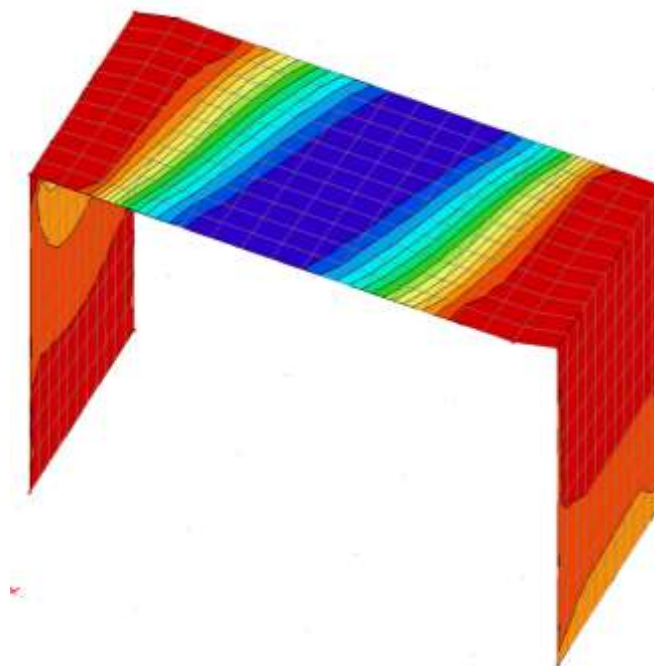
Obrázek 3-26 ukazuje záznam zatěžování desky stolu. Deska byla zkoušena v třibodovém ohybu, zatěžovací síla byla vnášena jako liniové zatížení. Zkouška prokázala, že pro požadované zatížení – osoba sedící na desce stolu je více než dvojnásobná rezerva.



Obrázek 3-26 Záznam zkoušky v třibodovém ohybu desky stolu

3.5.1 Návrh konstrukce

Konstrukce byla navržena za předpokladu pružného působení. Cílem bylo ověření maximálního napětí v konstrukci a úprava rozměrů konstrukčních prvků tak, aby prvky byly schopné přenést požadované zatížení bez prutové betonářské výztuže. Tloušťka střešního a stěnových dílců byla stanovena na 100 mm při rozpětí 3500 mm. Při návrhu byly uvažovány tyto zatěžovací stavy: montážní stav, vlastní tíha + sníh, vlastní tíha + osoba konající údržbu). Tloušťka konstrukce stolu byla stanovena na 50 mm při rozpětí 2000 mm. Pro návrh konstrukce stolu byly uvažovány dva zatěžovací stavy: 1) montážní stav, 2) osoba sedící uprostřed stolu). Ukázka průběhu tahových napětí v rámové konstrukci přístřešku je na obrázku (obrázek 3-27).



Obrázek 3-27 Průběh tahových namáhání v horní desce přístřešku cyklopointu

3.5.2 Nelineární numerická simulace

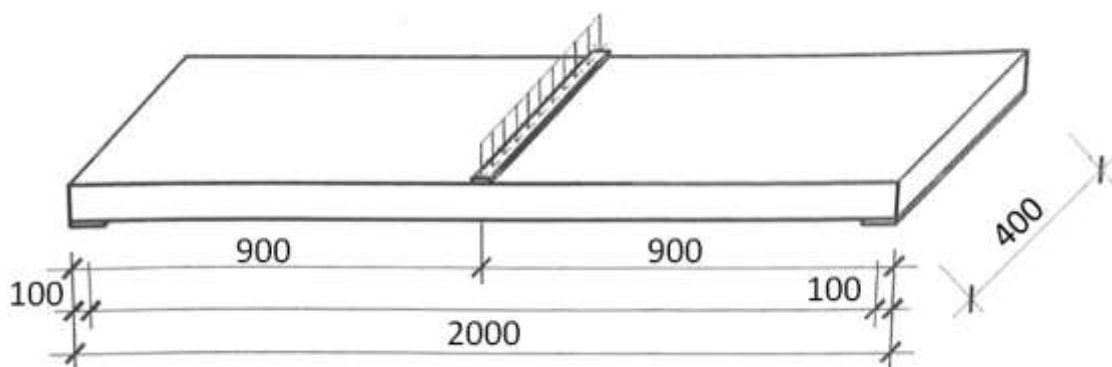
Dva prvky z UHPC byly ověřeny pomocí nelineární analýzy. Prvním prvkem je vodorovný střešní panel, který zakrývá celou konstrukci a přenáší vlastní tíhu a klimatická zatížení, zejména zatížení sněhem. V této práci jsou prezentovány výpočty mezního stavu únosnosti pro kombinaci vlastní tíhy a zatížení sněhem. Dále bylo definováno mimořádné zatížení, které je reprezentováno stojící skupinou lidí na horním panelu.

Druhým zkoumaným prvkem je stolek. Zatěžovací stav stolku reprezentuje zatížení vlastní tíhou. Jako mimořádné zatížení je uvažován dospělý stojící uprostřed rozpětí. Při tomto stavu je sledováno, zda nedochází k nadměrným průhybům nebo trhlinám.

K analýze byl použit software ATENA.

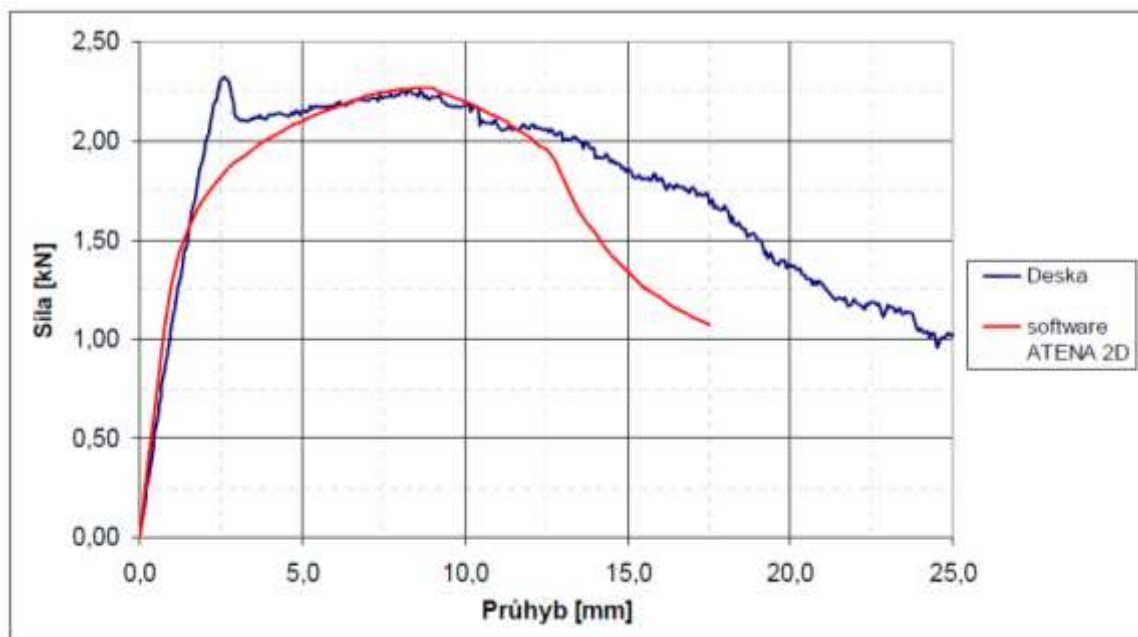
Základem materiálového modelu byl 3D Nonlinear Cementitious 2. K inverzní analýze byl využit experimentálně vybetonovaný deskový prvek, který původně sloužil k ověření návrhu konstrukce před realizací cyklopointu. Deska o tloušťce 50 mm a půdorysných rozměrech 400 x 2000 mm byla zatěžována v třibodovém ohybu, tj. byla uložena na dvě podpory a zatížena silou uprostřed rozpětí. Rozpon při zatěžovací zkoušce byl 1 800 mm (obrázek 3-28).

Materiálový model je stanoven tak, že postupným upravováním vstupních materiálových parametrů je nalezena taková kombinace parametrů, kdy zatěžovací křivka (zatížení – průhyb) spočítaná v numerické simulaci odpovídá záznamu zatěžovací zkoušky v laboratoři. Shoda je nalezena pro krychelnou pevnost 67,5 MPa. Lomová energie musí být značně zvětšena oproti implementovanému materiálu, který je primárně určen pro modelování obyčejného betonu. V návaznosti na tuto úpravu je vhodné změnit hodnotu redukce tlakové pevnosti vlivem trhlin a zvýšit kritickou tlakovou deformaci, což souvisí s obecně vyšší duktilitou vláknobetonu.



Obrázek 3-28 Schéma zatěžovací zkoušky deskového prvku

Porovnání aproximace s laboratorní zkouškou je na obrázku (obrázek 3-29). Křivky se v zásadě shodují. Odlišnost v první fázi zatěžování je dána rychlostí zatěžování při laboratorním testu.



Obrázek 3-29 Porovnání výsledků numerické simulace a laboratorní zkoušky

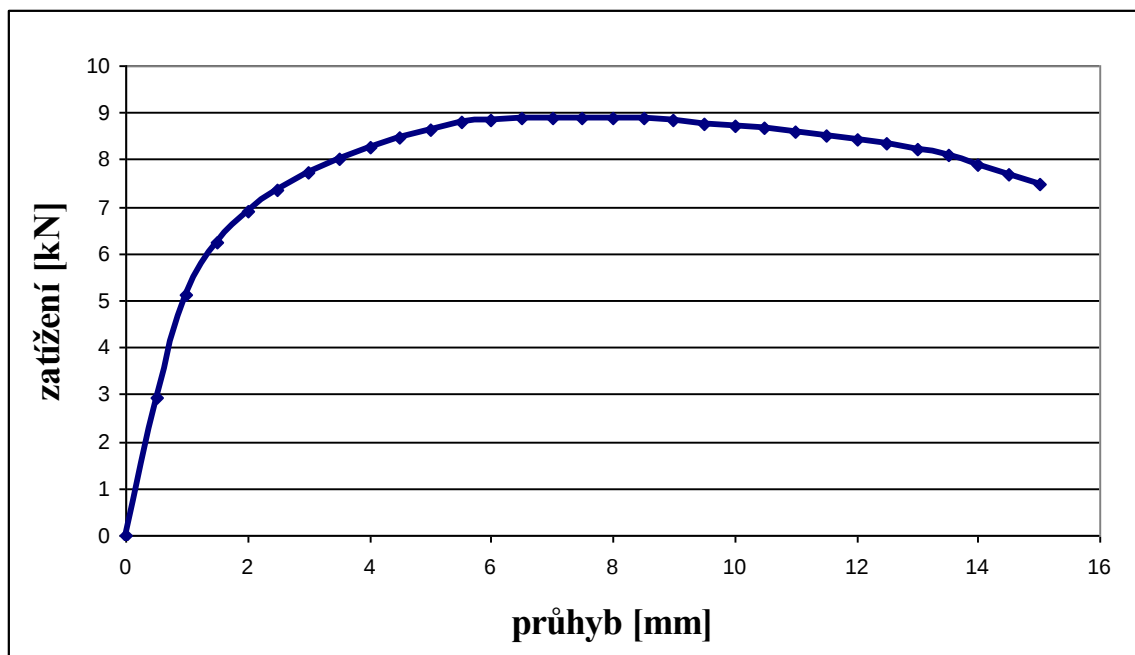
S nalezenými materiálovými parametry bylo simulováno chování celé konstrukce. Střešní panel je navržen jako půdorysně zkosený a má tvar lichoběžníku. Pro převedení do 2D modelu je z konstrukce použit střední pruhu panelu. Pro tento střední pruh modelu bude stanovena maximální únosnost na 1 m šířky. Rozpon konstrukce v této variantě je 3 400 mm.

Konstrukce stolku cyklopointu představuje uzavřený rámový prvek o tloušťce 50 mm. Je realizovaný jako jeden kompletní kus bez nutnosti další montáže. Při montáži byl umístěn na předem určené místo a nebylo nutné jeho další zajištění. Vnější rozměr rámové konstrukce je 800 x 2060 mm a šířka činí 800 mm.

Stolek tvoří uzavřený rám. I pro počítačovou simulaci je uvažováno rámové působení, konstrukce byla modelována celá včetně spodní desky. Konstrukce stolu má po své šířce stále stejnou geometrii, a proto je modelována také ve 2D prostředí.

Pro zatěžování prvku je použito osamělé břemeno působící v polovině rozpětí horní desky. Břemeno je osazeno na roznášecí ocelovou desku šířky 50 mm. Pro zmenšení počtu konečných prvků a tím zrychlení výpočtu je konstrukce rozdělena na dvě části. Jednu část tvoří horní vodorovná deska a svislé stěny stolku. V těchto oblastech se budou nacházet trhliny a vznikne zde kritický průřez. Proto je zde zachováno jemnější dělení, v tomto případě jsou to čtyři prvky na tloušťku konstrukce. Druhou část představuje spodní deska. Ta není pro stanovení únosnosti rozhodující a slouží ke kotvení horní rámové konstrukce. Proto zde byla zvolena větší velikost sítě konečných prvků.

V numerické simulaci je stanovena hodnota maximální síly rovna 8,901 kN při průhybu 8 mm, jak ukazuje zatěžovací diagram na obrázku (obrázek 3-30). Při této úrovni zatížení jsou vypočtené šířky trhlin 0,2 mm.



Obrázek 3-30 Zatěžovací diagram stolku z UHPC

3.5.3 Stochastická analýza

Pro kontrolu spolehlivosti prvků z UHPC je vhodným nástrojem pravděpodobnostní analýza, která může v sobě zahrnout nejistoty v materiálových parametrech, jako jsou pevnosti, lomová energie, modul pružnosti. Stochastické ověření konstrukce rámového přístřešku a stolku byla provedena v prostředí ATENA – SARA – FREET.



Obrázek 3-31 Rozvoj trhlín na stolku

Analýza vycházela z deterministické simulace chování prvků – tj. numerické simulace v softwaru ATENA 2D. Jako náhodné proměnné byly zvoleny materiálové charakteristiky. Jako střední hodnoty byly uvažovány materiálové parametry získané v inverzní analýze. Na základě provedených laboratorních zkoušek byly stanoveny

hodnoty rozptylu, střední kvadratické odchylky a variačního koeficientu pro hodnoty pevností v tlaku, příčném tahu, modul pružnosti a lom energii. Veličiny modulu pružnosti a pevností byly zadány jako korelované. Náhodné proměnné byly zadány s normálním pravděpodobnostním rozdělením (Gaussovo rozdělení) a s příslušnými hodnotami variačního součinitele.

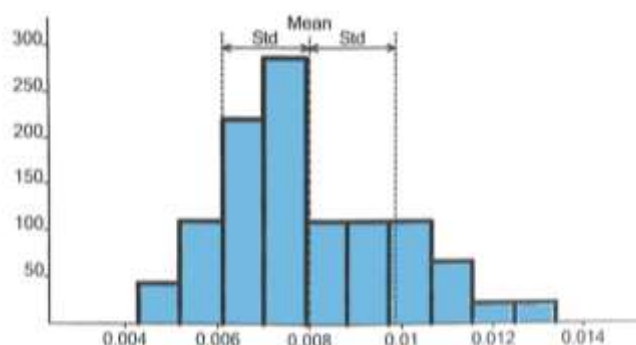
Pro vygenerování souboru materiálových parametrů byla použita simulační technika LHS. Pomocí programů SARA a FREET bylo sestaveno 50 simulačních úloh se znáhodněnými materiálovými parametry.

Únosnost rámové konstrukce vychází po statistickém vyhodnocení takto:

střední hodnota maximální síly: 7,98 kN

variační koeficient: 0,236

střední kvadratická odchylka: 1,88 kN



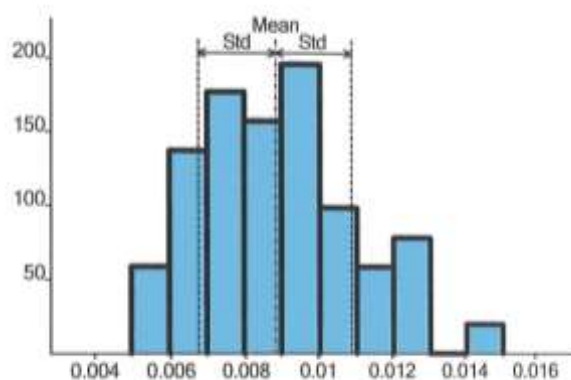
Obrázek 3-32 Statistické rozdělení odolnosti přístřešku cyklopointu

Únosnost stolku vychází po statistickém vyhodnocení takto:

střední hodnota maximální síly: 8,802 kN

variační koeficient: 0,237

střední kvadratická odchylka: 2,09 kN



Obrázek 3-33 Statistické rozdělení odolnosti stolku

Spolehlivost konstrukce lze vyhodnotit porovnáním únosnosti s odezvou konstrukce na zatížení. Jako zatížení cyklopointu byla uvažována zatížení vlastní tíhou a zatížení

sněhem. Dále byla zvolena nepříznivá kombinace zatížení skupinou osob stojících na střeše cyklopointu. Nejnepříznivější kombinace zatížení byla zadána jako tři osoby o celkové hmotnosti 300 kg na 1 m šířky konstrukce ve středu rozpětí spolu s vlastní tíhou konstrukce. Uvažovaná zatížení byla přepočtena na ekvivalentní síly pro numerickou simulaci, které by vyvolaly na konstrukci stejné účinky.

Posouzení konstrukce je pak možno provést po zatřídění z hlediska dopadů následku kolapsu a požadované životnosti.

Kolaps cyklopointu by nevyvolal vážné následky. Konstrukce byla proto zařazena do třídy následků CC1, která je charakterizována malými následky s ohledem na ztráty na životech a zanedbatelnými ekonomickými a sociálními následky. Třída následků CC1 odpovídá třídě spolehlivosti RC1. Pro referenční dobu 50 let a třídu spolehlivosti RC1 činí minimální index spolehlivosti $\beta = 3,3$. Pro tuto hodnotu indexu spolehlivosti je stanovena maximální pravděpodobnost poruchy $p_d = 4,8 \cdot 10^{-4}$.

Pro zvolenou kombinaci zatížení přepočtenou pro numerické simulace na ekvivalentní zatížení působící na střešní desku přístřešku vychází index spolehlivosti $\beta = 4,3$ a pravděpodobnost poruchy $p_d = 7,5 \cdot 10^{-6}$. Spolehlivost konstrukce je tedy dostatečná.



Obrázek 3-34 Detail stolku z UHPC se závitem pro transportní úchyt

3.5.4 Výroba, montáž

Jednotlivé díly konstrukce byly vyráběny ve firmě SMP CZ v Brandýse nad Labem. Míchání probíhalo v záměsích o velikosti 0,5 m³. Při výrobě byl zkoušen čerstvý beton (konzistence betonu a test obsahu vzduchu). Konzistence byla měřena pomocí zkoušky Flowtest; naměřené hodnoty se pohybovaly mezi 640 až 720 mm, což odpovídá třídě F6. Čerstvý beton rychle ztrácel zpracovatelnost, superplastifikační přísada nebyla tak

efektivní, jako při laboratorní výrobě. Kombinace proměnné zpracovatelnosti spolu s vysokým objemovým stupněm vyztužení (2%), vyžadovala rychlé ukládání betonu a důsledné vibrování.

Po zavadnutí čerstvého betonu byl povrch prvků zahlázen, aby bylo dosaženo hladkosti povrchu i na straně odvrácené od bednění (obrázek 3-34).

Požadavkem zadavatele bylo, aby konstrukce byla demontovatelná, a proto při spojování byly použity suché spoje. Konstrukce je stabilizována pouze svojí hmotností a je usazena na zhutněné štěrkové lože.

3.5.5 Závěry, komentář

Tato aplikace přinesla cenné zkušenosti s transferem technologie z laboratorních podmínek do reálné výroby. Prokázala, že materiál UHPC vyvinutý v laboratoři je možné vyrobit i podmínkách běžné výrobní linky a přinesla nové poznatky pro další praktické konstrukční aplikace UHPC.

4 Recyklace

Problematika separace a zpracování stavebních odpadů a odpadů z demolicí je oblast, v které došlo k dynamickému rozvoji na přelomu posledního tisíciletí. Dnes už je recyklace na takové úrovni, že ji lze považovat za nové průmyslové odvětví. Při recyklaci se vrací odpad do výroby, slouží jako surovina při výrobě nových výrobků nebo jako zdroj energie.

Bezodpadové technologie využívají odpad přímo na místě vzniku. Jde o uzavřený technologický postup, v kterém se případný odpad z výrobního procesu neupravený nebo částečně upravený použije znovu ve výrobě. Příkladem může být použití zbytků betonu v prefě pro výrobu drobných prefabrikátů, např. betonových zátarasů.

Další způsob recyklace využívá ve vlastním výrobním procesu odpadní látky z jiné výroby. Jako příklad lze uvést použití tzv. vedlejších energetických produktů (struska, popílek) pro výrobu betonu.

Třetí typ recyklačních technologií využívá pro produkci nových výrobků materiál ze spotřebovaných výrobků s ukončeným životním cyklem – odpadů, resp. druhotných surovin. Příkladem může být použití drceného betonu ze stavebního demoličního odpadu pro výrobu nové betonové směsi.

Stavební demoliční odpad (SDO) tvoří čtvrtinu všech odpadů. Největší množství stavebního a demoličního odpadu vzniká při demolici a odstraňování staveb. Jeho další použití – recyklace může snížit skládkování, ovlivnit cenu nového produktu (stavby), omezit spotřebu neobnovitelných zdrojů.

SDO je svážen do recyklačních linek, kde je drcen, tříděn. Podrcený materiál často obsahuje i kusy jiných materiálů (asfalt, cihla, kámen). Ze směsného SDO je po odstranění nežádoucích příměsí získán např. cihlo-betonový recyklát, používaný především k zásypům.

Z železobetonových prvků je po prvotním rozlámání pomocí čelistových drtiček získána betonářská výztuž. Velké kusy betonu se dále drtí v různých typech drtiček.

Vzniknou různé frakce drceného materiálu. Drobný betonový recyklát (frakce 0-8), frakce 8-32, které se používají jako podkladní vrstvy komunikací i jako kamenivo do betonu, až po široké frakce s velkými kameny.

Nejčastěji je drcený beton používán jako podkladní vrstva pod vozovky, jako zásypový materiál. Lze ho použít i jako kamenivo do nového betonu.

4.1 Kamenivo z recyklovaného betonu

Pro použití drceného betonu jako kameniva se většinou vyžaduje prokázat jeho vlastnosti. Materiálovými vlastnostmi kameniva z recyklovaného betonu se zabývalo mnoho studií. Hlavními sledovanými parametry jsou velikost zrn kameniva, tvarový index, křivka zrnitosti, měrná hmotnost, objemová hmotnost, nasákavost, porozita, alkalická reakce, obsah chloridů a nežádoucí materiály.

Většina studií porovnává vlastnosti drceného betonu s přírodním kamenivem. Oproti němu jsou některé vlastnosti recyklovaného betonu horší; odlišnosti jsou i v tvaru křivky zrnitosti, tvarovém indexu zrn, měrné hmotnosti kameniva a nasákavosti. Studie konstatují, že recyklovaný beton je hrubší, pórovitější ale zrna jsou pravidelnější. Křivka zrnitosti se stanovuje stejným způsobem jako pro přírodní kamenivo, její charakter je však poněkud jiný. Katz ve své studii prokázal, že na křivku zrnitosti má vliv způsob drcení.

Kamenivo z recyklovaného betonu má o 3 – 15 % nižší měrnou hmotnost než přírodní kamenivo, které bylo použito v původním betonu. Podle jiného zdroje je o 7–9 % nižší. Největší rozdíly mezi recyklovaným betonem a přírodním kamenivem jsou v nasákavosti. Nasákavost přírodního kameniva je cca 0,5 – 1 %. Nasákavost recyklovaného kameniva je vyšší kvůli cementovému tmelu o 3 – 6,5 %. Vyšší nasákavost souvisí i s podílem jemných částic. Nasákavost jemných částic je v některých případech desetkrát větší než nasákavost hrubých frakcí. Nasákavost samozřejmě ovlivňuje vlastnosti čerstvé směsi jako je zpracovatelnost. Z tohoto hlediska může být vhodnější dát přednost vyšším frakcím recyklovaného betonu před jemnými. Kvalitu recyklovaného betonu negativně ovlivňují znečišťující příměsi. Proto se drcený beton musí třídit. Pro použití se pak klasifikuje se podle množství a druhu příměsí – drcené cihly, sklo, keramika, dřevo ap.

Pro použití recyklovaného betonu jako kameniva pro výrobu nového betonu, je vhodné sledovat i jeho chemické složení. Původní beton může být kontaminován např. rozmrazovacími solemi, což by limitovalo použití recyklátu z tohoto betonu pro železobeton kvůli hrozící korozi výztuže.

4.2 Beton vyrobený z recyklátu

Mnoho výzkumů se věnuje vlivu recyklátu na výsledné vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem. Výzkumy uvádějí, že je-li v hrubé frakci méně než 30% recyklovaného betonu, nejsou vlastnosti výsledného betonu ovlivněny. S narůstajícím podílem recyklovaného betonu se značně snižuje tlaková pevnost výsledného betonu s obsahem recyklovaného betonového kameniva.

Vliv na vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem má i poměr hrubých a jemných frakcí. Vyšší podíl jemného kameniva snižuje tlakovou i tahovou pevnost a modul pružnosti.

Horší vlastnosti recyklovaného betonu jsou obvykle řešeny tak, že pro výrobu čerstvého betonu je použita směs přírodního a recyklovaného kameniva.

Důležitý faktor, který negativně ovlivňuje parametry betonu z recyklovaného kameniva je cementový tmel ulpívající na původním přírodním kamenivu. Některé výzkumy se zaměřily na možnosti odstranění nebo zvýšení přídržnosti tohoto cementového tmelu. Použité metody jsou založeny na chemickém nebo mechanickém ošetření. [48] Zůstává otázkou, zda je nově získaný beton po všem chemickém ošetření a další nutné manipulaci stále ještě přínosem pro ekologii a odpovídá principům udržitelné výstavby.

Jelikož za hlavní důvod odlišných vlastností recyklovaného a přírodního kameniva je považován cementový tmel obsažený v recyklátu, vyskytly se návrhy hodnotit kvalitu recyklovaného kameniva pomocí množství cementového tmelu ulpívajícího na původním přírodním kamenivu a padly návrhy, jak toto množství měřit. [47]

Jiné studie chtěly dokázat, že vliv cementového tmelu na vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem je přeceňován [37].

Cementový tmel je také jednou z příčin vyšší nasákavosti recyklovaného kameniva a vyvolává potřebu vyššího dávkování vody pro dosažení uspokojivé zpracovatelnosti, i když zvyšování obsahu vody v čerstvém betonu je obecně nežádoucí. Některé výzkumy se zabývaly porovnáním rozdílů ve vlastnostech čerstvého betonu s recyklovaným kamenivem, které bylo před dávkováním do směsi namáčeno ve vodě [44]. Zpracovatelnost se předchozím ošetřením recyklovaného kameniva zlepšila, nikoli však významně.

Další výzkumy se zabývaly vztahem pevnosti původního betonu a nového betonu vzniklého recyklací toho původního. Výsledky těchto výzkumů si vzájemně odporují. Navíc využitelnost těchto poznatků pro praktické aplikace je sporná.

4.3 Inverzní návrhový přístup

České normy pro kamenivo do betonu dovolují nahradit přírodní kamenivo recyklovaným pouze částečně, aby byla zaručena kvalita betonu s recyklovaným kamenivem [53]. Předpokládá se, že pak lze použít beton s recyklovaným kamenivem stejně jako běžný konstrukční beton.

V Evropě představuje recyklované kamenivo pouhých 8% celkové spotřeby kameniva do betonu [1]. Dosavadní výzkumy a snahy zvýšit podíl použití recyklovaného kameniva ztroskotávají na přísných podmínkách pro použití recyklovaného kameniva v betonu a proměnných vlastnostech recyklovaného kameniva ve srovnání s kamenivem přírodním.

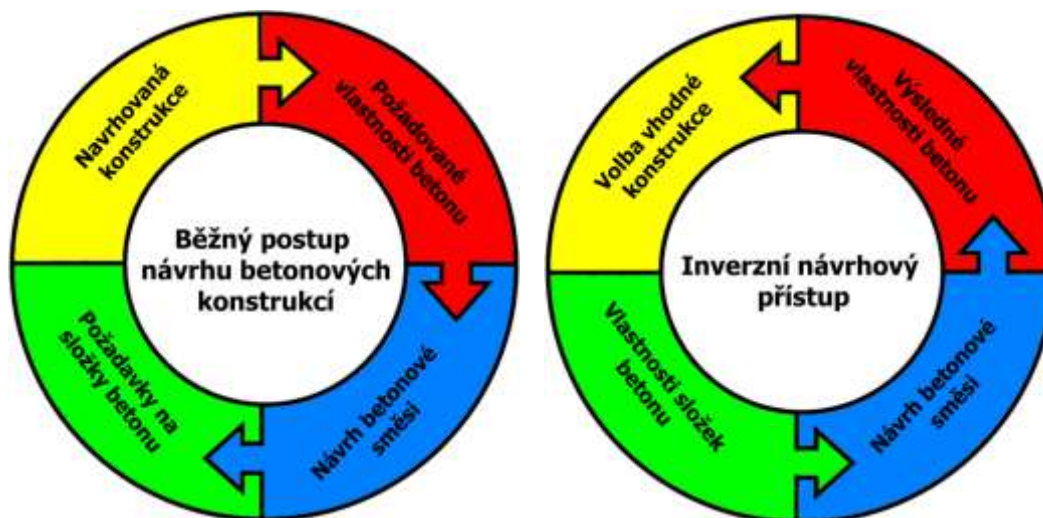
Naše pracoviště navrhuje modifikaci zavedeného přístupu k použití recyklovaného kameniva v betonu a tím umožnit širší uplatnění recyklovaného kameniva. Tradiční postup navrhování – tj. pro danou konstrukci zvolit odpovídající beton – je převrácen a v tzv. „inverzním způsobu navrhování“ je pro daný materiál hledána odpovídající konstrukce.

Hlavními záměry této filozofie navrhování jsou

- maximalizace spotřeby recyklovaného kameniva,
- minimalizace environmentální zátěže,
- minimalizace výrobních nákladů.

V souladu s těmito tezemi navrhujeme nový koncept navrhování. Běžný návrh betonové konstrukce začíná stanovením požadavků na beton. Je určena požadovaná třída betonu podle podmínek, jakým bude beton vystaven v budoucí konstrukci. V našem novém přístupu je postup obrácený. V počátečních stádiích návrhu je specifikována betonová směs, poté jsou zkoušeny a určeny materiálové charakteristiky navrženého betonu.

Podle zjištěných materiálových vlastností je navrženo odpovídající uplatnění betonu – vhodná aplikace (obrázek 4-1).



Obrázek 4-1 Vývojový diagram porovnávající tradiční návrh a inverzní způsob navrhování

Receptura betonu s recyklovaným kamenivem vychází z těchto principů:

- beton je výhradně z recyklovaného kameniva
- recyklované kamenivo je použito netříděné – tzv. široká frakce
- v betonu je minimální množství cementu
- nejsou použity žádné přísady do betonu.

Podle těchto principů byl navržen kompozit s rozptýlenými vlákny tvořený čtyřmi složkami: kamenivem z recyklovaného betonu, cementem, vlákny a vodou.

4.3.1 Kamenivo

Hrubá i jemná frakce kameniva jsou výhradně z recyklovaného drceného betonu. Tím, že není ve směsi použito přírodní kamenivo, se spotřebuje více odpadního materiálu, ten nemusí být skládkován a sníží se spotřebovávání neobnovitelných přírodních zdrojů.

Drcený recyklovaný beton je používán bez třídění jako tzv. široká frakce. Tím se sníží cena recyklovaného materiálu (odpadá nutnost prosévání materiálu a rozdělení na jednotlivé frakce) a zvýší se konkurenceschopnost výsledného kompozitu a výrobků z něj.

Je zřejmé, že vlastnosti recyklovaného kameniva jsou velmi různorodé. Zkoumat a posuzovat všechny vlastnosti recyklovaného kameniva podle technických norem pro výrobu běžného betonu nově navržená receptura vláknobetonu s recyklovaným kamenivem nepožaduje. Hlavní myšlenkou je co nejjednodušší a nejekonomičtější zpracování stavebního a demoličního odpadu do recyklátu pro výrobu vláknobetonu. Byly stanoveny základní charakteristiky recyklátu, které by měly být zkoušeny a posuzovány u každého dodávaného recyklátu pro výrobu vláknobetonu. Jedná se o hmotnostní charakteristiky recyklátu a sestavení křivky zrnitosti.

Drcený beton obsahuje relativně hodně velkých částic, obvykle v něm chybí střední frakce a je v něm naopak hodně jemných frakcí.

4.3.2 Cement

Množství cementu je minimalizováno. Je odvozeno z minimálního dávkování předepsaného pro konstrukční betony.

Kompozit s minimální dávkou cementu je vhodný z ekologického hlediska. Spolu s vynecháním přísad do betonu je také příčinou snížení výsledné ceny.

Dávkování cementu je takové, aby bylo zajištěno pokrytí kameniva cementovým tmelem a zakotvení vláken mezi zrny kameniva.

Jelikož je cement energeticky nejnáročnější složkou vláknobetonu s recykláty, byla v rámci navazujícího výzkumu [49] zkoumána vhodnost náhrady cementu dalšími alternativními pojivy – fluidním popílkem, vysokopecní struskou a hydraulickým pojivem používaným pro stabilizaci zemin. Všechny náhrady snížily pevnosti kompozitu (pevnost v tlaku snížena o 10 až 25 %). Navzdory tomu je vhodné použití těchto náhrad uvážit, především z důvodu úspory použitého množství cementu a tedy snížení energetické a ekologické náročnosti výroby vláknobetonu. Doporučené redukce hmotnostních dávek cementu byly stanoveny na 20% pro popílek, 30% pro strusku a 50% pro hydraulické pojivo pro stabilizaci zemin.

4.3.3 Vlákna

Vlákna ztužují strukturu kompozitu a zajišťují tahovou pevnost a houževnatost. Aktivace vláken po vzniku makro trhliny zvyšuje duktilitu kompozitu.

Při výběru vláken musí být zohledněna mezerovitost betonového kompozitu. Je nutné zabránit degradaci vláken od pronikající vlhkosti a vody. Proto jsou vhodnější vlákna syntetická; u drátků by hrozila jejich koroze. Délka vláken má být taková, aby vlákna byla bezpečně zakotvena mezi zrny kameniva. Množství vláken bylo stanoveno na základě předchozích zkušeností a zkoušek na 0,5% a 1% objemu. Tato dávka vláken dostatečně ovlivní strukturu vláknobetonu a není přespříliš velká s ohledem na celkovou cenu kompozitu.

V průběhu výzkumu byly zkoušeny různé typy polymerových vláken – polypropylenová, polyolefinová i vlákna vytvořená z PET lahví. Použití výztužných vláken z odpadových PET lahví by přispělo nejen ke snížení ceny vláknobetonu, ale také k likvidaci dalšího nechtěného odpadu, který má vliv na životní prostředí. Vlákna mají zakřivený tvar podle původu lahve, z nichž jsou nastříhána. Jejich rozměr je dán tloušťkou stěny PET lahve 0,25 mm až 0,28 mm a šířky mezi 0,7 mm až 2,5 mm. Délka vláken byla zvolena 60 až 90 mm. Pevnost vláken v tahu je 50 až 80 MPa. Zkouškami vláknobetonu s vlákny z PET lahví byly zjištěny podobné charakteristiky, jako mají vláknobetony s vlákny komerčními.

4.3.4 Výroba směsi

Suché složky jsou odváženy a smíchány s vlákny. Poté, co jsou vlákna v suché směsi rovnoměrně rozptýlena, přidává se voda.

Dávkování vody závisí na vlhkosti kameniva a jeho nasákavosti. Záměsová voda je dávkována tak, aby konzistence směsi odpovídala hutnění pomocí pěstů nebo hutnění válcováním (obrázek 4-2). Vibrování mezerovitěho betonu by bylo neefektivní.



Obrázek 4-2 Válcování mezerovitěho vláknobetonu s recyklovaným kamenivem při výrobě laboratorního vzorku

4.3.5 Materiálové vlastnosti

Výsledný kompozit má mezerovitou strukturu. Pevnosti v tlaku se pohybují od 12 do 35 MPa, pevnosti v tahu jsou cca 2 MPa. Zkoušeny byly vláknobetony vyrobené z recyklovaného betonu a z drcených cihel. Tabulka 4-1 ukazuje srovnání materiálových parametrů těchto dvou typů kompozitu.

Tabulka 4-1 Souhrn základních vlastností mechanicko-fyzikálních parametrů vláknobetonů s recykláty [52]

Charakteristiky		Betonový recyklát	Cihelný recyklát
Objemová hmotnost	[kg/m ³]	1950 - 2280	1710 - 2100
Pevnost v tlaku (150x150x150 mm)	[MPa]	12 - 35	12 - 30
Pevnost v příčném tahu (150x150x150 mm)	[MPa]	1,6 - 3,8	1,5 - 3,6
Pevnost v tahu za ohybu (150x150x700 mm)	[MPa]	1,6 - 3,8	1,5 - 3,7
Modul pružnosti (válec 150x300 mm)	[GPa]	13 - 18	10 - 15

4.4 Použití mezerovitého kompozitu s recyklovaným betonem

Součástí výzkumného programu bylo i nalezení možností, kde by bylo vhodné kompozit použít. Bylo navrženo několik možných aplikací mezerovitého kompozitu z recyklovaných materiálů. Některé z navržených aplikací byly podobněji rozpracovány, některé zůstaly ve fázi ideového záměru. Další text popisuje pro zvolené kompozity výsledky materiálových testů a analýzy možných aplikací.

4.4.1 Vyztužení zemního tělesa

Mezerovitost vláknobetonu lze využít jako výhodnou vlastnost při použití do zemních konstrukcí, voda může konstrukcemi volně prostupovat a není nutné řešit odvodnění betonové plochy.

Při zpevnění zemního tělesa se využívají tahové pevnosti kompozitu a jeho duktilita. Výztužné vrstvy z mezerovitého vláknobetonu s recyklovaným kamenivem je možné i kombinovat s geotextiliemi a geomřížemi.

V jednom z projektů bylo analyzováno ztužení náspu vrstvami z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem vloženými do zemního tělesa.

V počítačové simulaci byly modelovány tři varianty ztužení náspu o výšce 15 m. Při použití tří výztužných vláknobetonových desek byla vypočítána úspora objemu zemních prací a zabraného území pod náspem na 30 %. Původní sklon náspu 1:2 mohl být upraven na 1:1,33 při zachování stability náspu. Byly počítány celkem čtyři varianty s různým počtem ztužujících desek. Použití tří vláknobetonových desek se jeví jako nejvýhodnější.

4.4.2 Zpevnění sypané hráze

Ztužující vrstvy z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem mohou být využity i pro zpevnění sypané hráze. Zemní hráze by mohly fungovat jako protipovodňová ochrana nebo zpevnění břehů říčního koryta.



Obrázek 4-3 Prezentace zemní hráze na veletrhu

Pro důkaz funkčnosti a jako promo této aplikace byly vytvořeny dva zmenšené modely v měřítku 1:30 – jeden se čtyřmi výztužnými vrstvami z mezerovitého vláknobetonu s recyklovaným kamenivem a druhý srovnávací bez vnitřních vložených vrstev. Modely měly ukázat chování hráze v případě přelití vody přes vrchol hráze.

Použití vláknobetonových desek jasně ukázalo příznivý vliv na odolnost hráze při přelití. Nevýztužená hráz vydržela cca 7 minut a pak byla rozplavena proudící vodou. Výztužená vydržela několik hodin bez většího poškození.

4.4.3 Svislé nosné prvky

Série zkoušek a výpočetních analýz ověřovala možnost využití mezerovitého kompozitu s recyklovaným kamenivem pro svislé nosné konstrukce nízkopodlažních budov. Kompozit by mohl být použit v různých provedeních např. jako kompozit dusaný do bednění nebo pro výrobu tvárnic využívaných jako klasické zdicí prvky.

Byly provedeny základní zkoušky materiálových parametrů a speciální nestandardní zkouška v tlaku dvou prvků.

Pro výrobu směsi byl použit betonový recyklát z železničních pražců ze zrušené vlečky v blízkosti recyklačního centra (obrázek 4-4). Velikost maximálního zrna kameniva $d_{\max}$ byla 22 mm. Recyklát obsahoval jen malou část jemných složek; byl viditelně bez znečišťujících látek a příměsí.



Obrázek 4-4 Kamenivo z recyklovaného betonového pražce

Jako pojivo byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R v dávce 260 kg/m^3 . Vlákna byla ze speciální směsi polypropylenu a polyetylenu o délce 55 mm a se štíhlostním poměrem 115. Tahová pevnost materiálu vláken je 610 MPa, objemová hmotnost je 920 kg/m^3 .

Tabulka 4-2 Složení směsi pro tlačný prvek

Složka	Dávkování
Recyklát	1 650 kg/m ³
Cement	260 kg/m ³
Vlákna	9,1 kg/m ³
Voda	150 l/ m ³

Směs (obrázek 4-5) byla vyráběna v míchačce s nuceným mícháním. Hutnění čerstvé směsi bylo provedeno ručně ocelovým pěchem.



Obrázek 4-5 Čerstvá směs vláknobetonu s recyklovaným kamenivem

Byla vyrobena zkušební tělesa:

- krychle 150 / 150 / 150 mm
- krychle 100 / 100 / 100 mm
- hranoly 150 / 150 / 700 mm pro zkoušky v tahu za ohybu
- 150 / 150 / 600 mm pro tlakové zkoušky
- 150 / 150 / 1 200 mm pro tlakové zkoušky.

Na standardních tělesech byly provedeny zkoušky základních materiálových parametrů, které jsou v tabulkách 4-3 a 4-4.

Tabulka 4-3 Výsledky tlakových zkoušek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla	Pevnost v tlaku
	šířka	délka	výška				
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]
A1	149	149	149	6,088	1840,4	276	12,43
A2	149	147	149	5,946	1821,9	216	9,86
A3	149	145	148	6,032	1886,5	350	16,20
A4	149	149	149	6,034	1824,1	254	11,44
B1	149	150	148	6,302	1905,2	282	12,62
B2	148	149	151	5,98	1795,9	214	9,70
B3	149	149	149	5,972	1805,3	208	9,37
B4	149	150	148	6,106	1845,9	236	10,56
Průměrná hodnota					1840,7		11,52
Standardní odchylka					35,7		2,11

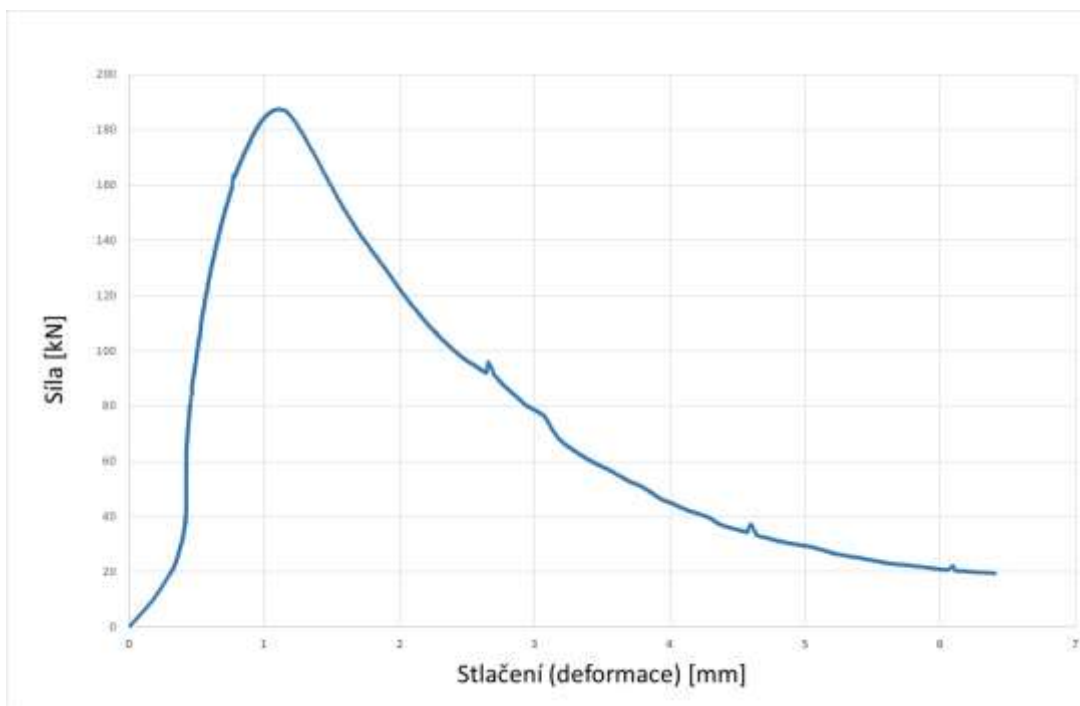
Charakteristická hodnota tlakové pevnosti spočtená z naměřených hodnot je $f_k = 7,3$ MPa.

Tabulka 4-4 Výsledky zkoušek v příčném tahu

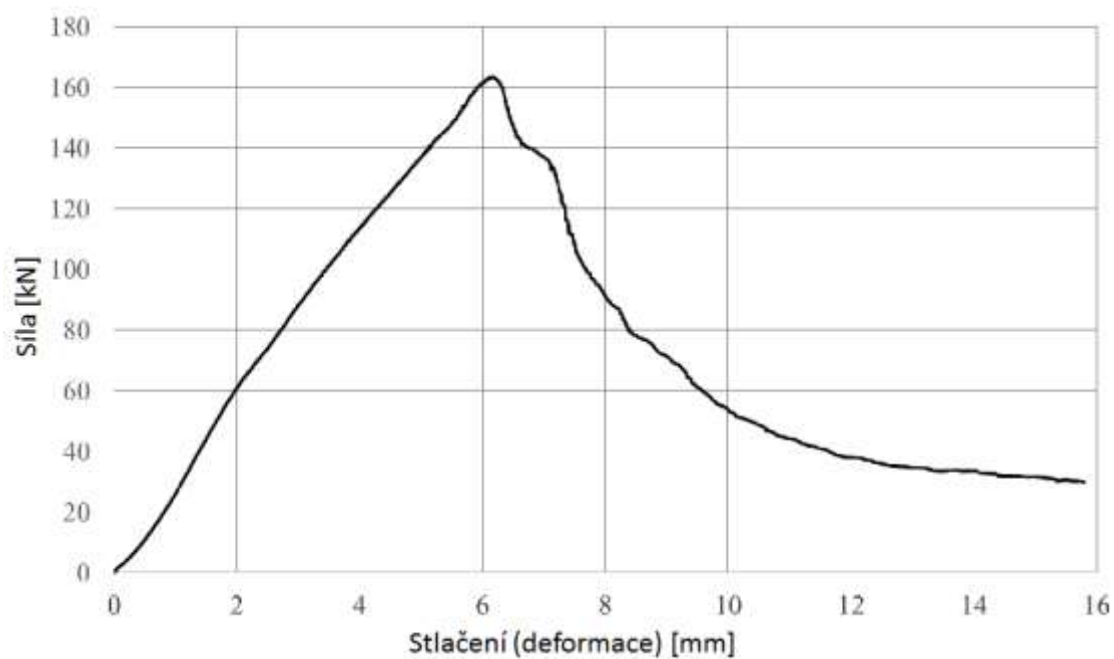
č. vzorku	Tahová pevnost
	[MPa]
1	0,6797
2	0,7042
3	0,7231
Průměrná hodnota	0,702
Standardní odchylka	0,02

Nestandardní tělesa byla použita pro hodnocení chování prvků z mezerovitého kompozitu v tlaku. Jednalo se o dva trámce o rozměrech 150/150/600 mm a 150/150/1 200 mm. Prvky byly zatěžovány svislou silou rovnoběžně s podélnou osou prvku.

Byla sledována závislost zatěžovací síly a přetvoření prvku, vznik a rozvoj trhlin. Zatěžování prvku je vidět na grafech (obrázek 4-6, obrázek 4-7). Viditelné trhliny se vytvořily po dosažení mezního zatížení. Obrázky ukazují tělesa po ukončení zkoušek (obrázek 4-8).



Obrázek 4-6 Zatěžovací křivka sloupku 150/150/600 mm



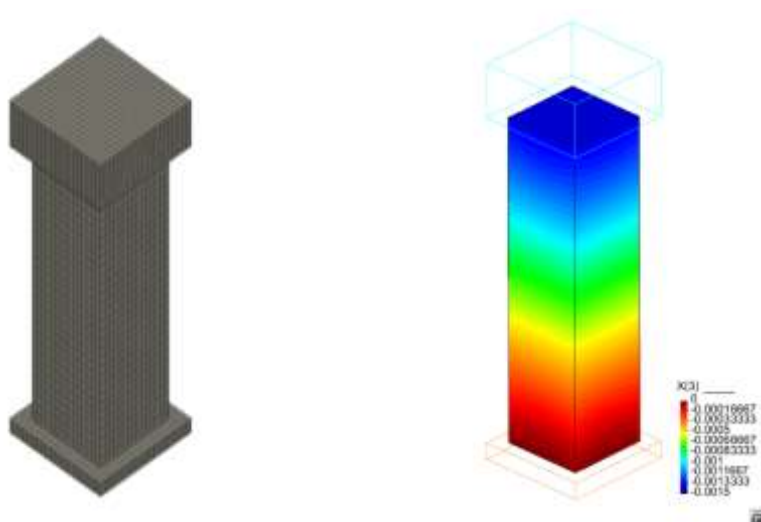
Obrázek 4-7: Zatěžovací křivka sloupku 150/150/1200 mm



Obrázek 4-8 Tělesa po skončení zatěžování (vlevo 150/150/600 mm, vpravo 150/150/1200 mm)

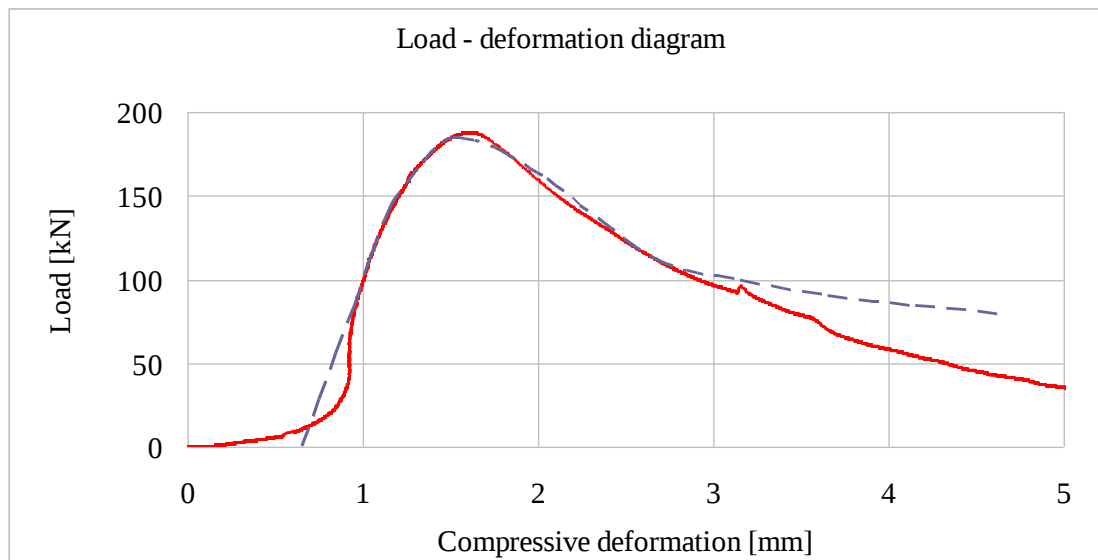
4.4.3.1 Výpočtová část

Numerické analýzy měly ověřit využitelnost kompozitu z recyklovaného kameniva pro nosné konstrukce. Byl stanoven materiálový model pro kompozit z recyklovaného kameniva. Ten byl pak využit pro simulaci chování prvků a pro hodnocení spolehlivosti prvku z tohoto materiálu. Materiálové modely byly stanoveny ve 3D a 2D verzi programu ATENA pomocí inverzní analýzy. Sít konečných prvků tvořily šestistěny. Základem pro inverzní analýzu byla zkouška ve čtyřbodovém ohybu tělesa 150/150/700 mm.



Obrázek 4-9 Konečně-prvkový model zkušebního tělesa a jeho přetvoření

K fitování parametrů materiálového modelu byl použit materiál implementovaný v nástroji ATENA 3D, jehož vstupní hodnoty byly upraveny tak, aby se závislost síla – deformace naměřená v laboratorní zkoušce co nejlépe shodovala s výstupem simulace. Výsledná aproximace je v grafu (obrázek 4-10).



Obrázek 4-10 Porovnání závislostí síla – deformace zjištěné v laboratoři (plná červená čára) a spočítané v 3D numerické simulaci (čárkovaná modrá čára)

Ve 2D verzi programu ATENA byly simulace principiálně stejné. Inverzní analýza vycházela z laboratorní zkoušky a fitován byl implementovaný materiálový model “Nonlinear Cementitious 2”.

4.4.3.2 Pravděpodobnostní analýza

Výsledky numerické simulace byly dále využity pro pravděpodobnostní analýzu.

Deterministický model, který byl sestaven a odladěn v základní numerické simulaci, je jedním ze vstupů do analýzy.

Nejistoty a náhodnosti materiálových parametrů jsou popsány jako náhodné proměnné pomocí pravděpodobnostních funkcí. Středními hodnotami se staly materiálové charakteristiky potvrzené v deterministické úloze. Standardní odchylka a variační koeficient byly odvozeny z rozptylu hodnot změřených v laboratorních testech. Tabulka 4-5 Náhodné materiálové parametry ukazuje sadu vstupních parametrů, které byly uvažovány jako náhodné proměnné v pravděpodobnostním výpočtu. Pravděpodobnostní výpočty byly provedeny v systému SARA – FREET – ATENA.

Náhodné vstupní parametry jsou generovány metodou LHS sampling (vzorkování pomocí metody Latinského čtverce). Statistická korelace mezi jednotlivými parametry je předepsána metodou simulovaného žihání. Vygenerované sady náhodných parametrů jsou použity jako vstupy pro výpočet metodou konečných prvků.

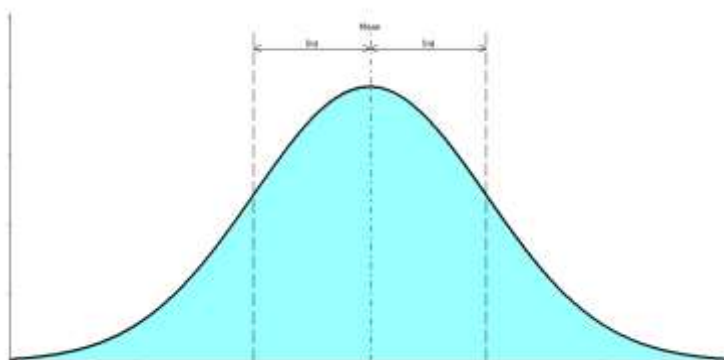
Základní podmínkou použití materiálu v nosném prvku je spolehlivý návrh. Spolehlivost je definována jako schopnost konstrukce nebo konstrukčního prvku odolat zatížení s přiměřenou úrovní spolehlivosti a splnit dané požadavky v průběhu celého životního cyklu konstrukce. Úroveň spolehlivosti je hodnocena pomocí statistických veličin, definováním přijatelné pravděpodobnosti selhání.

Současné navrhování a ověřování spolehlivosti je založené na metodě mezních stavů, kde náhodné jevy působícího zatížení, materiálových vlastností, geometrie konstrukce a nejistoty v statickém modelu konstrukce jsou zahrnuty v dílčích součinitelích. Čistě pravděpodobnostní přístup navrhování je metoda pokročilejší a není v praxi běžně využívána.

V pravděpodobnostní analýze byla hodnocena nosná stěna o tloušťce 440 mm a výšce 2,8 m jako konstrukční prvek srovnatelný např. se zděnými konstrukcemi běžně používanými jako svislé nosné prvky menších objektů. Rozměry stěny a zatížení (svislá síla o excentricitě 22 mm) odpovídají srovnatelné zděné stěně.

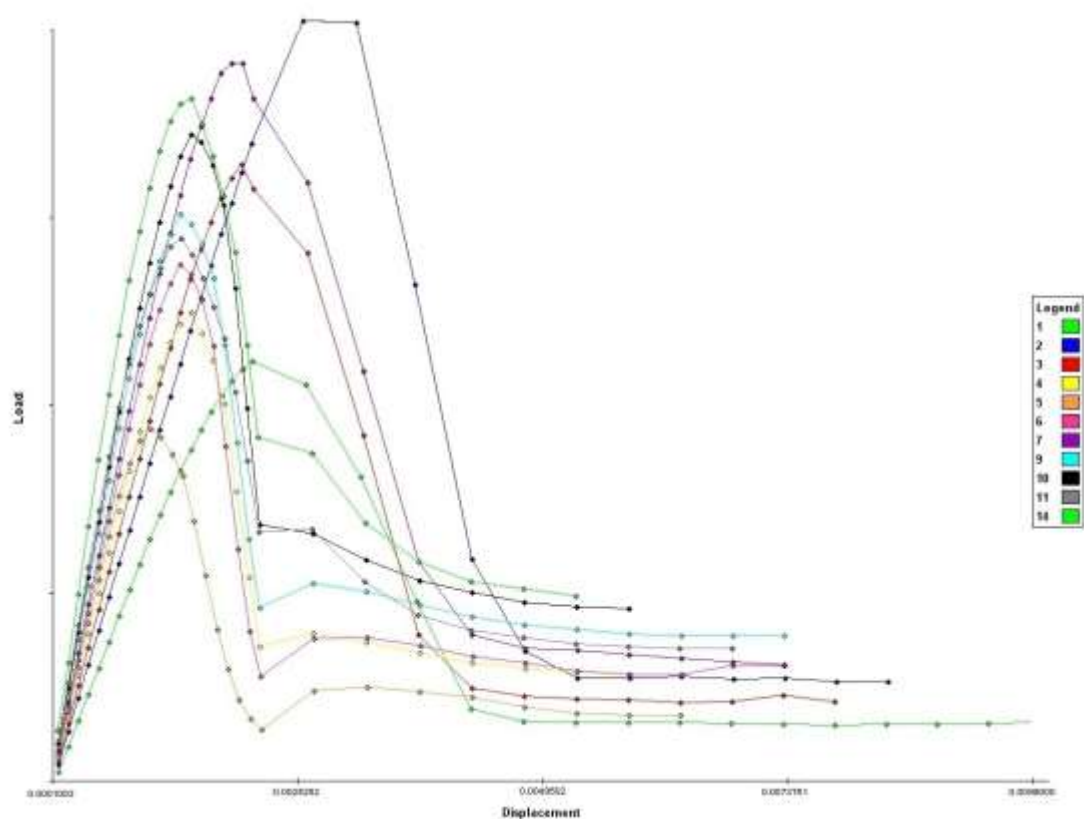
Tabulka 4-5 Náhodné materiálové parametry

Materiálový parametr	Rozdělení	Střední hodnota	Standardní odchylka
modul pružnosti	normální (Gaussovo)	15 GPa	4
tahová pevnost	normální (Gaussovo)	3 MPa	0,84
tlaková pevnost	normální (Gaussovo)	8 MPa	2,25
lomová energie	normální (Gaussovo)	$5 \cdot 10^{-5}$ MN/m	$1,4 \cdot 10^{-5}$



Obrázek 4-11 Rozdělení náhodné veličiny

Bylo spočteno čtrnáct simulací s náhodnými materiálovými parametry stěny zatížené silou s výstředností 22 mm. Výsledky pravděpodobnostní analýzy jsou shrnuty v tabulce.

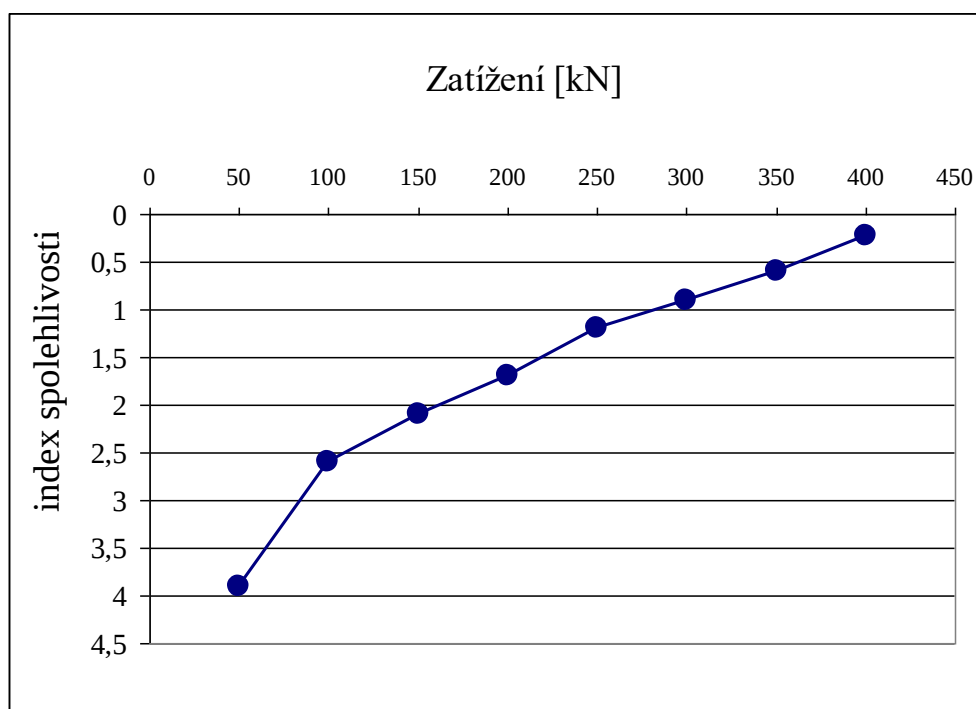


Obrázek 4-12 Svazek závislostí síla – deformace z pravděpodobnostní analýzy

Tabulka 4-6 Statistická odolnost stěny z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem

Střední hodnota maximální únosnosti	432 kN/m
Variační koeficient	0,19
Standardní odchylka	82
Distribuční funkce	Weibull

Simulační úlohy z pravděpodobnostní analýzy jsou dále vyhodnoceny z hlediska odolnosti konstrukce. Předpokládá se zatížení s normálním rozložením a variačním koeficientem 0,1. Výsledky ukazují, že pravděpodobnost selhání stěny je poměrně vysoká. V grafu (obrázek 4-13) je na svislé ose vyneseno index spolehlivosti v závislosti na úrovni zatížení (vodorovná osa).



Obrázek 4-13 Index spolehlivosti stěny z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem

Je-li odolnost konstrukce popsána pomocí střední hodnoty a standardní odchylky stejně jako funkce zatížení, lze konstrukci posoudit pomocí směrného indexu spolehlivosti. Požadovaná hodnota je specifikována v Eurokódu 1990, příloze B podle tříd spolehlivosti (tabulka 4-7).

Tabulka 4-7 Doporučené minimální hodnoty indexu spolehlivosti β pro mezní stav únosnosti

Třída spolehlivosti	Minimální hodnoty indexu β	
	referenční doba životnosti 1 rok	referenční doba životnosti 50 let
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Pro stanovení směrné hodnoty indexu spolehlivosti, je potřeba u objektu stanovit třídu spolehlivosti RC1 – RC3, která přímo souvisí s třídou následků poruchy stavby (tabulka 4-8).

Třída následků se stanoví na základě typu stavby, její funkce a dopady s ohledem na ekonomické a sociální následky, zranění nebo ztráty na životech způsobené selháním stavby. Vyšetřovaný konstrukční prvek je navrhován pro použití v jednoduchých

budovách, jako jsou rodinné domy, malé úřady nebo zemědělské objekty. Proto spadá do třídy spolehlivosti RC2.

Tabulka 4-8 Definice tříd následků podle ČSN EN 1990

	Popis	Příklady
CC1	Malé následky s ohledem na lidské životy a zranění osob nebo malé následky ekonomické a sociální	Stavební objekty bez časté přítomnosti lidí, zemědělské a skladovací objekty, sila, skleníky, stožáry...
CC2	Střední následky s ohledem na lidské životy a zranění osob nebo značné následky ekonomické a sociální.	Obytné budovy, průmyslové objekty, administrativní budovy a budovy určené pro veřejnost se střední závažností následků
CC3	Velké následky s ohledem na lidské životy a zranění osob nebo významné následky ekonomické a sociální	Budovy resp. objekty určené pro veřejnost, kde jsou následky poruchy vysoké. Nemocnice, divadla, stadiony, mrakodrapy a mosty.

Přestože průměrná hodnota pevnosti v tlaku vyšetřovaného materiálu je vyšší, než jsou pevnosti běžných typů zdiva, je únosnost tlačného prvku z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem menší než únosnost zdiva. Pravděpodobnostní analýza ukázala, že kvůli velkému rozptylu hodnot materiálových parametrů je únosnost tohoto prvku vyhovující jen pro malá zatížení.

4.4.3.3 Tepelně technické parametry

Pórovitost materiálu vede k předpokladu, že by mohl být vhodný i z hlediska tepelně technických požadavků na konstrukce. Pro měření parametrů byl použit přístroj ISOMET 2114 ruční přístroj na přímé měření součinitele tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity. Měření byla provedena na krychlích o hraně 100 mm. Výsledky měření jsou v tabulce (tabulka 4-9).

Z naměřených materiálových parametrů byla spočítána hodnota součinitele prostupu tepla U pro uvažovanou stěnu o tloušťce 440 mm s vápennou omítkou na vnitřní straně stěny a perlitovou omítkou na straně exteriérové. Výpočet byl proveden podle ČSN EN ISO 6946. Hodnota součinitele prostupu tepla vychází $U = 1,0 \text{ W/mK}$. Zdivo o stejné tloušťce z cihel plných má součinitel prostupu tepla roven hodnotě $U = 1,99 \text{ W/mK}$.

Tabulka 4-9 Tepelně technické parametry

Vzorek	součinitel tepelné vodivosti λ [W/mK]	měrná tepelná kapacita c [10 ⁶ J/m ³ K]
1	0,6741	1,4244
2	0,7505	1,5288
3	0,5892	1,3925
4	0,7689	1,5213
5	0,6005	1,4068
6	0,5926	1,4083
Střední hodnota	0,663	1,447
Standardní odchylka	0,082	0,061

4.4.3.4 Shrnutí

Analýzy ukazují, že přestože je pevnost vláknobetonu z recyklovaného kameniva srovnatelná ba vyšší než pevnost referenčního zdiva, celková únosnost stěny vychází poměrně malá. Po zvýšení únosnosti by bylo nutné snížit rozptyl hodnot materiálových parametrů vláknobetonu. Bylo by možné zvýšit dávku cementu nebo přidat jako jemnou složku kamenivo přírodní (písek) pro vyplnění křivky zrnitosti a dosáhnout tak menších rozptylů v materiálových parametrech.

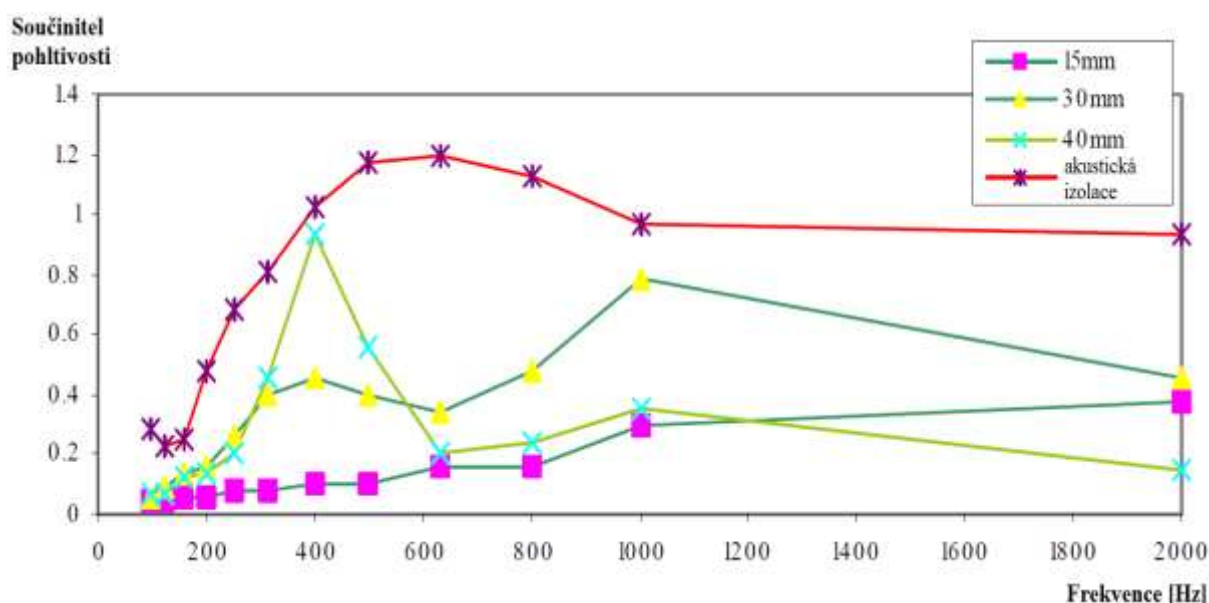
Tepelně technické parametry jsou lepší než má referenční zdivo z cihel plných. Šlo by je dále zvýšit přidáním vybraných příměsí; např. perlitu, polystyrenových kuliček ap.

4.4.4 Protihlukové stěny

Obecně se předpokládá, že porézní materiály jsou zvukově pohltivé. Z předpokladu, že zvuková energie bude disipována v soustavě dutin ve vláknobetonu z recyklovaného kameniva, vychází další navrhovaná aplikace tohoto materiálu – prefabrikované dílce protihlukové stěny.

Na tomto poli byl proveden výzkum na australské univerzitě Swinburne University. U protihlukové stěny navržené v rámci výzkumu byla prokázána schopnost pohltit 50% hluku z dopravy, při splnění požadavků na pevnostní charakteristiky a odpovídající bezpečnost stěny. Vzhledem k malé hloubce pórů je stěna nejefektivnější v pásmu do 2 000 Hz, což odpovídá nejnejpříjemnější frekvenci hluku z dopravy.

Stěna je tvořena dvěma vrstvami betonovanými bezprostředně po sobě. Na vrstvu hutného betonu je nabetonována vrstva mezerovitého betonu z recyklovaného kameniva. Pórovitý líc stěny přijímá zvukové vlny malými dutinami a pak je zvuk přeměněn na jinou energii, např. tepelnou nebo na vibrace v soustavě vzduchových kanálků. Byly provedeny experimenty s různými tloušťkami vrstvy z mezerovitého kompozitu. Graf (obrázek 4-14) ukazuje činitele pohltivosti v pásmu 100 Hz – 2 000 Hz.



Obrázek 4-14 Součinitele zvukové pohltivosti tří vzorků s různou tloušťkou vrstvy z mezerovitého betonu v porovnání s akustickou izolační deskou

Testy ukazují, že protihluková stěna může částečně pohlcovat zvuk, odrážet zvukové vlny a splnit požadavky dostatečné pevnosti materiálu a odolnosti konstrukce. Schopnost stěny pohlcovat zvuk závisí na tloušťce vrstvy mezerovitého betonu. Vlákná zvyšují houževnatost, odolnost panelu proti otluku a rázu. [7, 30]

4.4.5 Zpevněné plochy

Vlivem změny klimatu dochází v poslední době k extrémním hydrologickým jevům s často vyskytujícími se intenzivními srážkami, které mají za následek přívalové povodně a k obdobím výrazně suchým s minimem srážek. Klimatické změny mají dopad i na množství a prostorové rozložení půdní vláhy. Aby byly minimalizovány dopady extrémních hydrologických jevů vyvolaných probíhajícími klimatickými změnami, je vhodné provádět adaptační opatření. Ta by v České republice měla být zaměřena především na to, aby byl kompenzován pokles průtoků i vydatnost vodních zdrojů a minimalizován dopad přívalových dešťů způsobujících bleskové povodně. Navrhovaná opatření by měla výrazně zpomalovat odtok vody z území ČR, posilovat tvorbu zásob podzemních vod a chránit půdní pokryv před erozí a jinými procesy degradace. V tzv. malém koloběhu vody jsou nejproblematictějšími oblastmi intravilány měst a sídel, kde se nacházejí velké zpevněné plochy, na nichž se voda nemůže vsáknout a rychle odteče, případně se velmi rychle odpaří. Ke zvýšené schopnosti zadržení vody v dané lokalitě může přispět provádění zpevněných ploch z propustných materiálů. A zde by byla možnost uplatnit mezerovitý kompozit z recyklovaného betonu. Výhodou této aplikace je značná spotřeba recyklovaného materiálu a současně příspěvek k zvýšení retenční schopnosti oblasti.

4.4.6 Prvky k usměrnění vodního toku

Další navrhovaná aplikace také souvisí s důsledky současných klimatických změn a přispívá k zadržení vody v krajině a zvýšení ekologické stability oblasti.

V současnosti se ukazuje, že v minulosti provedené technické zásahy a úpravy vodních toků a jejich niv přinášejí i negativa a jejich rozsah byl až příliš velký. Velká část technických úprav, poškozujících přírodu a krajinu, byla nebo v dnešní době již je zbytečná nebo málo prospěšná. Mnoho současných projektů se orientuje na nápravu této situace, způsobené dřívějšími jednostranně pojatými technickými úpravami a provádějí revitalizační úpravy koryt řek a potoků.

Revitalizace vodních toků mají za účel zpomalit rychlost odtoku vody z krajiny pomocí změny vedení trasy toku, kdy jsou nepřirozené přímé úseky nahrazovány meandrujícím vodním tokem, a dále jsou prováděny zásahy v korytě toků. Při konstrukčních zásazích v korytu toku jsou např. vytvářeny kaskády pomocí prahů a stupňů, budovány příčné koncentrační stavby, které v širokých nížinných tocích mohou vytvářet proudový stín, útulky pro ryby a všeobecně přispívají k zvýšení různorodosti habitatu v toku. Ponořené usměrňovací konstrukce vytvářejí tůně usměrněním a zesílením přirozených výmolných procesů. Konstrukce ve vodě jsou namáhány nárazy předmětů a zvláště v horských úsecích může docházet k jejich poškození. Vláknobeton jako houževnatý a rázu odolný materiál bude vhodný pro konstrukce ve vodním toku a prvky vytvářející břehy toku. Z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem mohou být vytvořeny prahy i kaskády, stěnové prvky jakéhokoli tvaru.

4.5 Shrnutí

Snížení tvorby odpadu, zvýšení recyklace jsou v mnoha zemích žádané cíle – viz např. sedmý akční program pro životní prostředí (EAP), což je hlavní směrnice Evropské Unie pro environmentální politiku, která na zvýšení recyklace, znovuvyužití materiálů a snížení nutnosti sládkovat odpady klade velký důraz. V současnosti se zdá, že použití stavebního demoličního odpadu a dalších odpadů pro stavební výrobu je okrajová záležitost. Zůstane-li zachován dosavadní vývoj, nebudou mít budoucí generace z čeho vyrábět. Povědomí o neudržitelnosti růstu spotřeby a nutnosti snížení energetické náročnosti výroby je vytvářeno již desetiletí a chceme-li mít odpovědný přístup k budoucnosti, je nutné nalézt technická řešení pro budoucí výrobu s menším dopadem na spotřebovávání neobnovitelných zdrojů a snížení množství odpadů ze stavebního průmyslu.

Výzkum využití recyklátů, prezentace inverzního návrhového přístupu a představení aplikací vláknobetonu s recyklovaným kamenivem si klade za cíl upozornit na význam a perspektivy recyklace a poukázat na to, že jsou i jiné možnosti použití recyklovaného betonu než zavedené metody a postupy.

5 Hodnocení konstrukcí z materiálů na bázi betonu z hlediska udržitelné výstavby

Jedním z nových trendů v navrhování konstrukcí jsou témata související s udržitelnou výstavbou. Jejich cílem je minimalizovat dopady stavební výroby a provozu stavebních děl na exploataci a znečišťování planety a na postupující změny klimatu, které s ním zřejmě souvisejí.

5.1 Udržitelnost, udržitelná výstavba

Obsah termínu udržitelnost se postupně vyvíjí. V literatuře lze nalézt udržitelný rozvoj definovaný jako systém sestávající ze tří pilířů – environmentálního, ekonomického a sociálního. V tomto textu jsou uvedeny dvě další definice.

Daly (americký ekologický ekonom) a Cobb (americký filozof a environmentalista) formulovali ve své stati základní principy pro trvale udržitelné užívání přírodních zdrojů v roce 1989 takto:

1. Míra užívání neobnovitelných přírodních zdrojů nepřekročí míru, jakou mohou být rozvíjeny substituující obnovitelné zdroje.
2. Míra užívání obnovitelných přírodních zdrojů nepřekročí míru jejich regenerace.
3. Míra emisí škodlivin do životního prostředí nedosáhne hranice asimilačních schopností prostředí. [15]

V české legislativě byla trvalá udržitelnost definována v Zákoně o životním prostředí č. 17/1992 Sb.: "Trvale udržitelný rozvoj společnosti je takový rozvoj, který současným i budoucím generacím zachová možnost uspokojovat jejich základní potřeby a přitom nesnižuje rozmanitost přírody a zachovává přirozené funkce ekosystému." [3]

Jednoduchá a srozumitelná je upravená definice ISO 14050: Udržitelnost spočívá v uspokojení potřeb současnosti bez ohrožení schopnosti budoucích generací uspokojovat jejich vlastní potřeby.

Tyto definice celkem dobře popisují potřebu společnosti. Těžko však podle nich kvantifikovat, která stavba je postavena a provozována podle zásad udržitelnosti a určit tu, která zásadám nehoví. Pro kvantifikaci – vyčíslení ekologických aspektů výstavby nebo výroby se používají metody LCA (Life Cycle Assessment).

5.2 Hodnocení životního cyklu

Hodnocení životního cyklu (LCA – Life Cycle Assessment) je nástroj, který hodnotí environmentální vlivy výrobků, případně konstrukcí.

Prvním metodickým postupem, který hodnotil energii a zdroje spotřebované ve výrobním procesu a emise byla metodika "Analýza zdrojů a environmentálního profilu" (REPA – Resource and Environmental Profile Analysis), poprvé uplatněná v roce 1969 americkým výzkumným ústavem MRI pro porovnání a výběr materiálu pro loď a zjištění, zda je z ekologického hlediska vhodnější sklo nebo plast a recyklace nebo jednorázové použití materiálu. [17]

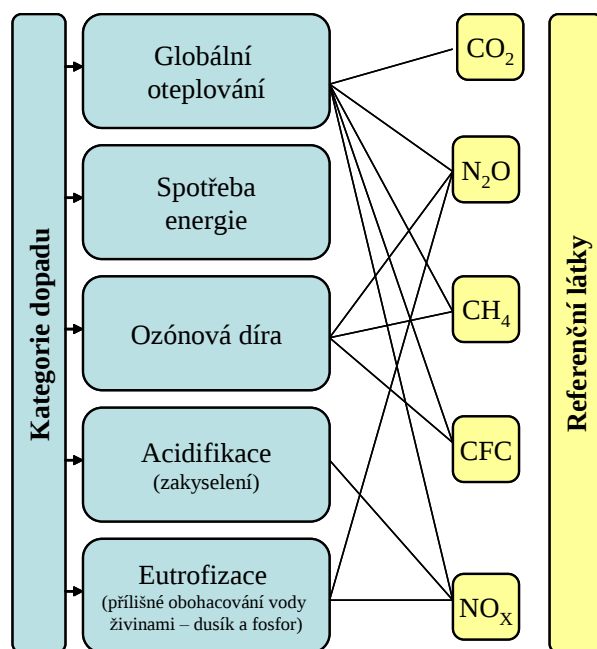
Pokroky v hodnocení životního cyklu (LCA) nastaly během ropné krize v sedmdesátých letech. Zpočátku byla analýza LCA používána pro studium energetické náročnosti balení výrobků (skleněné láhve – plastové láhve – karton ap.). Na přelomu osmdesátých a devadesátých let získala analýza životního cyklu velkou důležitost pro vyhodnocení vlivu na životní prostředí tzv. Green guides (environmentální marketingové prohlášení). Studie provedené pro stejný výrobek dávaly ale rozdílné výsledky. Proto byly snahy harmonizovat metodologii pro hodnocení životního cyklu, a vzniklo několik metodologických předpisů, které obsahovaly odlišná doporučení a často si odporovaly. Úsilí dosáhnout širokého konsenzu na mezinárodní úrovni vzešlo od společnosti SETAC. Poradní skupiny americké a evropské SETAC se v březnu 1993 v portugalské Sesimbře dohodly na znění Zákona o provádění hodnocení životního cyklu (Code of Practice for Life Cycle Assessment) – zdrojový dokument pro hodnocení LCA. Objevily se i další iniciativy standardizovat metodologii hodnocení životního cyklu, např. Z-760-LCA – směrnice kanadské normalizační asociace. Nejvíce je uznáván proces, který začal koncem devadesátých let v rámci mezinárodní organizace pro normalizaci. Hodnocení životního cyklu v oblasti stavebnictví se rozvíjí po přelomu století především pro hodnocení materiálů, výrobků a budov.

5.2.1 Metodologie hodnocení životního cyklu podle ISO

Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) vydala v roce 1997 řadu mezinárodních norem pro používání analýzy LCA EN ISO 14040 až EN ISO 14044, pomocí kterých lze hodnotit životní cyklus produktů a provozů (cradle to grave analysis = od kolébky do hrobu).

Tyto předpisy [13, 14] definují metodiku provádění LCA a stanovují, jaké části má obsahovat. Jsou to:

1. Definice cílů a rozsahu hodnocení.
2. Inventarizační analýza, která zahrnuje sběr dat k posouzení všech materiálů, energií a emisí. Do analýzy obvykle vstupují data jako zabudovaná energie, transport, užívání, spotřeba vody, údržba a opravy, demolice, odvoz na skládku nebo do recyklačního centra. Data jsou hodnocena, validována a zpravidla vztahována k uvažované jednotce (pro beton např. tuna, pro budovu např. 1m² podlahové plochy).
3. Hodnocení dopadů. V této části jsou aplikována data, získaná v předešlé etapě a jsou stanoveny vlivy na životní prostředí. Obrázek 5-1 uvádí příklady kategorií, které jsou v rámci LCA hodnoceny a příslušné referenční látky pro jejich kvantifikaci.
4. Interpretace výsledků, tedy závěrečná zpráva uvádí výsledky, závěrů a doporučení.



Obrázek 5-1 Příklady kategorií, které jsou hodnoceny v rámci životního cyklu

Analýza životního cyklu by měla být zkontrolována pomocí citlivostní analýzy a potvrzena nezávislou třetí stranou.

Metodiku podle ISO 14040/44 lze použít pro hodnocení životního cyklu stavby i pro environmentální prohlášení o produktu (EPD - Environmental Product Declaration). Pro hodnocení výrobků na životní prostředí byly vyvinuty v různých zemích celého světa další předpisy. Institutem WRI pro světové zdroje a Světová obchodní rada pro udržitelný rozvoj navrhli protokol výrobku GHG (GHG Protocol Product Standard), který je zaměřen především na sledování skleníkových plynů. Zahrnuje i praktické příklady.

Britský normalizační institut vydal britskou normu pro uhlíkovou stopu výrobků PAS 2050. Využívají ji společnosti po celém světě. Francouzská směrnice pro environmentální stopu produktu má označení BPX 30-323. Své vlastní směrnice mají v Japonsku a v Jižní Koreji (dokument Uhlíková stopa produktů – CFP Carbon Footprint of Products).

5.2.2 Nástroje pro LCA

Pro hodnocení vlivu na životní prostředí a certifikaci budov vzniklo několik nástrojů. Systém BREEAM byl vyvinut ve Velké Británii jako první svého druhu (od roku 1990). Systém LEED obdobný; byl vyvinut v USA a má tudíž platnost především tam. SB Tool CZ je český certifikační systém. V Německu mají certifikační systém DGNB. GBTool (Green Building Assessment Tool) byla vyvinuta v mezinárodní spolupráci. Výsledky hodnocení v různých nástrojích nejsou shodné. I v rámci jednoho nástroje se často provádí srovnávací analýza nikoli jen prosté stanovení certifikátu. Může jít o porovnání jednoho typu konstrukce s jiným, nebo porovnání jednotlivých fází životního cyklu.

Vedle těchto nástrojů existuje řada databází pro stanovení environmentálních dopadů, často zpracovaných ve formě výpočetního software. Údaje v jednotlivých databázích se v některých případech značně odlišují; hodnoty se mohou lišit v různých zemích ale i v různých regionech jedné země v závislosti např. na zdrojích energií, odlišnostech výroby.

Výsledek analýzy životního cyklu do značné míry záleží na volbě kategorií pro hodnocení a přidělení váhy jednotlivým kritériím [20, 22] a pro některé kombinace kritérií může být hodnocení zavádějící. Například cementářské výrobky jsou ve srovnání s pálenými materiály velmi výhodné při energetickém hodnocení, ale mají poměrně vysoké emise CO₂. Srovnání životního cyklu těchto dvou materiálů může dále ovlivnit to, je-li do analýzy zahrnut vliv karbonatace betonu, která způsobuje, že část emisí CO₂ z výroby cementu je za dobu života betonové stavby opět vázána v betonu.

Dalšími nejistotami v hodnocení životního cyklu jsou nedostatek informací o budoucím vývoji stavby, způsobu údržby, frekvenci rekonstrukcí, případně změně užívání.

Při hodnocení životního cyklu budov je obvykle stanovena vztahová jednotka – např. m² podlahové plochy, m³ obestavěného prostoru. Při hodnocení LCA pro mosty se používají funkční jednotky jako metr čtvereční efektivní plochy mostu, metr délky mostu, průřez mostu, celý most pro dané rozpětí a šířku. Tyto vztahové jednotky jsou pro správné hodnocení životního cyklu mostů příliš úzce definovány. Vztahová jednotka by měla souviset také s životností mostu a to nejlépe od fáze návrhu mostu až ke konci životního cyklu. Mosty (inženýrské konstrukce) zpravidla souvisejí s větší oblastí, slouží pro celý region a ovlivní infrastrukturu v celém kraji. I tato okolnost by měla být zohledněna v hodnocení životního cyklu a určení funkční jednotky. Výběr funkční jednotky může rozhodnout o výsledku analýzy LCA. Ve studii, která porovnávala tři projekty mostů, změnila volba funkční jednotky (metr čtvereční efektivní plochy mostu x celý most) výsledek tak, že pro jednu variantu vyšel nejlépe most dřevěný, pro druhou most betonový. [18]

Studie životnosti budov od kolébky do hrobu ukazují, že hlavní podíl na impaktech stavby na životní prostředí má fáze užívání stavby. Pro některé objekty a některé ukazatele představuje fáze výstavby jen cca 5% celkového dopadu.

Ve studiích životnosti mostů od kolébky do hrobu velmi záleží na způsobu údržby a oprav mostu v nejdelší životní fázi mostu – užívání a provozování. Správná údržba může minimalizovat počet nutných oprav a výměn mostních prvků a souvisejících výluk v dopravě; obojí má dopad na kategorie hodnocené v rámci LCA. Spotřeba energie na demolici mostů a inženýrských konstrukcí a její environmentální dopady ve srovnání s budovami mají zřejmě vyšší podíl na celkové bilanci v hodnocení životního cyklu.

5.3 Environmentální dopady výroby betonu a betonových konstrukcí

V analýze možného snížení dopadů výroby betonu uvažme vliv všech složek betonu: kameniva, cementu, vody, přísad i příměsí.

Těžba kameniva vedle vlivu na vzhled krajiny ovlivňuje podzemní a povrchové vody; těžba může negativně ovlivnit hydrogeologické poměry. Environmentální dopady má i další zpracování vytěženého kamene, především drcení.

Na výrobu cementu připadá 80 % z celkové spotřeby energií v procesu výroby betonu. Je to nejnáročnější proces i při hodnocení tzv. uhlíkové stopy, tedy produkce CO₂.

Záměsová voda pro výrobu betonu má být čistá; běžně je používána voda pitná, protože její použití nevyžaduje žádné průkazní zkoušky. V tzv. bezodpadové technologii výroby čerstvého betonu se používá voda recyklovaná. Tato voda obsahuje zvýšený podíl jemných částic (z cementu, kameniva a příměsí), který ovšem není stálý a v průběhu času se může měnit. Kvalita a vlastnosti recyklované vody musí být zohledněny v návrhu betonové směsi a při její výrobě, aby směs měla požadovanou konzistenci.

Environmentální dopady přísad se zpravidla v LCA nehodnotí.

Některé příměsi mají pozitivní vliv na bilanci dopadů v hodnocení LCA.

Výroba portlandského cementu je energeticky náročná; na výrobu jedné tuny cementu je zapotřebí přibližně 3,7 GJ energie. Portlandský cement má i vysokou uhlíkovou stopu. Při výrobě tuny portlandského slínku vzniká 1 tuna CO₂, z toho se 55% uvolní při kalcinaci vápence a zbylých 40% je způsobeno spalováním paliva. Proto se na snížení množství cementu zaměřuje mnoho výzkumů a jsou používána substituční pojiva, která částečně nebo plně nahrazují cement v betonové směsi. Jde o tzv. vedlejší energetické produkty s hydraulickými nebo latentně hydraulickými vlastnostmi jako jsou elektrárenské popílký, struska, cementové odprašky, mikromletý recyklát, křemičitý úlet. Jako pojiva jsou zkoušeny i netradiční materiály jako popel z rýžových slupek (RHA rice husk ash), popel z pšeničné slámy (WSA Wheat Straw Ash) ap. Vznikají spálením zemědělského odpadu při teplotě kolem 600°C. Jsou bohaté na oxid křemičitý, takže jejich efekt na beton by měl být podobný jako má mikrosilika. Testy, kde bylo 5 – 15 % cementu nahrazeno popelem z rýžových slupek a pšeničné slámy, ukázaly srovnatelné pevnosti jako běžný beton.

V úsilí minimalizovat dopady produkce betonu bychom se neměli zaměřit pouze na snížení environmentálních dopadů jednotlivých komponent betonu, ale udržet nadhled a dodržet následující principy:

- **Posouzení efektivnosti investičního záměru stavby z hlediska LCA i LCC.**
Z hlediska udržitelné výstavby mnohem důležitější než výpočet energetické náročnosti či dopad výstavby na znečištění životního prostředí může být správné rozhodnutí, zda je zamýšlená stavba potřebná a zda má být postavena v dané lokalitě. Optimalizovat například lokaci mostu s ohledem na minimální dopravní zatížení, minimalizaci dopravní vzdálenosti při výstavbě, využití mostu po dokončení, zkrácení dopravních cest oproti původní situaci atd.
- **Správný statický návrh.**
Správně zvolený tvar konstrukce a konstrukčního prvku, který odpovídá namáhání prvku a vhodně využívá vlastností materiálu, vede k udržitelné výstavbě. Je správné

uvážit možnosti vylehčení prvků (zvláště u prvků prefabrikovaných); zvážit, zda není na místě navrhnout předpjatý prvek, aby byly lépe využity vlastnosti betonu, ap.

Volba vhodného tvaru průřezu např.: ohýbaný prvek z hlediska mezního stavu únosnosti využívá pouze malou část průřezu, je tedy vhodné tomu přizpůsobit tvar prvku.

- **Efektivní využití materiálu.**

Na základě pochopení vlastností betonu správně navrhnout a efektivně využít jeho potenciál. V případě potřeby využít speciální druhy betonu – cementové kompozity s řízenými vlastnostmi, vláknobeton, vysokohodnotné betony atd. Použití cementových kompozitů může přinést další benefity architektonické a estetické (viz např. grafický beton, betony s hydrofobními, fotokatalytickými či biocidními povrchy).

- **Návrh trvanlivé konstrukce.**

Problematika životnosti staveb s otázkami udržitelné výstavby úzce souvisí. Stavby s velkou trvanlivostí vyžadují v průběhu své existence méně oprav. V případě trvanlivějších staveb také uplyne delší doba, než dospějí do stádia, kdy už je nutná jejich demolice a výstavba nového objektu. Environmentální dopady související s výstavbou jsou potom vykompenzovány delším provozem stavby bez nutných oprav. Trvanlivost může být zvýšena údržbou, správně načasovanými a provedenými opravami, sanací a rekonstrukcí. To je v současnosti sledováno hlavně u mostů – systém BMS (Bridge Management System).

- **Demontovatelné prefabrikované konstrukce.**

Předčasná demolice konstrukce je značným dluhem pro životní prostředí. Znovupoužití betonových dílců v jiné konstrukci bylo vyvinuto a je používáno v řadě států: Holandsko, Belgie, Lucembursko, Německo, Finsko, Švédsko atd. Průkopníkem vývoje demontovatelných systémů bylo Holandsko (konstrukční systémy CD 20, Matrixbouw)

- **Recyklace po skončení životního cyklu konstrukce.**

Recyklace se týká všech materiálů. Betonářskou výztuž lze získat a znovuvyužít pro výrobu oceli. O recyklaci betonového kompozitu šířeji pojednává kapitola 4.

Beton má pověst materiálu, který značně zatěžuje životní prostředí. Neprávem. Ve srovnání s dalšími konstrukčními materiály beton zpravidla vychází lépe. „Špatná“ pověst betonu je pravděpodobně způsobena globálními čísly; beton je totiž nejčastěji používaným konstrukčním materiálem a objem jeho produkce je ze všech stavebních materiálů největší.

Beton je ekonomicky a environmentálně výhodný zvláště tehdy, je-li v analýze hodnocen celý životní cyklus a nikoli jen prvotní náklady. Beton má nižší náklady na údržbu, větší trvanlivost a delší životnost ve srovnání s jinými stavebními materiály.

5.4 Resilience

Vedle termínu „sustainability“ (udržitelnost) se objevuje nový termín – „resilience“. Používá se v souvislosti s hospodářstvím (resilient economy), podnebím (resilient climate) i konstrukcemi (resilient structure). Český překlad výrazu „resilience“ je nezlomnost, nezdolnost, houževnatost, pružnost. Latinské slovo „resilio“ znamená zpět skákat. V české terminologii není zatím překlad ustálený, vzhledem k mnohoznačnosti termínu přidržím se v tomto textu varianty „resilience“.

Resilience společnosti znamená schopnost společnosti zotavit se po přírodní katastrofě a vrátit se ke stavu před ní.

Resilience konstrukcí představuje schopnost navrátit konstrukci do funkčního stavu po kalamitní události či havárii.

Do městských sídel – budov a infrastruktury jsou vloženy obrovské investice. Případné omezení nebo selhání městské infrastruktury má značné dopady sociální a ekonomické. Proto k prostému návrhu na minimální spolehlivost je doporučováno přijmout ochranná opatření na vlivy způsobené změnami klimatu, přírodními a člověkem způsobenými katastrofami. Resilience je dosaženo zvýšením robustnosti, trvanlivosti a životnosti konstrukcí, jejich dostatečnou odolností proti pohromám.

Resilientní konstrukce zajistí životaschopnost a udržitelnost společnosti tím, že umožní výrobu, obchodní činnost a poskytne ubytovací kapacity. Další hospodářský, sociální a environmentální prospěch vyplývá z úspory zdrojů, které by musely být použity na záchranné práce, odstranění následků katastrofy a obnovu o katastrofě.

Betonové konstrukce vyhovují požadavkům na resilientnost i udržitelnost.

5.5 Závěr

Beton a zvláště vláknobeton a ostatní cementové kompozity s vlákny jsou ekologickými materiály, které splňují zásady udržitelné výstavby. Je nutné zajistit vysokou trvanlivost betonových konstrukcí a jejich dlouhou životnost a efektivně využít klady materiálu.

Beton je komplexní materiál s mnoha variantami, variabilním složením, různými technologiemi výroby a mnoha možnostmi uplatnění. Proto i stanovení a případné posouzení vlivu betonu na životní prostředí nemůže mít jednoduché řešení použitelné globálně v kterékoli zemi, ale je souhrnem pokroků v návrhu betonové směsi, technologii výroby, nových materiálů, nového použití materiálů tradičních, nového pohledu na navrhování betonových konstrukcí a dalších strategií, které mohou být i kombinací.

Žádné hodnocení nemůže samo o sobě přinést udržitelnou stavbu. Při analýze environmentálních přínosů musí být použit zdravý rozum, logické uvažování, racionální a moudrý přístup. Nepovažuji za rozumné ustanovit certifikaci staveb jako povinný ukazatel a stanovit nějaké limity. Certifikace by měla probíhat na základě dobrovolnosti, kdy investor či provozovatel zadáním svého objektu k certifikaci ukáže svou odpovědnost, prokáže ohleduplnost k budoucím generacím, k životnímu prostředí.

K stavbám s nižším environmentálním dopadem by mělo vést vzdělávání, pozitivní příklady, altruismus investorů a motivovanost projektantů.

Navrhování konstrukcí podle zásad udržitelného stavitelství není široce rozšířeno, to je důvod proč zjišťovat dopady výroby betonu a jeho používání na životní prostředí a hledat nové cesty jak zmírnit jeho ekologické dopady, negativní vliv na životní prostředí a udržitelný život společnosti. [27]

6 Závěry, shrnutí

Habilitační práce pojednává o betonových a cementových kompozitech s rozptýlenou výztuží a jejich uplatnění v konstrukcích.

Druhá kapitola přináší v úvodní části přehled a klasifikaci vláknobetonů, ve druhé části ukázky aplikací vláknobetonů v prvcích a postupů. Práce si nekladla za cíl být vyčerpávající monografií, spíše na příkladech poukázat na charakteristické rysy vláknobetonů, ukázat pozitiva a výhodné vlastnosti vláknobetonu pro různé typy konstrukcí a konstrukčních prvků, průkopnický koncept navrhování na základě zkoušek a zkušenosti s ním a problematiku spojenou s transferem teoretických znalostí a vědeckých poznatků až k aplikaci v reálném prvku. Každá z podkapitol se věnuje konkrétní aplikaci a popisuje jistý výhodný aspekt vláknobetonu. V práci jsou shrnuty principy vhodné pro navrhování konstrukcí a konstrukčních prvků z vláknobetonu.

Třetí kapitola se zabývá ultra-vysokohodnotným betonem (UHPC), který se také řadí mezi cementové kompozity s rozptýlenou vláknovou výztuží. Po úvodním popisu UHPC a přehledu možného uplatnění tohoto kompozitu je v kapitole ukázka aplikace UHPC, na jejíž přípravě a navrhování se autorka podílela.

Čtvrtá kapitola mapuje použití recyklovaného kameniva pro výrobu vláknobetonového kompozitu a alternativní filozofii návrhu aplikací z vláknobetonu s recyklovaným kamenivem, včetně navrhovaných aplikací.

Závěrečná kapitola se věnuje aspektům udržitelného stavebnictví v návrhu betonových konstrukcí.

Cementové kompozity s rozptýlenou výztuží mají velký potenciál splnit požadavky na tzv. „udržitelnou“ konstrukci. Do této oblasti by měl směřovat výzkum. Dalším námětem budoucího výzkumu jsou otázky možného snížení krycích vrstev, bezpečného kotvení v betonových a cementových kompozitech a vlivu vláken na trvanlivost a životnost. V této oblasti chybí dostatečný počet dat pro validaci modelů popisujících dlouhodobé chování těchto kompozitů a vliv dotvarování a smršťování.

V habilitační práci byly využity výsledky mnoha projektů, na jejichž řešení se autorka podílela.

Literatura

- [1] Annual Review 2012-2013, European Aggregates Association, 2013
- [2] Batal I., Brejcha V., Fidranský P., Němec P.: “Drátkobetonový nosník pro lávky pro pěší – výroba a zkoušky”, Proceedings Betonářské dny 2010.
- [3] Bechník, B.: „Trvalá udržitelnost a její hodnocení“. Dostupné na tzb-info.cz
- [4] Brejcha, V.: Obkladový tenkostěnný panel z vláknobetonu, Stavebnictví 1802-2030 2014/03
- [5] Buzzini, D., Dazio, A., Trüb M.: Quasi-static Cyclic Tests on Three Hybrid Fibre Concrete Structural Walls, Institut für Baustatik und Konstruktion Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich – Svazek 297, Ibk-Berichte Series – Svazek 297, Vydavatel Hochschulverlag AG, 2006, ISBN 3728130745, 9783728130747
- [6] CA 1308883 C Compact reinforced composite, patent
- [7] Caiyou Zhao, Ping Wang, Li Wang, Dan Liu: Reducing Railway Noise with Porous Sound-Absorbing Concrete Slabs, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2014 (2014)
- [8] Cohen, Z., Peled, A., Mobasher, B., Janetzko, S., Gries, T.: “Hybrid Cement-Based Composites: Dynamic And Static Tensile Behaviours”, Befib2012, J. Barros, Editor, 2012.
- [9] Červenka, V., Jendele, L., Červenka, J.: ATENA Program Documentation Červenka Consulting, 2005
- [10] ČSN EN 12390: Zkoušení ztvrdlého betonu
- [11] ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu. Praha: Český normalizační institut
- [12] ČSN EN 206 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [13] ČSN EN ISO 14040 Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Zásady a osnova
- [14] ČSN EN ISO 14044 Environmentální management - Posuzování životního cyklu - Požadavky a směrnice
- [15] Daly, H.; Cobb, B. J. For the Common Good. Boston: Beacon Press, 1989
- [16] Dhir, R.K.; Limbachiya, M.C.; and Leelawat, T. Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 1999. 134 (3): 257 -274.
- [17] Gerilla, G.P.; Teknomo, K. and Hokao, K. “An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction”. Building and Environment (Jul. 2007, vol. 42, no. 7, pp. 2778-2784). ISSN 0360-1323.
- [18] Hammervold, J., Reenaas, M., & Brattebø, H.: Environmental effects-life cycle assessment of Bridges. SubProject 2 (SP2), ETSI Project (Stage 2), Norwegian University of Science and Technology (NTNU). (2009).
- [19] <http://www.celakovice.cz/cs/mesto/rozvoj-mesta/projekty/lavka-pres-labe/fotogalerie.html>
- [20] <http://www.cmlca.eu/>

- [21] <http://www.crc-tech.com/>
- [22] <http://www.czgbc.org/certifikace/registr-certifikovanych-budov>
- [23] <http://www.kuraray-am.com/>
- [24] <http://en.red-dot.org>
- [25] <http://www.sklocement.cz/>
- [26] <http://www.srg.saint-gobain.com/>
- [27] Kočí, V.: LCA a EPD stavebních výrobků: posuzování životního cyklu a environmentální prohlášení o produktu jako cesta k udržitelnému stavebnictví. Praha: Česká rada pro šetrné budovy, 2012. ISBN 978-80-260-3504-6.
- [28] Kohoutkova A., Broukalova I.: "Simulation as a Tool for Decision - Making Process for Applications of FRC in Precast Elements", Proceedings of The 3rd Central European Congress on Concrete Engineering,
- [29] Kohoutková A., Broukalová I.: "Utilisation of Fibreconcrete in Structural Elements for Increasing of Durability", Proceedings Life Cycle Assessment, Optimisation, Behaviour and Properties of Concrete Structures, Brno 2008
- [30] Krezel, Z.A., and McManus, K.J. Recycled Aggregate Concrete Sound Absorbing Barriers for Urban Freeways. Ecorecycle Victoria Market Development Grant – Final Report 2002
- [31] Krstulovic-Opara N.: „Use of partially-precast HPFRC systems for LNG tanks“, Workshop Fiber Reinforced Concrete From theory to practice, Bergamo 2004
- [32] Mobasher B, Peled A, Pahilajani J.: „Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites“. Materials and Structures 2006; 39(287):317–331.
- [33] Mobasher B, Peled A, Pahilajani J.: „Distributed cracking and stiffness degradation in fabric-cement composites“. Materials and Structures 2006; 39(287):317–331.
- [34] Mobasher B., Barsby, C.: „Flexural Design Of Strain Hardening Cement Composites“, BEFIB2012, J. Barros, Editor, 2012.
- [35] Mobasher, B. Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites, CRC press,. Release Date: Sept, 2011, 480 pp ISBN: 9781439806609
- [36] Mobasher, B., Pivacek, A., Haupt, G. J.: "Cement based cross-ply laminates", Journal of Advanced Cement Based Materials, 6, (1997) 144-152.
- [37] Mobasher, B., Pivacek, A.: "A Filament Winding Technique for Manufacturing Cement Based Cross-Ply Laminates," Journal of Cement and Concrete Composites, 20 (1998) 405-415
- [38] Nagataki, S., Gokce, A., Saeki, T., Hisada, M.: Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates“. Cement and concrete Research, 34(6), 965-971. 2004
- [38] Naaman, A.E., "High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications," in proceedings of CBM-CI International Workshop, December 2007, Karachi, Pakistan
- [39] Peled A, Mobasher, B. "Pultruded fabric-cement composites," ACI Materials Journal 2005;102(1):15-23.

- [40] Peled, A., and Mobasher, B.: "Properties of Fabric-Cement Composites Made by Pultrusion", *Materials and Structures*, 39(8), 787-797. 2006
- [41] Peled, A., Sueki, S., Mobasher, B.: "Bonding In Fabric-Cement Systems: Effects of Fabrication Methods", *Journal of Cement and Concrete Research*, 36(9) (2006), 1661-1671.
- [42] PONTEX: Report of the Load-test
- [43] Poon, C. S., Kou, S. C., Lam, L., Fok, H., and Kou, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on slump and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*; 2004. 34 (1): 31-36.,
- [44] Ramamurthy, K., Gumaste, K.S. Properties of Recycled Aggregate Concrete, *Indian Concrete Journal*, 1998, Vol.72, Jan.1998, pp 49-53.
- [45] Resplendino, J., Toulemonde, F.: *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, 24. 1. 2013 - Počet stran: 814
- [46] Sajdllová T.: Identifikace materiálových parametrů pro nelineární modelování konstrukcí z drátkobetonu (Bc), ČVUT v Praze
- [47] Shayan A., Xu A: „Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate“. (2003) *Materials Journal* 100/5, pp.371-380
- [48] Shi, C., et al.: Performance enhancement of recycled concrete aggregate A review, *Journal of Cleaner Production* (2015)
- [49] Šeps, K., Vodička, J., Vytlačilová, V.: *Nový způsob využití stavebních recyklátů v praxi*. Praha, České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, 2012. ISBN 978-80-01-05185-6
- [50] Šíkola, P.: *Cyklopointy Chocenice, architektonická studie (Domy jinak)*
- [51] Tanaka, Y., H. Musya, Y. Shimoyama, T. Kobayashi: Application technology of ultra high strength fibre reinforced concrete for a 50m span Sakat Mirai Footbridge 28th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 28 - 29 August 2003, Singapore
- [52] Vodička, J., Veselý, V., Broukalová, I., Lorek, K.: *Plovoucí ostrůvek. BETON-technologie, konstrukce, sanace*. 2010, roč. desátý, č. 2/2010, s. 22-25. ISSN 1213-3116.
- [53] Vytlačilová, V., Kohoutková, A., Vodička, J.: *Souhrn základních mechanicko-fyzikálních vlastností vláknobetonu s recykláty. Vláknobetony s plnou náhradou přírodního kameniva recykláty*. Praha, České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, 2011. ISBN 978-80-01-04968-6.