



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Návrh systémového oplocení s využitím vysokohodnotného betonu

Fencing system design using high-performance concrete

Diplomová práce

Studijní program:

Stavební inženýrství

Studijní obor:

Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce:

Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.

Vypracoval:

Bc. Eduard Hruška

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hruška Jméno: Eduard Osobní číslo: 484435
Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor/specializace: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh systémového oplocení s využitím vysokohodnotného betonu

Název diplomové práce anglicky: Fencing system design using high-performance concrete

Pokyny pro vypracování:

- rešerše historického vývoje a současného stavu betonového prefabrikovaného a prefamonolitického oplocení, možnosti implementace rostlin do oplocení
- návrh vlastního systémového oplocení, včetně vhodných materiálů
- experimentální stanovení mechanických parametrů zvoleného materiálu
- jednoduchý statický návrh dimenze oplocení, návrh stavebního řešení
- zhotovení prototypu dílce z vysokohodnotného betonu
- závěrečné shrnutí, doporučení pro další práci

Seznam doporučené literatury:

- AITCIN, Pierre-Claude. High performance concrete. CRC press, 1998

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.

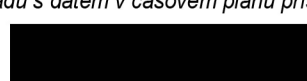
Datum zadání diplomové práce: 20. 9. 2023

Termín odevzdání DP v IS KOS: 8. 1. 2024

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku



Podpis vedoucího práce



Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

20. 9. 2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Tomáše Vlacha, Ph.D. a s použitím literatury, která je uvedena v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. ledna 2024

.....

Podpis

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Vlachovi, Ph.D. za jeho odborné rady, ochotu, trpělivost a také lidský přístup, se kterým se mi věnoval. Děkuji lidem z UCEEB ČVUT v Buštěhradě z Laboratoře kompozitních materiálů za pomoc s experimentální částí. Poděkování patří také mojí rodině za veškerou podporu v průběhu studia.

Anotace

Tématem diplomové práce je návrh nového systémového oplocení s využitím vysokohodnotného betonu. V první části práce pojednává o historii a vývoji betonového oplocení obecně, o jeho funkcích a vlastnostech. Následuje návrh uceleného systému betonového oplocení, včetně stavebních návazností a detailů. Instalace oplocení má být umožněna bez použití těžké manipulační techniky a při návrhu je tak maximálně využita efektivita vysokohodnotného betonu. Práce se rovněž zabývá implementací zeleně do oplocení z estetických důvodů. Dále je text krátce věnován výběru materiálů, jejichž vlastnosti jsou vzájemně porovnány a hodnoceny. Zvolený materiál receptury vysokohodnotného betonu s rozptýlenými ocelovými mikrovlákný, ze kterého je systém oplocení finálně navržen, je podroben zkouškám v laboratoři pro zjištění základních materiálových parametrů a výsledky těchto zkoušek jsou použity při konstrukčním návrhu samotných prvků oplocení. Na závěr je v experimentální části také navíc vyhotoven prototyp výseku navrženého oplocení.

Klíčová slova

Vysokohodnotný beton, vysokohodnotný vláknobeton, ocelová mikrovlákná, oplocení, systémové oplocení, betonové oplocení, betonové tvarovky, betonový květináč, integrovaný květináč, zeleň v betonu

Annotation

The topic of the diploma thesis is the design of a new system fence using high-performance concrete. The first part of the thesis deals with the history and development of concrete fencing in general, its functions and properties. This is followed by the design of a complete concrete fencing system, including construction connections and details. The installation of the fencing is to be made possible without the use of heavy handling equipment, thus maximising the efficiency of the high-performance concrete in the design. The work also addresses the implementation of greenery into the fencing for aesthetic reasons. Furthermore, the text briefly discusses the selection of materials, whose properties are compared and evaluated against each other. The selected material formulation of high-performance concrete with dispersed steel microfibers, from which the fencing system is finally designed, is tested in the laboratory to determine the basic material parameters and the results of these tests are used in the structural design of the fencing elements themselves. At the end of the experimental part, a prototype of a section of the designed fencing is also made in addition.

Keywords

High-performance concrete, high-performance fibre concrete, steel microfibres, fencing, system fencing, concrete fencing, concrete fittings, concrete planter, integrated planter, greenery in concrete

Obsah

Úvod	8
1. Rešerše	10
1.1 Vývoj a historie betonového oplocení	10
1.2 Současný stav	13
1.3 Rozvaha nad možným zlepšením	17
1.4 Požadavky na oplocení	19
1.5 Vhodnost betonu jako materiálu oplocení.....	20
1.6 Vysokohodnotný beton a oplocení.....	21
1.7 Spojení betonového oplocení s rostlinami.....	22
2. Materiál	23
2.1 Vysokohodnotný beton	23
2.2 Vysokohodnotný vláknobeton	28
3. Návrh systému oplocení – prvotní návrh.....	32
3.1 Stavební část – prvotní návrh řešení.....	32
3.2 Statická část – prvotní návrh.....	38
3.3 Zhodnocení – prvotní návrh	49
4. Experimenty.....	50
4.1 Zkoušený materiál.....	50
4.2 Návrh experimentů	56
4.3 Příprava směsi	57
4.4 Experimenty	66
4.4.1 Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [24].....	66
4.4.2 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu tříbodové uspořádání zkoušky dle ČSN EN 12390-5 [25].....	72
4.4.3 Zkouška statického modulu pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [26].....	80
4.4.4 Zkouška dynamického modulu pružnosti dle ČSN 73 1371 [27].....	85
4.4.5 Komentář k výsledkům experimentů	89
5. Návrh systému oplocení	90
5.1 Statická část	90
Ověření návrhu zkouškou pevnosti v tahu za ohybu – čtyřbodové uspořádání dle ČSN EN 12390-5 [25].....	95
5.2 Stavební část.....	102
5.2.1 Stavební část – konstrukce plotu	102
5.2.2 Stavební část – implementace rostlin	106
5.2.3 Stavební část – design	117
6. Realizace prototypu	122
6.1 Návrh realizace prototypu	122
6.2 Tvorba forem prototypu	123
6.2 Betonáž prototypu	132
6.3 Kompletace prototypu	146
Závěr.....	152
Použitá literatura	154
Seznam obrázků.....	157
Seznam tabulek.....	162

Úvod

Každý z nás je denně vystaven různým vlivům vnějšího prostředí. Jedním z těchto vlivů je i estetické okolí na člověka. Často se setkáváme s nelichotivým vzhledem konstrukcí či objektů, ten má vliv na vnitřní pocity člověka na dané prostředí a může se cítit nekomfortně. S nadsázkou řečeno se z hezké procházky po okolí může rázem stát procházka ponurá. Při pobytu venku jsem si začal postupně více všimnout prefabrikovaných betonových plotů, které jsou nyní instalovány doslova na každém rohu, převážně z důvodu nízkých pořizovacích nákladů. Vzhled je subjektivní záležitostí, nicméně po konzultaci s několika přáteli a rodinnými příslušníky je jasné, že tento pocit z prefabrikovaných betonových plotů nemám pouze já, tyto ploty nepůsobí většinou hezky a plní zejména dělicí funkci. Tato práce se zabývá tématem betonového prefabrikovaného oplocení, přičemž jejím cílem je návrh vhodné alternativy k současné produkci prefabrikovaného betonového oplocení s využitím potenciálu nejen mechanických vlastností vysokohodnotného betonu. Diplomová práce představuje inovativní přístup k návrhu a konstrukci betonového oplocení, který spojuje technické aspekty s designem. Cílem je také překonat tradiční vnímání betonu jako materiálu s omezenou estetickou hodnotou, hlavně v kontextu oplocení. Dalším cílem je návrh vhodné implementace zeleně do oplocení tak, aby došlo ke zlepšení vizuálního dojmu z oplocení a aby se povedlo najít systémové řešení tohoto problému. V první rešeršní části práce je čtenář seznámen s vývojem a historií betonového oplocení, se současným stavem betonového oplocení, dále pak s analýzou možných řešení. Následující část stručně popisuje vysokohodnotné betony. Poté přichází na řadu prvotní studie-návrh systémového oplocení z vysokohodnotného betonu, jednoduché statické posouzení pro ověření realizovatelnosti konceptu, zhodnocení možnosti provedení, prvotní stavebně technické řešení a řešení vzhledu systémového oplocení. Další část je věnována experimentům. Nejprve

jsou charakterizovány jednotlivé složky vybraných směsí, na základě výsledků experimentů zvolených směsí je vybrána nejvhodnější směs pro realizaci. Po výběru vhodné směsi došlo na zjednodušený statický návrh, díky kterému bylo možné přistoupit k návrhu vhodného podrobného stavebně technického řešení, možnosti implementace rostlin a designu systémového oplocení. Ve finální fázi se práce věnuje realizaci prototypu systémového oplocení, řeší se návrh a výroba forem pro betonáž dílců prototypu, samotná betonáž jednotlivých dílců prototypu, následné sestavení hotových dílců, ze kterých se prototyp skládá, završené výsadbou dostupných rostlin do květináčů pro prezentaci prototypu. Na závěr je prezentována podrobná fotodokumentace prototypu systémového oplocení z vysokohodnotného vláknobetonu a zhodnocení.

1. Rešerše

1.1 Vývoj a historie betonového oplocení

Betonové oplocení je tu s námi téměř stejně dlouho, jako beton samotný, první zmínky jsou z dob starověkého Řecka a Říma, kde se beton využíval spíše jako doplněk ke kamenům a dalším tehdy běžně používaným materiálům. V navazujícím období středověku a raného novověku se soustředili stavitelé převážně na stavbu z kamene a beton byl využíván pouze jako výplň nebo podklad pro kamenné zdi. V 19. století se začal beton zkoumat podrobněji, začalo se s výzkumy a studii na zlepšení betonové receptury a výrobních postupů, díky nimž se beton posunul do blízké podoby současných betonů. V tomto období vznikly první betonárky. V první polovině 20. století se betonové oplocení stalo běžným hlavně v městských oblastech, kde bylo nutné vybudovat levné, rychlé a funkční oddělení pozemků. Významněji se začalo uplatňovat v době betonové prefabrikace (druhá polovina 20. století), kde došlo také k vylepšení technologie betonu. Často bylo a stále je součástí vojenských objektů, věznic a chráněných objektů. Zde se také začaly objevovat první prefabrikované betonové ploty, které se těšily velké popularitě, zejména pro svou jednoduchost. Svými vlastnostmi se tento druh oplocení více než hodí k aplikaci u chráněných objektů, je neprůhledný, odolný, slouží jakožto akustická clona a zejména budí dojem hradby, kterou není lehké překonat, což v časté společnosti s ostatním, popřípadě žiletkovým drátem, rozhodně plní. Ikonickým historickým betonovým oplocením je jednoznačně Berlínská zeď, která byla součástí železné opony rozdělující tehdejší západní a východní Německo (Evropu). [1]



Obrázek 1 – Historická fotografie Berlínské zdi [2]



Obrázek 2 – Historická fotografie z usazování betonových dílců Berlínské zdi [3]



Obrázek 3 – Betonový plot věznice Všehrdy [4]

V době betonové prefabrikace také historický vývoj prefabrikovaných betonových plotů končí a dochází pouze k jeho aplikaci v podobě, jako je na obrázku 3. Toto se výrazně změní až v 21. století, kdy se začne hojně vyskytovat současná produkce prefabrikovaných betonových plotů, zřejmě z nutné potřeby lidí oddělit se od ostatních, ohraničit svůj soukromý majetek, potřeby soukromí a podobně.

1.2 Současný stav

Definicí současnosti betonového oplocení podle množství viditelných realizací jsou troufám si říci jednoznačně prefabrikované betonové ploty, složené z deskových dílců a sloupů s průřezem ve tvaru H, do kterých se jednotlivé slabě vyztužené desky nasouvají.



Obrázek 4 – Fotografie současného prefabrikovaného betonového plotu s příkladem profilace vnějšího povrchu desek [5]



Obrázek 5 – Sloupek [6]



Obrázek 6 – Deska profilovaná [7]



Obrázek 7 – Fotografie současného prefabrikovaného betonového plotu s hladkými deskami [8]

V oblibě je toto řešení zejména z důvodu nízké pořizovací ceny, rychlé výstavby, dobré životnosti, akustické funkce a zajištění soukromí. Konstrukční princip je shodný s konstrukčním principem prefabrikovaných betonových plotů z dob komunismu (viz. obrázek 3). Do vyhloubeného otvoru (patky) v zemi se uloží betonový sloupek, který se po vyrovnání zasype zavlhlou betonovou směsí. Takto se zabetonují všechny sloupky, mezi ně se poté osazují betonové desky, které se zasouvají do mezer ve sloupech průřezu H. Proti plotům z minulosti se liší hlavně z hlediska složení betonu a částečnou vzhledovou variabilitou (různé profilace a možnost probarvení betonu).

Dalším zástupcem současného betonového oplocení jsou prefa-monolitické zdi a opěrné zdi z betonových tvarovek, které se po vyskládání a montáži konstrukční výztuže vyplní betonem a fungují tak jako ztracené bednění.



Obrázek 8 – Fotografie zděného oplocení z betonových plotových tvárnic [9]



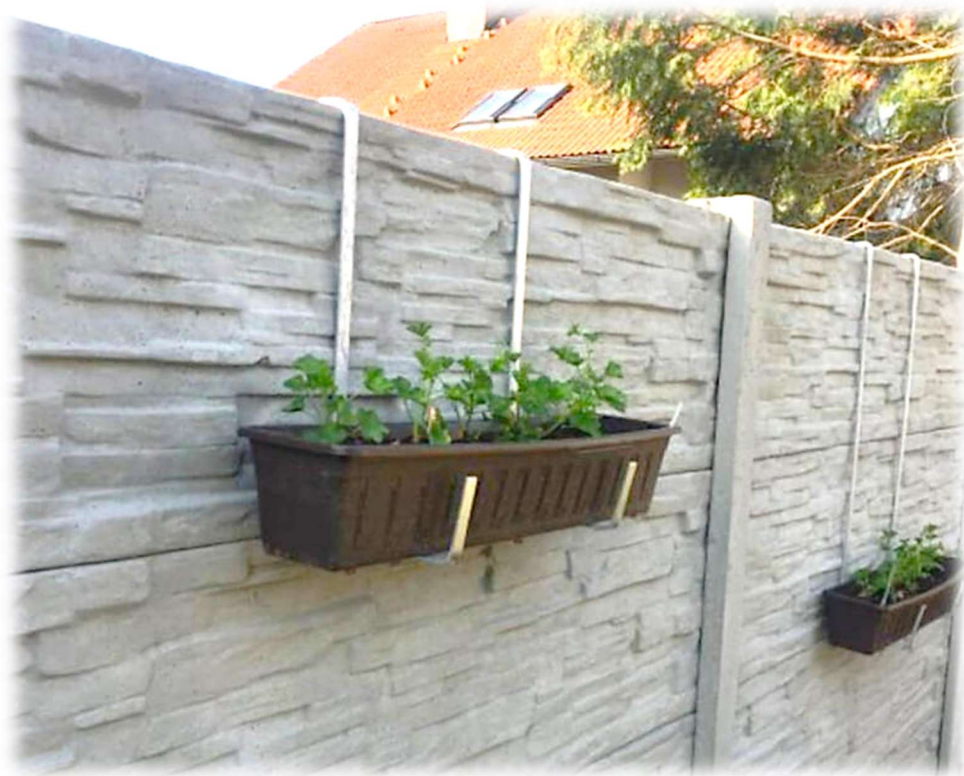
Obrázek 9 – Fotografie zděného plotu z betonových tvárnic v procesu realizace [10]

Tento typ betonového plotu je sice oku subjektivně příjemnější, avšak na prefabrikované dílce ztrácí svou vyšší časovou náročností na provádění a cenou. Je vhodné upozornit na fakt, že je v tomto případě nutné vytvořit základový pas pod celou délkou oplocení, a to do nezámrzné hloubky.

Rozhodně se lze setkat s více typy betonových oplocení, uvedeny byly v úvodu práce pouze ty, se kterými se lze setkat nejčastěji. Nejsou blíže rozebírány různé rozličné možnosti vzhledu tvarovek pro ztracené bednění, není zmíněna možnost realizace monolitické stěny, která je finančně náročná, na druhou stranu přináší velké možnosti variability.

1.3 Rozvaha nad možným zlepšením

Beton je velmi zajímavý materiál, lidem se líbí, bohužel ve formě oplocení se ne vždy dá jeho vzhled a konkrétní aplikace hodnotit kladně. To bych rád změnil a nabídl možnou alternativu k současné produkci betonových plotů. Mělo by se jednat o oplocení, které splní veškeré nároky kladené na betonové ploty současnosti, ale zároveň by mělo být svým vzhledem více přívětivé. Práce je zaměřena na nabídku alternativy k současným prefabrikovaným betonovým plotům, protože ty se mi subjektivně i lidem v mém okolí líbí nejméně. Tento typ plotu by mohl například působit jako celistvá deska. Líbilo by se mi, kdyby se plotové sloupy daly nějakým způsobem skrýt, aby nenarušovaly dojem celistvosti desek jednotlivých polí. Pokud je snahou integrovat nosný sloupek do oplocení, musíme počítat s tím, že plot bude mít tloušťku minimálně jako sloupek. To však kvůli redukci hmotnosti znamená, že deska by měla být dutá. Díky tomu by bylo možné sloupek schovat do dutiny a zároveň by dílec nebyl příliš hmotný. Zvětšením tloušťky plotu vyvstává otázka z hlediska tloušťky desek. Pokud by tato deska byla řešena z běžného betonu, byla by velice těžká kvůli minimální potřebné tloušťce betonu, což by značně zkomplikovalo proces výstavby s potřebou těžké manipulační techniky, ale také dopravy, cenu dílce. Uplatnění zde efektivně najde právě vysokohodnotný beton, díky kterému můžeme tloušťku stěny dílců výrazně snížit a tím pádem se dostaneme na přijatelnou hmotnost. Z důvodu montáže a dopravy je nutné navrhnout dílce tak, aby se s nimi dalo manipulovat co možná nejsnáze, jednotlivý dílec by měl vážit přibližně kolem 50 kg. Díky tomu bude možné vynechat potřebu těžké manipulační techniky pro instalaci. Líbila by se mi také možnost zakomponování zeleně do plotu, což bude vypadat jistě skvěle, protože tím můžeme spojit dva protiklady, živý plot a betonový plot. Jak se říká protiklady se přitahují a zde to bude platit taktéž. Je tedy dobré počítat i s variantou začlenění nějaké formy květináče do systému plotu. Inspirace kombinace zeleně a betonu je prezentována na obrázku 10 a 11.



Obrázek 10 – Fotografie příkladu realizace betonového plotu ve spojení se zelení [11]



Obrázek 11 – Inspirace kombinace betonu a zeleně [12]

1.4 Požadavky na oplocení

Od oplocení se běžně očekává splnění několika funkcí, které se mění podle potřeb stavebníka a také podle prostředí, ve kterém je umístěno. Primárně se klade důraz na dostatečnou dělící funkci, která má na starost oddělení soukromého pozemku od veřejného prostranství. Zabránění vniknutí osob, zvířat, ale i například poletujícího listí, je primárním cílem. Akustické a vizuální oddělení nabývá v některých případech též na důležitosti, zejména pak v místech, kde je v blízkosti dopravní infrastruktura, nebo například výrobní objekt. V bodech lze požadavky na funkci oplocení shrnout takto:

- Dělicí funkce
- Akustická funkce
- Zábrana nahlížení na pozemek
- Estetická funkce
- Trvanlivost
- Bezúdržbovost

Zajímavé je oplocení i z hlediska zákona, kdy do konce roku 2017 bylo nutné mít pro stavbu oplocení územní souhlas, to však od 1. 1. 2018 již potřeba není, nicméně je nutné splnit tyto podmínky:

- Výška plotu není větší než 2 m
- Oplocení nevede podél veřejně přístupné pozemní komunikace nebo veřejného prostranství
- Nachází se v zastavěném území nebo v zastavitelné ploše

Pokud nejsou tyto podmínky splněny, je nutné mít stavbu plotu podloženou územním souhlasem, případně jinými dokumenty, dle požadavků příslušného stavebního úřadu. Ve všech případech se musíme řídit stavebním zákonem č. 183/2006 Sb. [13]

1.5 Vhodnost betonu jako materiálu oplocení

V předchozí kapitole byly nastíněny obecné požadavky kladené na oplocení. Oplocení může být vyrobeno téměř z jakéhokoliv materiálu, beton v tomto ohledu však exceluje. Splňuje totiž všechny požadavky a ještě je cenově dostupný, tudíž ho lze považovat za ideální materiál pro stavbu plotu. Dělicí funkce betonového plotu je neoddiskutovatelná, akusticky je na tom také velmi dobře díky hmotnosti, trvanlivost betonu je při vhodném návrhu a provedení taktéž velice výhodná, bezúdržbovost jakbysmet při dobrém řešení detailů a návazností zejména v soklových oblastech. Řada otázek však vyvstává nad estetickou funkcí betonového oplocení, vzhled a design je sice velmi subjektivní záležitostí, nicméně betonové ploty se obecně nesečkávají s pozitivním hodnocením, co se týče vzhledu. Povrch betonu je však oku líbivý, což dokládá současná velká obliba v aplikaci interiérových betonových stěrek a pohledových betonů. Je potřeba také zmínit, že u běžných betonů dochází po delší době ke stárnutí a změnám na povrchu, což také výrazně ovlivňuje vzhled.



Obrázek 12 – Pohledový beton v Národní technické knihovně (NTK) [14]

1.6 Vysokohodnotný beton a oplocení

Jelikož je beton a prvky z něj vyrobené charakteristické svou vysokou hmotností, je nutné dbát zvýšené pozornosti, aby betonové oplocení nebylo příliš těžké. Pokud byla definována potřeba skryt sloupek oplocení, aby plot působil co nejvíce jednoduše, znamená to, že tloušťka plotových dílců bude nutně trochu větší než tloušťka sloupku, abychom ho dokázali integrovat. Tento požadavek je v rozporu s přijatelnou hmotností, otázkou je, jak to řešit? Zde je odpovědí vysokohodnotný beton, díky němuž se může tloušťka stěn zmenšit na nezbytné minimum, k tomu nám nejspíše dopomůžou i rozptýlená vlákna. Velmi dobrou vlastností HPC pro oplocení a veškeré venkovní konstrukce je jeho odolnost vůči negativním vlivům vnějšího prostředí, nízká propustnost vody, možnost vytvoření složitých tvarů a jeho kompaktní (téměř hladký) povrch s vynikající pohledovou kvalitou, který nepotřebuje žádnou dodatečnou povrchovou úpravu, což je patrné z obrázku 13.



Obrázek 13 – Fotografie povrchu HPC (květináč před budovou UCEEB ČVUT)

1.7 Spojení betonového oplocení s rostlinami

V současné době se lze setkat spíše s přisazením oplocení a zeleně k sobě, nikoliv se vzájemným propojením. Beton se s rostlinami spojuje pomocí betonových květináčů, svahových tvarovek a zatravnovacích (vegetačních) dlažeb. Spojení betonového plotu a rostlin není v současné době běžné, nikde jsem takovou aplikaci neviděl, a to ani po zběžném prozkoumání internetu a dalších zdrojů. Kombinace zeleně a betonového oplocení může vytvářet atraktivní a zároveň funkční prostředí. Rostliny dokážou redukovat povrchovou teplotu v městské zástavbě, mají taktéž pozitivní dopad na psychiku člověka. Skvělý je kontrast, kterým je zeleň a beton, živý a neživý prvek, tvarově rozmanitý a jednolitý prvek, barevný a šedý prvek. Myšlenka spojit zeleň s oplocením, zvláště pak s betonovým, je proto velmi zajímavá, tato práce se s ní bude snažit pracovat a vymyslet proveditelné řešení.



Obrázek 14 – Fotografie vegetační dlažby [15]

2. Materiál

2.1 Vysokohodnotný beton

Vysokohodnotný beton je tu s námi již řadu let, ve stavební praxi se začal uplatňovat při výstavbě výškových budov od 60. let dvacátého století, zejména z důvodu úspory místa v dispozici budovy (možnost menších průřezů sloupů), možnosti dosažení větších výšek a jako náhrada za ocel. [16]

Vysokohodnotný beton, označován zkratkou HPC (z anglického High-Performance Concrete), je speciální typ betonu, který v porovnání s běžným betonem, vykazuje zlepšené vlastnosti, zejména vyšší pevnost a větší odolnost vůči negativním vlivům prostředí. Konkrétní vlastnosti závisí však vždy na dané receptuře, která velmi ovlivňuje výsledný produkt. Primárně zlepšenými vlastnostmi jsou:

- Větší pevnost

HPC je charakteristický svou vyšší pevností (v tlaku i v tahu za ohybu) v porovnání s běžným (standardním) betonem, konstrukce z HPC mohou tedy přenášet vyšší zatížení, při zachování stejných rozměrů. Při shodné únosnosti konstrukce z běžného betonu, můžeme při použití HPC vytvořit danou konstrukci subtilnější a ušetřit tak primární zdroje surovin.

- Vyšší odolnost vůči negativním vlivům prostředí

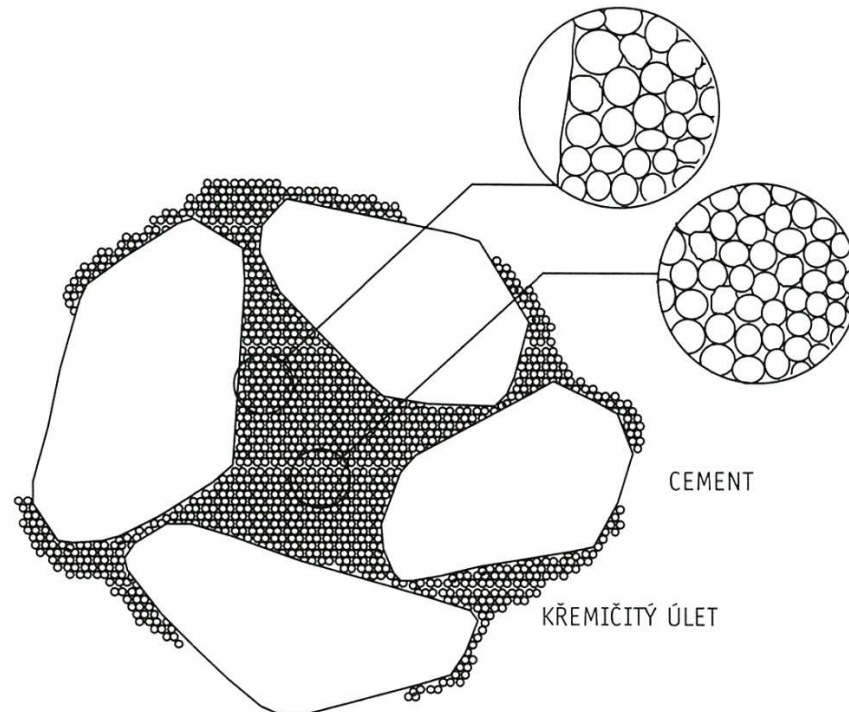
Dle zvolené receptury vysokohodnotného betonu je možné docílit větší odolnosti vůči negativním faktorům, jako jsou různé typy chemických látek, mořská voda a jiné agresivní látky, a to zejména díky větší hutnosti směsi – mikrostruktura.

- Zlepšené chování v nízkých teplotách
Díky své struktuře dokáže HPC lépe odolávat chladu a mrazu nežli běžný beton, což najde uplatnění v prostředích s extrémním klimatem.
- Snížená propustnost vody
V podmínkách, kde je kladen důraz na odolnost konstrukcí proti vodě a vlhkosti, můžeme též s výhodou použít vysokohodnotný beton, který má výrazně sníženou propustnost vody.
- Lepší zpracovatelnost
Díky použitým přísadám a menším frakcím plniv, je obecně možné konstatovat, že HPC má lepší zpracovatelnost v porovnání s běžným betonem. Receptury vysokohodnotného betonu jsou navrhovány výhradně jako samozhutnitelné.

Je nutné zopakovat, že vylepšení vlastností je závislé na složení vysokohodnotného betonu, to udává receptura, která pečlivě vybraným surovinám specifikuje jejich vzájemný poměr. Mezi specifické faktory, které ovlivňují vlastnosti HPC patří:

- Jemná granulometrie
 - HPC je charakteristický použitím jemnějšího plniva a absencí vyšších frakcí kameniva.
- Superplastifikátory
 - Přísady, které zajistí lepší zpracovatelnost betonové směsi a umožní použití výrazně menšího množství vody.
- Příměsi
 - Do směsi HPC lze přidat i speciální příměsi, které ovlivní výsledné vlastnosti vysokohodnotného betonu, jedná

se například o křemičitý úlet (což je mikrofiller, který dokáže zaplnit prostor mezi zrna cementu, díky tomu se zvyšuje pevnost, a navíc se účastní i pucolánové reakce).



Obrázek 15 – Zaplnění prostorů mezi zrna cementu křemičitým úletem [16]

- Poměr vody a cementu
 - HPC má zpravidla menší poměr vody a cementu než běžný beton, díky čemuž se sníží výsledná pórovitost a tím se zvýší pevnost a další parametry. Nízký poměr vody a cementu s sebou přináší nevýhody v podobě špatné zpracovatelnosti a velkého autogenního smršťování, to lze vhodnými postupy značně eliminovat.
- Preciznost při výrobě
 - U vysokohodnotných betonů musíme respektovat recepturu a držet se přesného množství jednotlivých surovin. Zejména je důležité kvalitní ošetřování s cílem snížit smršťování.

Vysokohodnotný beton, ostatně to samé platí i pro beton běžný, je možné přizpůsobit konkrétní aplikaci a potřebám, pomocí vhodně zvolené receptury.

„Přípravě vysokohodnotného betonu musí předcházet pečlivý výběr materiálů. Je velmi obtížné dosáhnout posledních požadovaných megapascalů tlakové pevnosti nebo takové zpracovatelnosti, aby mohl být beton spolehlivě a rovnoměrně ukládán ještě hodinu po namíchání. A jak snadné je o tyto vlastnosti přijít! S růstem požadovaných pevností se stávají vlastnosti a kvalita každé ze složek kritickými.“ [16]

Jednotlivé složky HPC:

Cement (pojivo)

- Pro HPC se používá cement s vazností 42,5 nebo 52,5
- Často se volí cement rychlovazný R
- Většinou CEM I, méně pak CEM II
- Zpravidla kolem 450-600 kg cementu na 1 m³ betonu, i více

Voda

- Běžně používáme pitnou vodu s teplotou kolem 15 °C
- Menší množství, než u běžného betonu

Kamenivo (plnivo)

- Volíme nejpevnější dostupné kamenivo (čedič, vápenec, žula)
- D_{\max} 16 mm (ideálně 8 mm)
- Tvarový index blíží se 1
- Těžené kamenivo je lepší

Příměsi

- Používají se pro vylepšení vlastností HPC

- Optimalizace zrnitostní křivky, urychlení nárůstu počáteční pevnosti, využívají se jako mikrofiller, každá příměs má svá vlastní pozitiva
- Křemičitý úlet=mikrosilika
- Popílek
- Struska
- Metakaolin
- Inertní příměsi
 - Křemenná moučka, prach z čediče, vápenná moučka

Přísady

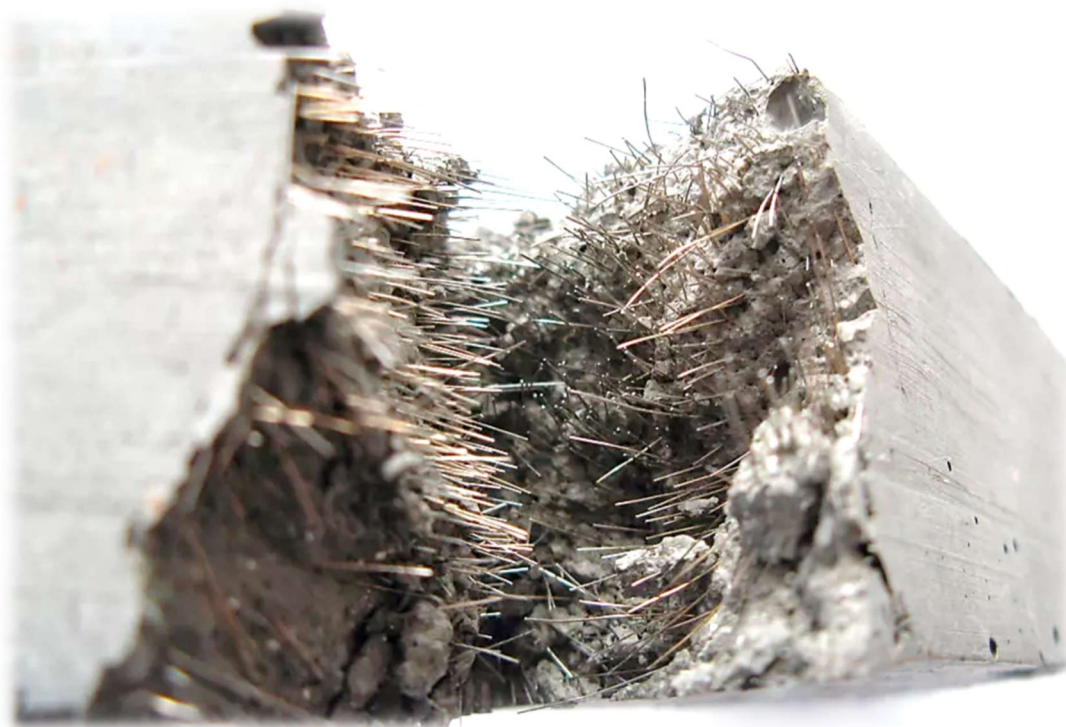
- Vylepšují HPC
- Široká paleta přísad, z nichž se nejčastěji používají:
 - **Superplastifikátory** – s jejich pomocí dosahujeme lepší zpracovatelnosti a také navýšení pevnosti, fungují na principu neutralizace povrchového napětí zrn cementu, díky tomu je možné použít menší množství vody při zachování dobré zpracovatelnosti, v dnešní době se používají látky na bázi polykarboxylát etherů
 - **Provzdušňující přísady** – zajišťují mrazuvzdornost HPC pomocí rovnoměrně distribuovaných uzavřených pórů, pozor však na limitní hodnotu pórovitosti (cca 10 %), po které výrazně klesá pevnost, jako provzdušňovací přísady se běžně používají mýdla z pryskyřic a tenzidy (saponáty)
 - **Zpomalovače (retardéry) tuhnutí** – prodlužují dobu zpracovatelnosti a snižují hydratační teplo, zpomalovače jsou zpravidla cukry, speciální typy kyselin (karboxylové kyseliny a hydroxylované kyseliny) nebo látky na bázi fosfátů

Rozptýlená výztuž

- Vylepšuje zejména pevnostní parametry, viz. další kapitola [16]

2.2 Vysokohodnotný vláknobeton

U běžných betonů se setkáváme s pojmem vláknobeton (běžně drátkobeton) již poměrně často, například u betonových podlah halových objektů. Jedná se o beton s rozptýlenou výztuží. Pro vláknobeton se používá zkratka FRC (Fibre Reinforced Concrete). Pro vysokohodnotný beton platí možnost vylepšení pevnostních parametrů taktéž. Vysokohodnotné betony vyztužené vlákny, neboli vysokohodnotné vláknobetony, jsou s výhodou používány v případech, kdy potřebujeme zlepšit pevnostní parametry materiálu, zamezit rozvoji trhlin a omezení negativních účinků objemových změn, zejména smršťování. Rozptýlená výztuž v podobě vláken, která jsou součástí směsi vysokohodnotného betonu, může být vyrobena z široké palety materiálů, přičemž nejčastěji se můžeme setkat s vlákny ocelovými, skleněnými, polypropylenovými a uhlíkovými. Vlákna mohou mít také různé tvary a rozměry.



Obrázek 16 – Fotografie vysokohodnotného vláknobetonu při porušení [17]

Vlákna začínají v betonu fungovat po vzniku první trhliny či mikrotrhliny. Pokud chceme, aby vlákna plnila správně svou funkci, musí být ve směsi rovnoměrně rozptýlena. Proto je nutné dbát na správnou přípravu (promíchání) směsi a zabránit vzniku shluků vláken v jednom místě. Tomu napomáhá například pomalé postupné přidávání těchto vláken do již hotové směsi HPC. Důležité je dbát i na správné množství vláken, které se liší dle materiálu použitých vláken a požadovaných vlastností. Rozdíl v chování vysokohodnotného betonu bez rozptýlené výztuže a vysokohodnotného betonu s příměsí ocelových mikrovláken je možné pozorovat v grafech na obrázcích 70, 71, 72 a 73.

Na následujících stranách jsou vlákna z nejběžněji používaných materiálů vyobrazena.



Obrázek 17 – Skleněná vlákna, délka 12 mm, průměr fibrily 14 μm [18]



Obrázek 18 – Polypropylenová vlákna, délka 12 mm, průměr fibrily 32 μm [18]



Obrázek 19 – Ocelová vlákna s profilací, délka 60 mm, průměr fibrily 0,8 mm [18]



Obrázek 20 – Ocelová mikrovlákna, délka 13 mm, průměr fibrily 0,19 mm [18]

Obecně je možné konstatovat, že všechny typy vláken se aplikují pro snížení negativních účinků objemových změn (eliminace tvorby trhlin v betonu a omezení jejich rozvoje). Jedině vláknobeton s ocelovými vlákny či mikrovlákny může sloužit pro aplikace v nosných konstrukcích. Polypropylenová vlákna se s výhodou používají tehdy, když chceme zlepšit požární odolnost. Polypropylenová vlákna spolu se skleněnými vlákny s alkalivzdornou úpravou povrchu jsou velmi odolná vůči agresivnímu prostředí a chemikáliím. V této práci budou použita pouze ocelová mikrovlákna z důvodu nutnosti dosažení vysokých pevností a možnosti

přenosu velkého zatížení i po vzniku trhlin, houževnatosti, zároveň se budou betonovat subtilní prvky, kde se mikrovlákná velmi hodí.

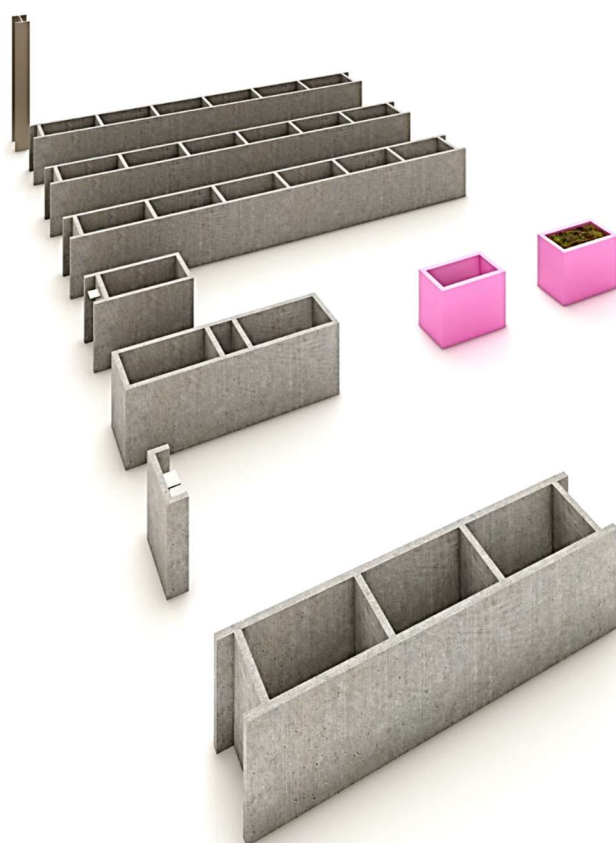
Pro vláknobeton, který je z běžného betonu platí:

„Účelem přidání vláken do betonu bylo v prvních aplikacích zejména ztužení základní poměrně křehké matrice nevyztuženého prostého betonu. Uplatněním vláknobetonu byly zejména podlahové desky, chodníky a vrstvy silničních vozovek, mostovek a letištních drah včetně jejich oprav. Po zkušenostech bylo zřejmé, že oproti běžnému betonu může vláknobeton přenášet tahová napětí i po vzniku trhliny, má příznivější přetvárné vlastnosti (větší duktilitu, menší smršťování a dotvarování), je odolnější proti povrchovému opotřebení, lépe vzdoruje dynamickým účinkům zatížení a vysokým teplotám. Uvedené pozitivní vlastnosti jsou však vždy podmíněny správným návrhem složení vláknobetonu a provedením.“ [19]

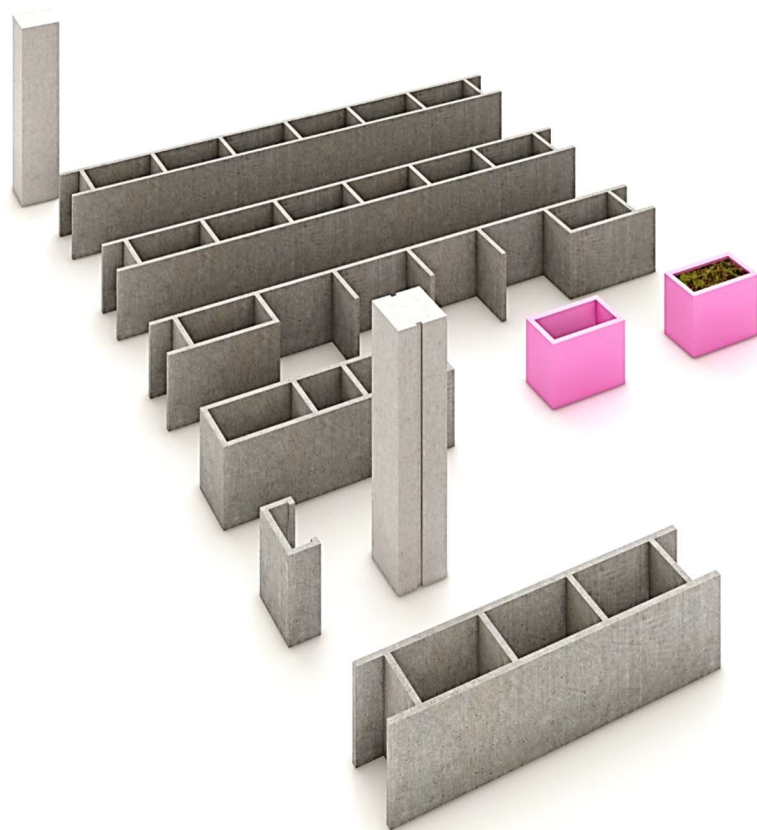
3. Návrh systému oplocení – prvotní návrh

3.1 Stavební část – prvotní návrh řešení

Jak již bylo zmíněno beton je velmi zajímavý materiál, lidem se líbí a já toho nejsem výjimkou, bohužel u stávajících betonových plotů nelze vzhled vždy hodnotit kladně. To bych rád změnil a nabídl alternativu k současné produkci betonových plotů. Postupně jsem dospěl k návrhu betonových prefabrikovaných plotových dílců, kde byl ve třech variantách navržen vnitřní integrovaný sloupek. První varianta sloupku byla z oceli, druhou variantou byl železobetonový prefabrikovaný sloupek a třetí byl železobetonový monolitický sloupek do ztraceného bednění. Zprvu jsem přistoupil na modeláž a zhmotnění myšlenek ve 3D model. Na snímcích níže lze vidět prvotní návrhy systémů betonového oplocení.



Obrázek 21 – Návrh systému prefabrikovaného betonového plotu s vnitřním sloupkem z oceli [20]



Obrázek 22 – Návrh systému prefabrikovaného betonového plotu s vnitřním sloupkem ze ŽB [20]

Po dlouhém uvažování různých výhod a nevýhod jsem jako vhodnou pro další pokračování vybral variantu prefabrikovaného betonového plotu s vnitřním sloupem z monolitického železobetonu, který se jeví jako nejlevnější a nejnáze proveditelná, bez potřeby těžké mechanizace. Ocelové sloupy jsou příliš drahé a korodují. Prefabrikované železobetonové sloupy jsou zase velmi těžké, byly by také kladeny veliké nároky na přesnost při instalaci. Bylo potřeba dále vymyslet, jak do plotu zakomponovat rostliny, respektive květináče.



Obrázek 23 – Prvotní návrh možné podoby květináčů v plotu, princip řešení [20]

Rozhodl jsem se systém plotu vyřešit takto:

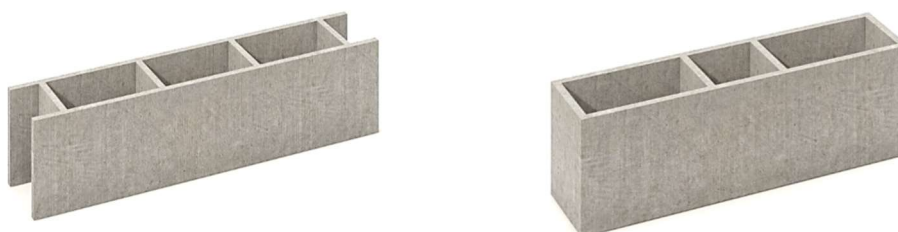
- Deskové dílce o tloušťce 200 mm s dutinami (dvě desky odděleny žebry) z vysokohodnotného vláknobetonu (ocelová mikrovlákná), různé délky dílců, včetně dílců doplňkových a dílců tvořících integrovaný květináč. Všechny dílce, kromě těch tvořících květináče, jsou vysoké 250 mm. Dílec s květináči je vysoký 500 mm.
- Tloušťka stěny dílce ideálně maximálně 20 mm, aby nebyl dílec příliš těžký a nebyla potřeba těžké manipulační techniky.
- Květináče budou umístovány do předem připravených tepelně izolačních boxů z XPS tloušťky cca 20 mm.
- Sloupky integrované v dutině plotových dílců jsou navrženy z monolitického železobetonu.



Obrázek 24 – Základní dílec výšky 250 mm, šířky 200 mm, délky 2 m [20]



Obrázek 25 – Dílec s květináči výšky 250 mm, šířky 200 mm, délky 2 m [20]



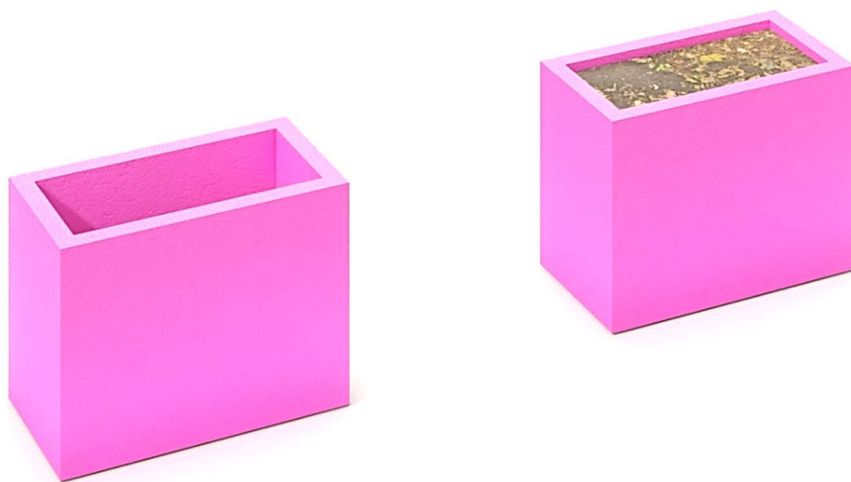
Obrázek 26 – Doplnkové dílce dlouhé 1 m [20]



Obrázek 27 – Železobetonový monolitický sloup s drážkou vytvořenou díky zazubení konce dílců [20]



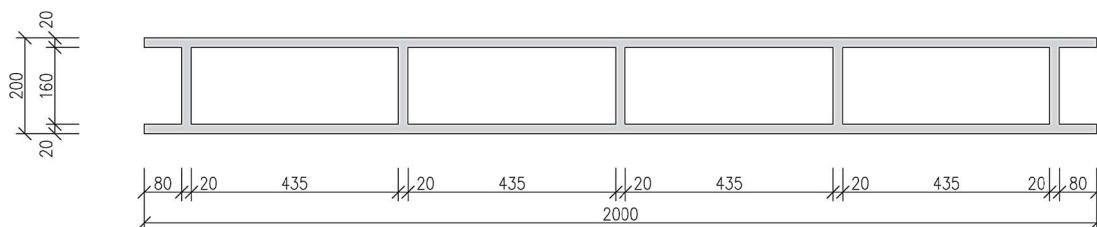
Obrázek 28 – Koncový dílec [20]



Obrázek 29 – Boxy z XPS pro květináče [20]



Obrázek 30 – Dílec s osazenými rostlinami jako vzor [20]



Obrázek 31 – Schéma půdorysu základního dílce s rozměry v mm [21]

3.2 Statická část – prvotní návrh

Prvotní design spolu s principem fungování systému je hotov. Je nutné v dalším kroku přistoupit k předběžnému výpočtu a určení rozměrů prvku (tloušťka stěn, vzdálenosti žeber atd.), a potřebných materiálových charakteristik. Z prvotního návrhu stavebního řešení byl základní dílec definován půdorysem, který je na obrázku 32, a jehož modulová výška je 250 mm. Prvotní statický návrh bude pro jednoduchost řešit pouze tento dílec.

Zatížení:

- Stálé: vlastní tíha a ostatní stálé zatížení (zatížení od dílců uložených nad posuzovaným dílcem)
- Proměnné: vítr, teplota, lokální zatížení – náraz fotbalového míče, aktivní zemní tlak od zeminy v květináčích

Charakteristiky materiálu:

- Receptura vysokohodnotného betonu HPC bude převzata z předchozího vývoje od kolegů z katedry konstrukcí pozemních staveb ČVUT v Praze

Složka	ρ [kg/m ³]	m [kg]	V [m ³]
CEM I 42,5R	3000	650	0,217
Technický písek	2650	1200	0,453
Mikrosilika (křemičitý úlet)	2200	75	0,034
Křemenná mouka ST 6	2650	265	0,100
Superplastifikátor na bázi PCE	1084	18	0,017
Voda	1000	180	0,180
Celkem		2388	1,000

Tabulka 1 – Vzorové složení HPC [22]

- Vlákna z vysokouhlíkové oceli potažené mosazí MasterFiber 482 v dávce 80 kg/m³

- Všechny materiálové charakteristiky pro prvotní návrh budou použity z bakalářské práce Ing. Elišky Kafkové [22]

Síla vyvozená dopadem fotbalového míče

$$v = 36 \text{ m/s}$$

$$m = 0,5 \text{ kg}$$

$$v_{\text{odraz}} = 20 \text{ m/s}$$

$$t = 0,005 \text{ s}$$

$$F = ?$$

$$F = a \cdot m$$

$$a = \frac{\Delta v}{t}$$

$$F = \frac{v - v_{\text{odraz}}}{t} \cdot m = \frac{36 - 20}{0,005} \cdot 0,5 = \mathbf{1,600 \text{ kN}}$$

Vzorové zatížení zeminou

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\varphi = 30^\circ$$

$$h = 0,25 \text{ m}$$

$$K_a = \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)^2 = \tan \left(45^\circ - \frac{30}{2} \right)^2 = 0,333$$

$$\sigma_a = \gamma \cdot h \cdot K_a = 20 \cdot 0,25 \cdot 0,333 = \mathbf{1,667 \text{ kN/m}^2}$$

Vzorové zatížení větrem

$$C_e = 1,3$$

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

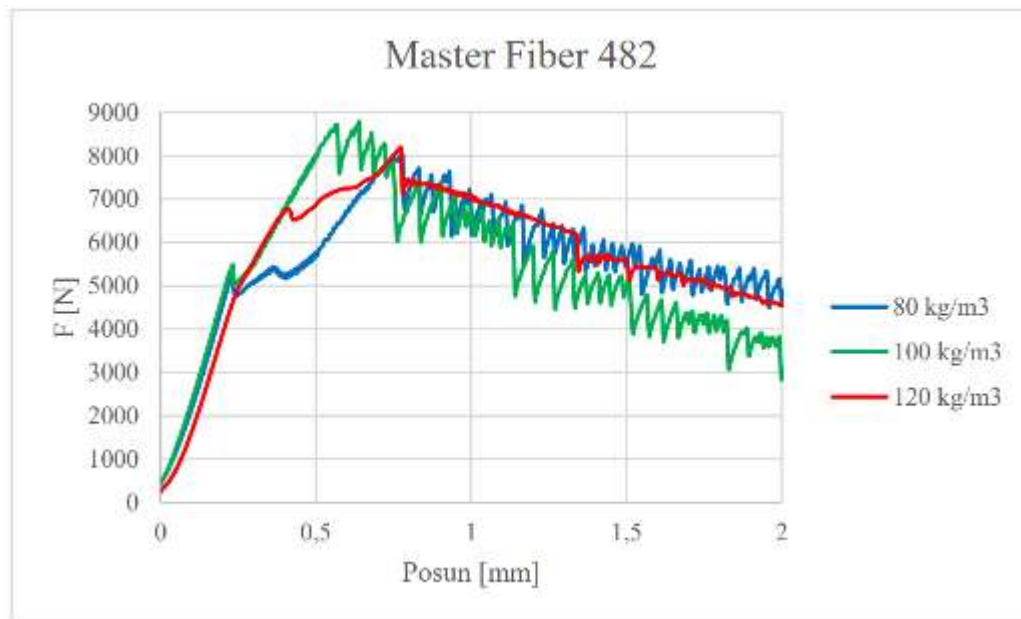
$$v_b = 22,5 \text{ m/s}$$

$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 22,5^2 = \mathbf{0,316 \text{ kN/m}^2}$$

$$q_p = C_e \cdot q_b = 1,3 \cdot 0,316 = \mathbf{0,411 \text{ kN/m}^2}$$

Množství	Rozlití	Trámečky	Trámečky	Krychle
	kužele [cm]	σ_{cf} [MPa]	σ_c [MPa]	σ_c [MPa]
80 kg/m ³	30	20,59	129,23	132,56
100 kg/m ³	30	21,30	133,60	142,63
120 kg/m ³	30	14,68	125,17	134,76

Tabulka 2 – Výsledky zkoušek trámečků (40x40x160 mm) v tahu za ohybu, v tlaku na úlomcích trámečků a v tlaku a krychlích o hraně délky 100 mm [22]



Obrázek 32 – Graf závislosti deformace na zatížení při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu na trámečcích 40x40x160 mm [22]

Materiálové charakteristiky

- Zvolená varianta: Master Fiber 482 80 kg/m³

$$f_{cf} = 20,59 \text{ MPa}$$

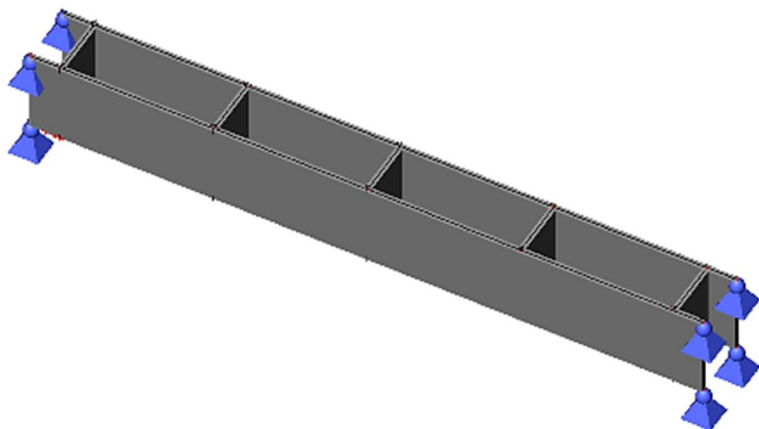
$$f_{c, \text{trámeček}} = 129,23 \text{ MPa}$$

$$f_{c, \text{krychle}} = 132,56 \text{ MPa}$$

$$F_{Rk, cr} = 5,4 \text{ kN}$$

Zjednodušený statický model

- Model odpovídá nejhorší návrhové situaci, kdy se pod dílcem uloženým vespod propadne štěrkopískové lože, které dílec po délce podpírá, v této situaci dílec drží pouze na krajích díky betonovým sloupkům a jejich založení.
- Veškeré výpočty a modely, byly vytvořeny v programu SCIA Engineer 21 [23].

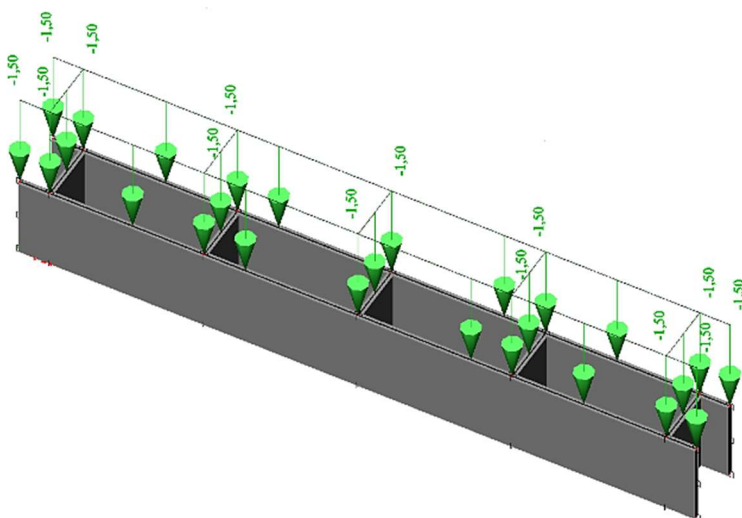


Obrázek 33 – Model základního dílce [23]

Zatížení dílce

Ostatní stálé zatížení

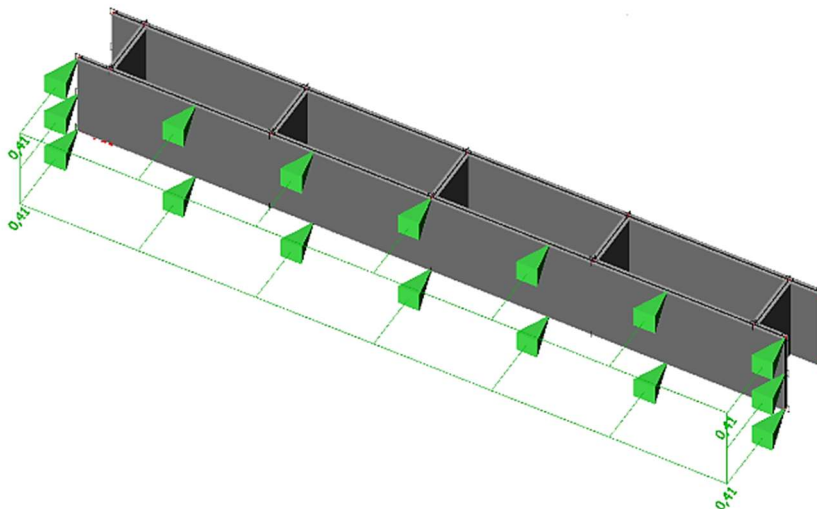
- Toto zatížení odpovídá 11 řadám dílců uloženým nad dílcem spodním (zatěžovaným), uvažovaná celková výška tedy 2,5 m.



Obrázek 34 – Ostatní stálé zatížení aplikované na základní dílec [23]

Proměnné zatížení - vítr

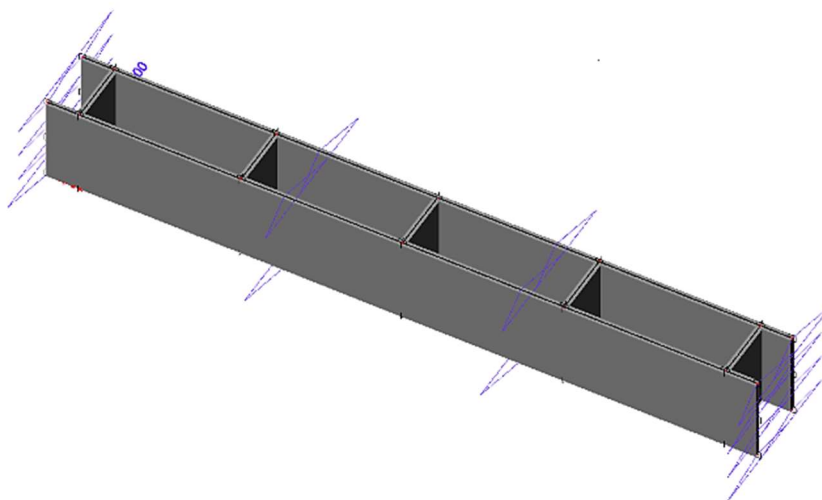
- Viz. výpočet zatížení větrem



Obrázek 35 – Zatížení větrem aplikované na základní dílec [23]

Proměnné zatížení - teplota

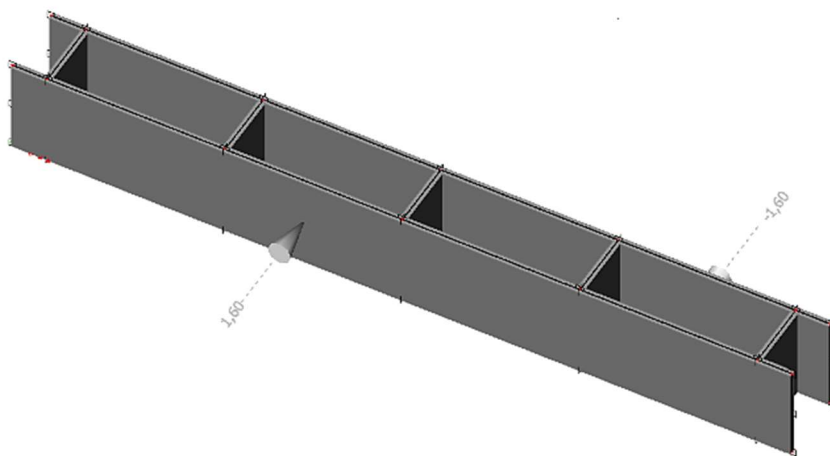
- Rozdíl povrchových teplot, uvažováno 30 K



Obrázek 36 – Zatížení teplotou aplikované na základní dílec [23]

Proměnné zatížení – dopad fotbalového míče

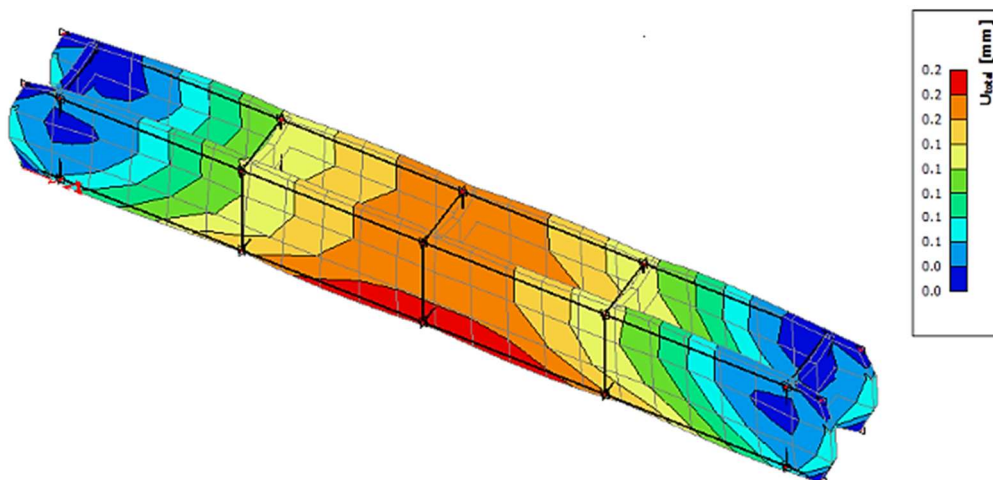
- Zjednodušeno pouze na statickou sílu, dynamický účinek se zanedbává. Hodnoty zatížení viz. výpočet síly vyvozené dopadem míče. Uvažováno zatížení při dopadu míče z obou stran s rozstupem, rychlost míče je definována 36 m/s (cca 130 km/h), což je velmi vysoká rychlost, dle oficiálních statistik tuto rychlost překonal pouze jeden český fotbalista (134,83 km/h), druhý v pořadí zvládl míč vystřelit rychlostí 127,33 km/h.



Obrázek 37 – Zatížení dopadem fotbalového míče aplikované na základní dílec [23]

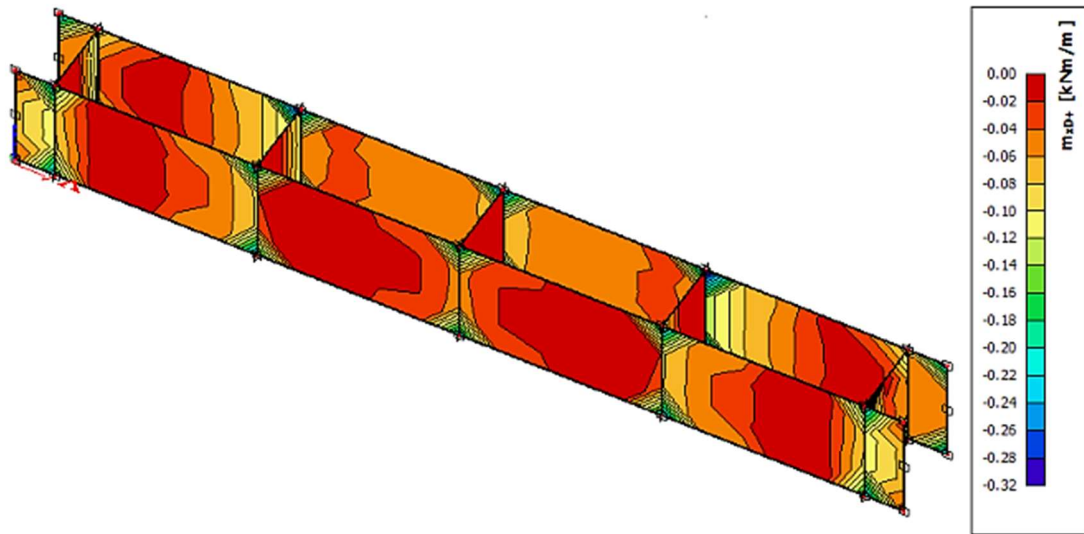
Výsledky

3D deformace



Obrázek 38 – 3D deformace základního dílce [23]

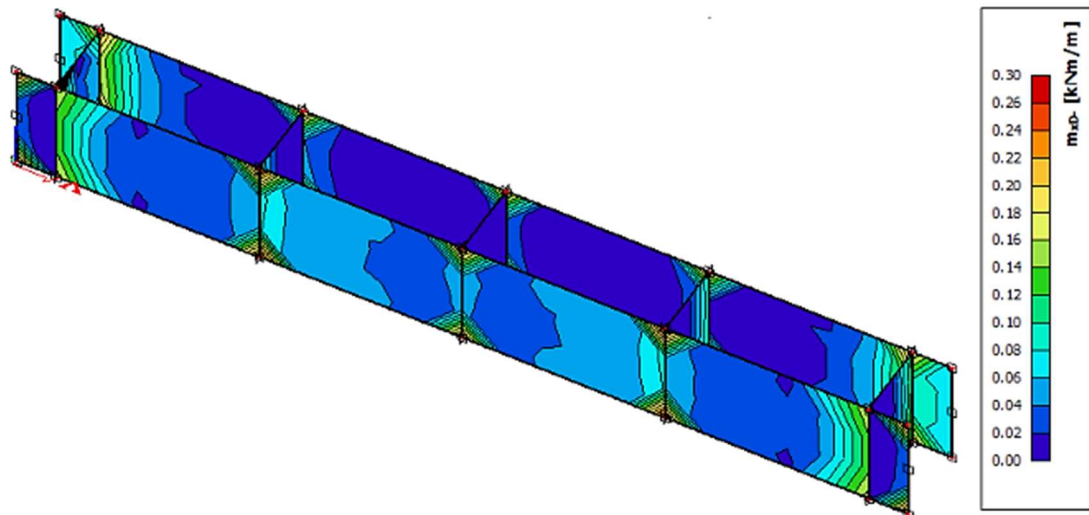
Návrhový moment m_{xD+}



Obrázek 39 – Výsledný návrhový moment m_{xD+} [23]

$$m_{xD,spodní} = -0,32 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

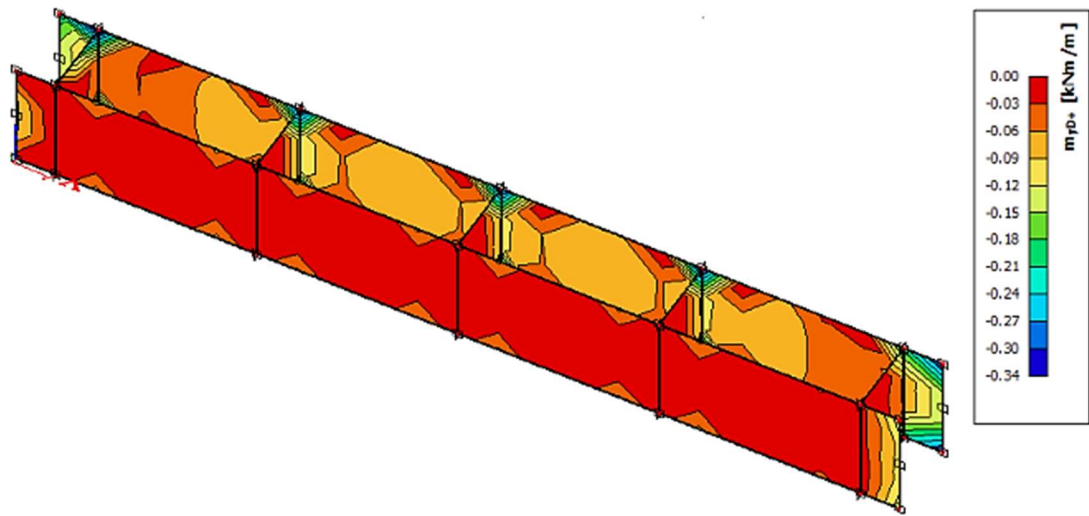
Návrhový moment m_{xD-}



Obrázek 40 – Výsledný návrhový moment m_{xD-} [23]

$$m_{xD,horní} = 0,30 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

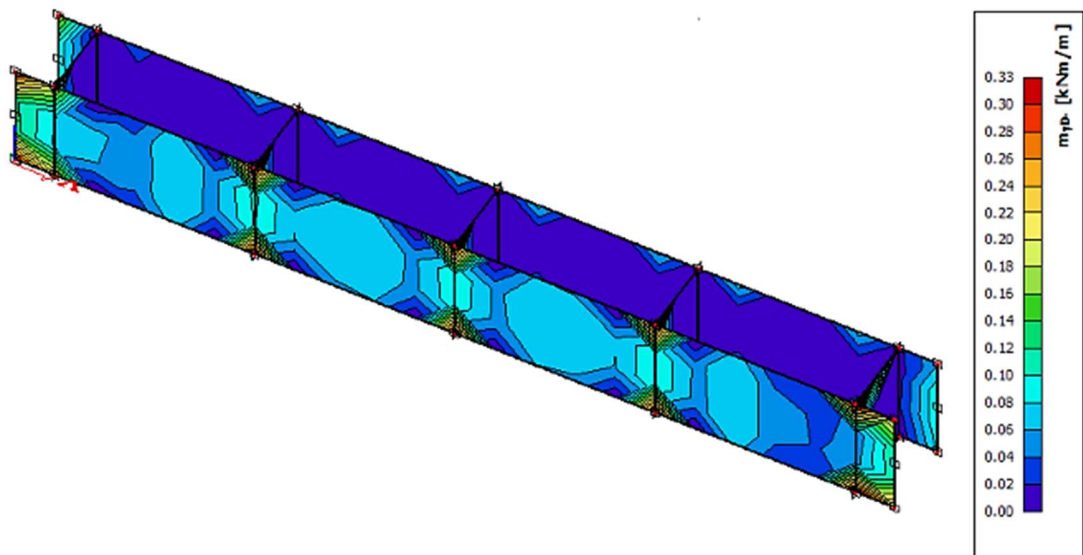
Návrhový moment m_{yD+}



Obrázek 41 – Výsledný návrhový moment m_{yD+} [23]

$$m_{yD,spodní} = -0,34 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

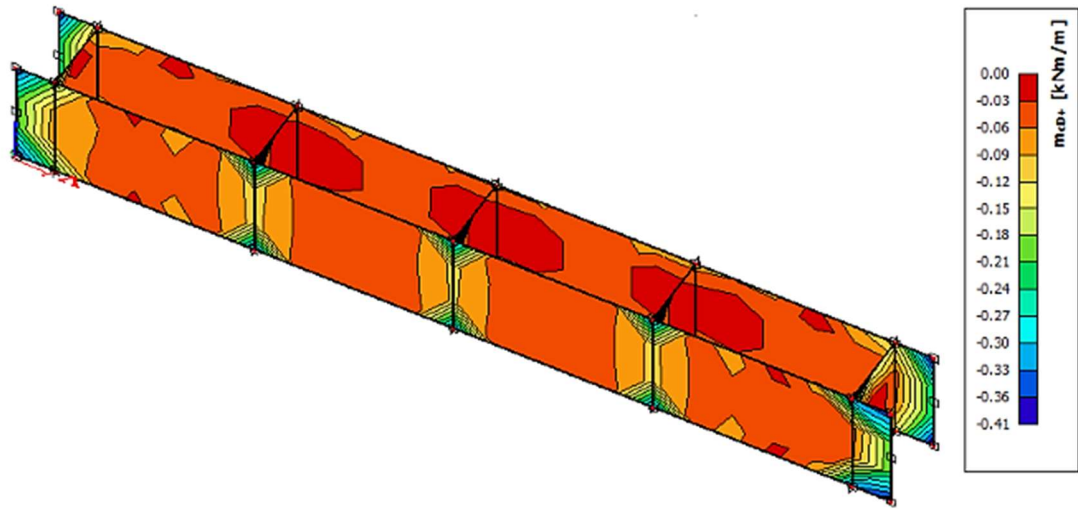
Návrhový moment m_{yD-}



Obrázek 42 – Výsledný návrhový moment m_{yD-} [23]

$$m_{yD,horní} = 0,33 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

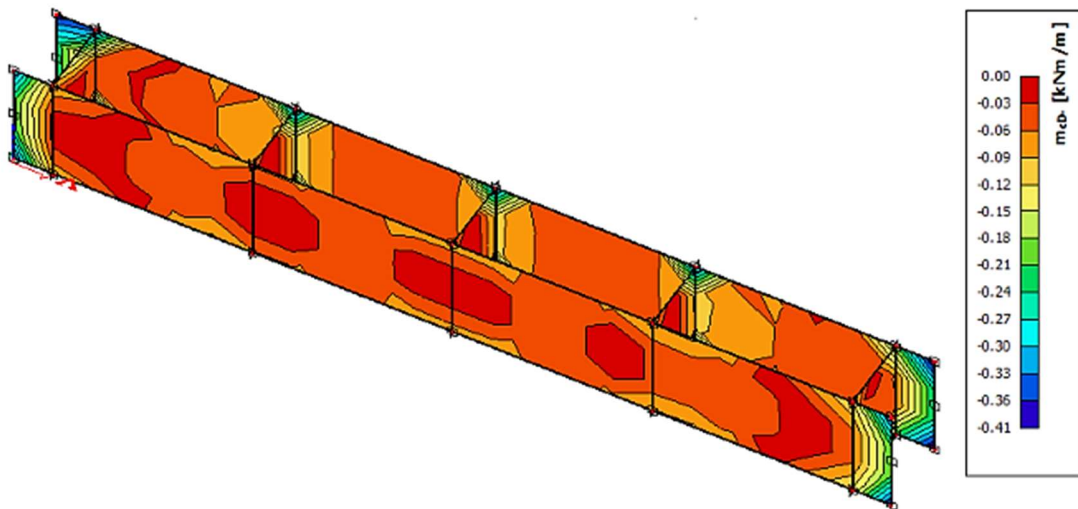
Návrhový moment m_{cD+}



Obrázek 43 – Výsledný návrhový moment m_{cD+} [23]

$$m_{cD,spodní} = -0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Návrhový moment m_{cD-}



Obrázek 44 – Výsledný návrhový moment m_{cD-} [23]

$$m_{cD,hor \ i} = -0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Posouzení

- Zvolená varianta ocelových mikrovláken: Master Fiber 482 80 kg/m³
- Trámečky 40x40x160 mm

$$f_{cf} = 20,59 \text{ MPa}$$

$$f_{c, \text{trámeček}} = 129,23 \text{ MPa}$$

$$f_{c, \text{krychle}} = 132,56 \text{ MPa}$$

$$F_{Rk, cr} = 5,4 \text{ kN}$$

$$L = 100 \text{ mm}$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$h = 40 \text{ mm}$$

Posudek pro návrhovou únosnost do vzniku první makrotrhlíky

$$f_{fc, tk} = \frac{F_{Rk, cr} \cdot L}{b \cdot h^2} = \frac{5400 \cdot 100}{40 \cdot 40^2} = \mathbf{8,438 \text{ MPa}}$$

$$f_{fc, td} = \frac{f_{fc, tk}}{\gamma_c} = \frac{8,438}{1,5} = \mathbf{5,625 \text{ MPa}}$$

$$b_m = 1000 \text{ mm}$$

$$h_{\text{tloušťka}} = ?$$

$$m_{Rd, cr} = f_{fc, td} \cdot \frac{1}{6} \cdot b_m \cdot h_{\text{tloušťka}}^2 \geq m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$5,625 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot h_{\text{tloušťka}}^2 \geq 0,41$$

$$h_{\text{tloušťka}} \geq 20,91 \text{ mm}$$

$$h_{\text{tloušťka}} = \mathbf{22 \text{ mm}}$$

$$m_{Rd, cr} = 5,625 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot 22^2 = 0,454 \text{ kN} \cdot \text{m} > m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

OK

- Potřebná tloušťka stěn vychází 22 mm

Posudek pro návrhovou únosnost v tahu

$$f_{cf} = 20,59 \text{ MPa}$$

$$f_{cf,d} = \frac{f_{cf}}{\gamma_c} = \frac{20,59}{1,5} = \mathbf{13,727 \text{ MPa}}$$

$$b_m = 1000 \text{ mm}$$

$$h_{\text{tloušťka}} = ?$$

$$m_{Rd} = f_{f_{cf,d}} \cdot \frac{1}{6} \cdot b_m \cdot h_{\text{tloušťka}}^2 \geq m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$13,727 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot h_{\text{tloušťka}}^2 \geq 0,41$$

$$h_{\text{tloušťka}} \geq 13,39 \text{ mm}$$

$$h_{\text{tloušťka}} = \mathbf{14 \text{ mm}}$$

$$m_{Rd,cr} = 13,727 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot 14^2 = 0,448 \text{ kN} \cdot \text{m} > m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \mathbf{OK}$$

- Potřebná tloušťka stěn vychází 14 mm

Komentář k výsledkům

- Z výsledků prvotního návrhu je jednoznačně patrné, že je možné takto výše definovaný základní dílec realizovat a to při tloušťce stěn okolo 20 mm.

3.3 Zhodnocení – prvotní návrh

Z prvotního návrhu je zřejmé, že je možné takto vymyšlený dílec z HPC s výztuží z ocelových mikrovláken realizovat. Nutností však zůstává výběr konkrétního materiálu na základě mechanických zkoušek a také návrh vhodného stavebního řešení systémového oplocení z vysokohodnotného vláknobetonu. Těmto problémům se budou věnovat následující kapitoly, jako první se zaměříme na výběr toho nejvhodnějšího materiálu, tuto volbu budeme provádět na základě zkoušky pevnosti v tlaku, zkoušky pevnosti v tahu za ohybu, zkoušky statického modulu pružnosti a zkoušky dynamického modulu pružnosti. Základním vstupem ve volbě materiálu budou receptury pro vysokohodnotný beton dodané vedoucím práce a kolegy z FSv ČVUT a UCEEB ČVUT.

4. Experimenty

4.1 Zkoušený materiál

Z prvotního návrhu je patrné, že HPC s ocelovými mikrovlákný a navržená geometrie plotového dílce je proveditelná. Nyní přistoupíme k výběru konkrétnímu materiálu.

Jelikož je nutné dbát také na ekonomické aspekty, musí se dojít ke kompromisu materiálových vlastností a jeho ceny. V tomto případě je to podstatný faktor, protože plot se zpravidla řeší až jako jedna z posledních věcí a nezbyvá na něj příliš financí.

Návrh konkrétní receptury je vcelku náročný proces, který z důvodu mnoha zkoušek a testování trvá dlouho dobu. Tato práce tedy bude pracovat s recepturami získanými od kolegů z FSv ČVUT a UCEEB ČVUT. Byly poskytnuty dvě vhodné receptury HPC, které navíc budou ve dvou variantách, s rozptýlenou výztuží a bez rozptýlené výztuže pro možnost přímého porovnání vlivu ocelových mikrovláken.

RECEPTURA č.1 – HPC I

Surovina	ρ	m	V
	[kg×m ³]	[kg]	[m ³]
Cement CEM I 42,5R	3000	760	0,253
Technický písek	2650	1075	0,405
Křemičitý úlet	2200	85	0,039
Křemenná moučka	2650	250	0,094
Superplastifikátor	1084	21	0,019
Voda (12°C)	1000	188	0,188
CELKEM		2379	0,999

Tabulka 3 – složení HPC I

RECEPTURA č.2 – HPC I + ocelová mikrovlákna

Surovina	ρ	m	V
	[kg×m ³]	[kg]	[m ³]
Cement CEM I 42,5R	3000	760	0,253
Technický písek	2650	1075	0,405
Křemičitý úlet	2200	85	0,039
Křemenná moučka	2650	250	0,094
Superplastifikátor	1084	21	0,019
Voda (12°C)	1000	188	0,188
Ocelová mikrovlákna	7850	80	0,010
CELKEM		2379	1,009

Tabulka 4 – složení HPC I + ocelová mikrovlákna

RECEPTURA č.3 – HPC II

Surovina	ρ	m	V
	[kg×m ³]	[kg]	[m ³]
Cement CEM I 42,5R	3000	650	0,217
Technický písek	2650	1200	0,453
Křemičitý úlet	2200	75	0,034
Křemenná moučka	2650	265	0,100
Superplastifikátor	1084	18	0,017
Voda (12°C)	1000	180	0,180
CELKEM		2388	1,000

Tabulka 5 – složení HPC II

RECEPTURA č.4 – HPC II + ocelový mikrovlákna

Surovina	ρ	m	V
	[kg×m ³]	[kg]	[m ³]
Cement CEM I 42,5R	3000	650	0,217
Technický písek	2650	1200	0,453
Křemičitý úlet	2200	75	0,034
Křemenná moučka	2650	265	0,100
Superplastifikátor	1084	18	0,017
Voda (12°C)	1000	180	0,180
Ocelová mikrovlákna	7850	80	0,010
CELKEM		2388	1,010

Tabulka 6 – složení HPC II + ocelová mikrovlákna

Všechny receptury jsou vytvořeny ze stejných složek, liší se pouze jejich vzájemný poměr. Jednotlivé složky jsou rozebrány na následujících řádcích.

Cement CEM I 42,5 R

- slouží jako pojivo
- portlandský cement
- rychlý nárůst pevnosti a vysoká počáteční pevnost
- rychlý vývin hydratačního tepla



Obrázek 45 – Cement CEM I 42,R

Technický písek

- plnivo
- křemenný písek s extrémně vysokým obsahem SiO_2
- maximální zrnitost 1,25 mm



Obrázek 46 – Technický písek

Křemičitý úlet Masterlife MS 140 U

- neboli mikrosilika
- jedná se o příměs, která zvyšuje pevnost betonu
- mimořádně velký měrný povrch



Obrázek 47 – Křemičitý úlet Masterlife MS 140 U

Křemenná moučka

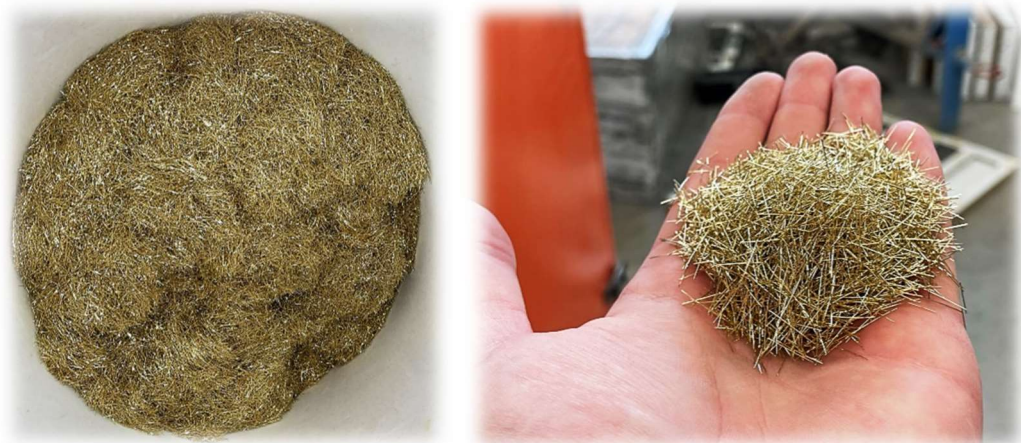
- příměs
- zlepšuje zpracovatelnost
- zvyšuje pevnost



Obrázek 48 – Křemenná moučka

Ocelová mikrovlná MasterFiber 482

- rozptýlená výztuž
- přenos tahových napětí i po vzniku trhliny
- pro směsi v této práci se používá dávkování 80 kg/m³



Obrázek 49 – Ocelová mikrovlná MasterFiber 482

Superplastifikátor MasterGlenium ACE 300

- přísada
- zajišťuje výbornou zpracovatelnost
- možnost použití nižšího vodního součinitele
- samozhutnitelnost



Obrázek 50 – Superplastifikátor MasterGlenium ACE 300

Voda

- záměsová voda
- pitná voda o teplotě 12 °C



Obrázek 51 – Voda

4.2 Návrh experimentů

Pro výběr vhodné směsi je nutné provést řadu zkoušek, díky jejímž výsledkům budeme výběr realizovat. Je nutné zjistit materiálové charakteristiky, které se následně použijí při statickém návrhu. Budou provedeny destruktivní, ale i nedestruktivní zkoušky, veškerá specifikace zkoušek, bude na dalších řádcích. Zkoušky se týkaly pouze ztvrdlého betonu, zkoušky čerstvého betonu nejsou pro účely této práce potřebné.

Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [24]

- destruktivní zkouška
- krychle 100x100x100 mm
- krychle 150x150x150 mm

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 12390-5 [25]

- destruktivní zkouška
- zkouška pevnosti v tahu za ohybu – tříbodové uspořádání
 - trámečky 40x40x160 mm
- zkouška pevnosti v tahu za ohybu – čtyřbodové uspořádání
 - destičky 20x100x400 mm

Zkouška statického modulu pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [26]

- nedestruktivní zkouška
- trámce 100x100x400 mm

Zkouška dynamického modulu pružnosti dle ČSN 73 1371 [27]

- nedestruktivní zkouška pomocí ultrazvuku
- trámce 100x100x400 mm

Díky těmto zkouškám zjistíme základní pevnostní charakteristiky materiálu, na jejichž základě bude vytvořen statický návrh.

4.3 Příprava směsi

Všechna zkoušená tělesa budou vyrobena shodným způsobem, popsaným níže, lišit se bude pouze receptura jednotlivých směsí. Při přípravě směsi je nutné dodržovat základní bezpečnostní pokyny, každá laboratoř má své vlastní, celá experimentální část práce byla realizována v laboratoři kompozitních materiálů v UCEEB ČVUT, kde bylo nutné mít při práci základní ochranné pracovní pomůcky (brýle, oblečení, pevná obuv, rukavice). K ochraně zdraví při práci se velmi hodí několik průmyslových odsavačů, které jsou v laboratoři umístěny, ty jsem využil zejména při manipulaci s cementem a mikrosilikou, využil jsem je i při míchání směsi, kdy při míchání dochází k víření cementu a mikrosiliky.

K přípravě směsi je potřeba:

- míchačku s nuceným oběhem
- stavební vědra (kbelíky)
- stavební vana (kalfas)
- přesnou váhu
- odměrný válec
- kádinku
- vibrační stůl
- formy na zkoušená tělesa
- zednické lžíce
- zednické naběračky (fanky)
- lopatka
- odbedňovací přípravek (olej)
- štětec
- stopky
- suroviny dle receptury (cement CEM I 42,5 R, technický písek, křemičitý úlet Masterlife MS 140 U, křemenná moučka, ocelová

mikrovlákna MasterFiber 482, superplastifikátor MasterGlenium ACE 300, voda)

Postup betonáže:

- rozbálíme pytle s jednotlivými surovinami
- na přesnou váhu umístíme stavební vědro a vynulujeme váhu
- do vědra vysypeme váženou surovinu (pomáháme si zednickou naběračkou) a to tak, abychom dosáhli požadované hmotnosti předepsané recepturou
- takto zvážíme všechny suroviny (na malou část předepsaného množství vody použijeme odměrný válec a na superplastifikátor použijeme kádinku)
- na vibrační stůl umístíme čisté formy zkušebních těles
- do forem aplikujeme odbedňovací přípravek a pomocí štětce rozetřeme
- do čisté míchačky s nuceným oběhem vysypeme stavební vědra s přesně naváženým množstvím technického a křemičitého úletu, na míchačku vložíme ochranný kryt a při zapnutém odsávání necháme po stanovenou dobu míchat.
- následně vysypeme do míchačky další stavební vědra s přesně naváženým množstvím cementu a křemenné moučky, opět mícháme po stanovenou dobu.
- následně vylejeme do míchačky vodu ze stavebního vědra a superplastifikátor
- po stanovené době vsypeme ocelová mikrovlákna
- po přípravě směsi ji aplikujeme do připravených forem
- poté co jsou jednotlivé formy zdánlivě plné můžeme zapnout vibrační stůl a tím směs ve formách jemně zhutnit, po kontrole plnosti forem a případném doplnění směsi zapneme vibrační stůl znovu a necháme směs řádně zhutnit

- po uplynutí zhruba 10 vteřin vibrační stůl vypneme a provedeme finální kontrolu forem vylitých čerstvou betonovou směsí, kdy horní povrch směsi by měl být zarovnan s horním povrchem formy
- tímto je betonáž zkušebních vzorků hotová, formy se směsí můžeme přikrýt a z důvodu následné identifikace umístíme na papíru napsané informace o betonáži (jméno směsi a datum betonáže), vzorky se poté umístí do klimatizovaného skladu vzorků, kde je udržována stálá teplota a stálá vlhkost vzduchu



Obrázek 52 – Příprava forem



Obrázek 53 – Aplikace odbedňovacího oleje do forem



Obrázek 54 – Míchačka s nuceným oběhem spolu s průmyslovým odtahem prachu



Obrázek 55 – Suroviny vysypané do míchačky



Obrázek 56 – Ocelová mikrovlná přidané na samém závěru míchání



Obrázek 57 – Vypouštění hotové betonové směsi



Obrázek 58 – Vybetonované formy zkušebních těles

Při této první betonáži byly vyhotoveny sady zkušebních těles, pro každou směs (HPC I, HPC I + ocelová mikrovlákna, HPC II a HPC II + ocelová mikrovlákna) bylo vyhotoveno stejné množství a typy zkušebních těles, a to: 6 kusů trámečků 40x40x160 mm, 3 kusy krychlí 100x100x100 mm, 3 kusy krychlí 150x150x150 mm, 3 kusy trámčů 100x100x400 mm. Tato zkušební tělesa byla po odbednění vložena do vodní lázně, přičemž zkoušky zkušebních těles byly naplánovány po 28 dnech od betonáže.



Obrázek 59 – Krychle 100x100x100 mm a krychle 150x150x150 mm po 28 dnech



Obrázek 60 – Trámce 100x100x400 mm po 28 dnech



Obrázek 61 – Trámečky 40x40x160 mm po 28 dnech

Tato zkušební tělesa budou podrobena následujícím zkouškám:

- Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [24]
- Zkouška pevnosti v tahu za ohybu tříbodové uspořádání zkoušky dle ČSN EN 12390-5 [25]
- Zkouška statického modulu pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [26]
- Zkouška dynamického modulu pružnosti dle ČSN 73 1371 [27]

4.4 Experimenty

4.4.1 Zkouška pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [24]

Zmíněná norma ČSN EN 12390-3 [24] se zaměřuje na zkoušku pevnosti betonu v tlaku, což je klíčový parametr při hodnocení jeho mechanických vlastností. Tato zkouška slouží k stanovení maximální tlakové pevnosti betonu, což je potřebný parametr pro návrh konstrukcí z betonu.

Postup zkoušky začíná odběrem vzorků betonu ve formě válců nebo krychlí, v našem případě se jedná o krychle o rozměrech 100x100x100 mm a 150x150x150 mm (viz. obrázek 59), které jsou po určité době podrobeny tlakovému zatížení v laboratoři, námi zkoušené vzorky byly staré 28 dní.

„Zkušební těleso musí být krychle, válec nebo vývrt, vyhovující požadavkům EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 nebo EN 12504-1.“ [24]

Před samotnou zkouškou je důležité, aby vzorky byly správně připraveny, musí být podrobně změřeny jejich rozměry a nesmí se zapomenout na jejich přesné zvážení.

„Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu, který vyhovuje EN 12390-4. Maximální zatížení při rozdrčení tělesa se zaznamená a vypočítá se pevnost betonu v tlaku.“ [24]

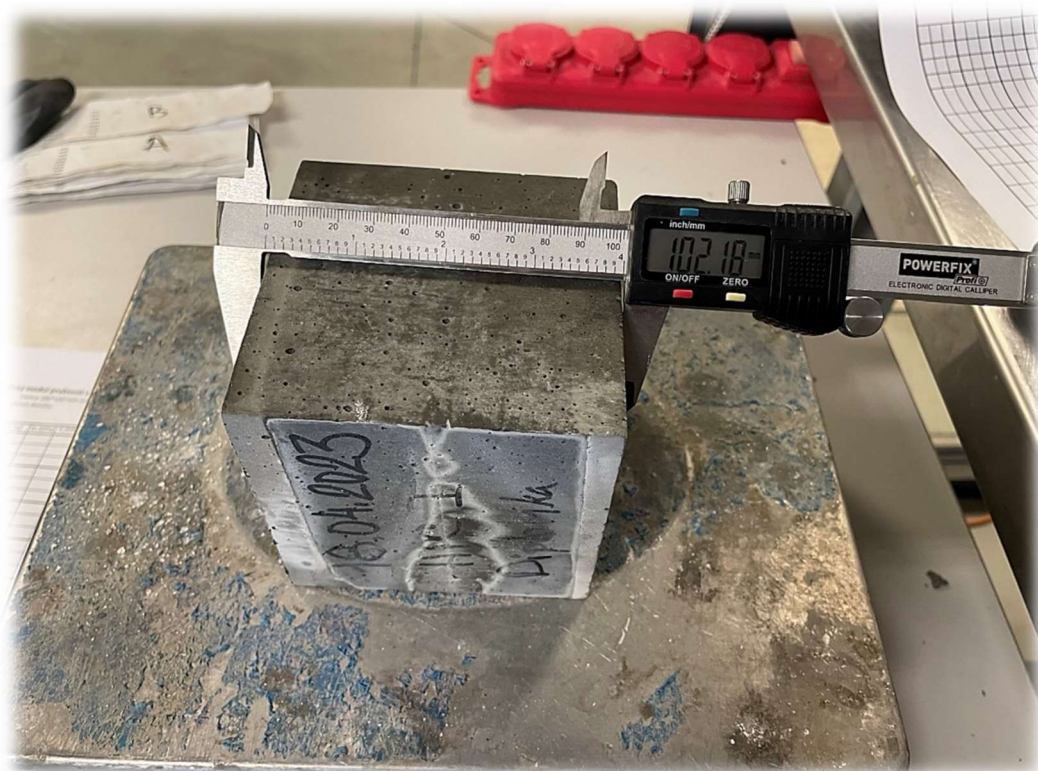
Zkušební postup je přesně stanoven normou ČSN EN 12390-3 [24] a musí být bezpodmínečně dodržen. Norma ČSN EN 12390-3 [24] definuje přípravu a usazení zkušebních těles, zatěžování, posouzení způsobu porušení a vyjádření výsledků. Výsledky jsou vyjádřeny pevností v tlaku v MPa, ty se vypočtou pomocí vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

f_c pevnost v tlaku [MPa]

F maximální zatížení při porušení [N]

A_c průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]



Obrázek 62 – Měření rozměrů krychle 100x100x100 mm posuvným měřítkem



Obrázek 63 – Vážení krychle 100x100x100 mm přesnou váhou



Obrázek 64 – Umístění krychle 150x150x150 mm do lisu



Obrázek 65 – Porušení krychle 150x150x150 mm

Tímto způsobem byla vyzkoušena všechna zkušební tělesa určená pro zkoušku pevnosti v tlaku, celkem 12 kusů krychlí 100x100x100 mm a 12 kusů krychlí 150x150x150 mm. Výsledky těchto zkoušek jsou shrnuty v tabulkách 7 a 8.

SMĚS	ČÍSLO VZ.	d	m	F _c	f _c	f _{c,av}
		[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[MPa]
HPC I	1	101,30	2,3766	1084,7	107,08	108,89
	2	100,83	2,3614	1027,5	101,91	
	3	102,02	2,3834	1200,7	117,69	
HPC II	1	101,48	2,3826	949,0	93,52	107,40
	2	101,05	2,3764	1113,8	110,22	
	3	100,99	2,3632	1196,3	118,46	
HPC I + drátky	1	100,90	2,4106	1203,9	119,31	125,82
	2	100,79	2,4008	1242,9	123,32	
	3	100,35	2,4048	1353,0	134,83	
HPC II + drátky	1	100,44	2,4210	1212,9	120,76	122,11
	2	100,54	2,4168	1278,4	127,15	
	3	100,55	2,4060	1190,8	118,42	

Tabulka 7 – Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku pro krychle 100x100x100 mm

SMĚS	ČÍSLO VZ.	d	m	F _c	f _c	f _{c,av}
		[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[MPa]
HPC I	1	150,90	7,9654	2515,1	111,12	119,62
	2	149,77	7,9412	2757,9	122,76	
	3	151,13	7,9482	2833,0	124,97	
HPC II	1	150,67	8,0048	2756,0	121,94	126,47
	2	150,50	8,0560	2854,8	126,46	
	3	150,90	8,0284	2965,6	131,02	
HPC I + drátky	1	151,62	8,0144	2994,1	131,65	127,32
	2	151,70	8,1152	2804,1	123,23	
	3	149,79	7,9822	2855,3	127,08	
HPC II + drátky	1	151,29	8,0874	2813,2	123,96	125,11
	2	151,53	8,1284	2745,8	120,81	
	3	148,83	8,1054	2914,6	130,56	

Tabulka 8 – Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku pro krychle 150x150x150 mm

S výslednými hodnotami stanovenými ze zkoušky pevnosti v tlaku nemůžeme ve statickém výpočtu počítat, je nutné vypočítat charakteristickou hodnotu pevnosti v tlaku (což je hodnota 5 % dolního kvantilu z výsledných hodnot získaných zkouškami). K tomuto výpočtu byl využit program Microsoft Excel, kde bylo nejprve nutné spočítat směrodatnou odchylku (v Excelu funkce STDEPVA), poté střední hodnotu (v Excelu funkce AVERAGEA) a z těchto hodnot dopočítat 5% dolní kvantil (v Excelu funkce NORM.INV), který je roven charakteristické hodnotě pevnosti v tlaku.

HPC I	HPC I + d	HPC II	HPC II + d	
6,568523	6,577999	10,37514	3,689634	směrodatná odchylka
108,8933	125,82	107,4	122,11	střední hodnota v MPa
98,08908	115,0002	90,33442	116,0411	5 % kvantil v MPa
98,08908	115,0002	90,33442	116,0411	$f_{c,k}$ charakteristická pevnost v tlaku krychle 100x100x100mm v MPa

Tabulka 9 – Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tlaku stanovených zkouškou v tlaku na charakteristickou pevnost v tlaku pro krychle 100x100x100 mm

HPC I	HPC I + d	HPC II	HPC II + d	
6,075417	3,441637	3,706906	4,062635	směrodatná odchylka
119,6167	127,32	126,4733	125,11	střední hodnota v MPa
109,6235	121,659	120,376	118,4276	5 % kvantil v MPa
109,6235	121,659	120,376	118,4276	$f_{c,k}$ charakteristická pevnost v tlaku krychle 150x150x150mm v MPa

Tabulka 10 – Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tlaku stanovených zkouškou v tlaku na charakteristickou pevnost v tlaku pro krychle 150x150x150 mm

Pro upřesnění v tabulkách uvedené názvy směsí HPC I + d nebo HPC I + drátky značí směs HPC I + ocelová mikrovlákna, to samé platí pro směs HPC II + ocelová mikrovlákna.

Z tabulek 9 a 10 vyplívají charakteristické pevnosti v tlaku pro směs:

- HPC I – $f_{c,k} = 98,089$ MPa pro krychle 100x100x100 mm
- HPC I – $f_{c,k} = 109,624$ MPa pro krychle 150x150x150 mm

- HPC I + drátky – $f_{c,k} = 115,000$ MPa pro krychle 100x100x100 mm
- HPC I + drátky – $f_{c,k} = 121,659$ MPa pro krychle 150x150x150 mm

- HPC II – $f_{c,k} = 90,334$ MPa pro krychle 100x100x100 mm
- HPC II – $f_{c,k} = 120,376$ MPa pro krychle 150x150x150 mm

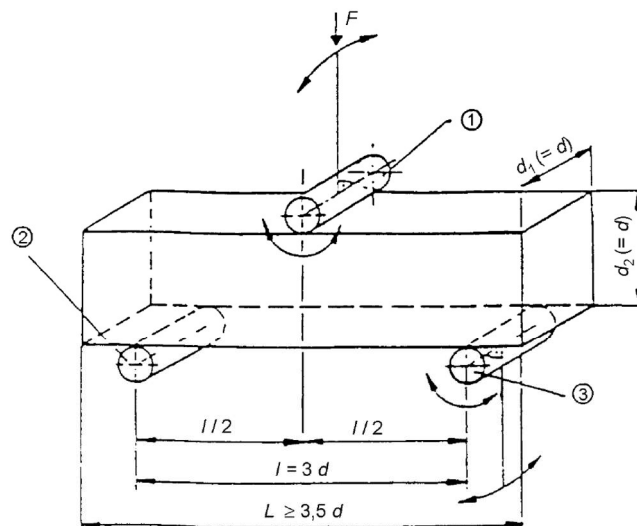
- HPC II + drátky – $f_{c,k} = 116,041$ MPa pro krychle 100x100x100 mm
- HPC II + drátky – $f_{c,k} = 118,428$ MPa pro krychle 150x150x150 mm

Z výsledných hodnot charakteristických pevností v tlaku je zřejmé, že nejlepších výsledků dosahuje směs HPC I + ocelová mikrovlákna.

4.4.2 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu tříbodové uspořádání zkoušky dle ČSN EN 12390-5 [25]

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu se tříbodovým uspořádáním, respektive zkouška pevnosti v tahu za ohybu se zatěžováním jedním břemenem uprostřed, je systematický postup sloužící k posouzení mechanických vlastností materiálů, s důrazem na odolnost betonu vůči ohybovému zatížení. Tento proces, přesně specifikovaný v normě ČSN EN 12390-5 [25]. Postup zkoušky začíná odběrem vzorků betonu ve formě hranolů, v našem případě se jedná o trámečky s rozměry 40x40x160 mm (viz. obrázek 61), které jsou po určité době podrobeny zatížení v laboratoři, námi zkoušené vzorky byly staré 28 dní, stejně jako tomu bylo u tlakové zkoušky.

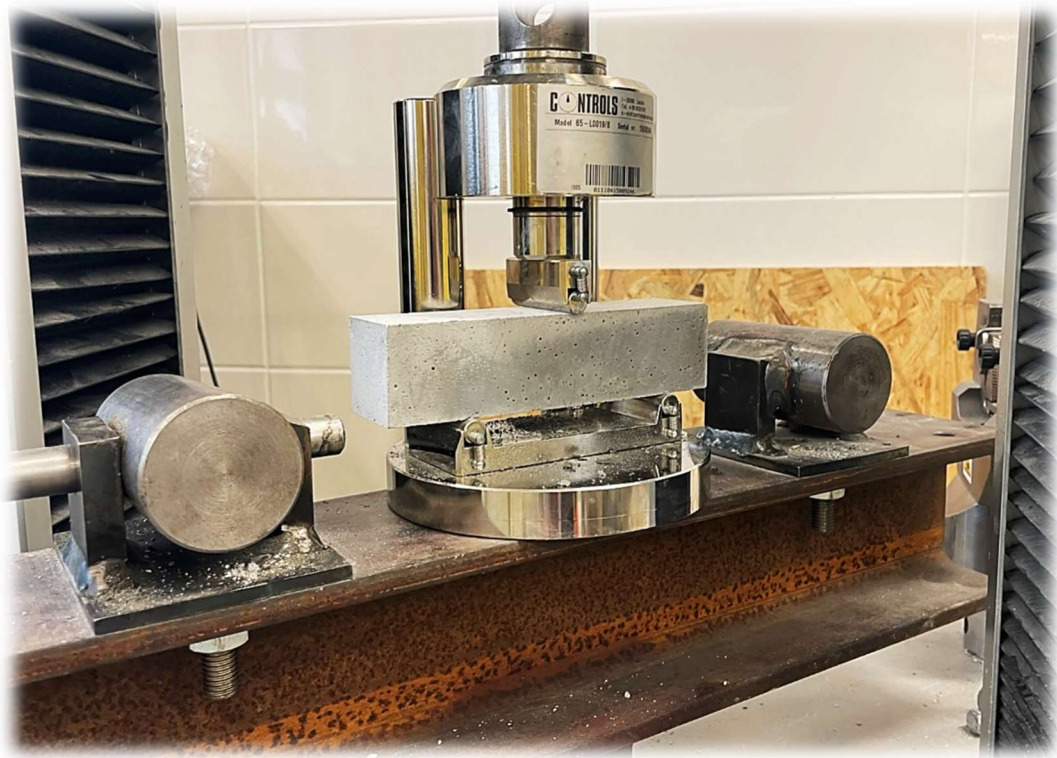
„Hranolová zkušební tělesa jsou vystavena ohybovému momentu od zatížení přenášeného prostřednictvím horních zatěžovacích a spodních podpěrných válečků. Největší dosažené zatížení se zaznamená a vypočte se pevnost v tahu ohybem.“ [25] V případě tříbodového uspořádání zkoušky je horní zatěžovací váleček pouze jeden, u čtyřbodového uspořádání jsou dva.



Legenda

- 1 zatěžovací váleček (otočný a výkyvný)
- 2 podpěrný váleček
- 3 podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

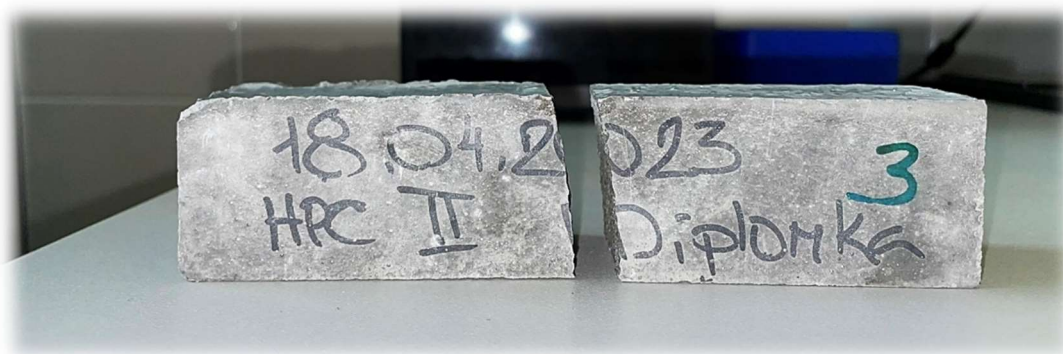
Obrázek 66 – Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu s tříbodovým uspořádáním [25]



Obrázek 67 – Zkoušený trámeček 40x40x160 mm před zatěžováním



Obrázek 68 – Zkoušený trámeček 40x40x160 mm při porušení (po zatěžování)



Obrázek 69 – Destrukce trámečku 40x40x160 mm

Veškeré podmínky a předpisy zkoušky jsou podrobně uvedeny v normě ČSN EN 12390-5 [25], dle těchto podmínek a předpisů byla vyzkoušena všechna zkušební tělesa pro tuto zkoušku vyrobená. Úlomky po provedení zkoušky byly dále podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku.

Výsledky zkoušky jsou vyjádřeny maximálním zatížením a jeho přepočtem na pevnost v tahu ohybem, dále je výstupem graf závislosti posunu (deformace) a zatížení. Pevnost v tahu ohybem je vyjádřena v MPa, a vypočtena pomocí vztahu:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (2)$$

$f_{ct,fl}$ pevnost v tahu ohybem [MPa]

F maximální zatížení [N]

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm] (100 mm)

d_1 rozměr příčného řezu [mm]

d_2 rozměr příčného řezu [mm]

V tabulce 11 jsou uvedeny výsledky, tato tabulka je zjednodušena, kompletní tabulka je umístěna v příloze této práce.

Směs	vzorek	m [kg]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	F [kN]	f _{ct,fl} [MPa]	f _{ct,fl,av} [MPa]
HPC I	1	0,5998	40,3	40,0	6,00	14,0	16,0
HPC I	2	0,5890	39,5	40,0	7,37	17,5	
HPC I	3	0,5936	39,6	40,0	6,58	15,6	
HPC I	4	0,6066	40,2	40,0	6,84	15,9	
HPC I	5	0,5942	40,0	40,0	6,92	16,2	
HPC I	6	0,6052	40,4	40,0	7,13	16,5	
HPC I dratky	1	0,6102	39,7	40,0	7,81	18,5	17,9
HPC I dratky	2	0,6184	40,0	40,0	7,64	17,9	
HPC I dratky	3	0,6156	40,1	40,0	7,38	17,3	
HPC I dratky	4	0,6204	40,4	40,0	7,72	17,9	
HPC I dratky	5	0,6102	40,1	40,0	7,99	18,7	
HPC I dratky	6	0,6034	39,6	40,0	7,14	16,9	
HPC II	1	0,5980	39,7	40,0	7,55	17,8	16,5
HPC II	2	0,6054	40,4	40,0	7,25	16,8	
HPC II	3	0,5900	39,3	40,0	6,64	15,8	
HPC II	4	0,6018	40,2	40,0	6,82	15,9	
HPC II	5	0,6022	40,2	40,0	7,54	17,6	
HPC II	6	0,6028	40,3	40,0	6,38	14,8	
HPC II dratky	1	0,6082	39,9	40,0	6,90	16,2	17,4
HPC II dratky	2	0,6126	40,0	40,0	8,08	18,9	
HPC II dratky	3	0,6234	40,4	40,0	8,05	18,7	
HPC II dratky	4	0,6184	39,8	40,0	6,84	16,1	
HPC II dratky	5	0,6110	39,9	40,0	7,30	17,1	
HPC II dratky	6	0,6106	39,9	40,0	7,43	17,5	

Tabulka 11 – Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu trámečků 40x40x160mm

S výslednými hodnotami stanovenými ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu nemůžeme ve statickém výpočtu počítat, je nutné vypočítat charakteristickou hodnotu pevnosti v tahu za ohybu (což je hodnota 5 % dolního kvantilu z výsledných hodnot získaných zkouškami). K tomuto výpočtu byl využit program Microsoft Excel, kde bylo nejprve nutné spočítat směrodatnou odchylku (v Excelu funkce STDEPVA), poté střední hodnotu (v Excelu funkce AVERAGEA) a z těchto hodnot dopočítat 5% dolní kvantil (v Excelu funkce NORM.INV), který je roven charakteristické hodnotě pevnosti v tahu za ohybu. Pro statický výpočet je důležitá i hodnota síly, při které dojde k porušení (charakteristická síla při porušení), ta je stanovena shodně jako charakteristická hodnota pevnosti v tahu za ohybu, ale počítá se sílou při porušení F namísto s vypočtenou pevností.

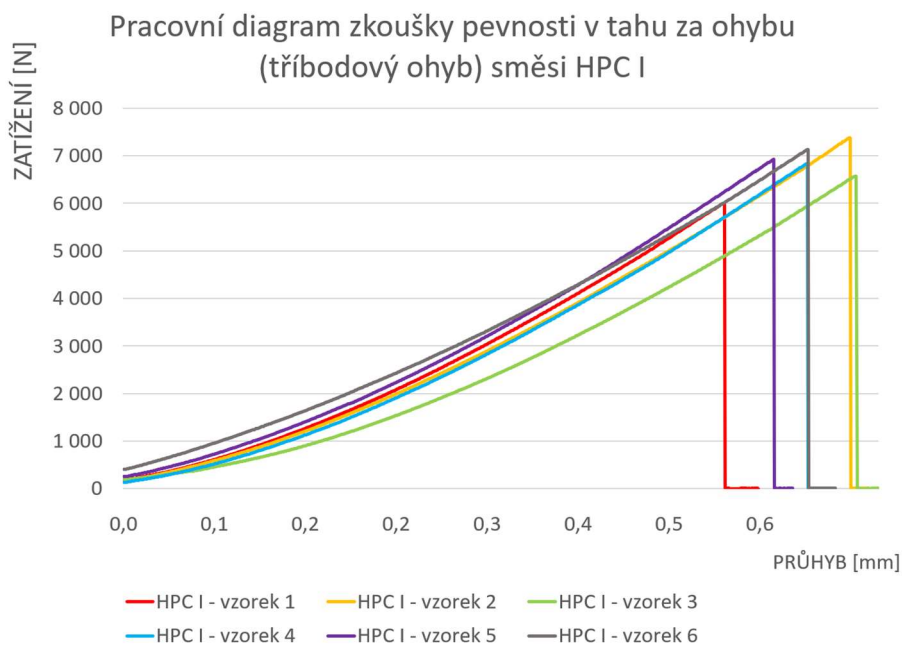
HPC I	HPC I + d	HPC II	HPC II + d	
1,0763	0,618738	1,048535	1,092885	směrodatná odchylka
15,95288	17,85783	16,4702	17,43176	střední hodnota
14,18252	16,8401	14,74552	15,63413	5% kvantil
14,18252	16,8401	14,74552	15,63413	$f_{cf,k}$ charakteristická pevnost v tahu v MPa

Tabulka 12 – Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tahu za ohybu stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou pevnost v tahu pro trámečky 40x40x160 mm

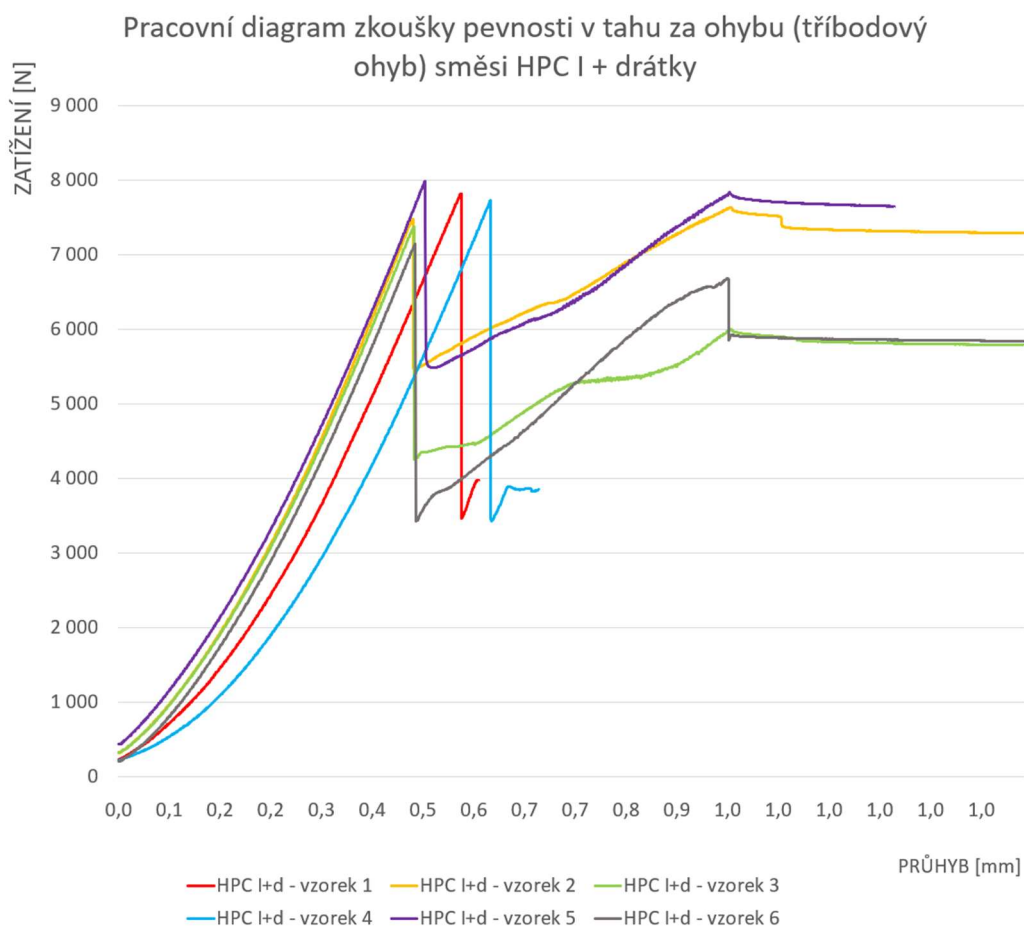
HPC I	HPC I + d	HPC II	HPC II + d	
0,436522	0,280765	0,44728	0,493761	směrodatná odchylka
6,8048	7,614417	7,02985	7,434567	střední hodnota
6,086785	7,152599	6,294139	6,622402	5% kvantil
6,086785	7,152599	6,294139	6,622402	$F_{rk,cr}$ charakteristická síla při porušení v kN

Tabulka 13 – Tabulka přepočtu hodnot síly při porušení stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou sílu při porušení pro trámečky 40x40x160 mm

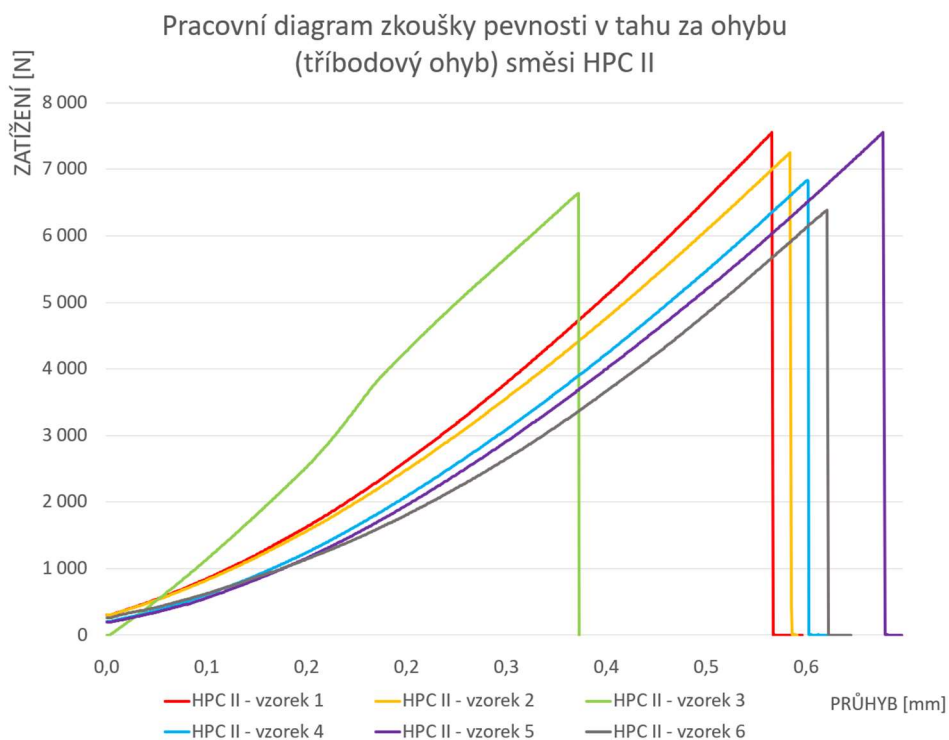
Pro statický výpočet je také důležitá hodnota síly vyvolující první trhlinu, ta se vyčte z grafu závislosti průhybu (deformace) a síly. V mnoha případech je tato síla shodná se silou, která způsobí porušení, zvláště pak u nevyztuženého betonu. Následující grafy jsou dalším výstupem zkoušky v tahu za ohybu na trámečcích 40x40x160 mm.



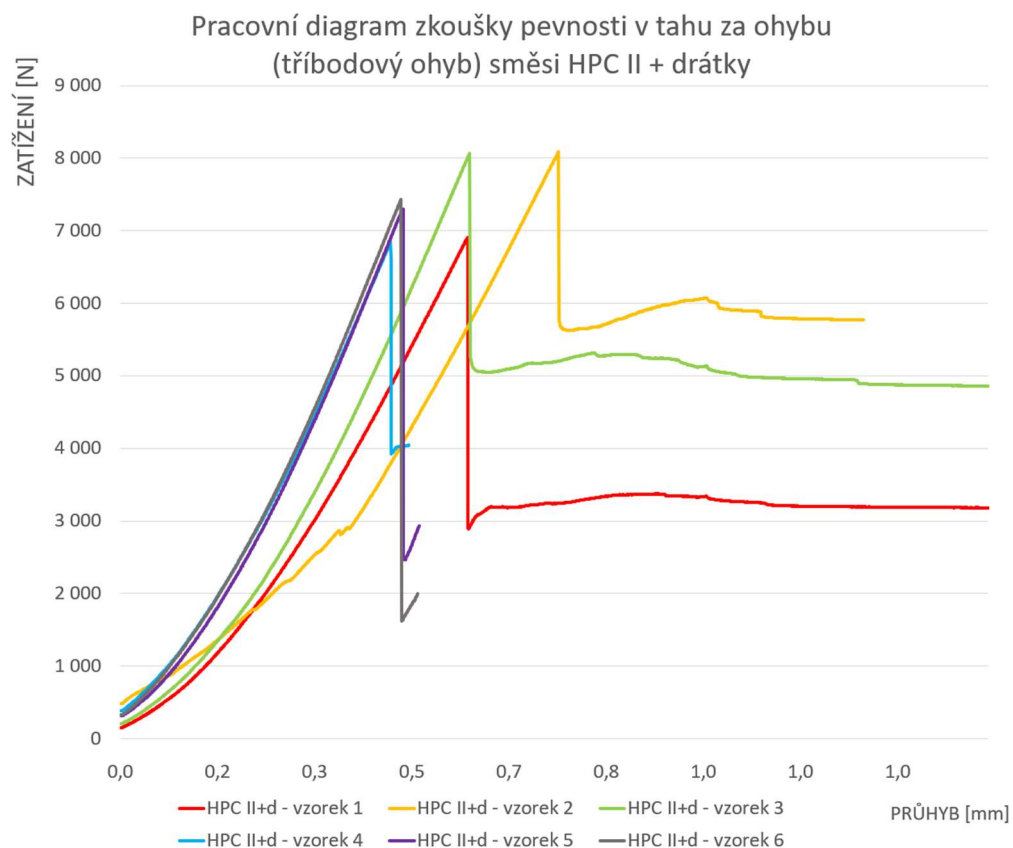
Obrázek 70 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC I, trámečky 40x40x160 mm



Obrázek 71 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC I + drátky trámečky 40x40x160 mm



Obrázek 72 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC II, trámečky 40x40x160 mm



Obrázek 73 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC II + drátky, trámečky 40x40x160 mm

Z grafů je patrné, že se trámečky vyrobené ze směsi neobsahující rozptýlenou výztuž v podobě ocelových mikrovláken poruší při vzniku první trhliny. Zatímco trámečky vyrobené ze směsi, která obsahuje ocelová mikrovláka, po vzniku první trhliny přenášejí zatížení dále, až do úplného porušení, které však není na grafech vidět z důvodu omezení velikosti maximálního průhybu na 1 mm, z důvodu úspory času. Zjednodušeně lze brát hodnotu síly při porušení jako téměř shodnou s hodnotou síly při vzniku první trhliny.

4.4.3 Zkouška statického modulu pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [26]

Zkouška statického modulu pružnosti je experimentální metoda používaná k měření tuhosti materiálu. Tato zkouška poskytuje informace o elastických vlastnostech materiálu, konkrétně o jeho schopnosti odolat deformacím pod působením zatížení.

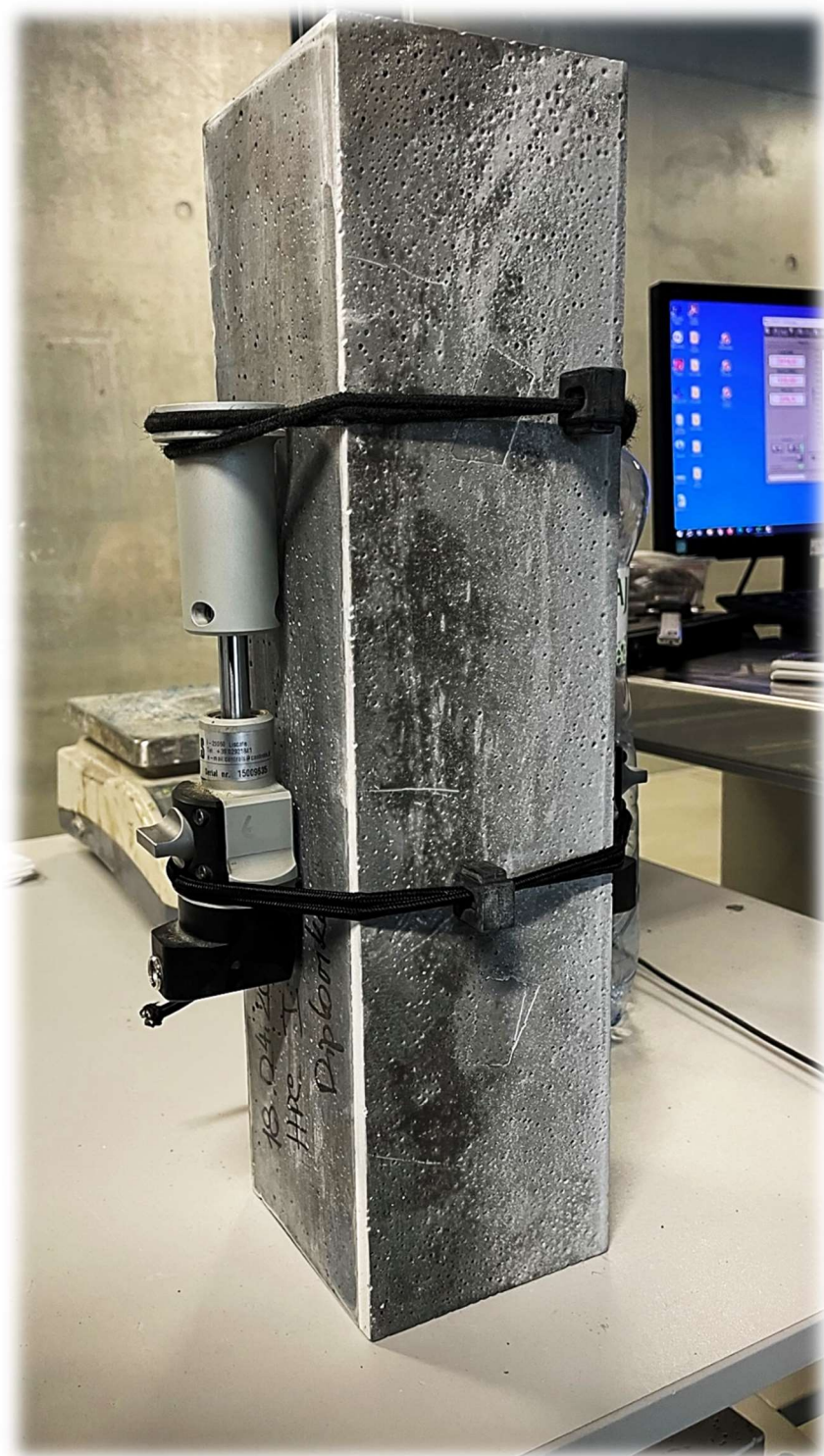
„Statický modul pružnosti v tlaku – vlastnost betonu, která odpovídá tečně křivky vztahu mezi napětím a přetvořením.“ [26]

„Zkušební těleso je vystaveno základnímu napětí 0,5 MPa a poté se napětí plynule zvyšuje až do hodnoty jedné třetiny pevnosti betonu v tlaku válce o poměru délky k průměru 2:1. Zaznamenají se poměrná přetvoření při odpovídajících napětích. Modul pružnosti se vypočítá jako podíl rozdílu základního napětí a horního zatěžovacího napětí a rozdílu odpovídajících poměrných přetvoření.“ [26]

Zkoušená tělesa jsou zpravidla válce o poměru délky k průměru rovné 2, lze však použít i jiná tělesa, která splňují podmínky popsané normou ČSN ISO 1920-10 [26]. V našem případě budou jako zkušební tělesa použity trámce 100x100x400 mm ve stáří 28 dní od betonáže.



Obrázek 74 – Vážení zkoušeného trámce 100x100x400 mm



Obrázek 75 – Osazené tenzometry měřící přetvoření



Obrázek 76 – Zkoušený trámec 100x100x400 mm s tenzometry umístěný v lisu

Všechna zkoušená tělesa byla důkladně změřena a zvážena. Zkouška se řídí předpisy a podmínkami uvedenými v normě ČSN ISO 1920-10 [26].

Výsledky zkoušky jsou vyjádřeny statickým modulem pružnosti v tahu, který se vypočte pomocí vztahu:

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad (3)$$

- E_c statický modul pružnosti v tlaku [MPa]
 σ_a horní zatěžovací napětí [MPa], $\sigma_a = \frac{1}{3}\sigma_c$
 σ_b základní napětí, tj. 0,5 MPa
 ε_a průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-]
 ε_b průměrné poměrné přetvoření při základním zatěžovacím napětí [-]

Software zkušebního lisu dokáže automaticky statický modul pružnosti v tlaku spočítat, využijeme tedy tzv. Automatickou měřicí metodu rovnoměrného zatěžování pro statický modul pružnosti, pro kterou je doporučen systém elektronického čtení dat, jako je zapisovač dat. Tato metoda je podrobně popsána v příloze A normy ČSN ISO 1920-10 [26], která popisuje postup měření takto:

„Zkušební těleso se umístí centricky ve zkušebním stroji. Vyvodí se základní napětí, potom se změří a zaznamenají údaje na všech přístrojích. Napětí se plynule zvyšuje s časovým nárůstem (0,6 až 0,4) N/mm²*s. Měří se a zaznamenávají se údaje měřidla napětí nejméně desetkrát s přibližně stejným intervalem napětí, přičemž se zvyšuje zatížení až na 0,5 zatížení na mezi porušení.“ [26]

V tabulce výsledků (viz. tabulka 14) se tedy objevuje již samotná hodnota statického modulu pružnosti v tlaku, poměrná přetvoření tedy nebylo nutné zaznamenat.

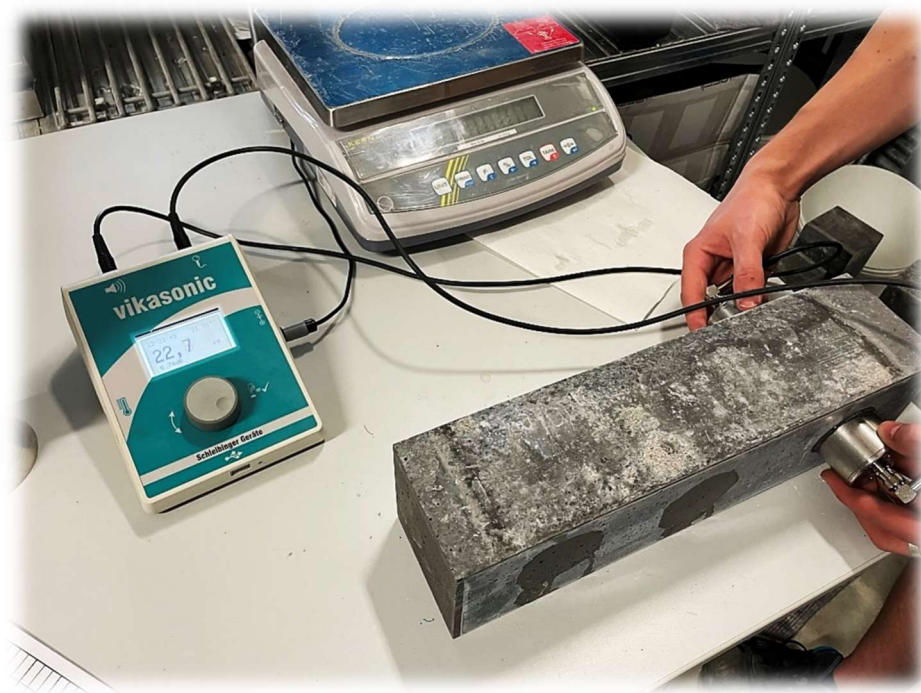
SMĚS	ČÍSLO VZ.	d			m	E _c	E _{c,av}
		[mm]			[kg]	[GPa]	[GPa]
HPC I	1	100,36	100,68	101,27	9,4430	46,99	47,29
	2	101,56	101,60	102,04	9,4912	48,35	
	3	100,85	100,86	101,59	9,4528	46,54	
HPC II	1	99,74	100,51	101,44	9,5202	49,17	48,70
	2	100,22	100,69	101,47	9,5354	48,39	
	3	99,27	100,03	100,76	9,4616	48,53	
HPC I + drátky	1	102,59	102,74	103,53	9,6918	48,16	47,90
	2	102,01	100,82	100,43	9,5644	47,35	
	3	101,24	100,37	99,48	9,5808	48,20	
HPC II + drátky	1	100,86	100,85	100,79	9,6970	50,00	49,25
	2	101,78	101,56	101,44	9,7104	49,15	
	3	100,37	101,17	100,90	9,6502	48,61	

Tabulka 14 – Výsledky zkoušky statického modulu pružnosti

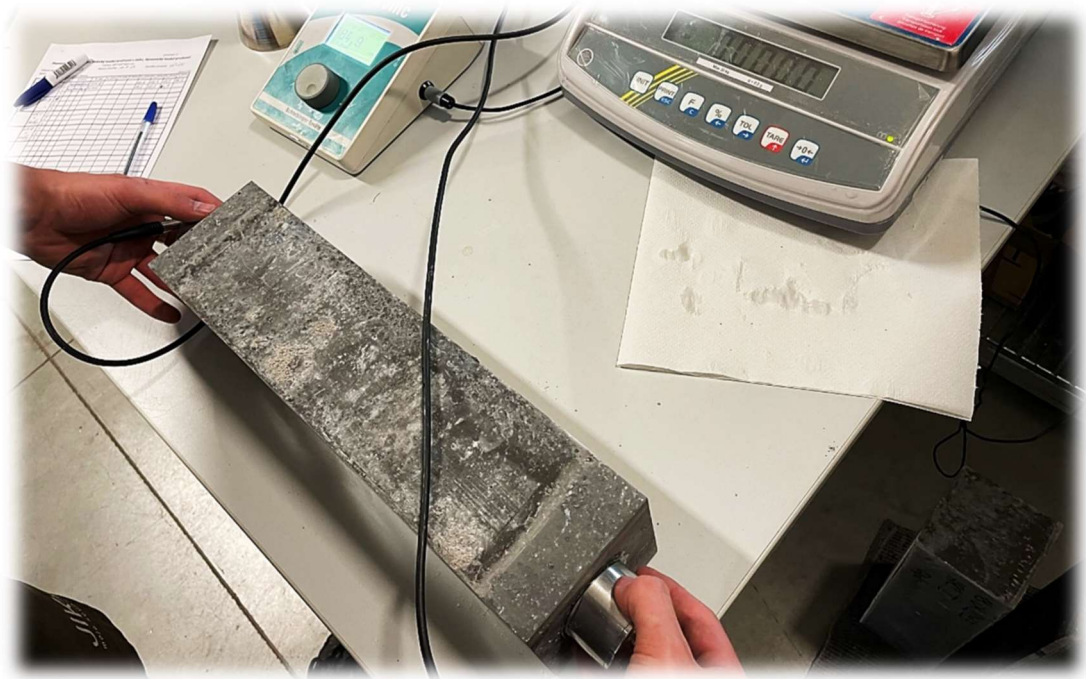
4.4.4 Zkouška dynamického modulu pružnosti dle ČSN 73 1371 [27]

Norma ČSN 73 1371 [27] uvádí postup pro zkoušení a hodnocení vlastností obyčejného i lehkého hutného betonu na základě stanovení rychlosti šíření impulzu ultrazvukových podélných vln. Ze stanovené rychlosti šíření ultrazvukového vlnění můžeme na základě odvozených vztahů určit dynamický modul pružnosti betonu.

„Při stanovení rychlosti šíření impulzu je nutno dodržet požadavky článku 6.1 a přílohy B v ČSN EN 12504-4:2005. Uspořádání sond (budiče a snímače) ovlivňuje čas šíření čela impulzů ultrazvukových vln.“ [27] V našem případě budeme aplikovat prozvučování přímé, u kterého jsou budič a snímač umístěny na protilehlých stranách proti sobě. Sondy budeme umísťovat na 4 místech zkoušeného tělesa, jímž je trámec 100x100x400 mm, na dlouhé straně je umísťujeme na začátek trámce, doprostřed trámce, na konec trámce a nakonec na čtvercové plochy proti sobě, vše je patrné z obrázku 77 a 78.



Obrázek 77 – Zkoušený trámec s viditelnými místy měření na dlouhé straně



Obrázek 78 – Zkoušený trámec, měření na čtvercových plochách

Z důvodu kvalitního přenosu ultrazvukových vln (odstranění negativního vlivu pórovitosti povrchu betonu) je nutné použít ultrazvukový gel, který negativní vlivy eliminuje.

Vyhodnocení výsledků měření probíhá pomocí výpočtu rychlosti šíření impulzů podélných vln v betonu a následnému výpočtu samotného dynamického modulu pružnosti v tlaku a tahu.

Rychlost šíření impulzů podélných vln v betonu vypočteme pomocí vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (4)$$

v_L rychlost impulzu [km/s]

L délka měřící základny [mm]

T čas včetně t_{kor} , který uplyne při průběhu impulzu měřící základnou [μ s]

t_{kor} korekce, zjistí se při kalibraci přístroje

Dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu vypočteme pomocí vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (5)$$

E_{cu} dynamický modul pružnosti v tlaku a tahu [MPa]

ρ objemová hmotnost betonu [kg/m³]

v_L rychlost impulzu [km/s]

k korekce, zjistí se při kalibraci přístroje



Obrázek 79 – Měřič ultrazvukových vln Vikasonic a ultrazvukový gel

	VZ	m	d ₁	d ₂	l	V	ρ	délka	t _L	E _{cu}	E _{cu,av}
		[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ³]	[kg×m ³]	[mm]	[μs]	[MPa]	[GPa]
HPC I	1	9,443	100,8	100,0	400,0	0,004031	2343	100,0	22,6	41288	43,0
								100,0	22,3	42406	
								100,0	22,5	41656	
								400,0	85,2	46481	
	2	9,491	101,7	100,0	400,0	0,004069	2332	100,0	22,2	42789	43,3
								100,0	22,2	42789	
								100,0	22,7	40925	
								400,0	84,9	46810	
	3	9,453	101,1	100,0	400,0	0,004044	2337	100,0	22,3	42406	43,7
								100,0	22,3	42406	
								100,0	22,1	43177	
								400,0	84,8	46921	
HPC II	1	9,520	100,6	100,0	400,0	0,004023	2367	100,0	22,1	43177	44,4
								100,0	22,2	42789	
								100,0	21,9	43969	
								400,0	84,0	47819	
	2	9,535	100,8	100,0	400,0	0,004032	2365	100,0	22,3	42406	44,5
								100,0	22,0	43570	
								100,0	21,9	43969	
								400,0	83,7	48162	
	3	9,462	100,0	100,0	400,0	0,004001	2365	100,0	22,0	43570	44,7
								100,0	22,1	43177	
								100,0	21,9	43969	
								400,0	83,9	47933	
HPC I + drátky	1	9,692	103,0	100,0	400,0	0,004118	2353	100,0	22,4	42028	43,2
								100,0	22,5	41656	
								100,0	22,2	42789	
								400,0	85,5	46156	
	2	9,564	101,1	100,0	400,0	0,004043	2365	100,0	22,6	41288	43,1
								100,0	22,3	42406	
								100,0	22,2	42789	
								400,0	85,7	45941	
	3	9,581	100,4	100,0	400,0	0,004015	2387	100,0	22,6	41288	42,7
								100,0	22,6	41288	
								100,0	22,4	42028	
								400,0	85,4	46264	
HPC II + drátky	1	9,697	100,8	100,0	400,0	0,004033	2404	100,0	22,3	42406	43,8
								100,0	22,4	42028	
								100,0	22,0	43570	
								400,0	84,4	47367	
	2	9,710	101,6	100,0	400,0	0,004064	2390	100,0	22,3	42406	43,7
								100,0	22,4	42028	
								100,0	22,1	43177	
								400,0	84,5	47255	
	3	9,650	100,8	100,0	400,0	0,004033	2393	100,0	22,4	42028	44,2
								100,0	22,0	43570	
								100,0	21,9	43969	
								400,0	84,5	47255	

Tabulka 15 – Výsledky zkoušky dynamického modulu pružnosti

4.4.5 Komentář k výsledkům experimentů

Po provedení experimentů je možné jednoduše vybrat tu nejvhodnější směs pro účel systémového oplocení. Z téměř všech výsledků jednotlivých zkoušek nám vychází nejlépe směs HPC I + ocelová mikrovlákná, která až na drobné výjimky dopadla vždy nejlépe (nejvyšší pevnost atd.), což je patrné z tabulek výsledků. Systémové oplocení bude realizováno z vysokohodnotného vláknobetonu dle receptury č. 2 - HPC I + ocelová mikrovlákná. Nyní se opět přistoupí ke statickému návrhu a ověří se správnost výběru směsi.

5. Návrh systému oplocení

5.1 Statická část

Díky experimentální části máme vybraný vhodný materiál, ze kterého systémové oplocení vyrobíme. Nyní je nutné přistoupit k ověření zvolené dimenze tloušťky stěny základního plotového dílce, který má délku 2000 mm, šířku 200 mm a výšku 250 mm. Statický návrh bude pro jednoduchost řešit pouze tento dílec. Veškeré zatížení, statický model a výpočty budou shodné jako při prvotním návrhu (viz. kapitola 3.2), změní se pouze charakteristiky materiálu a posouzení.

Zatížení:

- Stálé: vlastní tíha a ostatní stálé zatížení (zatížení od dílců uložených nad tím posuzovaným)
- Proměnné: vítr, teplota, náraz fotbalového míče, aktivní zemní tlak od zeminy v květináčích
- Na dílec bude aplikováno shodné zatížení jako v kapitole 3.2

Charakteristiky materiálu:

- Receptura č.2 – HPC I + ocelová mikrovlákna

Surovina	ρ	m	V
	[kg×m ³]	[kg]	[m ³]
Cement CEM I 42,5R	3000	760	0,253
Technický písek	2650	1075	0,405
Křemičitý úlet	2200	85	0,039
Křemenná moučka	2650	250	0,094
Superplastifikátor	1084	21	0,019
Voda (12°C)	1000	188	0,188
Ocelová mikrovlákna	7850	80	0,010
CELKEM		2379	1,009

Tabulka 16 – složení HPC I + ocelová mikrovlákna

Posouzení

Materiálové charakteristiky

- $f_{ct,k} = 16,84 \text{ MPa}$
- $f_{c,k,krych \ 100} = 115,00 \text{ MPa}$
- $f_{c,k,krychle \ 150} = 121,659 \text{ MPa}$
- $F_{Rk,cr} = 7,15 \text{ kN}$

$$L = 100 \text{ mm}$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$h = 40 \text{ mm}$$

Posudek pro návrhovou únosnost do vzniku první makrotrhlíky

$$f_{fc,tk} = \frac{F_{Rk,cr} \cdot L}{b \cdot h^2} = \frac{7150 \cdot 100}{40 \cdot 40^2} = 11,172 \text{ MPa}$$

$$f_{fc,td} = \frac{f_{fc,tk}}{\gamma_c} = \frac{11,172}{1,5} = 7,448 \text{ MPa}$$

$$b_m = 1000 \text{ mm}$$

$$h_{tloušťka} = ?$$

$$m_{Rd,cr} = f_{fc,td} \cdot \frac{1}{6} \cdot b_m \cdot h_{tloušťka}^2 \geq m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$7,448 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot h_{tloušťka}^2 \geq 0,41$$

$$h_{tloušťka} \geq 18,2 \text{ mm}$$

$$h_{tloušťka} = \mathbf{20 \text{ mm}}$$

$$m_{Rd,cr} = 7,448 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot 20^2 = 0,497 \text{ kN} \cdot \text{m} > m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

OK

- Potřebná tloušťka stěn vychází 20 mm

Posudek pro návrhovou únosnost v tahu

$$f_{ct,k} = 16,84 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,d} = \frac{f_{ct,k}}{\gamma_c} = \frac{16,84}{1,5} = 11,23 \text{ MPa}$$

$$b_m = 1000 \text{ mm}$$

$$h_{tloušťka} = ?$$

$$m_{Rd} = f_{ct,d} \cdot \frac{1}{6} \cdot b_m \cdot h_{tloušťka}^2 \geq m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$11,23 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot h_{tloušťka}^2 \geq 0,41$$

$$h_{tloušťka} \geq 14,8 \text{ mm}$$

$$h_{tloušťka} = \mathbf{16 \text{ mm}}$$

$$m_{Rd,cr} = 11,23 \cdot \frac{1}{6} \cdot 1000 \cdot 16^2 = 0,479 \text{ kN} \cdot \text{m} > m_{Ed} = 0,41 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \mathbf{OK}$$

- Potřebná tloušťka stěn vychází 16 mm

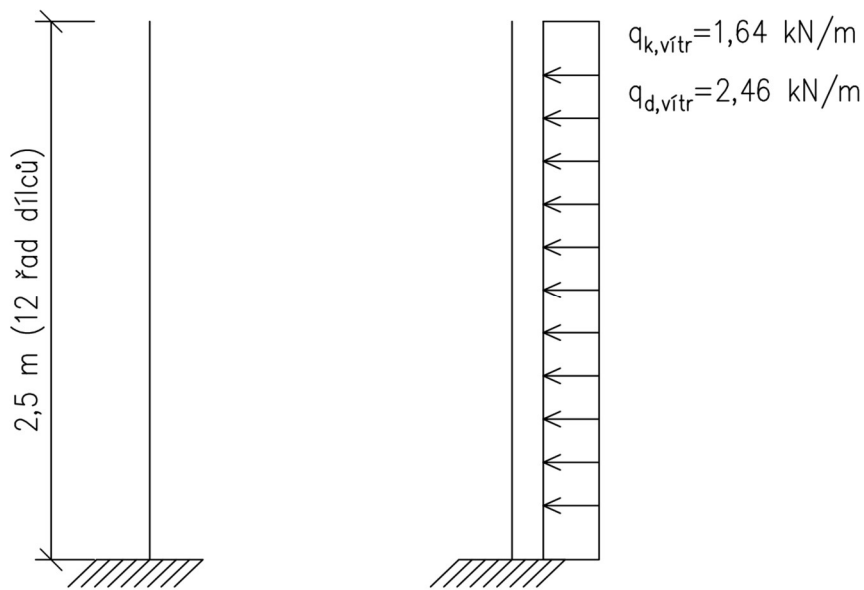
Komentář k výsledkům

- Z výsledků vychází navržená tloušťka stěn plotového dílce 20 mm
- V dalším kroku bude navržen a posouzen vnitřní sloupek systémového oplocení

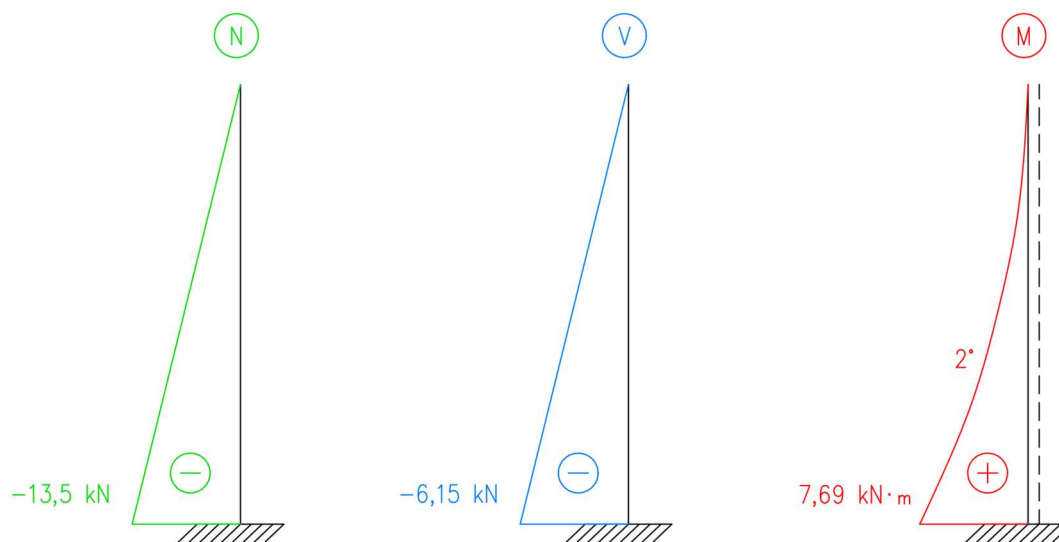
Návrh a posudek vnitřního sloupku

- Jelikož je vnitřní sloupek součástí systému oplocení, tak je nutné přistoupit k jeho statickému návrhu a posouzení
- Vnitřní sloupek je vymezen prostorem 160x160 mm
- Maximální osová vzdálenost sloupků je 2 m
- Maximální výška sloupku je 2,5 m
- Beton C25/30, ocel B500B

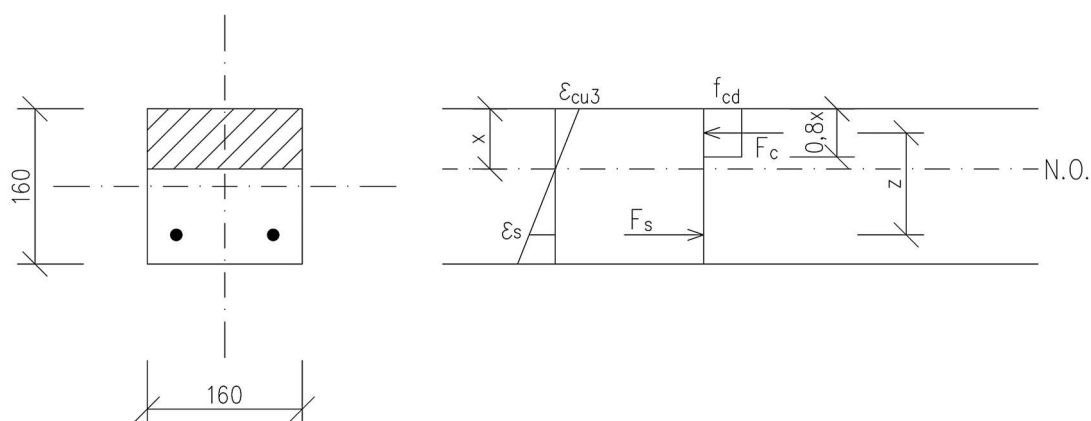
- Založení sloupku je řešeno základovou patkou s minimální hloubkou založení 800 mm, půdorysné rozměry zvoleny konzervativně 500x500 mm
- Zatížení sloupku je uvažováno pouze jako vlastní tíha plotu a proměnné zatížení způsobené účinky větru, konzervativně se bere v úvahu zatěžovací šířka, na které vítr působí, reálně je shodná s osovou vzdáleností sloupku 2 m, zde se však vzdálenost zdvojnásobila a byla uvažována 4 m
- Zatížení větrem je přenášeno z plotových dílců, kde je zatížení větrem rovno 0,411 kN/m², což je po převedení na zatěžovací plochu 4 m rovno 1,64 kN/m
- Veškeré výpočty byly provedeny v programu SCIA Engineer



Obrázek 80 – Statický model sloupku (vlevo) a zatížení od větru (vpravo)



Obrázek 81 – Vnitřní síly sloupku (zleva: normálová síla, posouvající síla a ohybový moment)



Obrázek 82 – Rozložení napětí v průřezu sloupku

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}} \quad \text{Odhad průměru výztuže} \Rightarrow 12 \text{ mm}, 2x \text{ } \varnothing 12 \text{ mm}$$

$$d = h - \varnothing - c = 0,16 - 0,012 - 0,012 = 0,136 \text{ m}$$

$$x = \frac{226,195 \cdot 435}{0,8 \cdot 160 \cdot 20} = 38,44 \text{ mm}$$

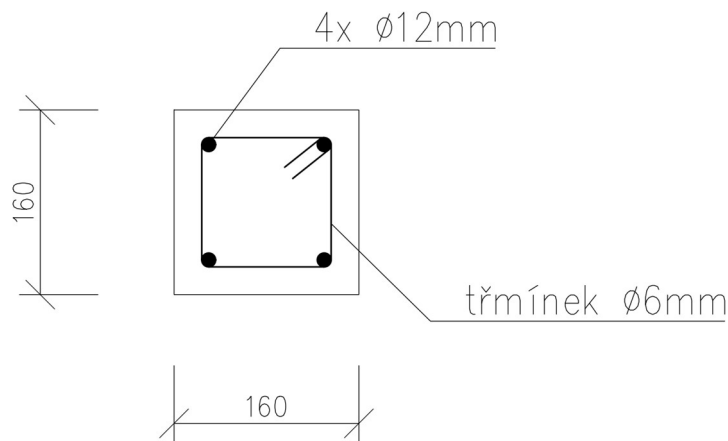
$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{38,44}{136} = 0,283 < \xi_{max} = 0,45 \quad \mathbf{OK}$$

$$z = d - 0,4 \cdot x = 136 - 0,4 \cdot 38,44 = 120,624 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z = 226,195 \cdot 435 \cdot 120,624 = \mathbf{11,869 \text{ kN} \cdot \text{m}}$$

$$M_{Rd} = 11,869 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_{Ed} = 7,69 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad \mathbf{OK}$$

Navržený sloupek 160x160 mm, beton C25/30, ocel B500B, výztuž 4x Ø 12 mm

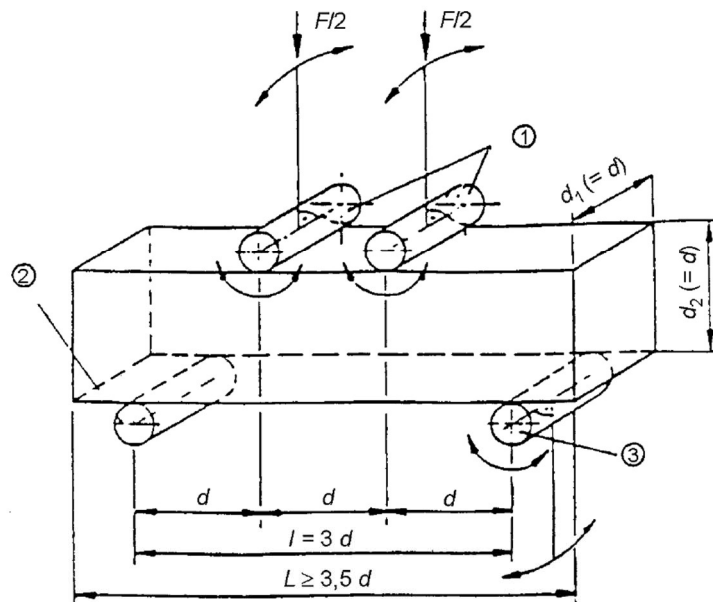


Obrázek 83 – Půdorys navrženého vnitřního sloupku

Ověření návrhu zkouškou pevnosti v tahu za ohybu – čtyřbodové uspořádání dle ČSN EN 12390-5 [25]

- Čtyřbodové uspořádání zkoušky pevnosti v tahu za ohybu nám umožňuje zjistit pevnost betonu v tahu za ohybu velmi přesně, na rozdíl od třibodového uspořádání, kde není jisté, zda získáváme nejvyšší možnou pevnost, u čtyřbodového uspořádání nejvyšší možnou pevnost v tahu za ohybu získáme. Díky nulové posouvající síle dostáváme pevnost v tahu za ohybu bez vlivu smyku.

- Díky čtyřbodovému uspořádání zkoušky můžeme také identifikovat místo s nejnižší pevností v tahu za ohybu, na rozdíl od třibodového uspořádání dopředu nevíme přesné místo porušení (vzniku první trhliny)



Legenda

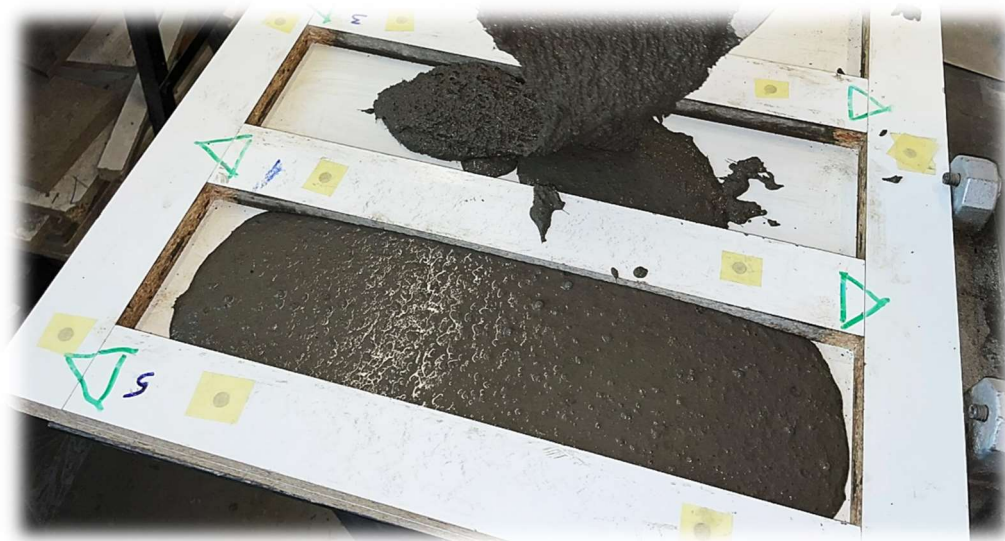
- 1 zatěžovací válečky (otočné a výkyvné)
- 2 podpěrný váleček
- 3 podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

Obrázek 84 – Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu se čtyřbodovým uspořádáním [25]

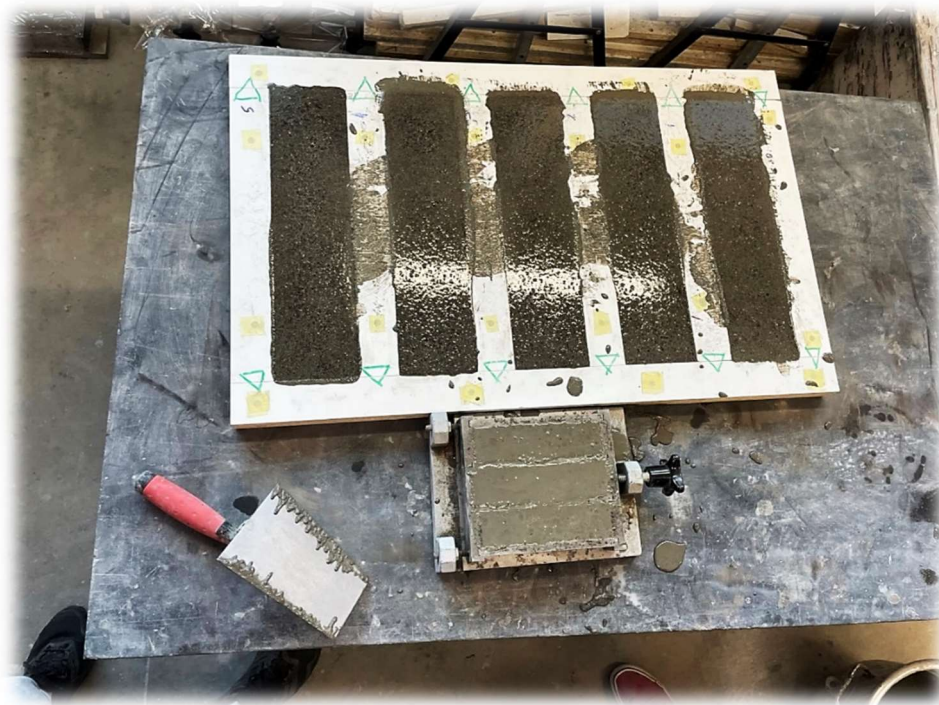
- Princip a podmínky zkoušky jsou stejné jako u třibodového uspořádání, liší se pouze v přípravku umístovaném do lisu a ve zvolených zkoušených tělesech.
- Zkoušeným tělesem jsou destičky o rozměru 20x100x400 mm v počtu 5 kusů.
- Samotná zkouška probíhala po 28 dnech od betonáže.



Obrázek 85 – Příprava forem pro betonáž destiček



Obrázek 86 – Betonáž destiček



Obrázek 87 – Betonáž destiček



Obrázek 88 – Hotové destičky



Obrázek 89 – Destička umístěná v lisu s využitím přípravku



Obrázek 90 – Porušení destičky



Obrázek 91 – Porušená sada zkoušených destiček

Vzorek č. 1 byl ze zkoušky vyloučen z důvodu porušení při působení velmi nízké síly. Pevnost v tahu ohybem je vyjádřena v MPa, vypočte se pomocí vztahu:

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (6)$$

$f_{ct,fl}$ pevnost v tahu ohybem [MPa]

F maximální zatížení [N]

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm] (300 mm)

b šířka průřezu [mm]

h výška průřezu (tloušťka destičky) [mm]

Směs	vzorek	m [kg]	b [mm]	h [mm]	L [mm]	F [kN]	$f_{ct,fl}$ [MPa]	$f_{ct,fl,av}$ [MPa]
HPC I	1	1,9822	100,0	20,3	300,0	1,61	11,7	-
HPC I	2	1,8772	100,0	19,5	300,0	2,34	18,5	19,5
HPC I	3	1,8958	100,0	19,4	300,0	2,62	20,9	
HPC I	4	1,9266	100,0	19,8	300,0	2,23	17,1	
HPC I	5	1,8848	100,0	19,7	300,0	2,75	21,3	

Tabulka 17 – Výsledky zkoušky v tahu za ohybu – čtyřbodové uspořádání

HPC I	
1,7072	směrodatná odchylka
19,4541	střední hodnota
16,6460	5% kvantil
16,6460	$f_{cr,k}$ charakteristická pevnost v tahu za ohybu v MPa

Tabulka 18 - Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tahu za ohybu stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou pevnost v tahu pro destičky 20x100x400 mm

HPC I	
0,2089	směrodatná odchylka
2,4850	střední hodnota
2,1414	5% kvantil
2,1414	$F_{rk,cr}$ charakteristická síla při porušení v kN

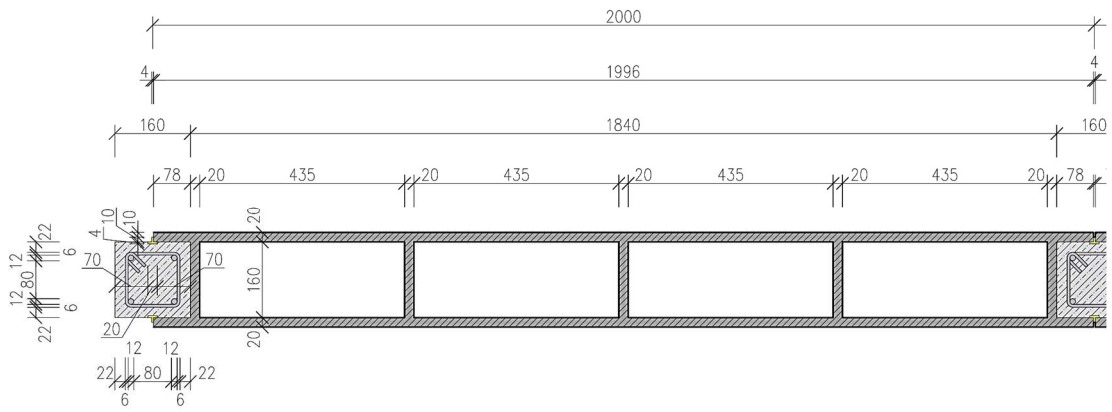
Tabulka 19 - Tabulka přepočtu hodnot síly při porušení stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou sílu při porušení pro destičky 20x100x400 mm

Výsledky zkoušky dopadly pozitivně, navržená tloušťka 20 mm je vyhovující i po experimentálním ověření.

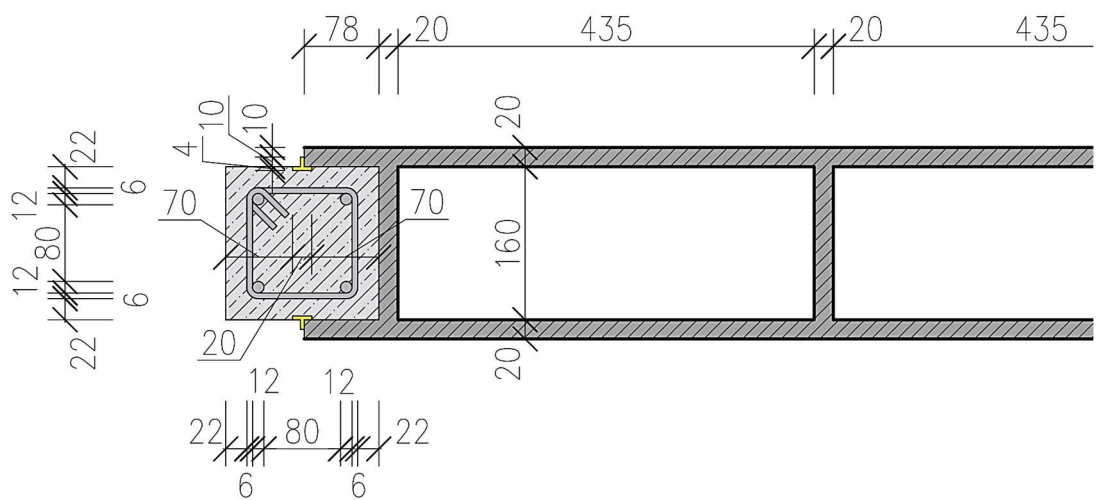
5.2 Stavební část

5.2.1 Stavební část – konstrukce plotu

Po ověření směsi HPC I + ocelová mikrovlákná ve statickém výpočtu je možné přistoupit k finálnímu návrhu stavebního řešení systémového oplocení. Výška všech plotových dílců bude 250 mm, šířka všech dílců bude 200 mm se 160 mm vnitřní dutinou, délka základního dílce bude 1996 mm (aby bylo místo na 4 mm těsnění, viz. dále), délka zkráceného dílce 996 mm, koncový dílec bude dlouhý 98 mm. Dílec pro květináče bude mít zmonolitněné dno, které v sobě bude mít 2 odtokové otvory v každé části oddělené vnitřními žebry. Dílec, který bude umístěn nad dílcem pro květináčem, bude vyroben bez jedné čelní stěny tak, aby umožnil umístění rostlin do dílce pod ním a vzniklo tak okno pro rostliny, v místech vnitřního sloupu bude čelní deska vyhotovena z důvodu potřeby ztraceného bednění pro betonáž vnitřního sloupku. Na vrcholu plotu bude deskový koncový díl o výšce 20 mm, kterým se svrchu plot uzavře a vytvoří tak stříšku plotu. Vnitřní sloupek bude mít půdorysné rozměry 160x160 mm, výška dle výšky vyskládaných plotových dílců, vyztužený bude 4x Ø 12 mm s třmínky Ø 6 mm po 200 mm z oceli B500B a bude vybetonován z betonu C25/30. Sloupek bude založen na betonových patkách, s minimální hloubkou založení 800 mm, půdorysné rozměry patky zvoleny konzervativně 500x500 mm, beton C16/20. Do betonové patky budou vždy vloženy 4x Ø 12 mm, tak aby se na ně dala navázat svislá výztuž pro sloupy, konce těchto vložených prutů budou zahnuty (délka zahnutí 100 mm) a umístěny alespoň 500 mm hluboko do základové patky s tím, že nad povrch patky bude vyvedeno alespoň 400 mm. Spodní dílec plotu bude na krajích ležet na základové patce a po délce bude uložen do štěrkopískového lože. Tento popis je pouze ilustrativní a neobsahuje veškeré podrobnosti, ty jsou patrné z výkresů.



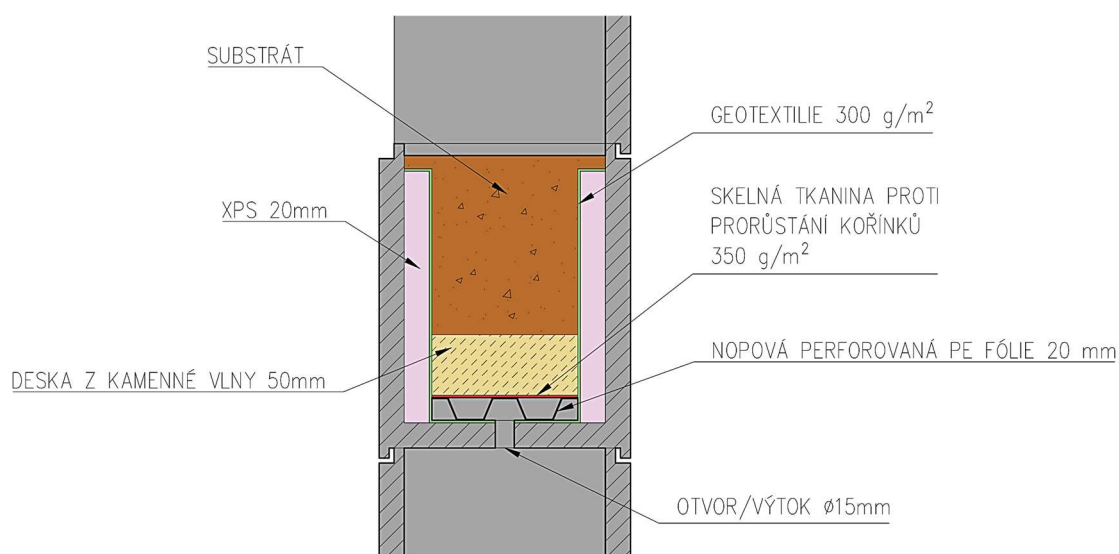
Obrázek 94 – Výsek půdorysu plotu



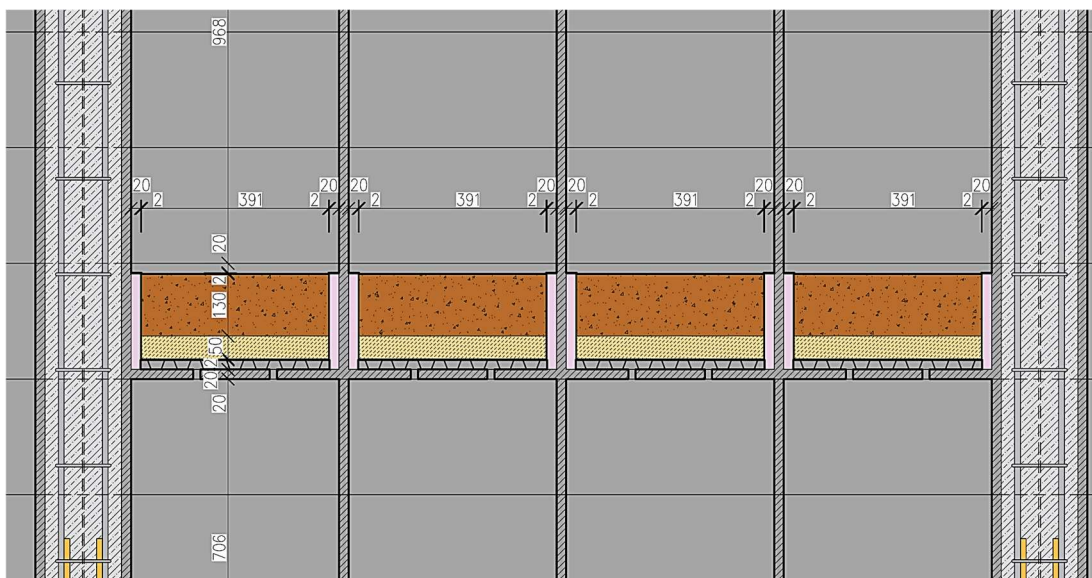
Obrázek 95 – Zvětšený výsek půdorysu plotu

5.2.2 Stavební část – implementace rostlin

V návaznosti na kapitolu 1.7 si na následujících řádcích rozebereme řešení implementace rostlin do navrženého systémového oplocení. Rostliny budeme umísťovat do substrátu vyplňujícího prostor květináče, který je součástí květináčového dílce systémového oplocení, květináč je řešen jako box s boky z extrudovaného polystyrénu (XPS) a dnem z nehydrofobizované kamenné vlny (zajišťující akumulaci vody), pod kterou je nopoová fólie zajišťující odtok přebytečného množství vody odtokovými otvory, prostor mezi substrátem a souvrstvím květináče je oddělen netkanou geotextilií. Při úvaze nad tímto řešením vyvstává otázka ohledně řešení zálivky a také teplotě v substrátu, na základě těchto otázek bude vymyšleno řešení zálivky a také řešení teploty v substrátu (následný návrh tloušťky XPS), na jejímž základě bude vybrán vhodný typ rostlin.



Obrázek 96 – Přibližný výsek příčného řezu květináčového dílce



Obrázek 98 – Výsek podélného řezu s květináči

ZÁVLAHA

Zavlažování rostli se může řešit třemi způsoby:

1. Přirozená zálivka díky dešti a větru
2. Zálivka manuální pomocí konve
3. Možnost automatizované zálivky

První dva způsoby nevyžadují žádnou úpravu navrženého oplocení. Automatizovaná zálivka však úpravu potřebovat bude, úprava bude ale realizována až při stavbě plotu, nejedná se o prefabrikované řešení, které by bylo již součástí procesu výroby plotových dílců. Myšlenka automatické závlahy je postavena na vyvrtání otvorů do příčných žeber plotového dílce, kde by se dala protáhnout hadice o průměru dle systémového řešení závlahy. Zpravidla se bude jednat o průsakový systém závlahy jehož hadice má většinou průměr 1/2" (půl palce, což je 1,27 cm), budou se muset vyvrtat otvory o průměru alespoň 15 mm. I toto poukazuje na velikou variabilitu navrženého systému oplocení.



Obrázek 99 – Průsaková hadice Gardena [28]



Obrázek 100 – Průsaková hadice Gardena v provozu [28]

TEPLOTA SUBSTRÁTU

Motivace řešit teplotu substrátu, ve kterém budou vysazeny rostliny, je jednoduchá, chceme, aby rostliny v květináči vydržely živé co nejdéle. Toto lze pozorovat na obrázku 101 a 102.



Obrázek 101 – Venkovní květináč z HPC s uvařenými (spálenými) rostlinami

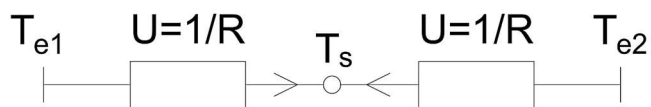


Obrázek 102 – Venkovní květináč z HPC s uvařenými (spálenými) rostlinami-detail

Rozhodně je nutné se tomuto "uvaření" rostlin vyhnout. Vystává zde otázka ohledně stanovení maximální teploty uvnitř substrátu a její případná korekce, která je umožněna zvolením vhodné tloušťky extrudovaného polystyrenu, který je součástí květináče. Jelikož nás zajímá extrém v podobě maximální teploty není nutné přistupovat k dynamickým modelům, který v sobě zahrnuje vliv času, nás zajímá pouze teplotní maximum, dle něhož budeme posléze vybírat vhodný typ rostlin. Díky tomu můžeme využít zjednodušený model v ustáleném stavu, kde je jedna strana plotu ohřívána dopadem slunečních paprsků a druhá strana je ve stínu a tento stav se nemění v čase, což v realitě není pravda, nicméně pro účely této práce (počítáme s maximální teplotou a maximálními zisky ze slunečního záření) je to dostatečné a také na straně bezpečnosti.

Zjednodušený model v ustáleném stavu

- Toto řešení nezahrnuje vliv času
- 1D vedení tepla
- Jednoduchý výpočet
- Jednoduché okrajové podmínky
- Při ustáleném stavu jsou teploty konstantní, stejně jako ostatní podmínky



Obrázek 103 – Zjednodušený model v ustáleném stavu, elektrická analogie

Z tohoto modelu můžeme odvodit rovnici:

$$U \cdot (T_{e1} - T_s) + U \cdot (T_{e2} - T_s) = 0 \quad (7)$$

T_{e1} ekvivalentní teplota 1 – ohřívána strana [°C]

T_{e2} ekvivalentní teplota 2 – strana ve stínu [°C]

T_s teplota uprostřed substrátu [°C]

U součinitel prostupu tepla [$W/(m^2 \cdot K)$]

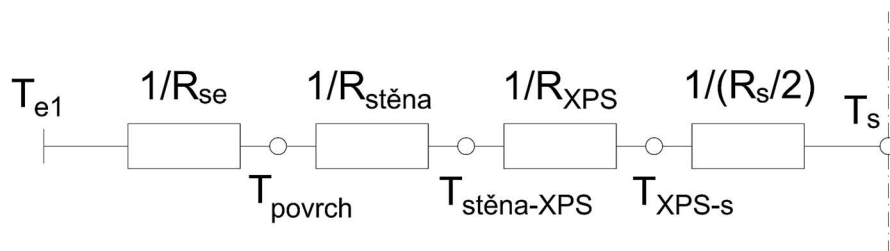
R celkový tepelný odpor [$(m^2 \cdot K)/W$]

A z této rovnice lze odvodit vztah pro výpočet teploty uvnitř substrátu T_s :

$$T_s = \frac{U \cdot T_{e1} + U \cdot T_{e2}}{2 \cdot U} = \frac{T_{e1} + T_{e2}}{2} \quad (8)$$

Jedná se tedy o průměrnou hodnotu ze dvou ekvivalentních teplot.

Celkový tepelný odpor R lze pro lepší popis jednotlivých vrstev souvrství rozepsat (viz. obrázek 104), platí zde pravidlo, že jednotlivé tepelné odpory R se sčítají, proto lze vše zjednodušit do schématu na obrázku 103.



Obrázek 104 – Zjednodušený model v ustáleném stavu – rozepsání, elektrická analogie

Platí:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{se}} + \frac{1}{R_{stěna}} + \frac{1}{R_{XPS}} + \frac{1}{\frac{R_s}{2}} \quad (9)$$

R celkový tepelný odpor [$(m^2 \cdot K)/W$]

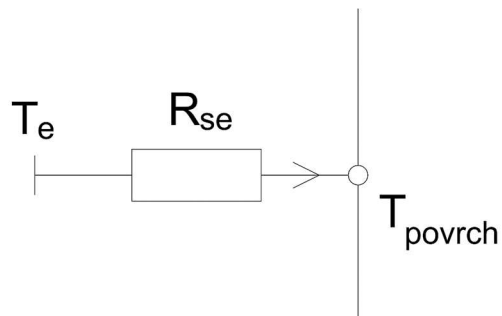
R_{se} tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [$(m^2 \cdot K)/W$]

$R_{stěna}$ tepelný odpor betonové stěny květináče [$(m^2 \cdot K)/W$]

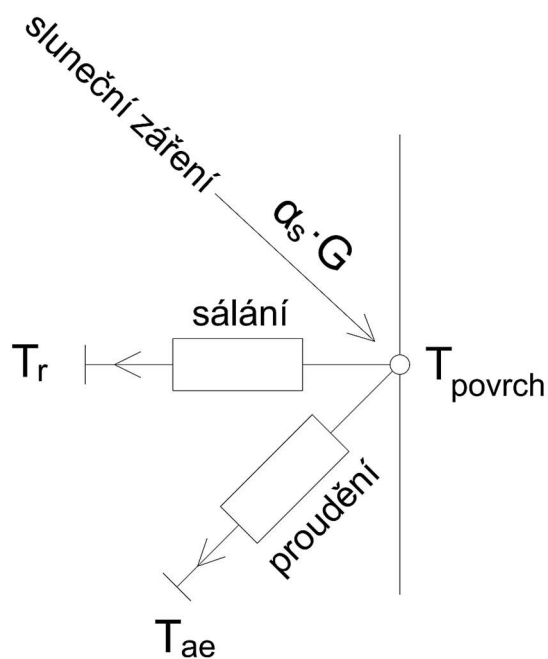
R_{XPS} tepelný odpor extrudovaného polystyrénu [$(m^2 \cdot K)/W$]

R_s tepelný odpor substrátu [$(m^2 \cdot K)/W$]

Před výpočtem teploty uprostřed substrátu T_s je potřeba přistoupit ke stanovení ekvivalentních teplot T_{e1} a T_{e2} , kde T_{e1} je ekvivalentní teplota na ohřívané straně a T_{e2} je ekvivalentní teplota na straně, která je ve stínu, to znamená, že můžeme uvažovat $T_{e2} = T_{ae}$, kde T_{ae} je teplota venkovního vzduchu. K výpočtu T_{e1} nám poslouží schéma na obrázku 105, respektive schéma na obrázku 106.



Obrázek 105 – Schéma pro ekvivalentní teplotu (rovnocenná sluneční teplota) , elektrická analogie



Obrázek 106 – Schéma pro výpočet ekvivalentní teploty, elektrická analogie

Schéma na obrázku 106 znázorňuje ohřívanou stranu plotu, přičemž teplota povrchu T_{povrch} je umístěna na líci betonového povrchu oplocení. Teplotní zisky na ohřívané straně jsou způsobeny slunečním zářením, zisky jsou však redukovány a to díky dvěma jevům, které jsou na schématu znázorněny. Jedná se o ochlazování díky sálání a proudění vzduchu, čímž se možné teplotní zisky ze slunečního záření snižují, povrch se tedy nezahřeje tolik, jako by tomu bylo, kdybychom sálání a proudění eliminovali. Ze schématu na obrázku 106 vyplývá vztah pro výpočet ekvivalentní teploty T_e :

$$T_e = T_{ae} + \frac{\alpha_s \cdot G}{\frac{1}{R_{se}}} \quad (10)$$

T_e ekvivalentní teplota (rovnocenná sluneční teplota) [°C]

T_{ae} teplota venkovního vzduchu [°C]

α_s koeficient odrazivosti povrchu [-]

G sluneční ozáření [W/m²]

R_{se} tepelný odpor při přestupu tepla na vnější straně konstrukce [(m²·K)/W]

Tento vztah využijeme pro výpočet ekvivalentní teploty T_{e1} pro ohřívanou stranu, pro T_{e2} je teplota stanovena. Teplotu venkovního vzduchu budeme uvažovat $T_{ae} = 35$ °C (což je již standartně dosahovaná teplota v průběhu letních dní v ČR), koeficient odrazivosti povrchu pro barvu povrchu HPC budeme uvažovat $\alpha_s = 0,7$, hodnota slunečního ozáření pro jasnou oblohu $G = 800$ W/m² a tepelný odpor při přestupu tepla uvažujeme $R_{se} = 0,04$ (m²·K)/W.

$$T_{e1} = T_{ae} + \frac{\alpha_s \cdot G}{\frac{1}{R_{se}}} = 35 + \frac{0,7 \cdot 800}{\frac{1}{0,04}} = 57,4^\circ\text{C}$$

Máme tedy stanovenou hodnotu ekvivalentní teploty vzduchu na ohřívané straně, můžeme se pustit do výpočtu tepelných odporů jednotlivých vrstev a následně stanovit celkový tepelný odpor konstrukce R .

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (11)$$

R_i tepelný odpor dané vrstvy [(m²·K)/W]

d_i tloušťka dané vrstvy [mm]

λ_i součinitel tepelné vodivosti dané vrstvy [W/(m·K)]

Tepelné odpory jednotlivých vrstev pak vychází následovně:

$$R_{stěna} = \frac{d_{stěna}}{\lambda_{stěna}} = \frac{0,02}{1,4} = 0,014 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$R_{XPS} = \frac{d_{XPS}}{\lambda_{XPS}} = \frac{0,02}{0,035} = 0,571 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$R_s = \frac{d_s}{\lambda_s} = \frac{0,058}{1,5} = 0,039 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{se}} + \frac{1}{R_{stěna}} + \frac{1}{R_{XPS}} + \frac{1}{\frac{R_s}{2}} = \frac{1}{0,04} + \frac{1}{0,014} + \frac{1}{0,571} + \frac{1}{0,039} = \frac{1}{0,664}$$

$$R = 0,664 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$U = 1,506 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

Teplota uprostřed substrátu:

$$T_s = \frac{U \cdot T_{e1} + U \cdot T_{e2}}{2 \cdot U} = \frac{T_{e1} + T_{e2}}{2} = \frac{35 + 57,4}{2} = 46,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

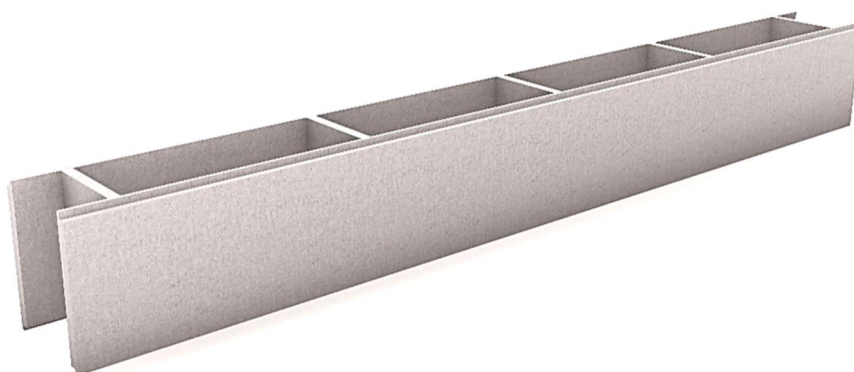
Vzhledem k této teplotě (T_s) musíme nalézt optimální druhy rostlin. Jistě se musí jednat o teplomilnou rostlinu, které nevadí přímé sluneční záření, ideálně o trvalku. Velmi dobrou volbou je jakýkoliv druh Levandule, nebo Aloisie citronová, to jsou teplomilné trvalky, lze je považovat taktéž za keře. Vhodným zástupcem z řady jednoletek je Měsíček lékařský, nebo například Krásenka zpeřená.



Obrázek 107 – Fotografie Levandule lékařské [29]

5.2.3 Stavební část – design

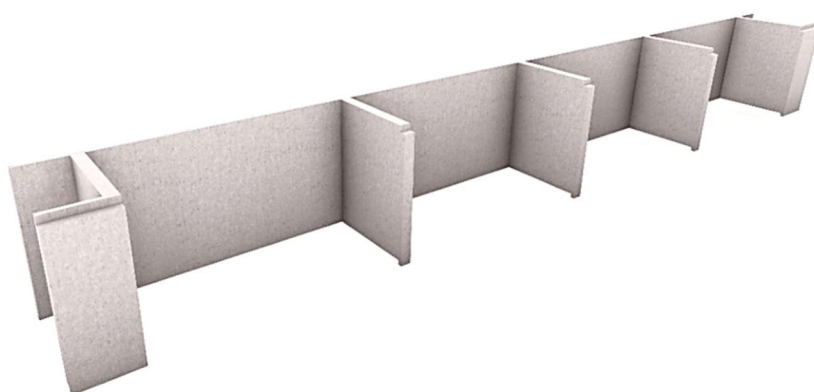
Na základě předchozích kapitol je nyní možné vytvořit přesnou podobu navrženého plotu v 3D programu. Vyobrazeny jsou pouze ty nejzákladnější dílce.



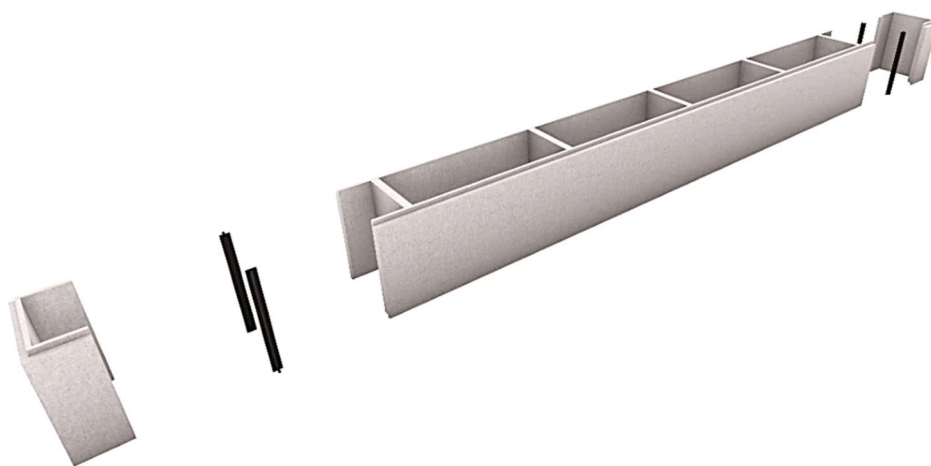
Obrázek 108 – Základní dílec délky 1996 mm



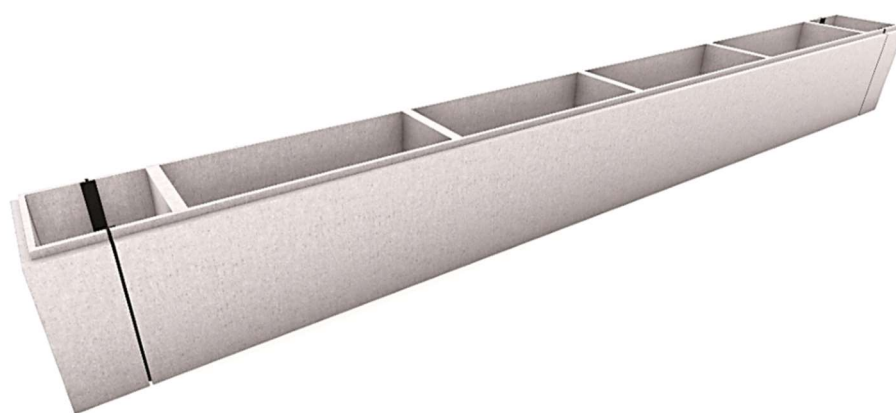
Obrázek 109 – Dílec s květináči (na dně lze pozorovat odtokové otvory)



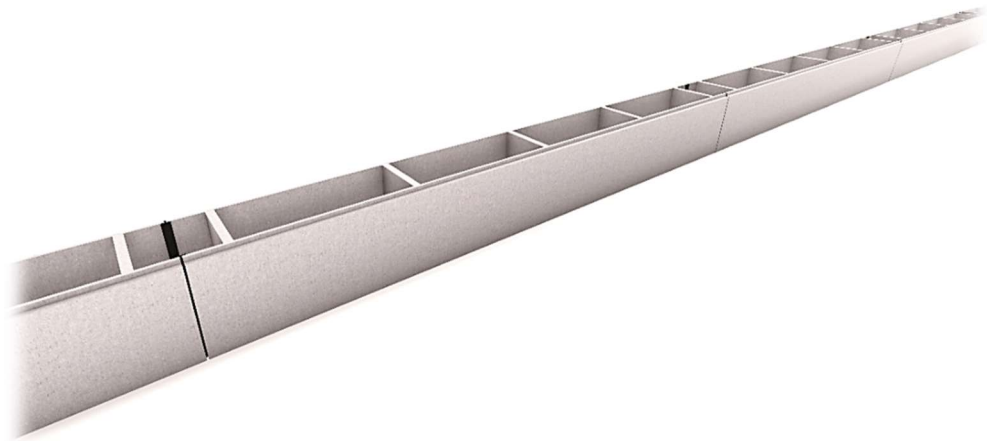
Obrázek 110 – Dílec s otvory umísťovaný nad dílec s květináči



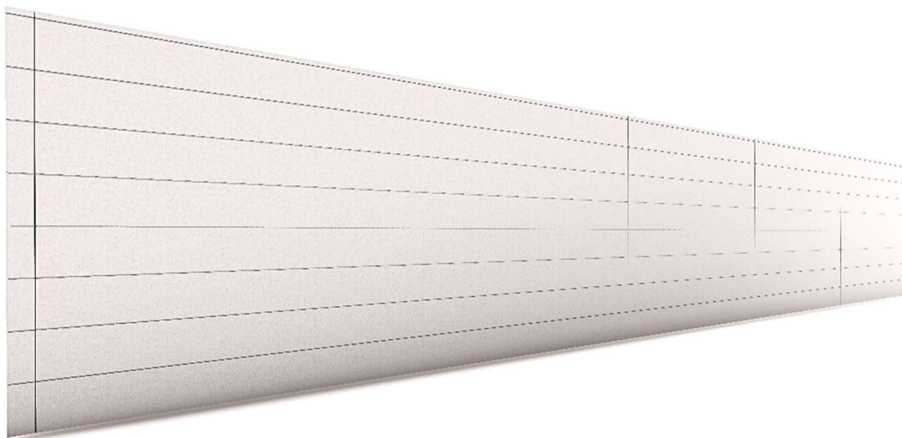
Obrázek 111 – Základní dílec s koncovými dílci a těsněním (černé prvky)



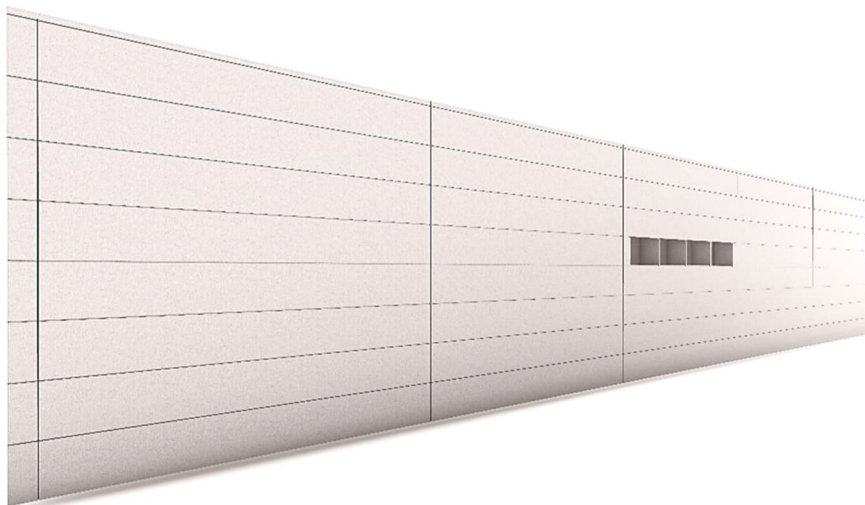
Obrázek 112 – Základní dílec s koncovými dílci a těsněním - kompletace



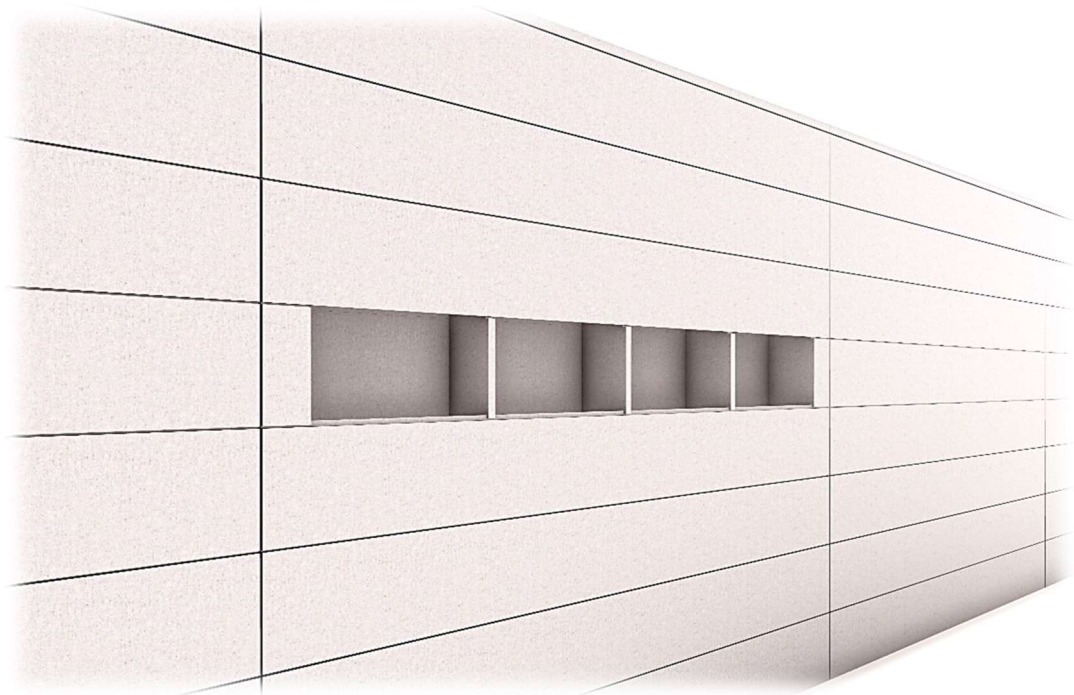
Obrázek 113 – Napojení základních dílců v jedné řadě s těsněním ve svislých spárách



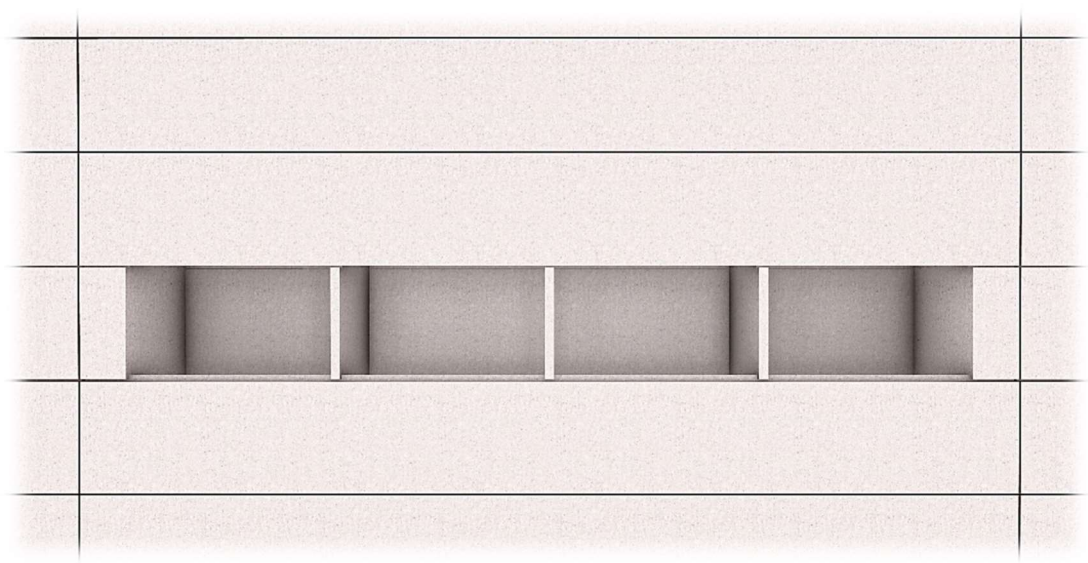
Obrázek 114 – Pohled na příklad stěny plotu o výšce 2 m



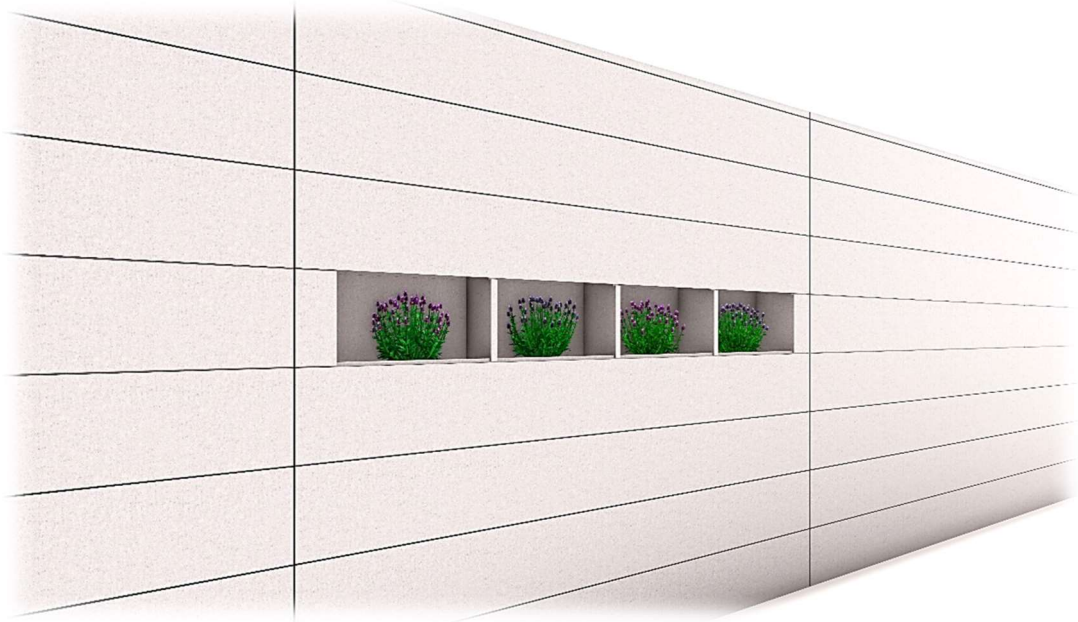
Obrázek 115 – Pohled na příklad stěny vysoké 2 m s dílcem pro květináče



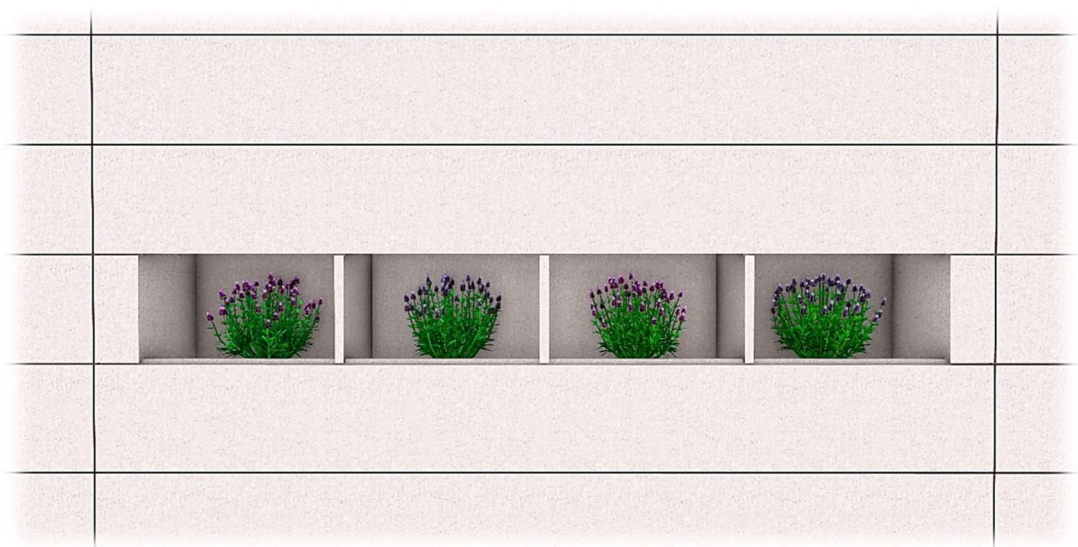
Obrázek 116 – Pohled na stěnu s osazeným květináčem – přiblížení



Obrázek 117 – Čelní pohled na prázdné květináče



Obrázek 118 – Pohled na stěnu s květináči



Obrázek 119 – Čelní pohled na květináče

Vizualizace byly provedeny pouze pro ty nejzákladnější dílce, aby bylo možné získat představu nad vzhledem systémového oplocení. Systém oplocení počítá s tvorbou speciálních dílců, díky kterým bude možné vytvořit roh a jiné atypické prvky, to však není součástí této práce z důvodu vysoké časové náročnosti.

6. Realizace prototypu

6.1 Návrh realizace prototypu

Na základě předchozích kapitol můžeme přistoupit k návrhu a realizaci navrženého systémového oplocení. Vyhotovením dílců či výseku oplocení dokážeme realizovatelnost navrženého systémového oplocení, získáme také informace a postřehy pro následné doladění návrhu.

Vzhledem k velmi velké časové náročnosti realizace dílců jsem se rozhodl udělat výsek systémového oplocení, který bude tvořen třemi základními dílci o délce 2 m, dílcem s květináči o délce 2 m, osmi ukončovacími dílci a dvěma vrchními dílci (stříškami). Sestavení těchto dílců bude provedeno v hale UCEEB ČVUT, základ bude suplován roznášecími patkami, ze kterých bude vyvedena startovací výztuž pro následné provázání s výztuží sloupu jejím stykováním.



Obrázek 120 – Zamýšlená podoba realizovaného prototypu výseku oplocení

6.2 Tvorba forem prototypu

Dle zamýšlené podoby prototypu (viz. obrázek 120) je nutné navrhnout a vyrobit formy pro příslušné dílce. Jedná se o formu základního dílce, formu dílce s květináči, formu koncového dílce (tvaru "U"), formu stříšky a formu základové patky. Pro tvorbu forem bude použita potažená dřevotřísková deska (lamino) a desky extrudovaného polystyrénu (XPS).

FORMA ZÁKLADNÍHO DÍLCE

- Základní forma je navržena z lamina tloušťky 18 mm, ta bude ohraničovat vnější povrch dílce.
- Vnitřní část formy je řešena boxy z desek XPS.
- K přesnému nařezání slouží výkresy, které jsou součástí příloh této práce.
- V průběhu realizace forem, zejména se to týká boxů z XPS, došlo k drobným korekcím návrhu, díky kterým se formy vylepšily.



Obrázek 121 – Nařezané dílce lamina pro sestavení formy základního dílce



Obrázek 122 – Kompletace vnější formy základního dílce



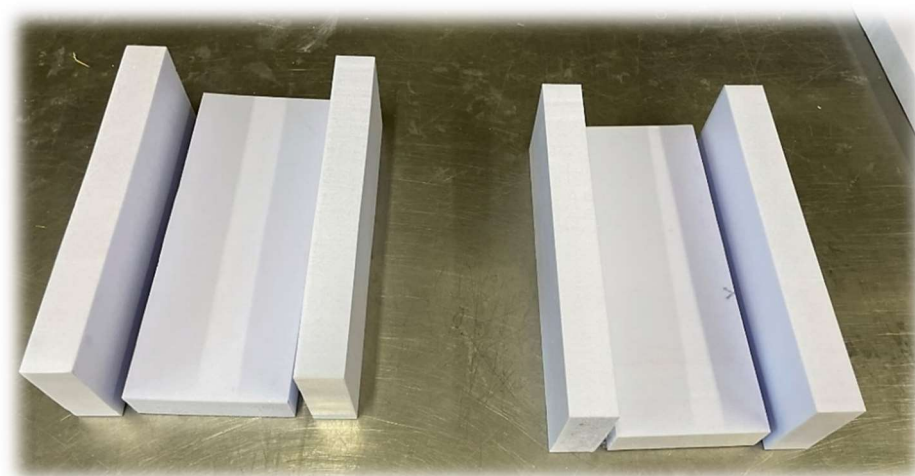
Obrázek 123 – Hotová vnější forma základního dílce



Obrázek 124 – Spojování nařezaných desek XPS



Obrázek 125 – Hotový vnitřní box pro formu základního dílce



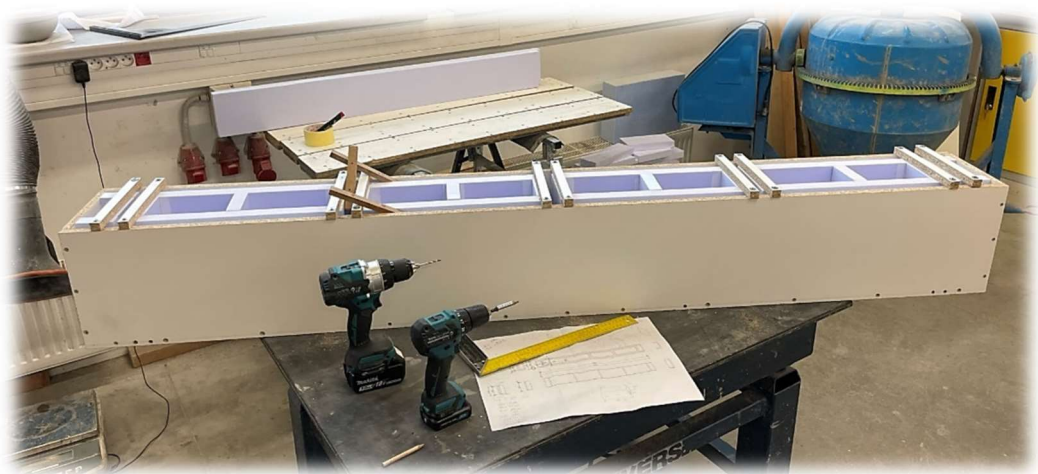
Obrázek 126 – Nařezané vnitřní krajní prvky z XPS pro formu základního dílce



Obrázek 127 – Řezačka polystyrénu s odporovým drátem



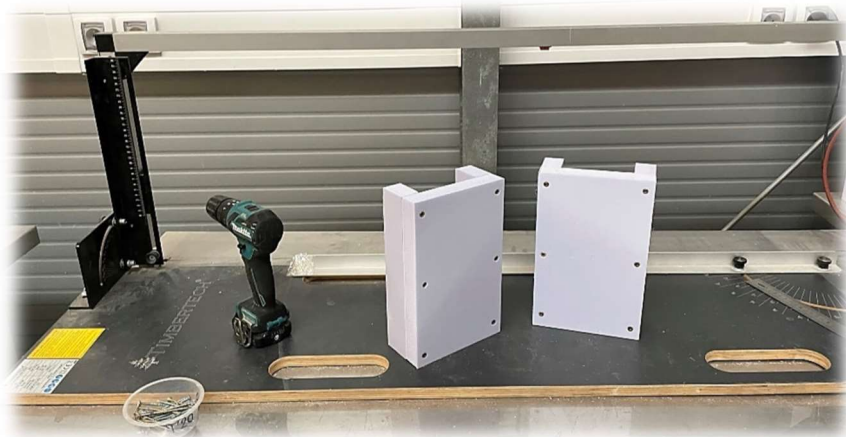
Obrázek 128 – Sestavení vnitřních boxů z XPS pro formu základního dílce



Obrázek 129 – Finální podoba formy základního dílce

FORMA KONCOVÉHO DÍLCE

- Základní forma je navržena z lamina tloušťky 16 mm, ta bude ohraničovat vnější povrch dílce.
- Vnitřní část formy je řešena boxy z desek XPS.



Obrázek 130 – Vnitřní prvky z XPS pro formu koncových dílců



Obrázek 131 – Řezání lamina pro vnější formu koncových dílců



Obrázek 132 – Kompletace forem pro koncové dílce

FORMA DÍLCE S KVĚTINÁČI

- Základní forma je navržena z lamina tloušťky 18 mm, ta bude ohraničovat vnější povrch dílce.
- Vnitřní část formy je řešena boxy z desek XPS.
- Výtokové otvory jsou zajištěny z XPS puků, díky kterým není nutné otvory posléze vrtat.
- Forma s květináči je logicky koncipována vzhůru nohama, tzn. dno květináče je směrem vzhůru



Obrázek 133 – Vnitřní box z XPS pro formu dílce s květináči



Obrázek 134 – Finální podoba formy pro dílec s květináči a pro koncové dílce

FORMA PRO STŘÍŠKU

- Základní forma je navržena z lamina tloušťky 16 mm, ta bude ohraničovat vnější povrch dílce.
- Vnitřní část formy je řešena boxy z desek XPS.
- Zkosení hran je zajištěno proužky z tvrdého polyethylenu s úhlem 45°, které jsou do formy vlepeny chemoprenem.



Obrázek 135 – Proces výroby formy pro stříšku



Obrázek 136 – Hotová forma pro stříšku

FORMA PRO PATKU

- Základní jednoduchá forma je navržena z lamina tloušťky 18 mm, ta bude ohraničovat vnější povrch dílce.
- Forma pro patku je koncipována vzhůru nohama tzn. spodní strana patky je směrem vzhůru a startovací výztuž pro vnitřní sloupek je z formy vyvedena směrem dolů. Pro vytažení výztuže je nutné vyvrtat otvory ve dně formy.



Obrázek 137 – Vnější forma pro patku (bez vyvrtaných otvorů pro výztuž)

Všechny formy byly využity několikrát, stačila tedy pouze jedna sada forem, což je jak ekonomické, tak ekologické. Jak již bylo zmíněno, během realizace prototypu docházelo k postupným úpravám forem, zejména pak vnitřních boxů a doplňků z extrudovaného polystyrenu. Nejprve se jednotlivé desky extrudovaného polystyrenu spojovaly pouze oboustrannou lepicí páskou, avšak po první betonáži se muselo přistoupit k úpravám spojů. Spoje se již nerealizovaly pouze pomocí oboustranné lepicí pásky, ale byly doplněny vruty, které zajistily dostatečnou pevnost

spojů, díky které již nevznikaly žádné problémy během samotné betonáže, zejména při vibrování betonové směsi ve formě. V závěrečné fázi byla vynechána původně použitá oboustranná lepící páska a spoje desek XPS byly řešeny pouze pomocí vrtů. Pro stabilizaci vnitřních vložek z XPS se použily zádržné hranolky z lamina, které se pomocí vrtů upevnily do vnější formy, díky tomu vnitřní vložky (boxy) z extrudovaného polystyrénu držely na svém místě a při betonáži s nimi nebyl sebemenší problém.

6.2 Betonáž prototypu

Po kompletaci a přípravě forem přichází na řadu betonáž. Postup přípravy betonové směsi je shodný s postupem v kapitole 4.3, postup se liší pouze v případě betonáže patek, z důvodu použití odlišné receptury. Z časových důvodů, jelikož je příprava forem a samotná betonáž velmi časově náročná, se tvar dílců zjednodušil tím, že se nerealizovala profilace hran, jednotlivé dílce jsou tedy spojovány natupo.

BETONÁŽ ZÁKLADNÍHO DÍLCE PROTOTYPU

- Betonáž základního dílce prototypu je nutné realizovat třikrát.
- Spolu s betonáží základních dílců probíhala betonáž koncových dílců, mimo první betonáž základního dílce.
- Celý dílec se vždy po vylití zhutnil pomocí vibračního stolu.
- K odbednění došlo vždy po uplynutí čtyř dnů.
- Po odbednění (demontáž formy na jednotlivé části) se dílce formy zbavily zbytků zatvrdlé betonové směsi a očistily se, následně se forma opět zkompletovala a připravila na další betonáž.



Obrázek 138 – První betonáž základního dílce prototypu



Obrázek 139 – První betonáž základního dílce prototypu



Obrázek 140 – Příprava formy pro druhou betonáž základního dílce prototypu



Obrázek 141 – Druhá betonáž základního a koncových dílců prototypu



Obrázek 142 – Třetí betonáž základního a koncových dílců prototypu



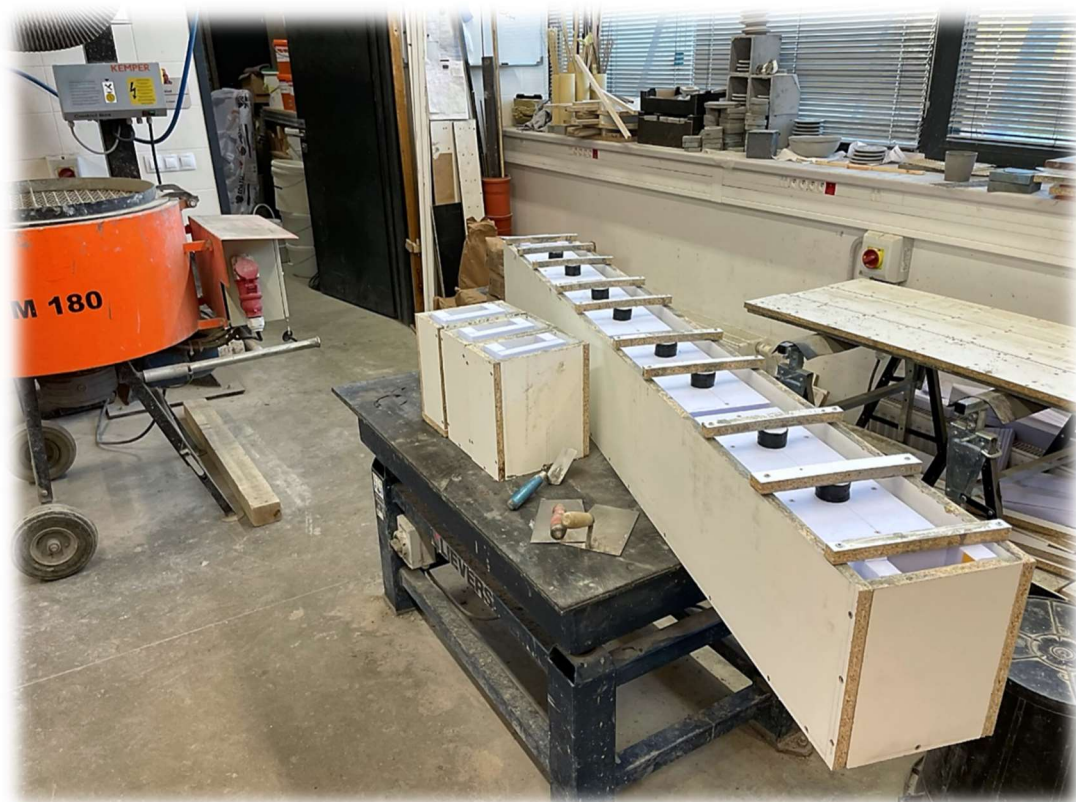
Obrázek 143 – Povrch základního dílce prototypu po odbednění boku



Obrázek 144 – Základní a koncový dílec prototypu do odstranění vnější formy

BETONÁŽ DÍLCE S KVĚTINÁČI PROTOTYPU

- Betonáž pouze jednou.
- Spolu s betonáží dílce s květináči proběhla betonáž koncových dílců.
- Obrácená betonáž dílce (dno směrem vzhůru).
- Celý dílec se po vylití zhutnil pomocí vibračního stolu.
- K odbednění došlo po uplynutí čtyř dnů.



Obrázek 145 – Příprava formy pro betonáž dílce s květináči a koncových dílců prototypu

BETONÁŽ KONCOVÉHO DÍLCE PROTOTYPU

- Betonáž koncových dílců prototypu probíhala vždy spolu s betonáží základních dílců prototypu a dílců s květináči viz. předchozí řádky a fotografie.
- Pro betonáž se využívala sada tří forem.
- Celkem je osm kusů koncových dílců prototypu.
- Odbednění po čtyřech dnech od betonáže

BETONÁŽ STŘÍŠEK PROTOTYPU

- Betonáž stříšky prototypu proběhla dvakrát z důvodu výroby pouze jediné formy. Odbednění po čtyřech dnech od betonáže.
- Vrchní plocha stříšky není řešena sedlovým tvarem, ale je svrchu rovná z důvodu časové úspory.



Obrázek 146 – Betonáž stříšky prototypu



Obrázek 147 – Hotová stříška prototypu



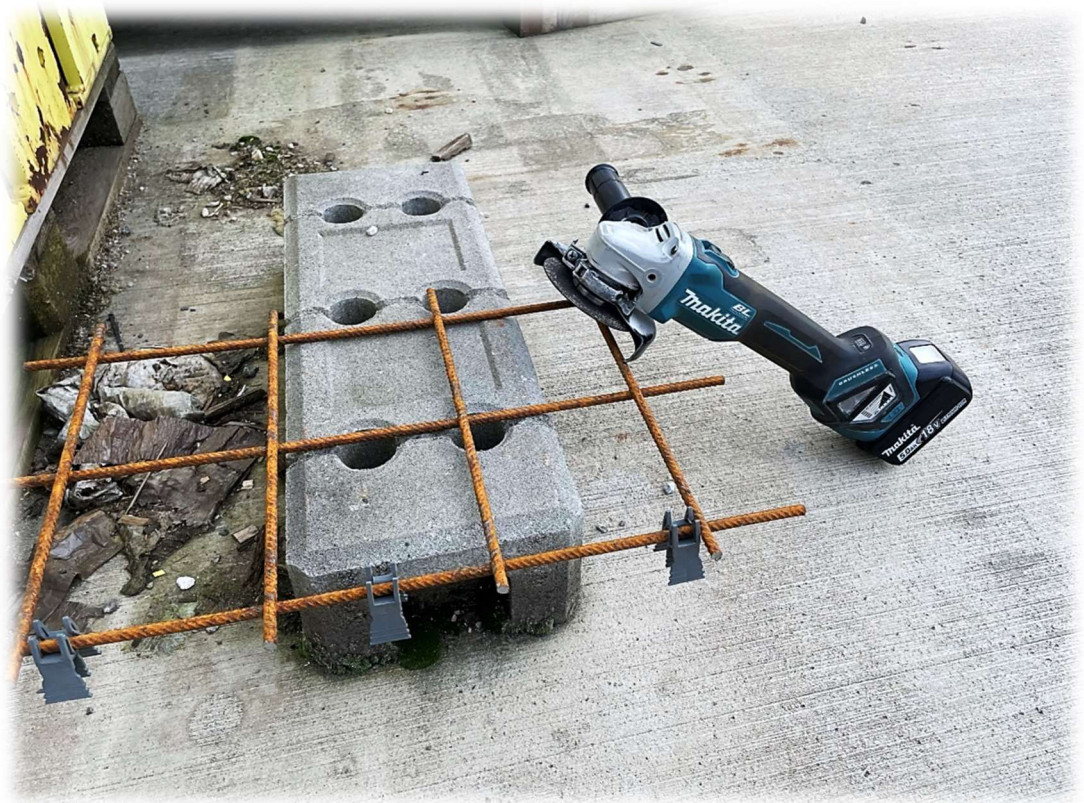
Obrázek 148 – Odbedněné dílce prototypu

BETONÁŽ PATKY PROTOTYPU

- Betonáž patky se jako jediná liší od zbytku.
- Patky jsou vyrobeny z běžného betonu, jehož receptura je uvedena v tabulce 20.
- Díky použití běžného betonu je možné použít obyčejnou stavební míchačku.
- Nejprve se promíchalo kamenivo, poté se přidal cement a voda, směs se následně dokonale promíchala a mohlo se betonovat.
- Patky jsou vyztuženy kari sítí s oky 100x100 mm a průměrem 6 mm.
- Z patek je vyvedena startovací svislá výztuž o průměru 12 mm.
- Odbednění je po uplynutí čtyř dnů od betonáže.

Surovina	ρ	m
	[kg×m ³]	[kg]
Cement CEM I 42,5R	3000	330
Kamenivo frakce 0/4 mm	2650	957
Kamenivo frakce 4/8 mm	2650	884
Voda (12°C)	1000	165

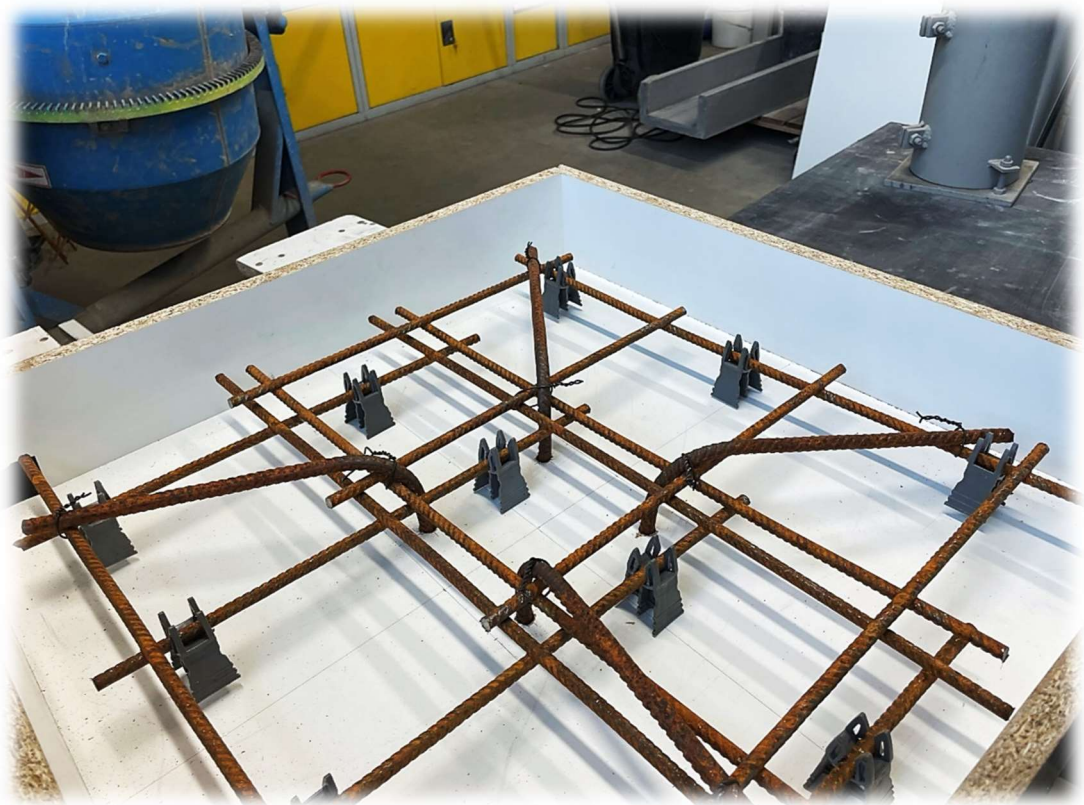
Tabulka 20 – Složení běžného betonu pro betonáž patek prototypu



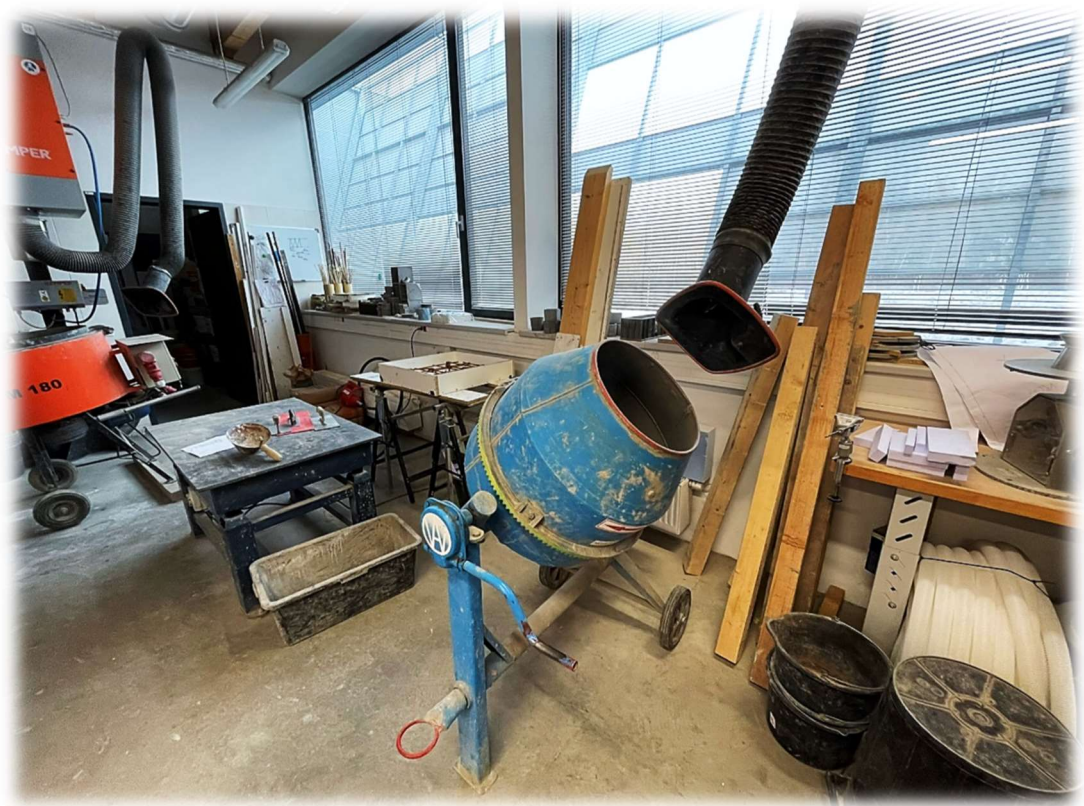
Obrázek 149 – Zkrácení výztuže pomocí úhlové brusky



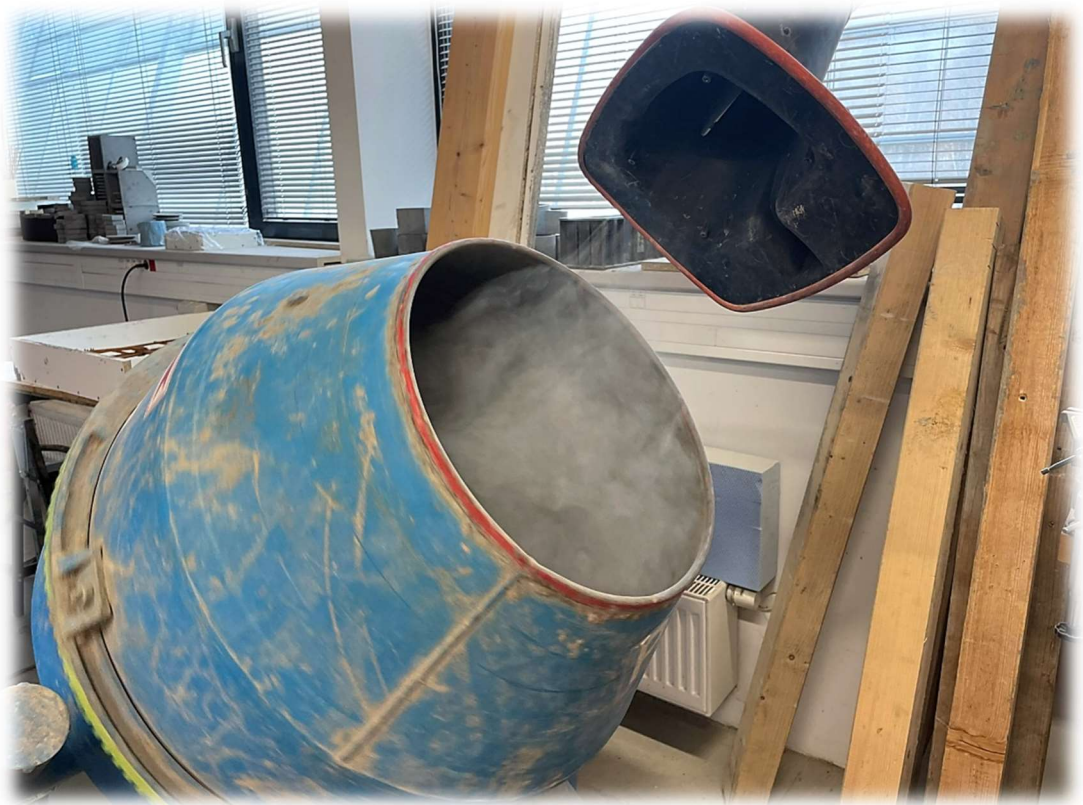
Obrázek 150 – Ohýbání startovací výztuže



Obrázek 151 – Vyztužení patky



Obrázek 152 – Stavební míchačka



Obrázek 153 – Odtah prachu při míchání směsi běžného betonu



Obrázek 154 – Betonáž první patky prototypu



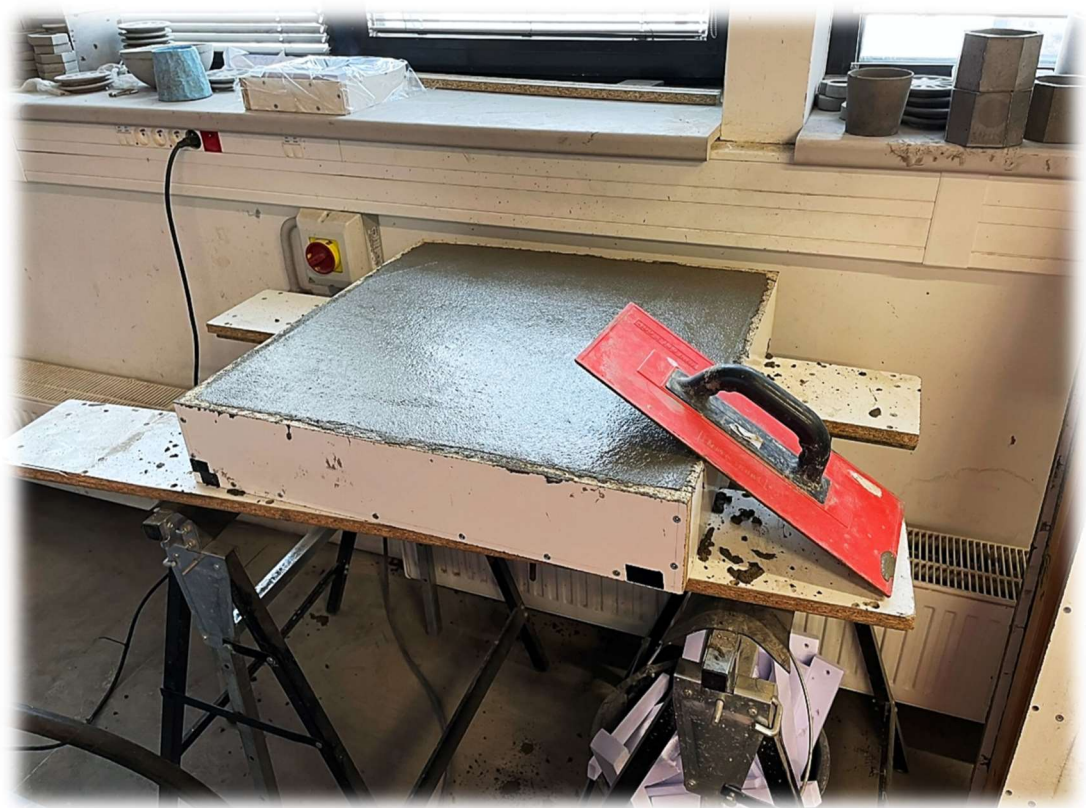
Obrázek 155 – Proces betonáže druhé patky prototypu



Obrázek 156 – Ponorný vibrátor



Obrázek 157 – Zhutněný beton patky prototypu pomocí ponorného vibrátoru



Obrázek 158 – Finální povrch po betonáži druhé patky prototypu



Obrázek 159 – Pohled na formu patky prototypu



Obrázek 160 – Patka prototypu po odbednění

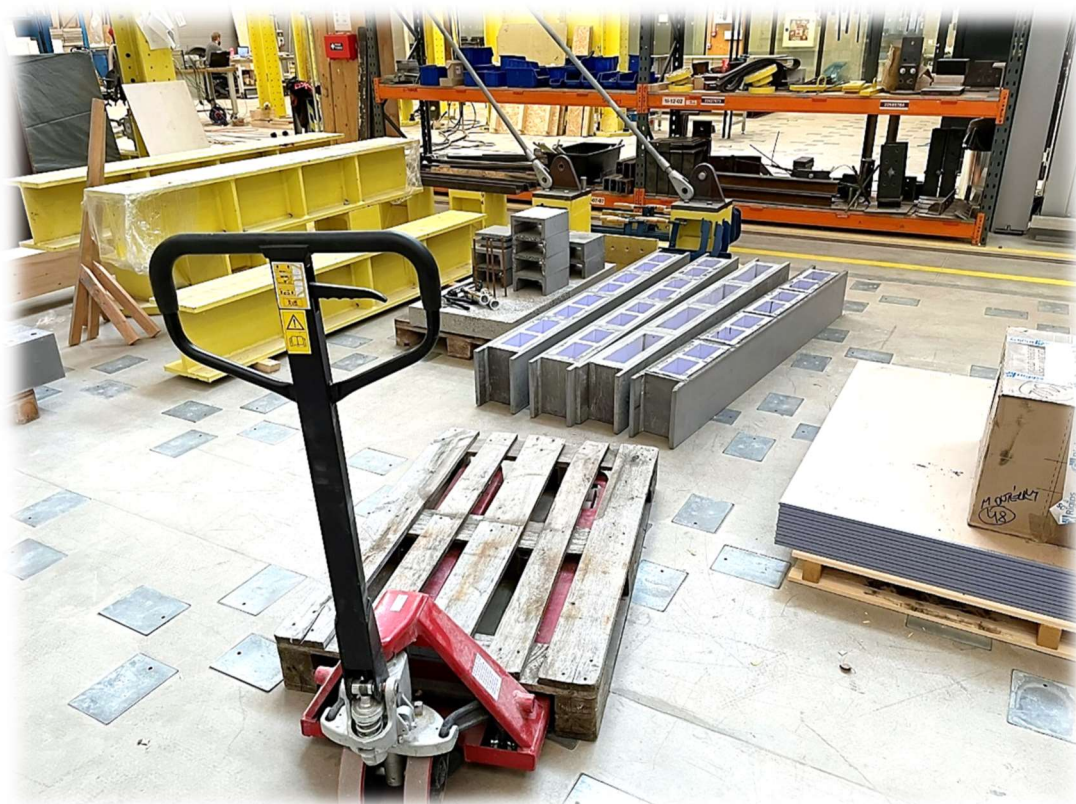


Obrázek 161 – Hotové patky prototypu

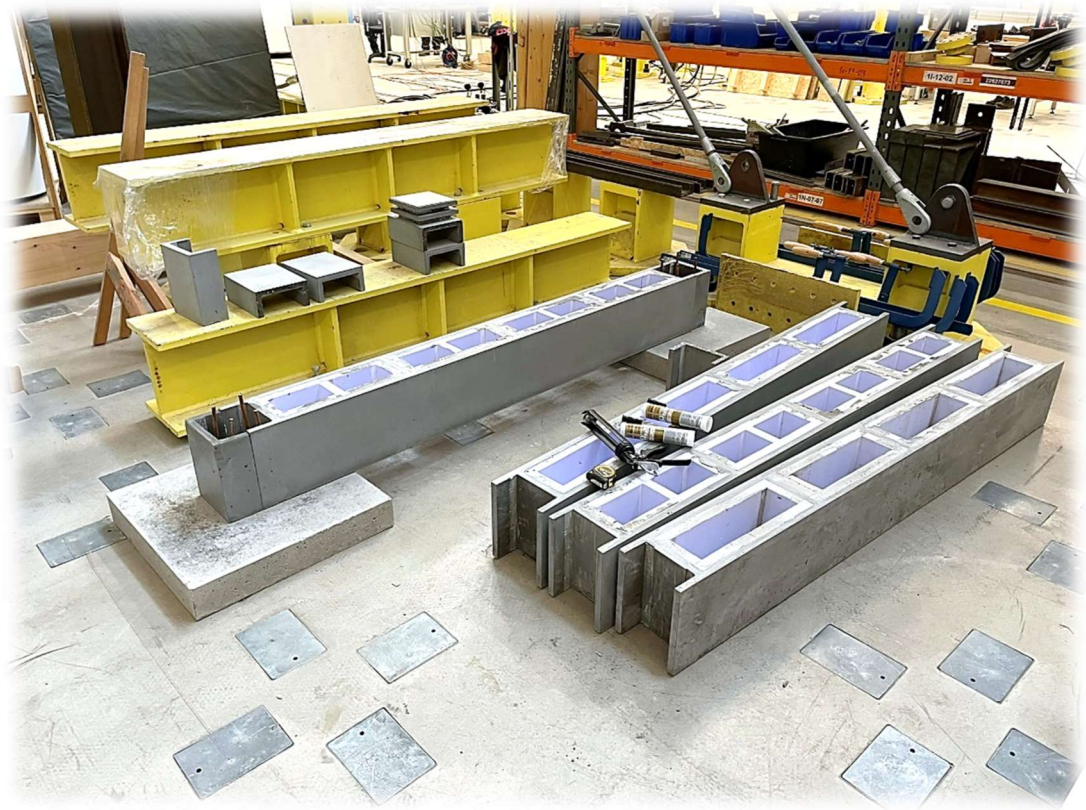
Z obrázku 161 si lze všimnout nedokonalého povrchu první patky prototypu, což je způsobeno špatným zhutněním betonu při betonáži. Nebyl zde použit ponorný vibrátor, ale hutnilo se po částech pomocí vibračního stolu, druhá patka je již hutněna ponorným vibrátorem, díky kterému je dosaženo mnohem lepšího výsledku.

6.3 Kompletace prototypu

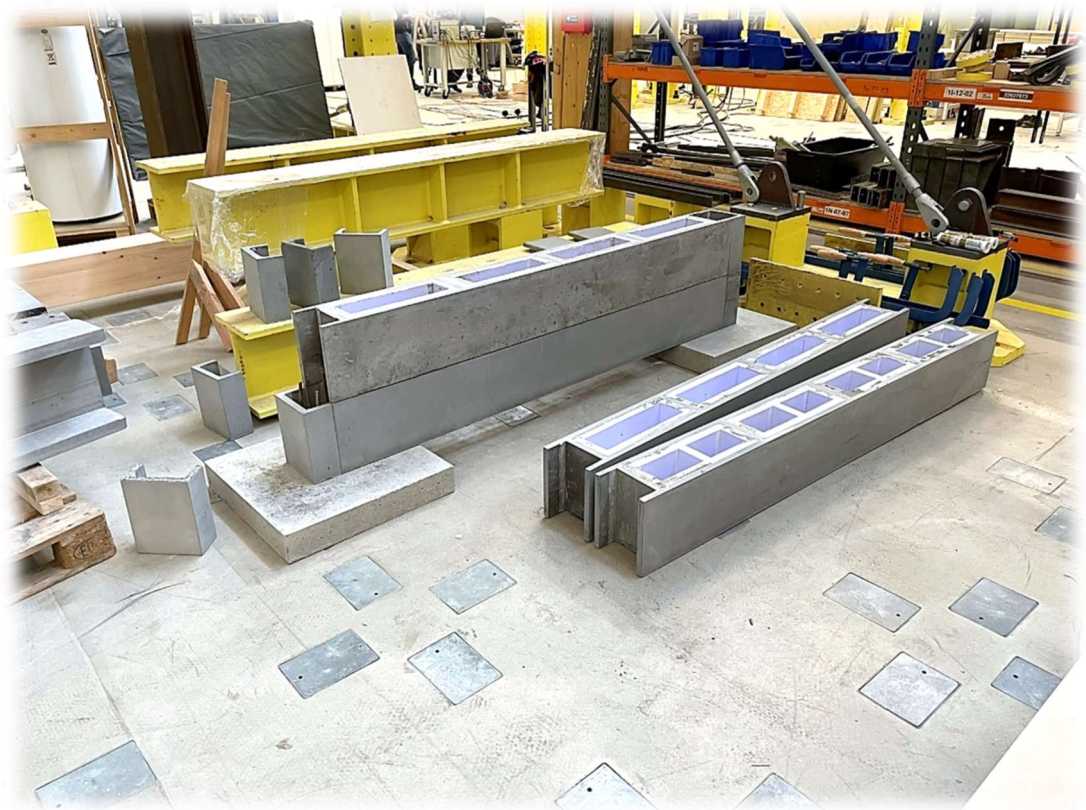
Nyní máme připravené všechny komponenty prototypu a zbývá pouze jeho kompletace. K sestavení dílců prototypu byly využity prostory haly, protože se venku nacházela 30 cm vrstva sněhu. Bohužel toto rozhodnutí s sebou nese fakt, že není možné přistoupit k betonáži vnitřních sloupků, protože je nutné prototyp po sestavení opět rozebrat. To však není velký problém, jelikož jsou dílce prototypu vcelku těžké, prototyp je stabilní i při suchém složení (pouhé sestavení dílců, bez použití jakéhokoliv lepidla).



Obrázek 162 – Manipulace s hotovými dílci prototypu



Obrázek 163 – Proces sestavování prototypu



Obrázek 164 – Proces sestavování prototypu



Obrázek 165 – Sestavený prototyp bez kompletace květináčů



Obrázek 166 – Finální podoba prototypu



Obrázek 167 – Finální podoba prototypu



Obrázek 168 – Finální podoba prototypu



Obrázek 169 – Finální podoba prototypu



Obrázek 170 – Finální podoba prototypu



Obrázek 171 – Finální podoba prototypu



Obrázek 172 – Finální podoba prototypu

Závěr

Diplomová práce představuje inovativní a perspektivní přístup k vývoji prefabrikovaných betonových oplocení. Základním cílem bylo poskytnout uživatelům novou alternativu k současné produkci, tato alternativa nejenže plní praktické účely oplocení, ale také zohledňuje estetiku a částečně i ekologii. Práce začíná identifikací nedostatků současné produkce prefabrikovaných betonových plotů a následně předkládá komplexní návrh nového systému oplocení.

Před finálním návrhem systému oplocení byla zahájena důkladná analýza zahrnující zkoušky betonových směsí s cílem identifikovat nejvhodnější poměr jednotlivých komponent směsi pro vývoj nového systému prefabrikovaného betonového oplocení. V této počáteční fázi výzkumu byly prováděny fyzikální a mechanické testy, poskytující důležité informace o pevnosti a odolnosti jednotlivých směsí.

Po úspěšném výběru optimální betonové směsi následoval statický návrh, kde bylo prokázána možnost realizace prvků o navržené tloušťce stěny. Tento krok byl velmi důležitý pro splnění požadavků na bezpečnost a odolnost v reálném prostředí.

Paralelně se statickým návrhem probíhal stavebně technický návrh, který zahrnoval praktické aspekty konstrukce. Tato fáze zajistila, že navržený systém je teoreticky proveditelný. Současně s technickým návrhem probíhal návrh designu, kde byly zkombinovány technické aspekty s estetickým designem. Tato kombinace byla klíčovým prvkem vytváření harmonické symbiózy mezi funkcí a formou, což zaručilo, že výsledný systém oplocení nejen splňuje požadavky na bezpečnost a stabilitu, ale zároveň přináší estetickou hodnotu a vizuální atraktivitu.

Průběh výzkumu vrcholí realizací prototypu systémového oplocení, který slouží jako konkrétní důkaz úspěšného dosažení stanovených cílů. Tento prototyp nejenom potvrzuje technickou proveditelnost nového řešení, ale rovněž zdůrazňuje jeho praktickou funkčnost, velkou variabilitu

a design. Zahrnutí živých rostlin do betonové konstrukce plotu představuje nejen architektonický prvek, ale i ekologicky ohleduplný koncept, který spojuje stavební konstrukci s přírodou.

Navržený systém otevírá širokou paletu nových možností výběru pro potenciální uživatele, a to nejen z hlediska estetiky, ale i v oblasti enviromentální udržitelnosti. Kombinace betonu s živými rostlinami představuje neotřelý a do jisté míry i revoluční pohled na koncept oplocení, kde tvrdé stavební materiály spolupracují s přírodou. Tato symbióza není pouze vizuálně atraktivní, ale zároveň posiluje vztah mezi lidským prostředím a přírodou, což je v dnešní době stále důležitější aspekt. Zároveň však kompletně zachovává primární funkce vyžadované od betonového oplocení, které jsou na stejné úrovni, jako u jiných betonových plotů, avšak navržený plot oplývá navíc přívětivým vzhledem, skvělou funkčností a variabilitou.

Diplomová práce tak přináší nejen technickou inovaci, ale i inspiraci pro další vývoj a výzkum v oblasti integrace přírodních prvků do stavebních konstrukcí, s ohledem na udržitelnost a estetický rozvoj.

Použitá literatura

- [1] *Wikipedie*. Online. Wikipedie. 2023.
Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org>. [cit. 2023-12-28].
- [2] *Historická fotografie Berlínské zdi*. Online. In: ČTK Fotobanka profimedia. (b. r.).
Dostupné z:
<https://www.profimedia.cz>. [cit. 2023-10-06].
- [3] WOLF, Helmut J. *Historická fotografie stavby Berlínské zdi*. online. In: *Bundesarchiv*. 1961.
Dostupné z:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bundesarchiv__Bild__173-1321,_Berlin,_Mauerbau.jpg. [cit. 2023-10-07].
- [4] *Betonový plot věznice Všehrdy: Výřez z panoramatického zobrazení map*. Online. In: Mapy.cz. 2021.
Dostupné z:
<https://mapy.cz/zakladni?pano=1&pid=76610103&newest=1&yaw=0.895&fov=1.257&pitch=0.058&x=13.4600459&y=50.4183235&q=v%C4%9Bznice&z=19&base=ophoto>. [cit. 2023-10-08].
- [5] *Fotografie betonového plotu s profilací desek*. Online. In: Betonové ploty LKB. 2023.
Dostupné z:
<https://www.lkb-ploty.cz/betonove-ploty>. [cit. 2023-10-10].
- [6] *Fotografie betonového H sloupku*. Online. In: ČESKÉ PLOTY. 2023.
Dostupné z:
https://www.ceskeploty.cz/betonovy-plot/betonovy-sloupek-hladky/betonovy-sloupek-prirodni/betonovy-sloupek-exclusive-prubezny-prirodni-2000-mm-nadzemni-vyska-2000-mm.html?gclid=Cj0KCQjw7JOpBhCfARIsAL3bobeLNTp__cDj-D3cm7z9Q9wd8REFOOA9b5o5xnMH__2nI5ZJvhOoOCNWQaAjivEALw__wcB. [cit. 2023-10-10].
- [7] *Fotografie betonové desky plotu*. Online. In: ČESKÉ PLOTY. 2023.
Dostupné z:
<https://www.ceskeploty.cz/betonovy-plot/betonove-panely-jednostranne/betonovy-panel-exclusive-stipany-kamen-2-str-prirodni-2000x400x40-mm.html>. [cit. 2023-10-10].
- [8] *Fotografie betonového plotu s hladkými deskami*. Online. In: DITON. 2023.
Dostupné z:
<https://www.diton.cz/kategorie/ploty-zdi-a-strisky/ploty-plotove-deskove-systemy/plotovy-system-modern#lightbox-inspiration-3>. [cit. 2023-10-10].
- [9] *Fotografie plotu z betonových plotovek*. Online. In: DITON. 2023.
Dostupné z:

- <https://www.diton.cz/kategorie/ploty-zdi-a-strisky/zdici-a-plotove-tvarnice/plotove-tvarnice-s-fazetou>. [cit. 2023-10-10].
- [10] VETCHÝ, Jan. Fotografie realizace plotu z betonových plotovek. online. In: *MCT*. 2015.
Dostupné z:
<https://www.mct.cz/soubor/betonove-ploty/>. [cit. 2023-10-10].
- [11] *Fotografie květináče a betonového plotu*. Online. In: ČESKÉ PLOTY. 2023.
Dostupné z:
<https://www.ceskeploty.cz/ostatni/zahradni-doplanky/zavesny-hak-pro-kvetinace-zinek.html>. [cit. 2023-10-10].
- [12] *Fotografie plotové tvarovky s květinami*. Online. In: BEST. 2023.
Dostupné z:
<https://www.best.cz/best-vario/prirodni/VARCO1>. [cit. 2023-10-10].
- [13] Zákon č. 183/2006 Sb.: Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon). In: . 2006.
- [14] *Fotografie interiéru budovy NTK*. Online. In: HEIDELBERG CEMENT. 2023.
Dostupné z:
<https://www.heidelbergcement.cz/cs/referencni-stavby/narodni-technicka-knihovna>. [cit. 2023-10-16].
- [15] *Fotografie vegetační dlažby*. Online. In: BEST. 2023.
Dostupné z:
<https://www.best.cz/best-akvagrass/colormix-brilant>. [cit. 2023-10-18].
- [16] AiTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vydání. Betonové stavitelství. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-867-6939-9.
- [17] *Fotografie porušení vláknobetonu*. Online. In: SIKA. 2023.
Dostupné z:
<https://irl.sika.com/en/construction/concrete-admixtures/fibre-reinforced-concrete.html>. [cit. 2023-10-14].
- [18] *Fotografie výztužných vláken*. Online. In: KRAMPEHAREX. 2023.
Dostupné z:
<http://www.krampeharex.cz/vlakna-do-betonu>. [cit. 2023-10-17].
- [19] KRÁTKÝ, Jiří; HANZLOVÁ, Hana; KOHOUTOVÁ, Alena; VAŠKOVÁ, Jitka a VODIČKA, Jan. *Experimenty a analýza chování konstrukčního vláknobetonu*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04990-7.
- [20] Act-3D, *Program Lumion Student*. 12.5. 2022.
- [21] GRAITEC, *Program CADKON: Stavební konstrukce*. 2024 Student. 2023.
- [22] KAFKOVÁ, Eliška. *Vliv různých výztužných vláken na způsob porušení textilního betonu*. Bakalářská práce. Praha: ČVUT Fakulta stavební, 2021.
- [23] Nemetschek Group, *Program SCIA Engineer*. Verze 21.1. 2021.

- [24] ČSN EN 12390-3 (731302), *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 04/2020. SVAZ VÝROBCŮ BETONU ČR.
- [25] ČSN EN 12390-5 (731302), *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. 07/2020. SVAZ VÝROBCŮ BETONU ČR.
- [26] ČSN ISO 1920-10 (731319), *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. 07/2016. SVAZ VÝROBCŮ BETONU ČR.
- [27] ČSN 73 1371 (731371), *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 09/2011. TECHNICKÝ A ZKUŠEBNÍ ÚSTAV STAVEBNÍ PRAHA S. P.
- [28] *Fotografie průsakové hadice Gardena*. Online. In: HORNBAACH. 2023.
Dostupné z:
<https://www.hornbach.cz/p/prusakova-zavlazovaci-hadice-gardena-delka-15-m-vc-regulacniho-ventilu/1622215/>. [cit. 2023-11-21].
- [29] *Fotografie Levandule lékařské*. Online. In: Sieberz. 2023.
Dostupné z:
<https://www.sieberz.cz/okrasne-rostliny/trvalky/stredne-vysoke-a-vysoke-trvalky/837/levandule-lekarska-modrofialova-6>. [cit. 2023-12-03].

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Historická fotografie Berlínské zdi [2]	11
Obrázek 2 – Historická fotografie z usazování betonových dílců Berlínské zdi [3]	11
Obrázek 3 – Betonový plot věznice Všehrdu [4]	12
Obrázek 4 – Fotografie současného prefabrikovaného betonového plotu s příkladem profilace vnějšího povrchu desek [5]	13
Obrázek 5 – Sloupek [6]	13
Obrázek 6 – Deska profilovaná [7]	13
Obrázek 7 – Fotografie současného prefabrikovaného betonového plotu s hladkými deskami [8]	14
Obrázek 8 – Fotografie zděného oplocení z betonových plotových tvárnic [9]	15
Obrázek 9 – Fotografie zděného plotu z betonových tvárnic v procesu realizace [10]	15
Obrázek 10 – Fotografie příkladu realizace betonového plotu ve spojení se zelení [11]	18
Obrázek 11 – Inspirace kombinace betonu a zeleně [12]	18
Obrázek 12 – Pohledový beton v Národní technické knihovně (NTK) [14]	20
Obrázek 13 – Fotografie povrchu HPC (květináč před budovou UCEEB ČVUT)	21
Obrázek 14 – Fotografie vegetační dlažby [15]	22
Obrázek 15 – Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem [16]	25
Obrázek 16 – Fotografie vysokohodnotného vláknobetonu při porušení [17]	28
Obrázek 17 – Skleněná vlákna [18]	29
Obrázek 18 – Polypropylenová vlákna [18]	29
Obrázek 19 – Ocelová vlákna s profilací [18]	30
Obrázek 20 – Ocelová mikrovlákná [18]	30
Obrázek 21 – Návrh systému prefabrikovaného betonového plotu s vnitřním sloupkem z oceli [20]	32
Obrázek 22 – Návrh systému prefabrikovaného betonového plotu s vnitřním sloupkem ze ŽB [20]	33
Obrázek 23 – Prvotní návrh možné podoby květináčů v plotu, princip řešení [20]	34
Obrázek 24 – Základní dílec výšky 250 mm, šířky 200 mm, délky 2 m [20]	35
Obrázek 25 – Dílec s květináči výšky 250 mm, šířky 200 mm, délky 2 m [20]	35
Obrázek 26 – Doplnkové dílce dlouhé 1 m [20]	35
Obrázek 27 – Železobetonový monolitický sloup s drážkou vytvořenou díky zazubení konce dílců [20]	36
Obrázek 28 – Koncový dílec [20]	36
Obrázek 29 – Boxy z XPS pro květináče [20]	37
Obrázek 30 – Dílec s osazenými rostlinami jako vzor [20]	37
Obrázek 31 – Schéma půdorysu základního dílce s rozměry v mm [21]	37
Obrázek 32 – Graf závislosti deformace na zatížení při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu na trámečcích 40x40x160 mm [22]	40
Obrázek 33 – Model základního dílce [23]	41
Obrázek 34 – Ostatní stálé zatížení aplikované na základní dílec [23]	41
Obrázek 35 – Zatížení větrem aplikované na základní dílec [23]	42

Obrázek 36 – Zatížení teplotou aplikované na základní dílec [23]	42
Obrázek 37 – Zatížení dopadem fotbalového míče aplikované na základní dílec [23]	43
Obrázek 38 – 3D deformace základního dílce [23].....	43
Obrázek 39 – Výsledný návrhový moment m_{xD+} [23].....	44
Obrázek 40 – Výsledný návrhový moment m_{xD-} [23].....	44
Obrázek 41 – Výsledný návrhový moment m_{yD+} [23].....	45
Obrázek 42 – Výsledný návrhový moment m_{yD-} [23].....	45
Obrázek 43 – Výsledný návrhový moment m_{cD+} [23].....	46
Obrázek 44 – Výsledný návrhový moment m_{cD-} [23].....	46
Obrázek 45 – Cement CEM I 42,R.....	52
Obrázek 46 – Technický písek.....	53
Obrázek 47 – Křemičitý úlet Masterlife MS 140 U	53
Obrázek 48 – Křemenná moučka	54
Obrázek 49 – Ocelová mikrovlákná MasterFiber 482	54
Obrázek 50 – Superplastifikátor MasterGlenium ACE 300	55
Obrázek 51 – Voda	55
Obrázek 52 – Příprava forem.....	59
Obrázek 53 – Aplikace odbedňovacího oleje do forem.....	59
Obrázek 54 – Míchačka s nuceným oběhem spolu s průmyslovým odtahem prachu	60
Obrázek 55 – Suroviny vysypané do míchačky.....	61
Obrázek 56 – Ocelová mikrovlákná přidané na samém závěru míchání.....	61
Obrázek 57 – Vypouštění hotové betonové směsi.....	62
Obrázek 58 – Vybetonované formy zkušebních těles.....	62
Obrázek 59 – Krychle 100x100x100 mm a krychle 150x150x150 mm po 28 dnech	63
Obrázek 60 – Trámce 100x100x400 mm po 28 dnech.....	64
Obrázek 61 – Trámečky 40x40x160 mm po 28 dnech.....	64
Obrázek 62 – Měření rozměrů krychle 100x100x100 mm posuvným měřítkem.....	67
Obrázek 63 – Vážení krychle 100x100x100 mm přesnou váhou	67
Obrázek 64 – Umístění krychle 150x150x150 mm do lisu	68
Obrázek 65 – Porušení krychle 150x150x150 mm	68
Obrázek 66 – Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu s tříbodovým uspořádáním [25].....	72
Obrázek 67 – Zkoušený trámeček 40x40x160 mm před zatěžováním	73
Obrázek 68 – Zkoušený trámeček 40x40x160 mm při porušení (po zatěžování)	73
Obrázek 69 – Destrukce trámečku 40x40x160 mm	74
Obrázek 70 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC I, trámečky 40x40x160 mm	77
Obrázek 71 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC I + drátky trámečky 40x40x160 mm	77
Obrázek 72 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC II, trámečky 40x40x160 mm	78
Obrázek 73 – Graf závislosti průhybu na zatížení pro směs HPC II + drátky, trámečky 40x40x160 mm	78

Obrázek 74 – Vážení zkoušeného trámce 100x100x400 mm.....	80
Obrázek 75 – Osazené tenzometry měřící přetvoření.....	81
Obrázek 76 – Zkoušený trámec 100x100x400 mm s tenzometry umístěný v lisu....	82
Obrázek 77 – Zkoušený trámec s viditelnými místy měření na dlouhé straně	85
Obrázek 78 – Zkoušený trámec, měření na čtvercových plochách.....	86
Obrázek 79 – Měřič ultrazvukových vln Vikasonic a ultrazvukový gel	87
Obrázek 80 – Statický model sloupku (vlevo) a zatížení od větru (vpravo)	93
Obrázek 81 – Vnitřní síly sloupku (zleva: normálová síla, posouvající síla a ohybový moment).....	94
Obrázek 82 – Rozložení napětí v průřezu sloupku	94
Obrázek 83 – Půdorys navrženého vnitřního sloupku.....	95
Obrázek 84 – Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu se čtyřbodovým uspořádáním [25].....	96
Obrázek 85 – Příprava forem pro betonáž destiček	97
Obrázek 86 – Betonáž destiček	97
Obrázek 87 – Betonáž destiček	98
Obrázek 88 – Hotové destičky	98
Obrázek 89 – Destička umístěná v lisu s využitím přípravku.....	99
Obrázek 90 – Porušení destičky.....	99
Obrázek 91 – Porušená sada zkoušených destiček.....	100
Obrázek 92 – Výsek příčného řezu plotem vedeného v místě sloupku.....	103
Obrázek 93 – Výsek podélného řezu plotu	104
Obrázek 94 – Výsek půdorysu plotu.....	105
Obrázek 95 – Zvětšený výsek půdorysu plotu.....	105
Obrázek 96 – Přiblížený výsek příčného řezu květináčového dílce.....	106
Obrázek 97 – Výsek příčného řezu plotu vedeného v místě květináče	107
Obrázek 98 – Výsek podélného řezu s květináči.....	108
Obrázek 99 – Průsaková hadice Gardena [28]	109
Obrázek 100 – Průsaková hadice Gardena v provozu [28].....	109
Obrázek 101 – Venkovní květináč z HPC s uvařenými (spálenými) rostlinami.....	110
Obrázek 102 – Venkovní květináč z HPC s uvařenými (spálenými) rostlinami-detail	110
Obrázek 103 – Zjednodušený model v ustáleném stavu, elektrická analogie.....	111
Obrázek 104 – Zjednodušený model v ustáleném stavu – rozepsání, elektrická analogie	112
Obrázek 105 – Schéma pro ekvivalentní teplotu (rovnocenná sluneční teplota) , elektrická analogie.....	113
Obrázek 106 – Schéma pro výpočet ekvivalentní teploty, elektrická analogie.....	113
Obrázek 107 – Fotografie Levandule lékařské [29].....	116
Obrázek 108 – Základní dílec délky 1996 mm.....	117
Obrázek 109 – Dílec s květináči (na dně lze pozorovat odtokové otvory)	117
Obrázek 110 – Dílec s otvory umístovaný nad dílec s květináči	118
Obrázek 111 – Základní dílec s koncovými dílci a těsněním (černé prvky).....	118
Obrázek 112 – Základní dílec s koncovými dílci a těsněním - kompletace.....	118

Obrázek 113 – Napojení základních dílců v jedné řadě s těsněním ve svislých spárách	119
Obrázek 114 – Pohled na příklad stěny plotu o výšce 2 m.....	119
Obrázek 115 – Pohled na příklad stěny vysoké 2 m s dílcem pro květináče	119
Obrázek 116 – Pohled na stěnu s osazeným květináčem – přiblížení.....	120
Obrázek 117 – Čelní pohled na prázdné květináče.....	120
Obrázek 118 – Pohled na stěnu s květináči	121
Obrázek 119 – Čelní pohled na květináče	121
Obrázek 120 – Zamýšlená podoba realizovaného prototypu výseku oplocení	122
Obrázek 121 – Nařezané dílce lamina pro sestavení formy základního dílce	123
Obrázek 122 – Kompletace vnější formy základního dílce	124
Obrázek 123 – Hotová vnější forma základního dílce.....	124
Obrázek 124 – Spojování nařezaných desek XPS.....	125
Obrázek 125 – Hotový vnitřní box pro formu základního dílce.....	125
Obrázek 126 – Nařezané vnitřní krajní prvky z XPS pro formu základního dílce.....	125
Obrázek 127 – Řezačka polystyrénu s odporovým drátem.....	126
Obrázek 128 – Sestavení vnitřních boxů z XPS pro formu základního dílce.....	126
Obrázek 129 – Finální podoba formy základního dílce.....	126
Obrázek 130 – Vnitřní prvky z XPS pro formu koncových dílců.....	127
Obrázek 131 – Řezání lamina pro vnější formu koncových dílců.....	127
Obrázek 132 – Kompletace forem pro koncové dílce	127
Obrázek 133 – Vnitřní box z XPS pro formu dílce s květináči	128
Obrázek 134 – Finální podoba formy pro dílec s květináči a pro koncové dílce.....	128
Obrázek 135 – Proces výroby formy pro stříšku	129
Obrázek 136 – Hotová forma pro stříšku.....	129
Obrázek 137 – Vnější forma pro patku (bez vyvrtných otvorů pro výztuž).....	130
Obrázek 138 – První betonáž základního dílce prototypu	132
Obrázek 139 – První betonáž základního dílce prototypu	133
Obrázek 140 – Příprava formy pro druhou betonáž základního dílce prototypu.....	133
Obrázek 141 – Druhá betonáž základního a koncových dílců prototypu	134
Obrázek 142 – Třetí betonáž základního a koncových dílců prototypu.....	134
Obrázek 143 – Povrch základního dílce prototypu po odbednění boku.....	135
Obrázek 144 – Základní a koncový dílec prototypu do odstranění vnější formy	135
Obrázek 145 – Příprava formy pro betonáž dílce s květináči a koncových dílců prototypu	136
Obrázek 146 – Betonáž stříšky prototypu	137
Obrázek 147 – Hotová stříška prototypu.....	137
Obrázek 148 – Odbedněné dílce prototypu.....	138
Obrázek 149 – Zkrácení výztuže pomocí úhlové brusky	139
Obrázek 150 – Ohýbání startovací výztuže.....	139
Obrázek 151 – Vyztužení patky.....	140
Obrázek 152 – Stavební míchačka.....	140
Obrázek 153 – Odtah prachu při míchání směsi běžného betonu	141
Obrázek 154 – Betonáž první patky prototypu	141
Obrázek 155 – Proces betonáže druhé patky prototypu	142

Obrázek 156 – Ponorný vibrátor	142
Obrázek 157 – Zhutněný beton patky prototypu pomocí ponorného vibrátoru	143
Obrázek 158 – Finální povrch po betonáži druhé patky prototypu	143
Obrázek 159 – Pohled na formu patky prototypu	144
Obrázek 160 – Patka prototypu po odbednění.....	144
Obrázek 161 – Hotové patky prototypu.....	145
Obrázek 162 – Manipulace s hotovými dílci prototypu.....	146
Obrázek 163 – Proces sestavování prototypu	147
Obrázek 164 – Proces sestavování prototypu	147
Obrázek 165 – Sestavený prototyp bez kompletace květináčů.....	148
Obrázek 166 – Finální podoba prototypu.....	148
Obrázek 167 – Finální podoba prototypu.....	149
Obrázek 168 – Finální podoba prototypu.....	149
Obrázek 169 – Finální podoba prototypu.....	150
Obrázek 170 – Finální podoba prototypu.....	150
Obrázek 171 – Finální podoba prototypu.....	151
Obrázek 172 – Finální podoba prototypu.....	151

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Vzorové složení HPC [22].....	38
Tabulka 2 – Výsledky zkoušek trámečků (40x40x160 mm) v tahu za ohybu, v tlaku na úlomcích trámečků a v tlaku a krychlích o hraně délky 100 mm [22].....	40
Tabulka 3 – složení HPC I.....	50
Tabulka 4 – složení HPC I + ocelová mikrovlákná.....	51
Tabulka 5 – složení HPC II.....	51
Tabulka 6 – složení HPC II + ocelová mikrovlákná.....	51
Tabulka 7 – Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku pro krychle 100x100x100 mm.....	69
Tabulka 8 – Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku pro krychle 150x150x150 mm.....	69
Tabulka 9 – Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tlaku stanovených zkouškou v tlaku na charakteristickou pevnost v tlaku pro krychle 100x100x100 mm.....	70
Tabulka 10 – Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tlaku stanovených zkouškou v tlaku na charakteristickou pevnost v tlaku pro krychle 150x150x150 mm.....	70
Tabulka 11 – Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu trámečků 40x40x160mm.....	75
Tabulka 12 – Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tahu za ohybu stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou pevnost v tahu pro trámečky 40x40x160 mm.....	76
Tabulka 13 – Tabulka přepočtu hodnot síly při porušení stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou sílu při porušení pro trámečky 40x40x160 mm.....	76
Tabulka 14 – Výsledky zkoušky statického modulu pružnosti.....	84
Tabulka 15 – Výsledky zkoušky dynamického modulu pružnosti.....	88
Tabulka 16 – složení HPC I + ocelová mikrovlákná.....	90
Tabulka 17 – Výsledky zkoušky v tahu za ohybu – čtyřbodové uspořádání.....	101
Tabulka 18 - Tabulka přepočtu výsledných hodnot pevností v tahu za ohybu stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou pevnost v tahu pro destičky 20x100x400 mm.....	101
Tabulka 19 - Tabulka přepočtu hodnot síly při porušení stanovených zkouškou v tahu za ohybu na charakteristickou sílu při porušení pro destičky 20x100x400 mm.....	101
Tabulka 20 – Složení běžného betonu pro betonáž patek prototypu.....	138