

VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY ŽELEZOBETONOVÝCH NOSNÍKŮ

EXPERIMENTAL TESTING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

Bc. Miroslav Raček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.

Ostrava 2021

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Miroslav Raček

Studijní program: N0732A260009 Stavební inženýrství - Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma:

Experimentální zkoušky železobetonových nosníků
Experimental testing of reinforced concrete beams

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce zpracujete experimentální program zahrnující železobetonové nosníky pro konstrukční použití. Ověřte také možnost použití drátkobetonu u vybraných nosníků. Součástí práce bude také stručný souhrn současného stavu standardů pro navrhování a testování betonu a betonových konstrukcí. V experimentálním programu se také zaměříte na specializované zkoušky pro použitý beton a betonářskou výztuž. Cílem práce je provést podrobné vyhodnocení statických zatěžovacích zkoušek a statistického vyhodnocení mechanických vlastností použitých materiálů (průměr, směrodatná odchylka, atd.). Experimentální program bude zahrnovat také využití vybraných možností nedestruktivního testování a diagnostiky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN 1992-1-1 – Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI 2006
- [2] ČSN 73 2030 Statické zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019
- [3] Model Code 2010 – Final Draft, fib, Bulletin No 65 and 66. 1-2. 2012.
- [4] RILEM (2011): About Rilem [Online], url: <https://www.rilem.net> [Accessed on 4 May 2011].
- [5] <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18218-nelinearni-analyza-zelezobetonoveho-nosniku-bez-smykove-vyztuze-na-zaklade-charakteristik-betonu>
- [6] ČSN P 732350: Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015.
- [7] TP FC 1-1 Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1: Zkoušení vláknobetonu, vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagram vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí; ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra betonových a zděných konstrukcí, Praha 2007.
- [8] Krátký, J., Trtík, K., Vodička, J. Drátkobetonové konstrukce, Informační centrum ČKAIT ve spolupráci s Českou společností pro beton a zdivo, Praha 1999

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave

.....

Podpis študenta

Prehlasujem, že:

- *som bol oboznámený s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, najmä § 35 – použitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a použitia diela školského a § 60 – školské dielo*
- *beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nezárobkovo ku svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu použiť (§ 35 odst.3).*
- *súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu. Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.*
- *bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s opravením použiť toto dielo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.*
- *bolo zjednané, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu alebo poskytnutie licencií k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do jej skutočnej výšky).*
- *beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím s jej zverejnením podľa zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.*

V Ostrave

Pod'akovanie

Týmto by som chcel poďakovať môjmu vedúcemu diplomovej práce Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D. za vedenie, priebežné konzultácie a pomoc pri realizácii mojej diplomovej práce, Ing. Radke Hédlovej a Ing. Davidovi Bujdošovi za odbornú pomoc a spoluprácu pri realizácii diagnostických skúšok. Experimentálny program a práce boli podporované z prostriedkov koncepčného rozvoja vedy, výskumu a inovácií pridelených VŠB-TUO Ministerstvom školstva, mládeže a telovýchovy ČR.

Abstrakt

Raček, M. Experimentální zkoušky železobetonových nosníků. Ostrava, 2021
Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Vedúci práce: Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.

Cieľom diplomovej práce je experimentálne skúšanie železobetónových nosníkov. Konkrétne sa budú skúšať mechanické vlastnosti na dvoch železobetónových nosníkoch, prvý s rozmermi 4500 x 400 x 150 mm a druhý s rozmermi 6000 x 400 x 165 mm. V teoretickej časti diplomovej práce sú stručne uvedené základné informácie o železobetóne a výstuži spolu s možnosťami ich testovania. V rámci experimentálnej časti boli prevedené skúšky pevnosti v tlaku na jadrových vývrtoch, identifikácia výstuže, ťahová pevnosť výstuže, sledovanie vývoju trhlin a odolnosť voči CHRL. Tieto skúšky sú ďalej doplnené o nedeštruktívne testovanie nosníkov Schmidovým tvrdomerom na zistenie pevnosti a ultrazvukovou impulzívnou metódou na zistenie dynamického modulu pružnosti.

Kľúčové slová

Železobetón, výstuž, mechanické vlastnosti, diagnostika, jadrový vývrt, nosník

Abstract

Raček, M. Experimental testing of reinforced concrete beams. Ostrava, 2021 Diploma thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Thesis supervisor: Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.

The aim of the diploma thesis is experimental testing of reinforced concrete beams. Specifically, the mechanical properties will be tested on two reinforced concrete beams, the first with dimensions 4500 x 400 x 150 mm and the second with dimensions 6000 x 400 x 165 mm. The theoretical part of the thesis briefly provides basic information about reinforced concrete and reinforcement, along with the possibilities of testing them. In the experimental part, compressive strength tests on concrete bores, reinforcement identification, tensile strength of reinforcement, monitoring of crack development and resistance to CHRL were performed. These tests are further supplemented by non-destructive testing of beams with a Schmidt hardness tester to determine hardness and an ultrasonic impulsive method to determine the dynamic modulus of elasticity.

Keywords

Reinforced concrete, reinforcement, mechanical properties, diagnostics, concrete bore, beam

Obsah

Úvod	10
1 Rozdelenie betónu	11
1.1 <i>Betón prostý</i>	11
1.2 <i>Železobetón</i>	12
1.3 <i>Predpäťý betón</i>	13
1.4 <i>Betón s rozptýlenou výstužou</i>	15
2 Železobetón	16
2.1 <i>Technológia výroby</i>	17
2.2 <i>Poruchy vystuženého betónu</i>	17
2.2.1 <i>Korózia výstuže</i>	17
2.2.1.1 <i>Karbonatácia betónu</i>	17
2.2.1.2 <i>Prenikanie chloridov do konštrukcie</i>	18
2.2.2 <i>Vylúhovanie cementovej pasty</i>	19
2.2.3 <i>Striedavé zmrazovanie a rozmrazovanie</i>	19
2.2.4 <i>Pôsobenie fyzikálnych vplyvov</i>	20
2.2.5 <i>Alkalicko kremičitá reakcia</i>	21
2.3 <i>Diagnostika železobetónu</i>	22
2.3.1 <i>Vybrané nedeštruktívne metódy</i>	23
2.3.1.1 <i>Ultrazvuková impulzívna metóda</i>	24
2.3.1.2 <i>Elektromagnetické indikátory výstuže</i>	25
2.3.1.3 <i>Stanovenie tvrdosti betónu Schmidovým tvrdomerom</i>	26
2.3.2 <i>Vybrané semideštruktívne metódy</i>	27
2.3.2.1 <i>Jadrové vývrty</i>	27
2.3.3 <i>Vybrané deštruktívne metódy</i>	29
2.3.3.1 <i>Sekané sondy</i>	29
2.3.3.2 <i>Pevnosť v tlaku na jadrových vývrtoch</i>	30
2.3.3.3 <i>Mechanické vlastnosti výstuže</i>	31
2.3.3.4 <i>Odolnosť voči mrazu a CHRL</i>	31
Výstuž	33
2.4 <i>Vlastnosti</i>	33
2.4.1 <i>Medza klzu</i>	33

2.4.2	Ťažnosť.....	33
2.4.3	Ohýbatelnosť	33
2.4.4	Pracovný diagram ocele.....	34
3	Výsledky skúšok železobetónových nosníkov a betonárskej výstuže	35
3.1	<i>Sledovanie vývoju trhlín</i>	<i>35</i>
3.2	<i>Pevnosť v tlaku.....</i>	<i>41</i>
3.2.1	<i>Lokalizácia výstuže</i>	<i>42</i>
3.2.2	<i>Odber a úprava vzoriek.....</i>	<i>43</i>
3.2.3	<i>Skúšanie jadrových vývrtov na pevnosť v tlaku.....</i>	<i>46</i>
3.3	<i>Identifikácia výstuže.....</i>	<i>47</i>
3.4	<i>Skúška pevnosti výstuže ťahom</i>	<i>50</i>
3.5	<i>Overenie možnosti použitia drátkobetónu pre železobetónové nosníky</i>	<i>53</i>
3.6	<i>Objemová hmotnosť</i>	<i>55</i>
3.7	<i>Určenie pevnosti v tlaku nosníkov Schmidtovým tvrdomerom.....</i>	<i>56</i>
3.8	<i>Dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzívnou metódou</i>	<i>58</i>
3.9	<i>Odolnosť betónu proti CHRL</i>	<i>59</i>
4	Záver	64
	Zoznam použitej literatúry:	66
	Zoznam obrázkov	70
	Zoznam grafov	73

Úvod

Cieľom diplomovej práce je experimentálne skúšanie a diagnostika železobetónových nosníkov. V práci sa budú zisťovať a vyhodnocovať mechanické vlastnosti dvoch nosníkov prvý s rozmermi 4500 x 400 x 150 mm, druhý s rozmermi 6000 x 400 x 165 mm. Statické zaťažovacie skúšky budú tiež doplnené vybranými nedeštruktívnymi skúškami a overí sa aj možnosť použitia drátkobetónu na železobetónových nosníkoch.

Betón ako stavebný materiál patrí v stavebníctve medzi najpoužívanejšie stavebné materiály. Venuje sa mu veľká pozornosť vo výskume v rámci výskumných úloh a organizácií, ktoré vydávajú odporúčania. Medzi najznámejšie odporúčania patrí Model Code 1990 [1] a jeho aktualizovaná verzia Model Code 2010 [2]. Uvedené odporúčania sú základom pre súčasné platné návrhové štandardy, ktoré označujeme Eurokódy. Pre betón je to konkrétne EC2 [3] alebo pre Slovensko [4]. Pre návrh betónových a železobetónových konštrukcií je potom podstatné, že musí dosahovať dostatočnú spoľahlivosť pri zohľadnení neistôt návrhu [5],[6].

V prvej teoretickej časti diplomovej práce je stručne popísané rozdelenie betónu podľa rôznych kritérií a bližšie sa potom zameriava na informácie ohľadom železobetónu a výstuže. V práci sú uvedené základné informácie o železobetóne, technológia výroby a najčastejšie poruchy železobetónu spolu s príčinami vzniku a ich následkami. Ďalej sa tu popisujú najdôležitejšie vlastnosti výstuže a uvedené sú aj vybrané diagnostické skúšky s postupom skúšania.

Druhá praktická časť diplomovej práce zahrňuje skúšanie mechanických vlastností konkrétnych nosníkov. Skúšať sa bude pevnosť v tlaku na jadrových vývrtoch, identifikuje sa množstvo, rozloženie a druh výstuže použitej v nosníkoch, ťahová pevnosť výstuže, bude sa sledovať vývoj trhlin pri statickom zaťažovaní nosníkov, overí sa možnosť použitia drátkobetónu na železobetónových nosníkoch a zisťovať sa bude aj odolnosť proti CHRL. Práca bude doplnená aj vybranými nedeštruktívnymi skúškami a to Schmidovým tvrdomerom na zistenie pevnosti a ultrazvukovou impulzívnou metódou na zistenie dynamického modulu pružnosti.

1 Rozdelenie betónu

Betón sa v dnešnej dobe radí medzi najpoužívanejší stavebný materiál [7], [8], [9]. Jeho základnými zložkami sú cement, voda a kamenivo, ktoré môžu byť doplnené rôznymi prísadami či prímiesami, vďaka ktorým vieme upraviť alebo zlepšiť jeho vlastnosti. Druhov betónu a taktiež kritérií, podľa ktorých ho vieme rozdeliť je preto veľmi veľa a jeden druh betónu môže patriť naraz do viacerých kategórií.

Najbežnejšie používané rozdelenia betónu sú:

- Podľa spôsobu výroby:

Monolitický - betonáž priamo na stavbe do debnenia

Prefabrikovaný (montovaný) - betónové prvky vyrobené vo výrobniciach, ktoré sú následne montované na stavbe

Prefa-monolitický - kombinácia monolitickej a prefabrikovanej výstavby. Bežné, opakujúce sa časti konštrukcie sú vyrábané vo výrobniciach a atypické časti sú vybudované monoliticky.

- Podľa vystuženia:

Betón prostý - betón bez pridania výstuže

Železobetón - betón s pridanou betonárskou výstužou

Predpäťý betón - prefabrikovaný betón s vopred predpäťou výstužou alebo monolitický betón s dodatočným predpäťím výstuže na stavbe

Vláknobetón – betón s rovnomerne rozptýlenými vláknami

- Podľa objemovej hmotnosti:

Lahký betón - betón s objemovou hmotnosťou 800 – 2000 kg/m³ po vysušení pri 105 °C

Bežný betón - betón s objemovou hmotnosťou 2000 – 2600 kg/m³ po vysušení pri 105 °C

Ťažký betón - betón s objemovou hmotnosťou viac ako 2600 kg/m³ po vysušení pri 105 °C

- Podľa pevnosti:

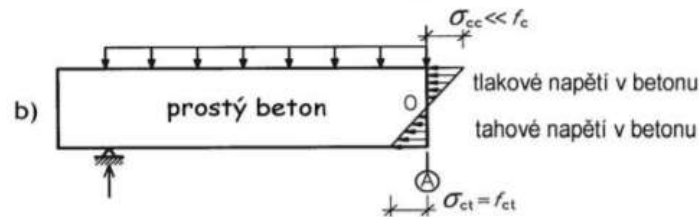
Bežný betón - betón s triedou pevnosti C 8/10 až C 50/60

Vysokopevnostný betón - betón s triedou pevnosti C 55/67 až C 100/115

1.1 Betón prostý

Prostý betón je betón, v ktorom sa nevyskytuje žiadny druh výstuže. Vyrába sa obvykle z prírodného kameniva s objemovou hmotnosťou 2200 až 2400 kg/m³ a vyrába sa v pevnostnej triede C 12/15 až C 40/50. Prostý betón dosahuje pevnosť v ťahu 1/10 až 1/20

z hodnoty pevnosti v tlaku, je krehký a nieje schopný odolávať väčším deformáciám bez toho aby došlo k jeho porušeniu. Z tohto dôvodu sa používa výhradne na konštrukcie namáhané tlakom ako sú napríklad podkladné vrstvy, základové konštrukcie, piliere alebo klenby. Prostý betón však nieje vhodné použiť na nosníky pretože jeho únosnosť by sme dosiahli keď napätie v ťahu σ_{ct} dosiahne hodnotu pevnosti v ťahu za ohybu f_{ct} (Obr. 1). Táto hodnota je ale pri nosníku z nevystuženého betónu veľmi malá, takže bude malá aj jeho únosnosť a pevnosť v tlaku f_c nemôže dosiahnuť svoje vysoké hodnoty [10], [16].



Obrázok 1 - Únosnosť nosníka z prostého betónu [10]

1.2 Železobetón

Betón vystužený betonárskou výstužou označujeme ako železobetón. Pri tvrdnutí betónu sa výstuž s betónom spoja a začnú spolu staticky spolupôsobiť. Väčšina betónových konštrukcií je práve zo železobetónu pretože pridaním takejto výstuže vieme výrazne zlepšiť jeho pevnosť v ťahu. Železobetón má preto v stavebníctve široké zastúpenie a používa sa napríklad na stropné dosky a panely, schodiská, preklady, prievlaky, piliere, konštrukcie mostov a podobne.



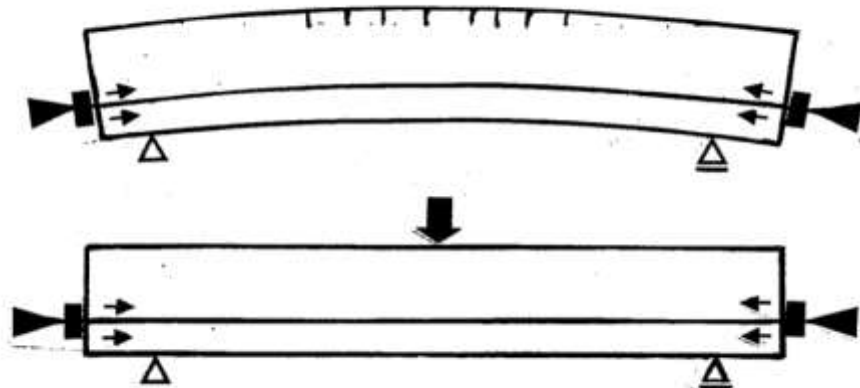
Obrázok 2 – Zaťažovanie železobetónového nosníka v skúšobnom lise [autor]

Železobetón sa vyrába priemyselne ako prefabrikát ale môže sa vyrábať aj priamo na stavbe, kde sa betón vyleje do zvaranej alebo zviazanej ocelevej kostry, ktorá však musí mať vždy svoje krytie, aby na ňu nepôsobili vonkajšie vplyvy. Táto oceľová sieť sa navrhuje

tak, aby preberala čo najviac ťahového zaťaženia. Preto sa napríklad pri nosníkoch najviac výstuže ukladá na jeho spodnej časti kde je toto ťahové namáhanie najväčšie [10], [11].

1.3 Predpätý betón

Princípom predpätého betónu je v zámerné vnesenie predpätia do nosníka pomocou kvalitnej predpínacej výstuže, čím sa eliminuje vznik ťahových napätí od zaťaženia. Predpínacia výstuž stláča nosník a tým tak v betóne vytvára tlakovú rezervu (Obr. 3).



Obrázok 3 - Pôsobenie predpínacej výstuže na nosník [10]

Použitím betónu s predpätou výstužou odstraňujeme nedostatok železobetónu v tvorbe trhlín po zaťažení. V závislosti na veľkosti vneseného predpätia môžeme tieto trhliny vylúčiť, alebo podstatne zmenšiť ich šírku. Obmedzením vzniku trhlín a dostatočnou injektážou dutín, v ktorých je uložená výstuž dosiahneme zvýšenú vodotesnosť a tým pádom aj lepšiu ochranu výstuže. Ďalšou výhodou predpätého betónu je, že sa vyrába z vysokohodnotnej ocele aj betónu a tým pádom sú pri rovnakej tuhosti a únosnosti omnoho ľahšie ako železobetón. Používaním vysokopevnostnej ocele a betónu s triedou pevnosti C 30/37 sa však zvyšuje ekonomická náročnosť, ktorej neprospievajú ani potrebné kontroly pri zhotovovaní konštrukcie na stavbe a nutnosť použitia špeciálnych hydraulických predpínacích zariadení.

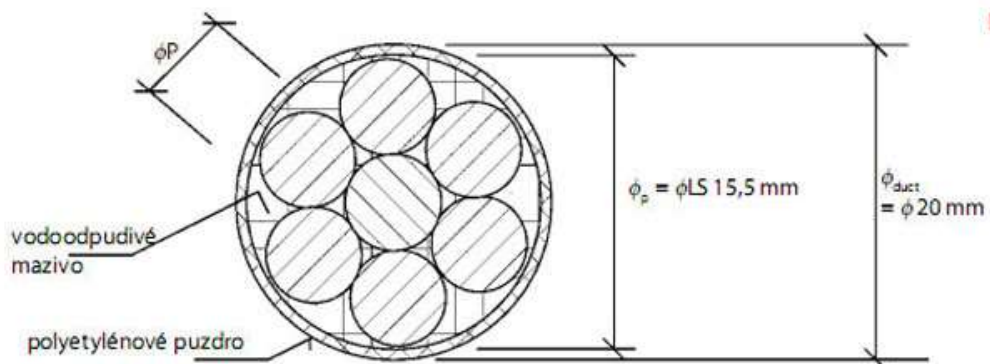
Predpätý betón sa vyrába prefabrikovaný aj monolitický s dodatočným predpätím alebo predpätý predom. Predom predpäté prvky sa vyrábajú v tuhom špeciálnom debnení s dĺžkou až 100 m, kde sa uloží predopnutá lanová výstuž a tá sa dodatočne zabetónuje betónom s rýchlotuhnúcim cementom. Výstuž tu je nechránená a s betónom je spojená súdržnosťou. Dôležitú úlohu tu preto hrá krycia vrstva betónu, v ktorej sa nesmú nachádzať žiadne trhliny,

inak by mohlo dôjsť ku korózii výstuže. Takýto postup vystužovania je vhodný iba na výrobu prostých nosníkov.



Obrázok 4 - Predpätý betón [autor]

Dodatočné predpínanie sa realizuje tak, že sa vopred vybetónujú prvky s betonárskou výstužou a do kanálikov vyplnených mazivom sa vloží predpínacia výstuž. Počká sa kým prvky dosiahnu požadovanú pevnosť a až potom sa výstuž dodatočne predpínajú. Takéto prvky sa môžu vyrábať ako prefabrikované, ale aj monolitické. Predpínacie laná sú uložené v kanálikoch z polyetylénu, ktoré slúžia ako ochrana výstuže pred koróziou a zároveň zamedzujú súdržnému spojeniu lán s betónom. Napnuté laná sa tiež môžu priestorovo tvarovať čím tak umožňujú použitie tohto betónu aj na prievlaky, trámy alebo betónové dosky [10], [12], [13].



Obrázok 5 - Prierez sedemdrôtovým predpínacím lanom [13]

1.4 Betón s rozptýlenou výstužou

Betón s rozptýlenou výstužou sa v stavebníctve stáva stále populárnejším. Výstuž tu tvoria vlákna, ktoré môžu byť rôznych materiálov s rôznymi zakončeniami. Najčastejšie používané vlákna sú oceľové, sklenené a polypropylénové. Rozptýlená výstuž v betóne zlepšuje ťahové pevnosti, obmedzuje vznik zmrašťovacích trhlin, zvyšuje odolnosť voči vzniku mikrotrhlin, zlepšuje pevnosť pri zaťažení rázom a odolnosť voči náhlym teplotným zmenám. Veľkou výhodou je aj to, že sa môžu vystužovať aj tenké prvky rôznych tvarov čo by u železobetónu nešlo. Vláknobetóny sa vyrábajú buď ako klasický betón ukladaním zmesi do debnenia, alebo striekaný betón suchým aj mokrým spôsobom. Aby bolo zaistené že má vláknobetón dobré fyzikálno-mechanické vlastnosti musíme dbať pri jeho výrobe na to aby boli vlákna rovnomerne aj všestranne rozmiestnené. Vlastnosti vláknobetónu závisia aj na veľkosti, povrchovej úprave a na type zakončenia. Najúčinnnejšie sú vlákna s povrchovou úpravou a rôznym typom zakončenia.



Obrázok 6 - Rovné oceľové drôtičky s voľným zväzkovaním [15]



Obrázok 7 - Oceľové drôtičky s dvojitém koncovým ohybom a lepeným zväzkovaním [15]

Najčastejšie používaný vláknobetón je vytvorený liatím zmesi do debnenia a používa sa hlavne pri konštrukciách priemyselných podláh, letiskových plôch a doskách vozoviek. Použiť ho ale môžeme aj pri tenkostenných konštrukciách, nádržiach, alebo základových konštrukciách. Striekané vláknobetóny sa zas používajú pri ostení tunelov, stabilizácii svahov, alebo zosilnení či rekonštrukcii rôznych konštrukcií [14].

2 Železobetón

Železobetón je stavebný materiál, ktorý je založený na vzájomnom statickom spolupôsobení zatvrdnutého betónu a betonárskych vložiek. Pri železobetóne teda ťah nepôsobí iba na betón, ale prenáša ho jeho výstuž, ktorá v ňom musí byť zakotvená.

Aby sme zaistili statické spolupôsobenie oboch materiálov, musí byť betón s výstužou dokonale a trvalo spojený, čo je dané súdržnosťou oboch materiálov. Ich súdržnosť potom bráni pohybu výstuže pri pretváraní konštrukcie a výstuž sa bude pretvárať rovnako ako betón. Táto súdržnosť vzniká tak, že cement pri hydratácii obklopí všetky nerovnosti výstuže, ktoré sa tvarujú na jej povrchu a účinnosť tejto súdržnosti sa neskôr ešte navýši pri zovretí výstuže zapríčinenom zmrašťovaním betónu.

Statické spolupôsobenie betónu s výstužou tiež ovplyvňuje ich teplotná rozťažnosť, ktorá by mala byť rovnaká. Ak by mali tieto dva materiály rôznu teplotnú rozťažnosť, tak by sa pri kolísaní teploty rozťahovali inak, čo by viedlo k tvorbe napätia na povrchu výstuže a následne by sa zhoršovala ich súdržnosť.

Pre správne spolupôsobenie betónu s výstužou je tiež dôležitá krycia vrstva betónu (Obr. 8), ktorá chráni výstuž pred koróziou. Betón krycej vrstvy musí byť preto kvalitný, s malou pórovitosťou a priepustnosťou, s malým vodným súčiniteľom, musí byť dostatočne hutný a mal by obsahovať dost' cementu na to, aby sa mohol na povrchu výstuže vytvoriť cementový povlak. Dôležitá je tiež hrúbka krycej vrstvy výstuže, pretože oddiaľuje výstuž od agresívnych účinkoch z prostredia [10], [11].



Obrázok 8 - Krytie výstuže [autor]

2.1 Technológia výroby

Pri výrobe železobetónu je prvým krokom vyhovujúci návrh množstva, tvaru a hrúbky výstuže, spolu s návrhom vhodného betónu na konkrétne účely, pretože iné usporiadanie výstuže bude pre vodorovné nosníky a iné pre piliere. Pri návrhu je tiež dôležitá zrnitosť kameniva, aby sa zrná mohli dostať do všetkých miest skrz výstuž. Výstuž sa uloží do vyčisteného debnenia, podloží sa dilatačnými podložkami a po skontrolovaní uloženia sa môže zaliť betónom. Po vyliatí sa betón musí zhutniť, aby sa odstránili všetky vzduchové medzery a aby sa zrná kameniva dostali na všetky miesta okolo výstuže. Počas tuhnutia sa nakoniec nesmie zabudnúť na ošetrovanie betónu, pretože by mohlo dôjsť k vzniku zmršťovacích trhlin, ktoré sú nežiadúce [8], [17].

2.2 Poruchy vystuženého betónu

2.2.1 Korózia výstuže

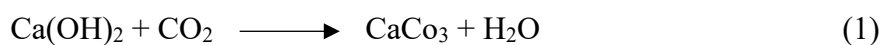
Korózia výstuže vzniká premenou ocele Fe na hrdzu tvorenú oxidmi a hydroxidmi železa $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Príčinou vzniku korózie je prenikanie vody a kyslíka skrz trhliny ku výstuži, ktorá potom znižuje jej účinný prierez. Pre vznik korózie však vždy potrebujeme obe tieto zložky, čo znamená, že napríklad vystužená konštrukcia ponorená vo vode nemôže korodovať, lebo v nej bude chýbať kyslík. Poznáme dva najhlavnejšie procesy vzniku korózie, ktorými sú:

- Karbonatácia betónu
- Prenikanie chloridov do konštrukcie

Oba tieto procesy nevytvárajú koróziu priamo, ale vytvárajú také podmienky, ktoré jej vznik umožnia [19], [20].

2.2.1.1 Karbonatácia betónu

Výstuž v betóne je okrem krycej vrstvy chránená aj malou vrstvou zo špeciálnych oxidov železa. Táto vrstva je nepriepustná a tvorí tak ideálnu ochranu výstuže pred koróziou. Jej nevýhodou je však, že je stabilná iba v zásaditom prostredí, kde je PH 11,5 a viac. Vďaka vzniku hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ je v cementovej paste PH viac ako 13. Prenikáním CO_2 skrz kryciu vrstvu, čo výrazne ovplyvňuje pórovitosť betónu, a cez prípadné trhliny dochádza ku karbonatácii, čo je premena hydroxidu vápenatého na uhličitan vápenatý:





Obrázok 9 – Strata krycej vrstvy a korózia výstuže [22]

Neutralizáciou hydroxidu vápenatého potom dôjde k poklesu PH pod 9, ochranná vrstva výstuže bude odstránená a na výstuži začne vznikať hrdza. Výstuž začne zväčšovať svoj objem, pretože oxidy, ktoré sú produktom korózie, majú približne 6-7 krát väčší objem ako železo. Krycia vrstva začne praskať až môže nakoniec úplne odpadnúť (Obr. 9) a korózia sa pri nechránenej výstuži bude ešte rýchlejšie a viac zhoršovať [19].

2.2.1.2 Prenikanie chloridov do konštrukcie

Ku strate ochrannej vrstvy z oxidov železa na povrchu výstuže môže dôjsť okrem procesu karbonatácie aj pôsobením chloridových iónov (Obr. 10). Chloridové ióny sa na povrch výstuže môžu dostať napríklad od pôsobenia morskej vody, alebo u nás bežnejšie pôsobením rozmrazovacích solí, ktoré sú v zime bežne používané. Hlavným rozdielom medzi procesmi karbonatácie a pôsobením chloridov je, že karbonatácia máva pravidelnú hĺbku, zatiaľ čo hĺbka pôsobenia chloridov je veľmi nepravidelná a preto sa na výstuži vytvára bodová korózia.

Prienik chloridov skrz kryciu vrstvu až na povrch výstuže môže nastať dvoma spôsobmi:

- Kapilárnou eleváciou vody – Voda môže obsahovať rôzne soli, medzi ktorými sa môžu vyskytovať aj chloridy. Betón dokáže vodu rýchlo nasiaknuť a vďaka kapilárnemu tlaku voda ďalej preniká do prázdnych pórov, kde sa tieto soli usádzajú.
- Difúziou chloridov betónom – Kapilárne póry, ktoré sú nasýtené vodou, pomáhajú pohybu chloridových iónov vďaka tlaku koncentračného spádu [19].



Obrázok 10 - Korózia podporená pôsobením chloridov [19]

2.2.2 Vylúhovanie cementovej pasty

Betón býva vystavovaný pôsobeniu rôznych kvapalín, z ktorých môžu mať niektoré za následok vylúhovanie vápenatých solí alebo hydroxidu vápenatého z cementovej pasty. Sú to napríklad vody z priemyslových výrobní, ktoré stekajú po povrchu konštrukcie. Tieto vody môžu obsahovať nežiadúce látky, ktorými sú napríklad:

- Agresívne CO₂ – CO₂ rozpustené vo vode vytvára reakcie zapríčiňujúce zmenu vápna alebo vápenca do rozpustného uhličitanu Ca(HCO₃)₂.
- Látky s PH menej ako 6 – Kyseliny, ako napríklad H₂SO₄, HCl a HNO₃, podobne ako CO₂ zapríčiňujú rozpúšťanie vápna a vápenca. V prípade, že je PH kyselín menšie ako 4 je nutné betón chrániť nátermi, ktoré týmto látkam odolávajú, inak by mohlo dôjsť až ku vylúhovaniu C-S-H gélu tvoriaceho spojivovú fázu v betóne.
- Amónne a horečnaté soli – Amónne a horečnaté soli zapríčiňujú zmenu vápna na rozpustené vápenaté soli. Pri reakcii s amónnymi soľami však ešte vzniká plynný amoniak NH₃ a pri horečnatých soliach nerozpustné Mg(OH)₂.
- Octan vápeno-horečnatý – Pri intenzívnom pôsobení octanu vápeno-horečnatého môže dôjsť k vylúhovaniu vápniku z portlanditu alebo C-S-H gélu. Používa sa najmä na letiskách ako náhrada za rozmrazovacie látky obsahujúce chloridy [19].

2.2.3 Striedavé zmrazovanie a rozmrazovanie

Striedavé zmrazovanie a rozmrazovanie môže betónové konštrukcie veľmi vážne porušiť. Porušenie vzniká rastom objemu vody nasiaknutej v betóne pri premieňaní vody na ľad. Ten vyvíja v betóne ťahové napätie, až dôjde k porušeniu cementovej matrice a kameniva (Obr.11). K porušeniu však dôjde iba vtedy, ak bude pomer objemu vody

a objemu pórov väčší ako určitá prahová hodnota nazývaná kritické nasýtenie. Je to z toho dôvodu, že voda zväčšuje svoj objem o 9%. Ak bude mať pri zväčšovaní svojho objemu dost' miesta v póroch, tak ku porušeniu nedôjde. Dôležitú úlohu tu hrá okrem obsahu pórov aj ich rozmiestnenie a veľkosť. Napríklad v póroch s polomerom menej ako 0,1 μm ľad vzniká vďaka zakriveniu povrchu až pri ďaleko nižších teplotách, preto sú najnebezpečnejšie póry s priemerom 0,1 až 10 μm .

Mrazuvzdornosť sa dá zlepšiť dodržaním troch požiadavok:

- Znížením obsahu pórov s priemerom 0,1 – 10 μm zmenšením vodného súčiniteľa
- Prevzdušnením betónu kedy sa v jeho vnútri vytvoria bublinky s priemerom 100 až 300 μm
- Použitím hutného mrazuvzdorného kameniva, ktoré odoláva účinkom zmrazovania a rozmrazovania [19], [20]



Obrázok 11 - Poškodenie betónu vplyvom mrazu [21]

2.2.4 Pôsobenie fyzikálnych vplyvov

Pôsobením fyzikálnych vplyvov v betóne veľmi často vznikajú ťahové trhliny, a to hlavne v cementovej paste, alebo vo vrstve medzi pastou a zrnami. Najčastejšími fyzikálnymi vplyvmi spôsobujúcimi vznik ťahových napätí sú:

- Zmrašťovanie spôsobené vysychaním povrchu betónu. Voda sa z povrchu betónu odparuje, zatiaľ čo jeho vnútro je stále vlhké. Povrch betónu sa preto zmenšuje, pričom tu vznikajú ťahové napätia. Ak ťahové napätia dosiahnu väčšie hodnoty ako je ťahová pevnosť betónu, tak začnú vznikať trhliny. Nadmernému zmrašťovaniu sa dá predísť ošetrovaním betónu počas jeho tuhnutia a tvrdnutia.

- Zmrašťovanie vplyvom rýchleho striedania teplôt prostredia. Môže dôjsť napríklad k rýchlemu ochladeniu na povrchu betónu, zatiaľ čo vo vnútri sa ochladzuje pomalšie. Vzniknú tak ťahové napätia kvôli rozličným teplotám a nakoniec dôjde až ku tvorbe trhlín.
- Hydratačné teplo hlavne pri väčších konštrukciách. Teplo z povrchu konštrukcie býva odsávané do prostredia, zatiaľ čo teplo z vnútra nemá kde unikať. Na povrchu konštrukcie vznikajú ťahové napätia až sa nakoniec vytvoria trhliny.
- Dynamické zaťaženia tiež vytvárajú ťahové napätia, ktoré keď prekročia hodnotu pevnosti v ťahu konštrukcie, vytvoria na jej povrchu trhliny. Najtypickejším príkladom sú mostné betónové dielce pri veľkej premávke.
- Stále zaťaženie vytvára na betónové konštrukcie tlakové aj ťahové napätie. Pri zväčšenom namáhaní môže dôjsť k porušeniu medzi zrnom a cementovým tmelom, čo môže zapríčiniť statickú únavu a nakoniec až rozpad konštrukcie [19].

2.2.5 Alkalicko kremičitá reakcia

Alkalicko kremičitá reakcia vzniká vtedy, ak použité kamenivo s obsahom amorfného kremíka príde do vztyku s alkáliami. To býva zväčša sodík a dusík, ktoré sa najčastejšie vyskytujú v cemente. Okrem toho sa však alkálie môžu dostať do konštrukcie z okolného prostredia, ako napríklad NaCl, ktorý sa používa na rozmrazovanie v dopravných stavbách, alebo môžu byť obsiahnuté v urýchľovačoch tvrdnutia založených na kremičitane sodnom.

Alkalicko kremičitá reakcia môže vážne poškodiť betón, pretože každé zrno kameniva s obsahom amorfného kremíka pri kontakte s alkáliami začne reagovať a následne zväčšovať svoj objem. Vytvára sa tak ťahové napätie v betóne, až dôjde k vzniku trhlín (Obr. 12). Tieto trhliny najčastejšie vznikajú vtedy, ak sa reaktívne zrná kameniva vyskytujú v blízkosti povrchu konštrukcie. Následne môže dôjsť k porušeniu tromi spôsobmi:

- Vznikne sieť mikrotrhlín a na povrchu sa vytvoria výkvety s gélovitým charakterom
- Odlupovanie kusov betónu
- Vznik nepravidelných trhlín na povrchu betónu



Obrázok 12 - Makrotrhliny spôsobené alkalicko kremičitou reakciou [19]

Alkalicko kremičitá reakcia má pomalý priebeh a často vzniká až po niekoľkých rokoch po vybetónovaní konštrukcie. Vyššia koncentrácia alkálií na povrchu konštrukcie ju však môže výrazne urýchliť. Pri prevencii proti vzniku alkalicko kremičitej reakcie musíme dbať na:

- Používanie nereaktívneho kameniva
- Nepoužívať cementy s vysokým obsahom alkálií, ale miesto nich struskové, puzolánové alebo zmesné cementy
- Konštrukcia sa musí udržiavať suchá
- Použitie inhibítorov alkalicko kremičitej reakcie [19]

2.3 Diagnostika železobetónu

Diagnostika železobetónu slúži na overenie vlastností materiálu, jeho identifikáciu a klasifikáciu chýb či porúch. Na každú konštrukciu pôsobia vždy iné klimatické vplyvy, iné zaťaženia alebo agresívne látky. Z tohto dôvodu sa postup pri diagnostike vždy upravuje tak, aby bol čo najúčinnjší a pri rôznych konštrukciách sa kladie dôraz na rôzne vlastnosti. Diagnostiku železobetónu vykonávame z dôvodov:

- Pochybnosti o kvalite materiálov pri nových konštrukciách.
- Vznik staticky závažných porúch pri starších konštrukciách, z čoho vzniká pochybnosť o bezpečnosti pri užívaní stavby.
- Pri príprave rekonštrukcie alebo prístavby k starším konštrukciám.
- Diagnostika je predpísaná po určitej dobe v projektovej dokumentácii [22], [23].

2.3.1 Vybrané nedeštruktívne metódy

Nedeštruktívne metódy slúžia na určenie vlastnosti materiálu či konštrukčného prvku bez toho, aby sa poškodil. Iba pri niektorých tvrdomerných metódach sa skúšané miesto upraví zbrúsením, vrypom alebo vtiskom. Ich výhodou je, že umožňujú viacnásobné meranie na rovnakom mieste a sledovanie zmien v čase.

Diagnostiku nedeštruktívnymi metódami rozdeľujeme podľa fyzikálneho princípu, ktorým sa realizujú na:

1. Tvrdomerné metódy – Sú to metódy, s ktorými meriame tvrdosť povrchu materiálu a stanovujú sa korelačné vzťahy medzi touto tvrdosťou a pevnosťou materiálu. Tvrdomerné metódy vieme ešte ďalej rozdeliť na:
 - Vtiskové
 - Vrypové
 - Odrazové
2. Elektrodynamické metódy – Metódy snímajú a vyhodnocujú účinky mechanického vlnenia vneseného do skúšaného materiálu. Tieto metódy rozdeľujeme na:
 - Ultrazvuková metóda – Stanovenie kvality betónu a dynamického modulu pružnosti
 - Rezonančná metóda – Stanovenie dynamického modulu pružnosti
 - Metóda fázových rýchlostí – Stanovenie dynamických charakteristík vozoviek a podloží
 - Metóda tlmeného rázu – Stanovenie tuhosti a únosnosti vrstiev vozoviek a podloží
 - Metóda akustickej emisie – Stanovenie rozvoja vnútorných trhlín
 - Echo metóda – Stanovenie vnútorných nehomogenít materiálu
3. Elektromagnetické metódy – Metódy, ktoré využívajú elektromagnetické vlastnosti skúšaného materiálu. Rozdeľujú sa na:
 - Elektromagnetické sondy – Stanovenie hrúbky a hĺbky výstuže
 - Mikrovlnné metódy – Meranie vlhkosti materiálu
 - Indukčné metódy – Stanovenie pretvorenia materiálu
4. Elektrické metódy - Metódy, ktoré využívajú elektrické vlastnosti skúšaného materiálu. Rozdeľujú sa na:

- Odporové metódy – Meranie vlhkosti, deformácii a teploty materiálu
 - Kapacitné metódy – Meranie vlhkosti materiálu
 - Polovodičové metódy – Meranie teploty materiálu
5. Radiačné metódy – Metódy sú založené na zoslabení ionizujúceho žiarenia v materiáloch a rozdeľujeme ich na:
- Radiografické metódy – Určenie polohy výstuže v železobetónoch
 - Radiometrické metódy – Stanovenie objemovej hmotnosti a vlhkosti materiálu
 - Meranie radónu – Zistenie koncentrácie radónu v obytných domoch a pôde [24], [26]

2.3.1.1 Ultrazvuková impulzívna metóda

Skúška sa realizuje ultrazvukovým prístrojom (Obr. 13) a princípom tejto metódy je meranie doby, za ktorú prejdú impulzy ultrazvukového vlnenia cez skúšaný materiál. Rýchlosť šírenia vlnenia ovplyvňuje kvalita skúšaného materiálu alebo vzorky a pokiaľ máme známu dĺžku vieme túto rýchlosť vypočítať. Pri tejto metóde sa používa ultrazvukové vlnenie s frekvenciou od 20 do 150 kHz alebo výnimočne do 500 kHz. Podľa rýchlosti šírenia vln vieme zistiť:

- Dynamický modul pružnosti a pevnosť v tlaku
- Rovnomernosť betónu
- Zmeny vlastností v čase
- Prítomnosť trhlín alebo dutín



Obrázok 13 - Ultrazvukový prístroj Pundit PL-200 [32]

Výhodou tejto metódy je, že ultrazvukové vlnenie sa šíri aj silnejšími vrstvami materiálov a tiež to, že sa jedná o nedeštruktívnu skúšku, ktorá sa môže realizovať aj opakovane na rovnakom mieste alebo na jednej vzorke [23], [24].

2.3.1.2 Elektromagnetické indikátory výstuže

Elektromagnetické indikátory výstuže (Obr. 14) slúžia na identifikáciu, lokalizáciu a zistenie hrúbky krycej vrstvy výstuže v železobetónových konštrukciách. Princípom týchto prístrojov je indukcia elektromagnetického impulzu. Cievky umiestnené v sonde sa pravidelne nabíjajú prúdovými impulzmi, vytvárajú tak magnetické pole a na povrchu každého vodivého materiálu, ktorý sa v ňom nachádza sa vytvoria vírivé prúdy. Tieto prúdy potom indukujú magnetické pole v opačnom smere a spracovaním tohto signálu sa výstuž lokalizuje, určí sa prekrytie a priemer výstuže.



Obrázok 14 Elektromagnetický indikátor výstuže BOSCH D-tect 100 [26]

Výhodou tejto metódy je, že ide o nedeštruktívnu skúšku a nevodivé materiály ako je betón výsledky nijako neovplyvnia. Elektromagnetické indikátory v praxi najčastejšie využívame pre zistenie množstva, polohy a priemeru výstuže, na overenie správneho uloženia výstuže, zistenie hrúbky krycej vrstvy a na lokalizáciu výstuže, keď je potrebné odobrať vzorky. Na druhú stranu má však táto metóda aj veľa obmedzení, ako napríklad:

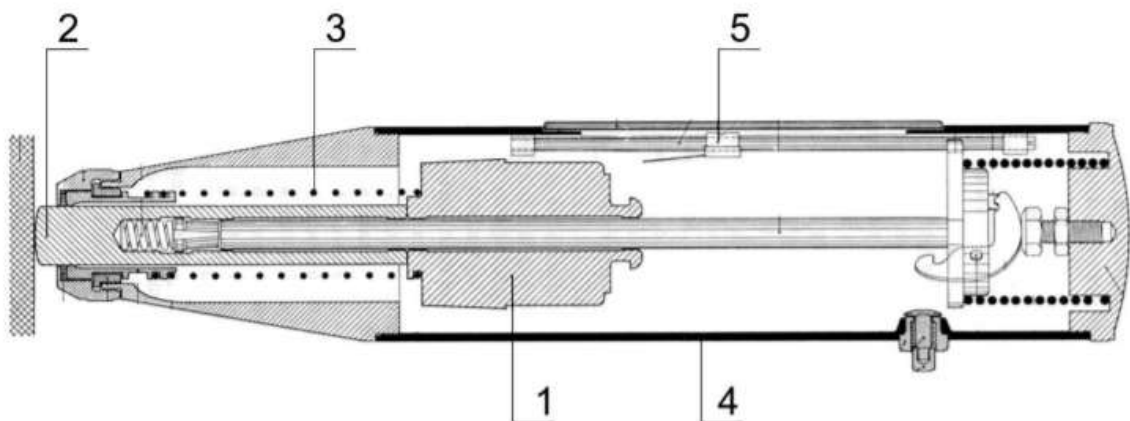
- Dosah prístroja – Metóda nieje vhodná pre hrubšie konštrukcie
- Ovplyvnenie susednými výstužami pokiaľ sú umiestnené bližšie k sebe
- Výskyt silnejších elektromagnetických polí
- Nevieme zistiť či sa výstuž vyskytuje aj v druhej rovnobežnej vrstve [25]

2.3.1.3 Stanovenie tvrdosti betónu Schmidtovým tvrdomerom

Tvrdosť betónu sa stanovuje odporom materiálu proti plastickej deformácii. Najčastejšie používaná metóda na zistenie tvrdosti materiálu je pomocou Schmidtového tvrdomera (Obr. 15), ktorým zistíme tvrdosť materiálu a následne sa stanoví kalibračný vzťah medzi tvrdosťou a pevnosťou betónu.

Metóda je založená na pružnom odraze telesa pri určitej energii od povrchu betónu. Mechanizmus Schmidtového tvrdomera je založený na barane s pružinou, ktorý je nasunutý na oceľovú tyč s razníkom. Baran sa potom pomocou zasúvania razníku naťahuje, až nakoniec vystrelí proti povrchu betónu upraveného brúsnym kameňom a zaznamená sa hodnota odrazu. Týmto tvrdomerom môžeme skúšať vzorky vo vodorovnej ale aj zvislej polohe. Podľa vyvinutej energie razu rozdeľujeme Schmidtové tvrdomery na:

- Typ N – energia 2,25 J
- Typ L – energia 0,75 J
- Typ M – energia 30,0 J



Obrázok 15 - Schmidtový tvrdomer, 1 – baran, 2 – úderník, 3 – pružina, 4 – puzdro, 5 – stupnica [25]

Pri skúškach Schmidtovým tvrdomerom počítame vždy iba s výsledkami na miestach cementovej malty, pri ktorých nedôjde k žiadnemu porušeniu povrchu. Ak k porušeniu dôjde, hodnoty budú vyradené. Skúšku tiež môžu ovplyvniť zrná kameniva alebo dutiny skryté tesne pod povrchom skúšanej vzorky a môžeme tak namerať hodnoty, ktoré sa od ostatných odlišujú. Takéto hodnoty sa však nevylučujú, ale pomocou kalibračných vzťahov stanovíme hodnoty pevnosti, vypočítame strednú hodnotu pevnosti a stanoví sa medza

použitelnosti $\pm 20\%$. Hodnoty mimo tohto rozmedzia vylúčime, zvyšné hodnoty sa opäť spriemerujú a výsledná hodnota sa zaokrúhli na celé MPa [23], [25].

2.3.2 Vybrané semideštruktívne metódy

Semideštruktívne skúšky bývajú čiastočne deštruktívne a pri skúšaní sa konštrukcia čiastočne poškodí. Tieto skúšky však realizujeme na určitých miestach konštrukcie tak, aby neovplyvňovali únosnosť ani stabilitu konštrukcie. Semideštruktívne metódy rozdeľujeme na:

1. Jadrové vývrty – k určeniu pevnosti v tlaku, na určenie priepustnosti alebo stanoveniu karbonatácie vo vnútri konštrukcie
2. Odtrhové skúšky – odtrhy povrchových vrstiev a skúšanie pevnosti podpovrchových a vnútorných vrstiev
3. Narezanie steny na vloženie plochých lisov – pri skúšaní napätosti vo zvislej stene a modulu pružnosti medzi dvoma plochými lismi
4. Brúsne, vrtné a vystreľovacie metódy stanovenia pevnosti betónu
5. Tvrdomerné vnikajúce metódy [24]

2.3.2.1 Jadrové vývrty

Jadrové vývrty patria medzi semideštruktívne skúšky a slúžia na stanovenie vlastností betónu. Realizujú sa jadrovou vrtačkou nasadenou na stojane, ktorý je pevne pripevnený na konštrukcii (Obr. 16). Vývrty sa robia špeciálnym dutým vrtákom vo vodorovnom alebo aj zvislom smere, pričom sa vrt stále ochladzuje vodou. Priemer týchto vrtákov býva od 12 do 500 mm, no na určenie pevnosti v tlaku betónu sa používajú priemery 25, 50, 100 alebo 150 mm. Vývrty sa vždy urobia do požadovanej hĺbky, vrták sa následne vyberie a vzorku v podobe valca opatrne z vrtu vylomíme. Takto získame vzorky betónu, ktoré sa ďalej skúšajú na pevnosť v tlaku, ale aj na ďalšie skúšky, ktorými sú pevnosť v priečnom ťahu, doba prechodu ultrazvukových vĺn, zisťovanie hĺbky karbonatácie, ale hlavne slúžia aj na upresnenie hodnôt nedeštruktívnych meraní, napríklad Schmidovým tvrdomerom.



Obrázok 16 - Jadrová vrtačka [autor]

Dôležitou súčasťou pri odbere vzorkov je určenie vhodného miesta vývrtnu. Vzorky odoberáme tak, aby konštrukcia nestratila únosnosť a stabilitu. Vyhýbame sa tiež miestam v blízkosti špár, hranám konštrukcie a miestam kde sa vyskytuje výstuž, na čo je dobré pred odberom vzorkov identifikovať množstvo a umiestnenie výstuže elektrickými indikátormi výstuže.

Po prevedení vývrtov sa pred ďalším skúšaním musia jednotlivé vzorky upraviť. Odmeria sa priemer vývrtov, ich dĺžky a prípadne poloha výstuže. Dĺžka vývrtov sa podľa potreby skráti na požadovaný pomer (Obr. 17) voči ich priemeru, zakončenia vzoriek sa zabrusia a skontroluje sa rovnobežnosť tlačných plôch [23] , [24].



Obrázok 17 - Píla na upravenie dĺžky jadrových vývrtov [autor]

2.3.3 Vybrané deštruktívne metódy

Pokiaľ je použitie nedeštruktívnych skúšok nedostačujúce, používame na diagnostiku deštruktívne metódy, ktorými zistíme požadované vlastnosti presnejšie. Často sa používa aj kombinácia nedeštruktívnych a deštruktívnych metód na spresnenie kalibračných vzťahov nedeštruktívnych metód [22].

2.3.3.1 Sekané sondy

Sekané sondy patria medzi veľmi často využívané metódy pri prieskumoch starších konštrukcií. Metóda je založená na odstránení krycej vrstvy betónu, čím sa odhalí výstuž, a tak môžeme určiť jej polohu, druh, množstvo výstuže, priemer a prípadne jej poškodenie. Aj keď sekanými sondami získavame presné informácie ohľadom výstuže, ich použitie nieje vhodné napr. pri nových konštrukciách, pretože poškodzovanie nových konštrukcií je nežiadúce. Pri sekaných sondách sa veľmi často využívajú aj elektromagnetické indikátory výstuže na určenie najvhodnejšieho miesta.



Obrázok 18 Sekaná sonda na železobetónovom nosníku [autor]

Na obnaženie výstuže v konštrukciách zväčša používame búracie kladivá a po odstránení krycej vrstvy vieme jednoducho vizuálne určiť množstvo, druh, umiestnenie výstuže a prípadne zhodnotiť stupeň korózie (Obr. 18). Posuvným meradlom potom vieme odmerať jej priemer a prípadne vieme na takýchto sondách určiť aj hĺbku karbonatácie za pomoci fenoftaleinu [23].

2.3.3.2 Pevnosť v tlaku na jadrových vývrtoch

Skúška pevnosti v tlaku je jednou zo základných špecifikácií betónu. Jej podstatou je zaťažovanie vzoriek konštantnou rýchlosťou až do porušenia vzorku (Obr. 19), čím získame hodnotu P_{max} , z ktorej sa následne vypočíta pevnosť v tlaku. Vzorky z jadrových vývrtoch sa musia pred skúškou upraviť na požadované rozmery a zaťažovacie plochy sa musia zabrúsiť. Vzorky s trhlinami alebo dutinami sa musia zo skúšky vyradiť.



Obrázok 19 - skúška pevnosti v tlaku na jadrových vývrtoch [autor]

Zo zistených hodnôt vypočítame pevnosť v tlaku podľa vzorcov:

$$f_{c,cube} = \frac{P_{max}}{a^2} \quad (2)$$

$$f_{c,cyl} = \frac{P_{max}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (3)$$

kde $f_{c,cube}$ je kocková pevnosť betónu v tlaku, $f_{c,cyl}$ je valcová pevnosť betónu v tlaku, P_{max} je maximálna sila dosiahnutá v skúšobnom lise, a je veľkosť hrany skúšobného vzorku a d je priemer skúšobného vzorku [24], [27].

2.3.3.3 Mechanické vlastnosti výstuže

Jednou z hlavných mechanických skúšok výstuže je skúška ťahom. Prevedenie skúšky je jednoduché, a tak sa stala najrozšírenejšou a najuznávanejšou skúšobnou metódou pri hodnotení mechanických vlastností. Skúška spočíva v tom, že vzorku výstuže uchyťme za pomoci čelústí v skúšobnom stroji (Obr. 20) a pomocou priet'ahomeru nasadenom na vzorke zist'ujeme závislosť pôsobiacej sily F na predĺžení, alebo závislosť napätia na deformácii až do porušenia. Výsledkom skúšky je graf týchto závislostí a hodnoty napät'ových a deformačných charakteristík výstuže [28].



Obrázok 20 - Skúška pevnosti výstuže [autor]

2.3.3.4 Odolnosť voči mrazu a CHRL

Cieľom tejto skúšky je zistiť odolnosť skúšaných vzoriek proti pôsobeniu 3 percentného roztoku chloridu sodného pri striedavom zmrazovaní a rozmrazovaní. Na prevedenie tejto skúšky môžeme použiť tri rôzne metódy, a to:

- metódu A – Metoda automatického cyklovania I
- metódu A – Metoda ručnej manipulácie
- metódu C – Metoda automatického cyklovania II



Obrázok 21 Vzorky uložené na skúšku CHRL [autor]

V našom prípade použijeme metódu A. Skúšobné vzorky z jadrových vývrtov sa uložia do misiek, ktorá sa naplní roztokom NaCl až pokiaľ nebude roztok dosahovať 5 ± 1 mm do výšky od spodnej hrany vzorky (Obr. 21). Misky sa uložia do mraziaku, kde bude prebiehať skúška a prevedie sa 25 cyklov. Jeden cyklus znamená zmrazenie skúšobnej plochy na -15 °C po dobu 15 minút a jej následné rozmrazenie a ohriatie na $+20$ °C tak isto po dobu 15 minút. Prechod medzi zmrazením a rozmrazením trvá vždy 45 minút. Po skončení 25 cyklov sa vzorky z mraziaku vytiahnu, opláchnu sa vodou, odpadnuté častice sa uložia do sušiarne na 105 °C a po ich vysušení sa zvažia s presnosťou na 0,1g. Vzorky sa po 25 cykloch uložia do novej misky znova sa zalejú roztokom chloridu sodného a proces sa opakuje po 25 cykloch až do celkového počtu cyklov 100 [29].

Výstuž

Výstuž do železobetónu rozdeľujeme podľa toho aké vnútorné sily prenášajú na ťahovú a tlakovú. Ťahová výstuž sa používa hlavne v konštrukciách namáhaných ohybom, ktorými sú napríklad dosky, trámy alebo prievlaky. Používame ju ale aj pri konštrukciách namáhaných prostým a mimostredným tlakom, ako napríklad tiahla a steny nádrží, alebo pri konštrukciách, kde pôsobí tlak s veľkou výstrednosťou, ako sú stĺpy pri ťahovom spôsobe namáhania. Ťahová výstuž sa ukladá vždy do ťahaných častí konštrukcie. Tlakovú výstuž používame zas pri konštrukciách namáhaných dostredným tlakom, alebo mimostredným tlakom s malou výstrednosťou, ktorými sú napríklad stĺpy, piliere, alebo klenby. Pri navrhovaní betónu sa však snažíme, aby najväčší tlak prenášal betón, a preto túto výstuž - ak je to možné - navrhujeme čo najmenšiu. Tlaková výstuž však výrazne zlepšuje pevnosť v tlaku a používa sa keď potrebujeme dodržať malé rozmery konštrukcie kôli dispozícii, alebo napríklad pri viacpodlažných konštrukciách, kde sa snažíme o dodržanie rovnakých prierezových rozmerov prvkov [10].

2.4 Vlastnosti

2.4.1 Medza klzu

Medza klzu sa vzťahuje podľa noriem na hodnoty založených na dlhodobej úrovni kvality výrobku. Pri navrhovaní sa však používa charakteristická medza klzu f_{yk} , ktorá sa používa iba pri výstuži v konštrukcii a je udávaná 5% kvantilom. Pri navrhovaní nesmie maximálna medza klzu $f_{y,max}$ prekročiť hodnotu $1,3 f_{yk}$ [10], [30].

2.4.2 Ťažnosť

Ťažnosť býva daná dvomi charakteristickými hodnotami, ktorými sú ϵ_{uk} a $(f_t / f_y)_k$, kde ϵ_{uk} je celkové pomerné predĺženie pri ťahovom napätí a $(f_t / f_y)_k$ je pomer medzi pevnosťou a medzou klzu. Obe tieto hodnoty získavame z ťahovej skúšky. Hodnota ťažnosti sa udáva percentom. Ťažnosť je veľmi dôležitá vlastnosť výstuže a treba ju sledovať kôli možným plastickým deformáciám výstuže [10].

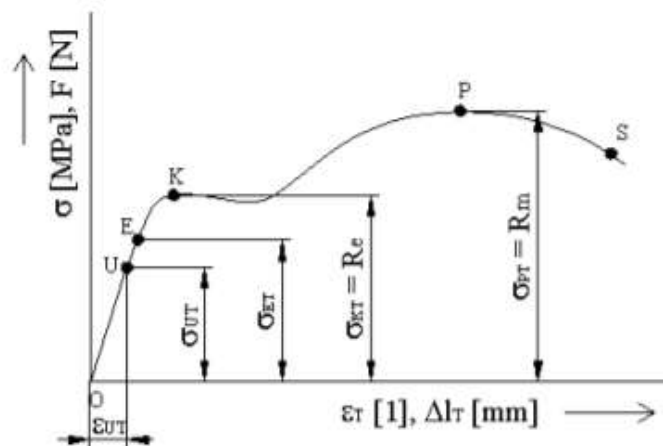
2.4.3 Ohýbatelnosť

Ohýbatelnosť je vlastnosť výstuže a je charakterizovaná skúškou ohybom, ktorá je založená na spätnom ohybe vložky podľa trňa s predpísaným polomerom, pričom na povrchu vložky nesmú vzniknúť žiadne viditeľné trhliny. Ohýbatelnosť je dôležitá vlastnosť výstuže

z hľadiska predpísaných minimálnych hodnôt vnútorných priemerov zakrivenia výstuže [10].

2.4.4 Pracovný diagram ocele

Pevnosť ocele v ťahu aj tlaku je oproti betónu mnohonásobne vyššia. Pevnosť v tlaku aj v ťahu je u oceli rovnaká a dosahuje hodnoty 320 až 750 MPa.



Obrázok 22 - Pracovný diagram ocele [22]

Pracovný diagram ocele (Obr. 22) je výsledkom trhacej skúšky výstuže a znázorňuje pomer medzi napätím a pretvorením ocele:

U... Medza úmernosti – Závislosť medzi napätím a pretvorením je pri oceli až do medzi úmernosti vyjadrená hookovým zákonom:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (4)$$

kde ε je pomerné predĺženie a E je modul pružnosti.

E... Medza pružnosti – Až do dosiahnutia medze pružnosti sa oceľ natiahne ale stále sa chová ako pružný materiál

K... Medza klzu – Po dosiahnutí medze klzu začína narastať deformácia bez toho aby vzrástlo aj napätie, oceľ sa stáva plastickou a zároveň sa porušuje súdržnosť medzi oceľou a betónom.

P... Medza pevnosti – Po dosiahnutí tejto medze pretvorenie ocele ďalej vzrastá no jeho napätie začína klesať, čo trvá až do medze deštrukcie.

S... Medza deštrukcie – Po dosiahnutí medze deštrukcie nastáva pretrhnutie ocele a pomerné predĺženie v tomto bode charakterizuje ťažnosť ocele [10], [22].

3 Výsledky skúšok železobetónových nosníkov a betonárskej výstuže

Experimentálna časť tejto práce sa zaoberá zisťovaním mechanických vlastností železobetónových nosníkov, betonárskej výstuže a ďalšími doplnkovými skúškami. Mechanické vlastnosti budeme zisťovať na dvoch nosníkoch, a to na nosníku číslo 1 s rozmermi 4000 x 400 x 150 mm a na nosníku číslo 2 s rozmermi 6000 x 400 x 165 mm. Hrúbka oboch nosníkov mala rozmerovú toleranciu ± 3 mm. Nosníky sa od seba odlišujú svojimi rozmermi, sú vyhotovené z rôznych druhov betónu a rozdielne je aj množstvo a umiestnenie výstuže. Všetky vlastnosti sa medzi sebou porovnajú a zhodnotia sa. U oboch nosníkoch budeme zisťovať:

- Pevnosť v tlaku na jadrových vývrtoch
- Pevnosť nosníkov za pomoci Schmidtového tvrdomera
- Vývoj trhlín pri statickom zaťažovaní
- Dynamický modul pružnosti ultrazvukovou skúškou
- Identifikácia výstuže elektromagnetickými indikátormi a sekanými sondami
- Napätové a deformačné charakteristiky výstuže ťahovou skúškou
- Odolnosť nosníkov voči mrazu a CHRL
- Objemovú hmotnosť nosníkov

3.1 Sledovanie vývoju trhlín

Sledovanie a značenie vývoja šírenia trhlín (Obr. 23) sa uskutočnilo pri statickej zaťažovacej skúške (Obr. 24 a 28). Nosníky sa vždy zaťažili určitou silou a po každom zaťažovacom stave sa na nosníku vyznačil tvar trhlín a ich šírky.

Prvý nosník mal dva zaťažovacie cykly, každý s dvomi zaťažovacími stavmi:

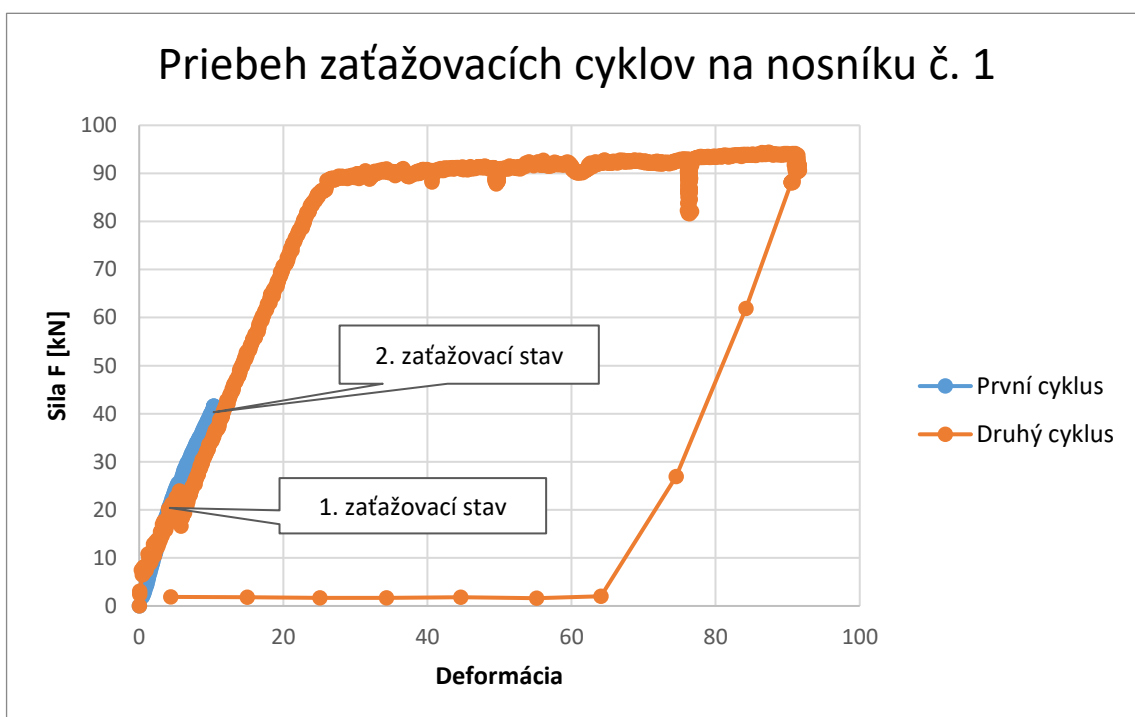
1. Prvý cyklus s nominálnymi zaťažovacími stavmi 25 a 40 kN
2. Druhý cyklus s nominálnymi zaťažovacími stavmi 25 kN a kolaps nosníka

Druhý nosník mal dva zaťažovacie cykly, prvý s piatimi a druhý s jedným zaťažovacím stavom:

1. Prvý cyklus s nominálnymi zaťažovacími stavmi 10, 20, 30, 34, 36 kN
2. Druhý cyklus s jedným zaťažovacím stavom do kolapsu nosníka

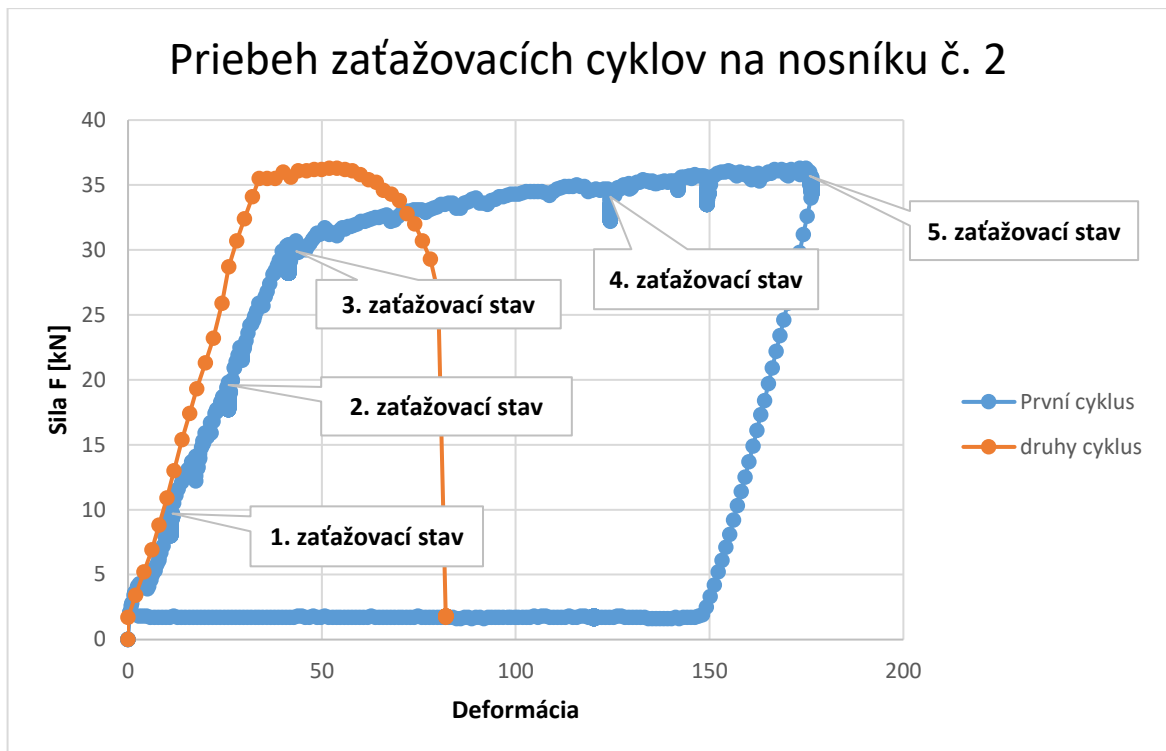


Obrázok 23 - Zaznačovanie trhlín na nosníku [autor]



Graf 1 - Priebeh zaťažovacích cyklov na nosníku číslo 1

Na grafe číslo 1 môžeme vidieť priebeh zaťažovacích cyklov na nosníku číslo 1. Prvý cyklus mal dva nominálne zaťažovacie stavy, pri ktorých sa vždy pri odľahčení nosníka zaznamenal tvar a šírka trhlín (Obr. 23). Pri druhom zaťažovacom cykle sa najskôr nosník zaťažil prvým zaťažovacím stavom na 20 kN a druhý zaťažovací stav bol až do kolapsu nosníka.

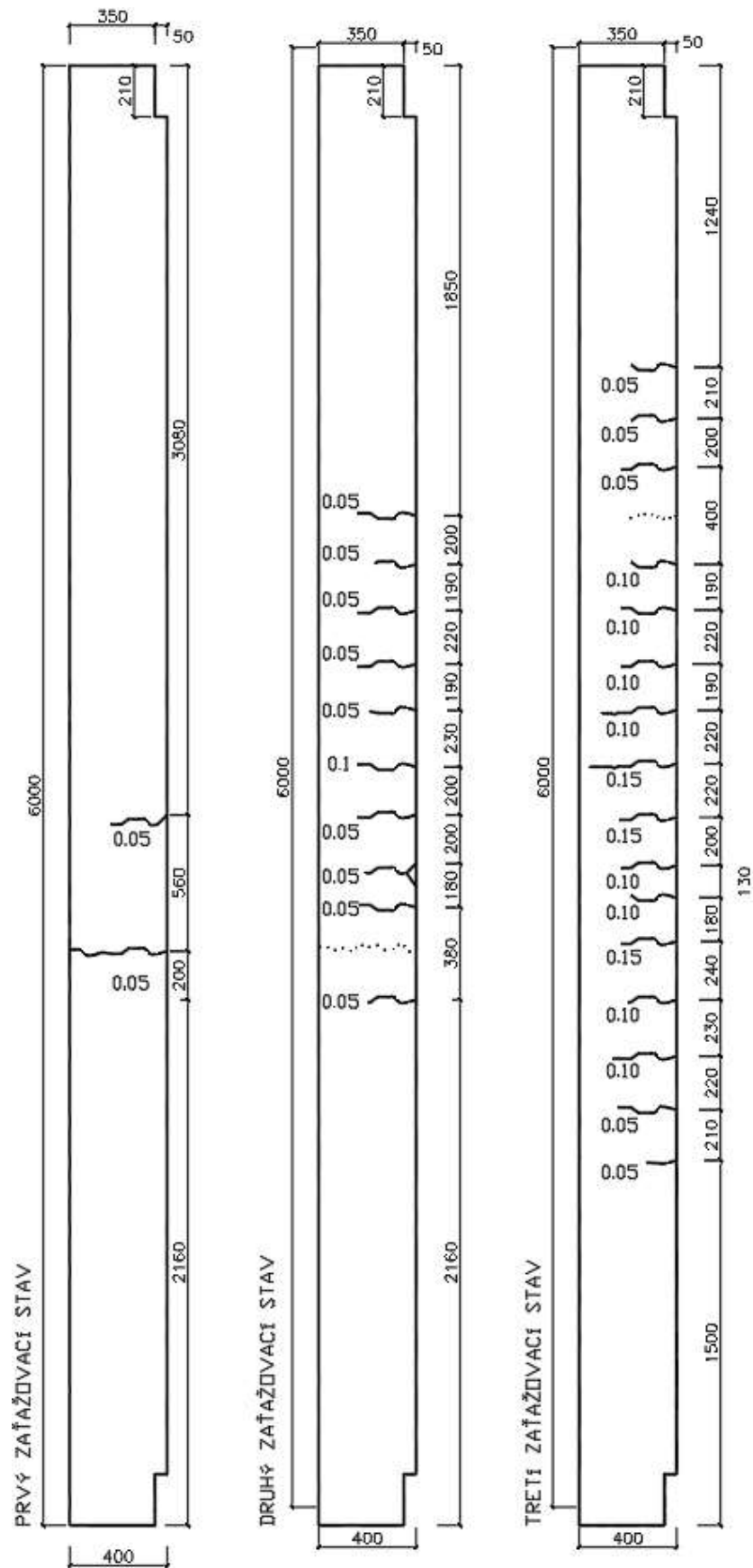


Graf 2 - Priebeh zaťažovacích cyklov na nosníku číslo 2

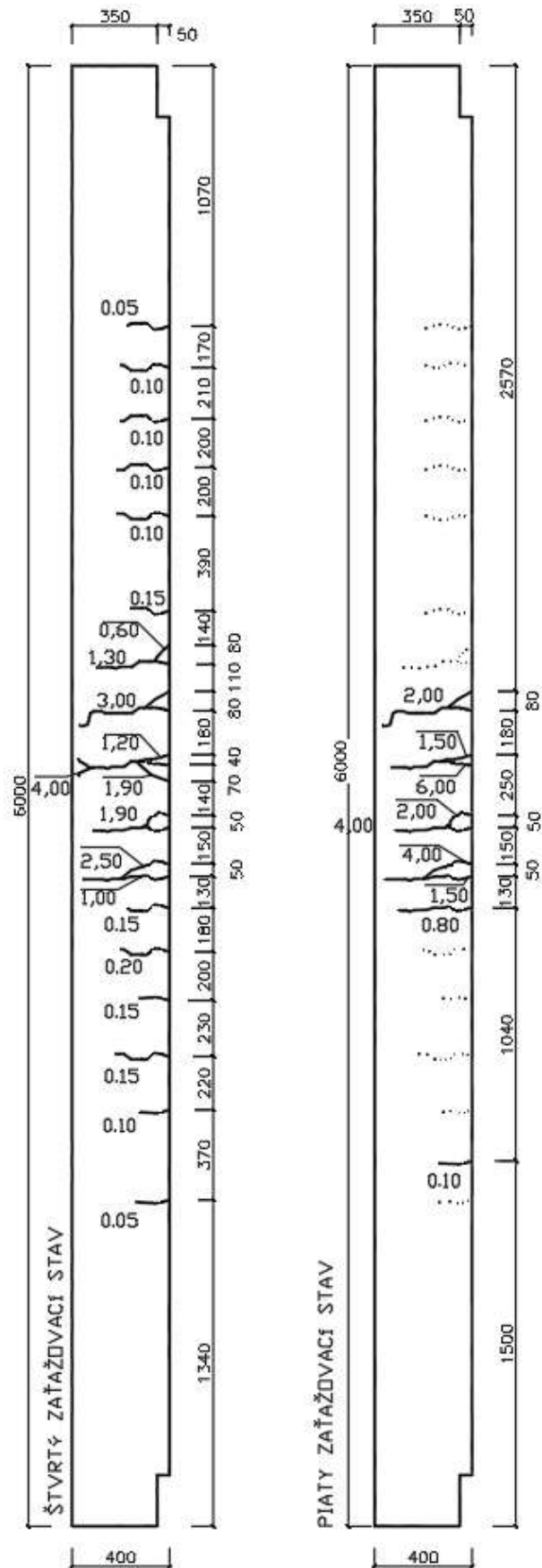
Na grafe číslo 2 je znázornený priebeh zaťažovacích cyklov na nosníku číslo 2. Prvý cyklus obsahoval až päť nominálnych zaťažovacích stavov. Pri každom zaťažovacom cykle sa zaznamenal tvar a hrúbka trhlín (Obr. 25 a 26). Druhý zaťažovací cyklus obsahoval už len jeden zaťažovací stav a to až do kolapsu nosníka.



Obrázok 24 - Statická zaťažovacia skúška [autor]



Obrázok 26 - Vývoj trhlin na nosniku číslo 2 [autor]



Obrázok 27 - Vývoj trhlín na nosníku číslo 2 [autor]

Na nosníku číslo 1 môžeme podľa obrázkov vidieť, že po prvom zaťažovacom stave vzniklo 8 trhlín, všetky s hrúbkou 0,05 mm. Po druhom zaťažovacom stave vznikli už len 2 ďalšie trhliny s hrúbkou 0,05 mm a trhliny vytvorené z predchádzajúceho zaťažovania zväčšili hrúbku na 0,1 mm.

Na nosníku číslo 2 vznikli po prvom zaťažovacom stave dve trhliny hrúbky 0,05 mm. Počas druhého zaťažovacieho stavu vzniklo pár nových trhlín s hrúbkou 0,05 mm, ale najväčší prírastok trhlín vznikol až pri treťom zaťažovacom stave, kedy bolo na nosníku napočítaných až 16 trhlín. Trhliny z predchádzajúcich zaťažení zväčšovali svoju šírku na 0,1 až 0,15 mm a vznikali aj trhliny nové s hrúbkou 0,05 mm. Pri štvrtom zaťažovacom stave už veľa nových trhlín nevzniklo, ale pôvodné trhliny - najmä pri strede nosníka, kde bol zaťažovaný - zväčšovali svoju šírku, a to od 1 až do 4 mm. Pri poslednom piatom zaťažovacom stave už nové trhliny nevznikali vôbec, no pôvodné trhliny pri strede nosníka sa ešte viac rozšírili, a to až do hrúbky 6 mm.



Obrázok 28 - Uloženie nosníka v skúšobnom lise [autor]

3.2 Pevnosť v tlaku

Pevnosť v tlaku bola zisťovaná na vzorkách z jadrových vývrtov (Obr. 29). Aby sme získali vhodné vzorky na skúšku pevnosti v tlaku, potrebujeme sa vyhnúť miestam, kadiaľ prechádza výstuž, snažíme sa vyhnúť miestam s trhlinami a vyhýbame sa aj miestam pri

krajoch nosníka. Pre správnosť skúšky budeme potrebovať dostatočné množstvo jadrových vývrtov a tie sa musia uskutočňovať tak, aby sa pri odbere nepoškodili.



Obrázok 29 - Príprava vzoriek na skúšku pevnosti v tlaku [autor]

3.2.1 Lokalizácia výstuže

Pred odberom jadrových vývrtov sa na oboch nosníkoch lokalizovala pozdĺžna aj priečna výstuž elektromagnetickým indikátorom výstuže BOSCH D-tect 100 a na nosníku sa naznačil ich smer (Obr. 30). Pri odbere vzoriek sme potom dávali pozor aby boli jadrové vývrty umiestnené tak, aby skrz výstuž vôbec neprechádzali. V niektorých prípadoch to však nebolo možné a vývrty sa robili aj s výstužou, no iba v takých miestach, kde sa po úprave vzorky na 100 mm výstuž odstránila. Lokalizácia výstuže je pri odbere jadrových vývrtov na skúšku pevnosti v tlaku dôležitá, pretože výstuž môže pevnosť vzorky ovplyvniť a zistené pevnosti by tak mohli byť nepresné.



Obrázok 30 - Lokalizácia výstuže elektromagnetickým indikátorom [autor]

3.2.2 Odber a úprava vzoriek

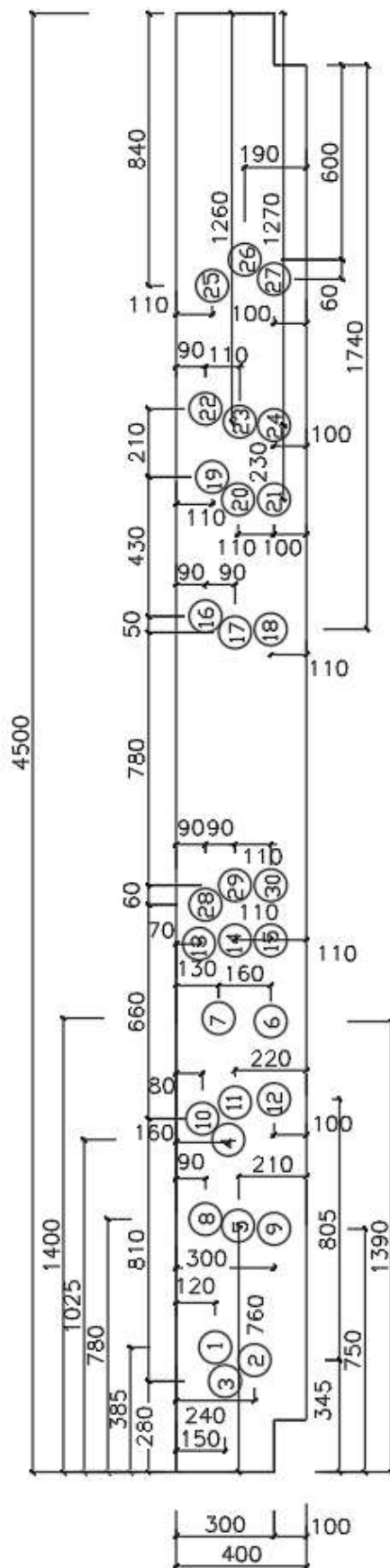
Po zistení umiestnenia výstuže sa určili vhodné miesta na odber vzoriek, jadrová vŕtačka sa na nosník poriadne upevnila (Obr. 31) a začali sa odoberať vzorky (Obr. 32). Na nosníku číslo 1 bolo odobratých 30 vzoriek a na nosníku číslo 2 bolo odobratých 22 vzoriek, všetky s priemerom 100 mm. Na skúšku pevnosti v tlaku sa z každého nosníka vybralo 14 vzoriek, ktoré neobsahovali výstuž a vyradené boli aj vzorky, v ktorých sa vyskytovali trhliny z predošlého zaťažovania nosníkov. Výška vybraných vzoriek sa upravila na 100 mm a tlačné plochy sa zabrusili. Presné miesta odberu jadrových vývrtov môžeme vidieť na obrázku č. 33 a 34.



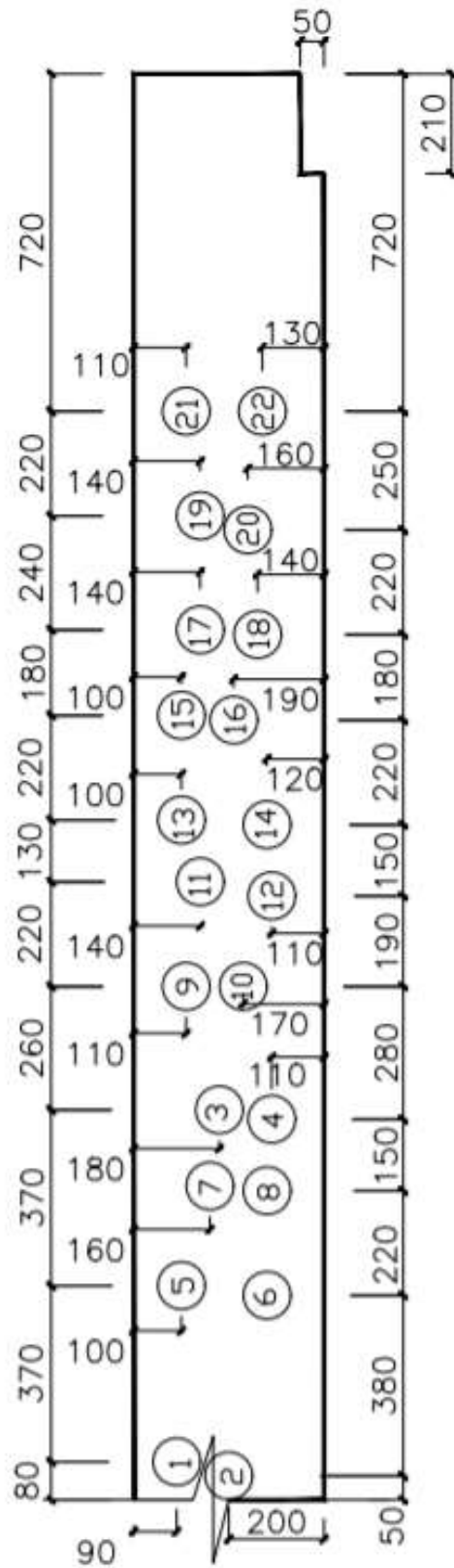
Obrázok 31 - Upevnenie jadrovej vŕtačky na nosník [autor]



Obrázok 32 - Jadrové vývrty [autor]



Obrázok 33 - Umiestnenie jadrových vývrtoch na nosníku číslo 1 [autor]



Obrázok 34 - Umiestnenie jadrových vývrtov na nosníku číslo 2 [autor]

3.2.3 Skúšanie jadrových vývrtov na pevnosť v tlaku

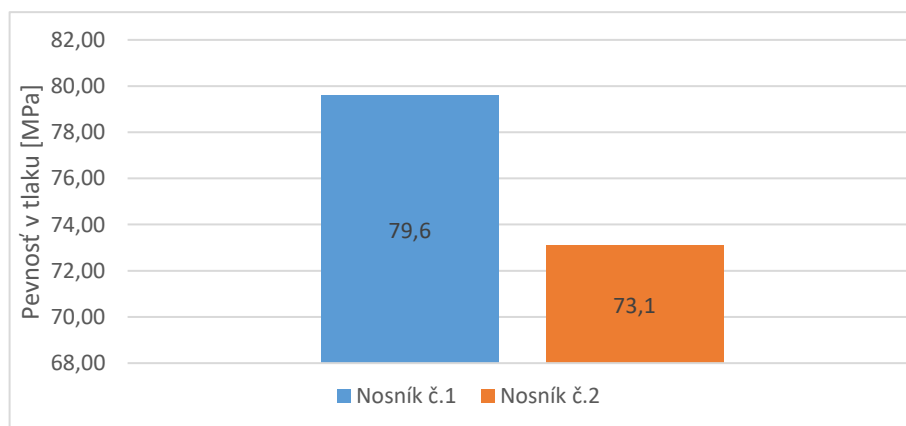
Skúška pevnosti v tlaku sa riadi podľa normy ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu. Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [38]. Skúšaných bolo 14 vzoriek z jadrových vývrtov (Obr. 35) výšky a priemeru 100 mm pomalým a plynulým zaťažením až do porušenia vzoriek, pričom sa zaznamenalo maximálne zaťaženie P_{max} . Porovnanie výsledných pevností môžeme vidieť v tabuľke číslo 1 a grafe číslo 3.



Obrázok 35 - Vzorka pripravená na skúšku pevnosti v tlaku [autor]

Tabuľka 1 - Pevnosť v tlaku

Číslo nosníka	Počet vzoriek	Pevnosť v tlaku Skúšobnej vzorky [MPa]	Smerodatná odchýlka	variačný koeficient	Prepočítaná charakteristická valcová pevnosť pre 5% kvantil [MPa]	Prepočítaná charakteristická kocková pevnosť pre 5% kvantil [MPa]
1	14	79,6	5,19	0,065	60,4	71,1
2	14	73,1	11,86	0,046	57,4	67,5



Graf 3 - Porovnanie pevnosti v tlaku

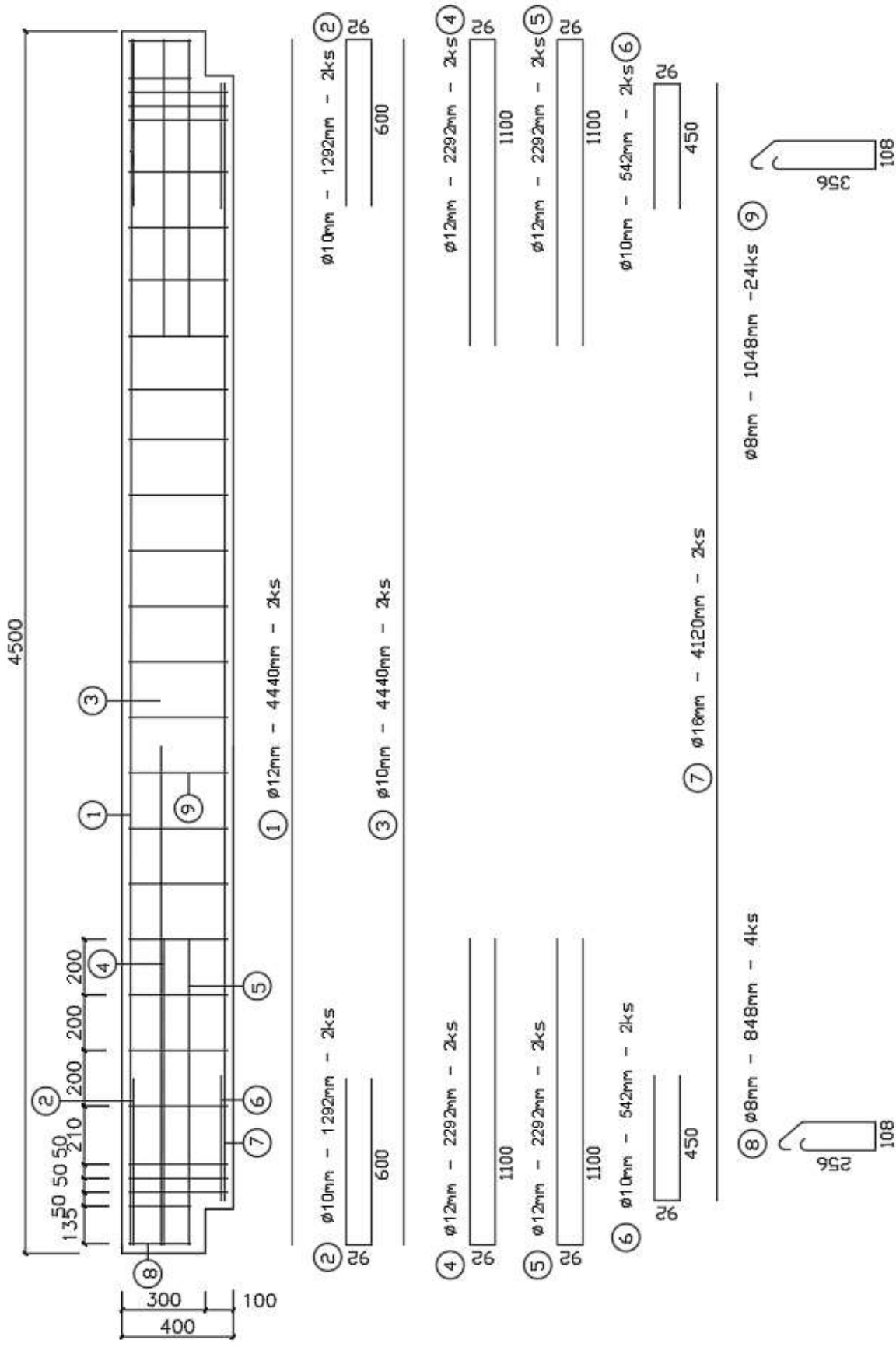
Podľa tabuľky číslo jedna a grafu číslo 3 môžeme vidieť, že lepšiu pevnosť v tlaku sme dosiahli pri nosníku číslo 1, a to 79,6 MPa. Pevnosť v tlaku pri nosníku číslo 2 sme zistili 73,1 MPa, čo je o 6,49 MPa menej ako pri prvom nosníku. Oba tieto nosníky sa zaraďujú medzi vysokopevnostné betóny.

3.3 Identifikácia výstuže

Na zistenie rozloženia, množstva, dĺžky a priemeru výstuže boli použité sekané sondy. Ešte pred odhalením výstuže bolo jej umiestnenie určené pomocou elektromagnetického indikátoru a sekané sondy sa podľa výsledku realizovali na miestach, kde bolo rozloženie výstuže zhustené, aby sa presne potvrdilo jej umiestnenie, množstvo, dĺžka a priemer. Sekané sondy sa teda uskutočnili na krajoch nosníkov a v ich strede (Obr. 36). Po odhalení výstuže sa odmerali dĺžky, priemery a odobrali sa vzorky na ďalšie skúšanie. Zistené informácie o výstuži v nosníku číslo 1 sú uvedené na obrázku 37 a o výstuži v nosníku číslo 2 na obrázku 38.



Obrázok 36 - Odhalenie výstuže sekanou sondou [autor]



Obrázok 37 - Skutočné rozloženie výstuže v nosníku číslo 1 [autor]

Sekanými sondami sa zistilo, že v nosníku číslo 1 sa vyskytovali 4 rôzne druhy výstuže s rôznymi dĺžkami. V nosníku bola uložená pozdĺžna výstuž s priemerom 16, 12 a 10 mm a priečna výstuž v podobe strmienok s priemerom 8 mm. V nosníku číslo 2 bolo uložené menšie množstvo pozdĺžnej výstuže s priermi 12, 10 a 8 mm a strmienka s priemerom 8mm, ktorých bolo z dôvodu väčšieho rozpätia nosníka viac.

3.4 Skúška pevnosti výstuže ťahom

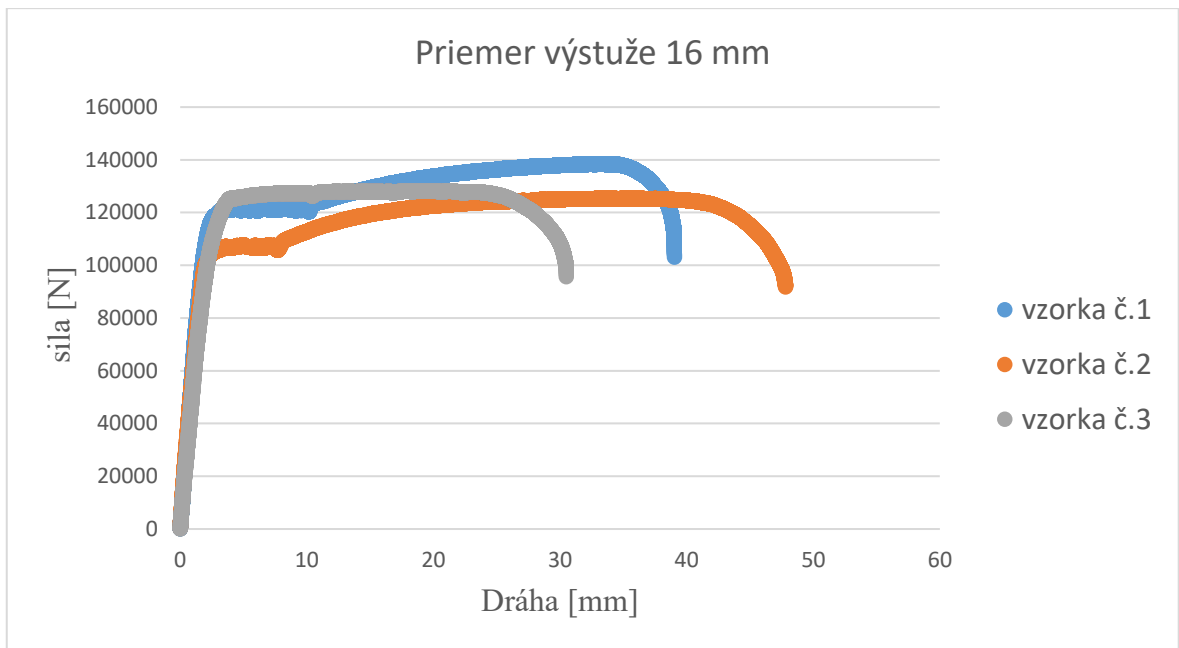
Skúška výstuže ťahom sa realizuje podľa normy ČSN EN ISO 6892-1 (42 0310): Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty [41]. Skúška sa realizovala na dvoch alebo troch vzorkách výstuže z každého priemeru a určila sa maximálna sila a závislosť pôsobiacej sily na deformácii pre každý priemer výstuže. Prípravu vzoriek na skúšku môžeme vidieť na obrázku číslo 39 a porušenie vzorku je vyobrazená na obrázku číslo 40. Zistená závislosť deformácie na pôsobiacej sile je ukázaná podľa priemeru výstuže na grafoch 4 až 7 a vyhodnotená v tabuľke 2. Zo zistených informácií sa určil typ výstuže B500.



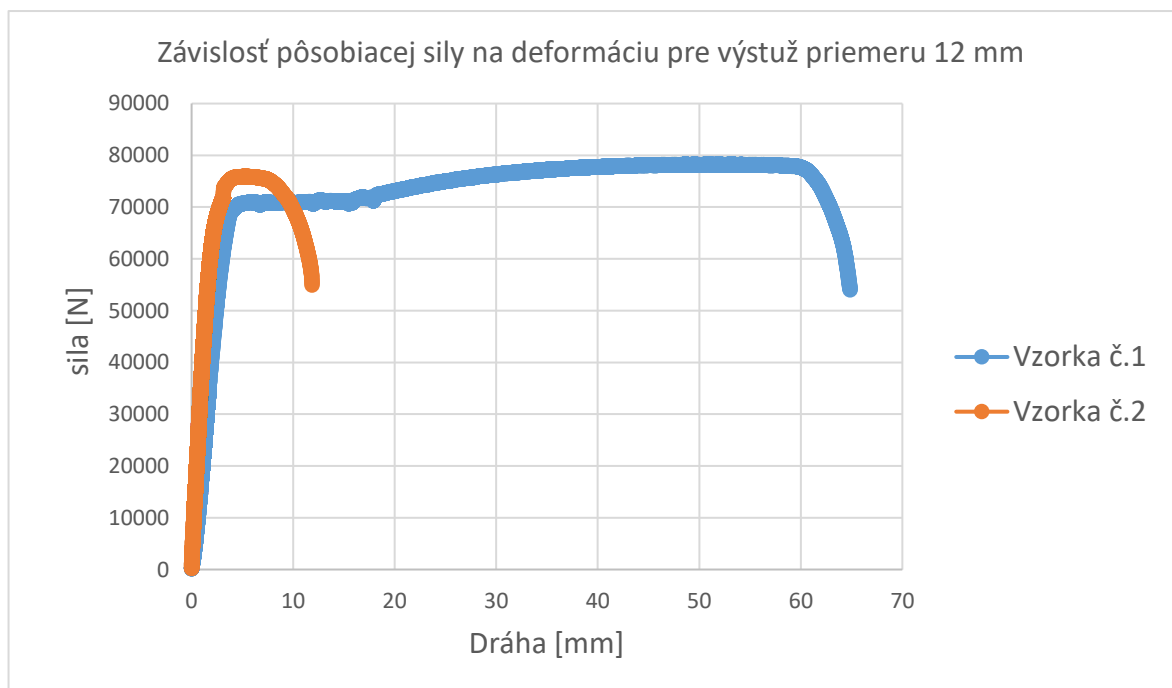
Obrázok 39 - Príprava vzoriek výstuže [autor]



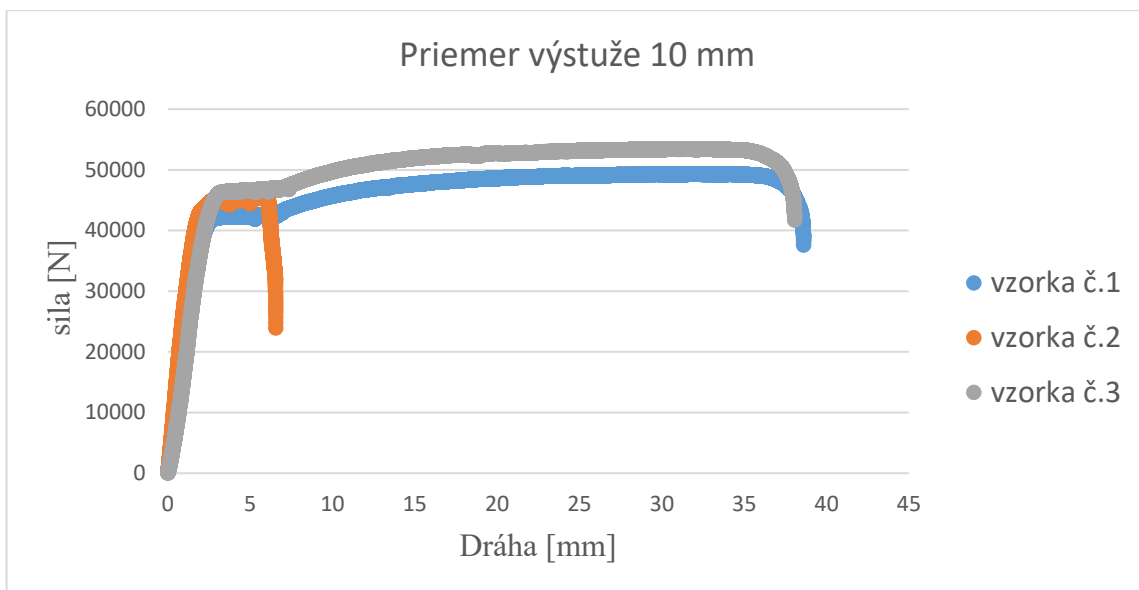
Obrázok 40 - Deformácia výstuže po prevedení skúšky [autor]



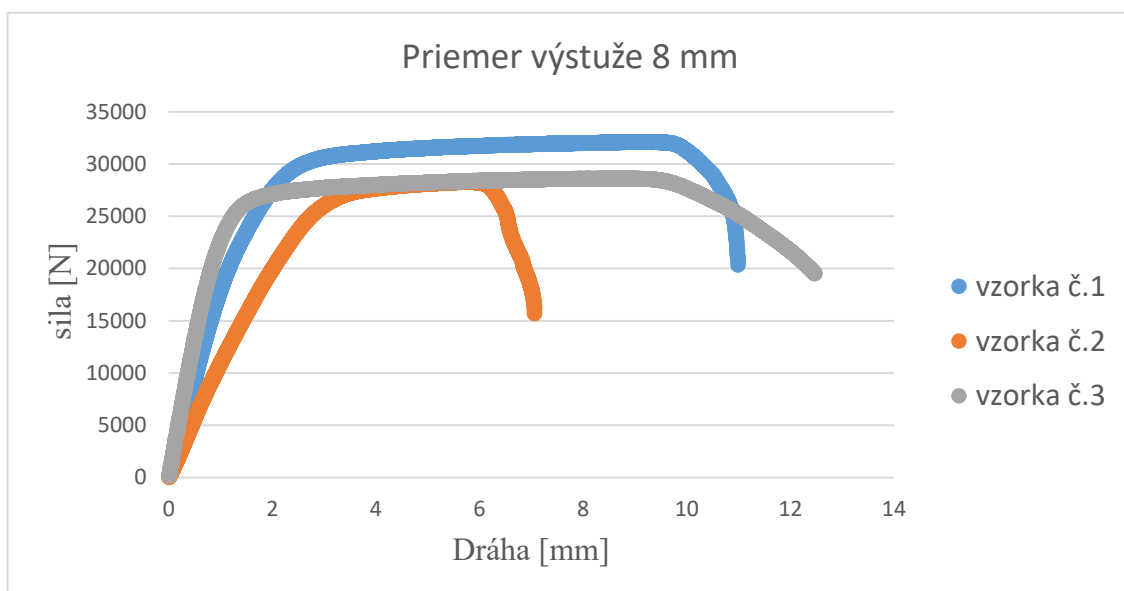
Graf 4 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii



Graf 5 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii



Graf 6 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii



Graf 7 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii

Tabuľka 2 - Maximálna sila vyvinutá pri skúške ťahom výstuže

	Priemer výstuže [mm]										
	16			12		10			8		
Maximálna sila [N]	138312	124801	128090	78271	75901	49289	45188	53430	32096	28264	28604
f_u	688	621	637	692	671	628	575	680	639	562	569
Priemer f_u	649			682		628			590		

3.5 Overenie možnosti použitia drátkobetónu pre železobetónové nosníky

Možnosť použitia drátkobetónu u vybraných nosníkov bola vykonaná formou porovnávacej štúdie už vykonaných experimentálnych skúšok železobetónových nosníkov bez šmykovej výstuže. Pre porovnávaciú štúdiu sa vychádzalo z troch experimentálnych programov [33],[34],[35] v tabuľkách 3 až 5. Vo všetkých prípadoch išlo o železobetónové nosníky pre rozpätie 900 mm, kedy prierez bol 100x190 mm. Vystuženie prierezu bolo betonárskou výstužou B500. Výstuž bola tvorená dvoma prútmi s prierezom 10 mm a krytie betónu bolo 20 mm. Experimentálne programy sa líšili použitým betónom, zvoleným typom drôtikov a dávkovaním. V prvom prípade (Tabuľka 3) išlo o transport betón [33], kde únosnosť čistých železobetónových nosníkov bola 37,7 kN a 40,81 kN. V prípade varianty drátkobetónu s drôtikmi Dramix 3D 65/60 BG (Obr. 41) a dávkovaním 25kg/m³ sa únosnosť zvýšila na 56 kN.

Tabuľka 3 - Únosnosť železobetónových nosníkov – experimentálny program 1 [33]

	Železobetón		Dramix 3D 65/60 BG
Dávkovanie [kg/m ³]	-		25
Únosnosť [kN]	37,7	40,81	56



Obrázok 41 - Dramix 3D 65/60 BG [36]

Druhý experimentálny program [34] (Tabuľka 4) zahrňoval väčšie množstvo variant dávkovania drôtika Dramix® 3D 55/30 BG (Obr. 42). Konkrétne sa jednalo o dávkovanie 40, 75, 110 kg/m³. Betón bol vyrobený v laboratóriu katedry stavebných hmôt, VŠB-TU Ostrava. Základný železobetónový nosník mal celkovú únosnosť 39,3 kN. Železobetónové nosníky s drátkobetónom mali výrazne väčšiu únosnosť. Celková únosnosť bola od 57,7 kN až 69,6 kN. Pre najvyššie dávkovanie bol však prírastok únosnosti relatívne malý a to približne len o 5 kN.

Tabuľka 4 - Únosnosť železobetónových nosníkov – experimentálny program 2 [34]

	Železobetón	Dramix® 3D 55/30 BG		
Dávkovanie [kg/m ³]	-	40	75	110
Únosnosť [kN]	39,3	57,7	64,6	69,6



Obrázok 42 - Drôtky Dramix® 3D 55/30 BG [36]

Tretí experimentálny program (Tabuľka 5) bol zameraný na odlišný typ betónu a drôtikov. Konkrétne sa jednalo o jemnozrnný betón s frakciou kameniva do 4 mm a drôtikmi MasterFiber 482 (Obr.43). Použité dávkovanie drôtika bolo 60 a 90 kg/m³. Skúšky na železobetónových nosníkoch boli vykonané v rámci experimentálneho programu [26] a boli rozšírené Gandelom [28]. Únosnosť nosníka s touto variantnou betónu bola 42 kN. V prípade dávkovania 60 kg/m³ sa potom únosnosť nosníka zvýšila na 74,65 kN a pre variantu dávkovania 90 kg/m³ bola únosnosť 87,78 kN. V oboch prípadoch sa únosnosť výrazne zvýšila. Pre všetky vykonané experimenty bolo spoločné, že mechanizmus porušenia bol šmykom.

Tabuľka 5 – Únosnosť železobetónových nosníkov – experimentálny program 3 [35]

	železobetón	MasterFiber 482	
Dávkovanie [kg/m ³]	-	60	90
Únosnosť [kN]	42	74,65	87,78



Obrázok 43 - MasterFiber 482 [37]

3.6 Objemová hmotnosť

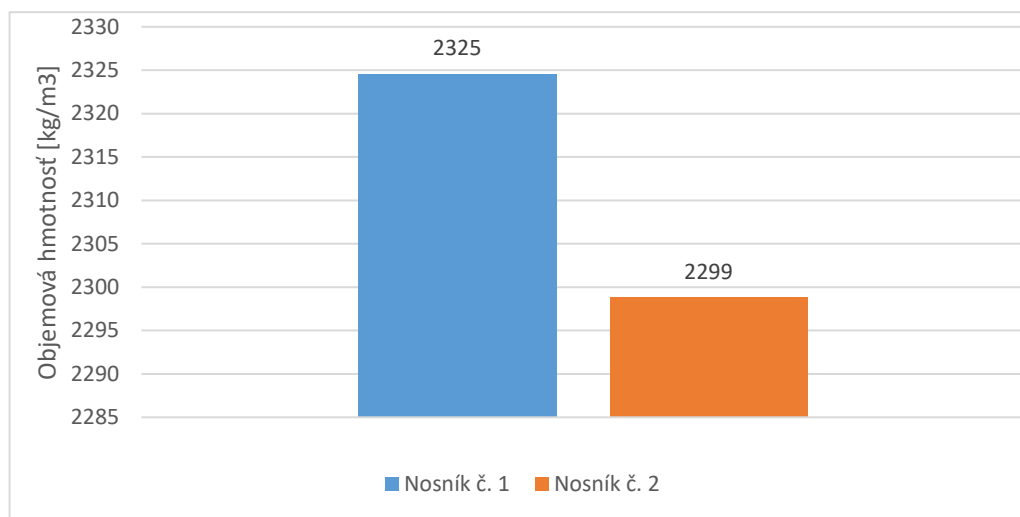
Objemová hmotnosť oboch nosníkov bola stanovená z jadrových vývrtov. Z oboch nosníkov sa vybralo 16 vývrtov, ktoré sa odvážili a zmerali. Objemová hmotnosť bola vypočítaná podľa vzorca:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

kde ρ je objemová hmotnosť, m je hmotnosť vzorky a V je objem vzorky.

Tabuľka 6 - Porovnanie objemových hmotností

Nosník	Počet vzoriek	Objemová hmotnosť [kg/m ³]	Smerodatná odchýlka
1	16	2325	49,46
2	16	2299	16,03



Graf 8 - Porovnanie objemových hmotností

Podľa tabuľky číslo 6 a grafu číslo 8 môžeme vidieť, že nosník číslo jedna má vyššiu objemovú hmotnosť 2325 kg/m³, no tento rozdiel je minimálny a je iba 26 kg/m³.

3.7 Určenie pevnosti v tlaku nosníkov Schmidtovým tvrdomerom

Stanovenie pevnosti v tlaku sa riadi podľa normy ČSN EN 12504-2: Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem [39]. Skúška sa previedla Schmidtovým tvrdomerom typu ND s energiou rázu 2,25 J (Obr.44). Každý nosník sa skúšal vo vodorovnom aj horizontálnom smere a na každom skúšanom mieste sa previedlo 15 meraní. Na prvom nosníku bolo 6 skúšaných miest vo vodorovnom aj zvislom smere, na druhom nosníku bolo 6 skúšaných miest vo vodorovnom smere a 3 vo zvislom smere (Obr. 45 a 46). Zo zistených hodnôt tvrdosti nosníku Schmidtovým tvrdomerom sa vypočítala pevnosť v tlaku nosníkov, ktorá je uvedená v tabuľke číslo 7 a 8.



Obrázok 44 - DIGI - SCHMIDT 2 [autor]

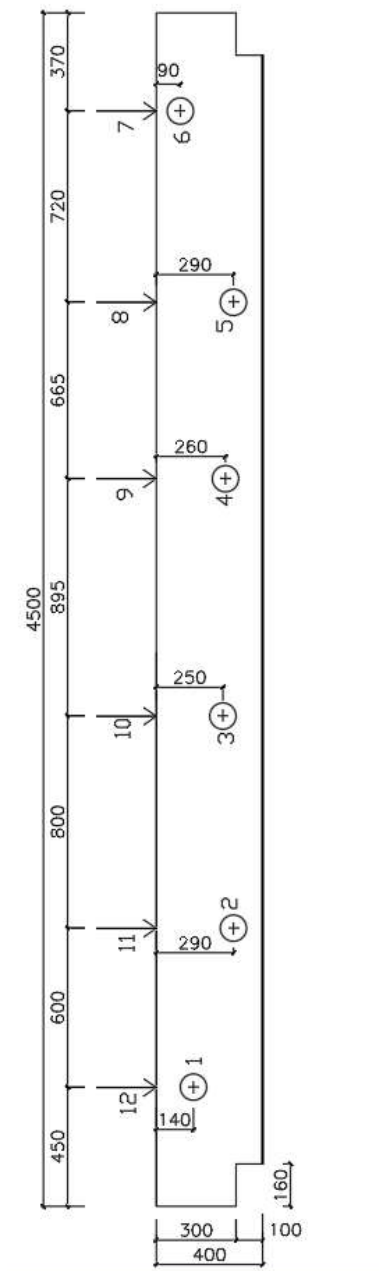
Tabuľka 7 - Pevnosť v tlaku zistená Schmidtovým tvrdomerom vo vodorovnej ose

Číslo nosníka	Pevnosť [MPa]	Smerodatná odchýlka	Variačný koeficient
1	73,9	4,63	0,063
2	67,9	3,93	0,058

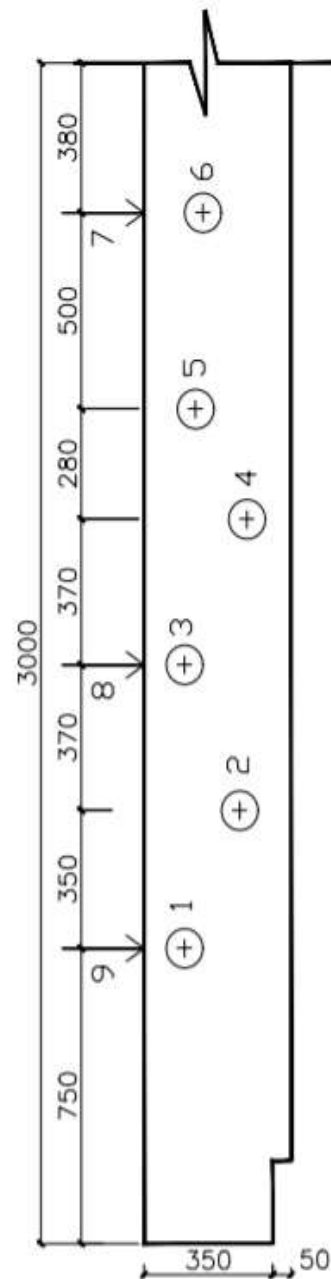
Tabuľka 8 - Pevnosť v tlaku zistená Schmidtovým tvrdomerom na zvislej ose

Číslo nosníka	Pevnosť [MPa]	Smerodatná odchýlka	Variačný koeficient
1	77,7	4,82	0,062
2	69,0	4,47	0,065

Schmidtovým tvrdomerom sa na prvom nosníku vypočítala podľa tvrdosti betónu z vodorovného aj zvislého smeru priemerná pevnosť v tlaku 75,8 MPa. V porovnaní s pevnosťou v tlaku zistenou zo skúšky na jadrových vývrtoch vyšla táto hodnota menšia približne o 3 MPa. Pri druhom nosníku bola zistená priemerná hodnota pevnosti v tlaku 68,45 MPa a v porovnaní s pevnosťou z jadrových vývrtoch bola menšia o 5 MPa.



Obrázok 45 - Miesta prevedenia skúšky Schmidtovým tvrdomerom na nosníku číslo 1 [autor]



Obrázok 46 - Miesta prevedenia skúšky Schmidtovým tvrdomerom na nosníku číslo 2 [autor]

3.8 Dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzívnou metódou

Dynamický modul pružnosti určujeme podľa normy ČSN 73 1371: Nedestruktívni zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu [40]. Modul pružnosti bol zisťovaný pre oba nosníky prístrojom Pundit PL-200 na 16 vzorkách z každého nosníka. Použité boli jadrové vývrty ešte pred úpravou na výšku do skúšobného lisu (Obr. 47). Vzorky z nosníka číslo 1 boli s priemerom 100 mm a výškou 152 mm, vzorky z nosníka číslo 2 mali priemer 100 mm a výšku 165 mm. Skúšaný povrch vzoriek sa očistil od nečistôt, na sondy sa naniesla vrstva gélu a zisťoval sa čas, za ktorý prejdú impulzy ultrazvukového vlnenia skrz materiál. Porovnanie dynamického modulu pružnosti medzi skúšanými nosníkmi môžeme vidieť v tabuľke číslo 9 a v grafe číslo 9. Dynamický modul pružnosti vypočítame podľa vzorca:

$$E = \rho \cdot V_l^2 \frac{1}{k^2} \quad (6)$$

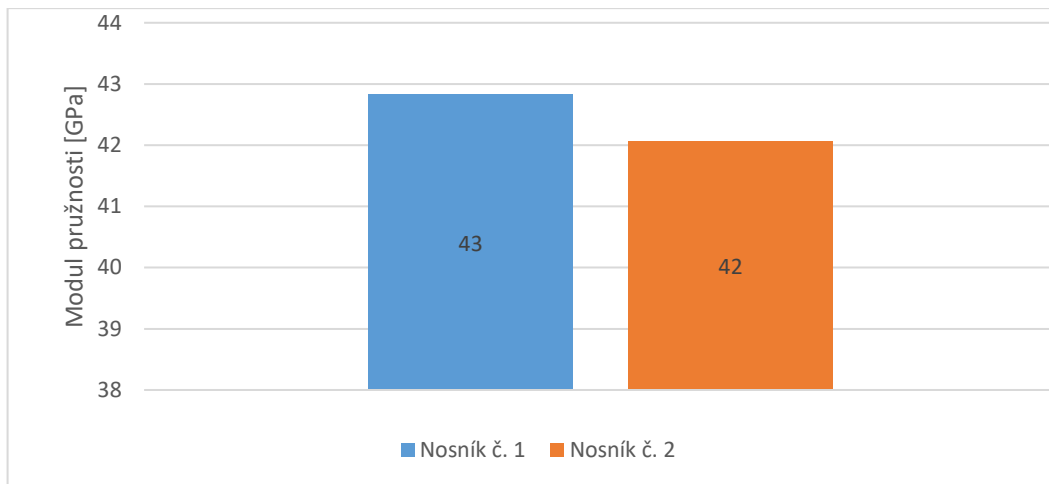
kde ρ je objemová hmotnosť, V_l je rýchlosť šírenia impulzov a k je koeficient rozmernosti prostredia.



Obrázok 47 - Príprava vzorky na ultrazvukovú skúšku [autor]

Tabuľka 9 - Porovnanie dynamického modulu pružnosti

Číslo nosníka	Počet vzoriek	Modul pružnosti [GPa]	Smerodatná odchýlka
1	16	42,82	1,21
2	16	42,06	0,95



Graf 9 - Porovnanie dynamického modulu pružnosti

V tabuľke číslo 9 a grafe číslo 9 môžeme vidieť, že vyšší dynamický modul pružnosti bol zistený na nosníku číslo 1, a to necelých 43 GPa. Rozdiel v dynamickom module pružnosti medzi týmito dvoma nosníkmi však nebol veľký a zo skúšky vyšiel iba 0,76 GPa.

3.9 Odolnosť betónu proti CHRL

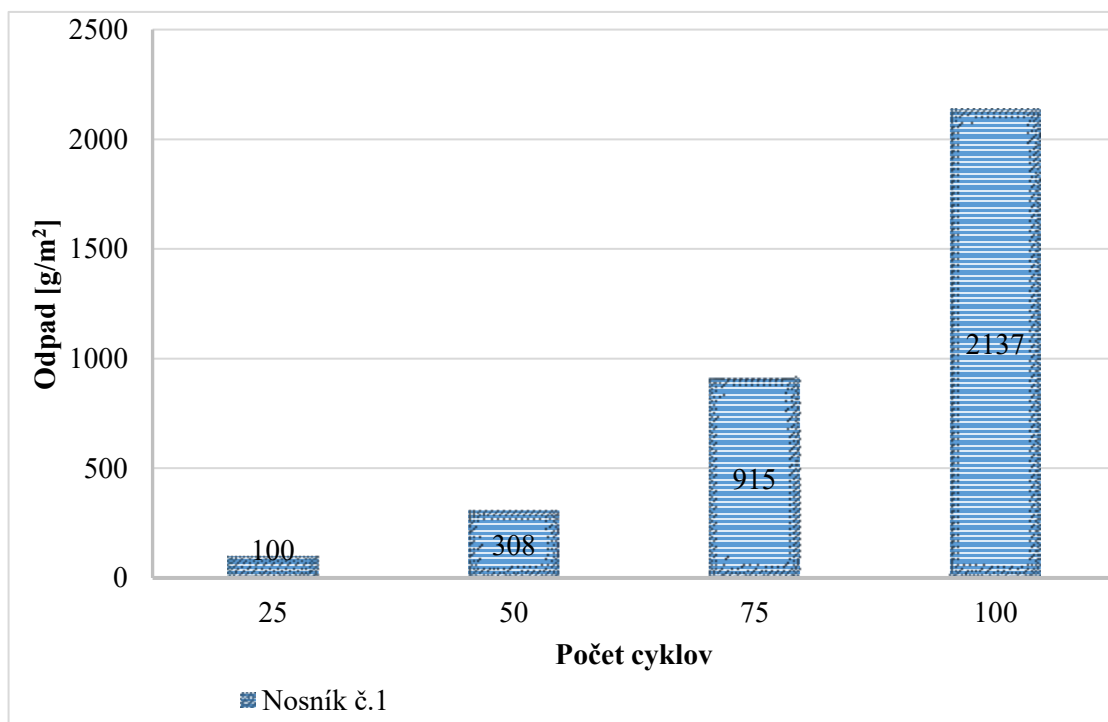
Skúška odolnosti betónu voči mrazu a CHRL sa riadi podľa normy ČSN 73 1326-Z1: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám [42]. Na skúšku sa použilo 10 vzoriek pre každý nosník a ako vzorky boli použité odrezky z jadrových vývrtov metódou A. Podľa normy bolo 7 vzoriek vystavených 100 cyklom zmrazovania a rozmrazovania pričom sa vždy po 25 cykloch zistilo množstvo odpadov na plochu v tabuľke číslo 10 a 11. Skúšaná plocha pri týchto vzorkách bola plocha nachádzajúca sa vo vnútri nosníka. Odkúšané boli ale aj na porovnanie hodnôt po 3 vzorky z oboch nosníkov na 50 cyklov ale na rozdiel od predošlých vzoriek bola skúšaná plocha, ktorá sa nachádza na povrchu nosníka. Množstvo odpadov na plochu z týchto vzoriek sú uvedené v tabuľke číslo 12.

Tabuľka 10 - Súčet odpadov na plochu [g/m²] pre nosník číslo 1

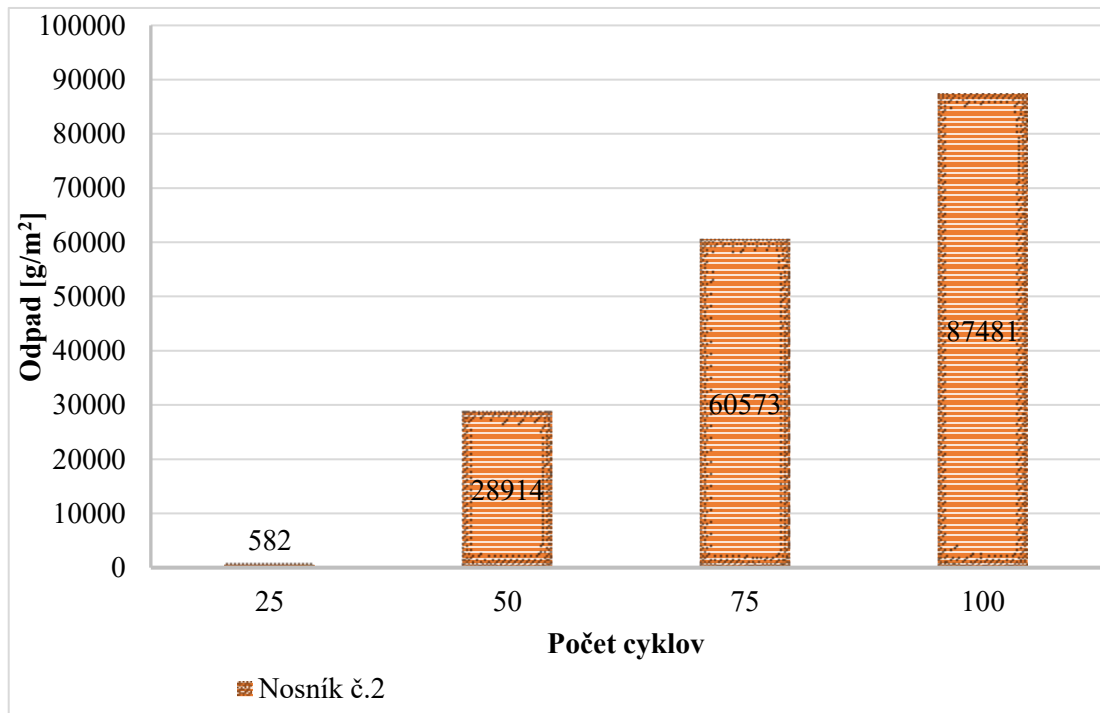
Nosník č.1	Odpad g/m ²			
	Číslo vzorku	1-25	26-50	51-75
1	196	-	-	-
8	84	362	1291	-
14	74	214	674	3030
18	63	285	824	1532
24	84	81	126	137
25	68	96	122	188
29	131	-	-	-
Priemer	100	208	607	1222

Tabuľka 11 - Súčet odpadov na plochu [g/m²] pre nosník číslo 2

Nosník č.2	Odpad g/m ²			
	Číslo vzorku	1-25	26-50	51-75
6	518	27051	21808	20270
9	567	38823	38192	-
10	667	39668	39400	-
15	925	25827	23719	33545
16	667	38017	23227	-
18	421	13913	37920	-
20	308	15023	37354	-
Priemer	582	28332	31660	26907



Graf 10 - Priemerný súčet odpadov po cykloch [g/m²] na nosníku číslo 1



Graf 11 - Priemerný súčet odpadov po cykloch [g/m²] na nosníku číslo 2

Z tabuliek 10, 11 a grafoch 10, 11 môžeme vidieť, že rozdiel v odpadoch prepočítaných na plochu bol medzi našimi dvoma nosníkmi veľmi vysoký. Menšie odpady vznikali na nosníku číslo 1 kde po prvých 25 cykloch vznikol odpad v priemere iba 100 g/m² a po ďalších cykloch sa tento odpad vždy viac ako zdvojnásobil až do množstva odpadu po 100 cykloch 1222 g/m² a celkového odpadu po 100 cykloch 2137 g/m². Skúšaná bola plocha vzoriek, ktorá sa pred odberom vrtov nachádzala vo vnútri nosníka takže nebola chránená vrstvou cementového tmelu a preto vznikali väčšie odpady. Skúšaných bolo 7 vzoriek no pri prvom nosníku sa zo skúšky vyradila vzorka 1 a vzorka 29 po 50 cykloch, a vzorka číslo 8 po 100 cykloch z dôvodu ich rozpadu (Obr. 48). Príčinou mohli byť trhliny vo vnútri vzorku, ktoré na povrchu neboli viditeľné.

Pri druhom nosníku bolo množstvo odpadov na skúšanú plochu oproti prvému nosníku veľmi vysoké. Po prvých 25 cykloch bolo množstvo odpadu na plochu len 582 g/m² no po 50, 75 a 100 cykloch sa toto množstvo výrazne zvýšilo. Po 100 cykloch bol celkový odpad až 87481 g/m² a vzorky číslo 9, 10, 16, 18 a 20 bolo nutné zo skúšky vyradiť z dôvodu ich rozpadu. Zo skúšky sme teda zistili, že tento nosník má veľmi slabú odolnosť voči pôsobeniu mrazu a CHRL a pri odoberaní jadrových vývrtov z tohto nosníka musíme dbať na dôkladné ošetrovanie a zainjektovanie vývrtu aby nedošlo k jeho poškodeniu.



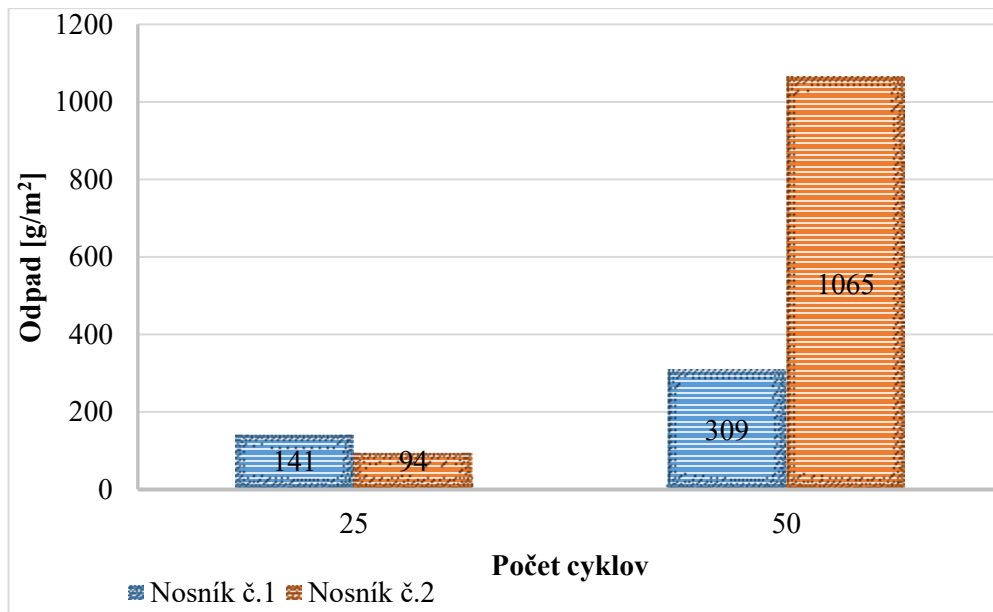
Obrázok 48 - Vyradená vzorka zo skúšky
CHRL [autor]



Obrázok 49 - vzorka po 100 cykloch [autor]

Tabuľka 12 - Súčet odpadov na plochu [g/m²]

Číslo nosníku	Nosník č.1	Odpad g/m ²	
	Číslo vzorku	25	50
1	1	157	175
	8	194	150
	14	71	179
2	18	66	1019
	24	101	1006
	25	115	889
	Priemer	141	168
		94	971



Graf 12 - Priemerný súčet odpadov po cykloch [g/m²]

Z tabuľky a grafu číslo 12 vidíme, že po 25 cykloch boli odpady z oboch nosníkov približne rovnaké pričom odpad z nosníku číslo 2 bol o niečo menší. Po 50 cykloch sa však odpad na prvom nosníku ďalej moc nezvyšoval ale pri druhom sa odpad zvýšil až desaťnásobne. Skúšané boli z každého nosníka 3 vzorky a skúšaná bola plocha, ktorá sa nachádza na povrchu nosníka. V porovnaní so skúšanou plochou z vnútra nosníka sú tieto odpady výrazne menšie pretože vonkajšia plocha je chránená cementovou pastou no aj tak sú odpady z druhého nosníka oproti nosníku prvému veľmi vysoké.

4 Záver

Tématicky je diplomová práca zameraná na oblasť betónových konštrukcií, ktoré zaujímajú významné zastúpenie pri nových aj rekonštruovaných stavbách. Oblasť betónu a betónových konštrukcií je veľmi široká a existuje celý rad odporúčaní, napr. Model Code 1990, Model Code 2010 alebo sústava štandardov Eurokódov. Pri betóne sa jedná najmä o Eurokód 2 pre prvky z prostého a železového betónu, ktorý je určený na dimenzovanie konštrukcií. Pre vhodný návrh konštrukcií alebo rekonštrukcií je dobrým predpokladom vhodného riešenia znalosť správania sa konštrukcie, resp. diagnostika správania a mechanických vlastností betónových konštrukcií. Na uvedenú oblasť sa sústreďuje predložená diplomová práca, kde hlavnou časťou práce je experimentálny program dvoch železobetónových nosníkov, skúšaných v laboratóriách Fakulty stavebnej, Vysokej školy banskej – Technickej univerzity Ostrava. Súčasťou práce bolo aj overenie možnosti použitia drátkobetónu pre železobetónové nosníky v rámci štúdie už vykonaných experimentov na Fakulte stavebnej.

Na uvedené dva experimenty nadviazali hlavné skúšky mechanických vlastností a diagnostiky, ktoré zahŕňali: Pevnosť v tlaku na jadrových vývrtoch, Pevnosť nosníkov za pomoci Schmidtového tvrdomera, Vývoj trhlín pri statickom zaťažovaní, Dynamický modul pružnosti ultrazvukovou skúškou, Identifikácia výstuže elektromagnetickými indikátormi a deformačné charakteristiky výstuže ťahovou skúškou, Odolnosť nosníkov voči mrazu a CHRL, Objemová hmotnosť nosníkov.

Jednotlivé vykonané skúšky a diagnostiky je možné rozviesť do čiastkových záverov:

1) Vykonané statické zaťažovacie skúšky umožnili stanoviť celkovú únosnosť nosníkov, kedy v oboch prípadoch išlo o porušenie nosníkov ohybom. Vykonané vyhodnotenie vzniku a rozvoja trhlín dokumentuje typický priebeh skúšky železobetónového nosníka.

2) Pevnosti v tlaku stanovené na vývrtoch a nedeštruktívne pomocou Schmidtového tvrdomera boli v dobrej zhode. Rozdiely medzi získanými hodnotami je možné prisúdiť materiálovým neistotám – prirodzenému rozptylu mechanických vlastností. V oboch prípadoch sa jedná o časovo náročné metódy. V prípade vývrtoch je nutné vzorky vyvrtáť a upraviť na skúšku v lise. Pri nedeštruktívnom skúšaní je potrebné vykonať výrazne väčšie množstvo meraní, kde je nutné správne zohľadniť polohu a miesto merania, ktoré môže prípadne výsledky ovplyvniť. V oboch prípadoch išlo o vysokopevnostné betóny.

3) Pre stanovenie dynamického modulu sa osvedčilo použitie ultrazvukovej skúšky. Výsledné hodnoty mali relatívne malý rozptyl a ležali v očakávanom intervale hodnôt

4) Pre identifikáciu výstuže je vhodné použitie prístrojov s elektromagnetickými indikátormi. Zistená poloha bola overená pomocou sekaných sond.

5) Skúšky betonárskej výstuže overili, že mechanické vlastnosti – pevnosť v ťahu bola väčšia, než je požadované pre výstuž triedy B500.

6) Skúškou odolnosti nosníkov voči mrazu a CHRL sa zistilo, že pre konkrétne skúšané betóny boli hodnoty odpadov výrazne odlišné. Rozdiely boli výraznejšie najmä pre povrch z rezu jadrového vývrtu. Pre presné stanovenie skúšky CHRL je výhodnejšie skúšobné vzorky pripraviť súčasne s betonážou konštrukčných prvkov a postupovať presne podľa normy. Toto však v rámci experimentálneho programu nebolo možné vykonať.

7) Zistená objemová hmotnosť mala typickú a predpokladanú hodnotu pre betón konštrukčných účelov.

Celkovo môžeme zhodnotiť, že diplomová práca sa zamerala na vyriešenie ucelenej témy diagnostiky a skúšok železobetónových nosníkov, a jej obsahom sú najdôležitejšie a najtypickejšie skúšky, s ktorými sa pri diagnostike stretávame najčastejšie.

Zoznam použitej literatúry:

- [1] CEB-FIP MODEL CODE 1990: DESIGN CODE, (Final version published by Thomas Telford Ltd., London), 1993
- [2] Model Code 2010 – Final Draft, fib, Bulletin No 65 and 66. 1-2. 2012.
- [3] EN 1992-1-1 (731201) Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI ervenec 2011,
- [4] Bilčík J., Fillo L, Benko V., Halvonik J., Betónové konštrckcie, STU v Bratislave 2008, ISBN 978-80-227- 2940-6.
- [5] ISO 2394: Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí. (General Principles on Reliability for Structures).
- [6] ISO. JCSS (2016), Probabilistic Model Code, JCSS Working Material, <http://www.jcss.byg.dtu.dk>.
- [7] Beton University [online]. [cit. 28.11.2021]. Dostupné z: https://www.betonuniversity.cz/uploads/sources/publikace/dd005446dfc8af01490e11d6a4f2c0df43bb981a_uploaded_prirucka-technologie-beton.pdf
- [8] Českomoravský beton – výroba betonu, doprava betonu a čerpání betonových směsí [online]. [cit. 28.11.2021]. Dostupné z: <https://www.transportbeton.cz/stahnout-soubor?id=12797>
- [9] ČSN EN 206+A2 - Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2021
- [10] PROCHÁZKA, Jaroslav. *Navrhování betonových konstrukcí 1*. 3. vyd. Praha: ČBS Servis, 2007. ISBN 978-80-903807-5-2.
- [11] Železobeton – Železový beton | Ebeton. Ebeton - Vítejte ve světě betonu [online]. Copyright © Svaz výrobců betonu ČR [cit. 11.10.2021]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/zelezobeton-zelezovy-beton/>
- [12] Predpätý betón – Wikipédia. [online]. [cit. 12.10.2021]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Predp%C3%A4t%C3%BD_bet%C3%B3n
- [13] Predpäté stropy | ASB.sk. ASB.sk | odborný portál | architektúra, stavebníctvo, biznis [online]. Copyright © JAGA GROUP, s.r.o. Všetky práva vyhradené. [cit. 12.10.2021]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/zaklady-a-hruba-stavba/priecky/predpate-stropy>

- [14] KRÁTKÝ, Jiří, Jan VODIČKA a Karel TRTÍK. *Drátkobetonové konstrukce: úvodní část a příklady použití : směrnice pro navrhování, provádění, kontrolu výroby a zkoušení drátkobetonových konstrukcí*. Praha: Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 1999. Betonové stavitelství. ISBN 80-863-6400-3.
- [15] MARCALIKOVA, Z.; RACEK, M.; MATECKOVA, P.; CAJKA, R. Comparison of tensile strength for fiber reinforced concrete with different types of fibers. *In 1st Virtual European Conference on Fracture Comparison of tensile strength for fiber reinforced concrete with different types of fibers. Structural Integrity Procedia*, 2020 (in print).
- [16] Betón – Wikipédia. [online]. [cit. 13.10.2021] Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Bet%C3%B3n#Hist%C3%B3ria>
- [17] Technologie staveb a jejich typy. Stavební povolení [online]. Copyright © 1995 [cit. 13.11.2021]. Dostupné z: <https://www.mikrat.cz/technologie-staveb-a-jejich-typy.php>
- [18] How to Make Good Reinforced Concrete. Bali Property Maintenance, Renovation, Repair and Construction [online]. Copyright © Phil Wilson [cit. 13.10.2021]. Dostupné z: <https://www.mrfixitbali.com/building-construction/building-structure-and-strength/reinforced-concrete-47.html>
- [19] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [20] Koroze výztuže a ovlivňující faktory [online]. [cit. 14.10.2021]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/16069-koroze-vyztuze-a-ovlivnujici-faktory>
- [21] Ako predchádzať chybám pri betonáži | ASB.sk. ASB.sk | odborný portál | architektúra, stavebníctvo, biznis [online]. Copyright © JAGA GROUP, s.r.o. Všetky práva vyhradené. [cit. 14.10.2021]. Dostupné z: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/zaklady-a-hrubavstavba/betonaz/ako-predchadzat-chybam-pri-betonazi>
- [22] Diagnostika betonových konstrukcí | ASB Portal. ASB-portal.cz | odborný portál | architektura, stavebnictví, byznys [online]. Copyright © Jaga Media, s.r.o. Všechna práva vyhrazena. [cit. 8.11.2021]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hrubavstavba/cement-a-beton/diagnostika-betonovych-konstrukci>

- [23] BERNARD, L. Stavební průzkum a diagnostika konstrukce, [online]. [cit. 10.11.2021]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=178570
- [24] HOBST, L.; ADAMEK, J.; CIKRLE, P.; SCHMID, P. Diagnostika stavebních konstrukcí [online]. [cit. 8.11.2021]. Dostupné z: http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BI52-Diagnostika%20stavebnich%20konstrukci/diagnostika_stavebnich_konstrukce_-_diagnostika_stavebnich_konstrukci.pdf
- [25] HOLBOVA, M. Zkoušení počáteční pevnosti betonu elektronickým tvrdoměrem [online]. [cit. 8.11.2021]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=107244
- [26] BOSCH D-tect 100 WALLSCANNER Professional ANIXNEYTHΣ YAIKΩN [online]. [cit. 8.11.2021]. Dostupné z: https://static.car.gr/21963923_0_b.jpg
- [27] Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu u drátkobetonu [online]. [cit. 10.11.2021]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18133-zkouseni-a-stanoveni-pevnosti-v-tahu-u-dratkobetonu>
- [28] KASUBA, M. Analýza výsledků zkoušek vykonaných na miniaturních zkušebních tělesech s různou geometrií [online]. [cit. 11.11.2021]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=151035
- [29] HOBZA, J. Odolnost betonu proti CHRL [online]. [cit. 11.11.2021] Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/81007/F1-DP-2019-Hobza-Jakub-Diplomova%20prace_Hobza.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [30] Ocel pro stavební ocelové konstrukce [online]. [cit. 15.11.2021]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/ocelove-konstrukce/13744-ocel-pro-stavebni-ocelove-konstrukce>
- [31] Vlastnosti a zkoušení materiálu [online]. [cit. 15.11.2021]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni_VZM.pdf
- [32] Proceq Pundit PL-200 Ultrasonic Testing Instrument with Two 54 KHz Transducers [online]. [cit. 8.11.2021]. Dostupné z: https://m.media-amazon.com/images/I/61YVoMwfNqL_SL1000_.jpg
- [33] Sucharda, O. Identification of Fracture Mechanic Properties of Concrete and Analysis of Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams without Transverse Reinforcement. Materials 2020, 13, 2788.

- [34] MARCALIKOVA, Z.; CAJKA, R.; BILEK, V.; BUJDOS, D.; SUCHARDA, O. Determination of Mechanical Characteristics for Fiber-Reinforced Concrete with Straight and Hooked Fibers. *Crystals* 2020, 10, 545.
- [35] GANDEL, R. Aspekty testování a mechanické vlastnosti drátkobetonu . Ostrava, 2021. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [36] Dramix® steel fiber concrete reinforcement solutions - Bekaert.com. Steel wire transformation and coatings - Bekaert.com [online]. Copyright © 2021 Bekaert. All rights reserved. [cit. 26.11.2021]. Dostupné z: <https://www.bekaert.com/en/products/construction/concrete-reinforcement/dramix-steel-fiber-concrete-reinforcement-solutions>
- [37] MasterFiber 482 [online]. [cit. 26.11.2021]. Dostupné z: <https://assets.master-builders-solutions.com/cs-cz/mbs-masterfiber-482-tl.pdf>
- [38] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu. Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.
- [39] ČSN EN 12504-2: Zkoušení betonu v konstrukcích. Část 2: Nedestruktivní zkoušení – stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem.
- [40] ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu.
- [41] ČSN EN ISO 6892-1 (42 0310): Kovové materiály - Zkoušení tahem. Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty
- [42] ČSN 73 1326 -Z1, Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látkách. ICS 91.100.30. Praha: Český normalizační institut, 2003.

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 - Únosnosť nosníka z prostého betónu [10]	12
Obrázok 2 – Zaťažovanie železobetónového nosníka v skúšobnom lise [autor].....	12
Obrázok 3 - Pôsobenie predpínacej výstuže na nosník [10].....	13
Obrázok 4 - Predpätý betón [autor]	14
Obrázok 5 - Prierez sedemdrôtovým predpínacím lanom [13].....	14
Obrázok 6 - Rovné oceľové drôtičky s voľným zväzkovaním [15]	15
Obrázok 7 - Oceľové drôtičky s dvojitým koncovým ohybom a lepeným zväzkovaním [15]	15
Obrázok 8 - Krytie výstuže [autor]	16
Obrázok 9 – Strata krycej vrstvy a korózia výstuže [22].....	18
Obrázok 10 - Korózia podporená pôsobením chloridov [19].....	19
Obrázok 11 - Poškodenie betónu vplyvom mrazu [21]	20
Obrázok 12 - Makrotrhliny spôsobené alkalicko kremičitou reakciou [19].....	22
Obrázok 13 - Ultrazvukový prístroj Pundit PL-200 [32].....	24
Obrázok 14 Elektromagnetický indikátor výstuže BOSCH D-tect 100 [26].....	25
Obrázok 15 - Schmidtový tvrdomer, 1 – baran, 2 – úderník, 3 – pružina, 4 – puzdro, 5 – stupnica [25]	26
Obrázok 16 - Jadrová vrtačka [autor]	28
Obrázok 17 - Píla na upravenie dĺžky jadrových vývrtov [autor]	28
Obrázok 18 Sekaná sonda na železobetónovom nosníku [autor]	29
Obrázok 19 - skúška pevnosti v tlaku na jadrových vývrtoch [autor]	30
Obrázok 20 - Skúška pevnosti výstuže [autor]	31
Obrázok 21 Vzorok uložený na skúšku CHRL [autor].....	32
Obrázok 22 - Pracovný diagram ocele [22]	34
Obrázok 23 - Zaznačovanie trhlín na nosníku [autor]	36
Obrázok 24 - Statická zaťažovacia skúška [autor]	37

Obrázok 25 - Vývoj trhlín na nosníku číslo 1 [autor].....	38
Obrázok 26 - Vývoj trhlín na nosníku číslo 2 [autor].....	39
Obrázok 27 - Vývoj trhlín na nosníku číslo 2 [autor].....	40
Obrázok 28 - Uloženie nosníka v skúšobnom lise [autor].....	41
Obrázok 29 - Príprava vzoriek na skúšku pevnosti v tlaku [autor]	42
Obrázok 30 - Lokalizácia výstuže elektromagnetickým indikátorom [autor]	42
Obrázok 31 - Upevnenie jadrovej vrtačky na nosník [autor].....	43
Obrázok 32 - Jadrové vývrty [autor].....	43
Obrázok 33 - Umiestnenie jadrových vývrtoch na nosníku číslo 1 [autor]	44
Obrázok 34 - Umiestnenie jadrových vývrtoch na nosníku číslo 2 [autor].....	45
Obrázok 35 - Vzorka pripravená na skúšku pevnosti v tlaku [autor]	46
Obrázok 36 - Odhalenie výstuže sekanou sondou [autor]	47
Obrázok 37 - Skutočné rozloženie výstuže v nosníku číslo 1 [autor]	48
Obrázok 38 - Skutočné rozloženie výstuže na nosníku číslo 2 [autor].....	49
Obrázok 39 - Príprava vzoriek výstuže [autor].....	50
Obrázok 40 - Deformácia výstuže po prevedení skúšky [autor]	50
Obrázok 41 - Dramix 3D 65/60 BG [36].....	53
Obrázok 42 - Drôtky Dramix® 3D 55/30 BG [36]	54
Obrázok 43 - MasterFiber 482 [37]	54
Obrázok 44 - DIGI - SCHMIDT 2 [autor].....	56
Obrázok 45 - Miesta prevedenia skúšky Schmidtovým tvrdomerom na nosníku číslo 1 [autor].....	57
Obrázok 46 - Miesta prevedenia skúšky Schmidtovým tvrdomerom na nosníku číslo 2 [autor].....	57
Obrázok 47 - Príprava vzorky na ultrazvukovú skúšku [autor].....	58
Obrázok 48 - Vyradená vzorka zo skúšky CHRL [autor]	62
Obrázok 49 - vzorka po 100 cykloch [autor].....	62

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 - Pevnosť v tlaku	46
Tabuľka 2 - Maximálna sila vyvinutá pri skúške ťahom výstuže.....	52
Tabuľka 3 - Únosnosť železobetónových nosníkov – experimentálny program 1 [33]	53
Tabuľka 4 - Únosnosť železobetónových nosníkov – experimentálny program 2 [34]	54
Tabuľka 5 – Únosnosť železobetónových nosníkov – experimentálny program 3 [35]	54
Tabuľka 6 - Porovnanie objemových hmotností.....	55
Tabuľka 7 - Pevnosť v tlaku zistená Schmidtovým tvrdomerom vo vodorovnej ose	56
Tabuľka 8 - Pevnosť v tlaku zistená Schmidtovým tvrdomerom na zvislej ose	56
Tabuľka 9 - Porovnanie dynamického modulu pružnosti.....	58
Tabuľka 10 - Súčet odpadov na plochu [g/m^2] pre nosník číslo 1.....	60
Tabuľka 11 - Súčet odpadov na plochu [g/m^2] pre nosník číslo 2.....	60
Tabuľka 12 - Súčet odpadov na plochu [g/m^2]	62

Zoznam grafov

Graf 1 - Priebeh zaťažovacích cyklov na nosníku číslo 1	36
Graf 2 - Priebeh zaťažovacích cyklov na nosníku číslo 2	37
Graf 3 - Porovnanie pevnosti v tlaku	46
Graf 4 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii.....	51
Graf 5 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii.....	51
Graf 6 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii.....	52
Graf 7 - Závislosť pôsobiacej sily na deformácii.....	52
Graf 8 - Porovnanie objemových hmotností.....	55
Graf 9 - Porovnanie dynamického modulu pružnosti.....	59
Graf 10 - Priemerný súčet odpadov po cykloch [g/m ²] na nosníku číslo 1	60
Graf 11 - Priemerný súčet odpadov po cykloch [g/m ²] na nosníku číslo 2	61
Graf 12 - Priemerný súčet odpadov po cykloch [g/m ²]	63