

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**



**Vliv uplatnění vysokopecních strusek a fluidního popílku  
jako náhrad cementu v betonech pro cementobetonové  
kryty na konečnou cenu vozovky**

**Effect of the use of blast furnace slag and fly ash as cement  
substitutes in concrete pavement surfacing on the final  
pavement cost**

Vypracoval: Bc. Pavel Koubík

Studijní program – STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor – Stavební management

Vedoucí práce: Ing. Lucie Brožová, Ph.D.

Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Praha 2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koubík** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **478682**  
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví**  
Studijní program: **Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Stavební management**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv uplatnění vysokopepných strusek a fluidního popílku jako náhrad cementu v betonech pro cementobetonové kryty na konečnou cenu vozovky**

Název diplomové práce anglicky:

**Effect of the use of blast furnace slag and fly ash as cement substitutes in concrete pavement surfacing on the final pavement cost**

Pokyny pro vypracování:

- zpracování rešerše na téma cementobetonových krytů s důrazem na materiálová řešení, včetně využití alternativních pojiv na bázi popílků a strusek se zahrnutím vlivu jejich aplikace úprav pro betonové směsi
- návrh směsi pro CBK s vybraným souborem dílčích náhrad cementu (min. 3) a jejich následná výroba
- experimentální ověření vybraných materiálových vlastností použitých náhrad a porovnání vlivu náhrad na základní materiálové vlastnosti betonu (pevnost, trvanlivost)
- stanovení nákladové výrobní ceny z pohledu výroby variant betonu pro CBK, vč. principu tvorby kalkulace ceny

Seznam doporučené literatury:

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.  
SCHNEIDEROVÁ HERALOVÁ, Renáta, Lucie BROŽOVÁ a Stanislav VITÁSEK. Ekonomika výstavbových projektů. Praha: Powerprint, 2018. ISBN 978-80-7568-130-0.  
ZAJÍČEK, Jan a kolektiv. Technologie stavby vozovek. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2014. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-59-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Lucie Brožová, Ph.D. katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví FSV**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Jan Valentin, Ph.D. katedra silničních staveb FSV**

Datum zadání diplomové práce: **18.09.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Lucie Brožová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Renáta Schneiderová Heralová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucích diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 8.1.2024

.....

Bc. Pavel Koubík



## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych vyjádřit svou upřímnou vděčnost všem, kteří mi pomohli při vypracování této diplomové práce.

Nejprve bych rád poděkoval svým vedoucím diplomové práce paní Ing. Lucii Brožové, Ph.D. a panu Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., za jejich cenné rady, odborné vedení a trpělivost. Jejich podněty a připomínky byly neocenitelným přínosem pro mé úsilí a rozvoj mého odborného pohledu.

Dále bych chtěl vyjádřit vděčnost těm, kteří mi pomohli se zpracováním experimentální části práce. Jmenovitě jde o Lukáše Jogla, doc. Ing. Pavla Reitermana, Ph.D. a Ing. Zdeňka Proška, Ph.D. Jejich pohledy na věc byly pro mě velkou inspirací. Vážím si jejich trpělivosti a množství času, který mně a této práci věnovali.

Také děkuji své rodině a přátelům za jejich neustálou podporu, povzbuzení a pochopení během celého studia. Bez jejich morální opory by tato cesta nebyla tak úspěšná.

Nemohu zapomenout ani na své kolegy a spolužáky, se kterými jsem sdílel tuto výzvu. Jejich podněty, diskuze a kolegiální prostředí přispěly k obohacení mého studia.

V neposlední řadě děkuji mé univerzitě za poskytnutí možnosti studovat na této prestižní instituci a za poskytnutí zdrojů potřebných pro mé vzdělání.

Tato diplomová práce by nebyla možná dokončit bez přínosu všech Vás. Děkuji Vám za vaši neocenitelnou podporu a příspěvek k mému akademickému růstu.





Vliv uplatnění vysokopecních strusek a fluidního popílku jako náhrad cementu v betonech pro cementobetonové kryty na konečnou cenu vozovky

Effect of the use of blast furnace slag and fly ash as cement substitutes in concrete pavement surfacing on the final pavement cost



## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá využitím vedlejších produktů metalurgického a energetického průmyslu, tj. vysokopecních strusek a fluidního popílku jako částečných náhrad cementu v betonech pro cementobetonové kryty vozovek. Vhodnou aktivací těchto vedlejších produktů lze docílit snížení objemu výroby cementu, což je zcela zásadní pro snížení obrovské uhlíkové stopy z jeho výroby a přispět tak k udržitelnějšímu stavebnictví. Cílem práce bylo posoudit a zhodnotit proveditelnost nahrazení části cementu zmíněnými alternativními pojivy, konkrétně pak jejich vliv na základní materiálové vlastnosti betonu (pevnost a trvanlivost) a na konečnou cenu cementobetonové vozovky. Pro jejich experimentální ověření byly vyrobeny zkušební vzorky betonu, kde byl z 25 % hmotnosti nahrazen cement dvěma typy vysokopecní strusky a fluidním popílkem, či jejich kombinací, a došlo také k ověření možnosti nahrazení celé jedné frakce kameniva ocelářskou struskou. Během 7 – 90 dní zrání byl sledován vývoj mechanických vlastností vyrobených vzorků, a dále pak povrchová nasákavost a odolnost proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. V ekonomické části práce byly stanoveny výrobní náklady navržených betonů s využitím kalkulačního vzorce. Následně byly vykalkulované ceny navržených betonů vloženy do softwaru KROS 4, kde byla stanovena konečná cena cementobetonového krytu vozovky. Bylo zjištěno, že využití těchto vedlejších produktů může pozitivně ovlivnit beton po technické i ekonomické stránce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

cementobetonový kryt, cement, vysokopecní struska, fluidní popílek, vysokorychlostní mletí, beton, mechanické vlastnosti, odolnost, kalkulační vzorec

## **ABSTRACT**

This master thesis deals with the utilization of by-products from metallurgical and energy industries, namely blast furnace slag and fly ash, as partial replacements for cement in concrete for road pavements. Appropriately activating these by-products, it is possible to achieve a reduction in the volume of cement production, which is crucial for reducing the immense carbon footprint associated with its manufacturing and contributing to a more sustainable construction industry. The objective of the study was to assess and evaluate the feasibility of replacing a portion of the cement with the mentioned alternative binders. Specifically, the study aimed to investigate their impact on the fundamental material properties of concrete (strength characteristics and durability) and on the final cost of the cement concrete pavement. For experimental verification, concrete test samples were produced, where 25 % by mass of cement was replaced by two types of blast furnace slag and one type of fly ash, either individually or in combination. The possibility of replacing the entire aggregate fraction with steel slag was also examined. During the curing period of 7 to 90 days, the development of the mechanical properties of the produced samples was monitored, along with surface absorption, resistance to water and chemical de-icing agents. In the economic part of the thesis, the production costs of the proposed concrete variants were determined using a cost code. Subsequently, the calculated prices of the proposed concretes were input into the KROS 4 software, where the final cost of the cement concrete pavement was established. It was found that the use of these by-products can positively influence concrete from both technical and economic perspectives.

## **KEY WORDS**

concrete pavement, cement, blast furnace slag, fly ash, high-speed grinding, concrete, mechanical properties, durability, cost code

# OBSAH

Úvod.....	15
Cíl práce.....	19
Metodika práce.....	21
<b>ČÁST I - TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>23</b>
1 Cementobetonové kryty .....	23
1.1 Použití cementobetonových krytů .....	23
1.2 Členění cementobetonových krytů .....	26
1.3 Materiály pro výrobu betonu cementobetonových krytů.....	28
1.4 Poruchy cementobetonových krytů .....	33
2 Hydratace cementu.....	37
2.1 Hydratace aluminátů.....	37
2.2 Význam sádrovce při tuhnutí cementu .....	38
2.3 Hydratace silikátů .....	38
2.4 Úloha portlanditu .....	40
3 Alternativní typy pojiv pro cementobetonové kryty.....	41
3.1 Strusky .....	43
3.2 Popílky.....	51
3.3 Aktivace.....	57
4 Využití strusky a popílků jako náhrad cementu v betonových směsích pro CBK.....	61
4.1 Čerstvý beton .....	61
4.2 Ztvrdlý beton .....	63
<b>ČÁST II - EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>71</b>
5 Experimentální metody .....	73
5.1 Čerstvý beton .....	73
5.2 Ztvrdlý beton .....	75
6 Použité materiály a vzorky.....	86
6.1 Specifikace vstupních surovin .....	86
6.2 Zkušební vzorky .....	91
7 Výsledky a diskuze .....	94
7.1 Ztvrdlý beton .....	94

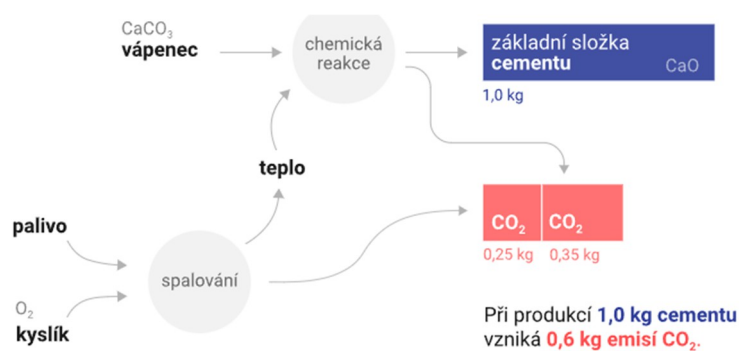
7.2	Vyhodnocení experimentální části .....	105
<b>ČÁST III – EKONOMICKÁ ČÁST .....</b>		<b>107</b>
8	Kalkulační členění nákladů .....	108
8.1	Přímý materiál .....	108
8.2	Přímé mzdy .....	109
8.3	Náklady na provoz strojů a zařízení .....	109
8.4	Ostatní přímé náklady .....	110
8.5	Výrobní režie .....	110
8.6	Správní režie .....	111
8.7	Poddodávky .....	111
8.8	Zisk .....	111
9	Popis uvažované betonárny .....	112
9.1	Princip výroby betonových směsí .....	112
10	Kalkulace ceny navržených betonových směsí .....	114
10.1	Přímé náklady .....	114
10.2	Nepřímé náklady .....	120
10.3	Cena .....	122
11	Konečná cena cementobetonového krytu vozovky .....	123
11.1	Rozbory cen cementobetonových krytů s využitím navržených betonů .....	124
11.2	Vyhodnocení .....	129
Závěr .....		131
Seznam použité literatury .....		133
Seznam obrázků .....		145
Seznam tabulek .....		148

# ÚVOD

V posledních letech dochází k významnému rozvoji ekologických technologií a materiálů, což je klíčové pro snižování environmentálních dopadů v různých odvětvích, včetně stavebnictví. Beton, jako jeden z předních stavebních materiálů dnešní doby, představuje neoddiskutovatelný pilíř mnoha stavebních projektů. Výroba portlandského cementu, který je jednou ze základních složek betonu tedy zaujímá v průmyslovém sektoru významné místo, nicméně je současně spojena s významnými ekologickými výzvami, především v oblasti emisí oxidu uhličitého.

Toto téma jsem si vybral z několika důvodů. Prvním důvodem je zájem o vývoj nových ekologičtějších stavebních materiálů, které mají potenciál snížit uhlíkovou stopu a mohou přispět k udržitelnějšímu stavebnictví. Dalším důvodem je ten, že se tématu využití odpadních produktů a recyklace ve stavebnictví již dlouhodobě věnuji, a tato diplomová práce mi umožní rozšířit doposud získané znalosti. Nakonec věřím, že moje práce může mít také praktický dopad.

Emise oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) se při výrobě cementu uvolňují ze dvou hlavních zdrojů, a to z rozkladu vápence, tzv. kalcinace a ze spalování paliva pro ohřev pece. Množství vznikajících emisí  $\text{CO}_2$  při výrobě cementu popisuje následující obrázek.



Obrázek 1 – vznikající emise  $\text{CO}_2$  při výrobě cementu, převzato z [1]

Dle celosvětových statistik z roku 2021 byla roční produkce cementu zhruba 4,4 mld. tun [2]. Z předchozího obrázku vyplývá, že výroba cementu byla v roce 2021 příčinou uvolnění cca. 2,64 mld. tun emisí  $\text{CO}_2$  do ovzduší, což odpovídá 7 – 9 % [2] celkových celosvětových emisí. Z tohoto důvodu se stává snižování emisí z cementové výroby klíčovým cílem v rámci úsilí o udržitelnost. Jedním z potenciálních přístupů k dosažení tohoto cíle je nahrazení části tradičního portlandského cementu v betonových směsích vedlejšími produkty jiných odvětví

s podobnými pojivými vlastnostmi, což by mohlo efektivně snížit objem výroby cementu a tím i celkové emise.

Tato diplomová práce se zaměřuje na možnost využití odpadních produktů metalurgického a energetického průmyslu, konkrétně vysokopecních strusek a fluidního popílku, v betonech pro cementobetonový kryt vozovek. Tyto vedlejší produkty, jejichž produkce se neustále zvyšuje, často končí na skládkách v blízkosti hutí a elektráren i přesto, že je zde velmi vysoká snaha o jejich recyklaci. To s sebou přináší rizika v podobě výskytu jemných částic v ovzduší v blízkosti hald, které jsou pro lidský organismus toxické. V současnosti je zde dále rozvíjena jedna z novějších metod jejich efektivní recyklace, která spočívá ve vysokorychlostním mletí. Tento způsob recyklace je nejen ekonomicky výhodný, a tudíž v praxi realizovatelný, ale také přináší řešení pro vytváření materiálu s velmi dobrými pojivými vlastnostmi. Využití těchto vedlejších produktů jako částečných náhrad cementu v betonu umožňuje minimalizaci jejich nutného skladování, šetří přírodní zdroje vápence a také finance. Zvláště významným přínosem je pak redukce vysokého množství emisí CO<sub>2</sub>, které jsou spjaté s tradiční výrobou cementu.

V praxi lze najít několik příkladů, kdy lze částečným nahrazením cementu vedlejšími produkty metalurgického a energetického průmyslu snížit náklady na výstavbu vozovek či jiných stavebních projektů. Názorným příkladem může být přehrada Hungry Horse, která se nachází v USA ve státě Montana. K výstavbě této přehrady bylo zapotřebí zhruba 2 360 943 m<sup>3</sup> betonu [3]. V rámci projektu došlo k optimalizaci složení betonu, ve kterém byl cement ze 35 % hmotnosti nahrazen uhelným popílkem. Touto optimalizací došlo k úspoře zhruba 2 milionů amerických dolarů, a navíc také ke zvýšení kvality betonu a tím i k prodloužení jeho životnosti [4]. Dalším významným přínosem z technického a ekonomického pohledu je prodloužení životnosti staveb, které tak umožňuje snížení nákladů na údržbu, opravy a rekonstrukce. Tímto tématem se na našem území zabývá i společnost Skanska, a.s. ve spolupráci s Ředitelstvím silnic a dálnic ČR, kteří v roce 2018 použili beton s obsahem mleté vysokopecní strusky k pokládce cementobetonového krytu na dálnici D1 na úseku mezi Přerovem a Lipníkem nad Bečvou. Již po pár letech provozu lze nalézt povzbudivé výsledky, kdy byl tento přínos potvrzen na základě několika provedených laboratorních zkoušek [5]. Výrazně delší studie byla provedena na území Nizozemska, kde začali s používáním betonu s popílkem nebo vysokopecní struskou již mezi lety 1919 – 1930. Tento typ betonu používali k výstavbě plavebních komor v Severním moři, tedy ve velice agresivním vnějším prostředí. Laboratorní zkoušky funkčnosti provedené po 80 letech neodhalily žádné vážné poškození



betonu způsobené chemickým napadením či korozí výztuže. U zdymadla, které bylo postavené z prostého portlandského cementu bylo po této době zjištěno velmi vážné poškození způsobené sírany a alkalicko-křemičitou reakcí [6].



## **CÍL PRÁCE**

Cílem této diplomové práce je posoudit a zhodnotit proveditelnost nahrazení části cementu v betonech pro cementobetonové kryty vozovek vedlejšími produkty metalurgického a energetického průmyslu, tj. vysokopeční struskou a fluidním popílkem. Konkrétně bude zkoumán jejich vliv na základní materiálové vlastnosti vozovkového betonu (pevnost, trvanlivost) a také jejich vliv na konečnou cenu vozovky.



# METODIKA PRÁCE

Tato diplomová práce je rozdělena do tří částí. V rámci teoretické části jsou analyzovány základní principy a charakteristiky cementobetonových kytů vozovek. Zaměřuji se zde zejména na materiálové složení, které je následně důležité pro zpracování experimentální části. Poté se práce zabývá využitím alternativních pojiv na bázi vysokopecních strusek a fluidních popílků v betonech pro cementobetonové kryty vozovek, přičemž zde navazuji na mé poznatky získané během studia a zpracování bakalářské práce. Součástí teoretické práce bude také průzkum vědeckých článků v odborných časopisech, jako jsou například Construction and Building Materials a Cement and Concrete research. To mi poskytne důležité informace a poznatky jiných autorů a kapacit v daném oboru, které budu moci zohlednit a využít v experimentální části práce.

V další části práce, tedy experimentální, je navrženo složení betonových směsí s částečným nahrazením cementu zmíněnými alternativními pojivy, přičemž zde vycházím z existující receptury na beton pro cementobetonový kryt. Vybrána jsou ta alternativní pojiva, která jsem testoval již v mé bakalářské práci na cementových maltách a jevila se jako velmi potencionální. Z těchto navržených betonových směsí jsou dle příslušných norem vyrobeny zkušební vzorky, které následně prošly experimentálním ověřením. V této souvislosti jsem sledoval mechanické vlastnosti, resp. pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu po dobu 90 dní zrání. Další sledovanou vlastností je trvanlivost, kdy je provedena zkouška odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek a zkouška povrchové nasákavosti. Tyto vybrané parametry jsou z mého pohledu klíčové pro cementobetonové vozovky. Všechny provedené zkoušky jsou provedeny dle normových postupů. Na konci experimentální části je vyhodnocen vliv vysokopecních strusek a fluidního popílku na zmíněné vlastnosti a tento vliv je porovnán s výsledky autorů zabývajících se touto tematikou.

V ekonomické části pak je provedeno vyhodnocení vlivu zmíněných alternativních pojiv na konečnou cenu cementobetonové vozovky. K tomu bylo nutné nejdříve stanovit výrobní náklady navržených betonů, přičemž bylo osloveno několik betonáren, abych získal potřebná data. Cena betonů je vyčíslena pomocí kalkulačního vzorce, což je základní nástroj pro určení nákladů. Nakonec v softwaru KROS 4 byly nalezeny položky cementobetonového krytu, do které se zahrnuly ceny vyrobených betonů, a došlo k určení konečné ceny vozovky. Poté jednotlivé ceny vozovek jsou v závěru diplomové práce porovnány a vyhodnoceny z hlediska

vlivu alternativních pojiv na cenu vozovky. V úplném závěru práce pak je vybrána nejvýhodnější varianta betonu po technické a ekonomické stránce, současně jsou shrnuty cíle a dosažené výsledky.

# ČÁST I - TEORETICKÁ ČÁST

## 1 CEMENTOBETONOVÉ KRYTY

### 1.1 POUŽITÍ CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ

Cementobetonové kryty vozovek jsou dlouhodobě ověřenou technologií pro výstavbu a rekonstrukce dálnic, vysoce zatížených silnic a letištních ploch. Betonové vozovky se realizují již od první poloviny 20. století především ve Spojených státech, Německu a Rakousku, kteří se v této technologii řadí dnes mezi absolutní špičku. Výhody a nevýhody CB krytu lze posuzovat ze dvou perspektiv, a to z pohledu uživatele komunikace a z pohledu správce komunikace. Největší výhodou cementobetonových vozovek z pohledu správce komunikace je životnost, která dosahuje při správném návrhu, provedení a údržbě 35 až 50 let, a to při minimálních provozních nákladech [7].

V očích veřejnosti nejsou CB kryty příliš v oblibě, neboť jsou spojovány s nepohodlnou jízdou a hlučností povrchu. Jako příklad lze uvést úseky dálnice D1 mezi Humpolcem a Brnem, kde donedávna byl původní CB kryt, který byl vybudován ve své době moderní technologií, která neumožňovala vyztužování spár. Vlivem vysokého dopravního zatížení především od nákladní automobilové dopravy docházelo k vertikálnímu posuvu jednotlivých desek krytu a ke vzniku tzv. schůdků na spárách (viz *obrázek 2*). V současnosti používané technologie s kluznými trny a kotvami jsou schopné zmíněné nedostatky eliminovat a pro nové úseky je tak charakteristická nižší hlučnost srovnatelná s asfaltovým krytem a bezpečně plynulá jízda [8].



*Obrázek 2 – schody na spárách, dálnice D1 (Rousínov), převzato z [9]*

Shrnutí výhod (+) a nevýhod (-) cementobetonových krytů vůči asfaltovým krytům [9; 10]:

a) z hlediska správce komunikace:

- + životnost (35-50 let) - vyšší pevnost a odolnost vůči vlivům prostředí
- + nižší náklady na provoz a údržbu
- + menší počet uzavírek po dobu životnosti
- složitější technologie oprav
- delší doba trvání oprav
- nepřizpůsobuje se podkladu (poruchy vyvolané nerovnoměrným sedáním)
- delší doba výstavby (tvrdnutí betonu)

b) z hlediska uživatele komunikace:

- + zaručení dobrých protismykových vlastností
- + větší bezpečnost jízdy (především za deště - nejsou tvořeny koleje)
- + světlý povrch - lepší viditelnost
- + nižší spotřeba paliva
- + nižší povrchová teplota (v létě komfortnější)
- + nezatěžuje prostředí škodlivými výluhy
- + menší četnost uzavírek
- hlučnost (závisí na textuře povrchu)
- schůdky na spárách (v případě použití technologie bez kluzných trnů a kotev)

V praxi jsou při rozhodování o vhodném druhu krytu na konkrétní stavbu klíčovým faktorem finance. Bohužel se ale často upřednostňuje výše nákladů vynaložených na výstavbu a přehlídí se dlouhodobé ekonomické výhody. Další významnou výhodou cementobetonových krytů z pohledu správce komunikace jsou výrazně nižší náklady na provoz a údržbu oproti asfaltovým krytům, což bylo potvrzeno analýzou, kterou provedla Birnbaumová [11]. V rámci analýzy se autorka zaměřila na vyčíslení a zhodnocení finančních nákladů vynaložených na výstavbu, provoz a údržbu sousedících úseku dálnic D1 a D2 s cementobetonovým a asfaltovým krytem. Vybrané úseky vybudované ve stejné době byly zatíženy stejnou dopravní intenzitou a působily na ně stejné klimatické podmínky. Z *tabulky 1* je zcela zřejmé, že dlouhodobě hospodárnější jsou na komunikacích s vysokým dopravním zatížením vozovky s cementobetonovým krytem. Obdobná analýza byla provedena Moralesem ve Španělsku, a to na dálnici AP-4 vedoucí ze Sevilly do Cádizu. Bylo zjištěno, že náklady na údržbu a provoz dálnice s asfaltovým krytem



byly za období 40 let zhruba 2,27krát vyšší než náklady na dálnici s cementobetonovým krytem (323 988 €/km vůči 142 476 €/km) [11].

Tabulka 1 – srovnání celkových nákladů CB a AB krytů na vybraných úsecích dálnic, vlastní úprava z [11]

Úsek D1	017 CB KRYT	018 ASFALTOVÝ KRYT
	Brno západní přivaděč - V. Bíteš 1972 - 2011 (39 let)	Brno jih - Brno západní přivaděč 1976 - 2011 (35 let)
Pořizovací náklady (Kč/m <sup>2</sup> )	267,13	234,00
Náklady na opravy a údržbu (Kč/m <sup>2</sup> )	561,98	965,06
	829,11	
Celkové náklady (Kč/m <sup>2</sup> )	<b>69,1 %</b> z nákladů na asfaltový kryt	1199,06
Úsek D2	023 CB KRYT	024 ASFALTOVÝ KRYT
	Hustopeče - Břeclav 1980 - 2011 (31 let)	Břeclav - hranice ČR/SR 1980 - 2011 (31let)
Pořizovací náklady (Kč/m <sup>2</sup> )	256,04	277,48
Náklady na opravy a údržbu (Kč/m <sup>2</sup> )	282,06	1378,82
	538,10	
Celkové náklady (Kč/m <sup>2</sup> )	<b>32,5 %</b> z nákladů na asfaltový kryt	1656,30

Výzkum provedený na technické univerzitě v německém Darmstadtu se zabýval srovnáním dopadů na životní prostředí 30letého provozu betonové a asfaltové vozovky. Závěrem výzkumu bylo, že betonová vozovka je v rámci výstavby ekologicky náročnější než asfaltová, ale v rámci životního cyklu 30 let jsou její dopady nižší. Dopady výstavby a provozu obou druhů vozovek jsou však zanedbatelné oproti znečištění ovzduší od dopravy, jak ukazuje následující tabulka [12].

Tabulka 2 – analýza dopadů betonové a asfaltové vozovky na životní prostředí za 30 let, vlastní úprava z [12]

Fáze	Druh vozovky	Potenciál globálního oteplování [kg CO <sub>2</sub> -ekv.]	Potenciál fotochem. tvorby ozonu [kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> -ekv.]	Potenciál acidifikace [kg SO <sub>2</sub> -ekv.]	Potenciál eutrofizace [kg PO <sub>4</sub> -ekv.]
Výstavba	Asfalt	1 730 430	431	8 516	1 264
	Beton	2 710 311	380	6 374	1 048
Provozování	Asfalt	1 048 154	316	6 028	764
	Beton	60 520	46	265	36
<b>Doprava</b>		230 904 557	167 980	1 066 521	202 078

## 1.2 ČLENĚNÍ CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ

CB kryty neboli tuhé vozovky se člení do tří skupin dle ČSN 73 6123-1 [13] podle významu dané komunikace a třídy dopravního zatížení (ČSN 73 6114 [14] pro letištní dráhy a plochy a změny Z1 [15] této normy pro ostatní typy komunikací). Tyto skupiny jsou od sebe odlišeny požadavky na výsledné vlastnosti CB krytů, způsoby zkoušení a požadavky na použité materiály. Skupiny CB krytů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 3 – členění cementobetonových krytů, vlastní úprava z [13]

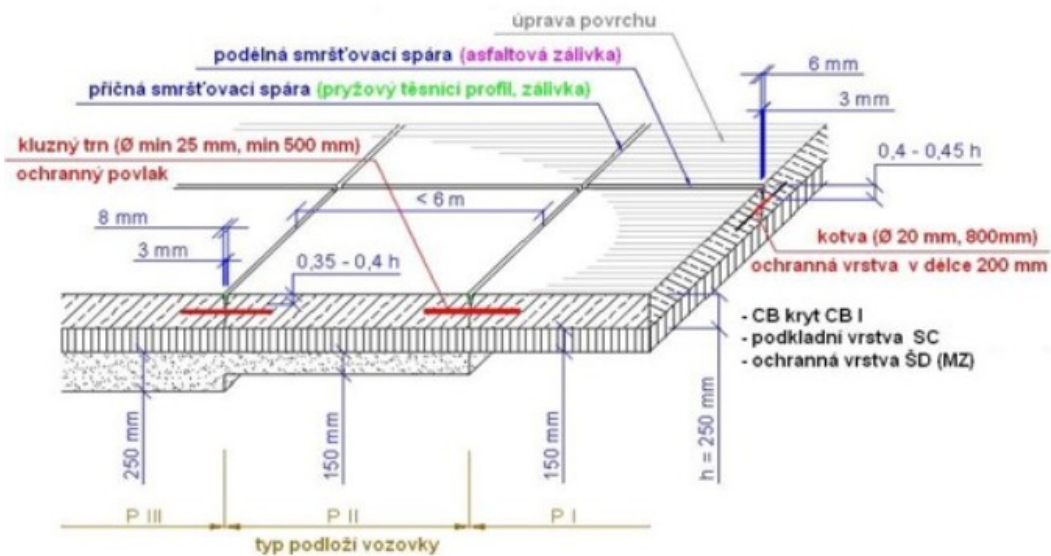
Specifikace komunikace	Třída dopravního zatížení podle ČSN 73 6114 a Změny Z1	Doporučené nejnižší zařazení do skupiny
Letištní dráhy a plochy, dálnice, rychlostní silnice, rychlostní místní komunikace, silnice I. třídy	S, I–III	CB I
Silnice II. a III. třídy, sběrné místní komunikace, obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy	III–V	CB II
Obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy, dočasné komunikace a účelové komunikace	IV–VI	CB III

Dále lze CB kryty dělit dle použité technologie vyztužování a postupu provádění zejména dle zahraniční literatury na [16]:

- Nevyztužený cementobetonový kryt se spárami (URC): příčné spáry s kluznými trny nebo bez trnů
- Vyztužený se spárami (JRC): desky vyztužené v podélném i příčném směru, příčné spáry obvykle s kluznými trny
- Spojitě vyztužený cementobetonový kryt (CRCP): cementobetonový kryt se souvislou podélnou výztuží bez příčných spár
- Spojitě vyztužená cementobetonová podkladní vrstva (CRCR): betonová vrstva se souvislou podélnou výztuží bez mezilehlých spár s množstvím oceli nižším, než má CRCP. Je překryta asfaltovou obrusnou vrstvou.
- Whitetopping: překrytí původní vrstvy vozovky novou tenkou vrstvou CB krytu

URC, tedy nevyztužený CB kryt s příčnými spárami s kluznými trny (viz *obrázek 3*) je v rámci ČR nejvíce využíván. K realizaci příčných spár dochází v okamžiku, kdy je beton lehce vyzrálý, tj. několik hodin po realizaci krytu. Příčné spáry se provádí pomocí kotoučové pily, kterou se kryt nařízne do předepsané tloušťky a pak by měl sám doprasknout. Vzniklé spáry se dále musí řádně utěsnit proti pronikání vody do systému, neboť průnikem vody může dojít k poruše krytu chemickým rozpadem materiálu a v zimním období díky objemové rozpínavosti vody při

proměně na led. Rozměry jednotlivých desek mají vliv na napětí, které vzniká v důsledku vnějšího zatížení. Z tohoto důvodu je výhodné upřednostnit obdélníkový tvar desek oproti čtvercovému, protože dochází k lepšímu rozložení zatížení a napětí na desce. Rozměr desek je ovlivněn zejména jejich tloušťkou a existují normové směrnice stanovující orientační vztahy, které určují vhodné poměry rozměrů jednotlivých desek. Varianta bez kluzných trnů se v praxi již příliš nevyužívá, protože musí dojít ke zvýšení tloušťky desek a desky nefungují jako spojitý systém. To má za následek defekty jako např. nerovnoměrné sedání jednotlivých desek vůči sobě [17].



Obrázek 3 – typická konstrukce vozovky s CB krytem v ČR podle TP 170 (katalogový list D0-T-1 pro třídu dopravního zatížení I), převzato z [18]

Vyztužené CB kryty (JRC) se používají v případě, kdy má být kryt vystaven vyššímu vnějšímu zatížení nebo nerovnoměrnému sedání. Výztuž zde zajišťuje dodatečnou tuhost desek a snižuje počet trhlin v desce. Díky použité výztuži lze oproti URC výrazně snížit tloušťku desek a desky mohou být cca. dvakrát delší do délky 20 m. Výztuž se umísťuje do středu desky, ale lze ji umístit i při obou površích, což ale není příliš časté z důvodu ekonomické nevýhodnosti a vyšší technologické náročnosti. Toto umístění výztuže je výhodné z hlediska rovnoměrného rozložení kladného a záporného momentu a deska se může rovnoměrně deformovat před porušením. Minimální tloušťka desek musí být vzhledem k dodržení krytí výztuže min. 150 mm. Příčné spáry je z důvodu větší vzdálenosti od sebe nutné kotvit kluznými trny tak, aby nedocházelo ke zvýšenému pohybu desek vlivem většího tepelného namáhání. Typické využití tohoto systému lze nalézt například v Thajsku v ulicích Bangkoku, které jsou vystaveny nadměrnému dopravnímu zatížení v kombinaci s tropickým podnebím [16].

Metoda CRCP vychází z metody JRC. Typické pro tuto metodu jsou dlouhé desky s podélnou výztuží umístěnou ve středu desky. Úkolem podélné výztuže je zabránit poruše desky z vlivu smršťování. Desky je nutné vzhledem k měnícím se teplotám a tím i většímu teplotnímu namáhání na koncích kotvit pomocí kluzných trnů k podkladu tak, aby se zabránilo pohybu desek k sobě či od sebe. Tento typ CB krytů se uplatňuje hlavně u velmi zatížených dálnic a letištních ploch [16].

Whitetopping je metoda opravy vozovek pocházející z USA, která se uplatňuje především na místech, kde došlo k poruchám krytu jako jsou např. vyjeté koleje nebo trhliny. Tato metoda spočívá v překrytí původní porušené asfaltové nebo betonové vozovky tenkou vrstvou betonu (100–150 mm), která může být s podkladem pevně spojena anebo záměrně nespojena. Hlavním principem je využít reziduální únosnost původní konstrukce vozovky. Nespornou výhodou této metody je fakt, že je časově a ekonomicky vhodnější než celková rekonstrukce vozovky. Uplatnění našla tato metoda především při opravách zatížených úrovnových křižovatek a dálničních odpočívek. Prvním pilotním projektem na našem území je oprava odpočívky dálnice D52 KM 10,5 Rajhrad, který byl realizován roku 2020 společností SKANSKA a.s. [19].

### **1.3 MATERIÁLY PRO VÝROBU BETONU CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ**

Beton je v současnosti nejvýznamnějším kompozitním stavebním materiálem. Vozovkové betony jsou oproti klasickým betonům v inženýrském stavitelství odlišné. Jsou na ně kladeny přísnější požadavky vzhledem k agresivnějšímu prostředí, ve kterém se uplatňují. Jedná se zejména o působení vody, chemických rozmrazovacích látek a pevnost v tahu ohybem. Beton využívaný v silničním stavitelství se skládá ze směsi cementu, vody, kameniva a přísad. V praxi především ve světě se využívají i příměsi, jejichž úkolem je zlepšit či upravit vlastnosti betonu [20]. Technologie betonu se řídí normou **ČSN EN 206+A1** [21]. Základním faktorem kvality a životnosti CB vozovek je kvalita vstupních materiálů. Materiály používané pro výrobu betonu CB krytů, tak musí splňovat požadavky předepsané normami **ČSN EN 13877-1** [22] a **ČSN 73 6123-1** [13].

Při výstavbě CB krytů se jako pojivo využívá pouze portlandský cement, případně jako příměs vysokopeční struska, která se však vzhledem k tuzemským technickým předpisům příliš neuplatňuje [17]. Portlandský cement je práškové hydraulické pojivo, které je z největší části tvořeno portlandským slínkem, který je definován normou **ČSN EN 197-1** [23] jako

hydraulická látka, která je složena nejméně ze dvou třetin hmotnosti z kalciumsilikátů. Zbytek hmotnosti představuje slínková fáze, která obsahuje železo, hliník a jiné sloučeniny. Proces výroby cementu spočívá v rozemletí vápence a jílu, které se pak společně vypalují při teplotách dosahujících 1450 °C. Touto reakcí dojde ke vzniku slínku, který se v kulových mlýnech mele na šedivý prach [24].

Pro skupinu cementobetonových krytů CB I lze dle normy využít pouze cement s označením CEM I 42,5. Pro skupiny CB II a CB III lze využít CEM I 32,5, lépe CEM I 42,5 a portlandský směsný cement CEM II/A-S 32,5(42,5), CEM II B/S 32,5 (42,5). Dále je požadováno, aby cement určený pro výrobu CB krytů měl omezený obsah alkálií, neboť jejich vyšší obsah zvyšuje riziko vzniku alkalicko-křemičité reakce. Pro skupinu CB I může být max. množství trikalciomaluminátu (C3A) ve slínku max. 8 %, jelikož C3A ovlivňuje velikost smršťování tuhneícího betonu [20]. V následující tabulce jsou zobrazeny vybrané požadavky na cement pro vozovkové betony dle normy ČSN 73 6123-1 [13].

Tabulka 4 – vlastnosti cementů do vozovkových betonů, vlastní úprava z [13]

Druh zkoušky	Parametr pro skupinu cementobetonových krytů	
	CB I	CB II, CB III
Druh cementu (ČSN EN 197-1 ed.2)	CEM I 42,5	CEM I 32,5 resp. 42,5 CEM II/A-S 32,5 resp. 42,5 CEM II/B-S 32,5 resp. 42,5
Ztráta žháním	max. 3 % hmotnosti cementu	Bez požadavku
Obsah trikalciomaluminátu C <sub>3</sub> A ve slínku	max. 8 %	Bez požadavku
Počátek tuhnutí	min. 1,5 h	Bez požadavku
Jemnost mletí (Blaine)	max. 350 m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	max. 400 m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>
Na <sub>2</sub> O <sub>ekv.</sub>	max. 0,80 %	Bez požadavku

Poznámky k tabulce 4:

CEM I - portlandský cement

CEM II/A-S - portlandský struskový cement (6 – 20 % vysokopecní strusky)

CEM II/B-S – portlandský struskový cement (21 – 35 % vysokopecní strusky)

Informativní hodnoty dávkování cementu [13]:

- Cementobetonové kryty CB I a CB II min. 350 kg/m<sup>3</sup>
- Cementobetonové kryty CB III min. 330 kg/m<sup>3</sup>
- Horní beton pro povrch s obnaženým kamenivem min. 420 kg/m<sup>3</sup>

Obsahuje-li cement příměs v množství vyšším než 5 % hmotnosti portlandského slínku, nazýváme jej směsným. Směsné cementy lze dle platných českých předpisů (ČSN 73 6123-1) využít pouze pro výstavbu CB krytů skupin CB II, CB III a nelze je využít pro skupinu CB I, tedy výstavbu dálnic a rychlostních silnic (viz *tabulka 4*). Přístup zmíněného předpisu je tedy daleko přísnější, než je tomu jinde ve světě, kdy např. v Německu je zcela běžné využití vysokopecní strusky jako příměsi pro vozovkové betony dálnic.

Další nedílnou složkou betonu pro CB kryty vozovek je kamenivo. Kamenivo ve vozovkovém betonu plní několik funkcí, na které jsou velmi často kladeny protichůdné požadavky. Příkladem může být fakt, že pokud čerstvý beton obsahuje větší množství jemné frakce, má lepší zpracovatelnost a tixotropii, ale na druhou stranu dochází ke snížení pevnosti a k většímu smršťování. Obdobný vliv má i tvar zrn kameniva. Z tohoto důvodu je na místě zvýšení pozornosti při výběru kameniva a jeho granulometrického složení. Pro výrobu betonu lze využít jak drceného, tak těžného kameniva. Základní požadavky na kamenivo jsou stanoveny normou **ČSN EN 12620+A1** [25] (viz *tabulka 5*). Mezi tyto požadavky patří zrnitost, tvarový index, odolnost proti drcení, ohladitelnost a odolnost proti zmrazování a rozmrazování. Z chemických vlastností je zásadní sledovat především reaktivnost s alkáliemi, neboť nepříznivé vlastnosti kameniva prioritně způsobují vznik alkalicko-křemičité reakce. V případě pochybností o reaktivnosti s alkáliemi je výhodné využít cementy s příměsí vysokopecní strusky, které riziko vzniku zmíněné reakce snižují [20].

V případě využití technologie dvouvrstvé betonáže, lze do spodního betonu použít i hrubé recyklované kamenivo. Drobné recyklované kamenivo je nevhodné z důvodu obsahu vyššího množství cementového kamene, čili potřebuje vyšší množství záměsové vody a tím dochází ke snížení konečných pevností [20].

Tabulka 5 - hlavní požadavky na kamenivo do cementobetonových krytů dle ČSN EN 12620+A1, vlastní úprava z [25]

Vlastnost	Kamenivo		Označení	Požadavky pro cementobetonové kryty	
				CB I, CB II	CB III
Zrnitost	Drobné D ≤ 4 mm	Drobné	G <sub>F</sub>	G <sub>F</sub> 85	
		Směs	G <sub>A</sub>	-	G <sub>A</sub> 90
	Těžené 0/8 mm		G <sub>NG</sub>	-	G <sub>NG</sub> 90
	Hrubé	D/d ≤ 2 nebo D ≤ 11,2 mm	G <sub>C</sub>	G <sub>C</sub> 85/20	
		D/d > 2 nebo D > 11,2 mm	G <sub>C</sub>	G <sub>C</sub> 90/15	
Obsah jemných částic	Drobné		f	f <sub>3</sub>	
	Těžené 0/8 mm			-	f <sub>3</sub>
	Hrubé			f <sub>1,5</sub>	
Tvarový index	Hrubé		SI	SI <sub>40</sub>	
- pro horní beton se doporučuje SI <sub>20</sub>					
Odolnost proti drcení (součinitel Los Angeles)	Hrubé drcené D ≤ 11, 2 mm		LA	LA <sub>35</sub>	
	Hrubé drcené D > 11, 2 mm			LA <sub>30</sub>	
	Hrubé těžené			-	LA <sub>50</sub>
Ochladitelnost PSV	Hrubé		PSV	PSV <sub>50</sub>	PSV <sub>deklarovaná</sub>
Nasákavost	Hrubé		WA <sub>24</sub>	WA <sub>24deklarovaná</sub>	
- je-li hodnota nasákavosti vyšší, rozhoduje odolnost proti zmrazování a rozmrazování					
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	Hrubé		F	F1 pro drcené kamenivo F2 pro těžené kamenivo	
Trvanlivost urychlenou zkouškou Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Hrubé		Q <sub>m</sub>	max. 8 % po 5 cyklech	
Reaktivnost s alkáliemi	Drobné a hrubé		dle ČSN EN 206+A1, podle zvláštních předpisů		
Obsah chloridů	Drobné a hrubé		Cl	Nevyztužený beton max. 0,1 %	
				Vyztužený beton max. 0,02 %	
Celková síra	Drobné a hrubé		S	max. 1 %	
Sírany rozpustné v kyselině	Drobné a hrubé		AS	AS <sub>0,2</sub>	
Humusovité látky	Drobné		-	Negativní	
	Těžené 0/8 mm			-	Negativní
Obsah lehkých znečišťujících látek	Drobné		-	max. 0,25 %	
	Hrubé			max. 0,05 %	
Obsah volné slidy	Drobné		-	max. 0,5 %	
	Těžené 0/8 mm			-	max. 0,5 %

Další důležitou součástí betonové směsi je voda, která primárně plní dvě funkce, a to chemickou (hydratace portlandského slínku a vznik kalcium-silikát-hydrátových komplexů) a fyzikální (zpracovatelnost betonu). Množství záměšové vody v betonové směsi je vyjádřeno prostřednictvím vodního součinitele, tedy hmotnostního poměru vody ku cementu (pojivu). Obecně lze k výrobě betonové směsi bez dalšího ověřování využít běžnou pitnou vodu anebo vodu, u které je vyloučeno negativní ovlivnění vlastností betonu či výztuže [10]. Specifikace a vhodnost záměšové vody do betonu je dána normou ČSN EN 1008 [26].

Do vozovkového betonu se dále běžně přidávají přísady. Jedná se o chemické sloučeniny, jenž se přidávají do betonu již ve fázi míchání z důvodu úpravy vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. U běžných betonů se přidávají v množství do 5 % hmotnosti cementu. Požadavky na přidávání přísad do betonové směsi předepisují normy ČSN EN 934-1 [27] a ČSN EN 934-2+A1 [28]. Používaných přísad v betonářské praxi je řada, avšak nejvíce se využívají plastifikátory, provzdušňovací přísady, urychlovače a zpomalovače tuhnutí a tvrdnutí. Pro vozovkové betony mají největší uplatnění plastifikátory a provzdušňovače. Provzdušňovací přísady jsou chemické látky, které jsou označovány jako smáčidla. Jsou to látky na bázi mýdla pryskyřic nebo tenzidů. Jejich úkolem je zabránit eliminaci vzduchových bublin přilnutých na zrnech kameniva či cementu, které se vytvořily během míchání. Vzduchové bublinky tvoří uzavřené póry o maximálním průměru 300  $\mu\text{m}$  a ty vytvářejí prostor pro rozpínání ledu. Led má o 9 % větší objem než voda a tím brání šíření trhlinek ve struktuře cementové matrice, což má pozitivní dopad na mrazuvzdornost betonu, která je klíčovým předpokladem pro zajištění dlouhé životnosti dopravních staveb ve středoevropských podmínkách. Plastifikátory neboli ztekutňující přísady jsou v současnosti založené na polykarboxyláteterových sloučeninách. Tyto sloučeniny neutralizují povrchové náboje na částicích cementu a tím zabraňují jejich shlukování při styku s vodou. Tento jev má pozitivní dopad na zajištění hydratace cementu a zlepšuje zpracovatelnost betonu [10].

Požadavky na zatvrdlý beton CB krytů jsou stanoveny normou ČSN EN 13877-1 [22]. Tyto požadavky jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 6 – požadavky na zatvrdlý beton, vlastní úprava z [22]

Vlastnost	Požadavky pro cementobetonové kryty		
	CB I	CB II	CB III
Třída pevnosti v tlaku (ČSN EN 206)	C 30/37		C 25/30
Třída pevnosti v tahu ohybem (ČSN EN 12390-5:2009)	F 4,5		F 4,0
Třída pevnosti v příčném tahu (ČSN EN 12390-6)	nepředepisuje se		
Stupeň vlivu prostředí (ČSN EN 206)	XF4, XD3		dle dokumentace
Kategorie odolnosti proti rozmrazování a rozmrazování (ČSN P CEN/TS 12390-9) - nejmenší počet cyklů	FT2 m56/m28	FT1 m28	FT0 dle dokumentace
Odolnost povrchu proti zmrazování a rozmrazování (ČSN EN 73 1326) metoda A / metoda C - nejmenší počet cyklů - maximální odpad ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	100/75 1000	75/50 1000	dle dokumentace
Maximální součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů (ČSN EN 480-11) [mm]	0,24	0,24	nepředepisuje se



## 1.4 PORUCHY CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ

Na úvod je nutné konstatovat, že se cementobetonové kryty nachází v prostředí s náročnými klimatickými podmínkami. Jsou vystaveny neustále měnícím se teplotám, měnící se vlhkosti, cyklickým vlivům mrazu, vysokému dopravnímu zatížení a rovněž agresivním látkám v podobě chemických rozmrazovacích látek apod. [29]. Z tohoto důvodu jsou náchylné k poruchám a musí se respektovat řada požadavků na složky betonu, tak jak je uvedeno v kapitole „1.3 Materiály pro výrobu betonu cementobetonových krytů“.

Poruchy cementobetonových krytů jsou podrobně zpracovány v dokumentu, který byl vydán Centrem dopravního výzkumu s názvem Katalog poruch vozovek s cementobetonovým krytem [30]. Každá porucha má zde svůj katalogový list, ve kterém je uveden popis poruchy, parametr poruchy, závažnost poruchy, příčina vzniku, možný vývoj, konstrukční a technické zásady údržby a oprav včetně grafického znázornění poruchy. V tomto katalogu je znázorněno a detailně popsáno 62 poruch CBK, jejichž projevy lze nalézt na dvou úrovních:

- Poruchy na úrovni konstrukce - chybné uložení kotev, ulomené rohy desek, vertikální posun desek na příčné spáře (schůdky), rozlomení a vystřelení desky, porucha odvodnění apod.
- Poruchy na úrovni materiálu – povrchové trhliny, jamky a výtluky, rozpad a odlupování betonu, poruchy způsobené alkalicko-křemičitou reakcí kameniva v betonu, cyklická únava, nízká mrazuvzdornost, malá odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám apod.

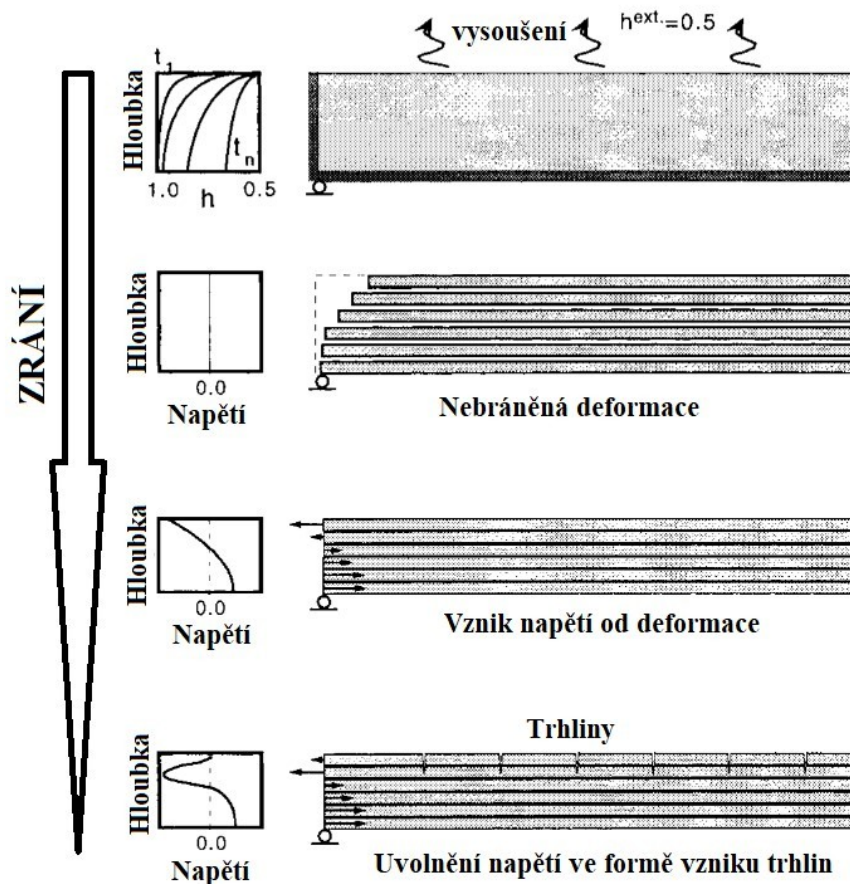
Problematikou zbytkové životnosti cementobetonových krytů se již dlouhodobě zabývá i Ředitelství silnic a dálnic. Na základě provedených diagnostik bylo zjištěno, že životnost cementobetonových krytů je významně ovlivněna vznikem a rozvojem trhlin. Důvodem je, že dle platných českých předpisů, zejména ČSN 73 6123-1 [13], se pro skupinu cementobetonových krytů CB I předepisuje CEM I 42,5, jehož použití vede k rychlé hydrataci betonu. Se vzniklými trhlinami dále souvisí i následné pronikání agresivních látek do struktury krytu, což je dalším zdrojem vad a poruch. V trhlinách se tímto způsobem mohou tvořit např. produkty alkalicko-křemičité reakce, které jak již bylo zmíněno výše velmi degradují cementobetonovou vozovku [7]. Problematikou formování trhlin v betonu se zabývá následující podkapitola. Další velmi častá porucha souvisí s pronikáním vody do nedokonale utěsněných příčných spár krytu a tím souvisejícím poškozením mrazovými cykly. Problémem

je, že provedené těsnění nemusí být vždy 100%, a tím dostatečně trvanlivé. Z tohoto důvodu se využívají v současnosti provzdušňovací přísady, které vytváří expanzní prostor při přeměně vody na led [17].

#### **1.4.1 FORMOVÁNÍ TRHLIN V BETONU**

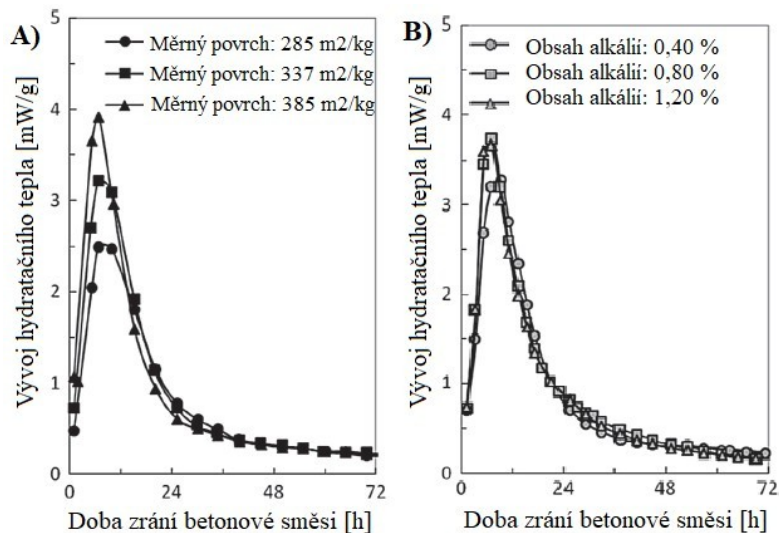
Během procesu tuhnutí a tvrdnutí cementového tmelu dochází ke smršťování, které má několik základních příčin vyskytujících se v různých fázích životnosti betonového prvku. K plastickému smršťování dochází z důvodu nadměrného vysušování v průběhu odpařování vody z povrchu čerstvé betonové směsi, což má za následek vznik smršťovacích trhlin. Dalším typem smršťování, které se projevuje v počátečních fázích zrání je autogenní smršťování, k němuž dochází v průběhu hydratace vlivem úbytku vody, tedy nadměrného odpařování záměsové vody. Smršťování může být dále způsobené vlivem karbonatace, odpařováním vody z tvrdnoucího betonu a také vlivem termálního smršťování. Povrchová vrstva betonové vozovky je tedy nejcitlivější na jednotlivé typy smršťování v raných fázích tvrdnutí a tuhnutí. Samotné formování trhlin lze hodnotit z hlediska vlastního materiálu, tj. betonu a také z hlediska technologického postupu pokládky, vnějších podmínek při pokládce a způsobu zpracování materiálu. Vzniklé trhliny na povrchu CBK jsou nežádoucím jevem, který postupně degraduje zmíněnou vrstvu vozovky a zhoršuje tak její počáteční mechanicko-fyzikální vlastnosti. Tím dochází ke snížení odolnosti vozovky vůči dopravnímu zatížení a působení vnějšího prostředí (změny teploty a vlhkosti, chemikálie v posypových prostředcích atd.) v následujícím užívání vozovky [7].

Ke vzniku trhlin dochází obecně vlivem omezeného smršťování, které vytváří tahové napětí, a to se postupně uvolňuje formou trhlin. U cementobetonových vozovek jsou tahová napětí minimalizována již v počátečních fázích pomocí časného řezání smršťovacích spár. Tímto postupem je uvolněno napětí od objemových změn a jednotlivým deskám je umožněno smrštění prokluzem po podkladní vrstvě. Rozložení tahového napětí přes celou výšku cementobetonové vozovky není rovnoměrné, což je způsobeno větším odpařováním vody z povrchu vozovky vlivem interakce s okolním prostředím (síla větru, teplota vzduchu, přímé sluneční světlo apod.), jak je znázorněno na následujícím obrázku [7].



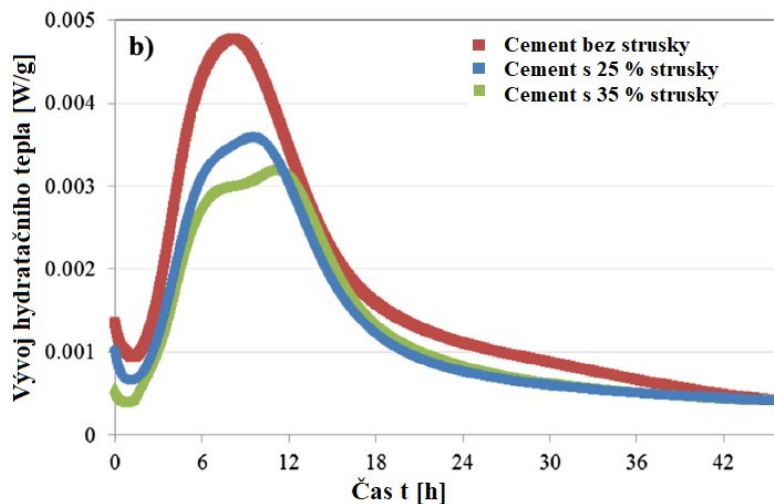
Obrázek 4 – rozložení napětí a formování trhlin v raných fázích tuhnutí a tvrdnutí, převzato z [31]

Povrchová vrstva vozovky, která je vysušována, podléhá smrštění a je tažena jádrem betonového prvku, kde je smrštění výrazně nižší. Současně se projevuje smrštění způsobené vlivem teplotní roztažnosti, jenž je podřízené teplotnímu gradientu v betonovém prvku. Tento jev způsobuje deformaci jednotlivých desek vozovky, což se projevuje deformací ve formě zvlnění vozovky (tzv. „curling“). Část napětí, které vzniká v konstrukci od omezeného smršťování je tedy přeměněna na plastickou deformaci místo vzniku trhlin. Ovlivnit vnější teplotu během pokládky betonové směsi kvůli požadavkům na postup výstavby nelze, nicméně vývoj hydratačního tepla betonové směsi je možné ovlivnit. Existuje řada studií, které se zabývají procesem zpomalení hydratace betonu, čímž lze snížit riziko vzniku mikrotrhlin ve vrchní části betonové vozovky v počátečních fázích tvrdnutí a tuhnutí. Vývoj hydratačního tepla je prvotním jevem hydratace betonu a rychlost tohoto procesu lze měřením teploty při zrání sledovat [7]. Způsobů, jak zpomalit proces hydratace je mnoho, nejběžnější je však snížit vodní součinitel, měrný povrch cementu anebo obsah alkálií [32]. To potvrzuje studie provedená Kaiem a kol. [32], jejichž zjištění jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obrázek 5 – A) vztah mezi vývojem hydratačního tepla a měrným povrchem cementu, B) vztah mezi vývojem hydratačního tepla a obsahem alkálií, převzato z [32]

Další možností, jak zpomalit vývoj hydratačního tepla je využití příměsí do betonu s nižší hydraulicitou, než má portlandský cement. Jako vhodná příměs se v tomto případě jeví granulovaná vysokopecní struska, což dokazuje i Erdogan a kol. ve své práci (viz obrázek 6) [33]. Beton s příměsí vysokopecní strusky navíc vykazuje i vysoké konečné pevnosti a nabízí řadu dalších výhod.



Obrázek 6 – vývoj hydratačního tepla cementu s příměsí strusky, převzato z [33]

Zpomalení rychlosti hydratace betonu má navíc pozitivní dopad i z hlediska technologie pokládky. Důvodem je vytvoření většího časového prostoru pro nutné technologické procesy související s výstavbou CB krytů (zpracování betonu, řezání spár, nástřik zpomalovače tuhnutí apod.) [34].

## 2 HYDRATACE CEMENTU

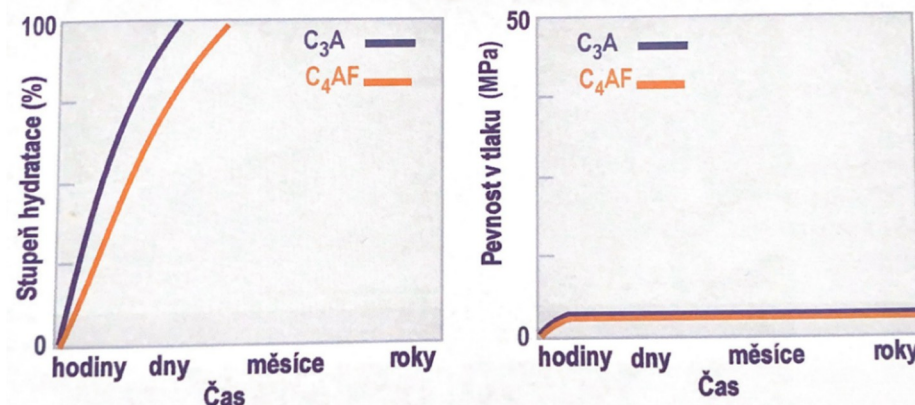
Beton tvrdne a získává svoji pevnost díky procesu hydratace cementu, který umožňuje jeho využití jako konstrukčního materiálu ve stavebním průmyslu. Tento proces zahrnuje sérii chemických reakcí mezi cementem a vodou, které transformují beton z původně lehce zpracovatelné plastické podoby do pevného a mechanicky odolného materiálu připomínajícího horninu. V průběhu chemických reakcí mezi cementem a vodou dochází ke dvěma zásadním změnám:

- 1) **tuhnutí** - pozvolné snižování zpracovatelnosti čerstvého betonu až do doby, kdy dojde ke ztrátě tvarovatelnosti cementové pasty
- 2) **tvrdnutí** - postupný růst pevností

Portlandský cement, který je nejvyužívanějším typem cementu je složen ze slínku a sádrovce. Slínek je produktem pálení vápence a jílových surovin, a proto obsahuje z cca. 80 % hmotnosti dva kalciumsilikáty ( $C_3S$  a  $C_2S$ ), které jsou důležité pro tvrdnutí, a ve zbytku hmotnosti pak dva kalciumalumináty ( $C_3A$  a  $C_4AF$ ), které jsou zase nezbytné pro proces tuhnutí [35].

### 2.1 HYDRATACE ALUMINÁTŮ

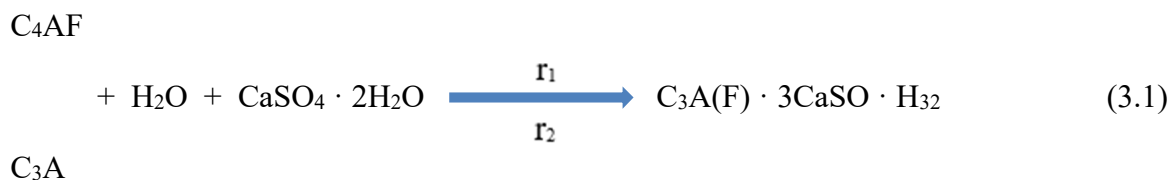
Hliník a železo jsou látky důležité při výrobě portlandského cementu z hlediska snížení teploty výpalu, což se pozitivně odráží na snížení jeho výrobní ceny. Při výpalu dochází ke vzniku  $C_3A$  a  $C_4AF$ , které při kontaktu s vodou a následném promíchání reagují za vzniku C–A–H, tedy kalcium-aluminát-hydrátu [35]. *Obrázek 7* znázorňuje schopnost kalciumaluminátů velmi rychle reagovat s vodou, která souvisí s rychlým tuhnutím (ztrátou plasticity). Dále si lze všimnout, že kalciumalumináty přispívají pevnosti téměř zanedbatelně.



*Obrázek 7 – vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku kalciumaluminátů v čase, převzato z [35]*

## 2.2 VÝZNAM SÁDROVCE PŘI TUHNUTÍ CEMENTU

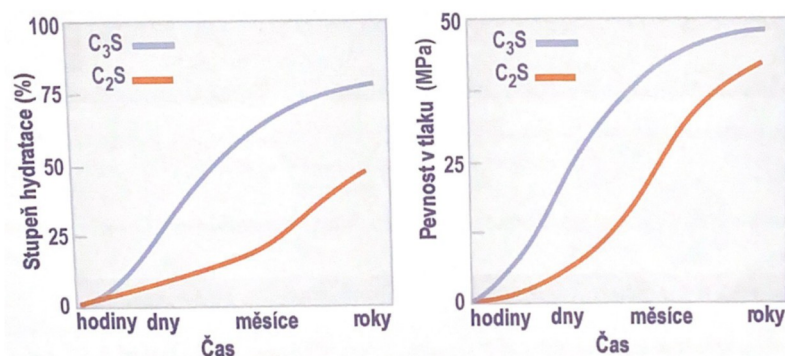
Sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) nebo anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) je přimílán ke slínku z důvodu zpomalení ztuhnutí a umožňuje tak zpracování čerstvé betonové směsi. Tyto sloučeniny zpomalují reakci aluminátů dle rovnice (3.1).



Sádrovec anebo anhydrit nemají pouze funkci regulátoru tuhnutí, ale zároveň ovlivňují i reakční rychlost a výsledný produkt reakce. Namísto C–A–H je zde výsledným produktem reakce primární ettringit ( $\text{C}_6\text{ASH}_{32}$ ), který vzniká téměř hned po kontaktu vody a cementu. Jeho hlavním úkolem je obalit povrch  $\text{C}_3\text{A}$  a  $\text{C}_4\text{AF}$  pomocí malých jehliček, které zamezují jejich dalšímu kontaktu s vodou. V případě nepřítomnosti sádrovce či anhydritu dochází k tvorbě plochých krystalů C–A–H a C–A(F)–H, které propojují jednotlivá zrna cementu s následkem ztráty plasticity [35].

## 2.3 HYDRATACE SILIKÁTŮ

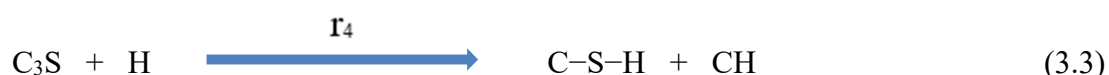
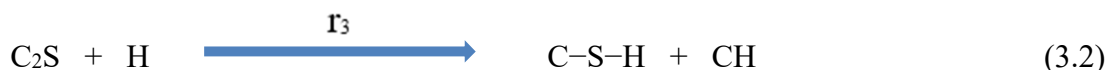
Vlivem hydratace silikátů dochází ke vzniku dvou produktů, a to C–S–H gelu a portlanditu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Na obrázku 8 jsou zobrazeny dva grafy, které znázorňují vývoj hydratace a pevnosti v tlaku v průběhu vytvrzování.



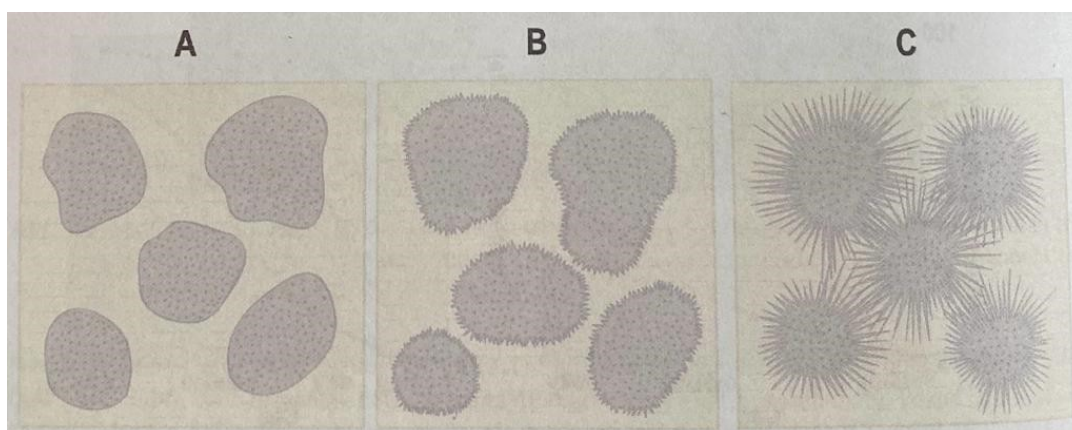
Obrázek 8 – vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku kalciumsilikátů v čase, převzato z [35]

Z grafů je zcela zřejmé, že  $\text{C}_3\text{S}$  (alit) reaguje ve srovnání s belitem ( $\text{C}_2\text{S}$ ) mnohem rychleji a vývoj pevností tím má obdobný charakter. Toto odlišné chování zmíněných kalciumsilikátů v časových intervalech jednoho dne, týdne a měsíce, je rozhodující pro aplikace v praxi.

Dosažená počáteční pevnost po několika málo dnech zrání je důležitá pro možnost odbednění betonu, zatímco pevnost po 28 dnech vytvrzování sehrává důležitou roli z hlediska samotné konstrukce. Z tohoto důvodu je většinou zastoupení alitu v cementech daleko vyšší než belitu, a to v poměru 3:1.



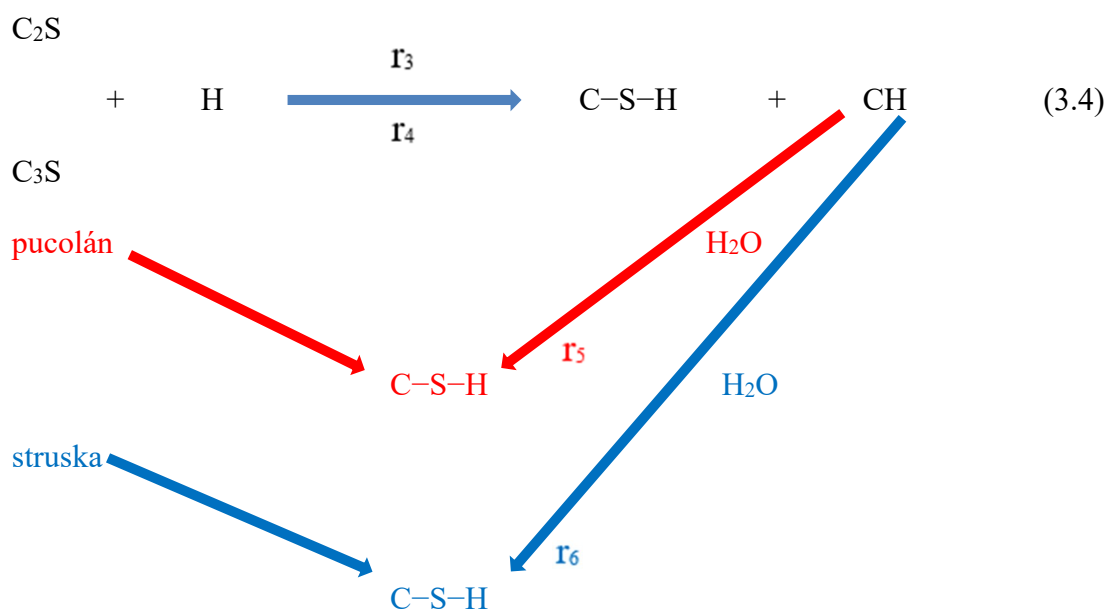
Reakční rychlost ( $r_3$ ) znázorněná v rovnici (3.2) je u belitu nižší než ( $r_4$ ) v rovnici (3.3) u alitu. Při hydrataci alitu dochází k produkci portlanditu (zjednodušeně CH) ve množství 30 – 40 %. V případě belitu je množství vzniklého portlanditu menší v rozmezí 10 – 15 %, což je způsobeno daleko menším zastoupením vápníku v jeho struktuře. Vzniklý portlandit přispívá k pevnosti velmi málo a nositelem pevnosti je především C–S–H gel, tedy skupina produktů amorfního charakteru. V průběhu hydratace dochází ke vzniku vláken C–S–H gelu na povrchu hydratujících zrn alitu a belitu. Tato vlákna se postupně rozšiřují až do doby, kdy dochází k propojení jednotlivých zrn. Průběh hydratace lze rozdělit do tří stádií, které znázorňuje následující obrázek. Prvním stádiem je počátek hydratace, kdy je systém cementu a vody v tekuté podobě (A). Následujícím stádiem je počátek tuhnutí, kdy již dochází k drobnému kontaktu vláken jednotlivých zrn (B). Posledním stádiem hydratace je tvrdnutí, kdy jednotlivá vlákna rostou, tím se prodlužují a přemost'ují mezery mezi zrny až do okamžiku jejich prorůstání (C) [35].



Obrázek 9 – vývoj struktury portlandského cementu během hydratace od okamžiku smíchání s vodou(A), přes tuhnutí (B) až do okamžiku tvrdnutí (C), převzato z [35]

## 2.4 ÚLOHA PORTLANDITU

Portlandit je produkt, k jehož vzniku dochází během hydratačního procesu silikátů. Jak již bylo řečeno v předešlé podkapitole, tak nepřispívá k vývoji pevnosti. To je způsobeno tvarem jeho krystalů, které na rozdíl od zrn C–S–H gelu nemají vláknitou morfologii, a navíc jsou ploché. Jeho zastoupení je však velmi důležité, neboť umožňuje výrobu pucolánových a struskových cementů a dále zvyšuje pH pórového roztoku, čímž zabraňuje korozi ocelové výztuže. Schopnost pucolánů reagovat s portlanditem je spojena s obsahem amorfni siliky, která umožňuje tvorbu C–S–H gelu:



Vlivem pucolánové reakce dochází ke vzniku sekundárního C–S–H gelu, což je v rovnici (3.4) znázorněno červeně. K jeho vzniku dochází v případě vysokého zastoupení portlanditu a pucolánu, a zároveň vzniká později a po delší dobu. To je způsobeno tím, že reakční rychlost ( $r_5$ ) je pomalejší než reakční rychlost hydratace silikátů ( $r_3$ ,  $r_4$ ). Vzhledem ke vzniku primárního a sekundárního C–S–H gelu, je možné u pasty z pucolánového cementu po 7 dnech zrání ve vodě pozorovat v její mikrostruktuře mnohem více vláknitých produktů. Když se tento jev porovná s pastou z portlandského cementu o stejném vodním součiniteli, tak prorůstání je hustší, čímž mj. dochází i ke snížení porozity. Výhodou struskových cementů je, že k aktivaci strusky není zapotřebí tak velké množství portlanditu jako u pucolánové reakce. To je také důvodem, proč struskové cementy mohou obsahovat menší množství portlandského cementu než ty pucolánové. Struskové cementy také dosahují vyšších počátečních pevností, protože reakční rychlost ( $r_6$ ) je vyšší než reakční rychlost pucolánové reakce ( $r_5$ ) [35].



### 3 ALTERNATIVNÍ TYPY POJIV PRO CEMENTOBETONOVÉ KRYTY

V posledních desetiletích dochází ve společnosti k rostoucím požadavkům na rychlost výstavby, která vede ke zvyšování pevností betonů. Z tohoto důvodu je využíváno cementů s vyšší rychlostí hydratace a tím rychlejším nárůstem počátečních pevností. Tento postup má velký význam především u výroby prefabrikovaných či předpínaných konstrukcí, ale nikoliv u cementobetonových vozovek, kde jsou tyto cementy nevhodné. V silničním stavitelství je technickým předpisem ČSN EN 13877-1 [22] nařízeno používat pro výstavbu CB vozovek skupiny CB I výhradně portlandský cement s označením CEM I 42,5 R, a proto se využívá tohoto typu cementu z Mokrě. Dle Šmilauera a kol. [29] může použití tohoto cementu negativně ovlivnit některé vlastnosti, které jsou od vozovkových betonů požadovány. Jedná se zejména o nízké autogenní smrštění, vyšší dotvarování, odolnost betonu a poжив proti vzniku a šíření trhlin během tvrdnutí a vyšší duktilitu betonů. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, tak bylo zjištěno, že životnost CB krytů je významně ovlivněna vznikem a rozvojem trhlin v raných fázích tvrdnutí, což taktéž souvisí s použitím těchto cementů. V podmínkách ČR lze těmto problémům předejít za pomoci příměsí k portlandskému cementu, které jsou schopny snížit rychlost hydratace a přispět k dlouhodobým pevnostem. Velmi zajímavě se v tomto ohledu jeví mletá granulovaná vysokopecní struska, která ale bohužel nemá podporu v tuzemských předpisech, což je v porovnání s okolními státy ojedinělé (viz *tabulka 7*) [29]. K výstavbě CB krytů v Německu se využívají zejména směsné či hrubě mleté portlandské cementy CEM I 32,5 R. Přístup v Rakousku je založen především na použití směsného portlandského cementu s obsahem strusky ze 20 – 25 % hmotnosti. Zajímavostí je, že dle předpisů musí být počátek tuhnutí nejdříve po 2 hodinách při teplotě 20 °C. Belgie je v tomto ohledu opatrnější než Rakousko či Německo, a kromě vysokopecních cementů používají klasický portlandský cement, jehož aplikace ale může být provedena pouze u spojitě vyztužených krytů. Vysokopecní cementy jsou dále běžnou součástí betonů pro CBK také v Nizozemsku či USA. Spojené státy americké lze označit za průkopníky betonových vozovek. Vzhledem k lišícím se klimatickým podmínkám v jednotlivých státech USA se i předpisy v tomto ohledu liší. Stát Minnesota, který má téměř totožné klimatické podmínky jako ČR, umožňuje přidávat k portlandskému cementu do 35 % vysokopecní strusky a do 30 % popílku [36].

Tabulka 7 – základní požadavky na CBK ve vybraných evropských zemích, vlastní úprava z [36]

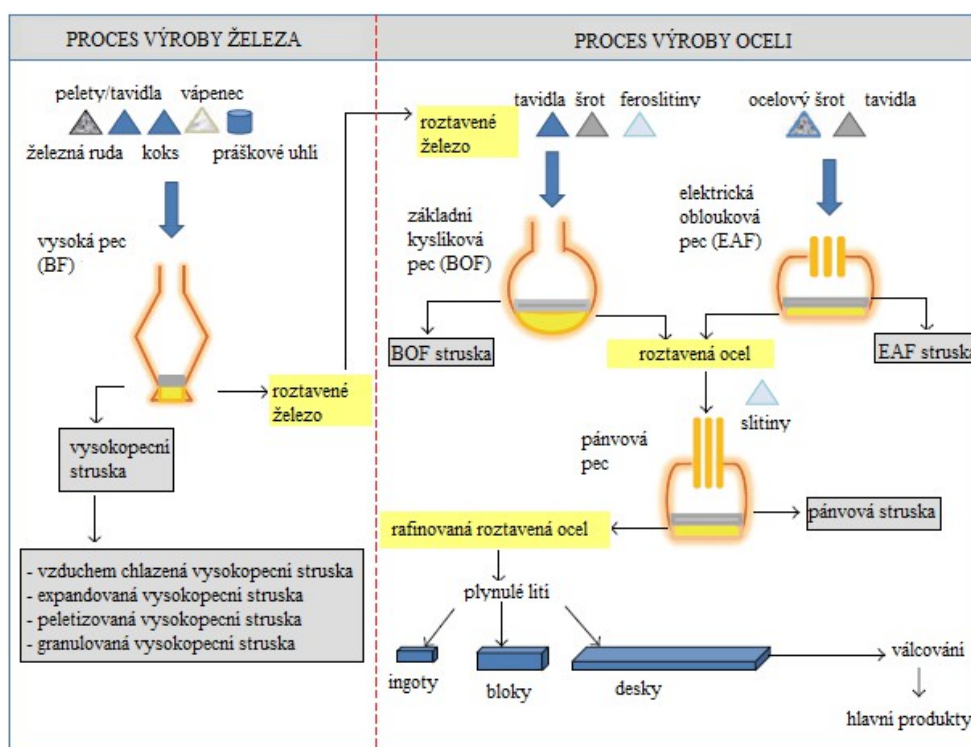
	Česká Republika	Německo	Rakousko	Belgie
<b>Povolené cementy</b>	CEM I 42,5	CEM I 32,5 R CEM II/A-S CEM II/B-S CEM II/A-T CEM III/A 42,5	CEM II/A-S CEM II/B-S	CEM I 42,5 N LA CEM III/A 42,5 LA
<b>Minimální dávka cementu spodní/horní vrstva CB krytu [kg/m<sup>3</sup>]</b>	350/420	320/420	370/400-450	375/425
<b>Max. měrný povrch cementu podle Blaina [m<sup>2</sup>/kg]</b>	350	350	400	-
<b>Krychelná pevnost v tlaku [MPa]</b>	28 dnů: 37	60 dnů: 37	28 dnů: 40	90 dnů: 60-70 dle vzduchu
<b>Obsah volného vzduchu [%]</b>	4 - 6	4 - 7	3,5 - 5,5 / 4 - 6	3 - 8

V rámci ČR byl roku 2018 realizovaný pilotní projekt CB krytu na dálnici D1 úsek 0137 Přerov – Lipník nad Bečvou s betonem, ve kterém byl portlandský cement CEM I 42,5 R z Mokré ze 25 % hmotnosti nahrazen vysokopecní struskou SMŠ 400 Štramberk. Vzorky, které byly po 59 dnech odebrány formou vývrtů ukázaly, že střední hodnota válcové pevnosti byla na úseku se struskou zhruba 45 MPa, což odpovídalo hodnotě úseku bez strusky. V rámci zkoušek byla dále sledována odolnost vůči CHLR, která v případě úseku bez strusky ukázala odpad po 100 cyklech v průměru 250 g/m<sup>2</sup>, kdežto u úseku se struskou 140 g/m<sup>2</sup>, tudíž došlo k výraznému zlepšení. V rámci výstavby byl také instalován systém, který umožňuje dlouhodobé monitorování teploty a deformací krytu, přičemž dosavadní výsledky zatím neodhalily negativní dopad strusky [36].

V současnosti se na základě výsledků pilotního projektu pracuje ve spolupráci s Českomoravským cementem – Cementárnou Mokrá na revizi normy ČSN EN 13877-1 [22], která by k výstavbě CBK skupiny I umožnila použít struskoportlandské cementy CEM II A/S a CEM II B/S. Použití tohoto typu cementu by bylo navíc výhodné i po ekonomické stránce, neboť by došlo k navýšení životnosti CBK ze současných 25 let na min. 40 let a došlo by k výraznému snížení provozních nákladů. Díky prodloužené životnosti by při aktuálních cenách došlo k úspoře přibližně 250 mil. Kč/rok (na délku 500 km) [10]. Využití těchto cementů v tomto odvětví je víceméně na spadnutí, neboť je dostatečně prověřené. V rámci této práce se zabývám využitím alternativních pojiv k těmto účelům na bázi mleté granulované vysokopecní strusky a fluidních popílků, které budou zpracovány v následujících podkapitolách.

### 3.1 STRUSKY

Struska je hrubě zrnitá hmota černého až šedého odstínu, která vzniká jako vedlejší produkt v metalurgickém průmyslu při výrobě železa (vysokopecní struska) či oceli (ocelářská struska) [37]. Zjednodušené schéma procesu výroby železa a oceli je znázorněno na *obrázku 10*. Struska se dále může vyskytovat i přirozeně v přírodě jako produkt vulkanické činnosti, kde vzniká při sopečné erupci vlivem odmísení sopečného plynu z magmatu vyvolaného snížením tlaku [38].



Obrázek 10 – zjednodušené schéma procesu výroby železa a oceli, vlastní úprava z [39]

Na základě dostupných dat z roku 2019 bylo celosvětově vyprodukováno zhruba 320 až 384 milionů tun vysokopecní strusky a 190 až 280 milionů tun ocelářské strusky [40]. V některých státech již dochází v tomto odvětví k téměř 100% využití vzniklé odpadní strusky. Jako názorný příklad lze uvést Německo. Dle údajů z německého FEhS (Institut pro výzkum stavebního materiálu) bylo v roce 2022 vyprodukováno z výroby železa a oceli celkem 11,1 milionů tun strusky. Z celkového vyprodukovaného množství strusky bylo 71 % (7,9 Mt) využito k částečnému nahrazení cementu a 28 % (3,1 Mt) k výrobě kameniva, což mj. výrazně přispívá k udržitelné recyklační ekonomice v Německu [41]. V řadě států vzhledem k náročným technickým předpisům a dalším faktorům (např. ČR) není využití odpadní strusky ani zdaleka na úrovni Německa. Tento vedlejší produkt tak převážně končí na skládkách, kde

může podléhat erozi a znečišťovat okolní prostředí. Výzkum provedený v Kabwe (hutní oblast v Zambii) navíc ukázal, že poléťavý struskový prach ze skládek může být životu nebezpečný, neboť obsahuje vyšší množství olova, které je pro lidský organismus toxické [42]. Strusky z metalurgického průmyslu mají ve stavebnictví obrovský potenciál, který navíc může vyřešit problémy spojené s jejich uskladněním a v neposlední řadě snížit náročnost výroby cementu na životní prostředí. Pro využití ve stavebním průmyslu je pak zásadní jejich chemické složení, mineralogické složení a také způsob chlazení, který předurčuje jejich následné využití. Před samotným použitím strusky ve stavebnictví je navíc nezbytné provést proces odsíření a odstranit nadbytečnou vlhkost společně s potenciálně nebezpečnými látkami, které se v ni vyskytují po výrobě železa.

### 3.1.1 VYSOKOPECNÍ STRUSKA

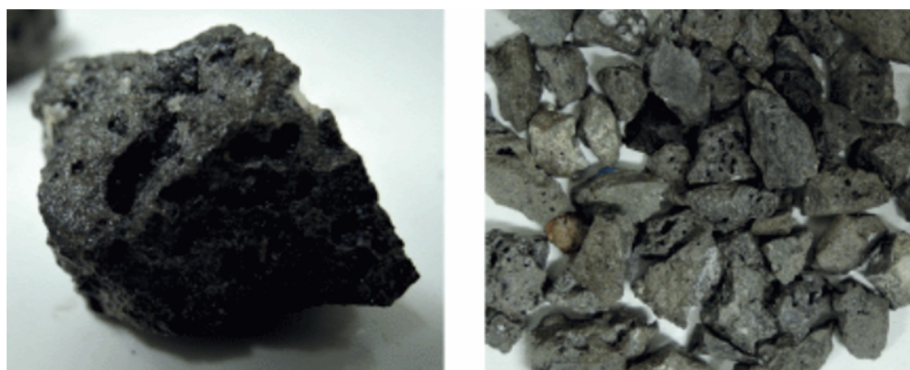
Vysokopecní struska je v současnosti nejběžněji využívaným druhem strusky ve stavebnictví. K jejímu vzniku dochází během termochemické redukce železa ve vysoké peci, kde vzniká jako vedlejší (odpadní) produkt. Proces výroby železa začíná kombinací železné rudy (neboli pelet) s vysokým obsahem hematitu ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a nízkým obsahem magnetitu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) s tavidly (např. vápenec, dolomit), jenž snižují tavný bod hlušiny, pomáhají přechodu nežádoucí síry do strusky a zajišťují požadovanou kvalitu surového železa. Tyto dvě základní složky tvoří směs, která se nazývá vsázka a společně s redukčním činidlem v podobě koksu či práškového uhlí se zavází do horní části vysoké pece. K zavážení je využíváno speciálního zavážecího mechanismu, jehož úkolem je zároveň bránit nechtěnému úniku vysokopecního plynu (oxid uhličitý, oxid uhelnatý). V oblasti výfukového otvoru tzv. výfučny, se do pece dodává horký dmýchaný proud vzduchu, jehož teplota se pohybuje v rozmezí 900 a 1350 °C. S horkým vzduchem se dále přivádí kyslík společně s dalšími redukčními činidly a dohromady tak tvoří protiproud redukčních plynů. Horký proud vzduchu je využíván pro zvýšení reakční teploty vsázky, pro zplynění koksu a tím vzniku kovového železa. Tím, jak vsázka postupně klesá ve vysoké peci, zvyšuje svoji teplotu a tím dochází ke změně jejího složení. Výsledkem je vznik tekutého železa a strusky, jenž se shromažďují v dolní části pece zvané nístěji, ze které se musí pravidelně odlévat. Struska tedy zjednodušeně vzniká reakcí tavidel se složkami hlušiny a z nístěje, ve které se vzhledem k nižší hustotě oproti železu usazuje nad ním, se odpichuje při teplotě 1440 – 1500 °C [43].

Po dokončení odpichování se struska musí zpracovat. Zpracování lze provést několika způsoby, což je zásadní pro její následné využití. Způsoby chlazení totiž ovlivňují její hustotu, pórovitost

a v neposlední řadě strukturu, která může být sklovitého nebo krystalického charakteru. Sklovitá struktura je obecně vhodnější pro cementové materiály, zatímco struska struktury krystalické našla uplatnění spíše jako kamenivo. Právě podle zmíněné technologie chlazení se vysokopecní struska dělí na [44]:

- Vzduchem chlazená vysokopecní struska
- Granulovaná vysokopecní struska
- Expandovaná vysokopecní struska
- Peletizovaná vysokopecní struska

**Vzduchem chlazená vysokopecní struska (ABS)** je vystavena procesu chlazení při běžných klimatických podmínkách. Samotný proces může probíhat ve struskové jámě, která se nachází poblíž vysoké pece anebo je prostřednictvím velkých pánví dopravována do speciálně určených míst pro chlazení. Strusková jáma je struskou postupně plněna a po naplnění dochází k postupnému hloubení jámy, kdy je vzniklá hrudková struska drcena na hrubé kamenivo. Tvrdnutí strusky je možné urychlit prostřednictvím kropení vodou, které má zároveň kladný vliv na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti, ale tento postup je doprovázen silným zápachem sirovodíku, jenž je pro proces chlazení obvyklým. Proces chlazení vzduchem je oproti jiným metodám chlazení spojován s vyšší pracností, která je způsobena zvýšenou manipulací a dodatečným drcením. Vzduchem chlazená vysokopecní struska má největší uplatnění v dopravním stavitelství, kde se využívá v nestmelených podkladních vrstvách silnic a v některých zemích také v asfaltových směsích [44; 45]. Společnost DestroKladno vyrábí z tohoto typu strusky umělé kamenivo, které je vzhledem ke stabilnímu složení a konstantní kvalitě dodáváno na stavební trh jako kamenivo pro nestmelené vrstvy a vrstvy stmelené hydraulickými pojivy pro inženýrské stavby a pozemní komunikace v několika frakcích, kdy splňuje platné předpisy, tedy ČSN EN 13242+A1 a ČSN EN 13285 [46].



Obrázek 11 – vzduchem chlazená vysokopecní struska frakce 8/16 mm, převzato z [46]

**Granulovaná vysokopecní struska (GBS)** je získána rychlým procesem ochlazení pomocí vysokotlakového nástřiku sladké vody na roztavenou strusku v granulační hlavě či komoře poblíž pece. Díky rychlému ochlazení kapalná struska ztuhne a vytvoří se úlomky o velikosti písku, tzv. frity s charakteristickou sklovitou strukturou připomínající slínkový materiál. Kvalita i vlastnosti vzniklé granulované strusky jsou dány chemickým složením strusky, postupem výroby a teplotou strusky při kalení vodou. Způsob drcení, třídění a mletí granulované strusky pak předurčuje její další využití. V současné době je nejvíce využívána mletá forma granulované vysokopecní strusky, která disponuje hydraulickými schopnostmi podobnými portlandskému cementu. Z tohoto důvodu je často využívána jako částečná náhrada portlandského cementu při jeho použití jako příměs [44; 45]. V některých zemích (např. Německo, Rakousku) se mletá granulovaná vysokopecní struska uplatňuje jako příměs do betonových směsí cementobetonových vozovek dálnic, neboť betony s její příměsí mají ověřenou a dlouhodobou trvanlivost.



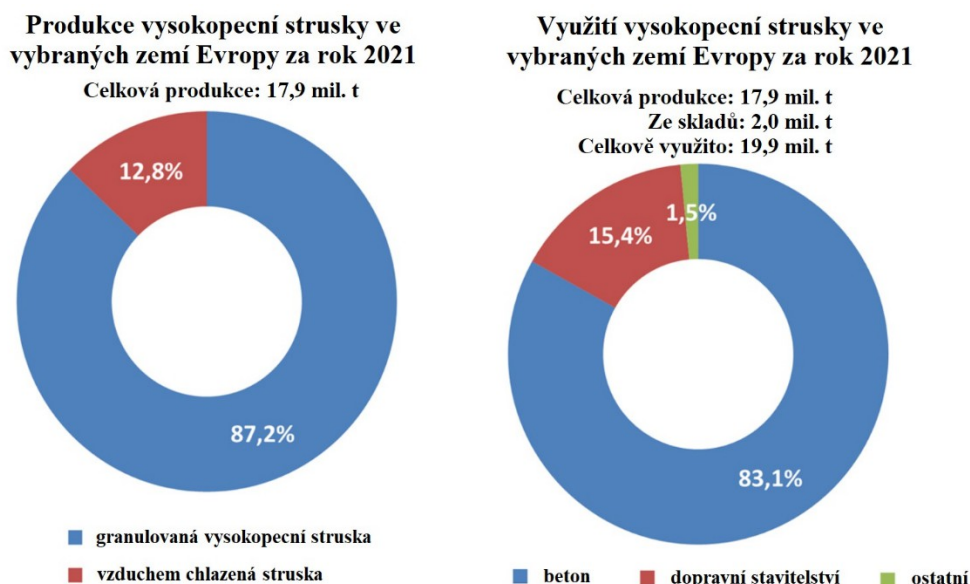
*Obrázek 12 – granulovaná vysokopecní struska, převzato z [47]*

**Expandovaná vysokopecní struska** vzniká podobným způsobem jako granulovaná struska. Zásadní rozdíl je v tom, že množství chladicí vody je pečlivě regulováno a kontrolováno a ve výrazně nižším množství. Dalším rozdílem je její nižší objemová hmotnost, která je způsobena vyšší porézností. Konečné vlastnosti expandované strusky jsou závislé na rychlosti chlazení a na množství chladicí vody. Pomalejším chlazením vznikne krystalický produkt, který připomíná vzduchem chlazenou strusku. Na druhou stranu, rychlejší chlazení vede k vytvoření produktů sklovitého charakteru, které se podobají granulované strusce [44].

**Peletizovaná vysokopecní struska** je produkt, který je rozšířen především v Kanadě, kde byl proces peletizace vymyšlen. Během peletizace je roztavená struska nanášena na desku, která

má v tomto případě funkci deflektoru, tedy odchylovače. Následně je tato vrstva řezána prostřednictvím vodních paprsků, které vyvolávají její bobtnání a zároveň jí chladí. Poté je struska vhozena do vzduchu rotujícího bubnu, který dokončuje proces chlazení a zajišťuje výfuk plynů. V důsledku toho dochází ke vzniku pelet kulovitého tvaru s charakteristickými sklovitými vlastnostmi [44; 45].

Na *obrázku 13* je zobrazena produkce a využití vysokopecní strusky ve vybraných zemích Evropy (Bulharsko, Finsko, Francie, Německo, Řecko, Lucembursko, Nizozemsko, část Polska, Slovinsko, Španělsko, UK) za rok 2021. Z grafu je zřejmé, že v produkci drtivě převažuje produkce granulované vysokopecní strusky, jejíž největší uplatnění je jako příměs v betonových směsích. Zajímavostí je, že v roce 2021 bylo vyprodukováno méně vysokopecní strusky, než bylo využito [48].



*Obrázek 13 - produkce a využití vysokopecní strusky ve vybraných zemích Evropy za rok 2021, vlastní úprava z [48]*

### 3.1.2 OCELÁRENSKÁ STRUSKA

Ocelářské strusky jsou vedlejším produktem výroby oceli. Jejich klasifikace je založena na použitých vstupních materiálech a principech výroby oceli. Dělí se na:

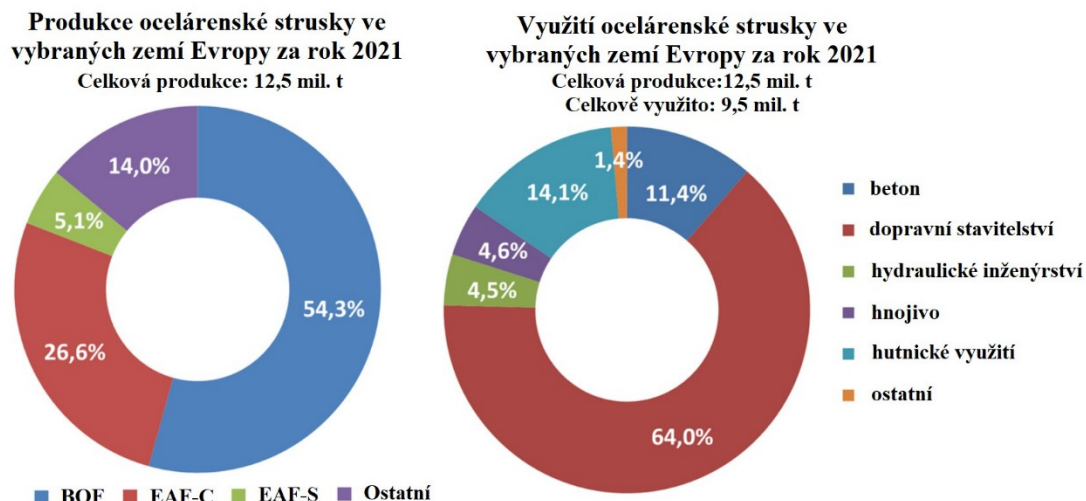
- Ocelářská struska BOF (z kyslíkových pecí)
- Ocelářská struska EAF (z elektrických pecí)
- Ocelářská pánvová struska (z pánvové pece)

BOF struska se využívá, nebo historicky využívala pouze v některých zemích jako kamenivo v dopravním stavitelství. Výhodou tohoto typu strusky je vyšší pevnost a lepší protismykové vlastnosti, jenž se u přírodního kameniva dosahují pouze u malé skupiny hornin. Nevýhodou této strusky je však neesteticky působící tvorba lokálních fleků rzi a zejména pak účinky objemové nestálosti, které se projevily na některých stavbách v Rakousku. EAF struska se taktéž jako BOF struska využívá v silničním stavitelství, kde se využívá pro povrchové úpravy vozovek z důvodu její větší odolnosti proti deformacím. Struska z pánvové pece má pak zcela odlišné vlastnosti oproti BOF a EAF. Tato struska totiž vzniká dodatečnou rafinací zmíněných strusek, která má zapotřebí dodávat velké množství tavidel [24].

V literatuře lze nalézt shodné názory na to, že využití ocelářské strusky ve stavebnictví je problematické. Může za to především jejich objemová nestabilita, která je ve stavebním průmyslu neakceptovatelná. Důvodem objemové nestability je řada chemických reakcí, mezi které patří například hydratace volného oxidu vápenatého, hydratace periklasu (MgO), karbonatace hydroxidů vápenatých a hořečnatých, polymorfní přeměna dikalcium silikátů a reakce aluminátů. Dalším faktorem je pak obsah sklovité struktury, která je náchylná k rozpadu a k objemovým změnám přispívá [49]. Příkladem lze uvést kauzu ohledně výstavby dálnice D47, kde byla do podloží použita levnější ocelářská struska namísto původní vysokopecní strusky, která byla v zadávací dokumentaci. Již po několika letech provozu došlo k deformaci dálnice, kde se začala projevovat objemová nestabilita ve formě zvlnění vozovky. Z uvedených důvodů je proto nutné ocelářskou strusku před využitím ve stavebnictví podrobit laboratorním zkouškám, které musí vyloučit objemové změny.

Na *obrázku 14* je zpracován roční přehled produkce a využití ocelářské strusky ve vybraných zemích Evropy (viz konec podkapitoly „3.1.1 Vysokopecní struska“).





Obrázek 14 - produkce a využití ocelářské strusky ve vybraných zemích Evropy za rok 2021, vlastní úprava z [48]

### 3.1.3 MINERALOGICKÉ A CHEMICKÉ SLOŽENÍ METALURGICKÝCH STRUSEK

Mineralogické a chemické složení metalurgických strusek je rozsáhlou problematikou, neboť každá vyrobená struska je jiná, a to z důvodu, že železárny či ocelárny používají různé vstupní materiály k výrobě železa či oceli. Složení je dále ovlivněno i nezbytným procesem chlazení, kterému jsou strusky vystaveny. U vzduchem chlazené strusky platí, že se tímto způsobem chlazení vytváří krystalická struktura, která umožňuje vznik minerálu. V největší v míře lze nalézt zastoupení melilitu, který je z největší části tvořen gehlenitem ( $C_2AS$ ) a akermanitem ( $C_2MS_2$ ). Ve většinovém množství lze dále ve strusce najít merwinit, diopsid, vápenec, wustit a ferit. Ve zbytkovém množství je možné nalézt i zastoupení monticellitu, rankinitu, pseudowollastonitu a oldhamitu. Vyšší zastoupení vápna se strusce pak umožňuje vznik dikalciumsilikátu, který je znám svým zvyšováním objemu [44; 50].

Co se chemického složení týče, tak v největší míře strusky obsahují oxid vápenatý a oxid křemičitý, což je způsobeno složením tavenin, které se používají k výrobě železa či oceli. Společně s předešle zmíněnými oxidy je zastoupen i oxid hlinitý a hořečnatý, a dohromady tyto oxidy tvoří 88 – 92 % hmotnosti strusky. Z tabulky 8, která ukazuje průměrné chemické složení metalurgických strusek, je zřejmé, že významným rozdílem mezi vysokopecní a ocelářskou struskou je obsah oxidu železnatého ( $FeO$ ). Oxid železnatý totiž u vysokopecní strusky bývá redukován, zatímco u ocelářské strusky je výsledným produktem oxidace [51; 52].

Tabulka 8 – chemické složení vybraných metalurgických strusek (% hm.), vlastní úprava z [51; 52]

Složka	Vysokopecní struska	Ocelářenská struska			
		BOF	EAC-C	EAC-S	Pánvová
CaO	35 – 42	30 – 55	35 – 60	39 – 45	30 – 60
SiO <sub>2</sub>	33 – 38	8 – 20	9 – 20	24 – 32	2 – 35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 – 15	1 – 6	2 – 9	3 – 7,5	5 – 35
MgO	7 – 12	5 – 15	5 – 15	8 – 15	1 – 10
FeO	≤1,0	10 – 35	15 – 30	1 – 6	0,1 – 15
MnO	≤1,0	2 – 8	3 – 8	0,4 – 2	0 – 5
P	-	0,2 – 2	0,01 – 0,25	0,01 – 0,07	0,1 – 0,4
S	1 – 1,5	0,05 – 0,15	0,08 – 0,2	0,1 – 0,3	0,1 – 1
Cr	≤0,1	0,1 – 0,5	0,1 – 1	0,1 – 20	0 – 0,5

Chemické složení strusek je zásadní pro jejich využití do směsných cementů. Z tohoto důvodu musí splňovat požadavky normy ČSN EN 197-1 [23]. V případě využití typické formy strusky do betonů či malt, tedy mleté granulované vysokopecní strusky také požadavky normy ČSN EN 15167-1 [53]. Požadavky zmíněných norem shrnuje následující tabulka.

Tabulka 9 – požadavky norem pro využití mleté granulované vysokopecní strusky jako příměsi, vlastní úprava z [23; 53]

Vlastnost	Jednotka	ČSN EN 15167-1	ČSN EN 197-1
Obsah oxidu hořečnatého	% hm.	max. 18	-
Obsah sulfidů	% hm.	max. 2,0	-
Obsah síranů	% hm.	max. 2,5	-
Obsah chloridů	% hm.	max. 0,10	-
Obsah vlhkosti	% hm.	max. 1,0	-
Ztráta žiháním	% hm.	max. 3,0	-
Obsah CaO+MgO+SiO <sub>2</sub>	% hm.	-	min. 2/3

### 3.1.4 LATENTNÍ HYDRAULICITA

Latentně hydraulické jsou látky, které nemají schopnost samovolně tuhnout a tvrdnout. Tuto schopnost však získávají v přítomnosti budiče, kterým může být například vápno. Typickou latentně hydraulickou látkou je mletá granulovaná vysokopecní struska. Tato forma strusky na rozdíl od pucolánů dokáže sama tvrdnout ve vodě i bez přídavku vápna, ovšem rychlost hydratačního procesu je velmi nízká. Důvodem je vyšší obsah vápna ve struktuře strusky, díky čemuž se i bez přítomnosti budiče chová jako latentně hydraulická látka. Za přítomnosti malého

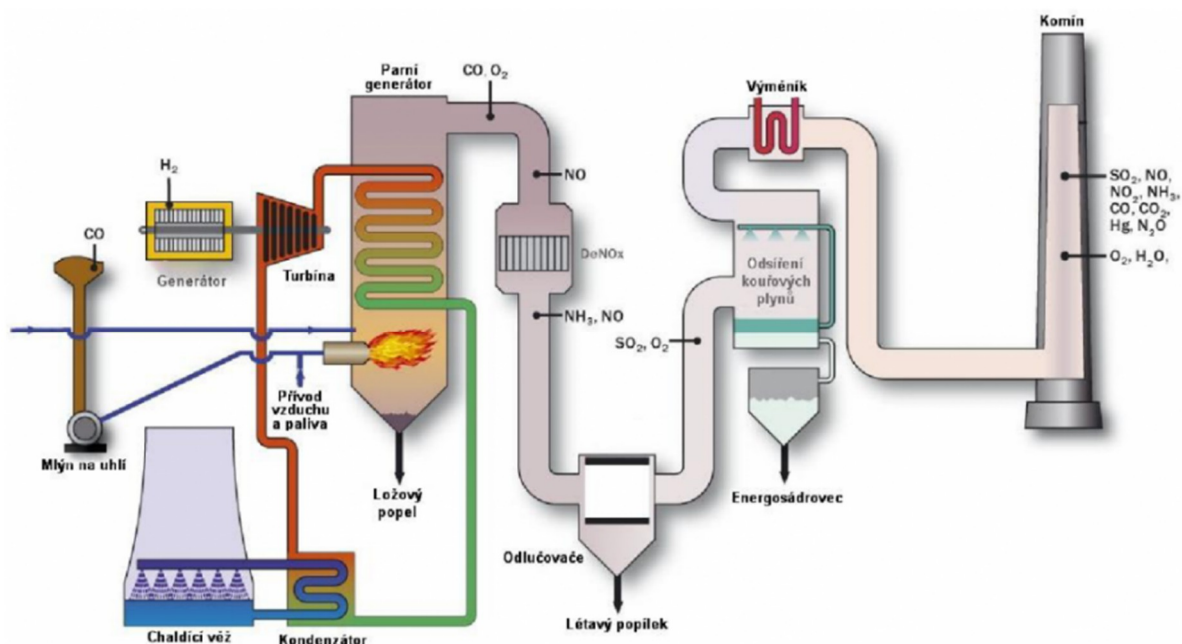
množství vápna se pak chová jako plně hydraulická látka. Vápno ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) má tedy funkci katalyzátoru hydratačního procesu a urychluje tak fázi tvrdnutí. Z tohoto důvodu se využívá v kombinaci s portlandským cementem, při jehož hydrataci dochází k uvolnění malého množství vápna, které urychluje hydrataci strusky [35].

## 3.2 POPÍLKY

V současné době má uhlí nezastupitelný význam jako celosvětový zdroj energie. Dostupná celosvětová data z roku 2019 ukazují, že spalováním uhlí bylo vyprodukováno cca. 9089 TWh energie, tedy 35,2 % celkové produkce. Z těchto čísel je zcela zřejmé, že těžba a spalování fosilních paliv produkuje každoročně  $\frac{3}{4}$  celosvětových emisí skleníkových plynů. K zabránění globální katastrofě je proto nutné upustit od těchto zdrojů energie a přecházet na obnovitelné zdroje energie či na jaderné zdroje. V ČR je situace v porovnání s celosvětovou produkcí ještě o něco horší, neboť spalováním uhlí bylo roku 2020 vyrobeno 42,66 % tuzemské energie. Současná energetická situace není v tomto ohledu příznivá a tyto zdroje energie nelze jen tak nahradit. Regulaci skleníkových plynů v ČR by výrazně pomohl rozvoj jaderné energie, ale bohužel nelze realisticky čekat nový reaktor dříve než v roce 2040 [54]. Společně s vysokým množstvím emisí dochází spalováním uhlí k produkci velkého množství odpadního produktu, tzv. popílku, který je vzhledem ke svým pucolánovým vlastnostem využíván ve stavebním průmyslu. Popílek je prášek jemné zrnitosti s charakteristickou sklovitou strukturou. Vzniká jako vedlejší produkt při výrobě energie v elektrárnách, kde se k těmto účelům využívá spalování antracitu, hnědého a černého uhlí. Popílek je zachycován přímo během spalovacího procesu ze vzniklých plynných produktů za pomoci elektrostatických či mechanických separátorů. Vzhledem k široké škále výrobních postupů, které zahrnují různé druhy používaných kotlů, techniky spalování, metody separace a v neposlední řadě různé typy spalovaného uhlí, může mít popílek velmi různorodé chemické, mineralogické či granulometrické složení. V oblasti betonářského průmyslu je preferováno využití popílků, které vznikají spalováním černého uhlí. Důvodem je jejich větší stálost vlastností oproti hnědouhelným popílkům [55]. Ke spalování uhlí jsou využívány tři hlavní techniky spalování, a to vysokoteplotní, spalování ve fluidním loži a suché spalování, po kterých získaly popílký své názvy [56]. Popílký, které vznikají při suchém spalování jsou ve stavebnictví bezvýznamné vzhledem k velmi nízkému obsahu sklovité fáze v jejich struktuře, a proto se jimi tato práce nezabývá.

### 3.2.1 VYSOKOTEPLTNÍ POPÍLEK

Vysokoteplotní popílky vznikají jako vedlejší produkt v práškovém ohništi při spalování uhlí při extrémních teplotách, které se pohybují mezi 1200 – 1700 °C. Během vysokoteplotního spalování se vytvářejí kromě úletového popílku v menší míře také nespalitelné zbytky, jako je např. struska a energosádrovec [57]. Popílek je ze spalovací komory práškového ohniště vylučován společně se spalinami, a následně je zachycen pomocí velkoobjemových odlučovačů tak, jak schematicky znázorňuje následující obrázek.

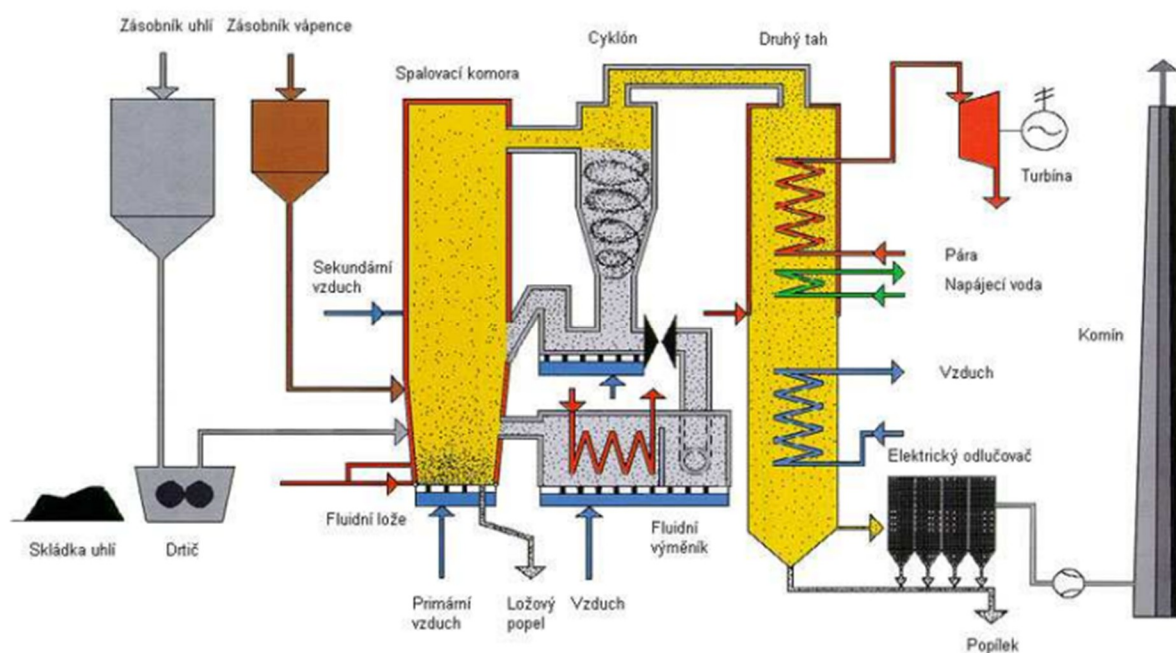


Obrázek 15 – vysokoteplotní spalování práškového uhlí, převzato z [58]

Všeobecně lze označit vzniklé popílky touto formou spalování za soubor kulovitých částic s obsahem krystalické a amorfni složky. Právě zmíněná amorfni složka, která obsahuje z více než 50 % hmotnosti látky na bázi mullitu, umožňuje popílkům reakci s portlandským cementem za běžných klimatických podmínek [59]. Pro využití těchto popílků ve stavebnictví je zásadní obsah karbonátu v uhlí, které vstupuje do spalovacího procesu. V případě vyššího obsahu dochází reakcí vzniklého oxidu vápenatého s oxidem siřičitým ke vzniku síranu vápenatého, který se při vysokých teplotách panujících v komoře rozkládá na kyslík, oxid siřičitý a oxid vápenatý. Tento oxid vápenatý je označován za „mrtvé pálené vápno“, jelikož je při těchto extrémních teplotách málo reaktivní. Pro tyto popílky je pak typická jejich opožděná hydratace, která může vyvolat nežádoucí objemové změny [60].

### 3.2.2 FLUIDNÍ POPÍLEK

Během procesu fluidního spalování je ve spalovací komoře kromě samotného paliva spalován také sorbent, přičemž jeho množství je ovlivněno obsahem síry v uhlí, které vstupuje do spalovacího procesu. Při fluidním spalování je nutné provést proces odsíření, k čemuž se nejvíce využívá mletého vápence a pro fluidní popílky je tak typický vyšší obsah oxidu vápenatého (CaO). Fluidní spalování se provádí oproti vysokoteplotnímu při výrazně nižších teplotách (cca. 850 °C), a proto lze považovat vzhledem k nižší produkci CO<sub>2</sub> za šetrnější [61]. Fluidní spalování funguje na principu zavedení inertního materiálu (nejčastěji popel z vlastního paliva nebo materiály na bázi křemičitého písku či keramzitu) do spalovací zóny, kde je za pomoci několika vzduchových trysek zahřátý do tekutého stavu (fluidního), a přenos hmoty a tepla tak probíhá mezi kapalinou a výhřevnou plochou. Do vzniklé fluidní vrstvy se v následujícím kroku přivádí drcené palivo a aditiva, jejichž množství se pohybuje v rozmezí 2 – 3 % hm. fluidní vrstvy. Proud spalovacího vzduchu, který je do spalovacího prostoru přiváděn intenzivně pomocí trysek, dále narušuje stabilitu inertních a uhelných látek v ohništi, což způsobuje vzestup fluidní vrstvy vlivem změny objemu. Vznášející se fluidní vrstva poté přechází do tzv. cyklonového odlučovače, který odděluje vzniklé spaliny od tuhých částic, které se přivádí zpět do spalovací komory a vstupují znovu do spalovacího procesu [62]. Na následujícím obrázku je schéma, které znázorňuje postup fluidního spalování uhlí.



Obrázek 16 – fluidní spalování uhlí, převzato z [63]

Během procesu fluidního spalování vznikají dva různé typy popílků, které se od sebe liší velikostí částic a chemickým složením. Popílek, který obsahuje ve větší míře hrubé částice se nazývá **ložový popel**. Pro tyto hrubé částice, které propadly roštem pod fluidním prstencem již během spalování je typické, že ve větší míře obsahují měkce pálené vápno a anhydrit, díky kterým má tento typ popílku výborné hydraulické vlastnosti vhodné pro stavební průmysl. Druhý typ popílku se nazývá **úletový** neboli **filtrový**. Tento typ popílku se získává až v elektrických odlučovačích ze spalin v místě komínu, a proto je složen především z malých a lehkých částic [60].

V minulosti se fluidní popílký ve stavebnictví téměř nevyužívaly, a proto se hromadně umísťovaly na skládky. Hlavním důvodem pro tuto nevyužitou potenciální hodnotu byl vysoký obsah síry v jejich struktuře, která měla za následek vznik objemově nestálého minerálu, tzv. ettringitu, který je pro stavební průmysl vzhledem ke své nestabilitě neakceptovatelný. Na straně druhé bylo provedenou studií dokázáno, že dlouhodobé ponechání fluidních popílků na skládce pozitivně ovlivňuje jejich vlastnosti, které mohou být výhodné pro jejich využití ve stavebnictví. To je způsobeno jejich postupným zvětráváním, které umožňuje změny mineralogického složení [64].

Technika fluidního spalování je v současnosti pro elektrárny nejvýhodnější, neboť je účinnější oproti vysokoteplotnímu spalování, a zejména pak daleko šetrnější k životnímu prostředí. Tento rozdíl v účinnosti a ekologickém dopadu vede ke stále širšímu uplatnění fluidního spalování, čímž i narůstá produkce fluidních popílků. Úskalím je zde ale nutnost pečlivě sledovat chemické složení a fyzikální vlastnosti těchto popílků, které musí splňovat a často nesplňují požadavky pro jejich použití do betonů předepsané normou ČSN EN 450-1 [55].

### 3.2.3 MINERALOGICKÉ A CHEMICKÉ SLOŽENÍ POPÍLKŮ

Mineralogické složení popílků je formováno hlavně použitou technikou spalovacího procesu, kdy je důležitá zejména teplota spalování a v neposlední řadě také složením spalovaného uhlí. Významnou část struktury popílků (50 až 90 %) tvoří minerály s amorfní, skelnou strukturou, která vzniká důsledkem rychlého ochlazení. Minerály krystalické struktury jsou zde zastoupeny v daleko menší míře. Dále v popílcích můžeme nalézt zastoupení částic uhlíku, které může dosahovat až 16 % hmotnosti. Podíl uhlíkových částic je ovlivněn několika faktory jako je např. teplota spalování, jeho rychlost, poměr paliva a vzduchu a charakteristika spalovaného uhlí.

V popílcích z černého uhlí jsou nejvíce zastoupeny minerály jako mullit (6,5 – 9 %), křemen (2,2 – 8,5 %), magnetit (0,8 – 6,5 %), volný CaO (<3 %) a hematit (1,1 – 2,7 %) [56].

Podobně jako mineralogické složení popílků je i jejich chemické složení determinováno celým spektrem faktorů, což v konečném důsledku vede k jedinečnému chemickému složení každého popílku. Opět jde především o typ spalování, druh spalovaného uhlí, a navíc o proces odsíření. Fluidní popílků se od těch vysokoteplotních liší především vyšším obsahem oxidu vápenatého, a to z důvodu provádění nutného procesu odsíření, jež se provádí přidáváním mletého vápence do drceného uhlí, a probíhá přímo ve spalovacím prostoru. Množství oxidu vápenatého u vysokoteplotních popílků nedosahuje ani zdaleka takových hodnot, neboť je vápencový sorbent přidáván až v absorberu, kde už probíhá pouze odsíření spalin bez popílků [65].

Použití popílků jako příměsí do betonových směsí je řízeno normou ČSN EN 206+A2 [21], která prostřednictvím dalších norem ČSN EN 450-1 [66] a ČSN EN 12620+A1 [25] stanovuje požadavky na chemické složení a fyzikální vlastnosti pro toto využití. Požadavky shrnuje následující tabulka.

Tabulka 10 – požadavky na popílků pro jejich použití do betonu, vlastní úprava z [25; 55; 66]

Vlastnost dle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II ČSN EN 450	Filer jako kamenivo příměs druhu I ČSN EN 12620+A1
Ztráta žíháním	% hm.	max. 5,0	-
Obsah SO <sub>3</sub>	% hm.	max. 3,0	max. 0,8
Obsah celkové síry	% hm.	-	1,0
Obsah chloridů v přep. Na Cl <sup>-</sup>	% hm.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15
Obsah aktivního CaO	% hm.	max. 10	-
Obsah volného CaO	% hm.	max 1,5	-
Obsah SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% hm.	min. 70	-
Obsah MgO	% hm.	max. 4,0	-
Jemnost, zb. na síť 0,045 mm	% hm.	max. 40	-
Sítový rozbor, zbytek na síť:			
2 mm			100
0,125 mm	%	-	85 – 100
0,063 mm			70 – 100
Obsah aktivního SiO <sub>2</sub>	% hm.	min. 25	-
Objemová stálost (roztážnost)	mm	max. 10	-
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min. 75 popř. 85	-
Měrná hmotnost (tolerance)	kg·m <sup>-3</sup>	max. ± 200	-

V *tabulce 11* jsou zobrazeny příklady chemického složení tuzemských popílků. Hned na první pohled je zcela patrný zvýšený obsah CaO u fluidních popílku, který tak nesplňuje požadavky ČSN EN 450-1 z *tabulky 10*. Dále lze pozorovat vyšší obsah SO<sub>3</sub> u fluidních popílků Hodonín a Ledvice, který tak opět nesplňuje požadavky předmětné normy. Vyšší obsah SO<sub>3</sub> u všech fluidních popílků nedovoluje jejich využití dle ČSN EN 12620+A1 ani jako kameniva do betonu, kdy může být max. 0,8 % hmotnosti.

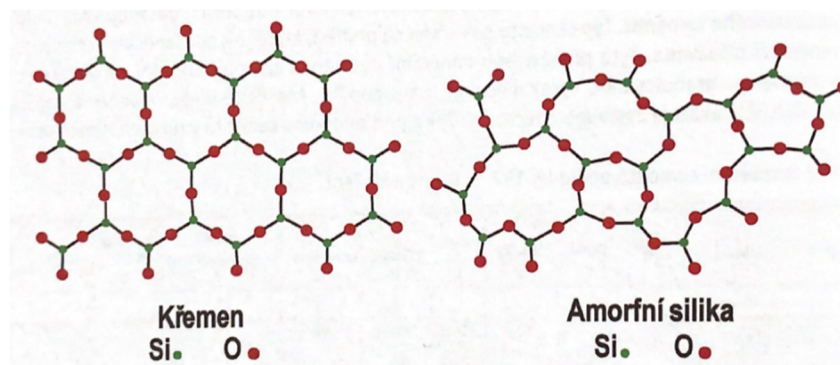
*Tabulka 11 – chemické složení vybraných tuzemských popílků, vlastní úprava z [65]*

	Fluidní popílek	Fluidní popílek	Fluidní popílek	Vysokoteplotní popílek
	Hodonín	Tisová	Ledvice	Mělník
SiO <sub>2</sub>	32,5	35,0	36,7	57,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,0	23,3	25,4	29,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,7	5,5	6,5	5,1
TiO <sub>2</sub>	0,6	5,4	1,8	1,7
CaO	24,5	21,5	19,5	2,2
MgO	3,4	1,6	1,1	1,4
MnO	0,1	0,1	0,1	0,0
K <sub>2</sub> O	0,8	0,5	1,5	1,6
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,1	0,3	0,1
SO <sub>3</sub>	4,0	2,5	3,3	0,1
<b>ztráta žháním</b>	4,5	4,5	3,8	1,2

### 3.2.4 PUCOLÁNOVÁ AKTIVITA

Pucolány jsou křemičité nebo křemičito-hlinité látky přírodního původu. V přírodě se s nimi lze setkat ve formě vulkanického popela, ale na stejném principu jako pucolány fungují i zmiňované průmyslové produkty jako jsou křemičité úlety či popílky. Látky na bázi pucolánů nemají schopnost samovolně tvrdnout pod vodou, a to ani v případě jejich jemného namletí. Z tohoto důvodu nelze pucolán sám o sobě označit hydraulickou látkou. Přidá-li se ovšem k pucolánům vápno v množství min. 20 – 30 % hmotnosti, získávají vynikající hydraulické vlastnosti jako např. vysokou pevnost či trvanlivost. Toto chování, které je odborně označováno jako pucolánová aktivita, lze popsat pomocí *obrázku 17*, který vlevo znázorňuje dokonalé uspořádání atomů Si a O krystalické látky ve formě křemenu (chemicky SiO<sub>2</sub>), a vpravo pak amorfní látku stejného chemického složení, kde už uspořádání těchto atomů není tak dokonalé. Právě tato neuspořádanost atomů u amorfní siliky umožňuje reagovat s Ca(OH)<sub>2</sub> za běžných pokojových teplot [35].





Obrázek 17 – dvourozměrné zobrazení krystalického křemene a amorfní siliky, převzato z [35]

Tohoto principu se využívalo již v období starověkého Říma. První dochovaná zmínka pochází přibližně z roku 30 př. n. l., kdy se římský architekt Marcus Vitruvius zmínil o římském betonu ve svých spisech. Šlo o směs vápna, vulkanických hornin, mořské vody, a právě sopečného popela, tedy pucolánu. Později byl tento beton využit např. k výstavbě Kolosea (100 n. l.) a Pantheonu (128 n. l.), přičemž tyto stavby můžeme sledovat ve velmi dobrém stavu i v současnosti téměř o 2000 let později [67]. Z toho lze soudit, že se jednalo o velmi kvalitní beton. Dlouhodobá a vysoká pevnost tohoto betonu je způsobena především vznikem hydrotermálního minerálu tzv. hliníkového tobermoritu, který vzniká po několika letech spolupůsobení mořské vody a sopečného popela, která jej postupně rozpouští [68].

### 3.3 AKTIVACE

Pro využití strusek či popílků jako příměsí do betonů je nutná jejich aktivace. Tyto materiály lze aktivovat cestou chemickou prostřednictvím tzv. alkalické aktivace anebo mechanicky za pomoci procesu vysokorychlostního mletí. Materiály, které byly využity v rámci této práce, prošly procesem vysokorychlostního mletí.

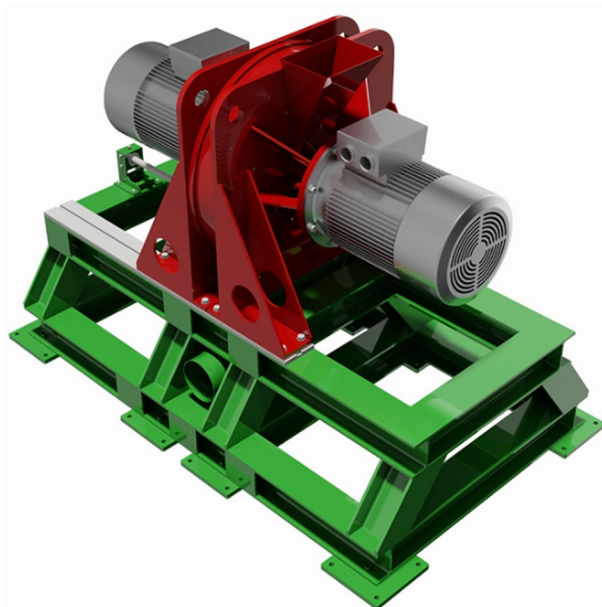
Alkalická aktivace je proces, při němž dochází za alkalických podmínek aktivátoru k transformaci amorfní struktury prekurzoru, tedy pevných aluminosilikátů do kompaktních tvarů. Aktivátor má schopnost rozrušit vazby mezi křemičitanovými a hlinitanovými mnohostěny, což má za následek jejich přechod do tekuté fáze spolu s vytvořenými ionty. Tímto způsobem se otevírá prostor pro vznik nových vazeb, které postupně tvrdnou do kompaktních tvarů. V dnešní době lze identifikovat dva hlavní přístupy k výrobě alkalicky aktivovaných pojiv. Nejrozšířenějším způsobem je využití tzv. jednosložkového systému, kde dochází ke spolupráci vody a suchého prášku. Méně rozšířeným způsobem je pak systém dvousložkový, kde se používá aktivátor tekutého skupenství. Za nejefektivnější a dostatečně prověřené jsou

považovány prekurzory na bázi aluminosilikátů, jako jsou vysokopecní strusky, elektrárenské popílky, kalcinované jíly a přírodní pucolány. Pro alkalickou aktivaci je nezbytné, aby tyto prekurzory byly dostatečně reaktivní, a proto často podstupují ještě proces mletí [69; 70]. Alkalické aktivátory byly v roce 1980 rozděleny profesorem Gluchovským do šesti skupin na základě jejich chemického složení. Jde o silné zásady (MOH), nesilikátové soli slabých kyselin ( $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF), silikáty ( $M_2O \cdot nSiO_2$ ), hlinitany ( $M_2O \cdot nAl_2O_3$ ), hlinitokřemičitany ( $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$ ) a nesilikátové soli silných kyselin ( $M_2SO_4$ ). Pro volbu správného alkalického aktivátoru je důležité chemické složení aktivovaného materiálu. Příkladem lze uvést aktivaci vysokopecní strusky, pro kterou je nejvhodnější použít alkalické křemičitany (vodní sklo), hydroxidy anebo uhličitan. Rozhodující jsou ale pro výběr vhodného alkalického aktivátoru i ekonomické důvody, a proto se k aktivaci strusky využívají zejména sloučeniny sodíku. Při použití aktivátorů je nezbytné pečlivě kontrolovat jejich dávkování, jelikož jejich nadměrná koncentrace může způsobit degradaci pojiva, což by se v budoucnu mohlo projevit zhoršením mechanických vlastností [71].

Mletí je označení pro proces, kterým dochází ke zjemňování zrnitosti mletého materiálu, čímž dochází ke zvětšení jeho měrného povrchu a zároveň také k otevření jeho zrn. Proces mletí tedy umožňuje vznik produktů s takovými parametry, které jsou pro mletý materiál důležité z hlediska následného využití. Princip mletí se využívá již od dob starověku, kdy bylo nedílnou součástí výroby léčiv a potravin. Později také našlo uplatnění při úpravě nerostných surovin, která výrazně ulehčovala získání kovů. V současnosti se téměř žádné průmyslové odvětví bez mletí neobejde. Je využíváno v oblasti energetiky, metalurgie, chemie, potravinářství, papírenství, při úpravě nerostných surovin a v průmyslu stavebních hmot. Klasické mlýny, které se používají v dnešní době, tj. kulové, prstencové, tyčové, kolové atd., využívají k mletí kombinaci mechanismů tlaku, stříhu a tlakového impulzu. Tyto mechanismy, ale nejsou z energetického hlediska tak účinné, neboť před samotným rozmělněním částic mleté látky, musí dojít k překonání přilnavosti mezi mlecím tělesem a částicemi látky nebo mezi částicemi látky ve vrstvě. Následně musí částice projít fází plastické deformace, a protože kontakt mezi mlecím tělesem a částicemi mletého materiálu probíhá při poměrně nízkých rychlostech, dochází ke kompenzaci části energie prostřednictvím vnitřní struktury (pružnost atd.). Nevýhodou tedy je, že se téměř veškerá dodaná energie transformuje na teplo, a nedochází tak k jejímu efektivnímu využití ke zjemnění zrnitosti mletého materiálu. Další významnou nevýhodou je, že vzhledem ke snížené produktivitě musí mít tyto mlýny velký objem, čímž jsou i velmi těžké. Tyto

negativa jsou v současnosti řešeny rozvojem mlecích technologií, přičemž jednou z nich je právě vysokorychlostní mletí (VRM) [72].

Vysokorychlostní mletí (VRM) patří do kategorie vysokoenergetického mletí (HEM), které dokáže předat velké množství energie na jednotku mletého materiálu. Základní princip vysokorychlostního mletí je odvozen od klasického (tradičního) mletí, a jeho hlavním cílem je dosažení zjemnění zrnitosti, tím rozšíření měrného povrchu a otevření zrn mletého materiálu. Během tohoto procesu se vyskytují jevy a efekty, které nejsou pozorovatelné při mletí v běžných mlýnech. Tyto jevy a efekty jsou výsledkem přeměny vynaložené energie, která se v klasických mlýnech mění na teplo. U anorganických materiálů se jedná o jevy jako například mechanochemická aktivace, tvorba vyšších podílů mikronových částic a nanočástic a v některých případech vyšší efektivita využití spotřebované energie na tvorbu nových povrchů. Efekt mechanochemická aktivace je důležitý právě z hlediska efektivně vynaložené energie k mletí látky, neboť dochází k její částečné akumulaci v podobě zvýšené entalpie mleté látky. Tento efekt navíc ve vysokorychlostních mlýnech umožňuje průběh chemických reakcí v pevném stavu při mletí (např. oxidace), iniciaci fázových změn v různých látkách, vznik mechanických slitin kovových materiálů v průběhu mletí a také průběh katalytických reakcí v organických i anorganických systémech v procesu mletí [72]. Příklad vysokorychlostního víceúrovňového mlýnu je znázorněn na následujícím obrázku. Jedná se o mlýn LAV650 od společnosti LAVARIS s.r.o., který je poháněn dvěma elektromotory o maximálním výkonu 95 kW a dokáže zpracovat až 6 tun materiálu za hodinu [73].



*Obrázek 18 – vysokorychlostní víceúrovňový mlýn LAV650, převzato z [73]*

Již před více jak 15 lety byl na základě provedeného výzkumu zjištěn pozitivní dopad vysokorychlostního mletí na fluidní popílký. Tato skutečnost postupně vedla k zavedení popílkového pojiva známého jako DASTIT. Během procesu vysokorychlostního mletí totiž dochází k narušení existujících vazeb a tím k homogenizaci výsledného materiálu, čímž lze například předejít tvorbě nežádoucích sloučenin v podobě ettringitu či thaumasitu, které jsou spojené s objemovými změnami. Díky tomu byl fluidní popílek, dříve považovaný za téměř nepoužitelný ve stavebním průmyslu vylepšen, a nyní lze úspěšně využít v různých aplikacích, jako jsou náhrady hydraulického pojiva, moderní konstrukce mostních závěrů a jako alternativy filerů pro asfaltové směsi za horka. Tyto poznatky naznačují, že vysokorychlostní mletí má do budoucna obrovský potenciál, a to jak z funkčního, tak ekonomického hlediska [74].

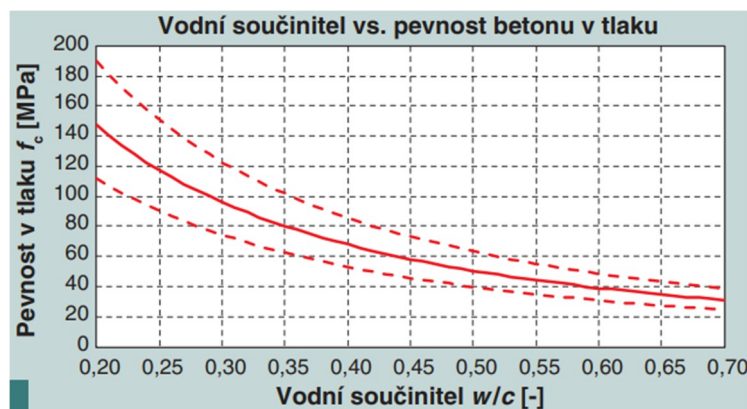
## 4 VYUŽITÍ STRUSKY A POPÍLKŮ JAKO NÁHRAD CEMENTU V BETONOVÝCH SMĚSÍCH PRO CBK

Tato kapitola shrnuje provedené experimenty, které se zabývají využitím strusky a popílků jako potenciálních náhrad cementu v betonových směsích pro cementobetonové kryty. V rámci kapitoly „7 Výsledky a diskuze“ budou tato zjištění porovnány se závěry experimentální části této práce.

### 4.1 ČERSTVÝ BETON

#### 4.1.1 VLIV VODNÍHO SOUČINITELE

Voda v betonové směsi je velmi důležitou složkou, neboť ovlivňuje většinu vlastností a chování čerstvého i ztvrdlého betonu. U betonových směsích pro CBK se vodní součinitel, tedy poměr vody k pojivu volí tak, aby stupeň konzistence byl ve třídě S1 (10 – 40 mm) – S2 (50 – 90 mm). Takto zavlhlá konzistence je důležitá z hlediska zpracovatelnosti směsi pro finišer, který beton hutní a zároveň uhlazuje jeho povrch. Zároveň je tato konzistence výhodná z hlediska mechanických vlastností betonu, neboť platí vztah, že čím nižší je vodní součinitel, tím je vyšší pevnost v tlaku. Tento vztah vyjadřuje následující obrázek. Je však důležité si uvědomit, že tento vztah platí pouze pro dobře zhutněný beton.



Obrázek 19 - závislost pevnosti v tlaku na vodním součiniteli, převzato z [75]

Množství vody ve směsi pro dosažení určité konzistence je ovlivněno také typem a velikostí kameniva. Vztah mezi velikostí max. zrna kameniva a množstvím záměsové vody pro daný stupeň konzistence je vyjádřen prostřednictvím tzv. Lyseho pravidla. Lyseho pravidlo lze popsat pomocí dvou zásad, které se vzájemně doplňují. Platí, že pro maximální zrno kameniva ( $D_{\max}$ ) je pro vyšší konzistenci zapotřebí vyšší množství záměsové vody. Dále platí, že čím větší

je maximální zrno kameniva ( $D_{max}$ ), tím nižší je množství záměsové vody, potřebné pro dosažení určité konzistence [35].

Tabulka 12 – Lyseho pravidlo: vliv maximálního zrna kameniva na dávku záměsové vody, převzato z [35]

Max. zrno (mm)	Dávka vody* (kg/m <sup>3</sup> ) podle stupňů konzistence				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

Využití strusky a popílků jako částečných náhrad cementu v betonových směsích má rovněž vliv na množství záměsové vody. Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole „3.3 Aktivace“, tak tyto produkty musí projít procesem úpravy prostřednictvím mletí. Důležité je zmínit, že každá struska a popílek má jiné mineralogické a chemické složení. V tomto případě zde sehrává důležitou roli obsah skelné a krystalické složky, které si při procesu mletí vzhledem ke své rozdílné tvrdosti jinak drtí. Na množství potřebné záměsové vody má důležitý vliv tvar zrn a jejich jemnost. V bakalářské práci [24] bylo prokázáno, že s vyšší jemností těchto materiálů roste i spotřeba záměsové vody. Obecně platí, že namleté popílků mají oproti struskám větší měrný povrch, a proto potřebují větší množství záměsové vody k dokonalému navlhčení všech zrn. Naopak struska má pak na vodní součinitel daleko nižší vliv než popílek. Bylo zjištěno, že vodní součinitel se oproti referenční směsi téměř nemění anebo dochází k jeho mírnému snížení. Tento jev potvrzuje i Bayqra s kol. [76], kteří nahrazovali část cementu popílkem v různých procentech hmotnosti. V jejich případě došlo přidáním popílků ke zvýšení vodního součinitele, což odůvodňují kulatostí jeho částic. Zvýšení vodního součinitele pak mělo za následek zvýšení nasákavosti a snížení pevností.

## 4.2 ZTVRDLÝ BETON

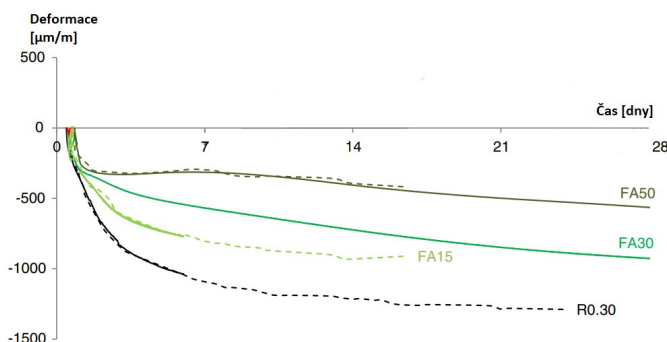
### 4.2.1 OBJEMOVÉ ZMĚNY

Vývoj objemové hmotnosti je velmi ovlivněn vývojem pórovitosti v průběhu zrání. Jak bylo zjištěno v bakalářské práci [24], tak pórovitost má tendenci se postupem vytvrzování snižovat, což je způsobeno postupným vyplňováním pórů hydratačními produkty, přičemž dochází ke zvyšování objemové hmotnosti. V případě, kdy dojde k nahrazení části cementu popílkem či struskou, tak lze pozorovat růst objemové hmotnosti i po delší době vytvrzování. Důvodem je, že tyto alternativní pojiva reagují s portlandským cementem i po delší době vytvrzování. V experimentální práci, kterou provedl Heikal a kol. [77], došlo k nahrazení části cementu v cementových pastách úletovým popílkem. Vývoj objemové hmotnosti sledovali po dobu jednoho roku a došli k závěru, že zastoupením popílku dochází ke snížení objemové hmotnosti. Mukherjee s kol. [78] provedli obdobnou studii s tím rozdílem, že cement nahrazovali se zvyšujícím se množstvím popílku. Zjistili, že se zvyšujícím se množstvím popílku dochází k lineárnímu poklesu objemové hmotnosti. Využitím vysokopecní strusky naopak dochází ke zvýšení objemové hmotnosti, což potvrzuje například Hanzálek [79] a Khalil s Abd-El-Hameedem [80].

Dalším jevem, který způsobuje objemové změny je smršťování. Pokud jde o smršťování, tak rozlišujeme dva základní principy, a to autogenní smršťování, známé také jako chemické, a smršťování způsobené vysycháním. K autogennímu smršťování dochází v případě, kdy je objem zatvrdlého cementového materiálu menší než objem pojiva a vody před hydratací. Společně s tímto jevem lze pozorovat vznik mikro a makrotrhlin, které vedou ke snížení pevnosti a trvanlivosti, zejména u směsí s nízkým obsahem vody. Ke smršťování od vysychání dochází v případě, kdy na začátku tuhnutí a tvrdnutí uniká voda, která nebyla spotřebována během procesu hydratace cementu z betonu do okolí [81].

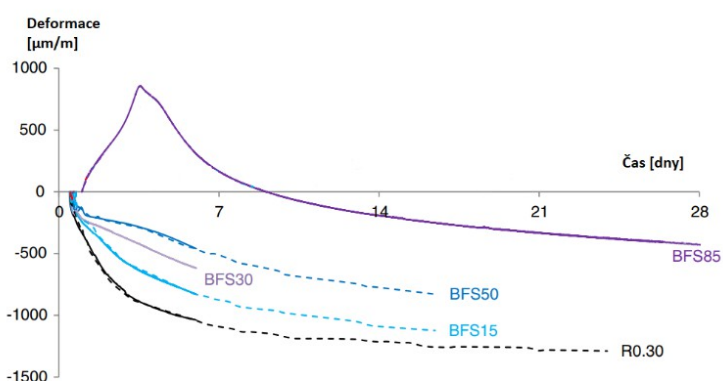
Snoeck a kol. [82] v rámci své práce zkoumali vliv popílku třídy F a vysokopecní strusky na autogenní smrštění směsí. Těmito potenciálními pojivy nahrazovali cement z 15 – 85 % hmotnosti a autogenní smršťování sledovali po dobu 28 dní. Z následujícího obrázku je zřejmé, že se zastoupením popílku dochází ke snížení smrštění v rané fázi tuhnutí a tvrdnutí. Autoři práce jako hlavní důvod označují pomalejší pucolánovou reakci, ke které dochází až po delší době vlivem spotřeby nebo aktivace portlanditu, který vzniká z procesu hydratace cementu. Dále si nelze nevšimnout, že se zvyšujícím se množstvím popílku ve směsi dochází ke snížení

smrštění, což je dle autorů způsobeno poklesem reakčního stupně popílku v důsledku nedostatečného množství portlanditu, jenž vzniká při hydrataci portlandského cementu.



Obrázek 20 – autogenní deformace cementových past s popílkem a bez popílku, vlastní úprava [82]

Vysokopecní struska má na autogenní smršťování obdobný vliv jako popílký, což je zřejmé z následujícího obrázku. U vzorku BFS85 si nelze nevšimnout obrovské expanze během prvního týdne stáří. Tento jev bylo možné pozorovat i práci Hanzálka [79], a tito autoři se shodují, že se jedná o následek nedostatku portlanditu, který nestačí k plné aktivaci strusky, která tak plní zejména funkci plniva.



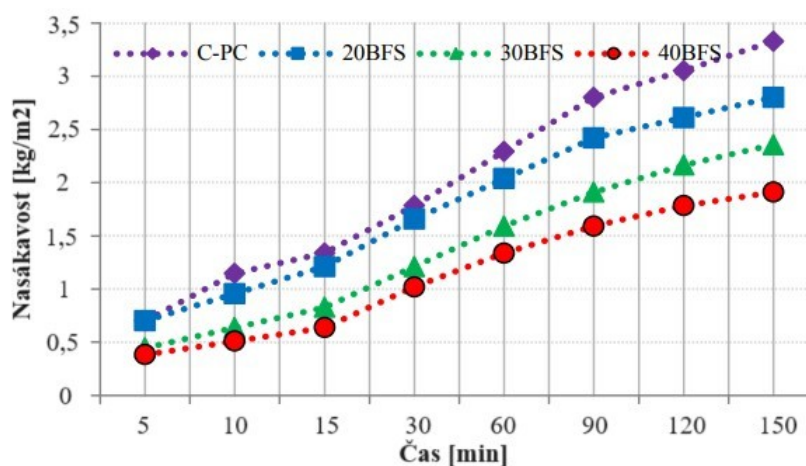
Obrázek 21 – autogenní deformace cementových past s vysokopecní struskou a bez strusky, vlastní úprava z [82]

Lee a kol. [83] sledovali autogenní smrštění na betonových vzorcích, ve kterých nahrazovali cement vysokopecní struskou z 0 – 50 % hmotnosti při měnícím se vodním součiniteli. V tomto případě došlo k odlišnému chování než u práce Snoeck a kol. [82]. Beton s obsahem vysokopecní strusky měl vyšší autogenní smrštění než běžný beton, a čím bylo zastoupení strusky vyšší, tím bylo i autogenní smrštění vyšší. Dle autorů je toto chování spojené s větším chemickým smršťováním a jemnější strukturou pórů betonu s vysokopecní struskou, a také tvarem částic vysokopecní strusky.



## 4.2.2 NASÁKAVOST

Nasákavostí betonu, ve kterém byl nahrazen cement z 20 – 40 % hmotnosti vysokopecní struskou se zabývali Deboucha a kol. [84]. Z následujícího obrázku je zřejmé, že vysokopecní struska měla pozitivní vliv na snížení nasákavosti v porovnání s kontrolní směsí (C-PC), která obsahovala pouze cement. U vzorku 40BFS, který obsahoval ze 40 % hmotnosti pojivové složky vysokopecní strusku lze pozorovat snížení nasákavosti až o 40 % oproti C-PC. Dle autorů je snížení nasákavosti spojené s jemnější strukturou pórů, distribucí a rozměrem kapilárních pórů, což je především důsledkem vzniku sekundárního C–S–H gelu, jenž vzniká vlivem reakce strusky s portlanditem. Téměř totožné chování betonu s příměsí strusky lze pozorovat i v práci Aghaeipoura a kol. [85].



Obrázek 22 – nasákavost betonu na jednotku plochy po 28 dnech zrání, vlastní úprava z [84]

Sun a kol. [86] ve své práci nahrazovali cement v betonových směsích popílkem ze 40, 55 a 70 % hmotnosti. Nasákavost sledovali po 28 a 90 dnech zrání. V tomto případě došlo se zvyšujícím se množstvím popílku ke zvýšení nasákavosti v obou fázích tvrdnutí. Ovšem vzorek, který obsahoval 40 % popílku vykazoval téměř shodnou nasákavost s kontrolním vzorkem, neboť došlo k navýšení pouze o 6,67 %. Naopak u vzorku, který obsahoval popílek ze 70 % hmotnosti došlo ke zvýšení nasákavosti o 166,67 %. Autoři práce se domnívají, že tento vývoj nasákavosti je spojený s vyšším obsahem popílku a tím nižším podílem cementu, což společně s později se projevující pucolánovou reakcí vede ke snížení objemu hydrátů a k degeneraci mikrostruktury. To se projevuje zvýšenou nasákavostí vzorků s vyšším obsahem popílku. Stejný vývoj nasákavosti u betonu s popílkem lze sledovat i v práci Bayqry a kol. [76]. Naopak v práci Golewskiho [87] lze pozorovat odlišné chování. V případě nahrazení cementu ze 20 % hm. popílkem došlo ke zvýšení nasákavosti o cca. 6 %, což je dle autorů způsobeno

větším zastoupením dutin ve formě kapilárních pórů ve struktuře cementové matrice. Při 30% nahrazení cementu popílkem došlo ke snížení nasákavosti oproti kontrolnímu vzorku o cca. 8 % a toto chování neodpovídá zjištěním dvou předchozích autorů.

#### 4.2.3 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

Orhan a kol. [88] se v rámci své práce zabývali také sledováním pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech zrání u vzorků určených pro betonové vozovky. Cement byl ve vzorcích nahrazen z 20 % hmotnosti popílkem a mletou granulovanou vysokopecní struskou. Vzorek referenční dosáhl po 28 dnech hodnoty 7,71 MPa. Využití vysokopecní strusky mělo pozitivní vliv na pevnost v tahu za ohybu, kdy vzorek s jejím obsahem dosáhl hodnoty 7,98 MPa, což je nepatrně vyšší hodnota než u referenční směsi. V případě vzorku s obsahem popílku nebyla pevnost o tolik nižší než u referenční směsi (6,25 MPa). Vysokopecní struska tedy měla na pevnost v tahu za ohybu lepší vliv než popílek.

Samad a kol. [89] se zabývali využitím práškového popílku (FA) a vysokopecní strusky (GGBS) jako částečných náhrad cementu (PC) v betonových směsích. Vzorky byly po dobu zrání umístěny do třech různých prostředí, která jsou popsána v poznámkách pod *tabulkou 13*, kde jsou zároveň zobrazeny výsledky měření.

*Tabulka 13 – pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání v prostředích C1-C3, vlastní úprava z [89]*

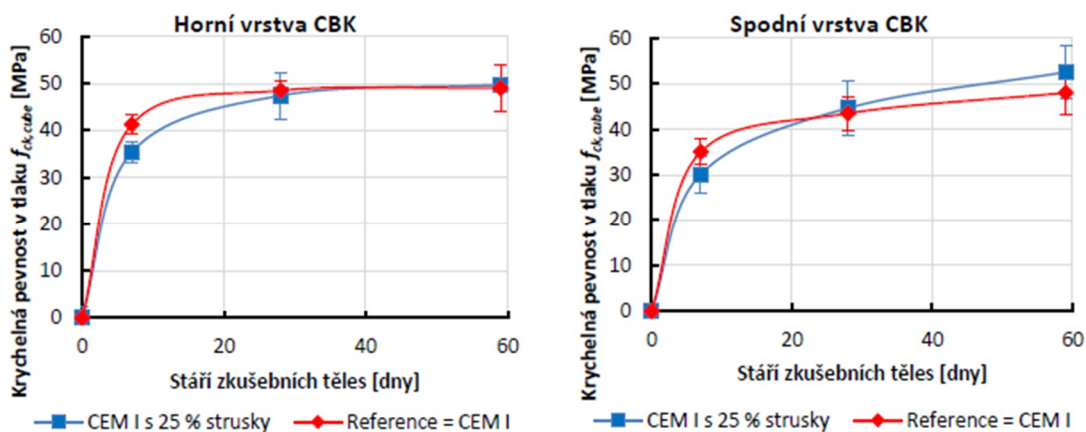
Vzorek	Pevnost v tahu za ohybu [Mpa]		
	C1	C2	C3
<b>Referenční</b>	6	6	7
<b>90PC/10FA</b>	6	5	5,5
<b>80PC/20FA</b>	7	5	6,5
<b>70PC/30FA</b>	6	6	6,5
<b>70PC/30GGBS</b>	6,5	6	7
<b>60PC/40GGBS</b>	6,5	6	7
<b>50PC/50GGBS</b>	6,5	6	7

*Poznámky k Tabulka 13:*

- C1 - prostředí pro letní vytvrzování - po odbednění vzorky vloženy do vzduchotěsných plastových pytlů při teplotě 20 °C
- C2 - prostředí pro zimní vytvrzování - po odbednění vzorky vloženy do vzduchotěsných plastových pytlů při 7 °C a relativní vlhkosti 55 %
- C3 - prostředí vytvrzování pod vodou - po odbednění vzorky umístěny do vodní lázně o teplotě 20±2 °C

#### 4.2.4 PEVNOST V TLAKU

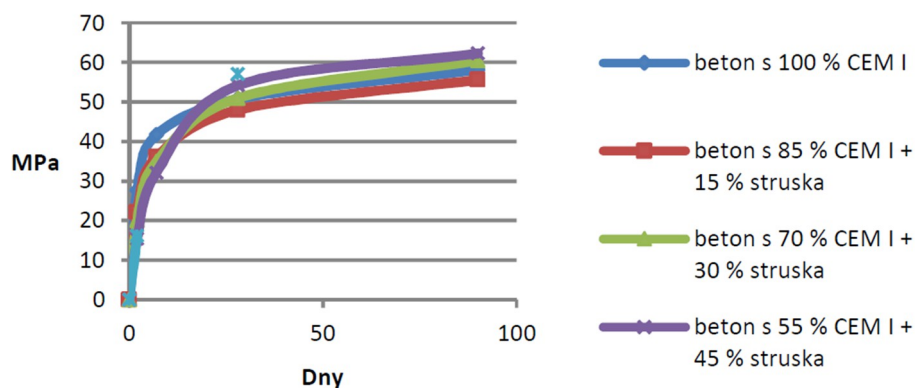
Slánský a kol. [5] se dlouhodobě zabývají využitím vysokopecní strusky pro zvýšení trvanlivosti CB krytů vozovek. V rámci výzkumu se také zabývali sledováním pevnosti v tlaku vzorků s betonem, ve kterém nahradili cement z 25 % hmotnosti vysokopecní struskou dle platných technických předpisů. Pevnost v tlaku sledovali po 7, 28 a 59 dnech zrání zvláště pro horní a spodní vrstvu CBK. Výsledky výzkumu jsou zobrazeny na *obrázku 23*. Z grafu je zcela zřejmé, že po 7 dnech zrání dosáhl nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku vzorek referenční. Po 28 dnech zrání lze ale pozorovat, že vzorky se struskou dosáhli u horní vrstvy nepatrně nižších pevností a u spodní vrstvy dokonce vyšších hodnot. To lze přičíst reakci strusky s portlanditem, která si již začala plně projevovat.



Obrázek 23 – krychelná pevnost v tlaku horní a spodní vrstvy CBK po 59 dní zrání, převzato z [5]

Autoři dále provedli i zkoušku válcové pevnosti v tlaku na vývrtech po 59 dnech vytvrzování. Vzorky s vysokopecní struskou dosáhli válcové pevnosti v tlaku 46,4 MPa, zatímco vzorky referenční 45,6 MPa.

Slánský společně s Uhlířovou [34] provedli ještě další rozsáhlejší výzkum, kde došlo k nahrazení cementu vysokopecní struskou z 15, 30 a 45 % hmotnosti. Zabývali se sledováním pevností v tlaku po dobu 90 dní, přičemž se zaměřili hlavně na rychlost vývoje pevnosti v tlaku v raných fázích tvrdnutí a tuhnutí, neboť pro CBK je toto období kritické z hlediska tvorby mikrotrhlin vlivem prudkého vývoje hydratačního tepla. Zjistili, že využitím vysokopecní strusky lze toto riziko vzniku trhlin snížit, a navíc získat beton, který má po 28 dnech vytvrzování vyšší pevnost než klasický beton. Zajímavostí je, že nejvyšších pevností již po 28 dnech zrání dosáhl vzorek s nejvyšším množstvím strusky, a naopak nejnižších vzorek s nejmenším množstvím strusky. Výsledky jsou zobrazeny na následujícím grafu.



Obrázek 24 – vývoj pevnosti v tlaku po dobu 90 dní, převzato z [34]

Orhan a kol. [88] zkoumali vliv popílku a mleté granulované vysokopecní strusky na pevnost betonu pro CBK. Cement nahradili těmito příměsi z 20 % hmotnosti při stálém vodním součiniteli 0,42. Výsledky jsou zobrazeny v následující tabulce a potvrzují tak zjištění Slánského [34], že tyto příměsi mají pozitivní vliv na snížení počátečních pevností. Po 28 dnech zrání je u vzorku se struskou a popílkem vidět vyšší nárůst pevností než u vzorku referenčního. Autoři se domnívají, že tyto vzorky budou mít v následujících fázích tvrdnutí a tuhnutí vyšší pevnost než vzorek referenční, neboť strusky a popílky reagují i po delší době vytvrzování.

Tabulka 14 – Pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech zrání, vlastní úprava z [88]

Vzorek	Pevnost v tlaku [Mpa]	
	7 dní	28 dní
Referenční	42,1	49,48
20 % popílku	35,78	44,85
20 % strusky	38,14	48,84

Sun a kol. [86] zkoumali vliv nasákavosti na pevnost v tlaku betonových vzorků, které obsahovali popílek ve množství 40, 55 a 70 % hm. pojiva. Vodní součinitel všech vzorků byl neměnný, a to 0,45. Bylo zjištěno, že čím byl vyšší obsah popílku ve směsi, tím byla vyšší nasákavost, která negativně ovlivnila pevnost v tlaku. Žádný z testovaných vzorků neměl po 180 dnech zrání vyšší pevnost než vzorek referenční. Nejvíce se mu však přiblížil vzorek, kde byl cement nahrazen popílkem ze 40 % hmotnosti. Tento vzorek měl v prvním týdnu zrání nižší pevnost oproti referenčnímu vzorku cca. o 40 %. Po 28 dnech zrání však došlo k obrovské expanzi, což je dle autorů projevem pucolánové reakce popílku a vznikem sekundárního C–S–H gelu, a rozdíl mezi těmito vzorky byl pouze 17 %. Po 56 dnech zrání je již jejich pevnost v tlaku srovnatelná, a pohybuje se kolem 50 MPa.

#### 4.2.5 ODOLNOST POVRCHU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK

Ondová a kol. [90] se ve své práci zabývali nahrazením cementu popílkem v betonových směsích pro CBK. Cement nahrazovali z 5, 10 a 15 % hmotnosti a vodní součinitel byl zvolen tak, aby bylo dosaženo požadovaného stupně konzistence betonu pro CBK, tedy třídy S1. Jedním ze sledovaných parametrů byla odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL). Autorky zmiňují, že dle technických předpisů STN 73 1326 a STN 73 6123 je maximální hmotnost odpadu 300 g/m<sup>2</sup> po 100 zmrazovacích cyklech. V rámci této zkoušky podrobili vzorky náročnějším podmínkám při 150 cyklech. Hmotnost odpadu u 5% nahrazení cementu byla 90,7 g/m<sup>2</sup>, u 10% 209,1 g/m<sup>2</sup> a u 15% 257 g/m<sup>2</sup>. Z toho lze soudit, že se zvyšujícím se množstvím popílku došlo ke snížení odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám.

Nowak-Michta [91] provedla velmi rozsáhlou studii, která se zabývala vlivem vodního součinitele na odolnost betonu s popílkem vůči CHRL. Vzorky byly vyrobeny ve třídě konzistence S3 a vodní součinitel byl 0,38 a 0,45. Autorka posuzovala odolnost betonu vůči CHRL dle švédského standardu pro Borås metodu SS 137244. Na základě tohoto standardu byly vzorky vystaveny 56 cyklům zmrazování a rozmrazování za přítomnosti 3% NaCl, a poté zatříděny do 4 kategorií dle hmotnosti odpadu:

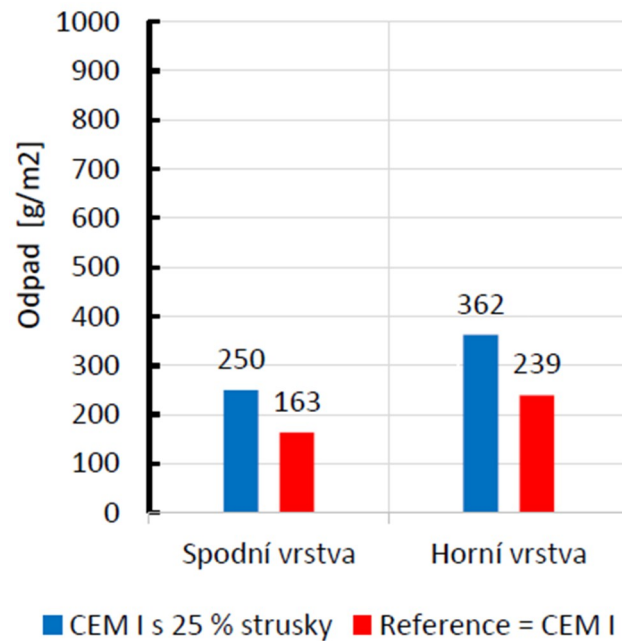
- velmi kvalitní beton:  $m_{56} < 0,1 \text{ kg/m}^2$
- kvalitní beton:  $m_{56} < 0,5 \text{ kg/m}^2$
- beton přijatelné kvality:  $m_{56} < 1 \text{ kg/m}^2$
- beton nepřijatelné kvality:  $m_{56} > 1 \text{ kg/m}^2$

Tabulka 15 – odolnost betonových vzorků s popílkem vůči CHRL s různým w/b, vlastní úprava z [91]

Vzorek	Množství popílku [%]	Množství odpadu [kg/m <sup>2</sup> ]	Kvalita betonu
<b>w/b=0,38</b>			
REF	0	0,05	velmi kvalitní
U2AN	20	0,05	velmi kvalitní
U3AN	35	0,94	přijatelná
U5AN	50	0,99	přijatelná
<b>w/b=0,45</b>			
REF	0	0,64	přijatelná
S2AN	20	1,6	nepřijatelná
S3AN	35	1,53	nepřijatelná
S5AN	50	1,23	nepřijatelná

Z tabulky 15 je zřejmé, že vyšší množství vody ve směsi jednoznačně zhoršuje odolnost betonu vůči CHRL. Stejně jako u předchozí autorky je i zde zcela patrné, že při vodním součiniteli 0,38 a zvyšujícím se zastoupení popílku roste i množství odpadu po 56 cyklech.

Slánský a kol. [5] zjišťovali odolnost proti CHRL na vývrtech ze zhotoveného CBK ve stáří 59 dní. Výsledky jejich pozorování popisuje následující graf, ze kterého je zřejmé, že beton s vysokopecní struskou má nižší odolnost vůči CHRL než prostý beton.



Obrázek 25 – odolnost proti CHRL na vývrtech po 59 dnech zrání, převzato z [5]

## ČÁST II - EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce zkoumá a posuzuje vliv dvou typů vysokopecních strusek a fluidního popílku na vlastnosti betonu pro cementobetonový kryt (CBK). Tato práce navazuje na poznatky, které byly získány v bakalářské práci [24], kde jsem se zabýval vlivem těchto potencionálních náhrad cementu na vlastnosti cementových malt a past. Předchozí studie byla velmi důležitá z toho pohledu, že na úrovni cementových past se odehrávají nejzásadnější změny, které jsou důležité pro následné uplatnění. Kapitola „5 Experimentální metody“ se zabývá popisem metodik provedených zkoušek a měření na betonu, ve kterém byla část cementu nahrazena dvěma typy vysokopecních strusek a fluidním popílkem. Na čerstvém betonu byla stanovena konzistence, která je u aplikace silničních betonů velmi důležitá. Na ztvrdlém betonu byla sledována objemová hmotnost, mechanické vlastnosti jako pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. V rámci zkoušky odolnosti proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL) byla zjišťována povrchová nasákavost. Kapitola „6 Použité materiály a vzorky“ pak blíže představuje všechny použité materiály, a také postup výroby a způsob uložení vzorků. V kapitole „7 Výsledky a diskuze“ jsou zpracovány výsledky zjištěné v rámci této práce vč. porovnání s poznatky jiných autorů, které byly zpracovány v kapitole „4 Využití strusky a popílků jako náhrad cementu v betonových směsích pro CBK“.

Z výsledků provedených zkoušek a měření betonových vzorků stejné směsi, tudíž stejného složení byl vypočten aritmetický průměr dle vzorce (1), který následně reprezentoval výslednou hodnotu dané směsi. Současně s aritmetickým průměrem byla vypočítána i směrodatná odchylka dle vzorce (2), což dodatečně poskytlo informace o odchylkách jednotlivých měření od aritmetického průměru naměřených hodnot. Tyto dvě charakteristiky byly následně zpracovány do tabulek a grafů.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

kde:

$\bar{x}$  aritmetický průměr měřených hodnot,

$n$  počet provedených měření,

$x_i$  změřené hodnoty.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

kde:

- $\sigma$  směrodatná odchylka,
- $n$  počet provedených měření,
- $x_i$  měřené hodnoty,
- $\bar{x}$  aritmetický průměr měřených hodnot.



## 5 EXPERIMENTÁLNÍ METODY

### 5.1 ČERSTVÝ BETON

#### 5.1.1 KONZISTENCE

Zkouška konzistence byla provedena pro každou směs, neboť bylo zapotřebí docílit stupně konzistence S1, který je důležitý z hlediska technologie pokládky betonové směsi pro cementobetonové kryty. Zkouška byla provedena dle technické normy ČSN EN 12350-2 [92], přičemž cílem bylo zařazení čerstvé betonové směsi do skupiny stupně konzistence dle normy ČSN EN 206+A2 [21], která stanovuje velikost poklesu výšky (sednutí) betonového vzorku. Rozmezí poklesu výšky pro dané stupně konzistence jsou znázorněné v následující tabulce. V rámci zkoušky byl použit Abramsův kužel o výšce 300 mm s dolním průměrem 200 mm a horním 100 mm, hutnicí tyč, podkladní deska, pravítko a zednická lžíce.

*Tabulka 16 – zařídění směsí dle sednutí kužele, vlastní úprava z [21]*

<b>Stupeň konzistence</b>	<b>Sednutí [mm]</b>
<b>S1 (tuhá)</b>	10 – 40
<b>S2 (plastická)</b>	50 – 90
<b>S3 (velmi měkká)</b>	100 – 150
<b>S4 (tekutá)</b>	160 – 210
<b>S5 (tekutá)</b>	≥ 220

Zkouška byla prováděna hned po umíchání betonové směsi v míchačce. Nejprve byla vedle míchačky umístěna podkladní deska, která byla pomocí houbičky spolu s kuželovou formou navlhčena. Následně byl pomocí zednické lžíce odebírán beton z bubnu míchačky a ukládán do kuželové formy. Ukládání betonu probíhalo po třetinách objemu formy, přičemž každá třetina byla zhutněna 25 vpichy hutnicí tyče. Tím bylo zajištěno, že došlo k dostatečnému propojení jednotlivých vrstev. Beton, který byl přebytečný nad horním okraje formy, byl opatrně stažen pomocí pilového pohybu zednické lžíce. Nakonec došlo k zvednutí kuželové formy plynulým pohybem vzhůru, a po několika sekundách, resp. po sednutí kužele došlo k odečtení poklesu betonového vzorku od kuželové formy, která byla postavena v blízkosti vzorku, tak jak je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 26 – měření poklesu (sednutí) čerstvé betonové směsi, vlastní tvorba

## 5.2 ZTVRDLÝ BETON

### 5.2.1 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Objemová hmotnost byla měřena dle normy ČSN EN 12390-7 [93] na plně nasycených vzorcích vždy před provedením zkoušky pevnosti v tlaku, tj. po 7, 28, 56 a 90 dnech zrání. Zkušební vzorky byly po vyndání z kádě naplněné vodou povrchově osušeny a následně změřeny za pomoci posuvného měřidla. Měření probíhalo tak, že délka s šířkou byly měřeny na každé podstavě několikrát a výsledná hodnota byla jejich průměrem. Výška byla měřena na každé straně vzorku a stejně jako šířka s délkou byla zprůměrována. Nakonec byly vzorky zváženy pomocí laboratorní váhy a objemová hmotnost byla vypočítána dle vztahu (3).

$$D = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

kde:

$D$  objemová hmotnost zkušebního plně nasyceného tělesa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$m$  hmotnost plně nasyceného zkušebního tělesa [ $\text{kg}$ ],

$V$  objem zkušebního tělesa [ $\text{m}^3$ ].

### 5.2.2 POVRCHOVÁ NASÁKAVOST

Povrchová nasákavost vzorků byla zjišťována v rámci zkoušky odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL). Vzorky válců o výšce 300 mm a průměru 150 mm byly po 28 dnech zrání v kádi s vodou vyjmuty a za pomoci kotoučové pily byl proveden odřez o výšce 50 mm od horního povrchu. Takto připravené vzorky byly poté uloženy do laboratorního prostředí. Po 5 dnech v laboratorním prostředí byla tělesa opatřena vodotěsnou objímkou v podobě automobilové vzdušnice pneumatiky o rozměru 6,50 – 20. Tato objímka byla na tělesa přilepena za pomoci chemoprenu, a ještě byla přitažena za pomoci kovových stahovacích pásků. Po dostatečném zatuhnutí chemoprenu byly vzorky zváženy pomocí laboratorní váhy, přičemž tato hodnota představovala hmotnost vysušeného tělesa v běžném laboratorním prostředí. Následně byla na povrch zkušebních těles nalita voda o výšce 2 cm. Voda byla na povrchu zkušebních těles ponechána po dobu předem zvolených časových intervalů, poté byla vylita a zkušební tělesa byla zvážena. Tato hodnota pak představovala hmotnost vodou nasycených těles. Časové intervaly pro zjištění povrchové nasákavosti zkušebních těles byly 5, 10, 20, 40, 80, 120 a 1440 minut. Povrchová nasákavost byla vypočtena

dle vzorce (4). Touto zkouškou navíc byla ověřena vodotěsnost objímek, která je nezbytná pro zkoušku odolnosti proti působení vody a CHRL.

$$W = \frac{M1 - M2}{A}, \quad (4)$$

kde:

$W$  povrchová nasákavost [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ],

$M1$  hmotnost vodou nasyceného tělesa [ $\text{kg}$ ],

$M2$  hmotnost vysušeného tělesa v běžném laboratorním prostředí [ $\text{kg}$ ],

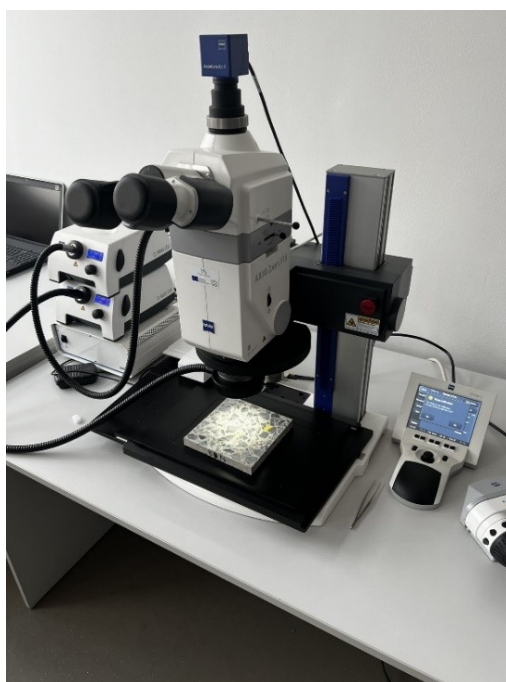
$A$  velikost zkušebního povrchu [ $\text{m}^2$ ].



*Obrázek 27 – zkouška povrchové nasákavosti, vlastní tvorba*

### 5.2.3 MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA

Mikroskopická analýza byla provedena z důvodu stanovení porozity vyrobených betonových vzorků, resp. množství vzduchových pórů na úrovni technologických pórů, tedy pórů zanesených do struktury betonu během jeho výroby a také záměrně vzniklých pórů použitím provzdušňovací přísady. Výsledky mikroskopické analýzy mohou pomoci vysvětlit výsledky ostatních provedených zkoušek a mimo jiné také vyhodnotit kvalitu provzdušnění, čímž lze předpovědět odolnost betonu. Důležité je zmínit, že vzhledem k velmi vysoké časové náročnosti, kdy pouze lapování jednoho vzorku zabere zhruba 4 hodiny, byla mikroskopická analýza provedena pouze na jednom řezu. Pro větší průkaznost analýzy je na místě usilovat o větší statistický soubor dat. Mikroskopická analýza byla provedena prostřednictvím dvou hlavních technik, a to optické mikroskopie a obrazové analýzy snímků v softwaru ImageJ. Mikroskopování bylo provedeno v Univerzitním centru energetiky efektivních budov ČVUT v Paze v laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy.



Obrázek 28 – optický stereo mikroskop ZEISS Axio Zoom. V16, vlastní tvorba

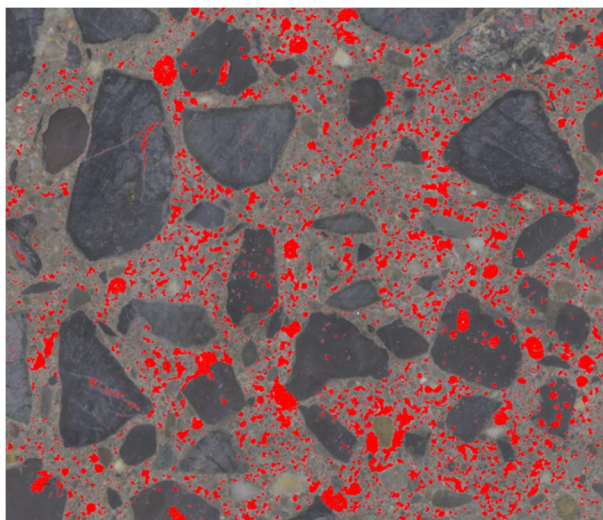
K provedení mikroskopické analýzy bylo nejprve nutné pomocí kotoučové pily vyříznout zkušební vzorek o tloušťce přibližně 18 mm ze střední části zkušební krychle, tedy o rozměrech 18×150×150 mm. Samotný řez byl proveden při velmi vysokých otáčkách a minimálním posunu kotouče, neboť pro následnou přípravu povrchu na mikroskopování je nutné, aby byl řez co nejčistší. Následujícím krokem byla vlastní příprava povrchu vzorků, která spočívala

v broušení a lapování pomocí prášku SiC a následném vyplnění pórů pomocí titanové běloby, díky které byly póry dostatečně odlišeny od struktury ostatních složek betonu. Dále byly vzorky vloženy do optického stereo mikroskopu ZEISS Axio Zoom V.16 (obrázek 28) a pořízeny snímky o matici 5×5 při zvětšení 3,5× (obrázek 29). Vlastní broušení, lapování a snímkování provedl Ing. Zdeněk Prošek, Ph.D., jelikož tuto část analýz může v případě mikroskopie provádět jen speciálně zaškolený odborník.



Obrázek 29 – příklad snímku z optického stereo mikroskopu včetně vyznačených pórů, vlastní tvorba

Po dokončení mikroskopování byly snímky vloženy do softwaru ImageJ, ve kterém byla provedena obrazová analýza. Ta byla provedena v závislosti na saturaci, barevném spektru a kontrastu a jas, tedy stupni šedi. Pro zobrazení a zvýraznění všech viditelných pórů, byla zvolena červená barva (obrázek 30). Výsledkem obrazové analýzy byl poměr pixelů červené barvy (pórů) ku celkovým pixelům snímku, přičemž tato hodnota reprezentuje pórovitost.



Obrázek 30 – obrazová analýza v softwaru ImageJ (všechny viditelné póry červeně), vlastní tvorba

## 5.2.4 PEVNOST V TLAKU

Zkoušky pevnosti v tlaku byly provedeny na krychlích o rozměrech  $150 \times 150 \times 150$  mm a na válcích o výšce 250 mm a průměru 150 mm. Je však důležité zmínit, že byly použity válce, které měly seříznutou horní část o 50 mm kvůli zkoušce odolnosti vůči CHRL (tedy výška zkušebních těles pro pevnost v tlaku byla v tomto ohledu nenormová a válce neodpovídaly normové požadované výšce 300 mm). Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena dle normy ČSN EN 12390-3 [94]. Krychelná pevnost byla zjišťována po 7, 28, 56 a 90 dnech zrání, zatímco válcová pouze po 28 dnech. Zkušební tělesa byla v těchto časových intervalech vyjmuta z kádí naplněných vodou a povrchově osušena. Následně byla tělesa změřena pomocí posuvného měřidla a zvážena. Poté byla tělesa postupně vkládána hladkými stranami na dosedací plochu zkušebního lisu s potřebným vybavením. Zatěžování bylo prováděno konstantním nárůstem síly až do okamžiku porušení. Výsledná pevnost v tlaku pak byla vypočtena dle následujícího vztahu. *Obrázek 31* pak znázorňuje zkušební těleso v počátku zatěžování a v momentě porušení.

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (5)$$

kde:

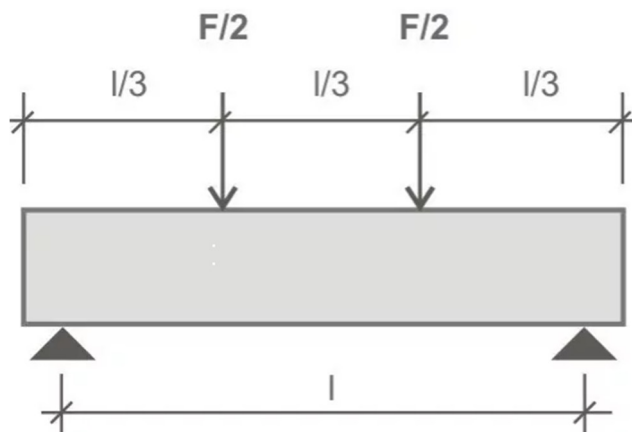
- $f_c$  pevnost v tlaku [MPa],
- $F$  síla v momentě porušení [N],
- $A_c$  zatěžovaná plocha [mm<sup>2</sup>].



*Obrázek 31 – zkušební těleso v okamžiku zatěžování a porušení, vlastní tvorba*

### 5.2.5 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

Zkouška v tahu za ohybu byla provedena na trácích o rozměrech  $100 \times 100 \times 400$  mm dle normy ČSN EN 12390-5 [95]. Jednalo se o zkoušku se čtyřbodovým uspořádáním (obrázek 32), kdy došlo k porušení zkušební tělesa mezi oběma silami od zatížení.



Obrázek 32 – čtyřbodové uspořádání zkoušky v tahu ohybem, převzato z [96]

Pevnost v tahu ohybem byla zjišťována na zkušebních tělesech po 90 dnech zrání, kdy byl vždy testován jeden vzorek od každé směsi. Je zde nutné podotknout, že není optimální zkoušku provádět pouze na jednom zkušebním tělese a tělesa by měla být vždy nejméně tři, aby byla zkouška více vypovídající. Nicméně na počátku experimentálních prací došlo po dohodě s vedoucím diplomové práce k omezení počtu vyráběných zkušebních těles, jelikož důraz byl kladen na další zde uvedené zkoušky. Před samotnou zkouškou byla zkušební tělesa vyndána z kádě s vodou a povrchově osušena. Dále byla tělesa za pomoci posuvného měřidla a metru změřena a zvážena. Následně byla tělesa uložena do zkušebního zařízení tak, aby všechny zatěžovací a podpěrné válečky byly rovnoměrně na zkušebním tělese. Poté bylo zahájeno samotné zatěžování rychlostí od  $0,04$  MPa/s do  $0,06$  MPa/s, aby nedošlo vlivem většího nárazu k porušení vzorku. Následně se zatěžovací rychlost nepřetržitě zvyšovala konstantní rychlostí  $\pm 10$  % až do momentu porušení. Pevnost v tahu ohybem byla vypočtena dle rovnice 6. Na obrázku 33 je zobrazen stav zkušební tělesa před zkouškou a v momentě jeho porušení.



$$f_{ct,fl} = \frac{F \times l}{d_1 \times d_2^2}, \quad (6)$$

kde:

- $f_{ct,fl}$  pevnost v tahu ohybem [MPa],  
 $F$  síla v momentě porušení [N],  
 $l$  vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm],  
 $d_1$  šířka zkušebního tělesa [mm],  
 $d_2$  výška zkušebního tělesa [mm].



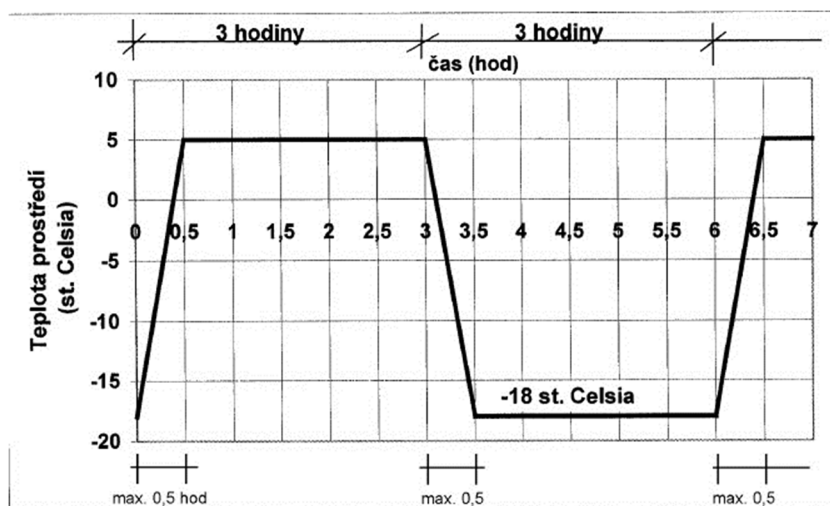
*Obrázek 33 – stav tělesa před a po zkoušce pevnosti v tahu ohybem se čtyřbodovým uspořádáním, vlastní tvorba*

## **5.2.6 ODOLNOST POVRCHU BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK**

Zkouška odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL) byla provedena metodou C, tedy metodou automatického cyklování dle normy ČSN 73 1326 Změny Z1 [97], kterou lze v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze provádět. Podstatou této metody je použití automaticky řízeného cyklického střídání kladných a záporných teplot, které působí na zkušební těleso rovnoměrně a na povrch tělesa, který je ohraničený objímkou je nalit 3% roztok NaCl (kuchyňské soli). Zkušební tělesa představovala odřezky horních povrchů válců o výšce 50 mm, které byly opatřeny gumovou vodotěsnou objímkou a staženy stahovacími pásky, tak jak již bylo zmíněno v podkapitole „5.2.2 Povrchová nasákavost“. Před samotnou zkouškou odolnosti byla na zkušebních tělesech dle zmíněné

podkapitoly dále provedena zkouška povrchové nasákavosti, jejímž úkolem bylo mj. ověření vodotěsnosti gumové objímky.

Po dokončení zkoušky povrchové nasákavosti, tj. 35. den od vyrobení zkušebních těles byla ze zkušebních těles slita voda, přičemž zbytková voda byla odstraněna pomocí stlačeného vzduchu. Následně byl připraven 3% roztok NaCl, který byl nalit na povrch zkušebních těles v tloušťce vrstvy cca. 5 mm. Takto připravená tělesa byla vložena do klimatizační komory CTS C-40/350/S s automaticky měnitelnou teplotou prostředí s přesností  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (obrázek 35). Komora byla nastavena tak, aby se teplota cirkulujícího vzduchu měnila cyklicky, kdy první cyklus pracoval s teplotou  $-18 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  a trval tři hodiny a druhý cyklus trávající taktéž tři hodiny o teplotě  $+5 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Délka jednoho cyklu byla tak zhruba 6 hodin, tak jak ukazuje následující obrázek.



Obrázek 34 – teplotní cyklus, převzato z [97]

Po uplynutí 25, 50, 75 a 100 cyklů byla zkušební tělesa vyjmuta z klimatizační komory. Následně byl opatrně slit slaný roztok tak, aby nedošlo k nežádoucímu úniku uvolněných částic betonu. Poté se pomocí plastové stříčky slily uvolněné částice betonu do misky, která byla větší než samotné těleso. Dále se pomocí tvrdšího kartáče okartáčoval povrch zkušebního tělesa a opět slil za pomoci stříčky do stejné misky (obrázek 36). Z této misky se pak slily uvolněné částice do Petriho misky, která byla následně vložena do sušárny, ve které se udržovala teplota vzduchu  $105 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na zkušební těleso s omytým povrchem byla dále nalita voda po okraj objímky po dobu 24 hodin a zmíněný postup se znovu opakoval.



Obrázek 35 – klimatizační komora CTS C-40/350/S a uložení vzorků, vlastní tvorba

Po vysušení uvolněných částic betonu v sušárně do stálé hmotnosti se pomocí laboratorní váhy s přesností 0,1 g stanovila jejich hmotnost. Následným přepočtem na plochu se poté stanovil odpad betonu v  $\text{g/m}^2$ . Výslednou hodnotou pak byla součtová hodnota odpadů po daných počtech cyklů, neboť odpad se splavoval do stejné Petriho misky.

Odolnost povrchu betonu proti působení vody a roztoku NaCl je vyjádřena prostřednictvím součinitelů odolnosti D1 až D5, kdy [97]:

- D1 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $1000 \text{ g/m}^2$
- D2 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $2000 \text{ g/m}^2$
- D3 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $3000 \text{ g/m}^2$
- D4 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $4000 \text{ g/m}^2$
- D5 = počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $5000 \text{ g/m}^2$

Odolnost D1 je obvykle uváděna jako kritérium odolnosti povrchu betonu proti působení vody a roztoku NaCl. Jelikož od každé směsi byly testovány tři vzorky, tak výsledná hodnota byla jejich průměrem. V případě, že se jeden ze vzorků lišil o více než 20 %, nebyl ve výpočtech uvažován.



Obrázek 36 – zkušební tělesa po vyndání z klimatizační komory po 25 cyklech a po sliti do Petriho misek, vlastní tvorba

V technické normě ČSN P 73 2404 [98], resp. v tabulkách F.1.1 a F.1.2 této normy, jsou uvedeny doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu. Součástí jsou také doporučené hodnoty odolnosti betonu vůči zmrazování a rozmrazování a působení rozmrazovacích látek pro jednotlivé stupně vlivu prostředí. Pro stupeň vlivu prostředí XF2 (mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky) je doporučená mezní hodnota odpadu betonu po 50 cyklech zmrazování a rozmrazování pro předpokládanou životnost 50 let  $1500 \text{ g/m}^2$ , a pro předpokládanou životnost 100 let po 75 cyklech  $1250 \text{ g/m}^2$ . Pro stupeň vlivu prostředí XF4 (značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou) je doporučená mezní hodnota odpadu betonu po 75 cyklech zmrazování a rozmrazování pro předpokládanou životnost 50 i 100 let  $1000 \text{ g/m}^2$ .

Na následujícím obrázku je zachycen stav zkušebních těles v okamžiku ukončení zkoušky odolnosti, tj. po uplynutí 100 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů, což odpovídá zhruba 600 hodinám.



*Obrázek 37 – stav zkušebních těles po ukončení zkoušky odolnosti, vlastní tvorba*

Na obrázku 37 si lze všimnout, že dopad působení vody a chemických rozmrazovacích látek byl na všechna tělesa různý. Zatímco zkušební tělesa s označením REF a N1 nevykazují téměř žádné poškození, tak na tělesech N2, a především pak N3 je poškození značné.

## 6 POUŽITÉ MATERIÁLY A VZORKY

Předmětem této kapitoly je specifikace materiálů, které byly použity v této práci. Jedná se o použitý typ cementu, 2 typy vysokopecní strusky, fluidní popílek či jejich kombinace, drobné a hrubé kamenivo a vodu. Dále jsou zde popsány receptury jednotlivých směsí, zvolené a použité typy zkušebních těles včetně jejich výroby a uložení.

### 6.1 SPECIFIKACE VSTUPNÍCH SUROVIN

#### 6.1.1 VYSOKOPECNÍ STRUSKA ECOCOAL (N1)

Tato struska je produktem společnosti ECOCOAL Slag Handling a jedná se o typ vodou chlazené vysokopecní granulované strusky z Ostravska. Pro mletí této strusky byl aplikován nový typ rotoru bariérového typu pro vysokorychlostní mletí. Konstrukce tohoto rotoru byla zhotovena z odolných materiálů, jako jsou např. karbidy wolframu či korund, avšak tyto materiály jsou citlivější na rázové namáhání. Proto bylo nejprve nezbytné provést předběžné mletí strusky ve dvouválcovém mlýně, aby bylo dosaženo velikosti zrn menších než 0,5 mm. Teprve poté bylo možné přejít k mletí ve vysokorychlostním mlýně. Po této úpravě dosahovala struska měrného povrchu dle Blaine hodnoty 175 m<sup>2</sup>/kg. Velikost zrn této strusky se pohybuje v rozmezí od 0,5 do 320 mikronů, s největším zastoupením zrn o velikosti 10 až 80 mikronů [99]. V následující tabulce je uvedeno chemické složení této strusky.

Tabulka 17 – chemické složení vysokopecní strusky EcoCoal (analýza XRF), vlastní úprava z [99]

Obsah ve strusce [%]							
Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,43	9,9	8,44	36,89	1,74	41,08	0,49	0,18

#### 6.1.2 FLUIDNÍ POPÍLEK KLADNO (N2)

Použitý typ fluidního úletového popílku je vedlejším energetickým produktem teplárny Kladno. Tento produkt je plně certifikovaný jako popílek do cementu, filer do betonu, aditivovaný granulát, surovina pro výrobu stavebních hmot a jako popílek pro silniční stavby. Chemické složení tohoto popílku je zobrazeno v následující tabulce [100].

Tabulka 18 – chemické složení fluidního úletového popílku Kladno (analýza XRF), převzato z [24]

Obsah v popílku [%]							
Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2,23	1,52	30,98	32,55	6,01	17,60	2,40	5,97

### 6.1.3 FLUIDNÍ POPÍLEK Kladno, VYSOKOPECNÍ STRUSKA Kladno A CEMENT (N3)

Vysokopecní struska Kladno je typem stabilizované vzduchem chlazené strusky. Tato struska je produktem společnosti DestroKladno s.r.o., která strusku postupně odtěžuje z haldy Koněv, která je v jejich vlastnictví. Poté tuto strusku drtí, třídí a částečně i sami zpracovávají. Halda Koněv nacházející se v blízkosti centra Kladna sloužila ke hromadění strusky již od roku 1870, přičemž její funkčnost z hlediska deponování horké strusky se uvádí až do zhruba 70. – 80. let 20. století. Na následujícím obrázku lze pozorovat část recyklační linky na zmíněné haldě Koněv [101].



Obrázek 38 – část recyklační linky na haldě Koněv, převzato z [101]

Chemické složení vzduchem chlazené vysokopecní strusky z Kladna je znázorněno v následující tabulce.

Tabulka 19 – chemické složení vysokopecní strusky Kladno (analýza XRF), vlastní úprava z [102]

Obsah ve strusce [%]							
Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
2,09	5,76	11,75	25,11	4,67	36,92	1,16	5,37

V rámci této práce byla vysokopecní struska Kladno využita v kombinaci s fluidním popílkem Kladno a cementem. Zmíněné složky byly smíseny v poměru 65:30:5 (fluidní popílek Kladno: vysokopecní struska Kladno: cement) a homogenizovány s využitím vysokorychlostního mlýnu, kterým se sjednotí velikost částic a složky se vzájemně dobře homogenizují či vzájemně aktivují.

## 6.1.4 CEMENT

K výrobě vzorků betonu byl použit pytlovaný portlandský cement typu CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá, kterou vlastní výrobce Českomoravský cement, a.s. Jeho fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 20 – fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Mokrá, převzato z [103]

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti		
Parametr		Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka	Parametr	Průměrné dosahované hodnoty	Metoda / poznámka
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	17,0	EN 196-1	Obsah SO <sub>3</sub> [%]	2,97*	EN 196-2
	2 dny	30,3*	EN 196-1	Obsah Cl <sup>-</sup> [%]	0,052*	EN 196-2
	7 dní	50,3	EN 196-1	Na <sub>2</sub> O ekvivalent [%]	0,64*	EN 196-2
	28 dní	60,6*	EN 196-1	Ner rozpustný zbytek [%]	0,88*	EN 196-2
	56 dní	65,9	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	3,26*	EN 196-2
	90 dní	67,9	EN 196-1			
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4,3	EN 196-1	*Průměrné hodnoty získané z měsíčních statistických dat za rok 2022		
	2 dny	6,3*	EN 196-1	V případě, že cement obsahuje (ve smyslu Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) 1907/2006 přílohy XVII, čl. 47) redukční činidlo, které po smíchání s vodou snižuje obsah Cr <sup>6+</sup> v cementu pod hodnotu 0,0002 %, je toto činidlo účinné nejméně po dobu skladování cementu, po kterou musí být cement chráněn před působením vody a vysoké relativní vlhkosti vzduchu (nejvýše 75 %). Doba skladování cementu je 90 dnů od data uvedeného na obalu (balený cement) nebo od data expedice (volně ložený cement).		
	7 dní	8,1	EN 196-1			
	28 dní	9,0*	EN 196-1			
	56 dní	9,6	EN 196-1			
	90 dní	9,7	EN 196-1			
Normální konzistence [%]		27,2*	EN 196-3			
Počátek tuhnutí [min]		211*	EN 196-3			
Konec tuhnutí [min]		286*	EN 196-3			
Objemová stálost [mm]		0,8*	EN 196-3, Le Chatelier			
Měrný povrch [m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]		409*	EN 196-6, Blaine			
Měrná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]		3130	EN 196-6			
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ] - v autocisterně		1070	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.			
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ] - v síle		1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síla.			
Hydratační teplo [J·g <sup>-1</sup> ]	7 dní	314	EN 196-11			

Použití cementu dle stupňů vlivu prostředí podle ČSN P 73 2404																	
Bez rizika	Koroze způsobená karbonatácí				Působení chloridů (ne z mořské vody)			Střídavé působení mrazu a rozmrazování				Chemicky agresivní prostředí			Obrus		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>a)</sup>	✓ <sup>a)</sup>	✓	✓	✓

## 6.1.5 KAMENIVO

V rámci této práce bylo použito drobné těžené kamenivo (šterkopísek) frakce 0/4 mm z pískovny Ledčice a hrubé drcené kamenivo frakce 4/8, 8/16, 11/22 mm z lomu Sýkořice. Oba tyto lomy vlastní společnost KÁMEN Zbraslav, a.s. Pískovna Ledčice je v provozu již od roku 1997. Dnes je tato provozovna plně stabilizovaná a vyrábí každoročně až 700 000 tun praného kameniva. V sortimentu lze nalézt šterkopísek frakcí 0/2 mm až 16/22 mm. V lomu Sýkořice



se těží zejména hornina spilit. Tato hornina se svou kvalitou řadí k těm nejlepším ve středních Čechách. Kamenivo se pak používá především do betonových a obalovaných směsí [104]. Následující obrázek zobrazuje použité přírodní drobné a hrubé kamenivo.



*Obrázek 39 – ukázka použitého přírodního drobného a hrubého kameniva, vlastní tvorba*

Ve směsi s označením M bylo nahrazeno hrubé drcené kamenivo frakce 8/16 mm umělým kamenivem, resp. ocelářskou struskou frakce 8/16 mm od dodavatele FeWo CB s.r.o. (jedná se o strusku pocházející z voestalpine AG v Linci a je to typ konvertorové strusky).



*Obrázek 40 – ocelářská struska frakce 8/16 mm, vlastní tvorba*

### **6.1.6 PŘÍSADY**

Do jednotlivých čerstvých směsí byly během míchání přidány přísady PORALAN STA a STACHEPLAST.

PORALAN STA je provzdušňovací přísada, která vytváří v betonu malé vzduchové póry o průměru 10 – 300  $\mu\text{m}$ , které představují tzv. účinný vzduch. Použitím této přísady do betonu dochází k několikanásobnému zvýšení mrazuvzdornosti a odolnosti betonu proti chemickým rozmrazovacím látkám, ke zlepšení zpracovatelnosti, ke zlepšení čerpatelnosti směsi, ulehčuje zhutnění betonu, výrazně zlepšuje vodotěsnost betonu, a navíc umožňuje snížit obsah záměsové vody bez zhoršení zpracovatelnosti [105].

STACHEPLAST je plastifikační přísada na bázi lignosulfonátů, která je vhodná zejména pro transportbeton. Tato přísada zlepšuje čerpatelnost betonové směsi, zlepšuje pevnost betonu včetně vodotěsnosti a odolnosti proti klimatickým a chemickým vlivům, zlepšuje vzhled betonu a způsobuje mírné prodloužení tuhnutí betonu [106].

### **6.1.7 VODA**

K výrobě vzorků byla využita běžná kohoutková voda. V okamžiku výroby vzorků byly z dat společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s. ověřeny veškeré náležitosti, které určuje vyhláška č. 252/2004 Sb.

## 6.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY

V rámci experimentální části práce byly dle normy ČSN EN 12390-1 [107] vyrobeny betonové vzorky krychlí o velikosti 150 × 150 × 150 mm, trámčů o rozměrech 100 × 100 × 400 mm a válců o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Od každé směsi bylo vyrobeno celkem 12 krychlí, 3 válce a 1 trámec dle následující receptury. Vodní součinitel jednotlivých směsí byl volen tak, aby bylo dosaženo stupně konzistence S1, tedy 10 – 40 mm. Cement byl u směsí s označením N1, N2, N3 a M nahrazen zmíněnými alternativními pojivy ze 25 % hmotnosti. Následující tabulka ukazuje složení jednotlivých směsí na 1 m<sup>3</sup>.

Tabulka 21 – složení jednotlivých směsí, vlastní tvorba

[kg/m <sup>3</sup> ]	OZNAČENÍ SMĚSÍ				
	REF	N1	N2	N3	M
<b>CEM I 42,5 R</b>	360	270	270	270	270
<b>Vysokopecní struska EcoCoal</b>	-	90	-	-	90
<b>Fluidní popílek Kladno</b>	-	-	90	-	-
<b>65:30:5 (fluidní popílek Kladno: vysokopecní struska Kladno: cement)</b>	-	-	-	90	-
<b>DTK 0/4 Ledčice</b>	620	620	620	620	620
<b>HDK 4/8 Sýkořice</b>	150	150	150	150	150
<b>HDK 8/16 Sýkořice</b>	545	545	545	545	-
<b>Ocelárenská struska 8/16</b>	-	-	-	-	545
<b>HDK 11/22 Sýkořice</b>	580	580	580	580	580
<b>Stacheplast</b>	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>Poralan STA</b>	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<b>Voda</b>	127,4	107,7	148,2	128,1	108,6
<b>Vodní součinitel (w/b)</b>	0,354	0,299	0,412	0,356	0,302
<b>Stupeň konzistence [mm]</b>	S1 - 30	S1 - 35	S1 - 15	S1 - 20	S1 - 40
<b>Objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2385	2365	2406	2385	2366

## 6.2.1 VÝROBA VZORKŮ

Nejprve byly za pomoci laboratorní váhy s přesností  $\pm 1$  g dle daných receptur naváženy veškeré potřebné materiály, které byly vkládány do samostatných plastových kýblů. Před mícháním první směsi bylo nutné lehce navlhčit buben míchačky pomocí mokré houbičky. Následně byly do bubnu míchačky nasypány všechny suché složky dané směsi a po dobu 60 s proběhlo jejich promíchání. Poté byla do míchané směsi postupně nalita voda a míchání probíhalo dalších 60 s. Po uplynutí této doby bylo míchání pozastaveno a za pomoci zednické lžice byly sejmuty usazeniny z bubnu míchačky a umístěny do středu bubnu. Následně bylo opět zahájeno konečné míchání betonu společně s přidáním přísad. Po uplynutí 60 s byla míchačka zastavena a za pomoci zednické lžice došlo k očištění betonu z lopatek míchačky. Po domíchání byl beton vkládán do předem připravených plastových forem, jejichž stěny byly opatřeny tenkou vrstvou odbedňovacího oleje. Vkládání betonu do forem probíhalo opět zhruba po třetinách jejich objemu, kdy každá třetina byla samostatně zhutněna prostřednictvím vibračního stolu. Nakonec byly naplněné formy překryty strečovou fólií, aby nedošlo k nadbytečnému výparu vody z těles, tak jak ukazuje následující obrázek.



*Obrázek 41 – výroba betonové směsi v míchačce a uložení naplněných plastových forem, vlastní tvorba*

Po 24 hodinách zrání byla tělesa vyjmuta z plastových forem prostřednictvím stlačeného vzduchu, který byl hadicí foukán do malého otvoru o velikosti malíčku na dně formy. Na následujícím obrázku lze vidět tělesa jedné směsi krátce po odbednění.



Obrázek 42 – zkušební tělesa jedné směsi krátce po odbednění, vlastní tvorba

## 6.2.2 ULOŽENÍ VZORKŮ

Po odbednění byly vzorky vloženy do nádob naplněných vodou o teplotě  $20 \pm 1$  °C (obrázek 43). Vzorky byly uloženy tak, aby byly celým objemem pod vodou a voda měla přístup ke každé jeho straně. Vzorky byly uloženy v nádobě s vodou až do okamžiku jednotlivých zkoušek.



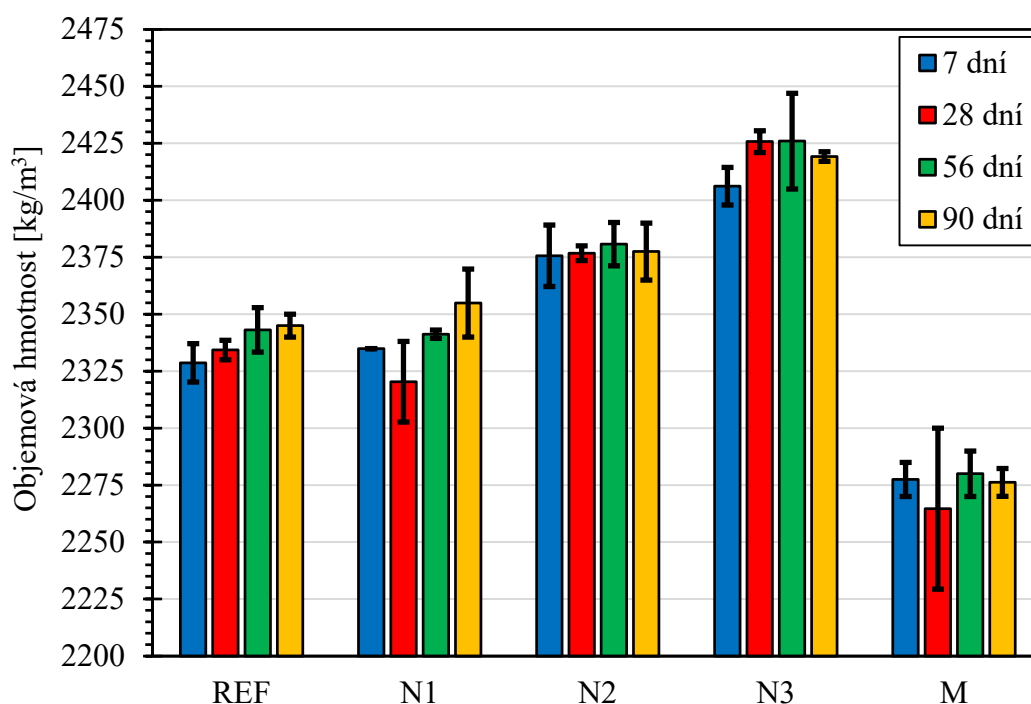
Obrázek 43 – uložení zkušebních těles, vlastní tvorba

## 7 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 7.1 ZTVRDLÝ BETON

#### 7.1.1 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Objemová hmotnost byla stanovena postupem dle podkapitoly „5.2.1 Objemová hmotnost“. Objemová hmotnost plně nasycených zkušebních těles po 7, 28, 56 a 90 dnech zrání je znázorněna na následujícím obrázku.



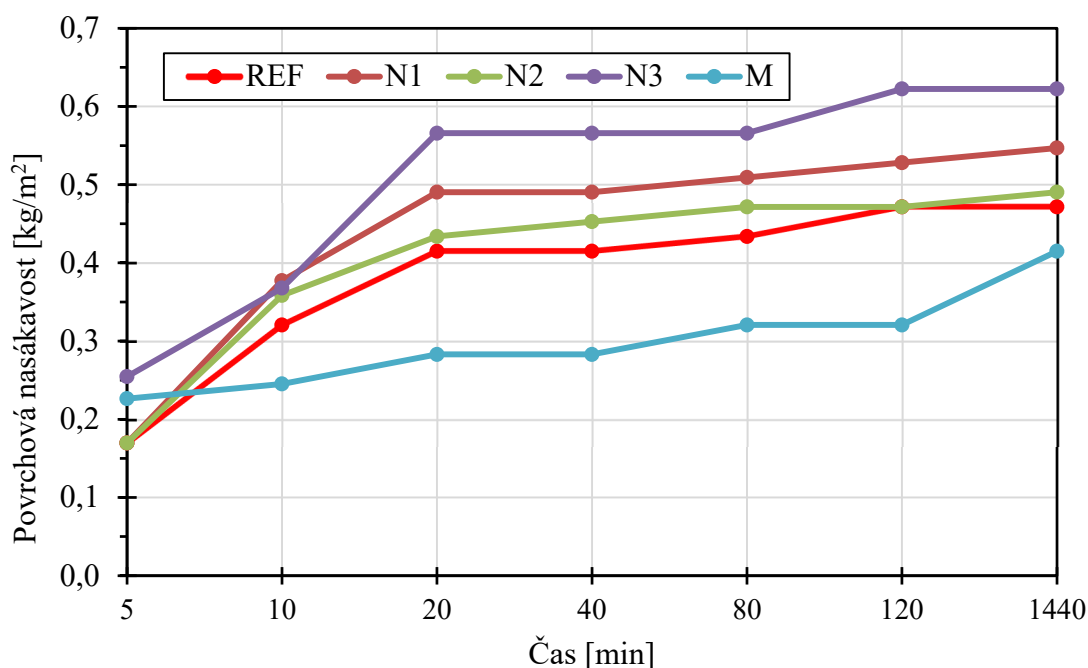
Obrázek 44 – objemová hmotnost betonových vzorků vč. směrodatných odchylek, vlastní tvorba

V bakalářské práci [24], kde byl sledován vliv pojiv na bázi popílků či vysokopecních strusek na vlastnosti cementových malt, nedosáhl žádný ze vzorků vyšších hodnot objemové hmotnosti než vzorek referenční. V tomto případě lze ale pozorovat, že beton s označením N2, a především pak N3, měl objemovou hmotnost po celou dobu zrání vyšší. Jedná se o betony, které obsahovaly fluidní popílek z teplárny Kladno. To nepotvrzuje zjištění Heikala a kol. [77], kteří tvrdí, že popílek snižuje objemovou hmotnost oproti referenčnímu betonu. Dále byl potvrzen všeobecný fakt, že se při zastoupení vysokopecní strusky a popílků ve směsi zvyšuje objemová hmotnost v průběhu vytvrzování. To je způsobeno postupným vyplňováním pórů sekundárním C-S-H gelem, který vzniká vlivem reakce popílků či strusky s portlanditem. Tento jev je blíže specifikován v podkapitole „2.4 Úloha portlanditu“. Výjimkou jsou v tomto případě

vzorky N1 a M, kde se po 28 dnech zraní objemová hmotnost snížila. Pokles objemové hmotnosti je v těchto případech v rámci rozsáhlé směrodatné odchylky, která mohla být způsobena špatným otřením vzorku během vážení. Betony N1 a M, tedy s obsahem vysokopecní strusky mají naopak nižší objemovou hmotnost než referenční beton. Tento jev tedy nepotvrzuje vývoj u práce Hanzálka [79] a Khalila s Abd-El-Hameedem [80]. Zajímavostí je poměrně velké snížení objemové hmotnosti oproti referenčnímu betonu u betonu s označením M, kde bylo nahrazeno kamenivo frakce 8/16 mm ocelářskou struskou.

### 7.1.2 POVRCHOVÁ NASÁKAVOST

Zkouška povrchové nasákavosti byla prováděna dle „5.2.2 Povrchová nasákavost“. Výsledná hodnota byla získána aritmetickým průměrem ze tří zkušebních těles stejného složení. Směrodatné odchylky nejsou na *obrázku 45* zahrnuty z důvodu jeho přehlednosti.



Obrázek 45 – povrchová nasákavost betonových vzorků, vlastní tvorba

Nejlepší hodnoty povrchové nasákavosti po 1440 minutách, resp. o 12 % nižší než beton referenční, měl beton s označením M. To bylo pravděpodobně způsobeno náhradou přírodního kameniva frakce 8/16 mm za ocelářskou strusku, neboť beton N1, který obsahoval taktéž vysokopecní strusku EcoCoal z 25 % pojivové hmotnosti, měl horší hodnoty než beton referenční. Naopak nejhůře dopadl beton N3, kde byl cement nahrazen z 25 % hmotnosti kombinací fluidního popílku, vysokopecní strusky a cementu. V tomto případě došlo ve srovnání s referenčním betonem ke zvýšení povrchové nasákavosti o 32 %. Na základě

získaných dat lze souhlasit s tvrzením Bayqry a kol. [76] a Sun a kol. [86], kteří se shodují na tom, že popílek zvyšuje nasákavost i přesto, že u betonu N2 došlo k jejímu snížení pouze o 4 %. Souhlasit ale úplně nelze s poznatky Debouchy [84] a kol. a Aghaeipoura a kol. [85], kteří tvrdí, že v případě nahrazení části cementu vysokopecní struskou dochází ke snížení nasákavosti.

### 7.1.3 MIKROSKOPICKÁ ANALÝZA

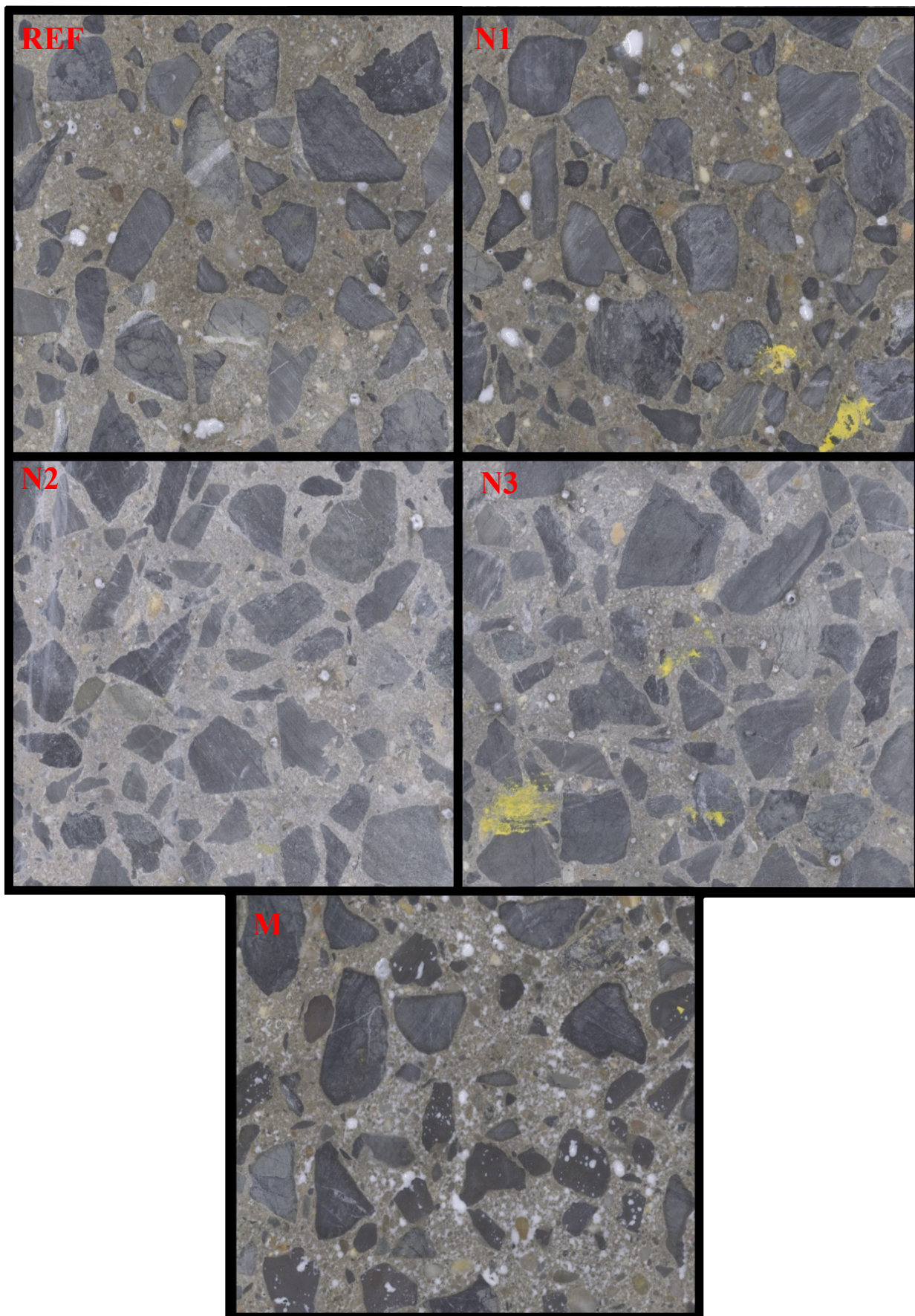
V rámci výroby navržených betonových směsí byla použita provzdušňovací přísada PORALAN STA. Jedná se tedy o záměrně provzdušněné betony, které jsou vzhledem k vyšší odolnosti proti působení vody a CHRL nutností pro cementobetonové vozovky. Záměrně provzdušněný beton má mít dle ČSN EN 480-11 [108] obsah vzduchu v pórech do průměru 300 mikronů větší než 1,5 %. Při pohledu na *tabulku 22* je zcela zřejmé, že všechny vyrobené betony toto kritérium splňují. Na *obrázku 46* jsou pak zobrazeny snímky jednotlivých betonových vzorků z optického stereo mikroskopu při zvětšení 3,5×, kde je možné pozorovat množství vzduchových pórů, které vynikly použitím titanové běloby (bílá barva).

*Tabulka 22 – pórovitost vyrobených betonů, vlastní tvorba*

Označení betonu	REF	N1	N2	N3	M
Pórovitost [%]	1,50	6,20	1,85	4,14	9,76

Množství vzduchových pórů v betonu je velmi ovlivněno konzistencí betonové směsi. Čím měla betonová směs lepší zpracovatelnost, tím více se v ni udrželo vzduchu. Nejvyšší sednutí kužele měla při výrobě betonová směs s označením M, která je i nejvíce porézní. Nejnižší sednutí pak směs N2, která má společně s referenční směsí výrazně nižší hodnotu pórovitosti než ostatní směsi. Obecně lze konstatovat, že při nahrazení cementu mletou vysokopecní struskou (N1, N3 a M) dochází k výraznému zvýšení pórovitosti oproti referenční směsi. To je, ale nejspíše ovlivněno zmíněnou lepší zpracovatelností. Naopak u betonové směsi s fluidním popílkem (N2) i přesto, že měla nejvyšší vodní součinitel, kdy se množství záměsové vody zvýšilo téměř o 50 % oproti směsi N1, se nezvýšila nijak výrazně pórovitost oproti referenční směsi. Zjištěné hodnoty pórovitosti odpovídají i objemovým hmotnostem, které zmiňovala podkapitola „7.1.1 Objemová hmotnost“. Čím byla vyšší pórovitost, tím byla nižší objemová hmotnost. Výjimkou je však referenční směs, která měla nejnižší hodnotu pórovitosti, a jednu z nejnižších objemových hmotností. V tomto případě je ale potřeba vzít v úvahu, že mikroskopická analýza byla provedena pouze na jednom řezu.

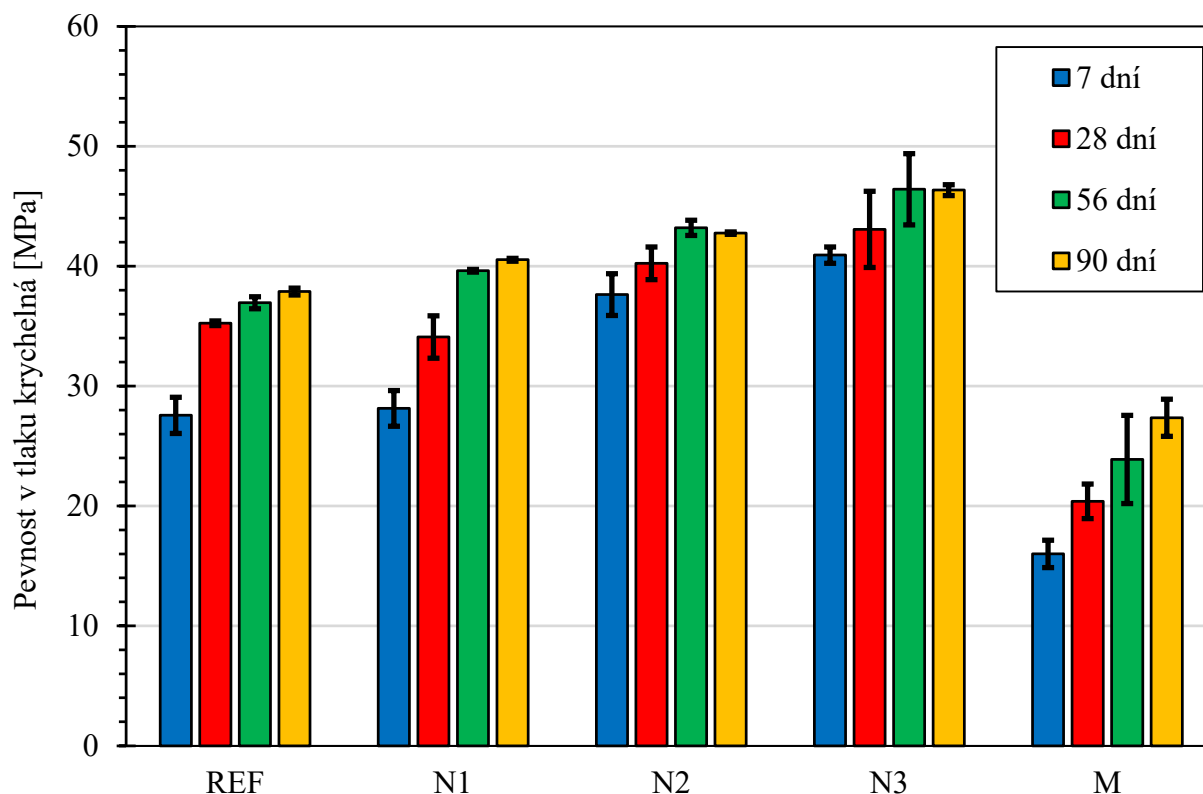




Obrázek 46 – snímky vyrobených betonů z optického stereo mikroskopu, vlastní tvorba

#### 7.1.4 PEVNOST V TLAKU

Jednoosá tlaková zkouška byla provedena na třech vzorcích od každé betonové směsi. V případě, že se hodnota pevnosti v tlaku lišila v rámci jedné směsi o více než 20 % od zbylých dvou hodnot, tak nebyla ve výpočtu uvažována. Výslednou hodnotou pevnosti v tlaku je aritmetický průměr, přičemž tyto hodnoty společně se směrodatnými odchylkami byly zaneseny do následujícího obrázku.



Obrázek 47 – krychlená pevnost v tlaku vyrobených betonů po dobu 90 dní zrání, vč. vynesení směrodatných odchylek, vlastní tvorba

Z obrázku 47 je zcela zřejmé, že nahrazení části cementu z 25 % hmotnosti mělo pozitivní dopad na pevnost v tlaku. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tlaku po celou dobu zrání lze pozorovat u vzorku N3, kde byl nahrazen cement kombinací fluidního popílku, vysokopecní strusky a cementu. Naopak nejnižší pevnost v tlaku po celou dobu zrání lze sledovat u vzorku M, kde došlo společně s nahrazením cementu vysokopecní struskou také k nahrazení celé frakce kameniva 8/16 mm ocelářskou struskou. Příčina této nižší pevnosti může být spojena právě s použitím umělého kameniva 8/16, neboť u vzorku N1, kde došlo k nahrazení cementu stejným typem vysokopecní strusky EcoCoal jsou výsledky o poznání lepší. Dále si nelze nevšimnout, že u všech vzorků kromě referenčního, lze pozorovat vyšší nárůsty pevností po 56 dnech zrání.

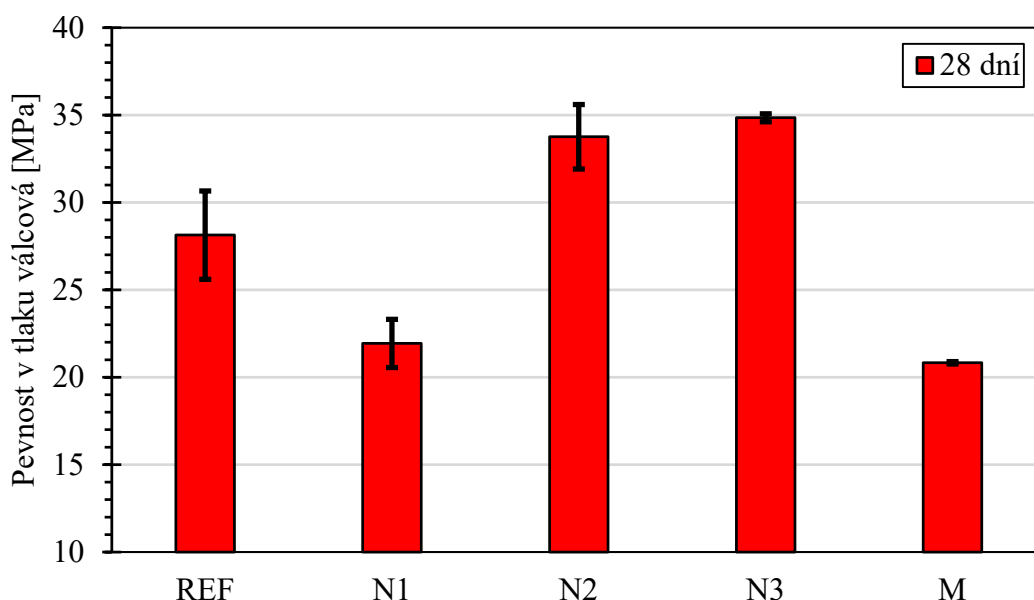
Důvodem je reakce strusky a popílků s portlanditem, čímž dochází ke vzniku sekundárního C–S–H gelu. Tento sekundární C–S–H gel vzniká po delší době vytvrzování a po delší dobu, což je zásadní výhodou použití těchto alternativních pojiv.

Nežerka a kol. [109] se ve své práci zabývali vlivem minerálních příměsí na mezifázovou přechodovou zónu (ITZ – interfacial transition zone). Jedná se o oblast přechodu mezi kamenivem a cementovou matricí betonu. Tato zóna sehrává klíčovou roli ve strukturálním výkonu betonu a výrazně ovlivňuje jak tahovou, tak i tlakovou pevnost. ITZ, která je považována za nejslabší článek výkonu betonu, má zvláštní význam v kontextu lomového chování. První trhliny se objevují poblíž kameniva (agregátů), což zdůrazňuje důležitost porozumění a redukce negativního vlivu ITZ na trvanlivost betonu. Výsledky ukazují, že použití minerálních příměsí k částečnému nahrazení cementu může zlepšit ITZ snížením její tloušťky a zvýšením její pevnosti. Křemičitý úlet byl identifikován jako účinnější při snižování tloušťky ITZ, zatímco úletový popílek byl účinnější při posilování ITZ. Materiály na bázi popílků zlepšují ITZ prostřednictvím pucolánové reakce, která má za následek vyplňování nadměrných pórů sekundárními hydratačními produkty. Závěrem autorů je, že pro dosažení co nejlepších výsledků, je optimální portlandský cement nahradit těmito materiály z 10 – 20 % hmotnosti. Tyto zjištění proto mohou být důvodem vyšších pevností v tlaku u navržených betonů, kde byl z části nahrazen portlandský cement zmíněnými alternativními pojivy.

Z *tabulky 21* a *obrázku 47* je dále zcela očividný vliv množství záměsové vody, tudíž zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi na výsledné pevnosti v tlaku. Platí zde vztah, že se zlepšující se zpracovatelností (vyšší sednutí) dochází ke zhoršení mechanických vlastností betonu. Navržené betony byly vyrobeny na stupeň konzistence S1, pro který platí rozptyl hodnot sednutí 10 – 40 mm). Nejvyššího sednutí kužele při výrobě betonových směsí bylo dosaženo u směsi M, která má nejnižší hodnoty krychelné i válcové pevnosti v tlaku po celou dobu zrání. Nejnižší sednutí bylo zaznamenáno u betonových směsí s označením N3 a N2, které dopadli v rámci zkoušky pevnosti v tlaku nejlépe. Výsledky tlakové zkoušky lze také odůvodnit pomocí výsledných pórovitostí ztvrdlého betonu, které jsou uvedeny v podkapitole „7.1.3 Mikroskopická analýza“. Platí, že vyšší obsah vzduchu ve struktuře betonu zhoršuje mechanické vlastnosti betonu.

V pracích Slánského a kol. [5; 34] lze pozorovat, že při využití vysokopecní strusky k nahrazení části cementu dochází ke snížení počátečních pevností. V této práci však tento trend pozorovat úplně nelze, neboť beton N1 má po 7 dnech krychlenou pevnost v tlaku srovnatelnou s betonem

REF a u betonu M pravděpodobně není nižší počáteční pevnost způsobena použitím dané vysokopecní strusky, což bylo zmíněno již výše. Pro posouzení počátečních pevností je nutné tlakové zkoušky provádět dříve než po 7 dnech zrání. S čím jde naopak souhlasit je, že substituce cementu mletou granulovanou vysokopecní struskou zlepšuje mechanické vlastnosti betonu. Úspěšná byla z hlediska mechanických vlastností i substituce části cementu fluidním popílkem. Proto nelze souhlasit s Orhanem a kol. [88] a Sunem a kol. [86], neboť v jejich pracích měly všechny vzorky s popílkem nižší tlakové pevnosti než vzorek referenční. Nicméně v práci Suna a kol. [86] lze pozorovat obrovské expanze pevností po 28 dnech zrání, což je způsobené již několikrát zmíněnou pucolánovou reakcí. Autoři práce se domnívají, že po delší době vytvrzování budou tlakové pevnosti vyšší.

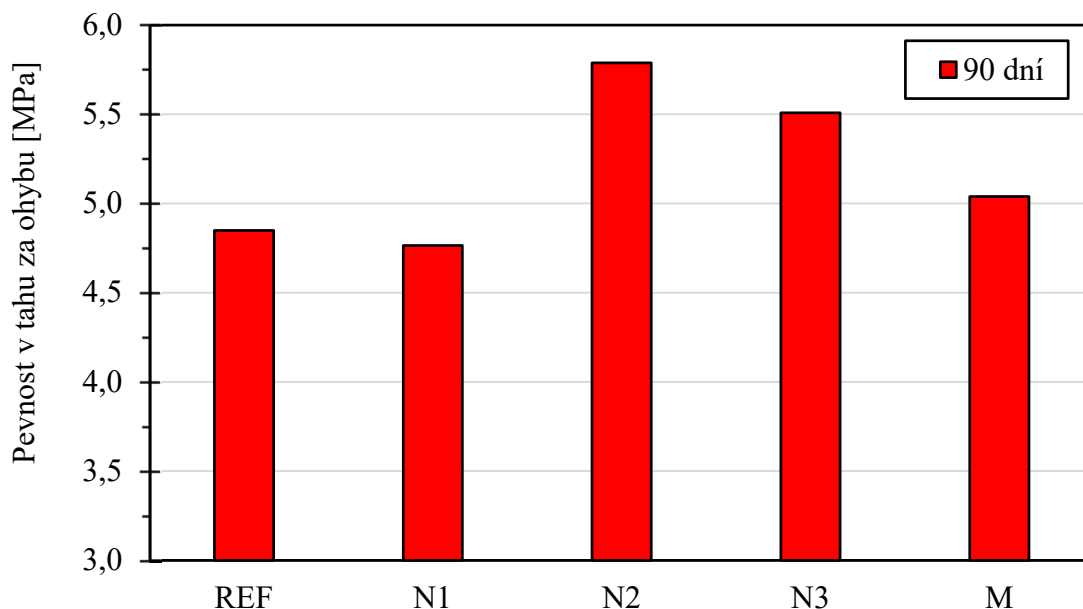


Obrázek 48 - válcová pevnost v tlaku vyrobených betonů po 28 dnech zrání, vč. vynesných směrodatných odchylek, vlastní tvorba

Výsledky tlakové zkoušky provedené na válcích, které jsou zobrazeny na obrázku 48, odpovídají těm stanoveným na krychlích. Jediným rozdílem je zde nižší pevnost betonu N1 oproti referenčnímu betonu, přičemž krychelné pevnosti byly srovnatelné. Nelze tak na základě dosažených výsledků souhlasit se Slánským a kol. [5], v jejichž práci lze pozorovat, že betonové vzorky s obsahem vysokopecní strusky mají válcovou pevnost vyšší než beton referenční.

### 7.1.5 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

Výsledné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech vytvrzování ve vodní lázni, které byly získány pomocí zkoušky se čtyřbodovým uspořádáním, jsou zobrazeny na *obrázku 49*.



*Obrázek 49 – pevnost v tahu za ohybu vyrobených betonů po 90 dnech zrání, vlastní tvorba*

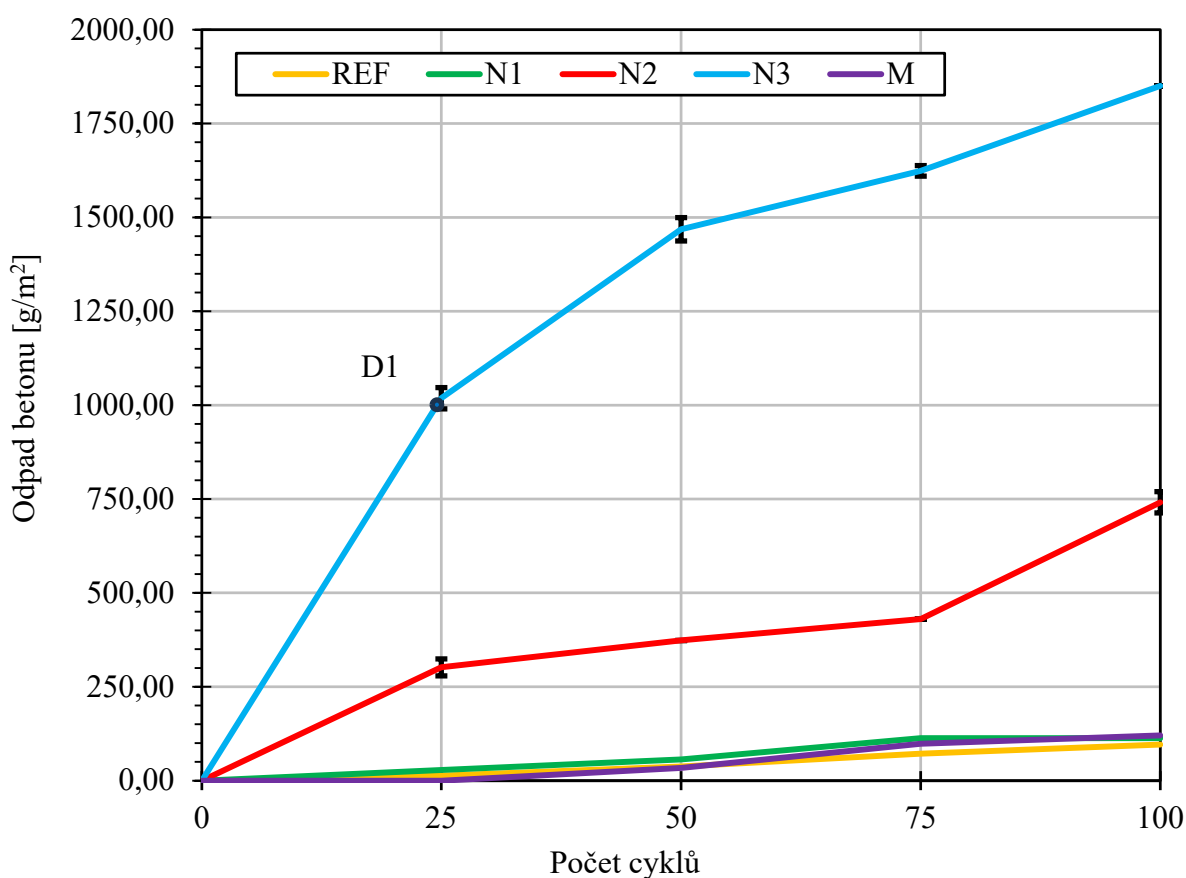
Z *obrázku 49* je zcela zřejmé, že nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu za ohybu dosáhl po 90 dnech zrání beton s označením N2, tedy s fluidním popílkem. Naopak nejnižší beton s označením N1, což je beton s vysokopecní struskou EcoCoal. Z výsledků dále vyplývá, že fluidní popílek, který byl součástí betonů s označením N2 a N3 má lepší vliv na pevnost v tahu za ohybu než vysokopecní struska (N1 a M). Zajímavostí je poměrně vysoká pevnost v tahu za ohybu u betonu s označením M, který mimo vysokopecní strusku EcoCoal obsahoval také struskové kamenivo frakce 8/16 mm. Tento beton byl totiž, co se tlakové pevnosti týče o dost horší než ostatní vyrobené betony. Podobně jako u pevnosti v tlaku i zde platí, že většina vyrobených vozovkových betonů dosáhla vyšších hodnot pevnosti v tahu za ohybu než beton referenční. To může být způsobeno pozitivním dopadem těchto alternativních pojiv na ITZ, což bylo podrobněji specifikováno v předchozí podkapitole.

V pracích Orhana a kol. [88] a Samada a kol. [89] lze shodně pozorovat, že betony s obsahem granulované mleté vysokopecní strusky mají lepší vliv na pevnost v tahu za ohybu než úletový popílek. V případě použití vysokopecní strusky k částečnému nahrazení cementu (20 – 40 % hm.), se pevnost v tahu za ohybu pohybovala nad úrovní referenčního betonu, což v mém případě platilo jen u směsi M a pak částečně u směsi N3, ale tam bylo větší zastoupení fluidního

popílku než vysokopeční strusky. Naopak v pracích zmíněných autorů lze pozorovat snížení pevnosti v tahu za ohybu při použití fluidního popílku oproti referenčnímu betonu. To v mém případě neplatilo a došlo k navýšení této pevnosti oproti REF betonu o více než 18 %.

### 7.1.6 ODOLNOST BETONU PROTI PŮSOBENÍ VODY A CHEMICKÝCH ROZMRAZOVACÍCH LÁTEK

Zkouška odolnosti betonu byla provedena dle podkapitoly „6.2.5 Odolnost povrchu betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám“. Na následujícím grafu je znázorněno množství generovaného odpadu při zkoušce odolnosti do 100 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů.



Obrázek 50 – odolnost vyrobených betonů proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám, vlastní tvorba

Z předchozího grafu je zcela zřejmé, že betonové vzorky s označením REF, N1 a M generovaly během 100 zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů velmi nízký odpad do 100 g/m<sup>2</sup>, a lze je tak označit jako velmi odolné proti chemickým rozmrazovacím látkám a působení vody. To lze přičíst zejména použití provzdušňovací přísady s názvem PORALAN STA, který vytváří malé

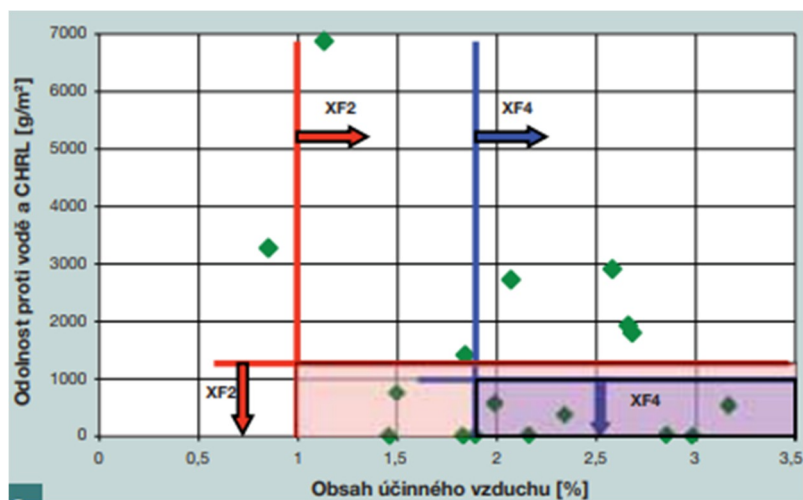
vzduchové póry, jenž zvyšují odolnost vůči mrazu a působení chemických rozmrazovacích prostředků. Zároveň lze potvrdit, že vysokopecní struska EcoCoal, která byla součástí směsi N1 a M neměla negativní vliv na tuto odolnost. Tím se zjištěné výsledky úplně neshodují s poznatky Slánského a kol. [5], kdy lze sledovat, že použitím vysokopecní strusky došlo ke zvýšení množství odpadu oproti referenční směsi zhruba o 50 %. V mém případě došlo ke snížení odolnosti pouze zhruba o 15 %.

V případě směsi s označením N2 už lze sledovat pořad relativně nízké množství generovaného odpadu. V této směsi došlo k nahrazení cementu ze 25 % hmotnosti fluidním popílkem z teplárny Kladno. Množství generovaného odpadu je po celých 100 cyklů menší než  $1000 \text{ g/m}^2$  (součinitel odolnosti D1), což je kritérium uváděné pro odolný beton proti CHRL. Zároveň je množství odpadu nižší než doporučená hodnota normy ČSN P 73 2404 [98], tj. po 75 cyklech  $1250 \text{ g/m}^2$  a lze tak i tuto směs považovat za odolnou proti chemickým rozmrazovacím látkám. V tomto případě lze souhlasit též s Ondovou a kol. [90] a Nowakem-Michtou [91], že v případě částečného nahrazení cementu popílkem dochází ke snížení odolnosti betonů proti CHRL.

Největší množství generovaného odpadu lze sledovat u směsi s označením N3, tedy u směsi, kdy byla část cementu nahrazena kombinací fluidního popílku, vysokopecní strusky a cementu. Při pohledu na výsledky zkoušky povrchové nasákavosti uvedené v podkapitole „7.1.2 Povrchová nasákavost“ je patrná její závislost na výsledky zkoušky odolnosti, kdy tato směs dopadla nejhůře. Tato směs nesplňuje požadavky zmíněné v předchozím odstavci a z důvodu nízké odolnosti proti CHRL není použitelná v praxi. Stanislav Bedřich vyráběl betonové směsi obdobného složení, kde nahrazoval část cementu kombinací fluidního popílku z teplárny Kladno a vysokopecní strusky z Kladna v poměru 50:50. Množství generovaného odpadu bylo ještě vyšší než v případě směsi s označením N3, z čehož lze soudit, že tyto horší hodnoty budou pravděpodobně spojeny s nižší odolností vysokopecní strusky z Kladna proti CHRL, neboť směs N2 s obsahem pouze fluidního popílku měla hodnoty dobré.

Coufal [110] ve své práci posuzoval vliv obsahu účinného vzduchu na odolnost proti vodě a CHRL (*obrázek 51*). Dle autora je obsah účinného vzduchu důležitým pro vyhodnocení kvality provzdušnění. Dále však autor podotýká, že závislost zobrazená na *obrázku 51*, platí zejména pro betony stejného složení, kde lze poměrně úspěšně porovnat např. vliv různých provzdušňovacích přísad. Hodnoty obsahu účinného vzduchu a rozložení vzduchových pórů jsou tak velmi závislé na konkrétním složení betonu, kdy je především důležité množství jemných podílů. Při pohledu na *tabulku 22*, která znázorňuje obsah vzduchu ve ztvrdlých

betonech je zcela zřejmé, že u všech betonů kromě betonu REF, byl takový obsah vzduchu, že je dle závislosti zobrazené na *obrázku 51* odolný proti působení vody a CHRL, tedy prostředí XF4. Na straně druhé, beton s označením N3 i přes vhodný obsah vzduchu nesplňuje kritérium odolnosti proti vodě a CHRL, což tedy nebude problém v obsahu vzduchu, ale spíše v materiálovém složení.



*Obrázek 51 – závislost odolnosti proti vodě a CHRL na obsahu účinného vzduchu, převzato z [110]*



## 7.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Tato podkapitola vyhodnocuje dosažené výsledky z experimentální části práce, jež byly detailně prezentovány v předchozích kapitolách. Hlavním cílem je popis a shrnutí materiálových vlastností navržených betonů s důrazem na jejich pevnost a trvanlivost.

Co se pevností týče, tak nejlépe dopadl beton s označením N3. Jednalo se o vozovkový beton, ve kterém byl nahrazen portlandský cement z 25 % hmotnosti kombinací fluidního popílku, vysokopecní strusky a cementu. O moc hůře na tom nebyl beton s označením N2, kde došlo k nahrazení části portlandského cementu fluidním popílkem. Tento fluidní popílek byl součástí též betonu N3, tudíž lze konstatovat, že jeho využití mělo pozitivní dopad na pevnost betonu. Betony N2 a N3 splňují pevnostní požadavky technické normy ČSN EN 13877-1 [22] a z pevnostního hlediska je lze využít jako vozovkový beton pro cementobetonový kryt skupiny CB I. Beton s označením N1, kde byl portlandský cement nahrazen z 25 % hmotnosti vysokopecní struskou EcoCoal, dopadl o něco hůře než beton referenční, což byl beton běžně používaného složení pro vozovkový beton. Stejný typ vysokopecní strusky byl dále použit ve směsi s označením M, kde byla kromě části cementu substituována frakce kameniva 8/16 mm ocelářskou struskou. Tento beton dopadl z pevnostního hlediska nejhůře. Substituce části cementu vysokopecní struskou neměla stejný efekt jako substituce fluidním popílkem, a navržené betony nesplňují požadavky výše zmíněné normy na cementobetonový kryt skupiny CB I. Beton s označením N1 lze na základě dosažených 28denních pevností využít jako vozovkový beton pro cementobetonový kryt skupiny CB III.

Trvanlivost či odolnost navržených vozovkových betonů byla stanovena pomocí zkoušky odolnosti proti působení vody a CHRL. Tato odolnost je u vozovkových betonů klíčová, neboť se vyskytují ve velmi agresivním vnějším prostředí. V tomto případě došlo ke snížení odolnosti u všech navržených vozovkových betonů oproti referenčnímu (kontrolnímu betonu). U betonů s označením N1 a M, tedy u těch, kde byl portlandský cement nahrazen z 25 % hmotnosti vysokopecní struskou EcoCoal bylo snížení odolnosti velmi nízké, téměř zanedbatelné. V případě betonu N2 (fluidní popílek) bylo už snížení odolnosti patrné, ale stále v rámci požadavků technických norem ČSN EN 13877-1 [22] a ČSN P 73 2404 [98]. Největší snížení odolnosti šlo ale pozorovat u betonu s označením N3. Množství generovaného odpadu po zkoušce odolnosti už bylo velmi vysoké a vzhledem ke zmíněným technickým předpisům již nelze tento vozovkový beton použít.

Vzhledem k tomu, co je uvedeno v předchozích dvou odstavcích, lze za technicky nejlepší variantu navržených vozovkových betonů označit beton N2, tedy beton, kde byl cement z 25 % hmotnosti nahrazen fluidním popílkem z teplárny Kladno. Je však důležité zmínit, že využití alternativních pojiv do vozovkových betonů skupiny CB I neumožňují naprosto bezdůvodně české technické předpisy, což bylo podrobně popsáno v kapitole „3 Alternativní typy pojiv pro cementobetonové kryty“.

## ČÁST III – EKONOMICKÁ ČÁST

Ekonomická část práce se zabývá stanovením nákladové výrobní ceny navržených betonových směsí pro cementobetonové kryty ve fiktivní betonárně. Cílem je stanovit vliv uplatnění fluidního popílku a vysokopecní strusky v betonech na konečnou cenu vozovkových betonů. Nákladová výrobní cena navržených betonových směsí bude kalkulována dle kalkulačního vzorce, jehož sktruktura je uvedena v kapitole „8 Kalkulační členění nákladů“. Konečná cena cementobetonového krytu vozovky bude stanovena prostřednictvím softwaru KROS 4.

## 8 KALKULAČNÍ ČLENĚNÍ NÁKLADŮ

Členění nákladů obvykle podléhá určitým schématům, označovaným též jako kalkulační vzorec. Struktura nákladových složek není stanovená pevně a často se upravuje v závislosti na potřebách vnitropodnikového řízení dané firmy. Kalkulační členění nákladů pak představuje detailnější rozdělení mezi přímými a nepřímými náklady. Kalkulační vzorec, který se používá k vyčíslení nákladů na jednotlivé stavební práce nebo konstrukce je zobrazen na *obrázku 52* [111].



Obrázek 52 – kalkulační vzorec, vlastní úprava z [111]

### 8.1 PŘÍMÝ MATERIÁL

Přímý materiál zahrnuje suroviny a materiály, které jsou přímo vloženy do výrobních či jiných procesů a jejichž spotřebu lze přesně stanovit na kalkulační jednotici. Mezi přímý materiál patří:

- **materiál vstupující do výkonu:** suroviny a materiály, které jsou integrovány do procesu výroby a stávají se jeho pevnou součástí,
- **materiál přispívající k vlastnostem výkonu:** materiály, které přispívají k vytvoření požadovaných vlastností výkonu, i když samy o sobě nejsou jeho součástí,
- **materiál nezbytný k realizaci výkonu:** materiály, které sice nejsou samotnou součástí výkonu, ale jsou nezbytné k jeho provedení nebo jejichž spotřeba umožňuje technologický proces,

- **výrobní obaly:** pokud jsou neodmyslitelnou součástí výrobků nebo jsou běžnou součástí, zahrnují se do přímého materiálu. Tyto obaly jsou klíčové pro balení výrobků a zároveň jsou součástí odbytového výkonu [111].

## 8.2 PŘÍMÉ MZDY

Přímé mzdy zahrnují mzdy, které jsou začleněny do nákladů a vždy zahrnují i další osobní náklady přímo spojené s provedením výkonu, jež lze přesně stanovit na kalkulační jednici. Lze je rozdělit na:

- **mzdy výrobních či provozních dělníků:** odměny pro pracovníky výroby nebo provozu za odpracovaný čas nebo splněnou práci, přičemž je možné jednoznačně identifikovat, jaký podíl těchto mzdových nákladů připadá na kalkulační jednici,
- **mzdy ostatních pracovníků s přímým vztahem k výrobnímu nebo jinému procesu:** mzdy dalších pracovníků, kteří mají přímý vztah k výrobnímu nebo jinému procesu a jejichž odměna lze přesně stanovit na kalkulační jednici. Sem patří základní mzdy (podle úkolu nebo času), příplatky a doplátky ke mzdě, prémie a odměny, pokud jsou přímo spojeny s kalkulovaným výkonem [111].

## 8.3 NÁKLADY NA PROVOZ STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Tato část ceny zahrnuje všechny náklady, které zhotovitel nebo výrobce vynakládá na zajištění nezbytných strojů a mechanismů pro vykonání konkrétních prací. Je však důležité zdůraznit, že v rámci dostupných podkladů tato cenová složka představuje nejistotu, neboť údaje o spotřebě času strojů při provedení specifických prací nejsou vždy dostupné a pomocné údaje jsou často zastaralé. V současné době se stále používají strojhodiny uvedené ve sbornících potřeb a nákladů. Je však nutné zdůraznit, že tyto strojhodiny mohou být zkresleny v důsledku různých přepočtů provedených v historických cenových představách a často zastaralými typy strojů. Přestože nejsou tyto údaje dostatečně aktuální, tak mohou poskytnout alespoň jistý limit nákladů na stroje a umožňují alespoň částečnou optimalizaci ceny [112]. Sazba strojhodiny většinou zahrnuje podíl odpisů stroje, podíl nákladů na opravy, podíl nákladů na přemístění stroje po staveništi, podíl nákladů na převozy na jiné stavby či k opravám, podíl nákladů na montáže a demontáže, náklady na mzdy obsluhy a náklady na provozní hmoty [111].

## 8.4 OSTATNÍ PŘÍMÉ NÁKLADY

Ostatní přímé náklady zahrnují ty výdaje, které lze stanovit na konkrétní kalkulační jednici a nejsou obsaženy v přechozích složkách nákladů. Mezi ostatní přímé náklady patří zejména dva hlavní typy nákladů, a to:

- náklady spojené s vnitrostaveništní přepravou materiálu,
- náklady na zdravotní a sociální pojištění: 34 % ze mzdy zaměstnanců [112].

## 8.5 VÝROBNÍ REŽIE

Do výrobní režie patří všechny časově odlišené prvotní a druhotné náklady, které jsou spojené s řízením výrobního procesu. Patří sem činnosti a služby režijního charakteru, kde není možné náklady přímo alokovat na kalkulační jednici či na jednotlivou položku v soupisu prací. Tyto náklady jsou pak přiřazeny k celému stavebnímu objektu, resp. k celému objemu výroby. Do výrobní režie patří zejména tyto náklady:

- nemovitosti a vybavení: odpisy majetku režijního charakteru,
- spotřeba materiálu: zahrnuje náklady spojené s odpisy, opravou a údržbou drobného majetku režijního výrobního charakteru, který je zařazen do provozu a nachází se ve vlastnictví prostředí výroby,
- přepravné a nájem: objednaná či vlastní režijní doprava zaměstnanců při služebních cestách,
- provozní náklady režijního charakteru: patří sem náklady na ochranu a dohled nad výrobním objektem, poplatky za telefon, likvidaci odpadu a také náklady nebo odpisy spojené s pronájmem či vlastnictvím počítačů a informační technologie,
- technické náklady výroby: zkoušky betonu, atestace zařízení, kontroly jakosti materiálů atd.,
- sociální příspěvky: příspěvek na obědy zaměstnanců, zajištění pitného režimu (voda, čaj), zdravotní služby apod.,
- spotřeba energie a vody,
- oprava a údržba majetku [113].

Výše výrobní režie je obvykle stanovena pomocí přírážkové kalkulace prostřednictvím režijních přírážek, sazeb a koeficientů. Ke kalkulaci lze také využít skutečné náklady z minulých let, přičemž se musí brát v úvahu i změny v předpokládaném období, které podléhá kalkulaci [111].

## **8.6 SPRÁVNÍ REŽIE**

Tato část kalkulačního vzorce zahrnuje všechny náklady spojené s řízením a správou firmy na úrovni top managementu a s útvary poskytujícími správní a technický servis pro výrobní a nevýrobní činnosti společnosti. Spadají sem jak prvotní, tak i druhotné náklady, které jsou časově rozlišené [113]. Výpočet správní režie bývá typicky proveden pomocí metody přírážkové kalkulace, kdy se nejčastěji využívají režijní přírážky, sazby a koeficienty. Alternativní přístup zahrnuje odhad nákladů na základě skutečných dat z minulých let, s ohledem na plánované změny v období, pro které se náklady kalkulují. Jinou možností je také využití rozpočtů pro budoucí režijní náklady při provádění kalkulací [111].

## **8.7 PODDODÁVKY**

V této části kalkulačního vzorce jsou promítnuty náklady spojené s prací poddodavatelů, které jsou spočteny na konkrétní kalkulační jednici zhotovovacích prací na daném projektu. Jedná se především o tyto náklady:

- přímé náklady subdodavatele včetně prováděných zkoušek,
- režijní náklady a zisk subdodavatele,
- náklady zhotovitele na zajištění úplnosti subdodávky [113].

## **8.8 ZISK**

Výše zisku, který je započítán do kalkulace cen stavebních prací, je jedním z klíčových parametrů, jehož výši si stanovuje každý zhotovitel podle svých vlastních potřeb a strategie firmy na trhu. Ačkoliv není nikde stanoveno, jak vysoko smí zisk stoupat, zákon č. 526/90 Sb. O cenách ve znění pozdějších předpisů se dotýká pojmu „nepřiměřený zisk“, aniž by však specifikoval konkrétní čísla. Z tohoto důvodu je velmi složité stanovit, co je a co není nepřiměřený zisk. Základem pro výpočet zisku jsou přímé mzdy, náklady na stroje, ostatní přímé náklady a režijní náklady, tedy tzv. zpracovací náklady. V praxi je ale zcela běžné kalkulovat zisk z celkových nákladů, tj. z přímých a nepřímých nákladů [112].

## 9 POPIS UVAŽOVANÉ BETONÁRNY

Pro ekonomické posouzení vyrobených betonových směsí bude uvažována betonárna v Praze. Rozsah a princip fungování betonárny bude vycházet z konzultace s existující betonárnou, která po vzájemné dohodě nebude v této práci zmíněna. Jedná se o betonárnu, která prošla kompletní rekonstrukcí v období 2018 – 2020. Vlastníkem betonárny je skupina, která vlastní v České republice více než 60 betonáren. V práci bude uvažována betonárna věžového typu s kapacitou výroby 90 m<sup>3</sup>/hod. Jedná se o velmi rozsáhlou a moderní betonárnu s roční produkcí betonu kolem 80 000 – 100 000 m<sup>3</sup>. V této práci bude uvažována spodní hranice roční produkce, tedy 80 000 m<sup>3</sup>. Tato betonárna je dále vybavena kotelnou, která umožňuje ohřev záměsové vody a kameniva v zimním období, tudíž jde o betonárnu s celoročním provozem. Betonárna má k dispozici několik autodomíchávačů a sklápěcích vozů, které jsou ale samostatnou organizační jednotkou a nemají vliv na provoz betonárny. Z tohoto důvodu nebudou v kalkulaci uvažovány.

### 9.1 PRINCIP VÝROBY BETONOVÝCH SMĚSÍ

V této podkapitole je zjednodušeně popsána výroba betonové směsi v uvažované betonárně, která je rozdělena do čtyř fází:

1. **Příprava složek betonu** - kamenivo je od prodejce prostřednictvím nákladních aut dopraveno do prostorů betonárny, kde je uloženo ve skladovacím dvoře. Ve skladovacím dvoře je kamenivo rozděleno podle jednotlivých frakcí a připraveno pro následnou manipulaci. Sypké hmoty, resp. cement a příměsi jsou dopraveny od prodejců pomocí cisteren s nosností 30 tun a v betonárně jsou uloženy do ukládacích sil. Voda a kapalně přísady jsou v betonárně uskladněny v nádržích. Voda je do nádrží nejčastěji přiváděna přímo z vodovodního řádu, ale některé spíše menší betonárny mají k dispozici vlastní studny, ze kterých vodu čerpají.
2. **Přeprava složek betonu** - jednotlivé frakce kameniva jsou přepravovány prostřednictvím kolových nakladačů do zásobníků, kde dochází zároveň k jeho vážení. Ze zásobníků je pak kamenivo pomocí dopravníků dopraveno do násypky kameniva, kde dochází k dalšímu vážení. Podle určených hmotnostních hodnot se pod odpovídajícím práškovým sílem spustí šnekový dopravník, který dopravuje cement či příměs do násypky určenou k dávkování cementu a příměsi. Voda a kapalně přísady jsou prostřednictvím čerpadel přivedeny do malých nádrží, kde dochází k vážení.



3. **Míchání betonu** - celá výroba betonových směsí je řízena automaticky prostřednictvím řídicího systému, který obsluhuje „míchač“, který je zároveň i dispečerem. Řídicí systém podle požadované receptury vykládá postupně jednotlivé násypky do mísicího zařízení a míchá směs podle nastavené doby míchání. Tento pracovník dále kontroluje prostřednictvím soustavy několika čidel chod jednotlivých úseků.
4. **Vykládání hotové betonové směsi** - v okamžiku dokončení míchání dochází k otevření výsypných dvířek pod mísicím zařízením, přes které se vykládá betonová směs do již připravených autodomíchačů či jiných přepravních vozů.

Zmíněné fáze v předchozích odstavcích jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obrázek 53 – fáze výroby betonové směsi, vlastní tvorba

# 10 KALKULACE CENY NAVRŽENÝCH BETONOVÝCH SMĚSÍ

Výrobní náklady vyrobených variant betonových směsí byly vyčísleny dle kalkulačního vzorce, který je uveden na *obrázku 52*. Jednotlivé ceny uvedené v této kapitole byly získány během několika konzultací s betonáři a jsou bez DPH.

## 10.1 PŘÍMÉ NÁKLADY

### 10.1.1 MATERIÁL (H)

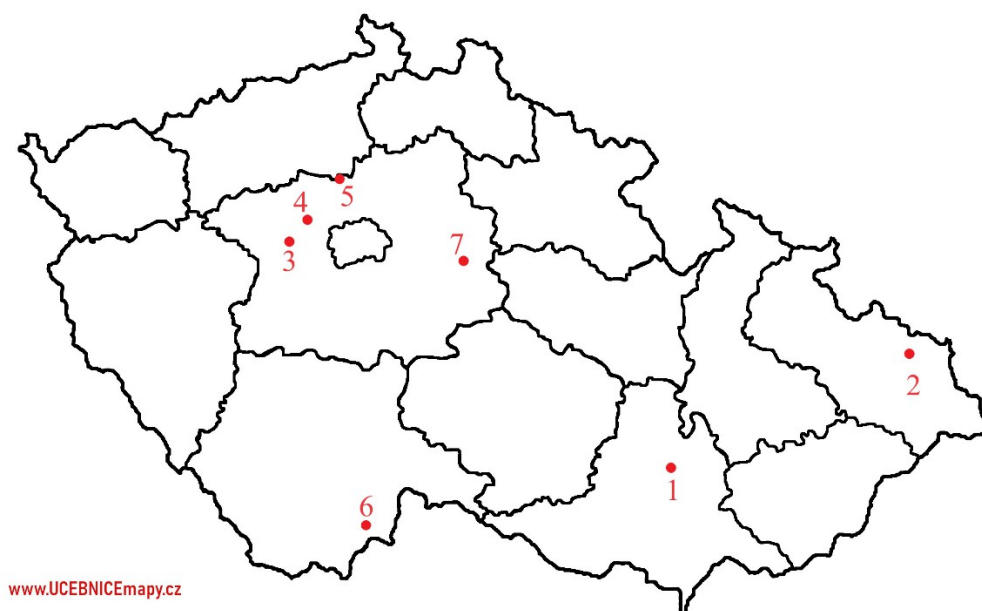
Jednotkové ceny použitých materiálů, které jsou uvedeny v *tabulce 23*, byly zjištěny kontaktováním prodejců a jedná se o aktuální prodejní ceny. Je však důležité zmínit, že jednotlivé betonárny mohou mít různé ceny materiálů určených k výrobě betonových směsí. Cenu materiálů ovlivňuje řada faktorů, přičemž nejdůležitější je partnerský vztah s prodejci či množství, ve kterém materiály odebírají. Cena vodného a stočného byla převzata z ceníku pro rok 2023, který je uveden na webu Pražské vodovody a kanalizace, a.s. [114].

*Tabulka 23 – jednotkové ceny materiálů a dopravy, vlastní tvorba: ceny převzaté od prodejců*

	MJ	Jednotkové ceny materiálů	Jednotkové ceny dopravy
<b>CEM I 42,5 R</b>	t	3 750,00 Kč	350,00 Kč
<b>Vysokopecní struska EcoCoal</b>	t	1 500,00 Kč	615,00 Kč
<b>Fluidní popílek Kladno</b>	t	500,00 Kč	85,00 Kč
<b>65:30:5 (fluidní popílek Kladno: vysokopecní struska Kladno: cement)</b>	t	1 600,00 Kč	85,00 Kč
<b>DTK 0/4 Ledčice</b>	t	205,00 Kč	165,00 Kč
<b>HDK 4/8 Sýkořice</b>	t	465,00 Kč	139,00 Kč
<b>HDK 8/16 Sýkořice</b>	t	437,50 Kč	139,00 Kč
<b>Ocelářenská struska 8/16</b>	t	250,00 Kč	480,00 Kč
<b>HDK 11/22 Sýkořice</b>	t	395,00 Kč	139,00 Kč
<b>Stacheplast</b>	kg	23,00 Kč	6,80 Kč
<b>Poralan STA</b>	kg	22,00 Kč	6,80 Kč
<b>Voda</b>	l	0,12 Kč	

Pro určení ceny dopravy je potřeba znát řadu faktorů. Mezi ně patří např. druh dopravního prostředku, přesná adresa dodání, objížďky, mýtné brány, silniční poplatky, aktuální ceny pohonných hmot atd. Cena dopravy se proto většinou stanovuje na míru jednotlivé zakázce.

V případě přepravy kameniva do uvažované betonárny byl jako dopravní prostředek zvolen návěs s nosností 30 – 32 tun. Cena byla vykalkulována přímo výrobcem a prodejcem použitých druhů kameniva, tj. Kámen Zbraslav a FeWo CB. Přepravu sypkých hmot, resp. cementu a alternativních pojiv zajišťuje soukromý dopravce prostřednictvím cisteren s nosností 30 tun. V rámci práce byla uvažována cena 50 Kč za ujetý kilometr, což je cena určená po konzultaci s dopravcem. Poloha jednotlivých prodejců byla zakreslena do slepé mapy níže. Při pohledu na mapu a *tabulku 23* je zřejmé, že vzhledem k přepravní vzdálenosti do uvažované betonárny se některé řešení jeví jako ekonomicky méně výhodné. Jde zejména o umělé kamenivo (ocelářská struska frakce 8/16 mm), které je sice téměř o polovinu levnější než přírodní, ale cena dopravy je výrazně vyšší.



Obrázek 54 - slepá mapa ČR s vyznačenými prodejci, vlastní úprava z [115]

Poznámky k obrázku 50:

- 1 - Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý (CEM I 42,5 R)
- 2 - ECOCOAL Slag Handling s.r.o. – Ostrava (vysokopecní struska EcoCoal)
- 3 - Kámen Zbraslav, a.s. – Lom Sýkořice (HDK 4/8 mm, HDK 8/16 mm, HDK 11/22 mm)
- 4 - DestroKladno s.r.o. (kombinace 65:30:5) a Teplárna Kladno s.r.o. (fluidní popílek Kladno)
- 5 - Kámen Zbraslav, a.s. – Pískovna Ledčice (DTK 0/4)
- 6 - FeWo CB s.r.o. – Byňov, Nové Hrady (ocelářská struska frakce 8/16 mm)
- 7 - STACHEMA CZ s.r.o. – Kolín (Stacheplast, Poralan STA)

V následujících tabulkách jsou vykalkulovány ceny přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> vyrobených betonových směsí.

Tabulka 24 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením REF, vlastní tvorba

REF	MJ	Množství spotřeby	CP cena	Doprava	Jednotková cena PPC
CEM I 42,5 R	t	0,360	1 350,00 Kč	126,00 Kč	1 476,00 Kč
DTK 0/4 Ledčice	t	0,620	127,10 Kč	102,30 Kč	229,40 Kč
HDK 4/8 Sýkořice	t	0,150	69,75 Kč	20,85 Kč	90,60 Kč
HDK 8/16 Sýkořice	t	0,545	238,44 Kč	75,76 Kč	314,19 Kč
HDK 11/22 Sýkořice	t	0,580	229,10 Kč	80,62 Kč	309,72 Kč
Stacheplast	kg	1,500	34,50 Kč	10,20 Kč	44,70 Kč
Poralan STA	kg	0,900	19,80 Kč	6,12 Kč	25,92 Kč
Voda	l	127,400	14,84 Kč		14,84 Kč
<b>Cena materiálů na 1 m<sup>3</sup>:</b>					<b>2 505,38 Kč</b>

Tabulka 25 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením N1, vlastní tvorba

N1	MJ	Množství spotřeby	CP cena	Doprava	Jednotková cena PPC
CEM I 42,5 R	t	0,270	1 012,50 Kč	94,50 Kč	1 107,00 Kč
Vysokopecní struska EcoCoal	t	0,090	135,00 Kč	55,35 Kč	190,35 Kč
DTK 0/4 Ledčice	t	0,620	127,10 Kč	102,30 Kč	229,40 Kč
HDK 4/8 Sýkořice	t	0,150	69,75 Kč	20,85 Kč	90,60 Kč
HDK 8/16 Sýkořice	t	0,545	238,44 Kč	75,76 Kč	314,19 Kč
HDK 11/22 Sýkořice	t	0,580	229,10 Kč	80,62 Kč	309,72 Kč
Stacheplast	kg	1,500	34,50 Kč	10,20 Kč	44,70 Kč
Poralan STA	kg	0,900	19,80 Kč	6,12 Kč	25,92 Kč
Voda	l	107,700	12,55 Kč		12,55 Kč
<b>Cena materiálu na 1 m<sup>3</sup>:</b>					<b>2 324,43 Kč</b>

Tabulka 26 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením N2, vlastní tvorba

N2	MJ	Množství spotřeby	CP cena	Doprava	Jednotková cena PPC
CEM I 42,5 R	t	0,270	1 012,50 Kč	94,50 Kč	1 107,00 Kč
Fluidní popílek Kladno	t	0,090	45,00 Kč	7,65 Kč	52,65 Kč
DTK 0/4 Ledčice	t	0,620	127,10 Kč	102,30 Kč	229,40 Kč
HDK 4/8 Sýkořice	t	0,150	69,75 Kč	20,85 Kč	90,60 Kč
HDK 8/16 Sýkořice	t	0,545	238,44 Kč	75,76 Kč	314,19 Kč
HDK 11/22 Sýkořice	t	0,580	229,10 Kč	80,62 Kč	309,72 Kč
Stacheplast	kg	1,500	34,50 Kč	10,20 Kč	44,70 Kč
Poralan STA	kg	0,900	19,80 Kč	6,12 Kč	25,92 Kč
Voda	l	148,200	17,27 Kč		17,27 Kč
<b>Cena materiálu na m<sup>3</sup>:</b>					<b>2 191,45 Kč</b>

Tabulka 27 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením N3, vlastní tvorba

N3	MJ	Množství spotřeby	CP cena	Doprava	Jednotková cena PPC
CEM I 42,5 R	t	0,270	1 012,50 Kč	94,50 Kč	1 107,00 Kč
65:30:5 (fluidní popílek Kladno: vysokopecní struska Kladno: cement)	t	0,090	144,00 Kč	7,65 Kč	151,65 Kč
DTK 0/4 Ledčice	t	0,620	127,10 Kč	102,30 Kč	229,40 Kč
HDK 4/8 Sýkořice	t	0,150	69,75 Kč	20,85 Kč	90,60 Kč
HDK 8/16 Sýkořice	t	0,545	238,44 Kč	75,76 Kč	314,19 Kč
HDK 11/22 Sýkořice	t	0,580	229,10 Kč	80,62 Kč	309,72 Kč
Stacheplast	kg	1,500	34,50 Kč	10,20 Kč	44,70 Kč
Poralan STA	kg	0,900	19,80 Kč	6,12 Kč	25,92 Kč
Voda	l	128,100	14,93 Kč		14,93 Kč
<b>Cena materiálu na m<sup>3</sup>:</b>					<b>2 288,11 Kč</b>

Tabulka 28 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením M, vlastní tvorba

M	MJ	Množství spotřeby	CP cena	Doprava	Jednotková cena PPC
CEM I 42,5 R	t	0,270	1 012,50 Kč	94,50 Kč	1 107,00 Kč
Vysokopecní struska EcoCoal	t	0,090	135,00 Kč	55,35 Kč	190,35 Kč
DTK 0/4 Ledčice	t	0,620	127,10 Kč	102,30 Kč	229,40 Kč
HDK 4/8 Sýkořice	t	0,150	69,75 Kč	20,85 Kč	90,60 Kč
Ocelářenská struska 8/16	t	0,545	136,25 Kč	261,60 Kč	397,85 Kč
HDK 11/22 Sýkořice	t	0,580	229,10 Kč	80,62 Kč	309,72 Kč
Stacheplast	kg	1,500	34,50 Kč	10,20 Kč	44,70 Kč
Poralan STA	kg	0,900	19,80 Kč	6,12 Kč	25,92 Kč
Voda	l	108,600	12,65 Kč		12,65 Kč
<b><u>Cena materiálu na m<sup>3</sup>:</u></b>					<b>2 408,19 Kč</b>

### 10.1.2 MZDY (M)

V betonárně uvažované velikosti jsou zaměstnání 2 strojníci, 2 dispečeri/obsluha míchacího zařízení a technolog betonu, který obsluhuje zároveň 5 betonáren. Náklady na mzdu technologa jsou tedy rozděleny mezi 5 betonáren. Hrubé měsíční mzdy zmíněných zaměstnanců byly stanoveny na základě konzultace s betonárnou.

Tabulka 29 – kalkulace přímých mezd na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi, vlastní tvorba: výše uvažovaných měsíčních odměn převzaty od betonárny

Zaměstnanec	Měsíční hrubá mzda	Roční hrubá mzda	Celková roční produkce [m <sup>3</sup> ]	Náklady na mzdy na 1 m <sup>3</sup> betonu
Strojník č. 1	46 000,00 Kč	552 000,00 Kč	80000	6,90 Kč
Strojník č. 2	46 000,00 Kč	552 000,00 Kč		6,90 Kč
Dispečer/obsluha míchacího zařízení č. 1	43 000,00 Kč	516 000,00 Kč		6,45 Kč
Dispečer/obsluha míchacího zařízení č. 2	43 000,00 Kč	516 000,00 Kč		6,45 Kč
Technolog betonu (obsluha pěti betonáren)	68 000,00 Kč	816 000,00 Kč		2,04 Kč
<b><u>Náklady na mzdy celkem:</u></b>				<b>28,74 Kč</b>

### 10.1.3 STROJE (S)

V uvažované betonárně používají k manipulaci s materiálem 2 kolové nakladače značky VOLVO typu L90E (obrázek 55). Po konzultaci s betonárnou jsou měsíční náklady na tento typ nakladače přibližně 71 140 Kč. V ceně jsou započítány náklady na údržbu a opravy, pojištění a pohonné hmoty.



Obrázek 55 – kolový nakladač Volvo L90E, vlastní tvorba

#### Kalkulace přímých nákladů na nakladače:

Roční náklady na 1 nakladač:  $71\,140 \text{ Kč/měsíc} \times 12 \text{ měsíců} = 853\,680 \text{ Kč/rok}$

Roční produkce betonu:  $80\,000 \text{ m}^3$

Náklady na 1 nakladač v přepočtu na  $1 \text{ m}^3$  betonu:  $853\,680 \text{ Kč} / 80\,000 \text{ m}^3 = 10,671 \text{ Kč/m}^3$

Náklady na 2 nakladače v přepočtu  $1 \text{ m}^3$  betonu:  $10,671 \text{ Kč/m}^3 \times 2 = \mathbf{21,342 \text{ Kč/m}^3}$

### 10.1.4 OSTATNÍ PŘÍMÉ NÁKLADY (OPN)

V rámci ostatních přímých nákladů jsou započítány odvody na zdravotní a sociální pojištění z mezd zaměstnanců. Sazba je 34 %.

#### Kalkulace ostatních přímých nákladů:

Náklady na mzdy celkem (vztaženo k  $\text{m}^3$  vyrobeného betonu):  $28,74 \text{ Kč}$

Odvody na zdravotní a sociální pojištění v přepočtu na  $1 \text{ m}^3$  betonu:  $28,74 \times 0,34 = \mathbf{9,77 \text{ Kč/m}^3}$

## 10.2 NEPŘÍMÉ NÁKLADY

### 10.2.1 VÝROBNÍ REŽIE (RV)

Výrobní režie betonárny zahrnuje veškeré náklady spojené s provozem a správou zařízení pro výrobu betonu. Náklady spojené s výrobní režii, které jsou zobrazené v následující tabulce byly získány v rámci několika konzultací s betonárnami. Největší položkou jsou zde náklady spojené s pořízením betonárny, kam patří především pořízení veškerých technologií a pořízení vhodného pozemku. Je důležité si uvědomit, že výrobní režie betonárny může být specifická pro každý provoz a závisí na různých faktorech, jako jsou velikost betonárny, geografická poloha, technologie využívaná při výrobě betonu a další okolnosti ovlivňující provoz betonárny.

Tabulka 30 – výrobní režie, vlastní tvorba: náklady převzaty od betonárny

Výrobní režie	Roční náklady
<b>Náklady na zřízení betonárny (odpis)</b>	7 845 000,00 Kč
<b>Energie:</b>	
- elektřina	1 440 000,00 Kč
- zemní plyn (ohřev záměsové vody a kameniva)	360 000,00 Kč
<b>Opravy a údržba betonárny</b>	2 870 000,00 Kč
<b>Pojištění betonárny</b>	435 000,00 Kč
<b>Technické náklady výroby (laboratorní zkoušky, atestace zařízení, ...)</b>	3 100 000,00 Kč
<b>Režijní materiál:</b>	
- náradí všeho druhu	98 000,00 Kč
- drobný a spotřební stavební materiál	32 000,00 Kč
- ochranné pracovní prostředky	41 500,00 Kč
- úklidové prostředky, čisticí materiál	33 000,00 Kč
- nápoje pro zaměstnance	15 200,00 Kč
- ostatní režijní materiál	10 500,00 Kč
- propagační a reklamní materiál	55 000,00 Kč
Ostatní výrobní režie (zabezpečení, IT služby, ...)	1 065 000,00 Kč
<b>Roční náklady na výrobní režie celkem:</b>	<b>17 400 200,00 Kč</b>

Kalkulace výrobní režie:

Roční náklady na výrobní režie: 17 400 200 Kč

Roční produkce betonu: 80 000 m<sup>3</sup>

Výrobní režie v přepočtu na 1 m<sup>3</sup> betonu:  $17\,400\,200 / 80\,000 = 217,5 \text{ Kč/m}^3$



### 10.2.2 SPRÁVNÍ REŽIE (RS)

Správní režie betonárny zahrnuje náklady spojené s řízením a správou celého podniku. Tyto náklady nejsou přímo spojeny s výrobou betonu, ale jsou nezbytné pro celkový chod a řízení betonárny. Uvažovaná betonárna spadá do vlastnictví skupiny, která provozuje dalších více než 60 betonáren. Z tohoto důvodu je velmi těžké podrobně určit náklady na správní režie, a proto byla doporučena od betonárny fixní výše správních režii **120 Kč/m<sup>3</sup>**. Výši správní režie ovlivňuje řada faktorů, přičemž nejpodstatnější je nastavená strategie společnosti. Do správní režie uvažované betonárny patří náklady na mzdy zaměstnanců oblastního zastoupení (ředitel, sekretářka, účetní, ...), a dále také náklady spojené s provozem a údržbou oblastního zastoupení, IT infrastrukturu, vzdělávání a školení zaměstnanců, právní služby a v tomto případě navíc také odvod režii společnosti, která je nadnárodním podnikem.

### 10.2.3 ZISK

Zisk betonárny se pohybuje v rozmezí 3 – 35 % z celkových nákladů na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi a je tedy velmi proměnlivý. Je ovlivněn zejména tím, kdo beton odebírá. V případě, že odběratelem je partnerská firma betonárny, pohybuje se v rozmezí 3 – 5 %. Jedná-li se o cizí firmu, je kalkulován zisk v rozmezí 15 – 35 %, přičemž jeho výše je ovlivněna především objemem odběru, kdy s vyšší poptávkou klesá. V rámci této práce bude uvažován zisk **35 %** z celkových nákladů na referenční směs (beton s označením REF), neboť se jedná o hodnotu zisku pro maloodběratele a zároveň je započítaná v oficiálním ceníku betonárny.

#### Kalkulace zisku:

Celkové náklady na referenční směs:

$$H + M + S + OPN + RV + RS = 2\,505,38 + 28,74 + 21,34 + 9,77 + 217,5 + 120 = 2\,902,73 \text{ Kč}$$

$$\text{Zisk (35 \%)} = 2\,902,73 \times 0,35 = \mathbf{1\,015,96 \text{ Kč}}$$

## 10.3 CENA

Tabulka 31 – výše ceny 1 m3 jednotlivých betonových směsí, vlastní tvorba

Název betonové směsi	Výše nákladů na m3 jednotlivých betonových směsí				
	REF	N1	N2	N3	M
<b>Přímé náklady</b>					
Přímý materiál (H)	2 505,38 Kč	2 324,43 Kč	2 191,45 Kč	2 288,11 Kč	2 408,19 Kč
Přímé mzdy (M)	28,74 Kč	28,74 Kč	28,74 Kč	28,74 Kč	28,74 Kč
Náklady na provoz strojů a zařízení (S)	21,34 Kč	21,34 Kč	21,34 Kč	21,34 Kč	21,34 Kč
Ostatní přímé náklady (OPN)	9,77 Kč	9,77 Kč	9,77 Kč	9,77 Kč	9,77 Kč
<b>Celkové přímé náklady</b>	<b>2 565,23 Kč</b>	<b>2 384,28 Kč</b>	<b>2 251,30 Kč</b>	<b>2 347,96 Kč</b>	<b>2 468,04 Kč</b>
<b>Nepřímé náklady</b>					
Výrobní režie (RV)	217,50 Kč	217,50 Kč	217,50 Kč	217,50 Kč	217,50 Kč
Správní režie (RS)	120,00 Kč	120,00 Kč	120,00 Kč	120,00 Kč	120,00 Kč
<b>Celkové nepřímé náklady</b>	<b>337,50 Kč</b>	<b>337,50 Kč</b>	<b>337,50 Kč</b>	<b>337,50 Kč</b>	<b>337,50 Kč</b>
<i>Celkové náklady</i>	<i>2902,73 Kč</i>	<i>2721,78 Kč</i>	<i>2588,80 Kč</i>	<i>2685,46 Kč</i>	<i>2805,54 Kč</i>
Zisk (35 % z celkových nákladů betonu REF)	1 015,96 Kč	1 015,96 Kč	1 015,96 Kč	1 015,96 Kč	1 015,96 Kč
<b>Cena bez DPH</b>	<b>3 918,69 Kč</b>	<b>3 737,74 Kč</b>	<b>3 604,76 Kč</b>	<b>3 701,42 Kč</b>	<b>3 821,50 Kč</b>
<b>Cena včetně DPH (21 %)</b>	<b>4 741,61 Kč</b>	<b>4 522,67 Kč</b>	<b>4 361,76 Kč</b>	<b>4 478,72 Kč</b>	<b>4 624,02 Kč</b>

# 11 KONEČNÁ CENA CEMENTOBETONOVÉHO KRYTU VOZOVKY

Konečná cena cementobetonové krytu vozovky bude stanovena prostřednictvím softwaru KROS 4, který k ocenění prací využívá cenovou soustavu ÚRS 2023/II. Konkrétně bude převzata položka č. 581151112 s názvem Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl. 270 mm. Jedná se o možnou tloušťku cementobetonového krytu dálnice, přičemž tloušťka spodní vrstvy betonu je 220 mm a horní vrstvy 50 mm. Vzhledem k použitým frakcím kameniva u navržených betonů bude v cenovém rozboru této položky (viz obrázek 56) nahrazen beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/16, což je beton pro spodní vrstvu cementobetonového krytu. Výsledkem pak bude jednotková cena cementobetonového krytu skupiny CB I, ve kterém byly využity jednotlivé varianty navržených betonů pro spodní vrstvu krytu.

Rozbor ceny																																																																																																																																																																																																																																																																							
Položka		581151112 Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl. 270 mm																																																																																																																																																																																																																																																																					
TOV		000							MJ		m2																																																																																																																																																																																																																																																												
<table border="1"> <tr> <td>H</td> <td>Přímý materiál</td> <td colspan="9">1277,01</td> </tr> <tr> <td>NC</td> <td>z toho nákupní cena</td> <td colspan="9">1123,57</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>z toho doprava</td> <td colspan="9">153,44</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>Mzdové náklady</td> <td colspan="9">119,44</td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>z toho přímé mzdy</td> <td colspan="9">89,27</td> </tr> <tr> <td>O</td> <td>odvody 33,8 % z mezd</td> <td colspan="9">30,17</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>Stroje</td> <td colspan="9">85,65</td> </tr> <tr> <td>T</td> <td>Ostatní přímé náklady</td> <td colspan="9">0,00</td> </tr> <tr> <td>SUB</td> <td>Pododávky</td> <td colspan="9">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="2">PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]</td> <td colspan="9">205,09</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]</td> <td colspan="9">1 482,10</td> </tr> <tr> <td>R1</td> <td>Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]</td> <td colspan="9">61,53</td> </tr> <tr> <td>R2</td> <td>Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]</td> <td colspan="9">34,87</td> </tr> <tr> <td>R3</td> <td>0,00 % z []</td> <td colspan="9">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]</td> <td colspan="9">96,39</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]</td> <td colspan="9">1 578,49</td> </tr> <tr> <td>Z</td> <td>Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]</td> <td colspan="9">42,21</td> </tr> <tr> <td>R4</td> <td>0,00 % z []</td> <td colspan="9">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="2">NK Nekalkulované náklady</td> <td colspan="9">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]</td> <td colspan="9">1 620,70</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><b>Jednotková cena</b></td> <td colspan="9"><b>1 620,70</b></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Hmotnost</td> <td colspan="9">0,67248</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Normohodiny</td> <td colspan="9">0,541</td> </tr> </table>											H	Přímý materiál	1277,01									NC	z toho nákupní cena	1123,57									D	z toho doprava	153,44									M	Mzdové náklady	119,44									P	z toho přímé mzdy	89,27									O	odvody 33,8 % z mezd	30,17									S	Stroje	85,65									T	Ostatní přímé náklady	0,00									SUB	Pododávky	0,00									PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]		205,09									Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]		1 482,10									R1	Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	61,53									R2	Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	34,87									R3	0,00 % z []	0,00									Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]		96,39									Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]		1 578,49									Z	Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]	42,21									R4	0,00 % z []	0,00									NK Nekalkulované náklady		0,00									Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]		1 620,70									<b>Jednotková cena</b>		<b>1 620,70</b>									Hmotnost		0,67248									Normohodiny		0,541								
H	Přímý materiál	1277,01																																																																																																																																																																																																																																																																					
NC	z toho nákupní cena	1123,57																																																																																																																																																																																																																																																																					
D	z toho doprava	153,44																																																																																																																																																																																																																																																																					
M	Mzdové náklady	119,44																																																																																																																																																																																																																																																																					
P	z toho přímé mzdy	89,27																																																																																																																																																																																																																																																																					
O	odvody 33,8 % z mezd	30,17																																																																																																																																																																																																																																																																					
S	Stroje	85,65																																																																																																																																																																																																																																																																					
T	Ostatní přímé náklady	0,00																																																																																																																																																																																																																																																																					
SUB	Pododávky	0,00																																																																																																																																																																																																																																																																					
PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]		205,09																																																																																																																																																																																																																																																																					
Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]		1 482,10																																																																																																																																																																																																																																																																					
R1	Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	61,53																																																																																																																																																																																																																																																																					
R2	Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	34,87																																																																																																																																																																																																																																																																					
R3	0,00 % z []	0,00																																																																																																																																																																																																																																																																					
Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]		96,39																																																																																																																																																																																																																																																																					
Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]		1 578,49																																																																																																																																																																																																																																																																					
Z	Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]	42,21																																																																																																																																																																																																																																																																					
R4	0,00 % z []	0,00																																																																																																																																																																																																																																																																					
NK Nekalkulované náklady		0,00																																																																																																																																																																																																																																																																					
Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]		1 620,70																																																																																																																																																																																																																																																																					
<b>Jednotková cena</b>		<b>1 620,70</b>																																																																																																																																																																																																																																																																					
Hmotnost		0,67248																																																																																																																																																																																																																																																																					
Normohodiny		0,541																																																																																																																																																																																																																																																																					
P.Č.	T	Kód položky	Název	MJ	Množství	Jednotková cena	Celkem	NC cena	NC cena celkem	Doprava	Doprava celkem																																																																																																																																																																																																																																																												
1	M	08211321	voda pitná pro ostatní odběratele	m3	0,04200	53,80	2,26	53,80	2,26	0,00	0,00																																																																																																																																																																																																																																																												
2	M	24551090	nástřik ochranný čerstvého betonu proti vysychání	litr	0,25000	47,80	11,95	42,90	10,73	4,90	1,23																																																																																																																																																																																																																																																												
3	M	58933331	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/8	m3	0,05125	4 620,00	236,78	4 070,00	208,59	550,00	28,19																																																																																																																																																																																																																																																												
4	M	58933332	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/16	m3	0,22550	4 550,00	1 026,03	4 000,00	902,00	550,00	124,03																																																																																																																																																																																																																																																												
Materiály							1 277,01																																																																																																																																																																																																																																																																
6	P	712000-S3-T2	Dělník	Nh	0,51000	165,10	84,20																																																																																																																																																																																																																																																																
7	P	833000-S2-T2	Strojník	Nh	0,01500	148,70	2,23																																																																																																																																																																																																																																																																
8	P	833000-S2-T3	Strojník	Nh	0,00800	189,10	1,51																																																																																																																																																																																																																																																																
9	P	833000-S3-T2	Strojník	Nh	0,00800	165,10	1,32																																																																																																																																																																																																																																																																
Mzdy							89,27																																																																																																																																																																																																																																																																
11	S	105030051100	Traktorové rypadlo výkon 63 kW objem lopaty 1,1 m3 dosah podkopu 5,46 m	Sh	0,00680	1 630,00	11,08																																																																																																																																																																																																																																																																
12	S	113040031100	Rozstřikovač ochranného nátěru	Sh	0,00680	378,00	2,57																																																																																																																																																																																																																																																																
13	S	113130011200	Finišer betonu šíře záběru 8 - 11,5 m	Sh	0,00680	10 100,00	68,68																																																																																																																																																																																																																																																																
14	S	304030011200	Kropiči automobil objem 7 m3	Sh	0,00600	553,00	3,32																																																																																																																																																																																																																																																																
Stroje							85,65																																																																																																																																																																																																																																																																

Obrázek 56 – rozbor ceny položky č. 581151112 Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl. 270 mm, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II)

## 11.1 ROZBORY CEN CEMENTOBETONOVÝCH KRYTŮ S VYUŽITÍM NAVRŽENÝCH BETONŮ

V této podkapitole budou stanoveny jednotkové ceny cementobetonových krytů, ve kterých byl beton spodní vrstvy nahrazen navrženými typy variantních betonů. Jde o beton s názvem REF, tedy referenční směs, poté o betony, kde byl cement nahrazen z 25 % hmotnosti dvěma typy vysokopecní strusky a fluidním popílkem (N1, N2, N3) a nakonec také směs M, kde byl cement z 25 % hmotnosti nahrazen vysokopecní struskou společně s nahrazením frakce kameniva 8/16 ocelářskou struskou.

Rozbor ceny											
Položka		581151REF		Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl. 270 mm (beton REF)							
TOV		000		TOV 000					MJ		m2
H	Přímý materiál									1258,67	
NC	z toho nákupní cena									1105,24	
D	z toho doprava									153,44	
M	Mzdové náklady									119,44	
P	z toho přímé mzdy									89,27	
O	odvody 33,8 % z mezd									30,17	
S	Stroje									85,79	
T	Ostatní přímé náklady									0,00	
SUB	Pododávky									0,00	
PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]				205,23							
Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]				1 463,90							
R1	Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]									61,57	
R2	Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]									34,89	
R3	0,00 % z []									0,00	
Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]				96,46							
Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]				1 560,36							
Z	Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]									42,24	
R4	0,00 % z []									0,00	
NK	Nekalkulované náklady									0,00	
Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]				1 602,59							
<b>Jednotková cena</b>				<b>1 602,59</b>							
Hmotnost				0,67248							
Normohodiny				0,541							
P.Č.	T	Kód položky	Název	MJ	Množství	Jednotková cena	Celkem	NC cena	NC cena celkem	Doprava	Doprava celkem
1	M	08211321	voda pitná pro ostatní odběratele	m3	0,04200	53,80	2,26	53,80	2,26	0,00	0,00
2	M	24551090	nástřik ochranný čerstvého betonu proti vysychání	litr	0,25000	47,80	11,95	42,90	10,73	4,90	1,23
3	M	58933331	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/8	m3	0,05125	4 620,00	236,78	4 070,00	208,59	550,00	28,19
4	M	58933REF	beton REF, kamenivo frakce 0/22 (spodní vrstva CB krytu)	m3	0,22550	4 468,69	1 007,69	3 918,69	883,66	550,00	124,03
Materiály							1 258,67				
6	P	712000-S3-T2	Dělník	Nh	0,51000	165,10	84,20				
7	P	833000-S2-T2	Strojník	Nh	0,01500	148,70	2,23				
8	P	833000-S2-T3	Strojník	Nh	0,00800	189,10	1,51				
9	P	833000-S3-T2	Strojník	Nh	0,00800	165,10	1,32				
Mzdy							89,27				
11	S	105030051100	Traktorové rypadlo výkon 63 kW objem lopaty 1,1 m3 dosah podkopu 5,46 m	Sh	0,00680	1 630,00	11,08				
12	S	113040031100	Rozstřikovač ochranného nátěru	Sh	0,00680	378,00	2,57				
13	S	113130011200	Finišer betonu šíře záběru 8 - 11,5 m	Sh	0,00680	10 100,00	68,68				
14	S	304030011200	Kropiči automobil objem 7 m3	Sh	0,00600	576,00	3,46				
Stroje							85,79				

Obrázek 57 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu REF pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II)

Rozbor ceny													
Položka		5811511N1		Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl. 270 mm (beton N1)									
TOV		000		TOV 000						MJ		m2	
H	Přímý materiál			1217,87									
NC	z toho nákupní cena			1064,43									
D	z toho doprava			153,44									
M	Mzdové náklady			119,44									
P	z toho přímé mzdy			89,27									
O	odvody 33,8 % z mezd			30,17									
S	Stroje			85,79									
T	Ostatní přímé náklady			0,00									
SUB	Pododávky			0,00									
PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]				205,23									
Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]				1 423,10									
R1	Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]			61,57									
R2	Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]			34,89									
R3	0,00 % z []			0,00									
Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]				96,46									
Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]				1 519,55									
Z	Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]			42,24									
R4	0,00 % z []			0,00									
NK	Nekalkulované náklady			0,00									
Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]				1 561,79									
<b>Jednotková cena</b>				<b>1 561,79</b>									
Hmotnost				0,67248									
Normohodiny				0,541									
P.Č.	T	Kód položky	Název	MJ	Množství	Jednotková cena	Celkem	NC cena	NC cena celkem	Doprava	Doprava celkem		
1	M	08211321	voda pitná pro ostatní odběratele	m3	0,04200	53,80	2,26	53,80	2,26	0,00	0,00		
2	M	24551090	nástřik ochranný čerstvého betonu proti vysychání	litr	0,25000	47,80	11,95	42,90	10,73	4,90	1,23		
3	M	58933331	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/8	m3	0,05125	4 620,00	236,78	4 070,00	208,59	550,00	28,19		
4	M	589333N1	beton N1, kamenivo frakce 0/22 (spodní vrstva CB krytu)	m3	0,22550	4 287,74	966,89	3 737,74	842,86	550,00	124,03		
Materiály							1 217,87						
6	P	712000-S3-T2	Dělník	Nh	0,51000	165,10	84,20						
7	P	833000-S2-T2	Strojník	Nh	0,01500	148,70	2,23						
8	P	833000-S2-T3	Strojník	Nh	0,00800	189,10	1,51						
9	P	833000-S3-T2	Strojník	Nh	0,00800	165,10	1,32						
Mzdy							89,27						
11	S	105030051100	Traktorové rypadlo výkon 63 kW objem lopaty 1,1 m3 dosah podkopu 5,46 m	Sh	0,00680	1 630,00	11,08						
12	S	113040031100	Rozstřikovač ochranného nátěru	Sh	0,00680	378,00	2,57						
13	S	113130011200	Finišer betonu šíře záběru 8 - 11,5 m	Sh	0,00680	10 100,00	68,68						
14	S	304030011200	Kropičí automobil objem 7 m3	Sh	0,00600	576,00	3,46						
Stroje							85,79						

Obrázek 58 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu N1 pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II)

Rozbor ceny											
Položka	5811511N2		Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl 270 mm (beton N2)								
TOV	000		TOV 000					MJ m2			
H	Přímý materiál		1187,88								
NC	z toho nákupní cena		1034,45								
D	z toho doprava		153,44								
M	Mzdové náklady		119,44								
P	z toho přímé mzdy		89,27								
O	odvody 33,8 % z mezd		30,17								
S	Stroje		85,79								
T	Ostatní přímé náklady		0,00								
SUB	Pododávky		0,00								
PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]			205,23								
Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]			1 393,11								
R1	Výrobní režie	30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	61,57								
R2	Správní režie	17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	34,89								
R3		0,00 % z []	0,00								
Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]			96,46								
Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]			1 489,57								
Z	Zisk	14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]	42,24								
R4		0,00 % z []	0,00								
NK Nekalkulované náklady			0,00								
Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]			1 531,80								
<b>Jednotková cena</b>			<b>1 531,80</b>								
Hmotnost			0,67248								
Normohodiny			0,541								
P.Č.	T	Kód položky	Název	MJ	Množství	Jednotková cena	Celkem	NC cena	NC cena celkem	Doprava	Doprava celkem
1	M	08211321	voda pitná pro ostatní odběratele	m3	0,04200	53,80	2,26	53,80	2,26	0,00	0,00
2	M	24551090	nástřik ochranný čerstvého betonu proti vysychání	litr	0,25000	47,80	11,95	42,90	10,73	4,90	1,23
3	M	58933331	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/8	m3	0,05125	4 620,00	236,78	4 070,00	208,59	550,00	28,19
4	M	589333N2	beton N2, kamenivo frakce 0/22 (spodní vrstva CB krytu)	m3	0,22550	4 154,76	936,90	3 604,76	812,87	550,00	124,03
Materiály							1 187,88				
6	P	712000-S3-T2	Dělník	Nh	0,51000	165,10	84,20				
7	P	833000-S2-T2	Strojník	Nh	0,01500	148,70	2,23				
8	P	833000-S2-T3	Strojník	Nh	0,00800	189,10	1,51				
9	P	833000-S3-T2	Strojník	Nh	0,00800	165,10	1,32				
Mzdy							89,27				
11	S	105030051100	Traktorové rypadlo výkon 63 kW objem lopaty 1,1 m3 dosah podkopy 5,46 m	Sh	0,00680	1 630,00	11,08				
12	S	113040031100	Rozstřikovač ochranného nátěru	Sh	0,00680	378,00	2,57				
13	S	113130011200	Finišer betonu šife záběru 8 - 11,5 m	Sh	0,00680	10 100,00	68,68				
14	S	304030011200	Kropičí automobil objem 7 m3	Sh	0,00680	576,00	3,46				
Stroje							85,79				

Obrázek 59 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu N2 pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II)

Rozbor ceny											
Položka	5811511N3		Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl 270 mm (beton N3)								
TOV	000		TOV 000					MJ m2			
H	Přímý materiál		1209,68								
NC	z toho nákupní cena		1056,24								
D	z toho doprava		153,44								
M	Mzdové náklady		119,44								
P	z toho přímé mzdy		89,27								
O	odvody 33,8 % z mezd		30,17								
S	Stroje		85,79								
T	Ostatní přímé náklady		0,00								
SUB	Pododávky		0,00								
PZN Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]			205,23								
Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]			1 414,91								
R1	Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]		61,57								
R2	Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]		34,89								
R3	0,00 % z []		0,00								
Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]			96,46								
Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]			1 511,36								
Z	Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]		42,24								
R4	0,00 % z []		0,00								
NK Nekalkulované náklady			0,00								
Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]			1 553,60								
<b>Jednotková cena</b>			<b>1 553,60</b>								
Hmotnost			0,67248								
Normohodiny			0,541								
P.Č.	T	Kód položky	Název	MJ	Množství	Jednotková cena	Celkem	NC cena	NC cena celkem	Doprava	Doprava celkem
1	M	08211321	voda pitná pro ostatní odběratele	m3	0,04200	53,80	2,26	53,80	2,26	0,00	0,00
2	M	24551090	nástřik ochranný čerstvého betonu proti vysychání	litr	0,25000	47,80	11,95	42,90	10,73	4,90	1,23
3	M	58933331	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/8	m3	0,05125	4 620,00	236,78	4 070,00	208,59	550,00	28,19
4	M	589333N3	beton N3, kamenivo frakce 0/22 (spodní vrstva CB krytu)	m3	0,22550	4 251,42	958,70	3 701,42	834,67	550,00	124,03
Materiály							1 209,68				
6	P	712000-S3-T2	Dělník	Nh	0,51000	165,10	84,20				
7	P	833000-S2-T2	Strojník	Nh	0,01500	148,70	2,23				
8	P	833000-S2-T3	Strojník	Nh	0,00800	189,10	1,51				
9	P	833000-S3-T2	Strojník	Nh	0,00800	165,10	1,32				
Mzdy							89,27				
11	S	105030051100	Traktorové rypadlo výkon 63 kW objem lopaty 1,1 m3 dosah podkopu 5,46 m	Sh	0,00680	1 630,00	11,08				
12	S	113040031100	Rozstřikovač ochranného nátěru	Sh	0,00680	378,00	2,57				
13	S	113130011200	Finišer betonu šíře záběru 8 - 11,5 m	Sh	0,00680	10 100,00	68,68				
14	S	304030011200	Kropičí automobil objem 7 m3	Sh	0,00680	576,00	3,46				
Stroje							85,79				

Obrázek 60 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu N3 pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II)

## Rozbor ceny

Položka	58115111M	Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl 270 mm (beton M)	
TOV	000	TOV 000	MJ m2

H	Přímý materiál	1236,76
NC	z toho nákupní cena	1083,32
D	z toho doprava	153,44
M	Mzdové náklady	119,44
P	z toho přímé mzdy	89,27
O	odvody 33,8 % z mezd	30,17
S	Stroje	85,79
T	Ostatní přímé náklady	0,00
SUB	Poddodávky	0,00

PZN	Přímé zpracovací náklady [M] + [S] + [T]	205,23
	Přímé náklady [H] + [SUB] + [PZN] + [NK]	1 441,98

R1	Výrobní režie 30,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	61,57
R2	Správní režie 17,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]	34,89
R3	0,00 % z []	0,00

	Nepřímé náklady [R1] + [R2] + [R3]	96,46
	Náklady celkem [H] + [SUB] + [PZN] + [R1] + [R2] + [R3] + [NK]	1 538,44

Z	Zisk 14,00 % z [P]+[O]+[S]+[T]+[R1]+[R2]	42,24
R4	0,00 % z []	0,00
NK	Nekalkulované náklady	0,00

	Celkem [H] + [SUB] + [PZN] až [NK]	1 580,68
--	------------------------------------	----------

<b>Jednotková cena</b>	<b>1 580,68</b>
------------------------	-----------------

Hmotnost	0,67248
Normohodiny	0,541

P.Č.	T	Kód položky	Název	MJ	Množství	Jednotková cena	Celkem	NC cena	NC cena celkem	Doprava	Doprava celkem
1	M	08211321	voda pitná pro ostatní odběratele	m3	0,04200	53,80	2,26	53,80	2,26	0,00	0,00
2	M	24551090	nástřik ochranný čerstvého betonu proti vysychání	litr	0,25000	47,80	11,95	42,90	10,73	4,90	1,23
3	M	58933331	beton C 30/37 XF3 kamenivo frakce 0/8	m3	0,05125	4 620,00	236,78	4 070,00	208,59	550,00	28,19
4	M	5893333M	beton M, kamenivo frakce 0/22 (spodní vrstva CB krytu)	m3	0,22550	4 371,50	985,77	3 821,50	861,75	550,00	124,03
Materiály							1 236,76				
6	P	712000-S3-T2	Dělník	Nh	0,51000	165,10	84,20				
7	P	833000-S2-T2	Strojník	Nh	0,01500	148,70	2,23				
8	P	833000-S2-T3	Strojník	Nh	0,00800	189,10	1,51				
9	P	833000-S3-T2	Strojník	Nh	0,00800	165,10	1,32				
Mzdy							89,27				
11	S	105030051100	Traktorové rypadlo výkon 63 kW objem lopaty 1,1 m3 dosah podkopy 5,46 m	Sh	0,00680	1 630,00	11,08				
12	S	113040031100	Rozstřikovač ochranného nátěru	Sh	0,00680	378,00	2,57				
13	S	113130011200	Finišer betonu šíře záběru 8 - 11,5 m	Sh	0,00680	10 100,00	68,68				
14	S	304030011200	Kropičí automobil objem 7 m3	Sh	0,00600	576,00	3,46				
Stroje							85,79				

Obrázek 61 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu M pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II)



## 11.2 VYHODNOCENÍ

Následující tabulka obsahuje informace o jednotkových cenách a úsporách pro navržené varianty betonů spodní vrstvy vozovky vzhledem k jednotkové ceně cementobetonového krytu na metr čtvereční.

*Tabulka 32 – shrnutí jednotkových cen a úspor cementobetonových krytů s navrženými variantami betonu, vlastní tvorba*

Varianta betonu	REF	N1	N2	N3	M
Jednotková cena CB krytu [m <sup>2</sup> ]	1 602,59 Kč	1 561,79 Kč	1 531,80 Kč	1 553,60 Kč	1 580,68 Kč
Úspora oproti REF betonu [m <sup>2</sup> ]	0,00 Kč	40,80 Kč	70,79 Kč	48,99 Kč	21,91 Kč

Z tabulky 32 je zcela zřejmé, že nahrazení části cementu odpadními produkty metalurgického a energetického průmyslu na bázi vysokopecních strusek a fluidního popílku v betonech pro spodní vrstvu cementobetonového krytu vozovek má pozitivní vliv na konečnou cenu vozovky. Důvodem je nižší cena těchto alternativních pojiv vůči ceně cementu. Největší úspory lze dosáhnout u varianty betonu N2, tedy u betonu, kde byl cement nahrazen fluidním popílkem z teplárny Kladno. Na místě je také nutné zdůraznit, že pořizovací cena těchto alternativních pojiv či umělého kameniva je velmi výrazně ovlivněna cenou dopravy. Například ocelářská struska frakce 8/16 mm, která byla použita v rámci této práce je téměř dvakrát levnější než přírodní kamenivo, ale vzhledem k velmi vysoké nákladnosti přepravy se toto řešení jeví nereálně po ekonomické stránce. V případě, že by tyto materiály byly uskladněny v blízkosti betonárny, mohou být konečné úspory znatelnější.

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, tak společnost Skanska, a.s. ve spolupráci s Ředitelstvím silnic a dálnic ČR vybudovali zkušební úsek cementobetonové vozovky s vysokopecní struskou. Jednalo se o úsek dálnice D1 z Přerova do Lipníka nad Bečvou, tedy o úsek délky 8,978 km. Celková výměra cementobetonové krytu byla 176 340 m<sup>2</sup> [5]. Pomocí této výměry lze vyčíslit úsporu na vybudování vozovky s nejlevnější variantou betonu N2 oproti běžnému betonu s označením REF. V tomto případě by došlo k úspoře při výstavbě zhruba 12,5 mil. Kč.



## ZÁVĚR

Diplomová práce se v teoretické části zabývala možností uplatnění alternativních pojiv na bázi fluidního popílku a vysokopecních strusek jako částečných náhrad cementu v betonech pro cementobetonové kryty vozovek. Z tohoto důvodu byla provedena podrobná rešerše v oblasti cementobetonových krytů s důrazem na materiálová řešení, a dále také charakteristika zmíněných alternativních pojiv vč. možných způsobů aktivace jejich pojivých vlastností. V experimentální části práce byly navrženy čtyři receptury vozovkového betonu. V těchto betonech byl nahrazen portlandský cement z 25 % hmotnosti fluidním popílkem a dvěma typy vysokopecní strusky či jejich vzájemnou kombinací, a dále byla také ověřena možnost nahrazení jedné z frakcí kameniva ocelářskou struskou. Na navržených betonech pak byly ověřeny základní materiálové vlastnosti dle příslušných norem, přičemž byl kladen důraz na pevnost a trvanlivost. Pevnost, resp. mechanické vlastnosti byly sledovány během 7 – 90 dní zrání. Trvanlivost navržených betonů byla posouzena pomocí zkoušky povrchové nasákavosti a zkoušky odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Dále byl sledován vývoj objemové hmotnosti po dobu 7 – 90 dní zrání a také byla provedena mikroskopická analýza z důvodu stanovení pórovitosti, neboť tyto dvě vlastnosti ovlivňují pevnosti i trvanlivost. V ekonomické části práce byly stanoveny nákladové výrobní ceny navržených betonů pomocí kalkulačního vzorce, aby bylo možné následně ekonomicky posoudit vliv uplatnění vysokopecních strusek a fluidního popílku jako náhrad cementu v betonech pro cementobetonové kryty na konečnou cenu vozovky.

Výsledky této práce lze shrnout do následujících bodů:

- Nahrazení portlandského cementu z 25 % hmotnosti fluidním popílkem (N2) a kombinací fluidního popílku, vysokopecní strusky a cementu (N3) mělo pozitivní vliv na mechanické vlastnosti vozovkového betonu.
- U všech navržených betonů došlo ke snížení odolnosti proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. V případě vysokopecní strusky EcoCoal, která byla součástí betonů s označením N1 a M, bylo snížení odolnosti zanedbatelné. Kromě betonu s označením N3, tedy betonu s kombinací fluidního popílku, vysokopecní strusky a cementu, všechny betony splnily technické požadavky příslušných norem.

- U většiny betonových vzorků byl pozorován vyšší nárůst pevností po 56 dnech zrání než u referenčního vzorku. To potvrzuje všeobecný fakt, že materiály na bázi vysokopecních strusek, a hlavně fluidních popílků reagují po delší době vytvrzování.
- Bylo také zjištěno, že množství záměsové vody výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti betonu. Se zlepšující se zpracovatelností dochází ke zhoršování mechanických vlastností, ale naopak ke zvýšení trvanlivosti, neboť se ve směsi udržuje více vzduchu.
- Bylo také zjištěno, že nahrazení části cementu vysokopecní struskou či fluidním popílkem má pozitivní dopad na konečnou cenu cementobetonového krytu vozovky. To je způsobeno nižší cenou těchto odpadních produktů vůči ceně cementu.
- Je nutná úprava tuzemských technických předpisů, které momentálně neumožňují využití těchto vedlejších produktů pro výstavbu cementobetonových vozovek skupiny CB I. Touto prací bylo dokázáno, že využitím těchto produktů lze získat beton vyšší kvality. Tento přístup je ve světě velmi ojedinělý, neboť v okolních státech s obdobnými klimatickými podmínkami je jejich využití naprosto běžné.
- Z ekonomického hlediska a na základě provedeného stanovení kalkulace ceny jednotlivých variant betonů lze největší úspory dosáhnout u cementobetonového krytu s betonem spodní vrstvy, kde byla část cementu nahrazena fluidním popílkem (N2). V tomto případě došlo ke snížení pořizovacích nákladů cementobetonového krytu o přibližně 5 % oproti klasickému vozovkovému betonu. Tato varianta betonu byla nejlepší i po technické stránce, tudíž jde o celkově nejlepší variantu co do poměru cena/výkon.

V následující fázi výzkumu se ukazuje jako relevantní provedení podrobnější studie fluidního popílku z teplárny Kladno společně s kombinací tohoto typu popílku s cementem a s jiným typem vysokopecní strusky než s tím, který byl použit v této práci. Tato studie by měla být především rozsáhlejší, neboť je nutné posbírat větší soubor statistických dat. Dále je pak vhodné se zaměřit na studium chemického složení a mikrostruktury zmíněných materiálů, a blíže specifikovat jejich vliv na materiálové vlastnosti betonu. Vhodné by bylo také vyrobit tyto betony s různým množstvím záměsové vody tak, aby zpracovatelnost betonu byla stále ve třídě konzistence S1. Nakonec by bylo dobré prověřit, zda lze nahradit i vyšší část cementu než pouze 25 % hm., což by se následně významně projevilo v ekonomických úsporách při výstavbě cementobetonové vozovky.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PŘIBYLA, Ondráš. Jakou roli hrají emise CO<sub>2</sub> z výroby cementu v klimatické změně?. In: *Fakta o klimatu* [online]. 2021 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emise-vyroba-cementu>
- [2] *Snižování emisí skleníkových plynů při výrobě cementu a betonu* [online]. Praha: Svaz výrobců cementu České republiky, 2022 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://svcement.cz/wp-content/uploads/2022/06/RoadMap-dekarbonizace-SVC-C%CC%8CR-2022-final.pdf>
- [3] PHILMON, Dennis. Hungry Horse Dam and Powerplant. In: IOWA STATE UNIVERSITY. *Institute for Transportation* [online]. 2019 [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: <https://intrans.iastate.edu/app/uploads/sites/7/2021/05/08-Hungry-Horse-Dam-Powerpoint-NCC-1.pdf>
- [4] Hungry Horse Project. In: *Hess Roise* [online]. Minneapolis, 2023 [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: <https://www.hessroise.com/project/hungry-horse-project/>
- [5] SLÁNSKÝ, Bohuslav, Richard DVOŘÁK, Vít ŠMILAUER, Jan VALENTIN, Josef STRYK a Jiří GROŠEK. *Využití vysokopecní strusky pro zvýšení trvanlivosti CB krytů vozovek* [online]. 2020 [cit. 2023-09-28]. Dostupné z: <https://www.shopcdv.cz/cs/metodika-vysokopecni-struska-do-CBK>
- [6] GULIKERS, Joost. Durability aspects of fly ash and slag in concrete: Long-term practice experience with the use of blast furnace slag cement for concrete structures at Rijkswaterstaat. *Nordicconcrete* [online]. Oslo, 3 [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: [https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2012/02/Workshop-Proceeding-No-10\\_komplett-pdf.pdf](https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2012/02/Workshop-Proceeding-No-10_komplett-pdf.pdf)
- [7] SLÁNSKÝ, Bohuslav a Richard DVOŘÁK. Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek. *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2001, **2018**(6), 8-13. ISSN 1213-3116.
- [8] POSPÍŠIL, Karel. Vlastnosti cementobetonových vozovek. *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2001, **2005**(6), 18-21. ISSN 1213-3116.
- [9] *Ceskedalnice.cz: Rozdíly mezi CB a AB* [online]. ceskedalnice.cz, ©2002-2023 [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.ceskedalnice.cz/odborne-info/rozdily-mezi-cb-a-ab/>

- [10] BÍLÝ, Petr. *Progresivní betonové konstrukce v dopravní infrastruktuře*. Praha, 2020. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [11] BIRNBAUMOVÁ, Marie. *Betonové vozovky 2012: Zkušenosti s výstavbou cementobetonových krytů v ČR*. 1. vydání. Praha: Svaz výrobců cementu ČR, 2002. ISBN 978-80-260-2091-2.
- [12] HORVATH, Johannes a Jiří ŠRÁMEK. Betonové vozovky současnosti. *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2001, **2018**(6), 4-7. ISSN 1213-3116.
- [13] ČSN 73 6123-1. *Stavba vozovek - Cementobetonové kryty - Část 1: Provádění a kontrola shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [14] ČSN 73 6114. *Vozovky pozemních komunikací - Základní ustanovení pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [15] ČSN 73 6114 ZMĚNA Z1. *Vozovky pozemních komunikací - Základní ustanovení pro navrhování*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [16] GRIFFITHS, Geoffrey a John NEWMAN, ed., Ban SENG CHOO. *Advanced Concrete Technology: 22 Concrete roads and pavements* [online]. Oxford: Elsevier, 2003, 565-571 s. [cit. 2023-06-26]. ISBN 0 7506 5105 9. Dostupné z: <https://faculty.uobasrah.edu.iq/uploads/teaching/1645380226.pdf>
- [17] VESELÝ, Jakub. *Numerická analýza cementobetonové vozovky s ohledem na transportní procesy*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [18] *Betonové vozovky: Dálnice a silnice* [online]. [cit. 2023-07-03]. Dostupné z: <https://www.betonovevozovky.cz/information/dalnice-a-silnice/>
- [19] SLÁNSKÝ, Bohuslav, Ladislav VYSLOUŽIL a Petr BIJOK. *Betonové vozovky 2020: Sborník přednášek*. Whitetopping - první pilotní projekt v ČR. 1. vydání. Praha: Výzkumný ústav maltovin Praha, 2020, , pages 108-117. ISBN 978-80-906541-5-0.
- [20] ZAJÍČEK, Jan, Marie BIRNBAUMANOVÁ, Petr HÝZL, Leoš NEKULA, Dušan STEHLÍK, Václav VALENTIN, Michal VARAUS a Ludvík VÉBR. *Technologie stavby vozovek*. 1. vydání. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2014. Technická knižnice (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-59-6.
- [21] ČSN EN 206+A2. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

- [22] ČSN EN 13877-1. *Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [23] ČSN EN 197-1. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [24] KOUBÍK, Pavel. *Experimentální ověření alternativních hydraulických pojiv na bázi fluidních popílků a vysokopecních strusek*. Praha, 2022. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [25] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [26] ČSN EN 1008. *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [27] ČSN EN 934-1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 1: Společné požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [28] ČSN EN 934-2+A1. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Část 2: Přísady do betonu - Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [29] HLAVATÝ, Jiří, Vít ŠMILAUER a Richard DVOŘÁK. Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek - část I. *Silniční obzor*. Česká silniční společnost z.s., 1991, **2019**(6), 164-168. ISSN 0322-7154.
- [30] *TP 62: Katalog poruch vozovek s cementobetonovým krytem*. Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., 2010.
- [31] MARTINOLA, Giovanni, Hamid SADOUKI a Folker H. WITTMANN. Numerical Model for Minimizing Risk of Damage in Repair System. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2001, **13**(2), 121-129. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:2(121)
- [32] YANG, Kai, Mingquan ZHONG, Bryan MAGEE, Changhui YANG, Chong WANG, Xiaohong ZHU a Zhilu ZHANG. Investigation of effects of Portland cement fineness and alkali content on concrete plastic shrinkage cracking. *Construction and Building Materials*. 2017, **144**, 279-290. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.130

- [33] ERDOĞAN, Sinan T. a Tümay Ç. KOÇAK. Influence of slag fineness on the strength and heat evolution of multiple-clinker blended cements. *Construction and Building Materials*. 2017, **2017**(155), 800-810. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.08.120
- [34] SLÁNSKÝ a Marcela UHLÍŘOVÁ. PŘÍMĚSI DO BETONU PRO ZLEPŠENÍ TRVANLIVOSTI CB VOZOVEK. In: *Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (CESTI)* [online]. Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague: CESTI [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: [http://www.cesti.cz/technicke\\_listy/tl2018/2018\\_WP1\\_TL1\\_06.pdf](http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2018/2018_WP1_TL1_06.pdf)
- [35] 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.
- [36] HLA VATÝ, Jiří, Bohuslav SLÁNSKÝ, Vít ŠMILAUER a Richard DVOŘÁK. Opatření k prodloužení životnosti cementobetonových krytů vozovek - část II. *Silniční obzor*. 2019, **80**(07-08), 193-197. ISSN 0322-7154.
- [37] *Struska* [online]. 2008 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <http://www.strusky.cz/>
- [38] *Lázeňské lesy a parky Karlovy Vary: Sopečná struska* [online]. Karlovy Vary: Lázeňské lesy a parky Karlovy Vary, příspěvková organizace, 2023 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://www.llpkv.cz/goethova-vyhliodka/geostezka/sopecna-struska?noTranslate=1&lg=cs>
- [39] YILDIRIM, Irem Zeynep a Monica PREZZI. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering* [online]. 2011, **2011**, 1-13 [cit. 2022-03-02]. ISSN 1687-8086. Dostupné z: doi:10.1155/2011/463638
- [40] C. CURRY, Kenneth. Iron and steel slag. *Mineral Commodity Summaries 2020* [online]. Reston (Virginia): U.S. Geological Survey, 2020, 86-87 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: doi:10.3133/mcs2020
- [41] *Globalslag: 71% of German slag recycled in cement production in 2022* [online]. UK: Pro Global Media Ltd., 2023 [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://www.globalslag.com/news/item/324-71-of-german-slag-recycled-in-cement-production-in-2022>



- [42] PIATAK, Nadine M. a Vojtech ETTLER. CHAPTER 1. Introduction: Metallurgical Slags – Environmental Liability or Valuable Resource?. *Metallurgical Slags* [online]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2021, 1-13 [cit. 2023-08-06]. Chemistry in the Environment. ISBN 978-1-78801-887-6. Dostupné z: doi:10.1039/9781839164576-00001
- [43] KONVIČKA, Vladislav. Hornická skripta: Vysokopecní provoz železáren. In: *Nejen HORNICTVÍ.info* [online]. [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/zprac/vyspec/vyspec.htm>
- [44] SARNA, Kumar. Blast Furnace Slag. In: *Ispatguru* [online]. Greater Noida, India [cit. 2023-08-06]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-slag/>
- [45] REMUS, Rainer, Miguel A. AGUADO-MONSONET, Serge ROUDIER a Luis DELGADO SANCHO. Slag cooling and processing. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production* [online]. European Union, 2013, 297-301 [cit. 2022-03-05]. ISSN 1831-9424. Dostupné z: doi:10.2791/97469
- [46] RUCKI, Radomír. Umělé kamenivo pro stavby pozemních komunikací. In: *Silnice+mosty* [online]. Praha: PRAGOPROJEKT, a.s. [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/884-umele-kamenivo-pro-stavby-pozemnich-komunikaci/>
- [47] *TARMAC: Granulated Slag (GBS)* [online]. 2023 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://tarmac.com/products/aggregates/slag-aggregates/granulated-slag/>
- [48] *EUROSLAG: Statistics 2021* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association, 2022 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2021/>
- [49] ŠAFRATA, Jiří, Vojtěch VÁCLAVÍK a Petr MLČOCH. Ocelářská struska a její aktuální využití při výrobě betonu. *Beton* [online]. 2021(1), 41-43 [cit. 2023-08-07]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2021-1-41.pdf>
- [50] RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar. *Cement Replacement Materials : Properties, Durability, Sustainability* [online]. Springer Berlin / Heidelberg, 2013 [cit. 2023-08-08]. ISBN 978-3-642-36721-2. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1538712>
- [51] SHI, Caijun. Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2004, 16(3), 230-236 [cit. 2023-08-08]. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)

- [52] Products: Properties. In: *EUROSLAG* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/properties/>
- [53] ČSN EN 15167-1. *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1 : Definice, specifikace a kritéria shody*. Český normalizační institut, 2006.
- [54] Energetika. In: *Faktaoklimatu* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., 2023 [cit. 2023-08-26].
- [55] Popílek a jeho použití do betonu. *Svaz výrobců cementu ČR* [online]. Výzkumný ústav maltovin Praha, spol. s r.o. [cit. 2023-08-26]. Dostupné z: [https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek\\_a\\_jeho\\_pouziti\\_do\\_betonu.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf)
- [56] WESCHE, K., ed. *Fly Ash in Concrete : Properties and Performance* [online]. Taylor & Francis Group, 1990 [cit. 2023-08-26]. ISBN 9781482267051. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=183041>
- [57] BLISSETT, R.S. a N.A. ROWSON. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel* [online]. 2012, **97**, 1-23 [cit. 2023-08-26]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.03.024
- [58] Produkty: Popílek. In: *Silotransport* [online]. Praha: SILO TRANSPORT [cit. 2023-08-26]. Dostupné z: <https://www.silotransport.cz/popilek>
- [59] BENEZET, Jean-Charles, Pierre ADAMIEC a Ali BENHASSAINE. Relation between silico-aluminous fly ash and its coal of origin. *Particuology* [online]. 2008, **6**(2), 85-92 [cit. 2023-08-26]. ISSN 16742001. Dostupné z: doi:10.1016/j.partic.2007.09.002
- [60] KALOUSOVÁ, Hana. *Vliv podmínek skladování na kvalitu klasických popílků*. 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [61] LEDEROVÁ, Jaroslava, Michaela SUCHARDOVÁ, Pavel LEBER a Miroslav SVOBODA. Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. In: *Časopis stavebnictví* [online]. INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT, 2007 [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-vyuziti-prumyslovych-odpadnich-materialu-pri-vyrobe-stavebnich-hmot.html>

- [62] POLACH, Vladislav. Parní kotle. *Inovace odborného vzdělávání na středních školách zaměřené na využívání energetických zdrojů pro 21. století a na jejich dopad na životní prostředí* [online]. Plzeň: Fakulta strojní západočeské univerzity, 2011 [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11144395/>
- [63] TICHÝ, Vít. Program obnovy uhelných zdrojů v ČEZ. In: *Časopis stavebnictví* [online]. INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT, 2007 [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-program-obnovy-uhelnych-zdroju-v-cez.html>
- [64] MEJEUOMOV, Gleb G., Chang-Seon SHON, Don SAYLAK a Cindy K. ESTAKHRI. Beneficiation of stockpiled fluidized bed coal ash in road base course construction. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, **24**(11), 2072-2078 [cit. 2023-08-27]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.055
- [65] SOKOLÁŘ, Radomír a Martin NGUYEN. Vlastnosti fluidních elektrárenských popílků s ohledem na jejich použitelnost ve výrobě pálených staviv. In: *Tzbinfo* [online]. INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT, 2007 [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrearskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenyh-staviv>
- [66] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu - Část 1 : Definice, specifikace a kritéria shody*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [67] MOORE, David. The Riddle of Ancient Roman Concrete. In: *Roman Concrete* [online]. Texas, 1995 [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: <http://www.romanconcrete.com/docs/spillway/spillway.htm>
- [68] AHMAD, Zahra. Why modern mortar crumbles, but Roman concrete lasts millennia. In: *Science* [online]. [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: <https://www.science.org/content/article/why-modern-mortar-crumbles-roman-concrete-lasts-millennia>
- [69] PROVIS, John L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **114**, 40-48 [cit. 2023-09-11]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.009
- [70] ŽIVNÝ, Martin. *Kompozitní směsi pro recyklaci konstrukčních vrstev vozovky za studena s využitím upravených vysokopecních strusek*. 2019. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, dopravní fakulta Jana Pernera.

- [71] ŠEDINA, Jakub, Jan VALENTIN a Petr MONDSCHHEIN. *Recycling 2019 - Recyklace a využití stavebních odpadů jako druhotných surovin: VYUŽITÍ AKTIVOVANÝCH STRUSEK PRO TECHNOLOGIE PODKLADNÍCH VRSTEV* [online]. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 1996 [cit. 2022-03-20]. ISBN 978-80-214-5728-7. Dostupné z: [http://www.arasm.cz/dok/RECYCLING\\_2019\\_sbornik.pdf](http://www.arasm.cz/dok/RECYCLING_2019_sbornik.pdf)
- [72] PROKŠAN, Zbyněk, Michal PROCHÁZKA, Miloš FALTUS, Miroslav PROCHÁZKA a Jan VALENTIN. Využití vysokorychlostního mletí v odpadovém hospodářství. *TVIP 2017* [online]. Hustopeče [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2017/prispevky/135.pdf>
- [73] *Lavaris - Vysokorychlostní víceúrovňový mlýn* [online]. 2020 [cit. 2023-09-11]. Dostupné z: <https://cs.lavaris.eu/high-speedmultilevelmill>
- [74] ŠEDINA, Jakub. *Alternativní přísady a pojiva v technologiích prováděných za studena*. 2018. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [75] VINKLER, Marek. Voda v betonu. *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Beton TKS, 2001, **2018**(2), 49-53. ISSN 1213-3116.
- [76] HUSEIN BAYQRA, Sultan, Ali MARDANI-AGHABAGLOU a Kambiz RAMYAR. Physical and mechanical properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement (A laboratory and case study). *Construction and Building Materials* [online]. 2022, **314** [cit. 2023-09-17]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125664
- [77] HEIKAL, Mohamed, Ivon M. HELMY, Shereen AWAD a Noha S. IBRAHIM. IMPROVEMENT OF CEMENT PASTES COMPOSITE PROPERTIES CONTAINING CLAY NANOPARTICLES. *Ceramics Silikaty* [online]. 2020, **64**(4), 398-406 [cit. 2023-09-23]. ISSN 0862-5468. Dostupné z: doi:10.13168/cs.2020.0027
- [78] MUKHERJEE, Shaswata, Saroj MANDAL a U.B. ADHIKARI. Study on the physical and mechanical property of ordinary Portland cement and fly ash paste. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* [online]. 2012, **2**(3) [cit. 2023-09-23]. ISSN 1524-5845. Dostupné z: doi:10.6088/ijcser.00202030003
- [79] HANZÁLEK, Michal. *Mechanické vlastnosti cementových malt s příměsí mikromleté strusky*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

- [80] KHALIL, Kh. A. a N. M. ABD-EL-HAMEED. Physicochemical characteristics of slag rich cement pastes incorporated by-pass cement dust. *Egyptian Journal of Chemistry* [online]. 2016, **59**(4), 491-507 [cit. 2023-09-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/316215682\\_Physicochemical\\_characteristics\\_of\\_slag\\_rich\\_cement\\_pastes\\_incorporated\\_by-pass\\_cement\\_dust](https://www.researchgate.net/publication/316215682_Physicochemical_characteristics_of_slag_rich_cement_pastes_incorporated_by-pass_cement_dust)
- [81] Smršťování betonu. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu ČR [cit. 2023-09-24]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu/>
- [82] SNOECK, D., O.M. JENSEN a N. DE BELIE. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2015, **74**, 59-67 [cit. 2023-09-24]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2015.03.020
- [83] LEE, K.M., H.K. LEE, S.H. LEE a G.Y. KIM. Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research* [online]. 2006, **36**(7), 1279-1285 [cit. 2023-09-24]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2006.01.005
- [84] DEBOUCHA, Walid, Mohamed Nadjib OUDJIT, Abderrazak BOUZID a Larbi BELAGRAA. Effect of Incorporating Blast Furnace Slag and Natural Pozzolana on Compressive Strength and Capillary Water Absorption of Concrete. *Procedia Engineering* [online]. 2015, **108**, 254-261 [cit. 2023-09-24]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2015.06.145
- [85] AGHAEIPOUR, Arash a Morteza MADHKHAN. Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **141**, 533-541 [cit. 2023-09-24]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019
- [86] SUN, Jinfeng, Yu ZHANG, Gang TAN a Jennifer TANNER. Water absorption of high volume fly ash concrete prepared by local fly ash. *International congress on the chemistry of cement* [online]. Prague, 2019, **15** [cit. 2023-09-28].
- [87] GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. Assessing of water absorption on concrete composites containing fly ash up to 30 % in regards to structures completely immersed in water. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2023, **19** [cit. 2023-09-28]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2023.e02337

- [88] CANPOLAT, Orhan, Mucteba UYSAL, Yurdakul AYGÖRMEZ, Furkan ŞAHİN a Fatih ACİKÖK. Effect of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag on The Strength of Concrete Pavement. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies* [online]. 2018, 3(3), 278-285 [cit. 2023-09-28]. ISSN 2458-973X. Dostupné z: doi:10.29187/jscmt.2018.31
- [89] SAMAD, Shabab a Attuallah SHAH. Comparative Analysis of Flexural Strength and Modulus Elasticity of Sustainable Concrete Using Supplementary Cementitious Material (SCM). *Preprints* [online]. 2020 [cit. 2023-10-01]. Dostupné z: doi:10.20944/preprints202011.0634.v1
- [90] ONDOVA, Marcela, Nadezda STEVULOVA a Ludmila MECIAROVA. The Potential of Higher Share of Fly Ash as Cement Replacement in the Concrete Pavement. *Procedia Engineering* [online]. 2013, 65, 45-50 [cit. 2023-10-03]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.09.009
- [91] NOWAK-MICHTA, Aneta. Water-binder Ratio Influence on De-icing Salt Scaling of Fly Ash Concretes. *Procedia Engineering* [online]. 2013, 57, 823-829 [cit. 2023-10-03]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2013.04.104
- [92] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [93] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [94] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [95] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Červenec 2020. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [96] BETON TKS, S.R.O. *Pevnost betonu v tahu za ohybu - zkouška* [online]. 2021 [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska/>
- [97] ČSN 73 1326 ZMĚNA Z1. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [98] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace*. Prosinec 2021. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

- [99] VALENTIN, Jan a Miloš FALTUS. *Inovativní technologie využití anorganických průmyslových odpadů nebo vedlejších produktů - průběžná zpráva 2021*. Praha, 2022. Projekt TH04020043.
- [100] Produkty a služby: Energetické produkty a služby. In: *SEVEN ENERGY* [online]. Skupina Sev.en [cit. 2023-11-18]. Dostupné z: <https://www.7energy.com/cz/produkty-a-sluzby/#energeticke-produkty-a-sluzby>
- [101] RUCKI, Radomír. Betonové stavební výrobky s vysokým podílem druhotných surovin. *DESTRObeton*.
- [102] VALENTIN, Jan a Majda BELHAJ. Poznatky z alternativních návrhů složení směsí recyklace za studena. In: *Asfaltové vozovky 2021*. Sdružení pro výstavbu silnic.
- [103] *Technický list CEM I 42,5 R Mokrý* [online]. 2021 [cit. 2023-10-06]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/sites/default/files/2023-09/tl-portlandskyementcemi425rmokra-09-2023.pdf>
- [104] *Kámen Zbraslav* [online]. 1994 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://kamenzbraslav.cz/>
- [105] STACHEMA CZ S.R.O. Poralan STA. In: STACHEMA CZ S.R.O. *Stachema - stavební hmoty a chemie* [online]. 1992 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/provzdusnujici-prisady:c3/poralan-sta:p268.htm>
- [106] STACHEMA CZ S.R.O. Stacheplast. In: STACHEMA CZ S.R.O. *Stachema - stavební hmoty a chemie* [online]. 1992 [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: <https://prisadydobetonu.stachema.cz/produkty/plastifikatory:c9/stacheplast:p237.htm>
- [107] ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. 11/2021. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [108] ČSN EN 480-11. *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [109] NEŽERKA, V., P. BÍLÝ, V. HRBEK a J. FLÁDR. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2019, **103**, 252-262 [cit. 2023-12-22]. ISSN 09589465. Dostupné z: [doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.05.012)

- [110] COUFAL, Robert. POŽADAVKY NA SLOŽENÍ BETONU VYPLÝVAJÍCÍ ZE SPECIFIKACE BETONU – PROBLÉMY A ALTERNATIVY. *Beton: technologie, konstrukce, sanace* [online]. Beton TKS, **2013**(6), 22-25 [cit. 2023-12-27]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: [https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2013-6-22\\_0.pdf](https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2013-6-22_0.pdf)
- [111] SCHNEIDEROVÁ HERALOVÁ, Renáta, Lucie BROŽOVÁ a Stanislav VITÁSEK. *Ekonomika výstavbových projektů*. Praha: Powerprint, 2018. ISBN 978-80-7568-130-0.
- [112] Individuální kalkulace. In: *ČESKÉ STAVEBNÍ STANDARDY* [online]. 2005, Aktualizováno: 18.3.2008 [cit. 2023-12-10]. Dostupné z: <https://stavebnistandardy.cz/default.asp?Typ=1&ID=6&Pop=1&IDmH=%20%096947521&IDm=6728359&Menu=Manu>
- [113] PIVEC, F.E. SMP CONSTRUCTION, A.S. Vzorový kalkulační vzorec a metodika kalkulace. In: *Fakulta stavební VUT v Brně* [online]. [cit. 2023-12-10].
- [114] VEOLIA. Cena vodného a stočného. In: VEOLIA. *Pražské vodovody a kanalizace, a.s.* [online]. 2023 [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/zakaznici/cena/>
- [115] Slepá mapa ke stažení. In: *UČEBNICEmapy* [online]. 2023 [cit. 2023-12-03]. Dostupné z: <https://www.ucebnicemapy.cz/blog/slepa-mapa-ke-stazeni.-20.html>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – vznikající emise CO<sub>2</sub> při výrobě cementu, převzato z [1]</i> .....	15
<i>Obrázek 2 – schody na spárách, dálnice D1 (Rousínov), převzato z [9]</i> .....	23
<i>Obrázek 3 – typická konstrukce vozovky s CB krytem v ČR podle TP 170 (katalogový list D0-T-1 pro třídu dopravního zatížení I), převzato z [18]</i> .....	27
<i>Obrázek 4 – rozložení napětí a formování trhlin v raných fázích tuhnutí a tvrdnutí, převzato z [31]</i> ...	35
<i>Obrázek 5 – A) vztah mezi vývojem hydratačního tepla a měrným povrchem cementu, B) vztah mezi vývojem hydratačního tepla a obsahem alkálií, převzato z [32]</i> .....	36
<i>Obrázek 6 – vývoj hydratačního tepla cementu s příměsí strusky, převzato z [33]</i> .....	36
<i>Obrázek 7 – vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku kalciumaluminátů v čase, převzato z [35]</i> .....	37
<i>Obrázek 8 – vývoj stupně hydratace a pevnosti v tlaku kalciumsilikátů v čase, převzato z [35]</i> .....	38
<i>Obrázek 9 – vývoj struktury portlandského cementu během hydratace od okamžiku smíchání s vodou(A), přes tuhnutí (B) až do okamžiku tvrdnutí (C), převzato z [35]</i> .....	39
<i>Obrázek 10 – zjednodušené schéma procesu výroby železa a oceli, vlastní úprava z [39]</i> .....	43
<i>Obrázek 11 – vzduchem chlazená vysokopecní struska frakce 8/16 mm, převzato z [46]</i> .....	45
<i>Obrázek 12 – granulovaná vysokopecní struska, převzato z [47]</i> .....	46
<i>Obrázek 13 - produkce a využití vysokopecní strusky ve vybraných zemích Evropy za rok 2021, vlastní úprava z [48]</i> .....	47
<i>Obrázek 14 - produkce a využití ocelárenské strusky ve vybraných zemích Evropy za rok 2021, vlastní úprava z [48]</i> .....	49
<i>Obrázek 15 – vysokoteplotní spalování práškového uhlí, převzato z [58]</i> .....	52
<i>Obrázek 16 – fluidní spalování uhlí, převzato z [63]</i> .....	53
<i>Obrázek 17 – dvourozměrné zobrazení krystalického křemene a amorfni siliky, převzato z [35]</i> .....	57
<i>Obrázek 18 – vysokorychlostní víceúrovňový mlýn LAV650, převzato z [73]</i> .....	59
<i>Obrázek 19 - závislost pevnosti v tlaku na vodním součiniteli, převzato z [75]</i> .....	61
<i>Obrázek 20 – autogenní deformace cementových past s popínkem a bez popínku, vlastní úprava [82]</i> .	64
<i>Obrázek 21 – autogenní deformace cementových past s vysokopecní struskou a bez strusky, vlastní úprava z [82]</i> .....	64
<i>Obrázek 22 – nasákavost betonu na jednotku plochy po 28 dnech zrání, vlastní úprava z [84]</i> .....	65
<i>Obrázek 23 – krychelná pevnost v tlaku horní a spodní vrstvy CBK po 59 dní zrání, převzato z [5]</i> .....	67
<i>Obrázek 24 – vývoj pevnosti v tlaku po dobu 90 dní, převzato z [34]</i> .....	68
<i>Obrázek 25 – odolnost proti CHRL na vývrtech po 59 dnech zrání, převzato z [5]</i> .....	70
<i>Obrázek 26 – měření poklesu (sednutí) čerstvé betonové směsi, vlastní tvorba</i> .....	74
<i>Obrázek 27 – zkouška povrchové nasákavosti, vlastní tvorba</i> .....	76
<i>Obrázek 28 – optický stereo mikroskop ZEISS Axio Zoom. V16, vlastní tvorba</i> .....	77

<i>Obrázek 29 – příklad snímku z optického stereo mikroskopu včetně vyznačených pórů, vlastní tvorba</i>	78
<i>Obrázek 30 – obrazová analýza v softwaru ImageJ (všechny viditelné póry červeně), vlastní tvorba</i>	78
<i>Obrázek 31 – zkušební těleso v okamžiku zatěžování a porušení, vlastní tvorba</i>	79
<i>Obrázek 32 – čtyřbodové uspořádání zkoušky v tahu ohybem, převzato z [96]</i>	80
<i>Obrázek 33 – stav tělesa před a po zkoušce pevnosti v tahu ohybem se čtyřbodovým uspořádáním, vlastní tvorba</i>	81
<i>Obrázek 34 – teplotní cyklus, převzato z [97]</i>	82
<i>Obrázek 35 – klimatizační komora CTS C-40/350/S a uložení vzorků, vlastní tvorba</i>	83
<i>Obrázek 36 – zkušební tělesa po vyndání z klimatizační komory po 25 cyklech a po slití do Petriho misek, vlastní tvorba</i>	84
<i>Obrázek 37 – stav zkušebních těles po ukončení zkoušky odolnosti, vlastní tvorba</i>	85
<i>Obrázek 38 – část recyklační linky na haldě Koněv, převzato z [101]</i>	87
<i>Obrázek 39 – ukázka použitého přírodního drobného a hrubého kameniva, vlastní tvorba</i>	89
<i>Obrázek 40 – ocelárenská struska frakce 8/16 mm, vlastní tvorba</i>	89
<i>Obrázek 41 – výroba betonové směsi v míchačce a uložení naplněných plastových forem, vlastní tvorba</i>	92
<i>Obrázek 42 – zkušební tělesa jedné směsi krátce po odbednění, vlastní tvorba</i>	93
<i>Obrázek 43 – uložení zkušebních těles, vlastní tvorba</i>	93
<i>Obrázek 44 – objemová hmotnost betonových vzorků vč. směrodatných odchylek, vlastní tvorba</i>	94
<i>Obrázek 45 – povrchová nasákavost betonových vzorků, vlastní tvorba</i>	95
<i>Obrázek 46 – snímky vyrobených betonů z optického stereo mikroskopu, vlastní tvorba</i>	97
<i>Obrázek 47 – krychlená pevnost v tlaku vyrobených betonů po dobu 90 dní zrání, vč. vynesných směrodatných odchylek, vlastní tvorba</i>	98
<i>Obrázek 48 - válcová pevnost v tlaku vyrobených betonů po 28 dnech zrání, vč. vynesných směrodatných odchylek, vlastní tvorba</i>	100
<i>Obrázek 49 – pevnost v tahu za ohybu vyrobených betonů po 90 dnech zrání, vlastní tvorba</i>	101
<i>Obrázek 50 – odolnost vyrobených betonů proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám, vlastní tvorba</i>	102
<i>Obrázek 51 – závislost odolnosti proti vodě a CHRL na obsahu účinného vzduchu, převzato z [110]</i>	104
<i>Obrázek 52 – kalkulační vzorec, vlastní úprava z [111]</i>	108
<i>Obrázek 53 – fáze výroby betonové směsi, vlastní tvorba</i>	113
<i>Obrázek 54 - slepá mapa ČR s vyznačenými prodejci, vlastní úprava z [115]</i>	115
<i>Obrázek 55 – kolový nakladač Volvo L90E, vlastní tvorba</i>	119

<i>Obrázek 56 – rozbor ceny položky č. 581151112 Kryt cementobetonový vozovek skupiny CB I tl. 270 mm, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II) .....</i>	<i>123</i>
<i>Obrázek 57 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu REF pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II) .....</i>	<i>124</i>
<i>Obrázek 58 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu N1 pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II) .....</i>	<i>125</i>
<i>Obrázek 59 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu N2 pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II) .....</i>	<i>126</i>
<i>Obrázek 60 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu N3 pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II) .....</i>	<i>127</i>
<i>Obrázek 61 – rozbor ceny cementobetonového krytu skupiny CB I tl. 270 mm s variantou betonu M pro spodní vrstvu krytu, vlastní úprava výstupu ze softwaru KROS 4 (CS ÚRS 2023/II) .....</i>	<i>128</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – srovnání celkových nákladů CB a AB krytů na vybraných úsecích dálnic, vlastní úprava z [11].....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 2 – analýza dopadů betonové a asfaltové vozovky na životní prostředí za 30 let, vlastní úprava z [12] .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 3 – členění cementobetonových krytů, vlastní úprava z [13].....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 4 – vlastnosti cementů do vozovkových betonů, vlastní úprava z [13] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 5 - hlavní požadavky na kamenivo do cementobetonových krytů dle ČSN EN 12620+A1, vlastní úprava z [25].....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 6 – požadavky na ztvrdlý beton, vlastní úprava z [22] .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 7 – základní požadavky na CBK ve vybraných evropských zemích, vlastní úprava z [36].....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 8 – chemické složení vybraných metalurgických strusek (% hm.), vlastní úprava z [51; 52]..</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 9 – požadavky norem pro využití mleté granulované vysokopecní strusky jako příměsi, vlastní úprava z [23; 53] .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 10 – požadavky na popílky pro jejich použití do betonu, vlastní úprava z [25; 55; 66] .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 11 – chemické složení vybraných tuzemských popílků, vlastní úprava z [65] .....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 12 – Lyseho pravidlo: vliv maximálního zrna kameniva na dávku záměsové vody, převzato z [35].....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 13 – pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech zrání v prostředích C1-C3, vlastní úprava z [89] ..</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 14 – Pevnosti v tlaku po 7 a 28 dnech zrání, vlastní úprava z [88].....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 15 – odolnost betonových vzorků s popílkem vůči CHRL s různým w/b, vlastní úprava z [91] .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 16 – zatřídění směsí dle sednutí kužele, vlastní úprava z [21] .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 17 – chemické složení vysokopecní strusky EcoCoal (analýza XRF), vlastní úprava z [99]... ..</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 18 – chemické složení fluidního úletového popílku Kladno (analýza XRF), převzato z [24] ..</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 19 – chemické složení vysokopecní strusky Kladno (analýza XRF), vlastní úprava z [102] ...</i>	<i>87</i>
<i>Tabulka 20 – fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Mokrý, převzato z [103].....</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka 21 – složení jednotlivých směsí, vlastní tvorba.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabulka 22 – pórovitost vyrobených betonů, vlastní tvorba.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka 23 – jednotkové ceny materiálů a dopravy, vlastní tvorba: ceny převzaté od prodejců.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabulka 24 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením REF, vlastní tvorba .....</i>	<i>116</i>
<i>Tabulka 25 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením N1, vlastní tvorba .</i>	<i>116</i>
<i>Tabulka 26 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením N2, vlastní tvorba .</i>	<i>117</i>

<i>Tabulka 27 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením N3, vlastní tvorba..</i>	<i>117</i>
<i>Tabulka 28 - kalkulace přímého materiálu na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi s označením M, vlastní tvorba ...</i>	<i>118</i>
<i>Tabulka 29 – kalkulace přímých mezd na 1 m<sup>3</sup> betonové směsi, vlastní tvorba: výše uvažovaných měsíčních odměn převzaty od betonárny.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabulka 30 – výrobní režie, vlastní tvorba: náklady převzaty od betonárny .....</i>	<i>120</i>
<i>Tabulka 31 – výše ceny 1 m<sup>3</sup> jednotlivých betonových směsí, vlastní tvorba .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabulka 32 – shrnutí jednotkových cen a úspor cementobetonových krytů s navrženými variantami betonu, vlastní tvorba.....</i>	<i>129</i>