



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VLIV DÁVKOVÁNÍ R-MATERIÁLU ZA STUDENA NA VÝSLEDNOU TEPLITU ASFALTOVÉ SMĚSI

THE INFLUENCE OF COLD RAP ADDITION ON THE RESULTING TEMPERATURE OF THE ASPHALT MIXTURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Bocák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací
Student: **Tomáš Bocák**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv dávkování R-materiálu za studena na výslednou teplotu asfaltové směsi

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V bakalářské práci bude zjišťován vliv mísení směsi studeného kameniva se směsí horkého kameniva na výslednou teplotu směsi kameniva, čímž bude simulováno přidávání studeného R-materiálu do za horka vyráběné asfaltové směsi. V rešeršní části budou uvedeny informace o možnostech dávkování R- materiálu do asfaltové směsi.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce bude simulovat vliv dávkování studeného R-materiálu do asfaltové směsi vyráběné za horka. Bude využita směs kameniva nahřátá na vysokou teplotu a směs studeného kameniva, přičemž dojde k jejich smísení a zjištění výsledné teploty.

Seznam doporučené literatury a podklady:

ČSN EN 12697-35

ČSN EN 13108-8

ČSN 73 6141

Internetové zdroje

Předchozí bakalářské a diplomové práce

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 29. 11. 2022

L. S.

prof. Dr.techn. Ing. Michal Varaus
vedoucí ústavu

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je, v laboratorních podmínkách, simulovat vliv dávkování studeného R-materiálu do horké směsi kameniva. V teoretické části budou popsány možnosti dávkování R-materiálu při výrobě asfaltové směsi, společně se zásadami při návrhu nové asfaltové směsi. V praktické části bude mnou navrženým postupem, studený podíl kameniva míchán s horkým podílem kameniva. Výsledkem měření budou výsledné teploty směsi kameniva a jejich vzájemné porovnání.

KLÍČOVÁ SLOVA

R-materiál, dávkování, teplota, asfaltová směs, míchání.

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to simulate the effect of dosing cold reclaimed asphalt into a hot aggregate mixture, under laboratory conditions. The theoretical part will describe the possibilities of reclaimed asphalt dosing in the production of asphalt mix, together with the principles for the design of a new asphalt mix. In the practical part, by my proposed procedure, the cold portion of aggregate will be mixed with the hot portion of aggregate. The measurements will result in the final aggregate mixture temperatures and their comparison.

KEYWORDS

Reclaimed asphalt, dosage, temperature, asphalt mixture, mixing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOCÁK, Tomáš. *Vliv dávkování R-materiálu za studena na výslednou teplotu asfaltové směsi*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv dávkování R-materiálu za studena na výslednou teplotu asfaltové směsi* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 5. 2023

Tomáš Bocák
autor

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Ondřeji Daškovi Ph.D. za odborné vedení práce a za cenné rady a připomínky. Také bych chtěl poděkovat své rodině, která mě v mém studiu podporovala.

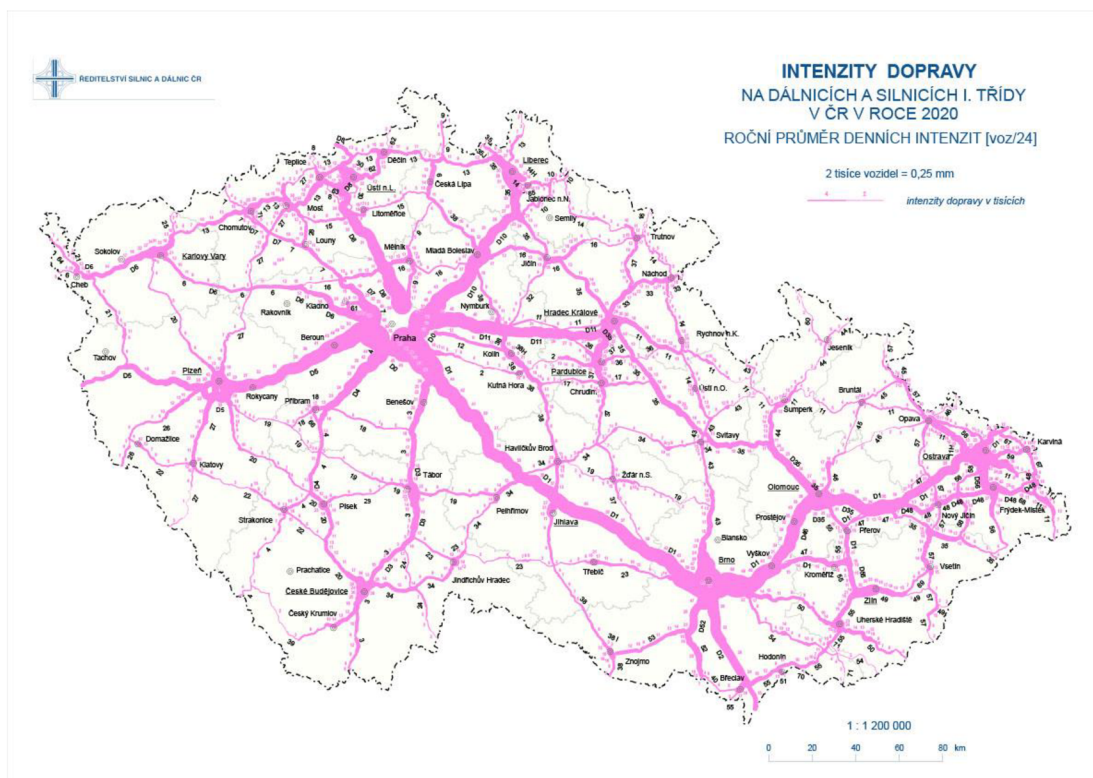
Obsah

1	Úvod.....	10
2	Rešerše Literatury.....	11
2.1	Základní názvosloví a definice [6].....	11
2.1.1	Asfaltová směs.....	11
2.1.2	Znovuzískaná asfaltová směs.....	11
2.1.3	R-materiál.....	11
2.1.4	Zásoba/halda R-materiálu.....	12
2.1.5	Zrnitost kameniva.....	12
2.1.6	Zrnitost R-materiálu.....	12
2.2	Značky a zkratky.....	12
2.2.1	Velikost horního síta kameniva v R-materiálu (D).....	12
2.2.2	Maximální zrnitost R-materiálu (U).....	12
2.2.3	Označení zrnitosti R-materiálu ($U_{RA} d/D$).....	12
2.3	Způsoby znovuzískávání R-materiálu.....	13
2.3.1	Bourání pneumatickými kladivý.....	13
2.3.2	Zásady skladování R-materiálu.....	15
2.4	Možnosti dávkování a recyklace R-materiálu.....	16
2.4.1	Recyklace na místě za studena.....	16
2.4.2	Recyklace na místě za tepla.....	18
2.4.3	Recyklace v míchacím centru za studena.....	20
2.4.4	Recyklace v míchacím centru za horka.....	21
3	Cíle bakalářské práce.....	24
4	Použité zkušební metody a postupy.....	25
4.1	Sítový rozbor směsi kameniva.....	25
4.1.1	Provedení sítového rozboru.....	25
4.2	Temperování směsí.....	26
4.2.1	Nahřívání horkého podílu kameniva.....	26
4.2.2	Postup navážení, nahřátí a kontroly teploty horké směsi.....	26
4.2.3	Temperování studeného podílu kameniva.....	27
4.2.4	Postup navážení, temperování a kontroly teploty studené směsi.....	27
4.3	Míchání směsi.....	27
4.3.1	Postup míchání v laboratorní míchačce.....	27

4.3.2	Pomůcky pro vyhotovení	28
4.4	Měření teploty směsi	28
4.4.1	Měření termokamerou	28
4.4.2	Pomůcky pro vyhotovení měření termokamerou.....	29
4.4.3	Měření vpichovým teploměrem	29
4.4.4	Pomůcky pro vyhotovení	30
5	Použité materiály	31
5.1	Směs kameniva vhodného pro ACO 11+	31
5.1.1	Výsledky síťového rozboru:	31
5.1.2	Výsledná čára zrnitosti	32
5.2	Voda	32
6	Výsledky zkoušek.....	33
6.1	Teoreticky naměřené hodnoty v bakalářské práci.....	33
6.1.1	Výpočet pomocí množství a teploty materiálu	33
6.1.2	Výpočet pomocí kalorimetrické rovnice	34
6.2	Postupné ochlazení celé navážky směsi	36
6.3	Poměr kameniva 90/10	41
6.4	Poměr kameniva 85/15	42
6.5	Poměr kameniva 80/20	43
6.6	Poměr kameniva 70/30	44
6.7	Poměr kameniva 50/50	45
6.8	Navlhčený poměr 90/10.....	46
6.9	Navlhčený poměr 70/30.....	47
6.10	Korelace naměřených hodnot.....	49
7	Závěr	54
8	Seznamy	55
8.1	Seznam použité literatury	55
8.2	Seznam obrázků	59
8.3	Seznam tabulek	60
8.4	Seznam grafů.....	61

1 Úvod

V posledních letech dochází k velkému rozvoji dopravních staveb, což znamená také zvýšený počet udržovacích prací spojených s komfortem a bezpečností provozu na pozemních komunikacích. [1] Jedním z důvodů zhoršení kvality asfaltových krytů pozemních komunikací je vysoký nárůst intenzit dopravy na Českých silnicích. Ředitelství silnic a dálnic ČR (ŘSD) zajišťuje v pětiletých intervalech celostátní sčítání dopravy (CSD), a to na dálnicích, silnicích I. třídy v jeho správě a na vybraných silnicích II. a III. třídy. Z výsledků sčítání vyplývá, že intenzita dopravy neustále významně narůstá. Oproti poslednímu sčítání dopravy v roce 2016 je to zhruba o 10 %, a to i přes faktor ovlivnění téhle intenzity důsledkem pandemie koronaviru, který měl za následek částečného zklidnění intenzity. Z výsledků sledování je patrný nárůst intenzity skupiny osobní dopravy o 9 % a skupiny lehké nákladní dopravy o 16 %. Průměrná intenzita dopravy na dálničních sítí je cca 30 700 voz/24 h, na silnicích I. třídy 9100 voz/24 h, na silnicích II. třídy 2900 voz/24 h. Na pentogramu intenzit dopravy z roku 2020, představeným Ředitelstvím silnic a dálnic ČR, je vyobrazen nárůst dopravy na českých silnicích. [2]



Obrázek 1: Pentogram intenzit dopravy [2]

Velká část silniční sítě v České republice, ale i v Evropské unii, je tvořena asfaltovým krytem. Tenhle stavební materiál je tvořen primárně kamenivem a asfaltovým pojivem. A právě chování asfaltového pojiva, jakožto viskoelastického materiálu, je klíčové pro tvorbu poruch od zatížení dopravou, a tím snižování kvality asfaltobetonového krytu a zhoršení bezpečnosti a komfortu přepravovaných osob na vozovce.

Při nutnosti výměny asfaltového krytu je využíváno silničních fréz, které odebírají materiál pomocí rotačních bubnů ve spodní části stroje. Pro potřeby výstavby nových silničních sítí a opravy stávajících, při snaze udržení nákladů na minimu, je získaný R-materiál klíčový [3]. Veškerý materiál získaný z již existujících asfaltových krytů vozovek, je při dodržení příslušných technologických postupů, technických podmínek a norem, plnohodnotným stavebním materiálem, u kterého lze předpokládat jeho chemicko-fyzikální vlastnosti. [4] Využitím R-materiálu, jakožto stavebního odpadu, dokážeme ekologicky přispět k udržitelnosti neobnovitelných zdrojů a ochraně životního prostředí. Nejhodnotnější pozitiva pro životní prostředí jsou: Zamezení skladování velkoobjemové sutě na skládkách, a tím ušetření jinak využitelných ploch, ušetření potřebné energie na vytěžení, převoz a výrobu asfaltové směsi.[5]

2 Rešerše Literatury

2.1 Základní názvosloví a definice [6]

2.1.1 Asfaltová směs

Jedná se o směs asfaltového pojiva, hrubého a jemného kameniva s příměsí fileru, zajišťujícího lepší konzistenci výsledné směsi.

2.1.2 Znovuzískaná asfaltová směs

Je materiál získaný frézovacími či jinými demoličními pracemi asfaltových vrstev pozemních komunikací, dopravních a jiných ploch, nebo také jako materiál z nadbytečné či nevyhovující šarže vyrobené směsi

2.1.3 R-materiál

R-materiálem rozumíme již znovuzískanou asfaltovou směs, u které bylo pomocí zkoušek vyhodnocena jeho vhodnost k použití ve výrobě nové asfaltové směsi. Vhodnost směsi je zhodnocena po odzkoušení, posouzení a klasifikace dle normy ČSN EN 13108-8 ed.2

2.1.4 Zásoba/halda R-materiálu

Množství skladovaného R-materiálu s posouzenými/doloženými vlastnostmi, který je dále vhodný k použití ve výrobě nové asfaltové směsi.

Rozlišuje se:

- R-materiál určený k zvláštním účelům nebo R-materiál z dané asfaltové směsi s konkrétními vlastnostmi
- R-materiál, který je skladován a průběžně odebírán a doplňován. Zde je sledování požadovaných vlastností zajištěno kontinuálními průkaznými zkouškami materiálu.

2.1.5 Zrnitost kameniva

Udává velikost zrn kameniva v R-materiálu, vyjádřené hodnotami velikosti síta spodního (d) a horního (D). Značí se jako d/D

2.1.6 Zrnitost R-materiálu

Největší velikost částic znovuzískané asfaltové směsi v R-materiálu. Vyjádřeno velikostí síta (U)

2.2 Značky a zkratky

2.2.1 Velikost horního síta kameniva v R-materiálu (D)

Značí velikost síta v mm. Jedná se o větší síto z těchto dvou sít: Nejmenší síto s propadem 100% dělené 1,4 nebo nejmenší síto s propadem 85 %.

2.2.2 Maximální zrnitost R-materiálu (U)

Značí velikost nejmenšího síta v mm, kterým propadne 100 % zrn asfaltové směsi.

2.2.3 Označení zrnitosti R-materiálu ($U RA d/D$)

První písmeno značí zrnitost materiálu. Následuje zkratka RA, z anglického „Reclaimed asphalt“. Popřípadě lze hledat v zahraniční odborné literatuře pod zkratkou RAP, vyjadřujícího „Reclaimed asphalt pavement“. Za zkratkou RA následuje zrnitost kameniva d/D . Přičemž pro R-materiál se d , téměř v všech případech, rovná 0.

Zde je příklad označení R-materiálu:

40 RA 0/8 mm

Zde se jedná o R-materiál s velikostí horního síta 8 mm a velikostí zrna směsi 40 mm. [6][7]

2.3 Způsoby znovuzískávání R-materiálu

R-materiál pro výrobu nové asfaltové směsi může být z přebytečné výroby, kdy dokážeme předpokládat jeho vlastnosti, nebo jako znovuzískaný materiál z již existující asfaltového povrchu. R-materiál z krytu komunikace je možné bourat pomocí kladiv nebo frézovat silničními frézami. Na obrázku je znázorněn koloběh recyklovaného materiálu v asfaltových krytech.



Obrázek 2: Schéma koloběhu recyklovaného materiálu [11]

2.3.1 Bourání pneumatickými kladivy

Při bourání kladivy vzniká problém promísení jednotlivých vrstev vozovky. Produktem bourání jsou velké kry, které je potřeba následně předrtit a přetřídit podle frakce. Třídí se nejčastěji dvě výchozí frakce, a to frakce 0/11 a 0/22. [9]



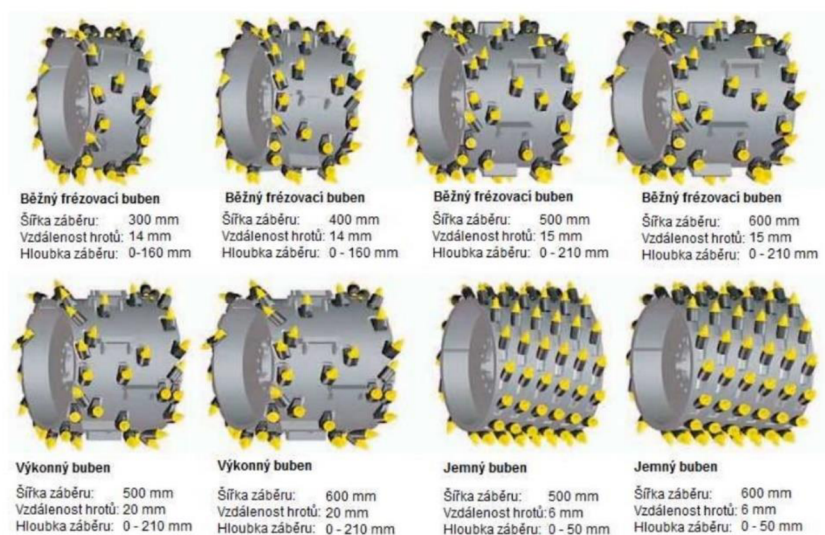
Obrázek 3: Bourání krytu vozovky pomocí kladiva [8]

Frézování asfaltových vrstev využitím silničních fréz je materiál ze staré nebo poškozené komunikace odebírán po jednotlivých vrstvách. Tato technologie je výhodná především v případě, kdy potřebujeme udržet niveletu komunikace odebráním vrstvy asfaltového krytu a

následným položením nové vrstvy ve stejné tloušťce. Popřípadě je možné odfrézováním a položením větší, či menší vrstvy asfaltové směsi niveletu pouze upravit. [10]

Odběr materiálu je realizován pomocí bubnu s hroty ve spodní části silniční frézy. Dle potřeb a rozsahu prací se volí frézy s různou šířkou a hloubkou záběru frézovacího bubnu. Pro drobnější úpravy obrusné vrstvy krytu se volí silniční fréza s "jemným bubnem". Jemný buben se od standardního bubnu liší nižším počtem a menší velikostí frézovacích nožů, ale také menší šířkou, a hlavně hloubkou záběru. Standardní frézy dosahují příčného záběru od jednoho do dvou metrů a hloubky záběru až 350 mm. [10] Tyhle frézy jsou využívány i pro technologie recyklace „na místě“.

Na obrázcích 3 a 4 jsou ukázky typických frézovacích bubnů a silniční frézy.



Obrázek 5: Druhy frézovacích bubnů [12]



Obrázek 4: Silniční fréza wirtgen w2100 [13]

2.3.2 Zásady skladování R-materiálu

Vyfrézovaný materiál z vozovky před zpracováním je potřeba uložit na skládce, která je zpravidla v blízkosti míchacího centra. Je proto nutné dodržovat zásady pro skladování tohoto materiálu. Pravidla pro skladování materiálu se řídí podle normy ČSN 73 6141 „Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí“. Rozlišuje se skladování neupravené znovuzískané asfaltové směsi a skladování jednotlivých frakcí R-materiálu.

Před úkladem asfaltové směsi je nutné ji zbavit znečišťujících součástí. Mezi ně mohou patřit například části obrubníků, úlomky betonu a jiné materiály. Cizorodé látky a jejich obsah jsou přímo definovány v normě ČSN EN 13108-8 ed. 2. [15]

Materiál se ukládá na hromadu do maximální výšky 3,5m. Skladovaný materiál je shrnován na oddělené skládky s betonovým nebo asfaltovým podkladem, k zajištění 1. stupně homogenizace. Větší kusy materiálu jsou bourány pomocí kladiv. Skladuje se nejen vyfrézovaný materiál, ale i směsi z nepovedených várek na obalovně nebo nadbytečné výroby asfaltové směsi. Tenhle materiál je ještě teplý položen v tenké tloušťce a následně po ochlazení rozpojen a urovnán na hromadu. Pro skladování různých frakcí kameniva jsou skládky odděleny opět na vybetonovaný nebo vyasfaltovaný podklad s vyspádováním pro zajištění odtoku dešťové vody. Materiálu, kterému je deklarován maximální velikost zrna $U \leq 8$ mm musí být zajištěno zastřešení. Frakce R-materiál, s pojivem z modifikovaných asfaltů, je vhodné skladovat na oddělené ploše. [14]



Obrázek 6: Skládka R-materiálu 16 RA 0-11, obalovna Zádveřice

2.4 Možnosti dávkování a recyklace R-materiálu

Obecně se rozlišují 4 druhy recyklace asfaltového materiálu. A to

- Na místě za studena
- Na místě za horka
- V míchacím centru za studena
- V Míchacím centru za horka [15]

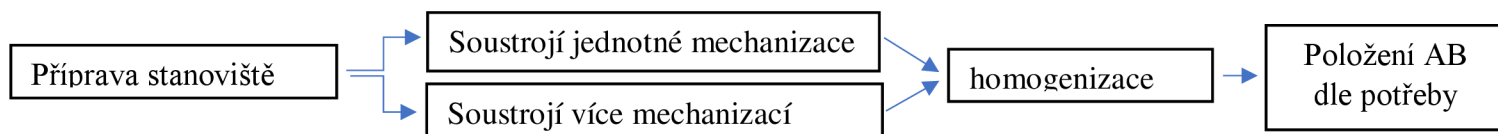
Přičemž každá z těchto metod má svá specifika a je nutné dodržovat dané předpisy ve smyslu poměru, teploty, vlhkosti, znečištění materiálu a druhu přidaného aditivního materiálu (pojiva) pro zajištění potřebných vlastností výsledné asfaltové směsi.

2.4.1 Recyklace na místě za studena

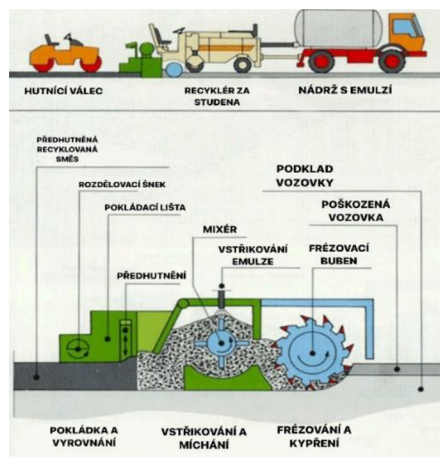
Pojem „recyklace na místě za studena“ znamená metodu, při které se sanace asfaltových vrstev provádí in situ pomocí silniční frézy a následně se vyfrézovaný materiál bez předehřátí míchá s novou asfaltovou směsí v míchacím finišeru. Velkou výhodou této metody je snížení potřeby přemístování velkého množství materiálu při pokládce. Výjimkou jsou zde mechanizace a aditiva.

Pro zlepšení přilnutí asfaltového pojiva k R-materiálu se využívají asfaltové emulze, které jsou udávány jako procentuální podíl v nově vyhotovené asfaltové směsi. V případě nestabilních směsí je možné přidávat vápno, nehašené vápno nebo cement. Podle TP 208 je stanoveno, že asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt s přísadkou cementu se využívá pro společnou recyklaci vrstev obsahujících asfaltové pojivo a vrstev bez asfaltového pojiva. Naopak asfaltová emulze a zpěněný asfalt bez přísadky cementu se využívají pro recyklaci vrstev s asfaltovým cementem. [17]

Proces míchání vyfrézovaného recyklátu probíhá na místě v soustrojí více mechanizací, v nichž dochází odděleně k mělnění/drcení, míchání se stabilizačním činidlem v množství přibližně 2% a pokládkou bez dohřívání směsi. Nebo v jednom stroji, kde dochází k drcení, míchání a pokládce (viz schéma).



Obrázek 7: Schéma recyklace za studena [18]



Obrázek 8: Technologický postup při recyklaci za studena na místě [18]

Recyklaci lze provést dvěma způsoby. Částečně po jednotlivých vrstvách, při hloubce záběru zubů frézovacího bubnu 50 mm -100 mm a v hloubce plné, kdy jsou odebírány také podkladní vrstvy a ložné vrstvy. [18]

Obecně lze prohlásit, že tahle technologie je příznivá k udržitelnosti životního prostředí a má své opodstatněné místo v oboru recyklace vozovek.

Složení a návrh recyklované směsi

Pro správný návrh recyklované asfaltové směsi je nutné stanovit jednotlivé vlastnosti původní asfaltové směsi a zpětně získaného materiálu asfaltového pojiva z dané směsi. Zkouškami původní asfaltové směsi jsou:

- Obsah rozpustného pojiva (dle ČSN EN 12697-1)
- Zrnitost směsi kameniva (dle ČSN EN 12697-2 + A1)
- Stanovení maximální objemové hmotnosti (dle ČSN EN 12697-5 + A1)
- Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa (dle ČSN EN 12697-6 + A1)
- Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi.

Dále se provádí zkoušky získaného asfaltu z původní asfaltové směsi. Těmito zkouškami jsou:

- Penetrace jehlou (dle ČSN EN 1426)
- Bod měknutí – metoda kroužek a kulička (dle ČSN EN 1427)
- Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) (dle ČSN EN 14770).

Pro návrh recyklované směsi je nutné splňovat následující požadavky:

- Zrnitost, která se určuje pro různé asfaltové směsi v závislosti na použití v různých vrstvách
- Maximální mezerovitost V_{\max} (%)
- Minimální mezerovitost V_{\min} (%)
- Maximální hloubka koleje PRD_{AIR} (%)
- Maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (%).

Kontrola hodnot poměrné hloubky koleje PRD_{AIR} a WTS_{AIR} jsou požadované při třídách dopravního zatížení. Pro ACO 11+ jsou to třídy II, III a IV. [39][40][41]

2.4.2 Recyklace na místě za tepla

Recyklace na místě za tepla je technologie, prováděna na místě určená pro sanaci povrchu vozovek při minimálním využití dalších materiálů. Lze ji rozdělit do 4 kroků:

1. Změkčení povrchu vozovky
2. mechanické odstranění povrchového materiálu
3. míchání materiálu s recyklačním činidlem, asfaltovým pojivem nebo novou směsí
4. pokládka a hutnění směsi na povrch odebrané vozovky

Tahle recyklace je primárně určená k opravám povrchové části vozovky, které nejsou důsledkem strukturálních poruch asfaltového krytu. [19] Příklady těchto poruch mohou být:

- vyjeté koleje
- výtluhy
- ztráta hmoty z krytu
- ztráta protismykových vlastností. [20]

Metoda se může praktikovat jako jednorůchodová nebo víceřůchodová. Při jednorůchodové recyklaci je recyklovaný materiál mísen s předbaleným kamenivem a následně pokládán na

vozovku (metoda remix). U víceprůchodové metody je na obnovený povrch přibalena další obrusná vrstva (metoda remix plus). [19]

Prohřívání směsi je prováděno pomocí vozidel vybavených infrazářiči, které šetrně prohřívají recyklovanou směs do stanovené hloubky a teploty podle technických podmínek a klimatických podmínek. Interval potřebných teplot před hutněním se pohybuje od 120 °C do 145 °C. Optimální počet a rychlost pojezdů infrazářičů nad recyklovaným asfaltovým krytem se volí na základě vstupních parametrů. Nejvyšší povolená teplota měřená na povrchu asfaltové směsi nesmí překročit 160 °C, aby nedocházelo k přepalování asfaltového pojiva v recyklované směsi. Rozpojení směsi je nutné provést ihned po přejezdu zářičů. [21]

Pro předbalenou směs kameniva dodávanou na stavbu také platí mezní rozmezí teplot od 135°C do 170 °C. Práce na stavbě je nutné co nejpřesněji naplánovat, aby byly stanovené teploty dodrženy. Toho je dosaženo překrytím korby tahače plachtou a omezení doby přepravy při 15°C

na 1 hodinu. Použitím homogenizátoru směsi je doba přepravy prodloužena na 2,5 hodiny. [22]

Složení a návrh směsi

Pro optimální volbu nové asfaltové směsi je nutné provést sadu testů pro určení vlastností odebraného materiálu z vozovky. Proces se sestává z odběru vzorku staré směsi a vyhodnocení, navrhovaného recyklačního činidla a navrhovaného kameniva.

1. vyhodnocení odebraných materiálů
2. Kategorizace druhu a určení množství recyklovaného materiálu
3. stanovení potřeby přidání dalšího kameniva a asfaltového pojiva
4. příprava a zkoušení navržené směsi
5. Výběr optimální kombinace nového kameniva, asfaltového pojiva a recyklačního činidla.

Procentuální množství recyklovaného materiálu ve směsi při technologii za tepla je obvykle velmi vysoká. Běžně se pohybuje v rozmezí 80 % - 100 %. Při sto procentní recyklaci není potřeba určovat poměr přidaného kameniva. Procento vzduchových mezer je přibližně 4 %. Nicméně Úspěšně provozované jsou i vozovky se 6 % vzduchových mezer. [23]

2.4.3 Recyklace v míchacím centru za studena

Při technologii recyklace v míchacím centru za studena je zapotřebí vyfrézovaný materiál z vozovky před zpracováním skladovat na skládce, která je zpravidla v blízkosti míchacího centra. Je proto nutné dodržovat zásady pro skladování tohoto materiálu. Pravidla pro skladování materiálu se řídí podle normy ČSN 73 6141 „Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí“.

Recyklace v míchacím centru za studena je ekonomicky výhodná, udržitelná technologie rekonstrukce asfaltových vozovek. Recyklovaný materiál je do míchacího ústrojí obaloven přidáván s novým materiálem v přesném poměru frakcí, který prošel fází sušení v sušicím bubnu. Teplota recyklátu není upravovaná a recyklát je přidáván s teplotou, kterou měl v době skladování.

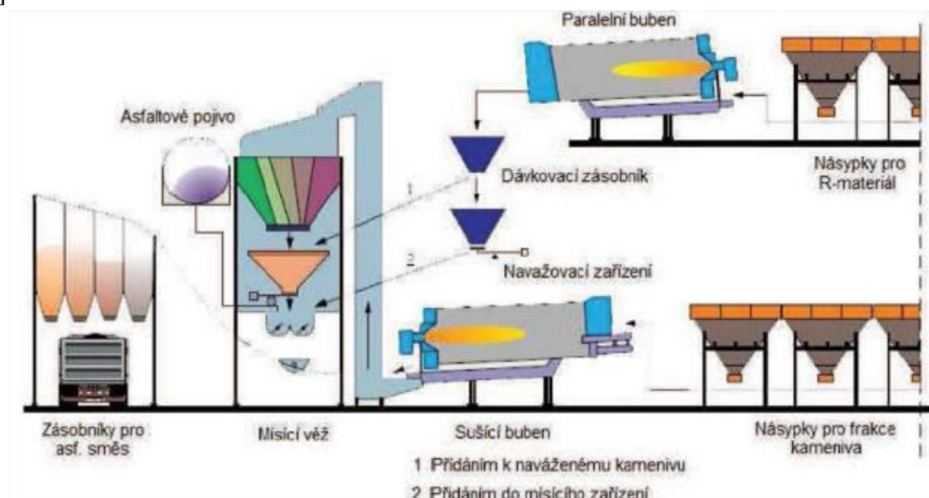
Tahle technika tudíž vyžaduje podstatně méně energie k výrobě, a tím i menším emisím skleníkových plynů než metoda s přehřevem. Obě metody recyklace, jak za studena na místě, tak za studena v míchacím centru, vyžadují poměrně malé množství potřebného dodaného pojiva (řádově od 2 do 2,5 %) ve formě zpěněného asfaltu, asfaltové emulze a vody, k dosažení optimální hustoty a vazby částic. Pomocí látek na bázi cementu lze také zvyšovat krátkodobou a dlouhodobou tuhost výsledné asfaltové směsi. [24]

Pro správné dávkování jednotlivých materiálů jsou dávkovací jednotky propojeny s řídicí věží, kde jsou veškeré údaje zobrazovány na počítači operátorovi. Ten spouští jednotlivé dávkovače a určuje množství veškerého materiálu dle požadované receptury na zakázku. Objemové dávkovací čerpadlo asfaltu řídí automatické podavače, které měří a řídí tok materiálu. Ke kompenzaci objemových změn v materiálech jsou nutné korekce teploty. Některé z obaloven jsou vybaveny i pásovou váhou pro přidávání asfaltové emulze a záměsové vody podle hmotnosti. Obalovna může být také vybavena drtící jednotkou mezi násypkou na R-materiál a míchací jednotkou, pro potřeby snížení velikosti dopravovaného recyklovaného materiálu. Emulgované směsi z recyklovaného materiálu zpravidla vyžadují kratší dobu míchaní než klasická za horka vyráběná směs. Při výrobě hrozí také riziko přemísení emulgovaných asfaltových směsí, což má za následek sedření emulgovaného asfaltového pojiva od hrubých částic plniva a předčasného rozbití emulgovaného asfaltu, čímž se může zapříčinit vzniku příliš tuhé směsi.

Podmíchání může způsobit nedostatečné pokrytí kameniva. Doba míchání může být řízena v nepřetržitém mlýnu změnou uspořádání lopatek, změnou výšky koncové brány nebo změnou umístění asfaltové stříkací lišty. U bubnového míchacího zařízení se doba míchání mění změnou sklonu bubnu nebo změnou umístění asfaltové vstupní trubky v bubnu. Ne vždy je na obalovně dosaženo stoprocentního obalení kameniva emulgovaným asfaltem. V praxi to ale není takový problém, protože k dalšímu přilínání asfaltového pojiva dochází také až na místě, při pokládce a rovnání asfaltové směsi, a následném hutnění pojezdem válce, popř. dodatečnou vibrací válce. Návrh receptury by měl přihlížet také k této problematice spojení pojiva s plnivem a měl by být navrhnout tak, aby byla dosažena co nejrovnoměrnější disperze emulgovaného asfaltu s pokrytím i jemnějších frakcí kameniva. [24]

2.4.4 Recyklace v míchacím centru za horka

Recyklace v míchacím centru za horka je proces, při kterém je znovuzískaný materiál míchán na obalovně, přehřátý na teplotu stanovenou recepturou. Takhle je míchán s novým materiálem, někdy také s recyklačním činidlem, za vzniku nové asfaltové směsi. Při správném návrhu může být taková směs svými vlastnostmi srovnatelná s novými konvenčními směsi vyráběné za horka. [25] Na obalovnách na zpracování horkou metodou lze vyrábět směsi s podílem R-materiálu 10 % - 15 %. Dáno je to typem obalovny, kvalitou R-materiálu, způsobu recyklace atd. Obecně lze rozdělit obalovny s technologií recyklace za horka na obalovny šaržové a kontinuální. [26] V současné době v České republice jsme schopni u šaržové obalovny zpracovávat až 80% R-materiálu. K ohřevu a dávkování R-materiálu dochází v paralelním bubnu obalovny, který recyklát ohřívá na teplotu přibližně 130 °C. Schéma takové obalovny na obr. 9 [27]

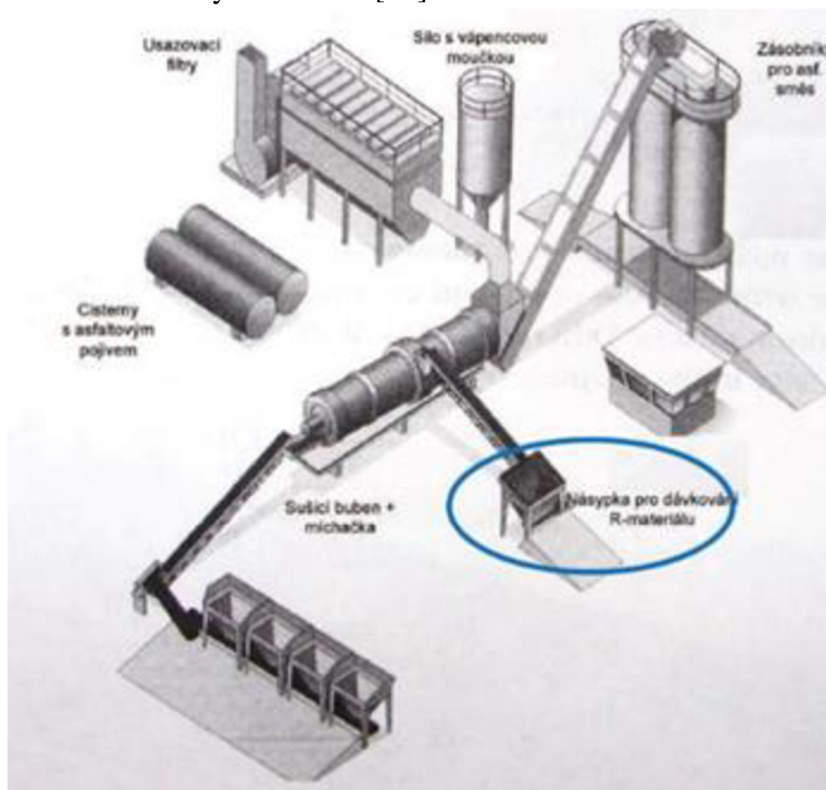


Obrázek 9: Schéma šaržové obalovny s paralelním bubnem [17]

Při zpracování na kontinuální obalovně je R-materiál průběžně dávkován do střední části sušícího a zároveň přehřívacího bubnu. V kontinuálních obalovnách je možno recyklovat 90%-100% R-materiálu. Rozlišují se 3 postupy přidávání materiálu do míchacího ústrojí, a to:

1. R-materiál se přidává souběžně s proudem horkého vzduchu
2. R-materiál se přidává proti proudu horkého vzduchu
3. Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce.

Schéma kontinuální obalovny na obr 10. [27]



Obrázek 10: Schéma kontinuální obalovny [17]

Návrh směsi při recyklaci v míchacím centru za tepla

Návrh takové směsi a určení správných poměrů se správnou teplotou zpracovaných materiálů by mělo odpovídat opět požadavkům na výslednou směs. Tudiž splnění objemových a mechanických vlastností v závislosti na konkrétní aplikaci. Ačkoliv výsledné požadavky na směs se nemění, je potřeba postup přizpůsobit recyklátu, které bude obsahovat zestárlé pojivo. [28]

Základní požadavky na návrh recyklované směsi lze zahrnout jako:

1. Pro výslednou zrnitost směsi je potřeba nahlížet při volbě vstupních materiálu a jejich zrnitost
2. Určení vlastností recyklovaného, primárního a přidaného pojiva pro určení správné viskozity pojiva v hotové směsi při provozní teplotě
3. Množství přidaného pojiva, aby vyhovovalo množství pojiva ve výsledné směsi
4. Také by měly být splněny ostatní objemové a pevnostní parametry směsi. [29]

3 Cíle bakalářské práce

Cílem bakalářské práce je zjišťování výsledné teploty směsi kameniva, která vznikne mísením směsi studeného kameniva, temperovaného na teplotu 20 °C, se směsí horkého kameniva nahřátého na teplotu 250 °C v různých poměrech. Tím je simulováno přidávání R-materiálu za studena (kamenivo s teplotou 20 °C) k horkému kamenivu při výrobě asfaltové směsi v míchacím zařízení obalovny asfaltových směsí.

Podle ČSN EN 12697-35 bude připraveno 10 kg směsi kameniva a fileru tak, aby byla vytvořena směs kameniva se zrnitostí asfaltové směsi typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+. [32]

Tato směs kameniva bude rozdělena v následujících poměrech:

- 0/100
- 10/90
- 15/85
- 20/80
- 30/70
- 50/50

První část kameniva bude natemperována vždy na teplotu 20 °C a druhá část na teplotu 250 °C. Tyto dvě části budou smíseny v laboratorní míchačce a bude změřena výsledná teplota. Dále bude zjišťován vliv vlhkosti studené dávky kameniva na výslednou teplotu směsi kameniva, čímž se bude simulovat přidávání vlhkého R-materiálu do asfaltové směsi.

4 Použité zkušební metody a postupy

Dále v této kapitole jsou popsány zkušební metody a postupy, které jsem při vyhodnocení vlivu dávkování R-materiálu za studena v bakalářské práci volil. Výsledky provedených zkoušek budou dále popsány v kapitole 6.

4.1 Sítový rozbor směsi kameniva

Provedení této zkoušky se řídí normou *ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Pomocí této zkoušky jsem si naváženou směs kameniva pomocí sady sít roztřídil na jednotlivé frakce. Počet volených sít je dán podle druhu vzorku směsi.

4.1.1 Provedení sítového rozboru

Naváženou směs kameniva je potřeba nejprve vysušit v sušárně při teplotě 110 °C. Po vysušení je směs zvážena a opět dána na po dobu 15 minut do sušárny. Jestliže je rozdíl hmotností po prvním a druhém sušení menší jak 0,1 %, bylo dosaženo ustálené hmotnosti směsi. Poté se materiál ochlazený na pokojovou teplotu zváží na laboratorní váze s přesností $\pm 0,1$ hmotnosti navážky a zapíše se hmotnost „M1“.

Dalším krokem je praní vzorku. Při něm se materiál promíchává s vodou v nádobě, které tvoří dno síto s velikostí ok 63 μm . Navážka se promíchává, dokud není zřetelné, že ze dna odtéká pouze čirá voda. Zůstatek směsi se zváží a zaznamená se hmotnost M2.

Sloupec sady sít je poskládán sestupně podle velikosti otvorů mřížek. Do horní části se vsype materiál a uzavře se víkem. Poté jsou na zařízení nastaveny vibrace a zařízení se zapne. Po několika minutách je zkouška u konce. Následně se sloupce demontují a jednotlivé zůstatky na sítích jsou přemísťovány do misek a váženy. Zbytky jemných částic $< 63 \mu\text{m}$, které propadly posledním sítím jsou také zváženy a hmotnost zapsána jako „P“.

Hmotnosti propadů na jednotlivých sítích se procentuálně vyjádří ku hmotnosti původní navážky „M1“. Tím se vypočítají se propady na jednotlivých sítích a z hodnot se vynese křivka zrnitosti.

Zrnitostní křivka je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna „d“ v milimetrech.

Procento jemných částic, propadlých sítím $< 63 \mu\text{m}$, je dán vztahem:

$$f = \frac{(M1 - M2) + P}{M1} \times 100$$

- M1 .. hmotnost suché navážky, v kg;
- M2 .. hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 mm, v kg;
- P .. hmotnost propadu jemných částic na dně, v kg [33], [34]

4.2 Temperování směsí

Vstupní teploty R-materiálu pro míchání jsou popsány v normě ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi: 6.3 příprava R-materiálu*. Pro potřeby zkoumání v bakalářské práci, jsem si zvolil teplotu dávkovaného R-materiálu, která bude simulovat teplotu haldy R-materiálu v běžném období výroby asfaltových směsí, za předpokladu absence předehřívacích zařízení na obalovně.

4.2.1 Nahřívání horkého podílu kameniva

Teplotu kameniva jsem volil podle mezní dovolené teploty nahřívání kameniva na obalovně podle ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody: 5.3 Výroba*. Cílená teplota kameniva je 250 °C. Pro potřeby vykompenzování ztrát tepelné energie při přenosu materiálu z laboratorní sušárny do laboratorní míchačky, je směs nahřátá na teplotu 255 °C.

4.2.2 Postup navážení, nahřátí a kontroly teploty horké směsi

Ze směsi kameniva bude na laboratorní váze odváženo přesné množství kameniva do otevřené nádoby menšího objemu a hladkým povrchem s přesností 0,1% hmotnosti. Při nedostatečném objemu nádoby je volena možnost dvou nádob, které bude možné v laboratorní sušárně umístit na sebe do sloupce. Vzorek materiálu se rozprostře rovnoměrně po objemu nádob a vloží do laboratorní sušárny předehřáté na 255 °C. V sušárně se materiál nahřívá po dobu minimálně 6

hodin do dalšího dne měření. Pomocí vpichového teploměru, který se vloží do stále nahřívané směsi kameniva na dobu alespoň 5 minut, se zkontroluje teplota těsně před vytažením z laboratorní sušárny. Pokud je teplota na mnou požadovaných 255 °C, považuji proces nahřívání za ukončený a směs kameniva jako vhodnou na pro další postup měření.

4.2.3 Temperování studeného podílu kameniva

Teplotu studeného podílu kameniva, reprezentujícího R-materiál podle odstavce 4.2 *Temperování směs*, jsem volil 20 °C.

4.2.4 Postup navážení, temperování a kontroly teploty studené směsi

Ze směsi kameniva bude na laboratorní váze odváženo přesné množství kameniva do otevřené nádoby menšího objemu a hladkým povrchem s přesností 0,1% hmotnosti. Směs bude rozprostřena do celého objemu nádoby a uložena do laboratorního chladicího zařízení, vychlazeného na teplotou 20 °C. V chladicím zařízení byl materiál uložen po dobu podobnou, jako dobu nahřívání směsi kameniva, a to minimálně 6 hodin. V případě temperování směsi nebylo potřeba teplotu nikterak upravovat, protože teplota studeného materiálu se blíží laboratorní teplotě prostředí a ztráty při přenosu z chladicího zařízení do míchacího laboratorní míchačky jsou zanedbatelné. Při replikaci mého postupu v jiném prostředí by ale bylo potřeba vstupní teplotu studeného materiálu poupravit, aby byly ztráty kompenzovány. Teplota studeného podílu směsi kameniva byla před mícháním zkontrolována vpichovým teploměrem.

4.3 Míchání směsi

Míchání se řídí podle normy ČSN EN 12697-35. „*Asfaltové směsi – Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi: 6.5 Míchání*“. V téhle normě je myšleno míchání s asfaltovým pojivem, tudíž pro potřeby své práce jsem si navrhl vlastní postup míchání směsi kameniva.

4.3.1 Postup míchání v laboratorní míchačce

Míchací nádoba laboratorní míchačky je před procesem míchání ponechána v sušárně, nahřáté na teplotu 180 °C, alespoň hodinu. Poté je do míchací nádoby souběžně vsypána navážka horkého i studeného kameniva. Míchací zařízení je zapnuto a oba podíly materiálu jsou míchány pomocí rotujících lopatek míchačky po dobu 60 vteřin. Po dokončení prvotního míchání je ocelovou lopatkou materiál ručně promísen a urovnán do konstantní vrstvy

v míchací nádobě. Po přikrytí dvěma vrstvami hliníkové fólie, je míchací nádoba se smíseným kamenivem opět uloženo na 60 vteřin do sušárny, vyhřáté na 180 °C, aby došlo k homogenizaci teploty v celém objemu zkoumaného materiálu. Následně je materiál vyndán ze sušárny a položen na topné těleso míchacího zařízení, které pomáhá udržovat teplotu sledované směsi.

4.3.2 Pomůcky pro vyhotovení

Na obrázku 11 je ukázána laboratorní míchačka, ve které byla směs kameniva míchána.



Obrázek 11: laboratorní míchačka

4.4 Měření teploty směsi

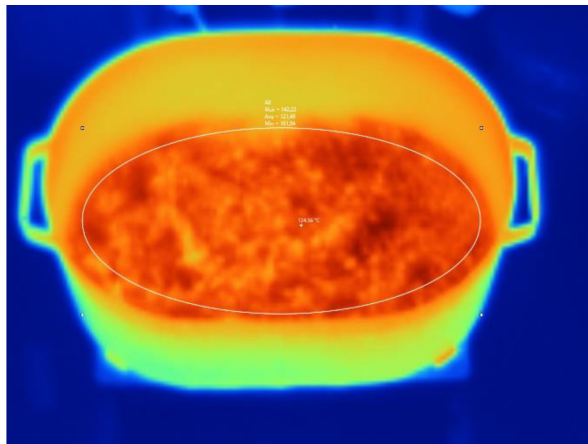
Pro změření teploty směsi kameniva jsem využil digitální kameru značky Fluke, která pomocí infračerveného snímače měří teplotu na povrchu směsi.

Pro zjištění teploty uvnitř vrstvy vzorku jsem využil vpichového teploměru.

4.4.1 Měření termokamerou

Pro změření povrchové teploty směsi kameniva jsem využil kameru značky Fluke, která využívá infračerveného snímače. Hodnoty teploty měří jsou uživateli zobrazovány na dvě desetinná místa. Pomocí softwaru kamery jsem byl schopný určit teplotu kameniva na povrchu, jeho maximální hodnoty, minimální hodnoty a průměrné hodnoty vzorku kameniva. Ukázka vyhodnocení měření termokamerou je na obrázku 12.

Zhomogenizovaný materiál ze sušárny jsem ihned zaznamenal snímkem pomocí termokamery tak, aby byla na fotce zřetelná celá směs materiálu, včetně míst s velkými výkyvy teplot.



Obrázek 12: Fluke software

4.4.2 Pomůcky pro vyhotovení měření termokamerou

Ukázka použité termokamery pro měření:



Obrázek 13: Termokamera fluke [38]

4.4.3 Měření vpichovým teploměrem

Díky vpichovému teploměru s čidlem na šídle rukojeti jsem byl schopný zjistit teplotu uvnitř materiálu. Teplota se měřila uprostřed vrstvy materiálu tak, aby se čidlo nedotýkalo dna, kde by měření značně ovlivňovala topná tělesa. Běžně bylo provedeno 5 záznamů teploty v různých reprezentativních částech směsi kameniva v nádobě a výsledky zaznamenány do tabulky v excelu, kde budou vyhodnoceny.

4.4.4 Pomůcky pro vyhotovení

Ukázka použití vpichového teploměru při měření



Obrázek 14: Vpichový teploměr

5 Použité materiály

5.1 Směs kameniva vhodného pro ACO 11+

V bakalářské práci bylo použito 10 kg směsi kameniva ze dvou lokalit těžby. Filer pochází z lokality Mokrá a je obsažen v procentuálním podílu 5,5 %. Frakce 0-4, 4-8 a 8-11 jsou z kamenolomu Luleč. Frakce 0-4 je zastoupena v podílu 43,5 %, fr. 4-8 v podílu 28 % a 8-11 v podílu 23 %. Procentuální zastoupení s vyjádřením hmotnosti je uvedeno níže v tabulce.

	přesná navážka:		10000	g kameniva
frakce	podíly v %	podíly	hmotnosti	
filer	5,5	0,055	550,0	Mokrá
0-4	43,5	0,435	4350,0	Luleč
4-8	28,0	0,280	2800,0	Luleč
8-11	23,0	0,230	2300,0	Luleč
suma	100	1	10000	

Tabulka 1: Množství jednotlivých frakcí kameniva ve směsi 10 kg

5.1.1 Výsledky síťového rozboru:

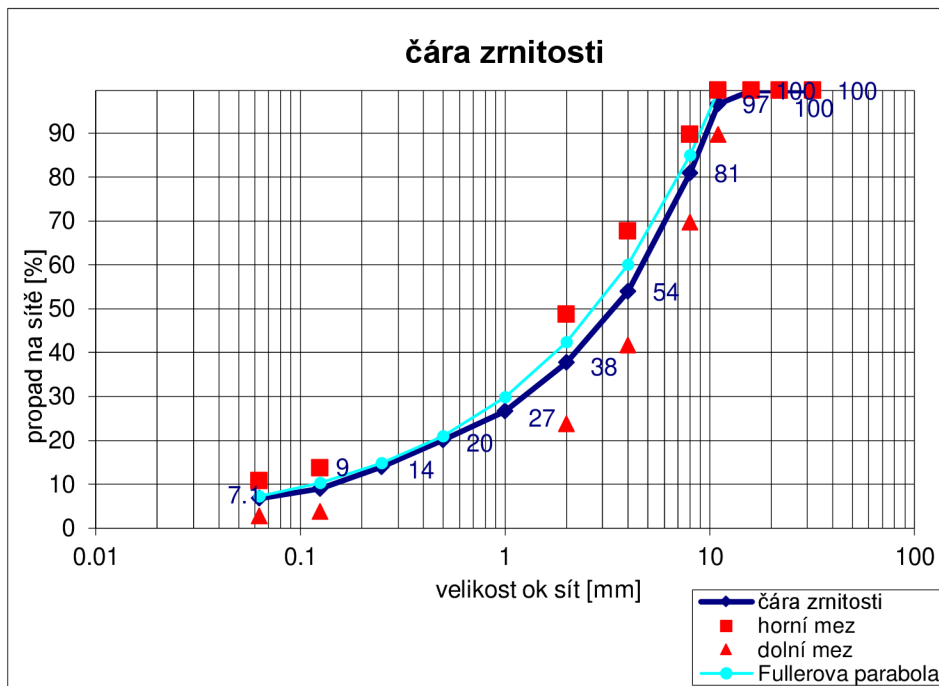
V tabulce 2 jsou shrnuty síťové rozborů jednotlivých frakcí kameniva, ze kterých byla složena výsledná čára zrnitosti směsi kameniva.

frakce	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8-11	100,0	100,0	100,0	86,6	21,8	3,4	3,1	2,9	2,8	2,5	2,1	1,7
4-8	100,0	100,0	100,0	100,0	96,9	25,3	6,7	4,0	3,2	2,7	2,2	1,7
0-4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	68,9	45,2	30,7	17,2	6,3	3,0
moučka	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	88,6

Tabulka 2: Síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva

5.1.2 Výsledná čára zrnitosti

V grafu 1 je sestavena čára zrnitosti vyjádřena procentuálním propadem zrn na jednotlivých sítích.



Graf 1: Čára zrnitosti směsi kameniva

5.2 Voda

Při měření s navlhčenými poměry kameniva byla studená část kameniva navlhčena pitnou vodou. Míru vlhkosti u vybraných směsí jsem volil 5 %, což je hodnota, které může přibližně dosahovat halda R-materiálu těsně po dešti.

6 Výsledky zkoušek

V následující kapitole budou vyhodnoceny výsledky jednotlivých zkoušek, popsány vlivy, které mohly výsledky ovlivnit a vzájemná korelace výsledků.

6.1 Teoreticky naměřené hodnoty v bakalářské práci

V téhle kapitole se budu zabývat teoretickými hodnotami, kterým by se měli mnou naměřené hodnoty výměny tepelné energie přiblížit

Výpočet teoretických teplot je ovšem pouze na úrovni dvou materiálů těles, kdy nedochází k přenosu tepelné energie do okolí a dalším látkám v přítomnosti těles, které si tepelnou energii předávají. Při výpočtu se uvažovala teplota studené části kameniva 20 °C a teplota horkého podílu kameniva 250 °C.

6.1.1 Výpočet pomocí množství a teploty materiálu

Prvním způsobem je výpočet pomocí množství a teploty materiálu. Do výpočtu vstupují hodnoty množství studeného nebo horkého materiálu z celé navážky směsi, krát teplota dané části směsi. Součet těchto hodnot tvoří teoretickou hodnotu výsledné směsi při předpokladu výměny tepelné energie pouze mezi poměry směsi. V tabulce 3 jsou výsledky takhle spočtených hodnot.

teoretické hodnoty				
90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
(podíl*teplota)+(podíl*teplota)/100%				
227	215,5	204	181	135

Tabulka 1: Teoretické hodnoty podle množství a teploty

6.1.2 Výpočet pomocí kalorimetrické rovnice

Výpočet pomocí kalorimetrické rovnice popisuje výměnu tepelné energie mezi tělesy, tvořící izolovanou soustavu, pro kterou platí zákon zachování energie. To znamená, že veškeré teplo odevzdané tělesem 1, je přijímáno tělesem 2 bez žádných ztrát. Také zahrnuje předpoklad, že energie není nikterak přeměňována na energii jinou. Jinou energii může být kupříkladu energie mechanická nebo energie uvolňována při chemických reakcích.

Matematicky lze tento děj popsat pomocí rovnice:

$$Q_1 = Q_2$$

Kde Q_2 je teplo odevzdané chladnějšimu tělesu tělesem teplejším, které se rovná teplu Q_1 , které chladnější těleso přijme od teplejšího.

Pro výpočet výsledné teploty „ t “ pomocí kalorimetrické rovnice, je předešlý vztah rozepsán do vzorce:

$$m_1 c_1 (t_1 - t) = m_2 c_2 (t - t_2)$$

Kde:

m_1 .. je hmotnost prvního tělesa v [kg]

c_1 .. je měrná tepelná kapacita prvního tělesa v [J/kg.K]

t_1 .. je teplota prvního tělesa v [°C]

m_2 .. je hmotnost druhého tělesa v [kg]

c_2 .. je měrná tepelná kapacita druhého tělesa v [J/kg.K]

t_2 .. je teplota druhého tělesa v [°C]

t .. je výsledná teplota po výměně tepelné energie v [°C] [35]

Měrná tepelná kapacita šterku je 750 [J/kg.K]. Po vyjádření „ t “ ze vzorce zjistíme, že nám tahle hodnota při mísení dvou stejných materiálu ze vztahu vymizí. [36]

Vyjádření „ t “ ze vzorce:

$$m_1 c_1 (t_1 - t) = m_2 c_2 (t - t_2) \quad / \div c_{1,2}$$

$$m_1 (t_1 - t) = m_2 (t - t_2)$$

$$m_1 t_1 - m_1 t = m_2 t - m_2 t_2$$

$$- m_1 t - m_2 t = - m_2 t_2 - m_1 t_1 \quad / * (-1)$$

$$+ m_1 t + m_2 t = + m_2 t_2 + m_1 t_1$$

$$t (m_1 + m_2) = m_2 * t_2 + m_1 * t_1 \quad / \div (m_1 + m_2)$$

$$t = \frac{m_2 * t_2 + m_1 * t_1}{(m_1 + m_2)}$$

Po vyjádření jsem zjistil, že kalorimetrická rovnice bez použití „měrné tepelné kapacity“ má stejný tvar, jako rovnice předešlá. Výsledky podle kalorimetrické rovnice jsou v tabulce:

teoretické hodnoty podle kalorimetrické rovnice				
90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
227	215,5	204	181	135

Tabulka 2: Teoretické hodnoty podle kalorimetrické rovnice

6.2 Postupné ochlazení celé navážky směsi

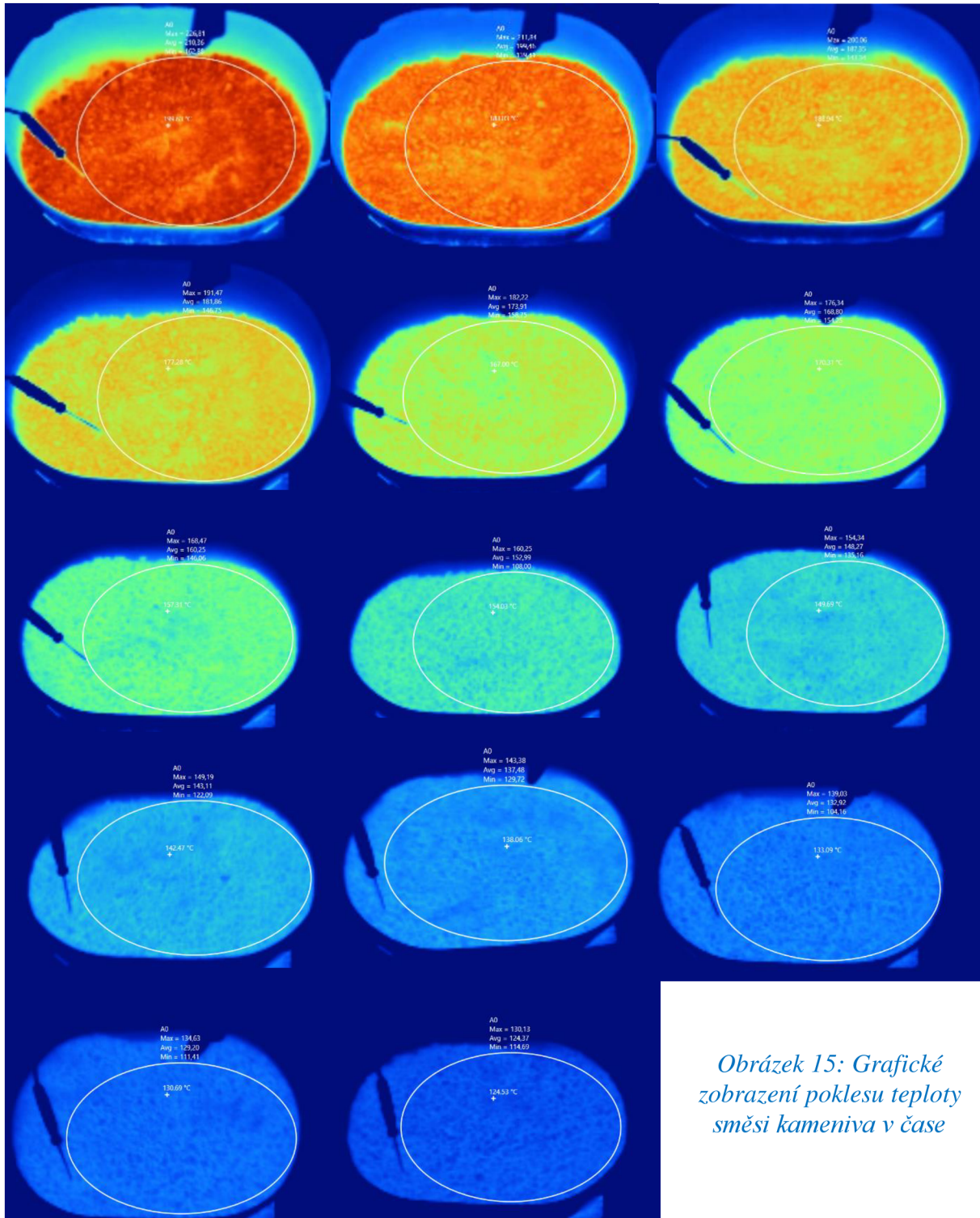
Prvním měřením byl zjišťován úbytek tepelné energie vzorku při laboratorní teplotě, přičemž vzorek byl umístěn v nádobě laboratorní míchačky, která byla vložena na rozežháté topné těleso míchačky. Celých 10 kg směsi kameniva bylo nahřáto na 255 °C v laboratorní sušárně, a poté byla na tomto vzorku měřena teplota v 90 vteřinových intervalech, s potřebnou dobou pro měření přibližně 30 vteřin. Teplota byla zjišťována pomocí termokamery a vpichovým teploměrem.

Záznamy z měření a graf průběhu teploty v čase jsou v následující tabulce a grafech.

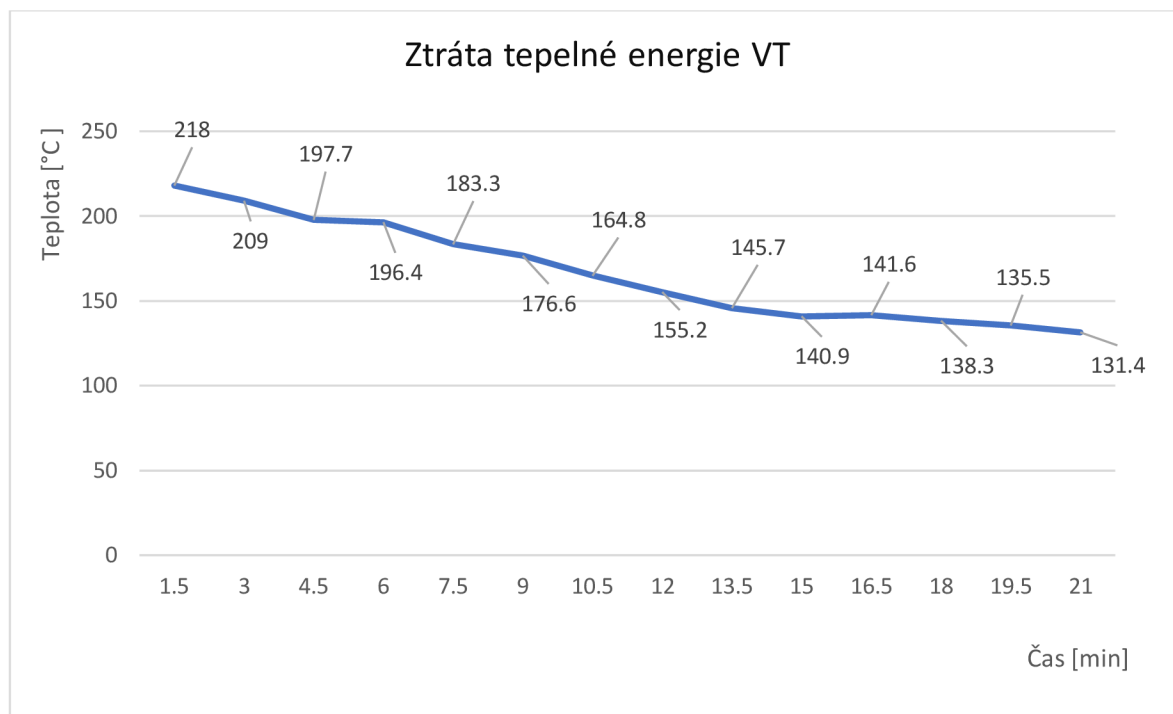
intervaly měření [minuty]	teplota vpichovým teploměrem [°C]	maximální teplota termokamerou [°C]	minimální teplota termokamerou [°C]	Ø teplota termokamerou [°C]
1,5	218	226,8	162,9	210,4
3	209	211,8	139,4	199,5
4,5	197,7	200,1	143,3	187,4
6	196,4	191,5	146,75	181,9
7,5	183,3	182,2	158,8	173,9
9	176,6	176,4	154,3	168,8
10,5	164,8	168,5	146,1	160,3
12	155,2	160,3	108	153
13,5	145,7	154,3	135,2	148,3
15	140,9	149,2	122,1	143,1
16,5	141,6	143,4	129,7	137,5
18	138,3	139	104,2	132,9
19,5	135,5	134,6	111,4	129,2
21	131,4	130,1	114,7	124,4

Tabulka 3: Průběh poklesu teploty v čase

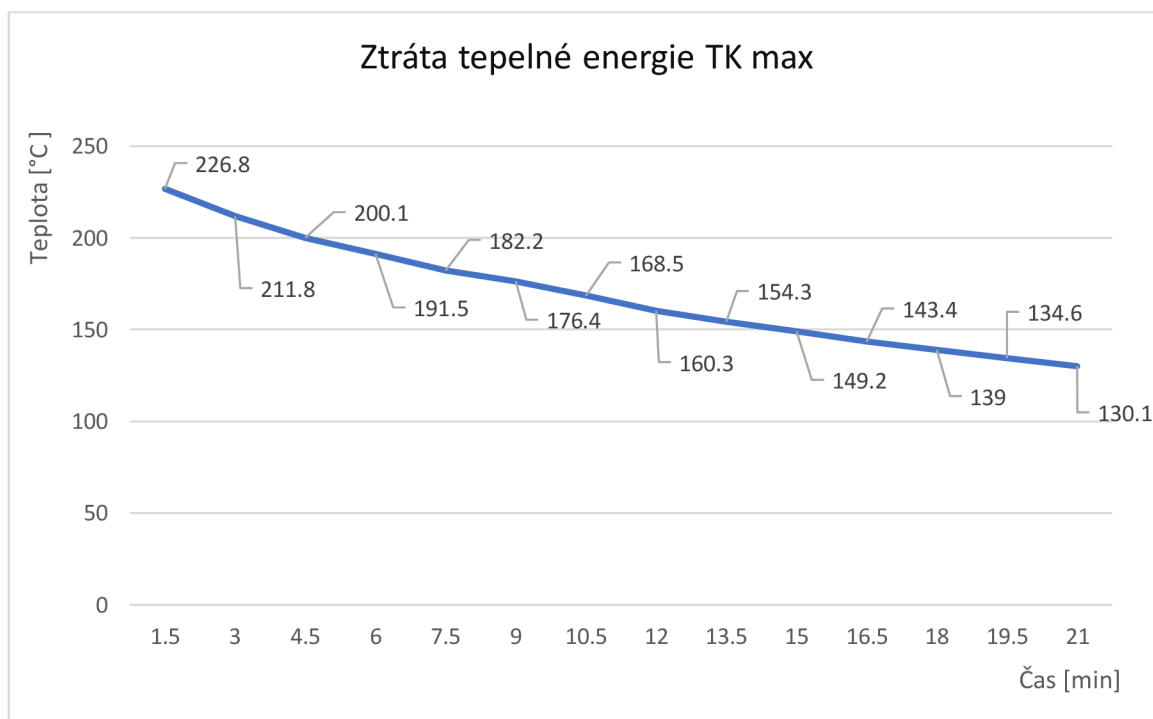
V softwaru fluke jsem nastavil rozmezí zobrazovaných teplot od 230 °C do 100 °C. V koláži měření termokamerou na obrázku 15 je zřetelně vidět pokles teploty v čase, kdy sytě červená barva značí teplotu ≤ 230 °C, barva zelená představuje teplotu ± 165 °C a barva modrá je teplota ≥ 100 °C.



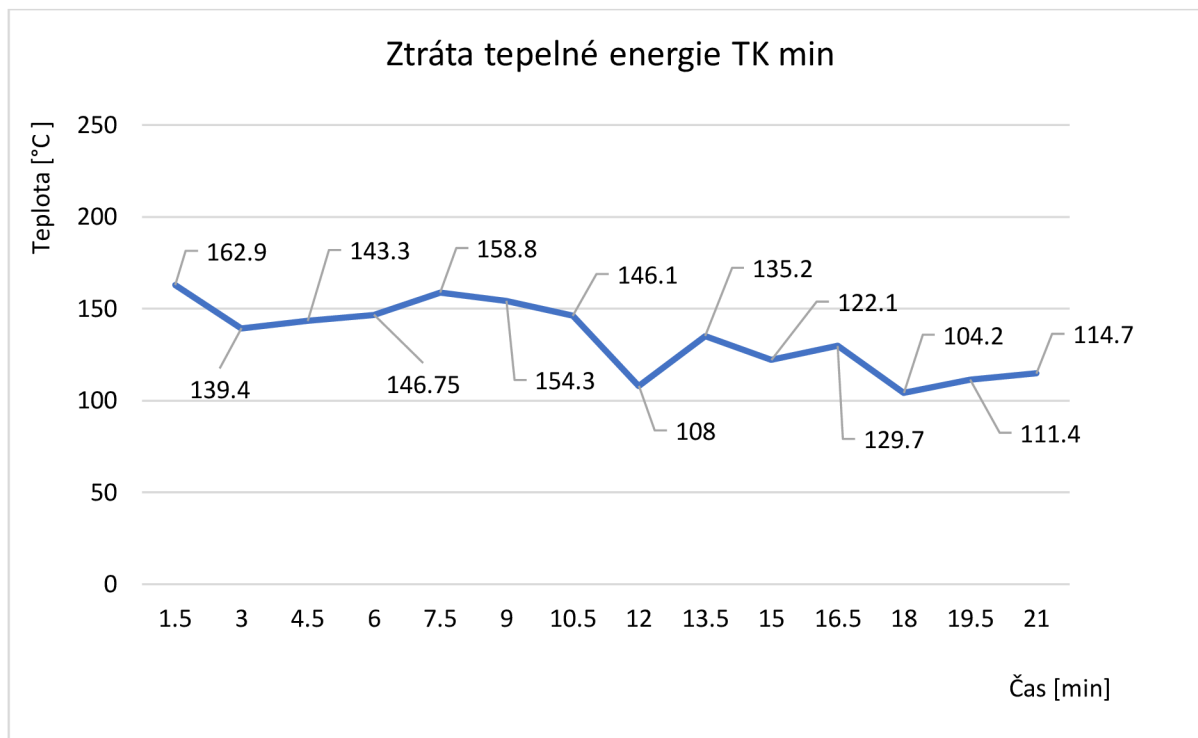
Obrázek 15: Grafické zobrazení poklesu teploty směsi kameniva v čase



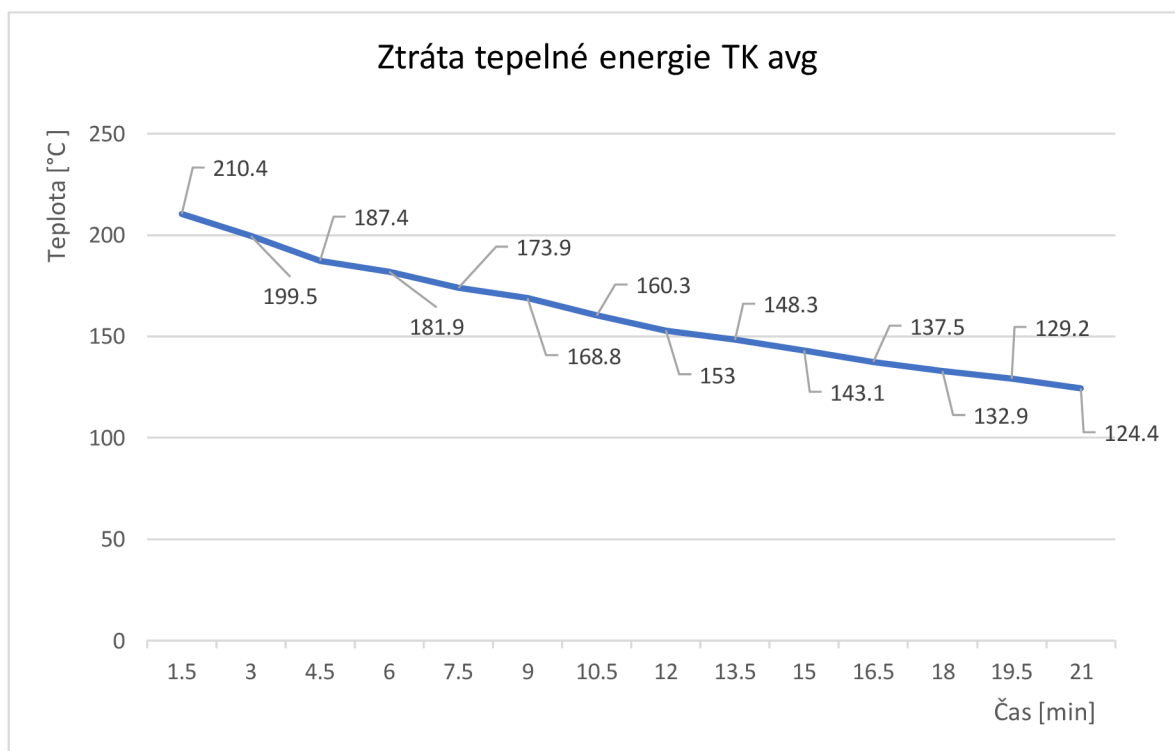
Graf 2: Ztráta tepelné energie v čase pomocí vpichového teploměru



Graf 3: Ztráta tepelné energie v čase pomocí termokamery – maximální hodnoty



Graf 4: Ztráta tepelné energie v čase pomocí termokamery – minimální hodnoty



Graf 5: Ztráta tepelné energie v čase pomocí termokamery – průměrné hodnoty

Z grafu 2 „Ztráta tepelné energie v čase pomocí vpichového teploměru“ je patrné, že ke konci měření měla teplota vzorku tendenci ztrácet tepelnou energii pomaleji než na začátku měření. To je zapříčiněno tím, že nahřátý materiál předává tepelnou energii okolí více, čím je větší rozdíl teploty materiálu a okolí. Navíc se projevilo to, že nádoba se směsí kameniva byla umístěna na zahřátém topném tělese míchacího zařízení.

U grafu 3 „Ztráta tepelné energie v čase pomocí TK – maximální hodnoty“ je průběh ztráty tepelné energie zřetelnější. Maximální hodnoty by bylo možné brát jako směrodatné. Při výrobě nové směsi jsou ovšem důležitější hodnoty teploty uvnitř materiálu, které byly zjišťovány vpichovým teploměrem.

V Grafu 4 „Ztráta tepelné energie v čase pomocí TK – minimální hodnoty“ se průběh ztráty tepelné energie vůbec nepřibližuje předpokládanému průběhu. Tentokrát došlo k velkým výkyvům při všech měřeních, kdy teplota v nejstudenějších místech materiálu dosahuje velkých výchylek. To mohlo způsobit nerovnoměrné rozložení materiálu s místy, kde je materiálu méně a svou tepelnou energii odevzdá rychleji.

Graf 5 „Ztráta tepelné energie v čase pomocí TK – průměrné hodnoty“ má průběh ztráty tepelné energie velmi podobný průběhu v grafu 3 „Ztráta tepelné energie v čase pomocí TK – maximální hodnoty“. Je zde vidět průběh poklesu teploty podobný exponenciální funkci, což byl i předpokládaný průběh. Ze všech způsobů měření bych tenhle vyhodnotil jako nejhodnotnější.

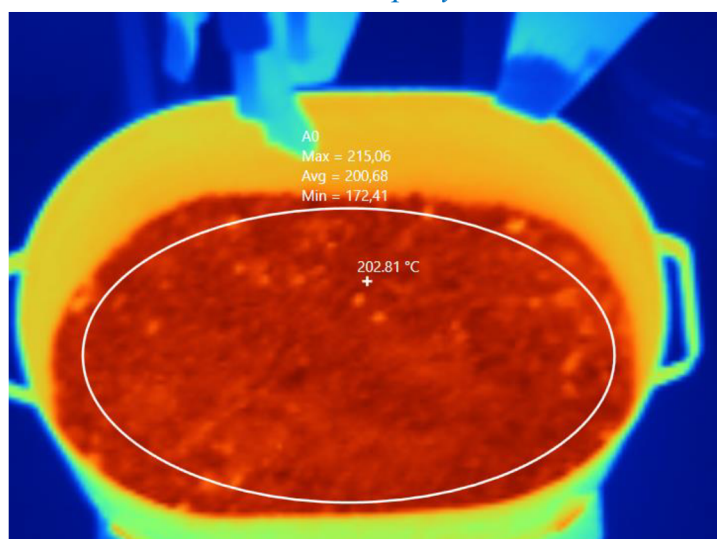
6.3 Poměr kameniva 90/10

Prvním zkoumaným poměrem směsi horkého a studeného kameniva je poměr 90/10. Laboratorně odvážená navážka 9 kg směsi kameniva (90 % ze 100 % vzorku) byla umístěná do sušárny a nahřáta na 255 °C. Zbylý 1 kg směsi byl v chladícím zařízení natepervován na 20 °C. Vzorky byly následně promíchány a změřila se jejich teplota.

Hodnoty „VP avg“ jsou zprůměrované hodnoty měřené vpichovým teploměrem v reprezentativních místech vzorku. Hodnoty „TK min“; „TK max“ a „TK avg“ jsou hodnoty vyhodnocené softwarem termokamery, funkcí „teplota v oblasti“. Rozdíl průměrné teploty, naměřené vpichovým teploměrem, se oproti hodnotám teoretickým, zjištěným kalorimetrickou rovnicí, liší o 23,25 °C. A rozdíl průměrné teploty, naměřené termokamerou, oproti teoretické teplotě, zjištěné kalorimetrickou rovnicí, je 26,32 °C. To naznačuje značné ztráty tepelné energie do okolí. V tabulce 6 jsou hodnoty teplot poměru 90/10 zvýrazněny žlutě.

	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,1
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	23,3	20,2	22,6	8,3	-11
rozdíl KR-TK	26,3	23,7	15,6	15,2	-5,7

Tabulka 4: Naměřené teploty směsi 90/10



Obrázek 16: Záznam z měření termokamerou poměru 90/10

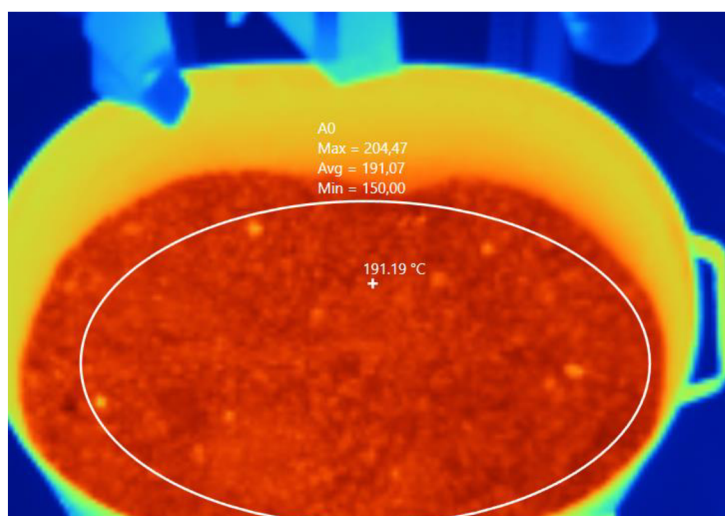
6.4 Poměr kameniva 85/15

Dalším zkoumaným poměrem je směs kameniva 85/15. Přesně odvážená navážka 8,5 kg směsi kameniva byla umístěná do laboratorní sušárny a nahřata na 255 °C. Zbylých 1,5 kg směsi bylo nateperováno na 20 °C. Vzorky se následně smísily v laboratorní míchačce a byla změřena jejich teplota.

Hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 7 ve zvýrazněném sloupci. Už při rozdílu hmotnosti studené směsi 0,5 kg, je patrný pokles výsledné teploty směsi. Rozdíly hodnot „VT avg“ a „TK avg“ mezi směsi 90/10 a 85/15 jsou velmi podobné. Rozdíl hodnot naměřených vpichovým teploměrem je 8,45 °C a rozdíl hodnot naměřených termokamerou je 8,85 °C. To naznačuje dobré promíchání směsi s očekávaným průběhem poklesu teplot. Rozdíl průměrné teploty, naměřené vpichovým teploměrem, se oproti hodnotám teoretickým, zjištěným kalorimetrickou rovnicí, liší o 20,20 °C. A rozdíl průměrné teploty, naměřené termokamerou, oproti teoretické teplotě, zjištěné kalorimetrickou rovnicí, je 23,67 °C.

	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,1
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	23,3	20,2	22,6	8,3	-11
rozdíl KR-TK	26,3	23,7	15,6	15,2	-5,7

Tabulka 5: Naměřené teploty směsi 85/15



Obrázek 17: Záznam z měření termokamerou poměru 85/15

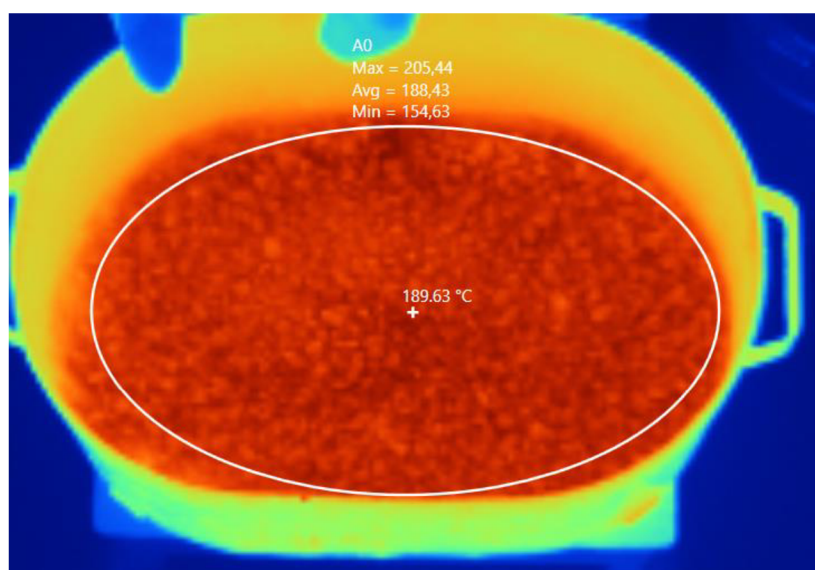
6.5 Poměr kameniva 80/20

Dalším měřeným poměrem je směs kameniva 80/20. Navážených 8 kg směsi kameniva bylo opět nahřáto v laboratorní sušárně na 255 °C. Zbylá část směsi o hmotnosti 2 kg, byla opět nateperována na 20 °C. Poměry se smísily v laboratorní míchačce a změřila se jejich teplota.

Hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 8 ve zvýrazněném sloupci. Oproti předešlé směsi je opět zřejmý pokles teploty. Zde ale došlo k výraznějšímu poklesu průměrné hodnoty teploty naměřené vpichovým teploměrem, a k menšímu poklesu průměrné hodnoty teploty, naměřené termokamerou. To by mohlo naznačovat místa s velkými výkyvy teplot ve směsi. Hodnota TK min dokonce narostla o 4,63 °C. Rozdíl průměrné teploty, naměřené vpichovým teploměrem, se oproti hodnotám teoretickým, zjištěným kalorimetrickou rovnicí, liší o 22,62 °C. A rozdíl průměrné teploty, naměřené termokamerou, oproti teoretické teplotě, zjištěné kalorimetrickou rovnicí, je 15,57 °C.

	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,1
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	23,3	20,2	22,6	8,3	-11
rozdíl KR-TK	26,3	23,7	15,6	15,2	-5,7

Tabulka 6: Naměřené teploty směsi 80/20



Obrázek 18: Záznam z měření termokamerou poměru 80/20

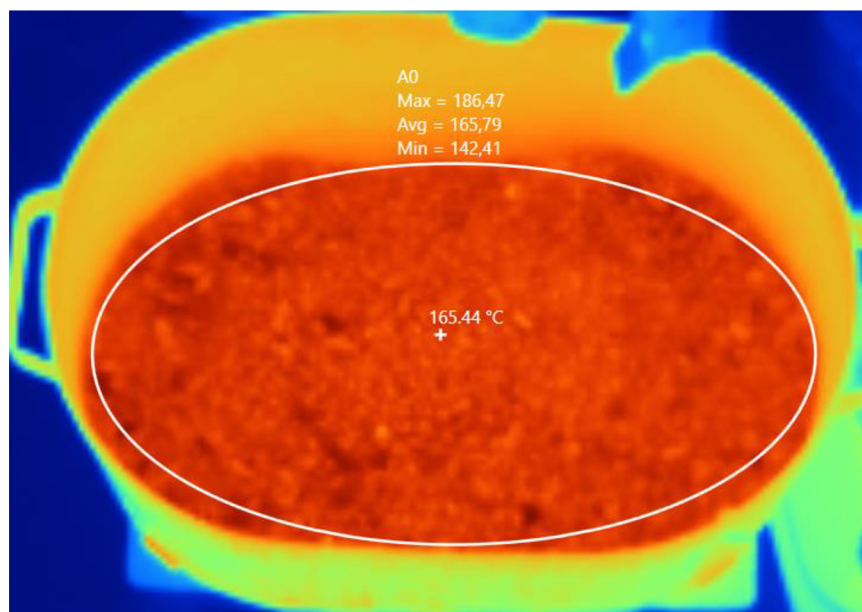
6.6 Poměr kameniva 70/30

Další naměřený poměr kameniva je 70/30. Opět bylo 70 %, z původních 7 kg směsi, nahřáto na 255 °C a smíseno se zbylými 30 %, nahřátých na 20 °C. Poměry byly smíseny a změřila se jejich teplota.

Hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 9 ve zvýrazněném sloupci. Ačkoliv bylo, oproti předešlému poměru, přidáno o 1 kg více studeného materiálu, nedošlo zde k tak výraznému rozdílu teplot naměřených vpichovým teploměrem, oproti poměru 80/20. Rozdíl zde činí 8,7 °C. Za to u průměrné hodnoty naměřené termokamerou, došlo k poklesu teploty o 22,64 °C. Rozdíl průměrné teploty, naměřené vpichovým teploměrem, se oproti hodnotám teoretickým, zjištěným kalorimetrickou rovnicí, liší o 8,32 °C. A rozdíl průměrné teploty, naměřené termokamerou, oproti teoretické teplotě, zjištěné kalorimetrickou rovnicí, je 15,21 °C.

	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,1
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	23,3	20,2	22,6	8,3	-11
rozdíl KR-TK	26,3	23,7	15,6	15,2	-5,7

Tabulka 7: Naměřené teploty směsi 70/30



Obrázek 19: Záznamy z měření termokamerou poměru 70/30

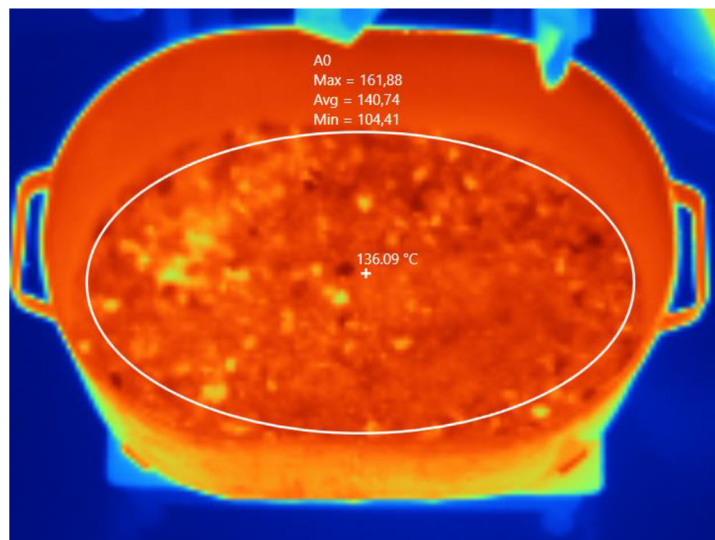
6.7 Poměr kameniva 50/50

Poslední sledovaná směs byla poměru 50/50, kdy bylo kamenivo rozděleno na teplé, nahřáté na 255 °C a studené, které bylo nateperováno na 20 °C. Tyhle dvě směsi byly smíchány a následně byla změřena jejich teplota.

Hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 10 ve zvýrazněném sloupci. Se zvýšeným poměrem studeného kameniva o 2 kg, oproti minulému měření, na hmotnost 5 kg, jsem naměřil teplotu o 26,67 °C nižší než předešlý poměr kameniva. Rozdíl průměrné teploty, naměřené vpichovým teploměrem, se oproti hodnotám teoretickým, zjištěným kalorimetrickou rovnicí, liší o -11,01 °C. A rozdíl průměrné teploty, naměřené termokamerou, oproti teoretické teplotě, zjištěné kalorimetrickou rovnicí, je -5,74 °C. To bylo zapříčiněno ohřevem od desky laboratorní míchačky, která měla po dobu měření teplotu přibližně 180 °C.

	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,1
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	23,3	20,2	22,6	8,3	-11
rozdíl KR-TK	26,3	23,7	15,6	15,2	-5,7

Tabulka 8: Naměřené teploty směsi 50/50



Obrázek 20: Záznamy z měření termokamerou 50/50

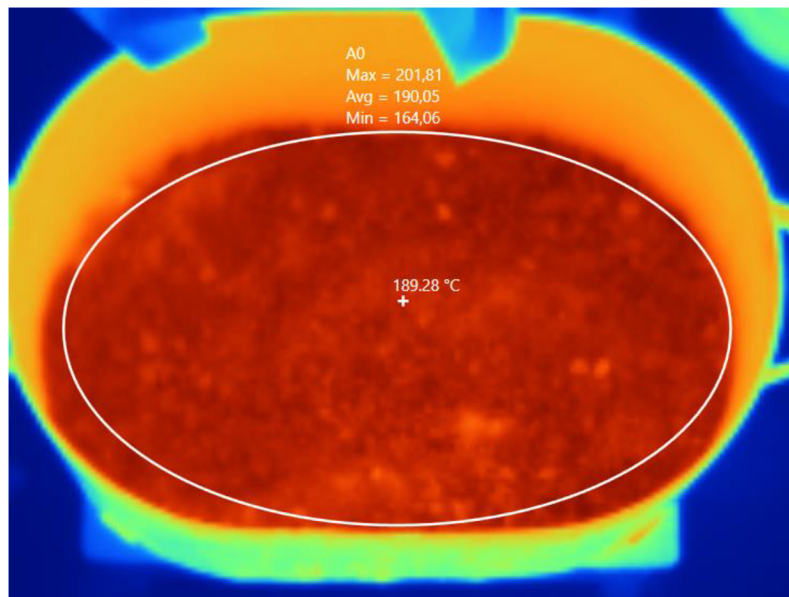
6.8 Navlhčený poměr 90/10

Dále bylo sledováno ovlivnění teploty navlhčením směsi reprezentující R-materiál. Zde bylo 9 kg z 10 kg směsi nahřáto na 255 °C a zbylý 1 kg směsi byl nateperován na 20 °C a promícháno s 5 % vody z hmotnosti. Odměřených 50 ml vody bylo promícháno s kamenivem v nádobě a ponecháno pár minut v chladícím zařízení, aby se voda vsákla do celého objemu směsi včetně pórů v kamenivu. Směs horkého a vlhkého kameniva byla následně promíchána v laboratorní míchačce.

Hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 11 ve zvýrazněném sloupci. Navlhčení kameniva snížilo teplotu uvnitř výsledné směsi, změřené vpichovým teploměrem, o 13,3 °C. Stejný rozdíl teplot je u maximální hodnoty změřené termokamerou „TK max“. Přičemž rozdíl minimálních teplot „TK min“ je 8,3 °C. Rozdíl průměrných teplot, zjištěných termokamerou, je 10,6 °C. Lze tedy prohlásit, že navlhčení směsi 1 kg R-materiálu na 5 % vlhkosti, způsobilo ochlazení výsledné směsi cca o 10 °C. To je způsobeno rychlým odpařováním vody ze směsi při míchání, a tedy rychlejšímu předávání tepelné energie do okolí. Rozdíly průměrných teplot, měřené vpichovým teploměrem „VT avg“ a termokamerou „TK avg“, oproti teoretické teplotě podle kalorimetrické rovnice, činí řádově 36 °C. To je opět zhruba o 10 °C větší hodnota, než rozdíly u nenavlhčených hodnot v tabulce 6 „*Naměřené teploty směsi 90/10*“.

	.90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,0
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150,0	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
	navlhčené				
	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	190,5	-	-	138,7	-
TK max	201,8	-	-	146,2	-
TK min	164,1	-	-	93,8	-
TK avg	190,1	-	-	129,4	-
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	36,5	-	-	42,3	-
rozdíl KR-TK	36,9	-	-	51,6	-

Tabulka 9: *Naměřené teploty navlhčené směsi 90/10*



Obrázek 21: Záznam z měření kamerou 90/10 - vlhké

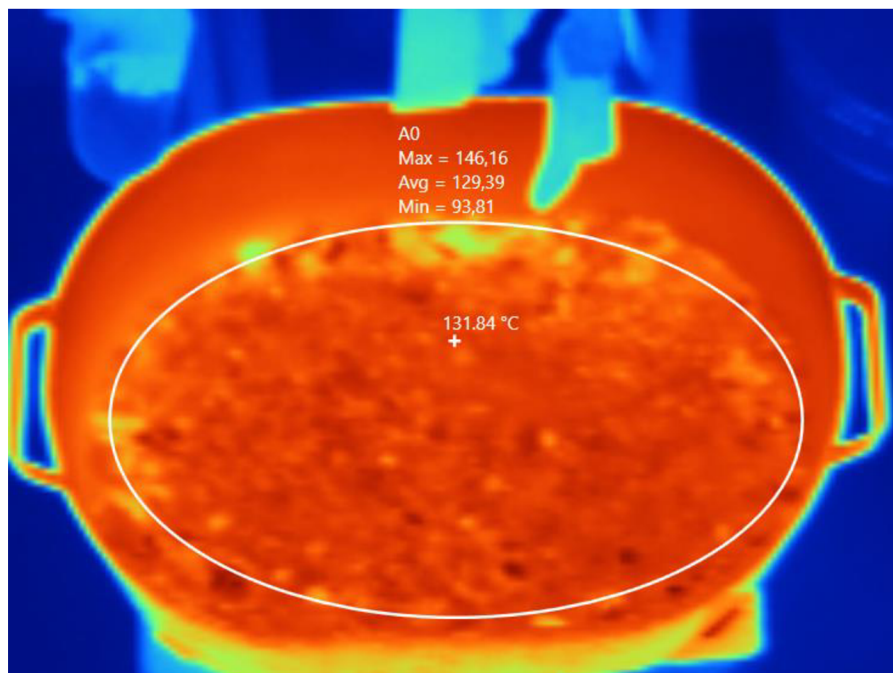
6.9 Navlhčený poměr 70/30

Dalším sledovaným poměrem s navlhčeným podílem, je směs horkého a vlhkého kameniva 70/30. Zde bylo 7 kg směsi nahřáto v laboratorní sušárně na 255 °C a zbylé 3 kg směsi natemperovány na 20 °C. Směs studeného kameniva byla smíchána se 150 ml vody a ponechána v chladicím zařízení, aby se navlhčená směs zhomogenizovala a kamenivo vodu vstřebalo. Směs horkého a vlhkého kameniva byla následně promíchána v laboratorní míchačce.

Hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 12 ve zvýrazněném sloupci. Navlhčení studené směsi kameniva mělo za efekt snížení teploty uvnitř výsledné směsi, změřené vpichovým teploměrem, o 34 °C. Maximální hodnota, změřená termokamerou, vlhké směsi, se od maximální hodnoty suchého poměru liší o 40,3 °C. Minimální hodnota „TK min“ suché směsi, změřená termokamerou, se od minimální hodnoty „TK min“ vlhké směsi, změřené termokamerou, liší od 48,3 °C. A průměrná hodnota teploty suché směsi, měřená termokamerou, se liší od průměrné hodnoty suchého poměru o 36,4°C. Rozdíly teplot oproti kalorimetrické rovnici je pro měření vpichovým teploměrem 42,3 °C a pro termokamerou 51,6 °C. Zde tedy došlo ke značné odchylce v porovnání s kalorimetrickou rovnicí, než u suchého poměru směsi 70/30, kde tenhle rozdíl činil 8,3 °C pro průměrnou hodnotu vpichovým teploměrem a 15,2 °C pro průměrnou hodnotu měřenou termokamerou.

	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	203,8	195,3	181,4	172,7	146,0
TK max	215,1	204,5	205,4	186,5	161,9
TK min	172,4	150,0	154,6	142,4	104,4
TK avg	200,7	191,8	188,4	165,8	140,7
	navlhčené				
	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
VT avg	190,5	-	-	138,7	-
TK max	201,8	-	-	146,2	-
TK min	164,1	-	-	93,8	-
TK avg	190,1	-	-	129,4	-
podle KR	227	215,5	204	181	135
rozdíl KR-VT	36,5	-	-	42,3	-
rozdíl KR-TK	36,9	-	-	51,6	-

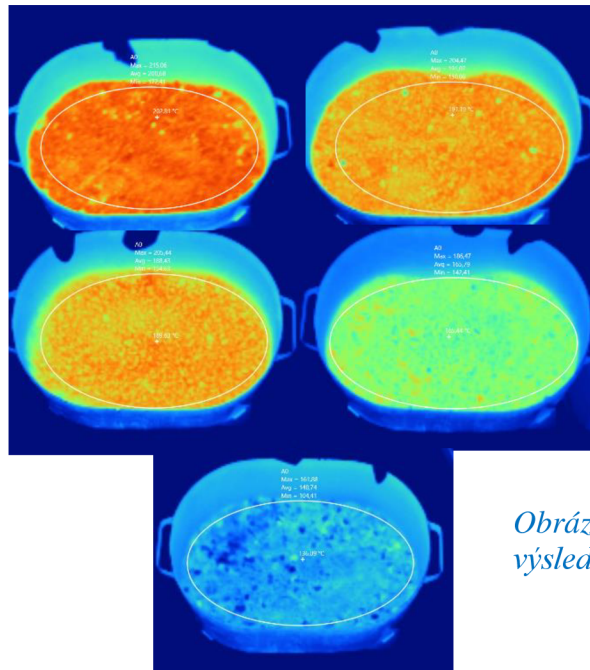
Tabulka 10: Naměřené teploty navlhčené směsi 90/10



Obrázek 22: Záznam z měření kamerou 70/30 - vlhké

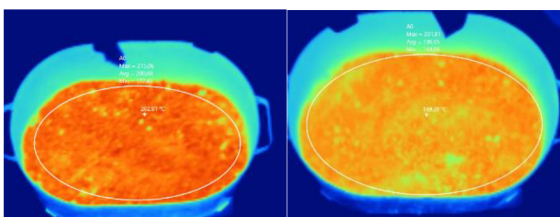
6.10 Korelace naměřených hodnot

V obrázku 23 je vidět porovnání vyobrazených teplot výsledné směsi kameniva, naměřených termokamerou. Rozsah teplot na fotkách je od 230 °C do 100 °C. Zleva doprava jsou poměry 90/10, 85/15, 80/20, 70/30 a 50/50.



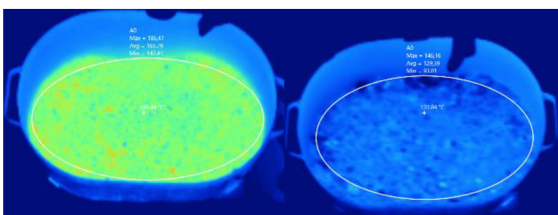
Obrázek 23: Porovnání teplot výsledné směsi kameniva

Na obrázku 24 je srovnání výsledných teplot suché a navlhčené směsi kameniva v poměru 90/10. Rozsah teplot na fotkách je od 230 °C do 100 °C. Vlevo je suchý poměr směsi kameniva 90/10 a vpravo je navlhčený poměr směsi kameniva 90/10.



Obrázek 24: Porovnání suché a vlhké směsi kameniva 90/10

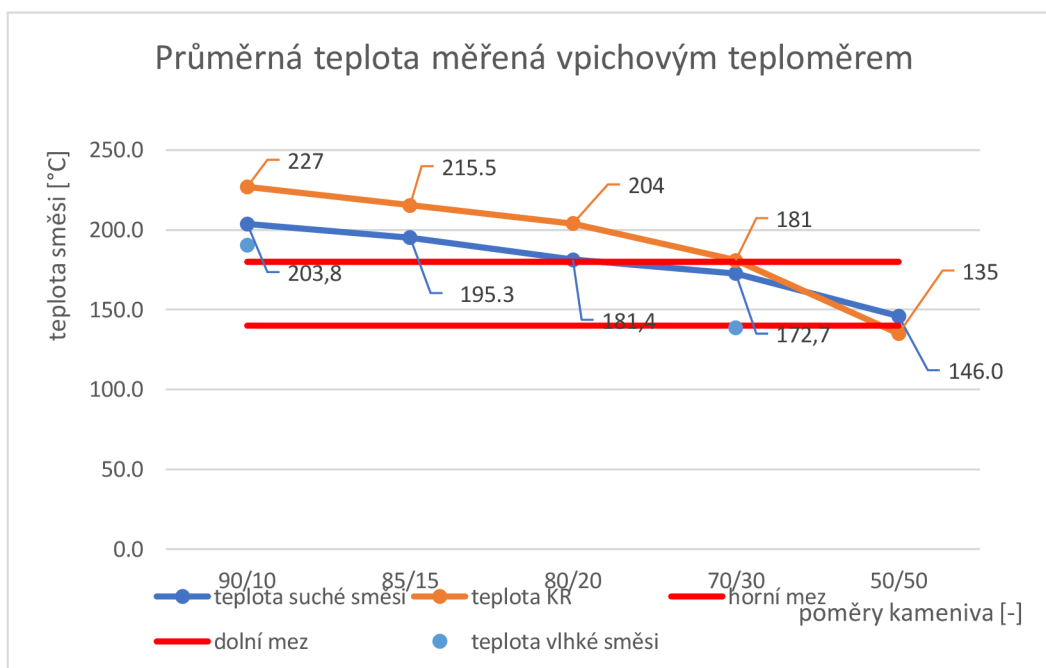
Na obrázku 25 je srovnání výsledných teplot suché a navlhčené směsi kameniva v poměru 70/30. Rozsah teplot na fotkách je od 230 °C do 100 °C. Vlevo je suchý poměr směsi kameniva 70/30 a vpravo je navlhčený poměr směsi kameniva 70/30.



Obrázek 25: Porovnání suché a vlhké směsi kameniva 70/30

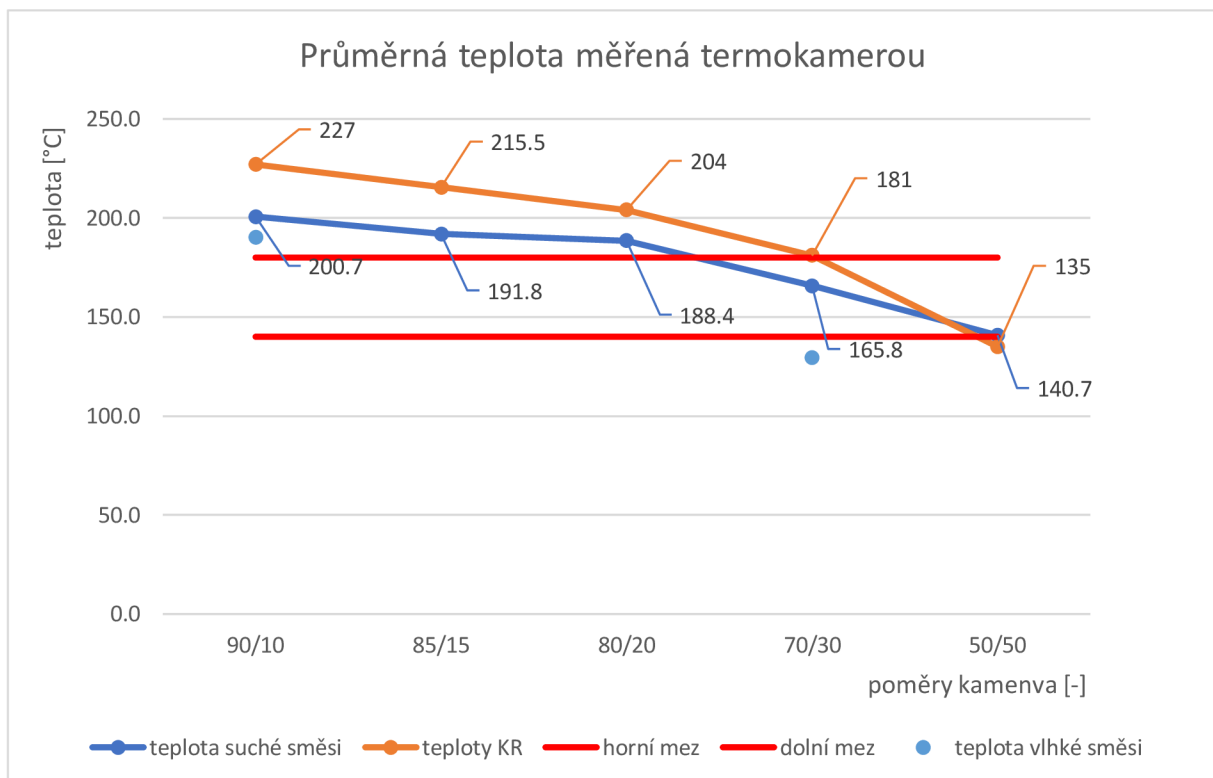
V následujících grafech bude vyjádřen vztah jednotlivých poměrů a výsledky naměřených hodnot teploty pro jednotlivé druhy zjišťování teploty směsi. Červené křivky vyjadřují interval přípustných teplot výsledné směsi ACO 11+, v případě použití asfaltového pojiva 50/70 podle normy ČSN 73 6121. Rozmezí těchto teplot je 140 °C – 180 °C. [37] Světle modrými body jsou zaznačeny teploty směsi kameniva, které obsahuje navlhčenou dávku kameniva.

V grafu 6 „Průměrná teplota měřená vpichovým teploměrem“ je vidět rozdíl hodnot naměřených vpichovým teploměrem a hodnot kalorimetrické rovnice. Teploty poměrů kameniva 90/10, 85/15, 80/20, 70/30 vyšly podle očekávání nižší než hodnoty spočtené kalorimetrickou rovnicí. Teplota poměru kameniva 50/50 vyšla vyšší než teplota podle kalorimetrické rovnice. To je zapříčiněno dodatečným ohřevem míchacího zařízení, kdy ostatní poměry byly ohřevem ochlazovány a poměru 50/50 byla tepelná energie ohřevu dodávána. Mezním hodnotám teploty R-materiálu přidávané do asfaltové směsi, vyhověla pouze směs s 30 % množstvím nenavlhčeného R-materiálu. Dalo by se očekávat, že při výrobě směsi v poměrech 85/15 a 80/20 s navlhčeným R-materiálem, by normovým požadavkům směsi kameniva s R-materiálem vyhověly.



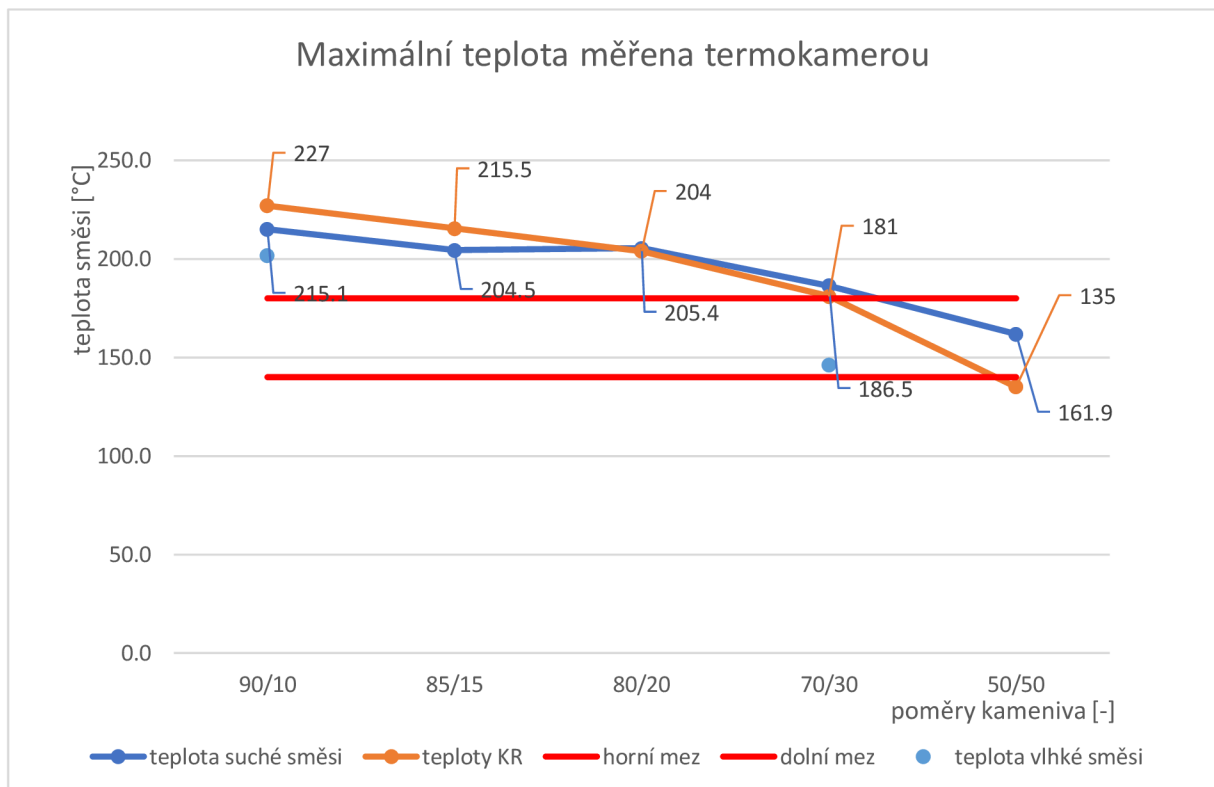
Graf 6: Průměrná teplota měřená vpichovým teploměrem

V grafu 7 „Průměrná teplota měřena termokamerou“ je vidět rozdíl hodnot naměřených termokamerou a hodnot kalorimetrické rovnice. Opět teploty poměrů kameniva 90/10, 85/15, 80/20, 70/30 vyšly podle očekávání nižší, než hodnoty spočtené kalorimetrickou rovnicí a teplota poměru 50/50 se teplotě podle kalorimetrické rovnice blíží, ale je stále vyšší. Je to nadále důsledkem ohřevu v míchacím zařízení, které tepelnou energii do soustavy dodávalo. Mezním hodnotám teploty R-materiálu přidávané do asfaltové směsi, vyhověla pouze směs s 30 % množstvím nenavlhčeného R-materiálu. Je zde ale opět prognóza vhodnosti směsi v poměru 85/15 a 80/20 s navlhčeným poměrem podílu R-materiálu.



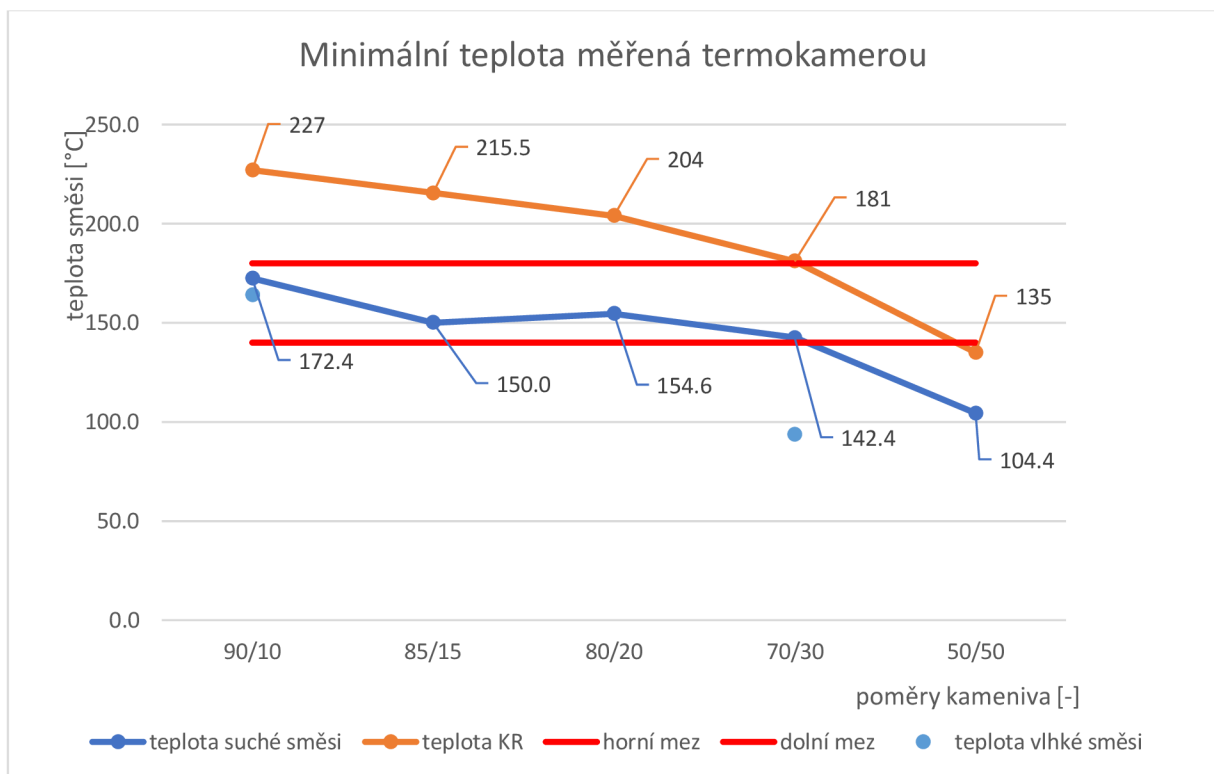
Graf 7: Průměrná teplota měřená termokamerou

V grafu 8 „Maximální teplota měřena termokamerou“ je vidět rozdíl hodnot naměřených termokamerou a hodnot kalorimetrické rovnice. V případě sledování maximální teploty hodnoty vyšly hodnoty, pod křivkou kalorimetrické rovnice, v poměrech 90/10 a 85/15. Za to teploty poměrů nad křivkou kalorimetrické rovnice vyšly v případech poměru 80/20, 70/30 a 50/50. V zmíněných případech nelze jednoznačně říct, že je teplota v poměrech zapříčiněna dodatečným ohřevem, protože se jedná o hodnoty maximální ve směsi. Mezním hodnotám teploty R-materiálu přidávané do asfaltové směsi vyhověl pouze poměr kameniva 50/50. Tenhle poměr ale již nesplňuje požadavky normy, která udává maximální procentuální množství R-materiálu 30 %. [37] Maximálním hodnotám nelze ale dávat směrodatnou hodnotu, jelikož ukazuje pouze maximální hodnotu teploty směsi v určitém místě a neplatí tedy pro celou směs. Pro vyhodnocení vhodnosti jsou vhodnější teploty průměrné.



Graf 8: Maximální teplota měřena termokamerou

V grafu 9 „Minimální teplota měřená termokamerou“ je vidět rozdíl hodnot naměřených termokamerou a hodnot kalorimetrické rovnice. V případě minimálních hodnot došlo k umístění křivky teplot poměrů pod křivku teplot kalorimetrické rovnice. To byl očekávaný výsledek měření, jelikož minima teplot jsou významně nižší než průměrné teploty vyhodnocené termokamerou. Mezním hodnotám teploty R-materiálu přidávané do asfaltové směsi vyhověly poměry kameniva 90/10, 85/15, 80/20 a 70/30. Poměr 50/50 nevyhověl. Minimálním hodnotám, taktéž jako maximálním, nelze udávat směrodatnou hodnotu, jelikož se jedná pouze o minima teplot ve směsi, a ne jako teplotu homogenní v celém objemu materiálu.



Graf 9: Minimální teplota měřená termokamerou

7 Závěr

V bakalářské práci byla zjišťována výsledná teplota směsi kameniva v 5 poměrech dávkování studeného kameniva (20 °C) a horkého kameniva (250 °C). Tím bylo simulováno dávkování R-materiálu studenou cestou do horkého kameniva na obalovně asfaltových směsí. Také byl sledován vliv vlhkosti studené dávky kameniva na výslednou teplotu směsi kameniva a pokles teploty celé navážky směsi o hmotnosti 10 kg. Metodika laboratorního mísení dvou směsí kameniv s různou teplotou byla vyvinuta v rámci bakalářské práce. Pro zjišťování teploty byl použit vpichový teploměr a termokamera.

Při sledování poklesu teploty směsi kameniva (rychlost chladnutí) byl zjištěn očekávaný pokles teploty připomínající křivku exponenciální funkce. Již během prvních 90 sekund od vyjmutí směsi kameniva z laboratorní sušárny teplota směsi poklesla přibližně o 30 °C. To naznačuje strmý pokles teploty v prvních okamžicích vystavení směsi okolní, významně nižší teplotě. Stejně tak při posledních intervalech měření je z grafů patrné, že rozdíly teplot mezi měřeními se menší a brzy by se hodnota ustálila na teplotě, která by odpovídala množství dodané tepelné energie od topného článku míchacího zařízení a tepelné energii odevzdané okolí.

Při sledování korelace výsledných teplot směsi poměrů bylo zjištěno, že v poměrech 90/10, 85/15, 80/20 a 70/30 se průměrné hodnoty teploty výsledné směsi přiblížily podobnou měrou k teoretické hodnotě teploty výsledné směsi vypočtené kalorimetrickou rovnicí. Při předpokladu využití průměrných hodnot teplot, měřených vpichovým teploměrem a termokamerou, by se vzhledem k mezním teplotám asfaltové směsi uvedeným v normě ČSN 73 6121 (140 °C až 180 °C pro směs stmelenu asfaltem třídy 50/70) dala při výrobě nové asfaltové směsi využít pouze směs kameniva s 30 % podílem suchého R-materiálu.

Mnou sledované navlhčené poměry kameniva (simulujícího přidávání R-materiálu) normovým požadavkům nevyhověly. To by ovšem bylo možné řešit nahříváním kameniva v obalovně na jinou teplotu, než je teplota maximálně přípustná podle normy ČSN 73 6121. Zajímavé bylo, že při 30 %ním dávkování studeného kameniva s 5 %ní vlhkostí (tj. pouze 1,5 % vlhkosti celé směsi kameniva) byla teplota výsledné směsi o 34 °C nižší než při dávkování stejných poměrů kameniv, ovšem dokonale vysušených. Minimální a maximální hodnoty teplot, získané plošnou

analýzou snímků z termokamery, vykazovaly příliš velké výchylky v měření, tudíž k nim nelze přihlížet jako k směrodatným.

Na základě dosažených výsledků práce lze říct, že by bylo zajímavé na tuto práci navázat v následném výzkumu ověřením vlivu jiných vstupních teplot, než byly voleny v této práci (250 °C a 20 °C) a rovněž by mohl být zjišťován vliv různých vlhkostí na výslednou teplotu kameniva.

8 Seznamy

8.1 Seznam použité literatury

[1] MA, Quingwei, Zhongyin GUO, Ping GUO, Liangyu SUN, Fayong YANG a Haibin LI. *Research on Fatigue Prediction Model of Asphalt Mixture with High RAP Content*. 2021, 16. dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/7995#B1-sustainability-13-07995>

[2] Sčítání dopravy: výstupy z celostátního sčítání dopravy 2020. In: *ŘSD ČR* [online]. Na Pankráci 546/56 140 00 Praha 4-Nusle: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., ManpowerGroup s.r.o. a VARS BRNO, 2020, 2020 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.rsd.cz/silnice-a-dalnice/scitani-dopravy#zalozka-celostatni-scitani-dopravy-2020>

[3] PŘÍVARA, Jakub. *VYUŽITÍ BĚŽNÉHO R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH*. 2016. Brno, 73s., 11s. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Dašek PhD.

[4] TP 210, UŽITÍ RECYKLOVANÝCH STAVEBNÍCH DEMOLIČNÍCH MATERIÁLŮ DO POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ministerstvo dopravy ČR, 1.1.22011 8s, 5.1 všeobecně

[5] Timothy Aschenbrener ARCHIVED: Chapter 1. Introduction To Pavement Recycling. Updated: 10.21.2022., U.S. Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/01.cfm>

[6] ČSN EN 13108-8. Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: část 8: R-materiál. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

- [7] PŘÍVARA, Jakub. *VYUŽITÍ BĚŽNÉHO R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH*. 2016. Brno. 14s. 2.2 Značení R-materiálu. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, fakulta stavební, ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, PhD.
- [8] Bourání a likvidace asfaltu Praha – od 1 m² do několika tisíců m². In: *Evropská databanka* [online]. Jeremenkova 3 Praha 4 147 00, 2018 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://nabidky.edb.cz/Nabidka-116537-bourani-a-likvidace-asfaltu-praha-od-1-m2-do-nekolika-tisicu-m2>
- [9] PŘÍVARA, Jakub. *VYUŽITÍ BĚŽNÉHO R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH*. 2016. Brno. 14s. 2.3 Získávání a uložení R-materiálu. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, fakulta stavební, ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, PhD.
- [10] Frézování vozovek: FRÉZOVÁNÍ ASFALTOVÝCH A BETONOVÝCH PLOCH. In: *Www.frekomos.cz* [online]. Valašské Meziříčí Česká republika: FREKOMOS © 2020, WANET, 2020, 2020 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.frekomos.cz/frezovani-vozovek/>
- [11] ZAUMANIS, Martins, Dominique LOETSCHER, Samuel MAZOR a Fabian STÖCKLI. Construction and Building Materials. *Construction and Building Materials: Impact of milling machine parameters on the properties of reclaimed asphalt pavement*. EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf, Switzerland: Elsevier, 2021, 2.
- [12] ING. POUL, Ondřej. *STUDIE SILNIČNÍCH FRÉZ*. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2013. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. JAROSLAV KAŠPÁREK, Ph.D.
- [13] HÁJEK, Ondřej. Trimble GCS900 vede frézu po Kunratické spojce třetím rozměrem. In: *Bagry.cz* [online]. Hádecká 21, 614 00 Brno, CZ: CE Grid, 2014 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://bagry.cz/cze/clanky/nazivo/trimble_gcs900_vede_frezu_po_kunraticke_spojce_tretim_rozmerem

- [14] ČSN 73 6141 1 (2021). *Požadavky na použití r-Materiálu do asfaltových směsí – část 8. Požadavky na technologické postupy zpracování R-materiálu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [15] Timothy Aschenbrener ARCHIVED: *Chapter 1. Introduction To Pavement Recycling*. Updated: 10.21.2022., U.S. Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/01.cfm>
- [15] ČSN EN 13108-8. *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: Část 8: R-materiál*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [16] Timothy Aschenbrener ARCHIVED: *Chapter 13 Cold in place recycling (construction methods and equipment)*. Updated: 21.10.2021., U.S. Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/13.cfm>
- [17] TP 208, *RECYKLACE KONSTRUKČNÍCH VRSTEV NETUHÝCH VOZOVEK ZA STUDENA*, Ing. Jan Zajíček – APT SERVIS, Červenec 2009
- [18] Timothy Aschenbrener ARCHIVED: *Chapter 13 Cold in place recycling (construction methods and equipment)*. Updated: 21.10.2021., U.S. Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/13.cfm>
- [19] Timothy Aschenbrener ARCHIVED: *Chapter 9. Hot In-Place Recycling (Construction Methods And Equipment)*. Updated: 21.10.2021 Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/09.cfm>
- [20] TP 82, *Katalog poruch netuhých vozovek*, PavEx® Consulting, s.r.o., Ministerstvo dopravy ČR, 22.3.1996. s10, 11. 4 Mechanismy porušení vozovek
- [21] TP 209, *RECYKLACE ASFALTOVÝCH VRSTEV NETUHÝCH VOZOVEK NA MÍSTĚ ZA HORKA*, NIEVELT-Labor Praha, spol. s.r.o., Ministerstvo dopravy odbor silniční infrastruktury. Červenec 2009. Dostupné z: https://pjpk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_209.pdf

- [22] TKP 7, *Kapitola 7 HUTNĚNÉ ASFALTOVÉ VRSTVY*, 7.3.6. Skladování a doprava směsi, Ministerstvo dopravy Odbor infrastruktury. Praha, duben 2008
- [23] Timothy Aschenbrener ARCHIVED: *Chapter 10. Hot In-Place Recycling (Materials And Mix Design)* Updated: 10.21.2022., U.S. Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/10.cfm>
- [24] *Cold Recycled Asphalt Mix Design*, National Center for Asphalt Technology at Auburn University, Dostupné z: <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/newsroom/2019-spring/coldrecycle.html>
- [25] Timothy Aschenbrener, ARCHIVED: *Chapter 7. Hot Mix Asphalt Recycling (Materials And Mix Design)* Updated: 10.21.2022., U.S. Department of Transportation, Federal highway administration. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/07.cfm>
- [26] Dina K. Kuttah, *Hot recycling of asphalt at a central plant*, vti. Linköping October 2013. Dostupné z: <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:762099/FULLTEXT01.pdf>
- [27] Filip Hlávka, *Analýza složení asfaltového R-materiálu a jeho využití v asfaltové směsi*. Praha, 2019.,
- [28] Giulia Tarsi, Piergiorio Tataranni, Cesare Sangiorgi, *The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review*, Published: 12. September 2020, Department of Civil, Chemical, Environmental and Materials Engineering-University of Bologna, Dostupné z: <file:///C:/Users/Tom%C3%A1%C5%A1/Downloads/materials-13-04052-v2.pdf>
- [29] K Aravind, Animesh Das, *Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes*, Available online: 18.07.2006, Indian Institute of Technology Kanpur, department of civil engineering, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806000663>
- [30] ČSN 73 6121. *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody: 5.3 Výroba*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.
- [31] ČSN 73 6121. *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody: 5.3 Výroba, tab. 5*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.

- [32] ČSN EN 12697-35. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi: 6.2.2 příprava kameniva a filleru*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [33] DUBŠÍKOVÁ, Karolína. *ODOLNOST ASFALTOVÉHO POJIVA A ASFALTOVÉ SMĚSI VŮČI DEFORMACI: 4.4.1 Postup síťového rozboru*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.
- [34] STEHLÍK, Dušan; ŠPERKA, Pavel. Klasifikace a charakteristiky stavu zemin podle ČSN 73 6133. [online]. 2022. [citováno 2023-05-21]
- [35] MYŠÁK, Jan. Kalorimetrická rovnice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11. 6. 2020 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kalorimetrick%C3%A1_rovnice
- [36] *Stavba.tzb-info: Sypké materiály* [online]. Praha: Topinfo, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html
- [37] ČSN 73 6121. *ČSN 73 6121: Tabulka E.7 - Požadavky na asfaltové betony do obrusných vrstev*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [38] PRESS, Profi. Energie 21: Termokamery kontrolují provoz elektráren. In: *Energie 21: Termokamery kontrolují provoz elektráren* [online]. Praha: Energie 21, 2012, 2012 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://energie21.cz/termokamery-kontroluji-provoz-elektren/>
- [39] ČSN 73 6121. *ČSN 73 6121: Tabulka E.7 - Požadavky na asfaltové betony do obrusných vrstev*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [40] ČSN 73 6121. *Požadavky na využití R-materiálu do asfaltových směsí: 5.4.2 Asfaltové pojiva*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [41] ČSN EN 13108-8. *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: část 8: R-materiál*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

8.2 Seznam obrázků

Obrázek 1: Pentlogram intenzit dopravy [2].....	10
Obrázek 2: Schéma koloběhu recyklovaného materiálu [11]	13

Obrázek 3: Bourání krytu vozovky pomocí kladiva [8]	13
Obrázek 4: Silniční fréza wirtgen w2100 [13].....	14
Obrázek 5: Druhy frézovacích bubnů [12]	14
Obrázek 6: Skládka R-materiálu 16 RA 0-11, obalovna Zádveřice	15
Obrázek 7: Schéma recyklace za studena [18].....	17
Obrázek 8: Technologický postup při recyklaci za studena na místě [18]	17
Obrázek 9: Schéma šaržové obalovny s paralelním bubnem [17]	21
Obrázek 10: Schéma kontinuální obalovny [17].....	22
Obrázek 11: laboratorní míchačka	28
Obrázek 12: Fluke software	29
Obrázek 13: Termokamera fluke [38]	29
Obrázek 14: Vpichový teploměr	30
Obrázek 15: Grafické zobrazení poklesu teploty směsi kameniva v čase	37
Obrázek 16: Záznam z měření termokamerou poměru 90/10	41
Obrázek 17: Záznam z měření termokamerou poměru 85/15	42
Obrázek 18: Záznam z měření termokamerou poměru 80/20	43
Obrázek 19: Záznamy z měření termokamerou poměru 70/30.....	44
Obrázek 20: Záznamy z měření termokamerou 50/50	45
Obrázek 21: Záznam z měření kamerou 90/10 - vlhké	47
Obrázek 22: Záznam z měření kamerou 70/30 - vlhké	48
Obrázek 23: Porovnání teplot výsledné směsi kameniva	49
Obrázek 24: Porovnání suché a vlhké směsi kameniva 90/10	49
Obrázek 25: Porovnání suché a vlhké směsi kameniva 70/30	49

8.3 Seznam tabulek

Tabulka 3: Teoretické hodnoty podle množství a teploty	33
Tabulka 4: Teoretické hodnoty podle kalorimetrické rovnice	35
Tabulka 5: Průběh poklesu teploty v čase	36
Tabulka 6: Naměřené teploty směsi 90/10	41
Tabulka 7: Naměřené teploty směsi 85/15	42
Tabulka 8: Naměřené teploty směsi 80/20	43
Tabulka 9: Naměřené teploty směsi 70/30	44

Tabulka 10: Naměřené teploty směsi 50/50.....	45
Tabulka 11: Naměřené teploty navlhčené směsi 90/10	46
Tabulka 12: Naměřené teploty navlhčené směsi 90/10	48

8.4 Seznam grafů

Graf 1: Čára zrnitosti směsi kameniva	32
Graf 2: Ztráta tepelné energie v čase pomocí vpichového teploměru	38
Graf 3: Ztráta tepelné energie v čase pomocí termokamery – maximální hodnoty	38
Graf 4: Ztráta tepelné energie v čase pomocí termokamery – minimální hodnoty.....	39
Graf 5: Ztráta tepelné energie v čase pomocí termokamery – průměrné hodnoty	39
Graf 6: Průměrná teplota měřená vpichovým teploměrem.....	50
Graf 7: Průměrná teplota měřená termokamerou	51
Graf 8: Maximální teplota měřená termokamerou	52
Graf 9: Minimální teplota měřená termokamerou.....	53