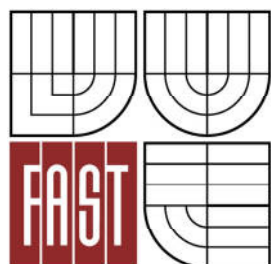




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

SLEDOVÁNÍ ODOLNOSTI PROTI MRAZU A VODĚ
STMELENÝCH SMĚSÍ DO POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
RESISTANCE TO FREEZING AND THAWING OF HYDRAULICALLY BOUND MIXTURES TO ROADS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ ŠVANTNER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2014



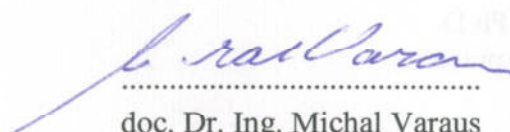
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

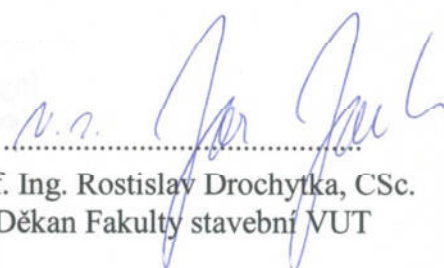
Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. LUKÁŠ ŠVANTNER
Název Sledování odolnosti proti mrazu a vodě stmelенých směsí do pozemních komunikací
Vedoucí diplomové práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2013
Datum odevzdání diplomové práce 17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013


.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT



Podklady a literatura

ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 1: Směsi stmelené cementem

ČSN EN 14227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy - Specifikace - Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy

další související normové předpisy

veřejně přístupné články a literatura z internetu

výzkumné zprávy týkající se zadané problematiky

diplomové práce s podobnou problematikou řešení

sborníky českých a zahraničních technických konferencí

apod.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Práce je zaměřená na sledování problematiky nastavené hodnotě v normě pro odolnost proti mrazu a vodě. Cílem práce je ověřit na širším souboru různých stmelených směsí (min.8) hodnocení tohoto parametru podle současně platné ČSN EN 14227 a jeho národním dodatku. Výsledkem práce se očekává zhodnocení možnosti úpravy sledovaného parametru odolnosti proti mrazu a vodě v závislosti na použitém stmelěném materiálu (přírodní a recyklované směsi) a typ hydraulického pojiva.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Bibliografická citace VŠKP

ŠVANTNER, Lukáš. *Sledování odolnosti proti mrazu a vodě stmelěných směsí do pozemních komunikací*. Brno, 2013. 81 s., 93 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D..

Abstrakt

Teoretická časť diplomovej práce sa zaoberá porovnávaním jednotlivých metód sledovania odolnosti betónových recyklátov stmelených hydraulickými spojivami proti účinkom mrazu a vody v Českej republike a niektorých štátov Európskej únie. Praktická časť sa venuje laboratórnemu skúšaniu betónového recyklátu s prímiesou spojív a jeho odolnosti proti vode a mrazovým cyklom v Českej republike. Na vyhotovených valčekoch sa porovnáva pevnosť v prostom tlaku s pevnosťou v prostom tlaku po mrazových cykloch. Z výsledkov skúšok sa uvažuje vhodnosť použitia týchto stmelených zmesí do konštrukcie pozemných komunikácií a to v závislosti na druhu použitého spojiva, množstve spojiva a vody. Výsledky diplomovej práce budú použité k revízii národného dodatku technologickej normy ČSN 73 6124-1.

Kľúčové slová

Pevnosť v prostom tlaku, mrazové cykly, betónový recyklát, spojivo, stmelené zmesi, odolnosť, pozemná komunikácia.

Abstract

The theoretical part of this master's thesis contain comparing the methods of endurance hydraulic bound mixtures of concrete recycles against influence of water and freeze in Czech republic and some other states of The European Union. The practical part is dedicated about laboratory testing concrete recycles with mixtures of binders and its endurance against the water and freeze cycles in Czech republic. In made rollers is compared the strength in pure compression with the strength in pure compression after freezing cycles. From the results of the exams is considered about suitability of using these hydraulic bound mixtures to road construction depending on the kind of use binder, amount of the binder and water. Results of this thesis will be used to revision of national postscript of technological norm ČSN 73 6124-1.

Key words

Strength in pure compression, freeze cycles, concrete recycled, binder, bound mixtures, resistance, land communication.

Abstrakt

Teoretická část diplomové práce se zabývá porovnáváním jednotlivých metod sledování odolnosti betonových recyklátů stmelených hydraulickými pojivy proti účinkům mrazu a vodě v České republice a některých států Evropské unie. Praktická část se věnuje laboratornímu zkoušení betonového recyklátu s příměsí pojiv a jeho odolnosti proti vodě a mrazovým cyklům v České republice. Na vyhotovených válečcích se porovnává pevnost v prostém tlaku s pevností v prostém tlaku po mrazových cyklech. Z výsledků zkoušek se uvažuje vhodnost použití těchto stmelených směsí do konstrukce pozemních komunikací a to v závislosti na druhu použitého pojiva, množství pojiva a vody. Výsledky diplomové práce budou použité k revizi národního dodatku technologické normy ČSN 73 6124-1.

Klíčové slova

Pevnost v prostém tlaku, mrazové cykly, betonový recyklát, pojivo, stmelené směsi, odolnost, pozemní komunikace.

Prehlásenie:

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne, podľa pokynov vedúceho diplomovej práce. Všetky zdroje, z ktorých som čerpal informácie na vyhotovenie práce, sú riadne uvedené v zozname použitej literatúry.

V Brne, dňa 17.1.2014

.....

Lukáš Švantner

Pod'akovanie:

Veľmi rád by som sa chcel poďakovať všetkým, ktorí mi pomáhali pri vypracovávaní mojej práce, predovšetkým Ing. Dušanovi Stehlíkovi, Ph. D. za odborné vedenie a cenné rady, ako i Pavlovi Strakovi za jeho pomoc a ochotu pri prevádzaní laboratórnych skúšok na ústave pozemných komunikácií.

Taktiež by som sa chcel poďakovať aj celej mojej rodine za ich podporu pri štúdiu.

Obsah:

1. ÚVOD A CIELE PRÁCE	10
2. TEORETICKÁ ČASŤ	11
2.1 Úvod	11
2.2 Definícia dôležitých pojmov.....	11
2.3 Recyklované materiály do pozemných komunikácií	14
2.3.1 Úvod.....	14
2.3.2 Výroba recyklátu.....	15
2.3.3 Ekonomické hľadisko.....	18
2.3.4 Ekologické hľadisko.....	18
2.4 Spojivá	19
2.4.1 Úvod.....	19
2.4.2 Cement.....	19
2.4.3 Doroport TB 25.....	22
2.5 Používanie a návrh stmelených zmesí do PK	24
2.5.1 Úloha, vlastnosti stmelených vrstiev	24
2.5.2 Zmesi stmelené cementom.....	26
2.5.3 Zmesi stmelené Doroportom TB 25	29
2.6 Odolnosť proti mrazu a vode.....	31
2.6.1 Česká republika.....	31
2.6.2 Anglicko.....	32
2.6.3 Nemecko	37
3. PRAKTICKÁ ČASŤ	39
3.1 Materiál.....	39
3.2 Laboratórne skúšky.....	41
3.2.1 Zhutniteľnosť	41
3.2.2 Pevnosť v prostom tlaku.....	44
3.2.3 Mrazové cykly.....	46
3.3 Postup prípravy a skúšania, zhodnotenie výsledkov	47
3.3.1 Proctorova skúška	47
3.3.2 Príprava skúšobných telies.....	50
3.3.3 Pevnosť v prostom tlaku.....	52
3.3.4 Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch	61
3.3.5 Výsledná odolnosť proti mrazu a vode.....	70
4. ZÁVER.....	74

ZOZNAM LITERATÚRY	76
1. Použitá.....	76
2. Doporučená	76
3. Doplnková.....	77
ZOZNAM SKRATIEK	78
ZOZNAM OBRÁZKOV	78
ZOZNAM TABULIEK.....	80
ZOZNAM GRAFOV	81
PRÍLOHY	82
A - Diagramy pevností v prostom tlaku	82
B - Diagramy pevností v prostom tlaku po mrazových cykloch.....	88

1. ÚVOD A CIELE PRÁCE

V súčasnej dobe je čoraz viacej kladený dôraz na používanie recyklovaných materiálov pri výstavbe pozemných komunikácií. Hlavnými výhodami pri používaní recyklátov ako náhrady za prírodné kamenivo je ochrana životného prostredia, ekonomické aspekty, znižovanie objemov odpadov a úspora energií. Recyklované materiály nemajú žiadny negatívny vplyv na výslednú kvalitu pozemných komunikácií a ich vlastnosti sú takmer totožné s prírodnými materiálmi. Samozrejme, len za dodržania správneho technologického postupu od samotnej výroby materiálov až po prevádzanie konštrukčných vrstiev, k čomu je potrebná dokonalá znalosť vlastností materiálu.

Najväčším nepriateľom pozemných komunikácií je voda, ktorej účinky na zemné teleso, konštrukčné vrstvy ako i na samotný prevoz na komunikácii sú naskrz negatívne. Môže spôsobovať objemové zmeny u niektorých materiálov, vymývať jemnozrnné častice a pod., ale jej najdeštruktívnejšie účinky sú za spolupôsobenia s mrazom. Voda vplyvom kapilárnych síl môže vzliňať až do konštrukčných vrstiev vozovky nachádzajúcich sa v zámrznej hĺbke. Tu vplyvom mrazu zväčšuje svoj objem čím dochádza ku vyzdvihovaniu, prípadne trhaniu jednotlivých vrstiev v dôsledku tzv. mrazových zdvihov. Taktiež vplyvom pôsobenia mrazových cyklov, čiže opakovaného striedania kladných a záporných teplôt, dochádza k znižovaniu samotnej únosnosti vrstiev. Táto diplomová práca sa bude predovšetkým zaoberať porovnávaním pevnosti (únosnosti) podkladových konštrukčných vrstiev pred a po vystavení mrazovým cyklom.

Teoretická časť práce sa venuje materiálom používaným do stmelených podkladových vrstiev, ich vlastnosťami, návrhom a skúšaním. Ďalej sa zaoberá skúmaním a porovnávaním jednotlivých metód skúšok na odolnosť proti mrazu a vode stmelených zmesí v Českej republike a vo vybraných štátoch Európskej únie. V súčasnej dobe neexistuje jednotná norma navrhovania a posudzovania stmelených zmesí do podkladových vrstiev pozemných komunikácií z hľadiska odolnosti proti mrazu a vode pre všetky štáty Európskej únie, čo je samozrejme pochopiteľné z hľadiska rozdielnych národných zvyklostí ale najmä kvôli odlišným klimatickým podmienkam na území jednotlivých štátov.

Praktická časť je zameraná na samotné skúšanie odolnosti proti mrazu a vode podľa skúšok platných v Českej republike. Hlavne je zameraná na sledovanie kritéria hodnotenia pevnosti v prostom tlaku po mrazových cykloch (0,85 Rc). Podľa výsledkov skúšok sa bude uvažovať na vhodnosť použitia betónového recyklátu s prímiesou spojív do podkladových vrstiev pozemných komunikácií.

2. TEORETICKÁ ČASŤ

2.1 Úvod

Teoretická časť sa zaoberá používaním recyklovaných materiálov do pozemných komunikácií, ich vlastnosťami a výrobou. Jedná sa hlavne o betónový recyklát používaný vo forme kameniva do stmelených zmesí podkladových vrstiev. Samozrejme, aby stmelená zmes mohla byť stmelenou, musí byť vhodne použité i spojivo. V tejto diplomovej práci sa bude pracovať s dvomi najpoužívanejšími spojivami, a to konkrétne so zmesným cementom a Doroportom TB 25. Vysvetlená bude ich výroba, vlastnosti ako i správny návrh zmesí stmelených hydraulickými spojivami podľa noriem platných v Českej republike.

Záver teoretickej časti bude patriť porovnávaniu skúšok platných v Českej republike so skúškami prevádzanými v okolitých štátoch Európskej únie a to konkrétne skúšky na mrazové zdvihy vystihujúce mrazovú citlivosť materiálov.

2.2 Definícia dôležitých pojmov

Zhutiteľnosť zeminy je laboratórna skúška odvodená z praktických pozorovaní chovania zemín v dopravných stavbách, stanovuje závislosť objemovej hmotnosti danej zeminy na určitej vlhkosti, pri ktorej sa dá túto objemovú hmotnosť dosiahnuť. [4]

Mrazuvzdornosť charakterizuje rozpadávanie zŕn pôsobením vlhkosti a mrazových cyklov. [4]

Stavebný a demolačný odpad (SDO) je inertný odpad, ktorý nemá nebezpečné vlastnosti a u ktorého za normálnych klimatických podmienok nedochádza k žiadnym významným fyzikálnym, chemickým alebo biologickým zmenám. [11]

Recyklovaný stavebný materiál – recyklát (RSM) – je materiálový výstup zo zariadenia k využívaniu a úprave SDO, kategórie ostatný odpad a odpadov podobných SDO, spočívajúci v zmene zrnitosti a jeho roztriedenia na veľkostné frakcie v zariadeniach k tomu určených. [11]

Recyklát z betónu – je recyklované kamenivo získané drvením a triedením betónu a betónových výrobkov, obsah zložky $R_c \geq 90\%$ hm.1, obsah $(R_u + R_b) \leq 6\%$, maximálny obsah zložky $R_g \leq 1\%$ hm. Maximálny obsah iných, ostatných a plávajúcich častíc

(X+Y+FL) je 3% hm. FL sa stanovuje objemovo podľa ČSN EN 933-11. Pozn. Maximálne množstvo plávajúcich častíc (FL) je 1%. [11]

Recyklát z vozoviek – je recyklované kamenivo získané drvením a triedením betónu, vrstiev stmelých asfaltom alebo hydraulickým spojivom prípadne nestmelých vrstiev a hrubozrnných zemín s celkovým obsahom zložiek $R_c + R_a + R_u \geq 95\%$ hm. Maximálny obsah zložky R_a je 30% hm. Maximálny obsah iných, ostatných a plávajúcich častíc (X+Y+FL) je 5% hm. [11]

Recyklát zmesný – je recyklát, získaný drvením a triedením SDO, ktorý sa nepovažuje za kamenivo v zmyslu ČSN EN 12620+A1, ČSN EN 13043 alebo ČSN EN 13242+A1. Podiel hlavných zložiek nie je určený a obsah iných, ostatných a plávajúcich častíc (X+Y+FL) je $\leq 10\%$ hm. Recyklát zmesný je určený prevažne ako náhrada zemín pre stavbu násypov a úpravy podloží pozemných komunikácií podľa ČSN 73 6133, zásypy rýh, terénne úpravy apod. [11]

Zmes stmelená hydraulickým spojivom je zmes, ktorá tuhne a tvrdne hydraulickou reakciou. [9]

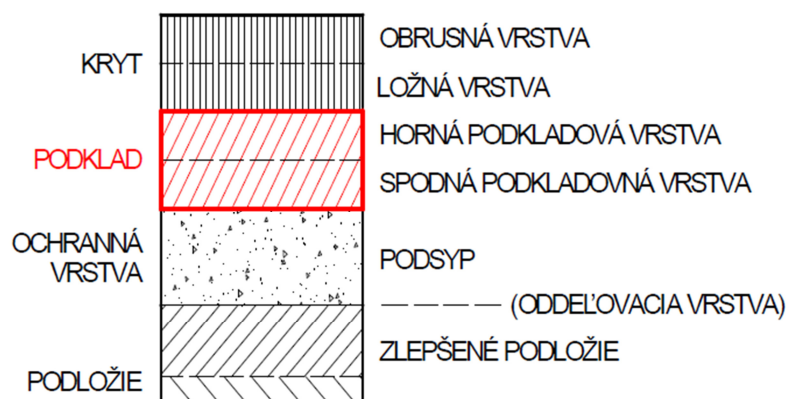
Zmes stmelená cementom je hydraulicky stmelená zmes kameniva s riadenou zrornosťou a cementom alebo hydraulického cestného spojiva typu E ako spojiva, vyrábaného spôsobom ktorý zaisťuje homogenitu zmesi. [8]

Hydraulické spojivá – hydraulická vlastnosť spojív je schopnosť práškovitých látok po rozmiešaní s vodou tuhnúť na vzduchu alebo i vo vode v trvalo pevnú hmotu. Ako hydraulické spojivá sa používajú cement, vápno a pomaly tuhnúce spojivá. [4]

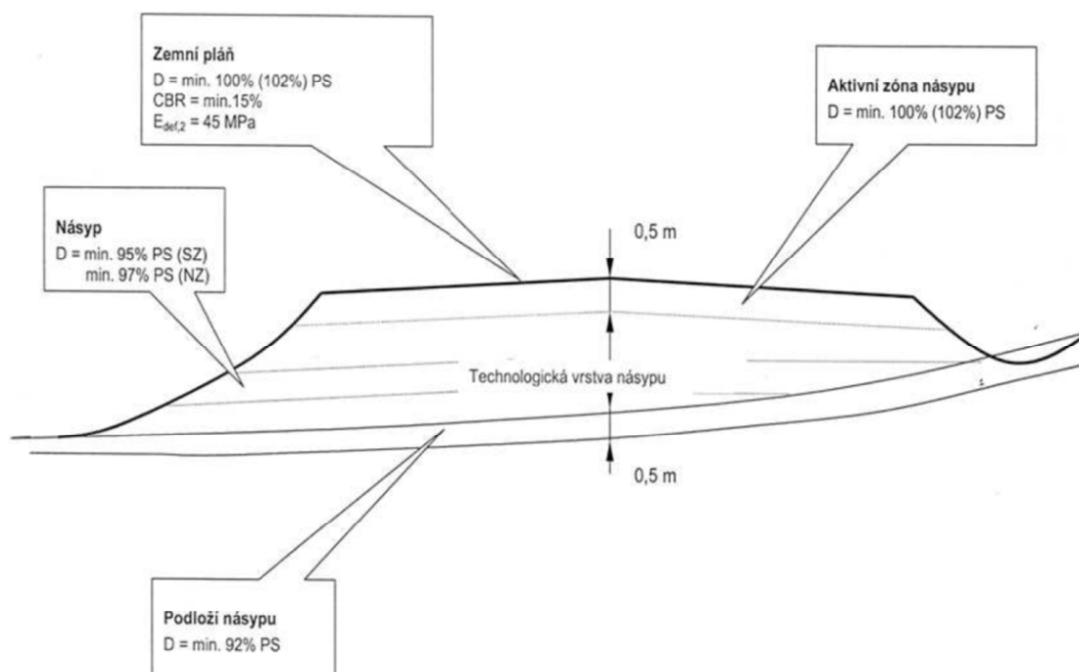
Aktívna zóna je horná vrstva zemného telesa zvyčajne hrúbky 0,5 m, do ktorej zasahujú vplyvy zaťaženia klímy. Vplyvy klímy môžu viesť k zmenám fyzikálnych a mechanických vlastností materiálov. Pre túto vrstvu sa požadujú prísnejšie parametre ako v ostatných častiach zemného telesa. [5]

Ochranná vrstva ochraňuje vrchné vrstvy vozovky pred vzlínaním vody, roznáša napätie do podložia a ochraňuje vozovku pred účinkami premrzania podložia. V súčasnej dobe je snaha v Českej republike nepoužívať toto označenie a nahradiť vyššie uvedené vlastnosti spodnou podkladovou vrstvou vozovky. [5]

Podkladová vrstva vozovky plní funkciu hlavnej nosnej vrstvy vozovky a najviac ovplyvňuje jej prevádzkovú výkonnosť, preto musí mať dostatočnú pevnosť v tlaku, pevnosť v ťahu pri ohybe, odolnosť proti vzniku trvalých deformácií aj odolnosť proti účinkom mrazu. Môže sa rozdeliť na hornú a spodnú podkladovú vrstvu. [3]



Obr. 2.1: Konštrukcia cestnej vozovky [3]



Obr. 2.2: Priečny rez pozemnou komunikáciou [5]

2.3 Recyklované materiály do pozemných komunikácií

2.3.1 Úvod

Recyklácia stavebných a demolačných odpadov sa stala v uplynulom desaťročí neoddeliteľnou súčasťou procesu nielen demolácie, ale i stavby. Recykláty zo stavebných a demolačných odpadov nachádzajú uplatnenie hlavne ako zásypové materiály najrôznejších inžinierskych sietí ale s ich zvyšujúcou sa kvalitou taktiež ako materiál pre stavbu komunikácií. [2]

Pre stavbu a opravy vozoviek sa vždy používali a používajú miestne materiály, medzi ktoré patria taktiež materiály odpadové, a to ako priemyslové odpady, tak odpady z búraných stavebných konštrukcií. Nakladanie s odpadmi je sofistikovaná činnosť a vo vyspelých štátoch je podporovaná rôznymi podmienkami a výskumnými projektmi. Celková produkcia odpadov v EU sa skladá z piatich hlavných tokov, z ktorých stavebné a demolačné odpady sa na produkcii podieľajú 22 % až 25 %, čomu je venovaná náležitá pozornosť. [2]

Jednou zo základných podmienok úspešnosti recyklácie SDO je konkurencieschopnosť vyrobených recyklátov, čo spočíva hlavne v dôslednom dodržiavaní ich akosti hlavne v súlade s príslušnými ČSN EN platnými pre kamenivo.

Stavebne demolačný odpad pochádza z odstraňovaných konštrukcií: [2]

- budov a stavebných betónových konštrukcií (z prostého alebo vystuženého betónu)
- cestných vozoviek z materiálov nestmelených alebo stmelených hydraulickým spojivom alebo asfaltom
- zo zmesi materiálov (betónové rámy, malta, tehly apod.)

Recykláciou sa rozumie premenenie stavebného demolačného odpadu na použiteľný materiál akýmkoľvek procesom. [2]

Priaznivé dopady využívania recyklácie: [1]

- znižovanie objemov odpadov
- obmedzovanie čerpania prírodných neobnoviteľných zdrojov (kamenivo)
- úspora energií (elektrina, pohonné hmoty)
- prevencia znečisťovania (výfukové plyny, prach)

- znižovanie ďalších nežiaducich vplyvov (hluk, zaťaženie komunikácií, doba výstavby)

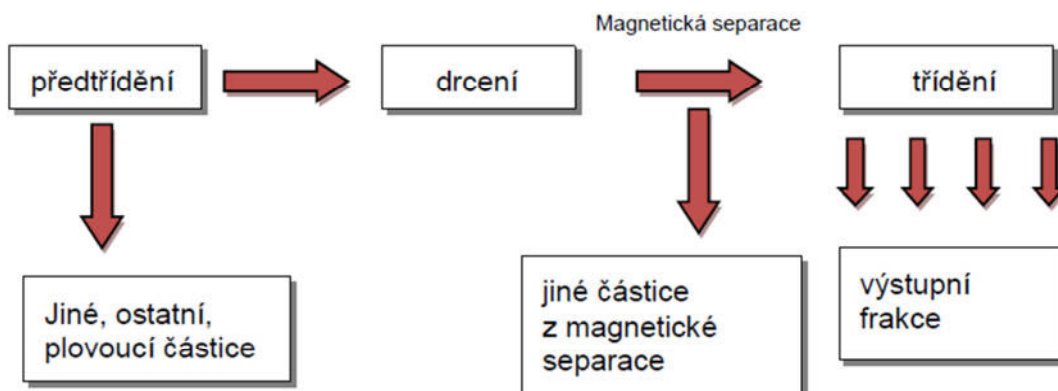
2.3.2 Výroba recyklátu

Ak má byť materiál použitý ako kamenivo, je spracovávaný nasledovnými spôsobmi:

- objavenie a odstránenie nežiaducich častíc a škodlivín ručným triedením alebo zvláštnymi zariadeniami
- oddelenie jemných častíc (to je ílových a prachovitých častíc) pred vlastným vstupom do recyklačnej linky (odhliňovačom)
- drvenie a triedenie (rovnaký spôsob ako sa používa pri výrobe kameniva) [2]

Pri bežných demolačných prácach sa ukazuje nutné prevádzať dôsledné triedenie, z hľadiska ďalšieho využitia druhotného materiálu. Zo zahraničných skúseností je jednoznačne preukázané, že triedenie stavebne demolačného odpadu už na stavbe je omnoho účinnejšie a taktiež lacnejšie, než triedenie potom priamo u výrobcu druhotnej suroviny (recyklovaného kameniva). Je to dané tým, že pri demolácii sa dajú ľahšie oddeliť od minerálnej suty všetky cudzorodé materiály (hlavne drevo, plasty, dechtové lepenky, kovy a pod.) [1]

Pôvodný recyklovateľný materiál sa skladuje oddelene podľa klasifikácie odpadových materiálov. Pred dávkovaním materiálov do recyklačnej linky sa veľké kusy materiálu zdobia hydraulickým búracím kladivom, prestrihnutím dlhých kusov hydraulickými nožnicami a vybraním najväčších nežiaducich látok. [2]



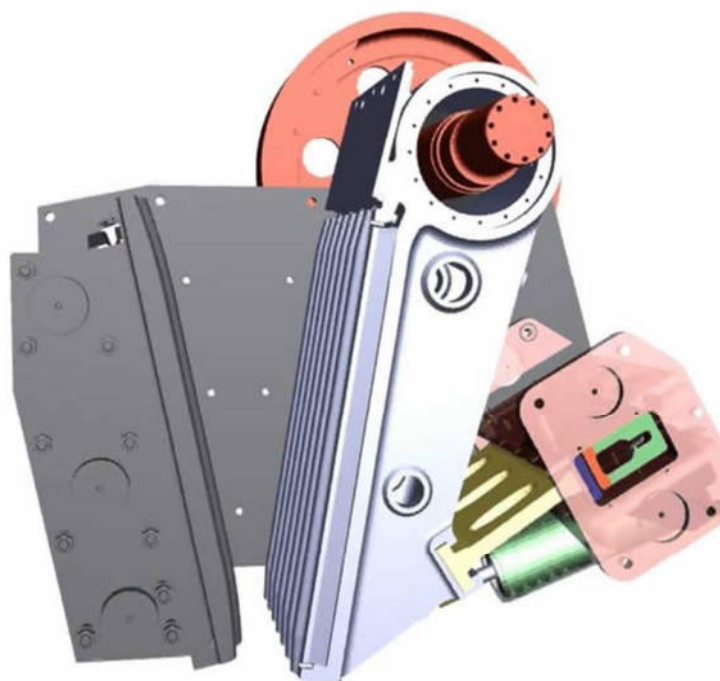
Obr. 2.3: Schéma procesu recyklácie [1]

Existujú a úspešne sa prevádzkujú i recyklačné zariadenia vybočujúce z tohto ustáleného schématu. Niemenej až na výnimočné prípady nie je výroba kvalitných recyklovaných materiálov mysliteľná bez troch základných technologických operácií: **pretriedenie - drvenie - následné triedenie**. [1]

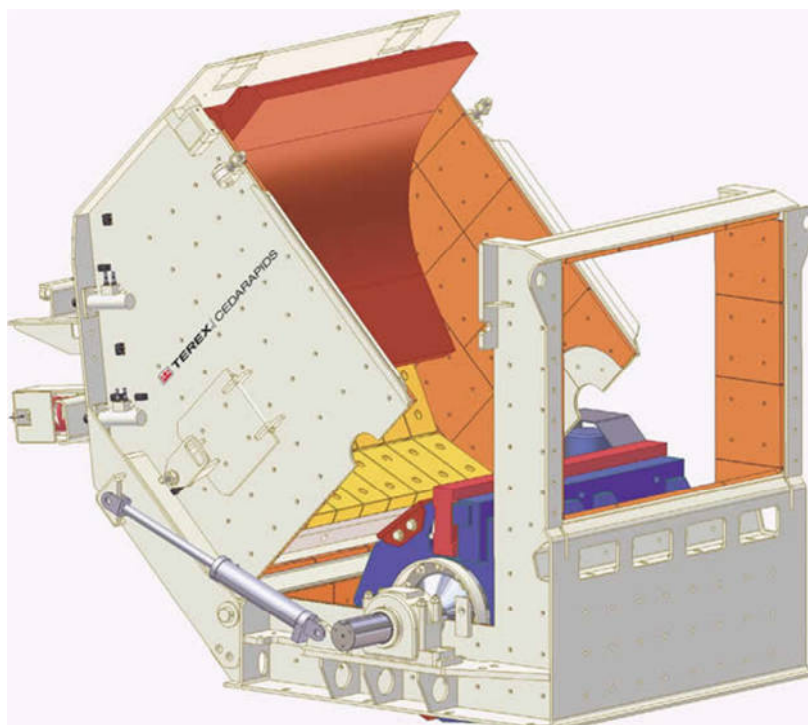
Väčšina recyklačných liniek na spracovanie odpadov má primárny a niekedy i sekundárny drvič.

Primárny drvič, ktorý môže byť čelust'ový alebo odrazový, uvoľní z betónu oceľovú výstuž a zmenší betónové kusy na maximálnu veľkosť častíc od 63 mm do 125 mm. Pri doprave materiálu pásovým dopravníkom do sekundárneho drviča sa po predchádzajúcom ručnom triedení odstráni elektromagnetickým separátorom oceľ. Druhotné drvenie rozdrobí materiál a v triedičoch sa získa materiál požadovaných frakcií. Tento postup sa môže opakovať v treťom stupni drvenia. Sekundárne spracovanie môže byť taktiež vybavené zariadením, ako je elektromagnetický separátor, premývajúce zariadenie, a iné.

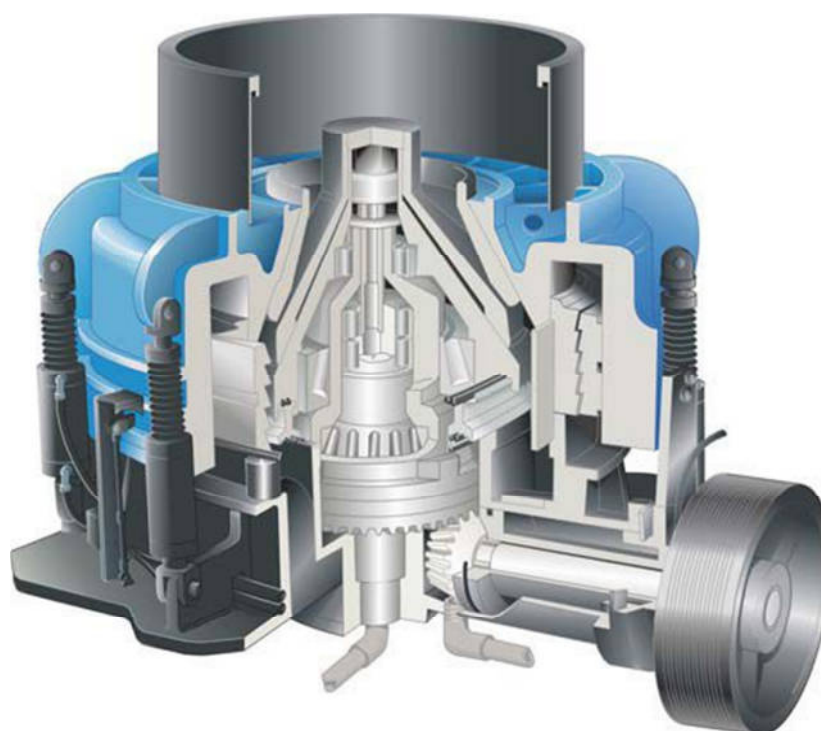
Recyklačné linky môžu byť vybavené rôznymi technickými zariadeniami, od jednoduchého čelust'ového drviča bez triedenia až po sofistikované priemyslové zariadenia s dvomi alebo tromi stupňami drvenia, triedenia a úpravou s produkciou jemného kameniva. Všetky zariadenia môžu byť mobilné alebo stacionárne. Všeobecne sú stacionárne zariadenia sofistikovanejšie a umožňujú produkciu viacej druhov materiálov. [2]



Obr. 2.4: Čelust'ový drvič [13]



Obr. 2.5: Odrazový drvič [13]



Obr. 2.6: Kužeľový drvič [13]

2.3.3 Ekonomické hľadisko

Pokiaľ recyklovaný materiál splňuje všetky kvalitatívne požiadavky, je jeho použitie do konštrukčných vrstiev vozoviek z hľadiska ceny určite výhodnejšie. Ako príklad na porovnanie sú uvedené nasledovné ceny prírodného a recyklovaného materiálu:

- **prírodné kamenivo** – 160 Kč/t (frakcia 0/32), 165 Kč/t (frakcia 0/63),
226 Kč/t (frakcia 16/32), 241 Kč/t (frakcia 8/16) [14]
- **betónový recyklát** – 70 Kč/t (frakcia 0/32), 90 Kč/t (frakcia 0/63),
160 Kč/t (frakcia 16/32) [15]
- **zmesný recyklát** – 5 Kč/t (frakcia 0/32), 5 Kč/t (frakcia 0/63),
10 Kč/t (frakcia 32/63) [15]

Ceny sú uvedené za jednu tonu materiálu a bez DPH. Samozrejme, ceny sa mierne líšia podľa jednotlivých výrobcov, avšak ako názorná ukážka na porovnanie cien prírodného a recyklovaného materiálu sú postačujúce. Ako aj z uvedených cien vyplýva, používanie recyklovaného materiálu je výhodnejšie.

2.3.4 Ekologické hľadisko

Recykláty zo stavebného a demolačného odpadu musia spĺňať nielen technické parametre podľa požiadaviek na ich konečné uplatnenie, ale je potrebné ich posudzovať i z hľadiska ich potenciálneho vplyvu na životné prostredie a zdravie človeka.

Či je daný recyklát vhodný sa preukazuje podľa jeho chemického zloženia, obsahu škodlivých látok a možnosti ich vylučovania do okolitého prostredia. Ekologické kritériá sa stanovujú podľa požiadaviek platnej legislatívy, v ktorej sú stanovené maximálne povolené limity obsahu jednotlivých škodlivín. [16]

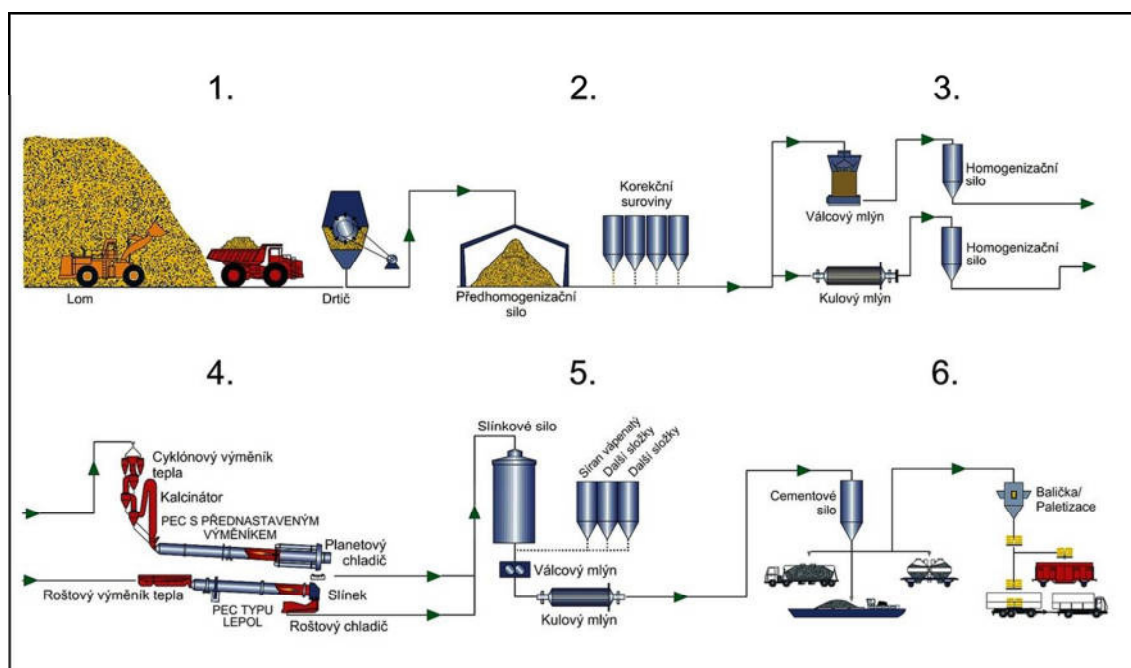
2.4 Spojivá

2.4.1 Úvod

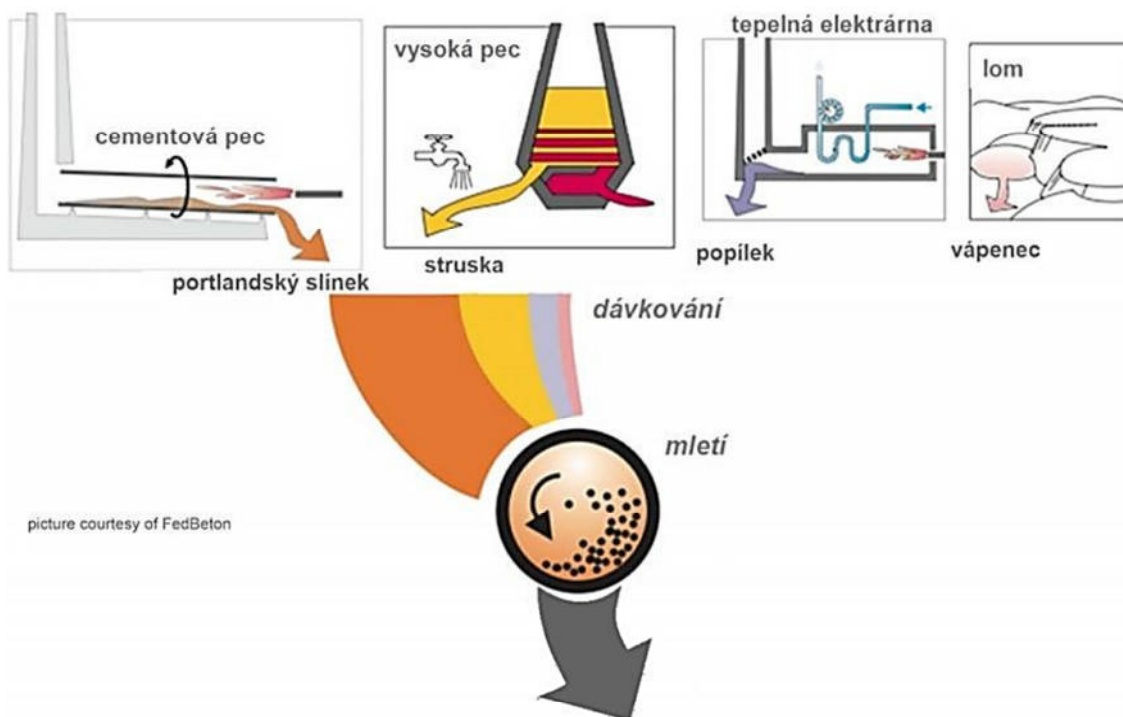
Termínom spojivá sa označujú látky, ktoré sa dajú upraviť s vodou do tekutej alebo kašovitej formy a ktoré potom z tejto formy relatívne ľahko prechádzajú do formy pevnej. V dôsledku tohto procesu majú spojivá schopnosť spojiť nesúdržné zrná alebo kusy rôznych látok v súdržnú, kompaktnú hmotu. Proces spevňovania sa dá rozdeliť na dve na seba naväzujúce štádiá – **tuhnutie a tvrdnutie**. Vo fáze tuhnutia stráca tekutá alebo kašovitá hmota svoju pôvodnú spracovateľnosť a postupne naberá charakter pevnej látky. Vo fáze tvrdnutia potom vzniká pevná látka postupne získavajúca vyššiu pevnosť. [18]

2.4.2 Cement

Cement je hydraulické spojivo, jemne mletý organický materiál, ktorý po zmiešaní s vodou vytvára kašovitú konzistenciu. Vyrába sa spoločným vypaľovaním vápenca a ílu pri teplotách okolo 1450 °C. Vyrobený slinok sa potom rozmieľa na jemný prášok. Niekedy sa pridávajú i prímеси ako vysokopecná struska, tras či popolček. Z celého tohto procesu mletia vzniká šedý prášok (cement). Po zmiešaní s vodou dochádza ku chemickej hydraulickej reakcii, v dôsledku ktorej dochádza k tvrdnutiu na vzduchu i pod vodou. Behom prebiehajúcich chemických pochodov vznikajú rôzne jemné kryštály, vzájomne prerastajúce a majúce vplyv na pevnosť. Vzniknutý cementový kameň si zachováva pevnosť a objemovú stálosť. [17]



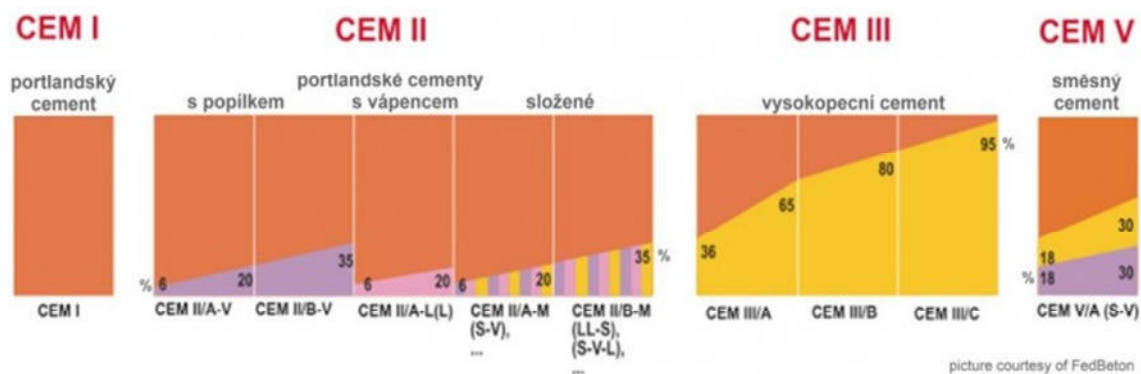
Obr. 2.7: Proces výroby cementu [18]



Obr. 2.8: Proces výroby cementu [17]

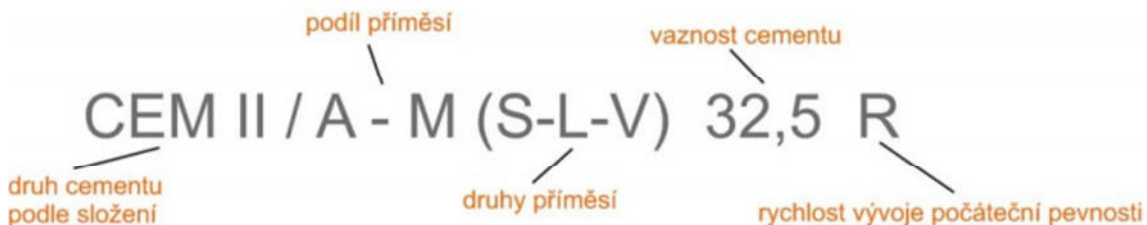
Cementy sa rozdeľujú podľa ČSN EN 197-1 nasledovne: [17]

- podľa zloženia:
 - CEM I – portlandský cement
 - CEM II – portlandský zmesný cem.
 - CEM III – vysokopecný cement
 - CEM IV – pucolánový cement
 - CEM V – zmesný cement
- podľa množstva prímiesí:
 - A – 6 až 20 %
 - B – 21 až 35 %
- podľa vývoja počiatočných pevností:
 - N – normálny
 - R – rýchlotuhnúci
- podľa druhov prímiesí:
 - K – slinok
 - S – vysokopecná struska
 - D – kremičitý úlet
 - P – prírodné pucolány
 - V – kremičité popolčeky
 - W – vápenaté popolčeky
 - T – kalcinované bridlice
 - L, LL – vápenec
- podľa pevností (po 28 dňoch):
 - 32,5 MPa
 - 42,5 MPa
 - 52,5 MPa



Obr. 2.9: Druhy cementov [17]

- portlandský slinok (vápeneč pálený v peci na cement: hydraulická zložka)
- vápenec (surovina získaná z lomov)
- vysokopecná struska (zbytkový produkt metalurgie: hydraulická zložka)
- popolček – kremičitý (zbytkový produkt uhoľnej elektrárni: pucolánová zložka reagujúca s voľným vápnom)



Obr. 2.10: Normalizované označenie [17]

Cement použitý v tejto diplomovej práci má označenie **CEM V/A (S-V) 32,5 R**, čo znamená, že sa jedná o cement zmesný s prímiesami vysokopecnej strusky a kremičitého úletu s rýchlym vývojom počiatkovej pevnosti. Pevnosť v tlaku po 28 dňoch zretia je 32,5 MPa.

2.4.3 Doroport TB 25

Toto spojivo sa používa v súlade s technickými normami pre hydraulicky prepojené podkladové spojovacie vrstvy, stabilizáciu zemín a zlepšovanie zemín pod najrôznejšími druhmi komunikácií. [19]

Spojivo je špeciálnou technikou premiešané so zeminou priamo na mieste stavby. Po následnom zhutnení je možno plynulo pokračovať vo výstavbe na už vyhovujúcom, únosnom podklade. V tomto prípade nie je potrebné odťažiť a znovu naviezť žiadny materiál, čím je prihladané i k hľadisku šetrného ekologického prístupu. [20]

Vzhľadom k svojim vlastnostiam je ideálnym spojivom pre podkladové spojovacie vrstvy. Použitím tohto materiálu vzniká zhutniteľná štruktúra, ktorá neobsahuje spoje, nepraská, má vysokú únosnosť a **odolnosť proti pôsobeniu mrazu**. [19]

Nakoľko sa jedná o spojivo s upravenými vlastnosťami priebehu nárastu pevností, je vhodné ho používať prevažne do piesčitých zemín. Ďalší stupeň využitia je recyklácia za studena a opravy podkladových vrstiev vozoviek ciest III. a IV. tried. [20]

Vlastnosti:

- vyrába sa kombinovaným mletím slinku a hydraulických komponentov podľa normových špecifikácií a skladá sa iba zo zložiek s hydraulickou reakciou
- chovanie spojiva pri tuhnutí je prispôbené požiadavkám na konečné vlastnosti podkladových vrstiev
- je vysoko odolný proti síranom
- zeminy obsahujúce sírany sa dajú stabilizovať materiálom bez výskytu problémov spôsobených rozpínaním [19]

Spracovanie:

- ľahko sa aplikuje za použitia bežných zariadení a pracovných metód. Vmiešavanie do pôdy sa prevádza najčastejšie miešaním namieste.
- reaguje s vlhkosťou alkalicky. [19]

Tab. 2.1: Vlastnosti Doroportu TB 25 [19]

Pevnosť v ťahu a ohybu		Pevnosť v tlaku	
po 7 dňoch	3,0 MPa	po 7 dňoch	14,0 MPa
po 28 dňoch	7,1 MPa	po 28 dňoch	32,0 MPa



Obr. 2.11: Úprava podkladových vrstiev [21]

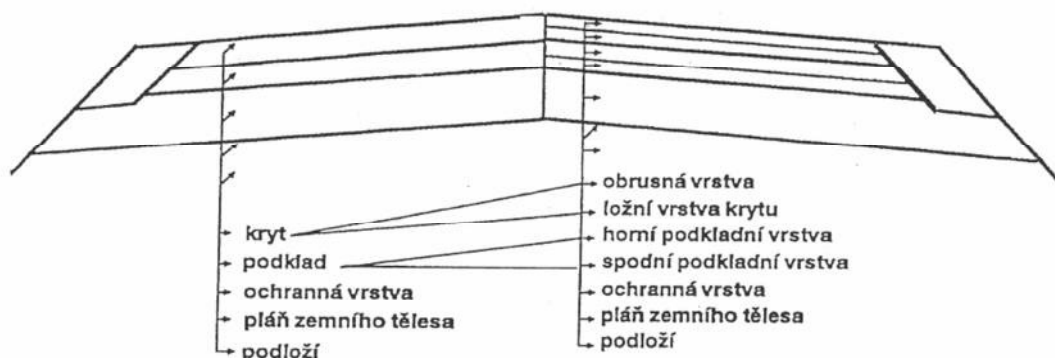


Obr. 2.12: Úprava podkladových vrstiev [21]

2.5 Používanie a návrh stmelených zmesí do PK

2.5.1 Úloha, vlastnosti stmelených vrstiev

Hlavnou funkciou stmelených podkladových vrstiev je roznášanie statického a dynamického zaťaženia od dopravy prebiehajúcej na krytových vrstvách, pričom zároveň dochádza aj k obmedzovaniu účinkov zaťaženia na zemné teleso.



Obr. 2.13: Konštrukčné vrstvy pozemných komunikácií [5]

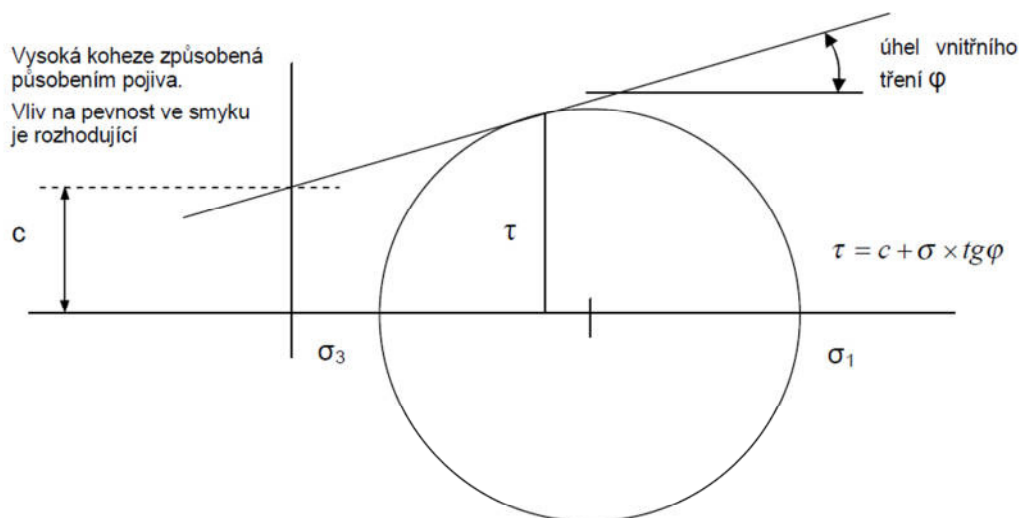
Charakteristiky stmelených podkladových vrstiev: [5]

- vrstvy majú relatívne vysoký modul pružnosti ale nízku pevnosť – sú krehké
- už pri malej deformácii vznikajú veľké napätia a dochádza k porušeniu
- vďaka relatívne nízkej pevnosti sa porušovanie odohráva tak, že vzniká veľké množstvo nepatrných trhliniek
- preto sú laboratórne pevnosti a pretvárne charakteristiky približne 10x vyššie ako tie, ktoré sú merané na vozovke
- vrstva spolupôsobí s podkladom, ktorý obmedzuje jej priehyb a umožňuje uplatnenie šmykových napätí

Používanie stmelenej podkladovej vrstvy nemá tak jednoznačný prínos, ako by sa mohlo na prvý pohľad zdať. Pokiaľ najviac v podkladovej vrstve nevzniknú v dostatočnej miere mikrotrhliny, vrstva sa začne chovať ako betónová doska. Vznikom priečnych trhlín si vynúti potrebnú dilatáciu, čím eliminuje výskyt **reflexných trhlín**. Vznik mikrotrhlín sa teda zavádza umelo tým, že sa čerstvo položená vrstva v dobe zretia (1-3 dni od prevedenia) prechádza valcom. [5]

V každej stmelenej podkladovej vrstve sa uplatňuje pevnosť v šmyku, ktorú spôsobuje:

- vnútorné trenie medzi zrnami kameniva
- súdržnosť v šmyku vplyvom pôsobenia spojiva (kohézia) [5]



Legenda:

- C koheze
- σ_1, σ_3 hlavní napětí
- τ smykové napětí
- φ úhel vnitřního tření

Obr. 2.14: Mohrova kružnica – stmelené zmesi [5]

Behom doby životnosti sa vrstva porušuje postupným rozvojom mikrotrhlín, vplyv kohézie sa znižuje a postupne sa chovanie vrstvy začína približovať chovaniu vrstvy nestmelenej.

Používanie podkladových vrstiev zo zmesí stmelených hydraulickými spojivami prináša nasledujúce rozpory: [5]

- čím vyššia pevnosť, tým je väčšie riziko tvorby reflexných trhlín
- nepatrná nižšia hrúbka konštrukcie vozovky oproti vyššej cene
- podpora vzniku mikrotrhlín pri pokladaní vrstvy je v rozpore s návrhom zmesi o vyššej pevnosti. Zmes s navrhnutou vyššou pevnosťou prehutnená valcom za účelom vzniku mikrotrhlín je takmer to isté ako zmes o nižšej pevnosti bez iniciácie mikrotrhlín

Môžeme sa teda opýtať. Aký je dôvod používania stmelených zmesí do podkladových vrstiev?

Hlavný zmysel používania zmesí stmelených hydraulickými spojivami v konštrukcii vozoviek je teda v možnosti využitia kameniva a rôznych **miestnych materiálov** alebo **druhotných surovín**, z ktorých nejde vyrobiť kvalitnú nestmelenu vrstvu a ktoré by bez možností aplikácie hydraulických spojív zostali nevyužitú. Zároveň sú stmelené zmesi predsa len únosnejšie než nestelené a preto sa používajú pre významne dopravne zaťažené vozovky. [5]

2.5.2 Zmesi stmelené cementom

Cement je dlhodobo najpoužívanejšie spojivo do stmelených podkladových vrstiev. Návrh týchto konštrukčných vrstiev sa musí riadiť normovými podkladmi ČSN EN 14227-1 - Směsi stmelené hydraulickými pojivami - Část 1: Směsi stmelené cementem.

1. Požadavky na vstupné materiály

1.1 – Spojivo

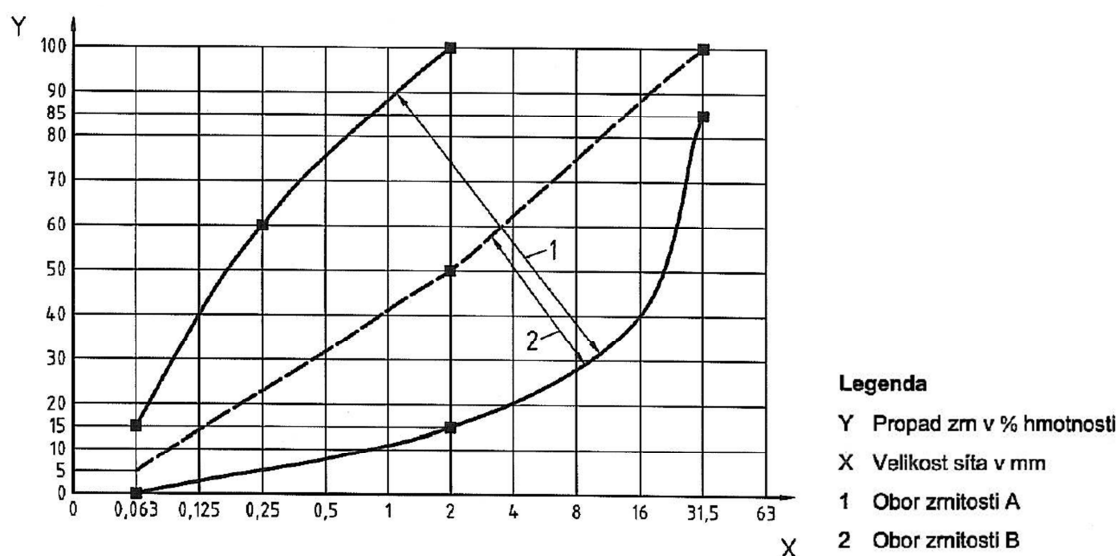
Cement musí spĺňovať požiadavky EN 197-1. Používajú sa cementy tried 32,5 N a 42,5 N, obmedzene i 52,5 N. Doba zretia sa predpokladá 28 dní. [8]

1.2 – Kamenivo

Kamenivo musí odpovedať požiadavkám EN 12620. Musí byť buď drvené alebo nedrvené alebo musí zostať z kombinácie oboch kamenív. Druh kameniva môže byť nasledujúci: a) prírodné alebo umelé,

- b) recyklované,
- c) kombinácia a) a b)

Zrinitosť kameniva pre špecifickú zmes musí byť zvolená vo vnútri oboru zrinitosti podľa obrázku 2.15. Táto zrinitosť sa musí použiť pri stanovení receptúry zmesi. Po dobu výroby musí byť požadovaná zrinitosť kameniva dostatočne stála, aby spĺňovala tolerancie zrinitosti stmelených zmesí. Taktiež nesmie obsahovať škodlivé jemné častice v množstve, ktoré by ovplyvňovali tvrdnutie, pevnosť alebo trvanlivosť zmesi.[8]



Obr. 2.15: Obor zrinitosti kameniva [8]

1.3 – Prímеси

Pokiaľ sa používa mletá granulovaná vysokopecná struska, musí odpovedať požiadavkám stanoveným v európskych normách alebo v národných predpisoch. To musí byť zahrnuté v návrhu receptúry.

Pokiaľ sa má použiť popolček, musí byť súčasťou zmesného cementu podľa EN 197-1. Zmesi obsahujúce zmesný cement, ktorý je pridávaný na mieste behom miešania alebo tesne pred miešaním s kamenivom, musí spĺňať požiadavky EN 14227-3. [8]

1.4 – Zámesová voda

Zámesová voda musí spĺňať požiadavky EN 1008. [8]

1.5 – Prísady

Prísady musia spĺňať požiadavky EN 934-2. Pokiaľ sa používajú urýchľovače alebo spomaľovače tuhnutia, musí byť ich použitie zohľadnené už v návrhu zmesi. [8]

2. Klasifikácia zmesí stmelých cementom a požiadavky na zmes

Obsah cementu a obsah vody v zmesi sa musí vzťahovať k celkovej hmotnosti suchého materiálu nasledovne: kamenivo + cement + voda = 100%. [8]

2.1 – Obsah spojiva

Obsah spojiva musí byť stanovený návrhom zmesi alebo na základe praktických skúseností. Návrhové postupy musia spĺňať požiadavky národných predpisov alebo opatrení platných v mieste užitia. Obsah spojiva nesmie byť nižší než minimálny obsah spojiva uvedený v tabuľke 2.2. [8]

Tab. 2.2: Minimálny obsah spojiva [8]

Maximální jmenovitá velikost zrna kameniva mm	Minimální obsah pojiva % hmotnosti
> 8,0 až 31,5	3
2,0 až 8,0	4
< 2,0	5

2.2 – Vlhkosť

Vlhkosť zmesi musí byť stanovená návrhom zmesi alebo na základe praktických skúseností. Vlhkosť zmesi vhodná pre dostatočné zhutnenie závisí na zrnitosti kameniva, obsahu spojiva, klimatických podmienkach v mieste stavby, dopravnej vzdialenosti, použitom hutniacom zariadení apod. [8]

2.3 – Zrornosť zmesi

Zrornosť zmesi sa musí vypočítať zo zrnosti kameniva a obsahu spojiva vrátane prímiesí mletej granulovanej vysokopečnej strusky, pokiaľ je použitá. Ku kontrole zrnosti zmesi sa musí použiť skúšobný postup podľa EN 933-1. [8]

2.4 – Pevnosť a modul pružnosti

Stanovenie pevnosti a modulu pružnosti sa prevádza pomocou skúšok na kockových alebo valcových skúšobných telesách, ktoré musia zrieť pri režime požadovanom národnými predpismi v mieste použitia.

Kocky musia mať dĺžku hrany 100 mm alebo 150 mm, valce musia byť priemeru 100 mm, 150 mm alebo 160 mm. Charakteristická pevnosť v tlaku, ktorá je uvedená v tabuľke 2.3 je stanovená priemerom z troch skúšobných telies. Pokiaľ sa jedna z hodnôt líši o viac alebo menej než 20 % od priemeru hodnôt ostatných dvoch skúšobných telies, musí byť táto hodnota vylúčená a priemer sa vypočíta zo zostávajúcich hodnôt. [8]

Zmesi stmelené cementom sa klasifikujú podľa tried pevností v tlaku v tabuľke 2.3 a konkrétne zmesi sa skúšajú podľa EN 13286-41 po 28 dňoch tuhnutia. [8]

Tab. 2.3: Charakteristická pevnosť v tlaku [8]

Sloupec	1	2	3
Řádek	28denní pevnost v tlaku		Třída pevnosti
	MPa		
	Charakteristická pevnost R_{ck}		
	Válce $H/D^a = 2,0$	Válce nebo krychle $H/D^a = 1,0^b$	
1	Bez požadavku		C_0
2	1,5	2,0	$C_{1,5/2,0}$
3	3,0	4,0	$C_{3/4}$
4	5,0	6,0	$C_{5/6}$
5	8,0	10,0	$C_{8/10}$
6	12,0	15,0	$C_{12/15}$
7	16,0	20,0	$C_{16/20}$
8	20,0	25,0	$C_{20/25}$

^a H/D = poměr mezi výškou a průměrem zkušebního vzorku.
^b H/D = 0,80 až 1,21.

2.5.3 Zmesi stmelené Doroportom TB 25

V súčasnosti neexistuje norma zaoberajúca sa priamo skúšaním zmesí stmelených Doroportom TB 25 ale nakoľko sa jedná o hydraulické cestné spojivo, budú sa skúšky prevádzať, ako i vyhodnocovať podľa normy ČSN EN 14227-5 - Směsi stmelené hydraulickými pojivami - Část 5: Směsi stmelené hydraulicky silničními pojivy. [9]

1. Požiadavky na vstupné materiály

1.1 – Hydraulické cestné spojivo

Hydraulické cestné spojivo musí obsahovať požiadavky ENV 13282 alebo iného európskeho dokumentu alebo predpisov platných v mieste použitia. [9]

1.2 – Kamenivo

Kamenivo musí odpovedať požiadavkám EN 13242. Kamenivo musí byť objemovo stále. Pokiaľ tomu tak nie je, použitie zmesi je možné za predpokladu, že existujú spoľahlivé záznamy o funkčných vlastnostiach alebo laboratórne hodnotenie zmesi podľa predpisov platných v mieste použitia. [9]

1.3 – Voda

Voda nesmie obsahovať zložky, ktoré nepriaznivo ovplyvňujú tvrdnutie a chovanie zmesí stmelených hydraulickým spojivom. [9]

1.4 – Spomaľovače

Spomaľovače musia splňovať požiadavky platné v mieste použitia. [9]

2. Klasifikácia zmesí

2.1 – Vlhkosť

Vlhkosť sa musí stanoviť tak, aby bolo umožnené hutnenie na stavbe a aby bolo dosiahnuto optimálnych mechanických vlastností zmesi. Vlhkosť sa najčastejšie stanovuje Proctorovou skúškou alebo inou skúškou podľa EN 13286-1 až 5 a musia byť stanovené medze pre interval vlhkosti vhodný pre spracovanie zmesi na stavbe v súlade s požiadavkami na hutnenie a mechanické chovanie zmesi. [9]

2.2 – Pomer vstupných materiálov, zrnitosť a suchá objemová hmotnosť

Pomer vstupných materiálov vyjadrený v percentách celkovej suchej hmotnosti zmesi, zrnitosť a suchá objemová hmotnosť sa musia deklarovvať na základe laboratórneho návrhu alebo praktických skúseností so zmesami vyrobenými z rovnakých vstupných materiálov a za rovnakých podmienok. [9]

3. Klasifikácia podľa laboratórnych mechanických vlastností

Pre laboratórne stanovenie funkčných charakteristík a ich klasifikáciu sa musí zvoliť jedna z týchto metód: [9]

- skúška pevnosti v tlaku R_c
- kombinácia pevnosti v ťahu R_t a modulu pružnosti E

3.1 - Klasifikácia podľa pevnosti v tlaku R_c

Zmesi sa klasifikujú podľa pevnosti v tlaku stanovenej podľa EN 13286-41. Trieda pevnosti sa musí zvoliť podľa tabuľky 2.4 v kombinácii so zvolenou metódou prípravy skúšobného vzorku. Doba a podmienky zretia skúšobných telies sa musia stanoviť podľa praktických skúseností v mieste použitia.

Pre stanovenie charakteristík laboratórneho návrhu zmesi musí byť pevnosť v tlaku priemerom stanoveným najmenej z troch skúšobných telies. Pokiaľ sa jedna z hodnôt líši o viac než 20 % priemeru, musí byť táto hodnota vylúčená a pevnosť v tlaku sa vypočíta ako priemer z ostatných hodnôt. [9]

Tab. 2.4: Klasifikácia podľa pevnosti v tlaku [9]

Sloupec	1	2	3
Řádek	Minimální hodnoty R_c pro válcová zkušební tělesa pro štíhlostní poměr 2 ^a MPa	Minimální hodnoty R_c pro válcová zkušební tělesa pro štíhlostní poměr 1 ^a a zkušební tělesa tvaru krychle MPa	Třída R_c
1	0,4	0,5	C _{0,4/0,5}
2	0,8	1	C _{0,8/1}
3	1,5	2	C _{1,5/2}
4	3	4	C _{3/4}
5	6	8	C _{6/8}
6	9	12	C _{9/12}
7	12	16	C _{12/16}
8	15	20	C _{15/20}
9	18	24	C _{18/24}
10	21	28	C _{21/28}
11	24	32	C _{24/32}
12	27	36	C _{27/36}

^a Pokud se použijí válcová zkušební tělesa se štíhlostním poměrem jiným než 1 nebo 2, musí se před použitím stanovit korelace u válcových těles o štíhlostním poměru 1 nebo 2.

2.6 Odolnosť proti mrazu a vode

Je to funkčná skúška slúžiaca ako ukazovateľ dlhodobého zachovania charakteristík zmesi. Simuluje chovanie zmesi v konštrukčnej vrstve pozemných komunikácií pri striedaní kladných a záporných teplôt za spolupôsobenia kapilárne vzliánanej vody z povrchu vozovky alebo z podložia. Vplyvom záporných teplôt mrznúca voda zväčšuje svoj objem, pričom narušuje konštrukčnú vrstvu, ktorej únosnosť sa týmto znižuje.

V niektorých štátoch stále panujú obavy nad používaním recyklovaných materiálov vo forme stmelených podkladových vrstiev z dôvodu ich nízkej odolnosti proti účinkom mrazu a vode. Táto diplomová práca sa snaží odpovedať na otázky týkajúce sa problémov s odolnosťou proti mrazu a vode stmelených zmesí s recyklátmi. Samozrejme, treba brať v úvahu i to, že jednotlivé štáty sa nachádzajú v rozdielnych klimatických pásmach, čiže ich metódy na skúšanie tejto odolnosti sa musia líšiť. Preto uvažovanie o nejakej jednotnej norme pre všetky štáty nie je možné a jej prípadný návrh by prinášal viacej rozporov ako úžitku.

2.6.1 Česká republika

U stmelených zmesí používaných do konštrukčných vrstiev vozoviek, teda v konštrukcii nad zemnou pláňou, sa pre hodnotenie citlivosti na vznik mrazových zdvihov používa skúška **pevnosti v prostom tlaku** prevedená po **mrazových cykloch**, ktoré simulujú striedanie vodnoteplotného režimu v konštrukcii vozovky. [5]

Pevnosť v prostom tlaku sa určuje podľa normy ČSN EN 13289-41 - Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy.

Mrazové cykly sa prevádzajú podľa normy ČSN EN 14227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy. Slúžia pre doplnenie skúšky pevnosti v prostom tlaku, z čoho sa následne usudzuje na mrazovú citlivosť skúšaných materiálov.

2.6.2 Anglicko

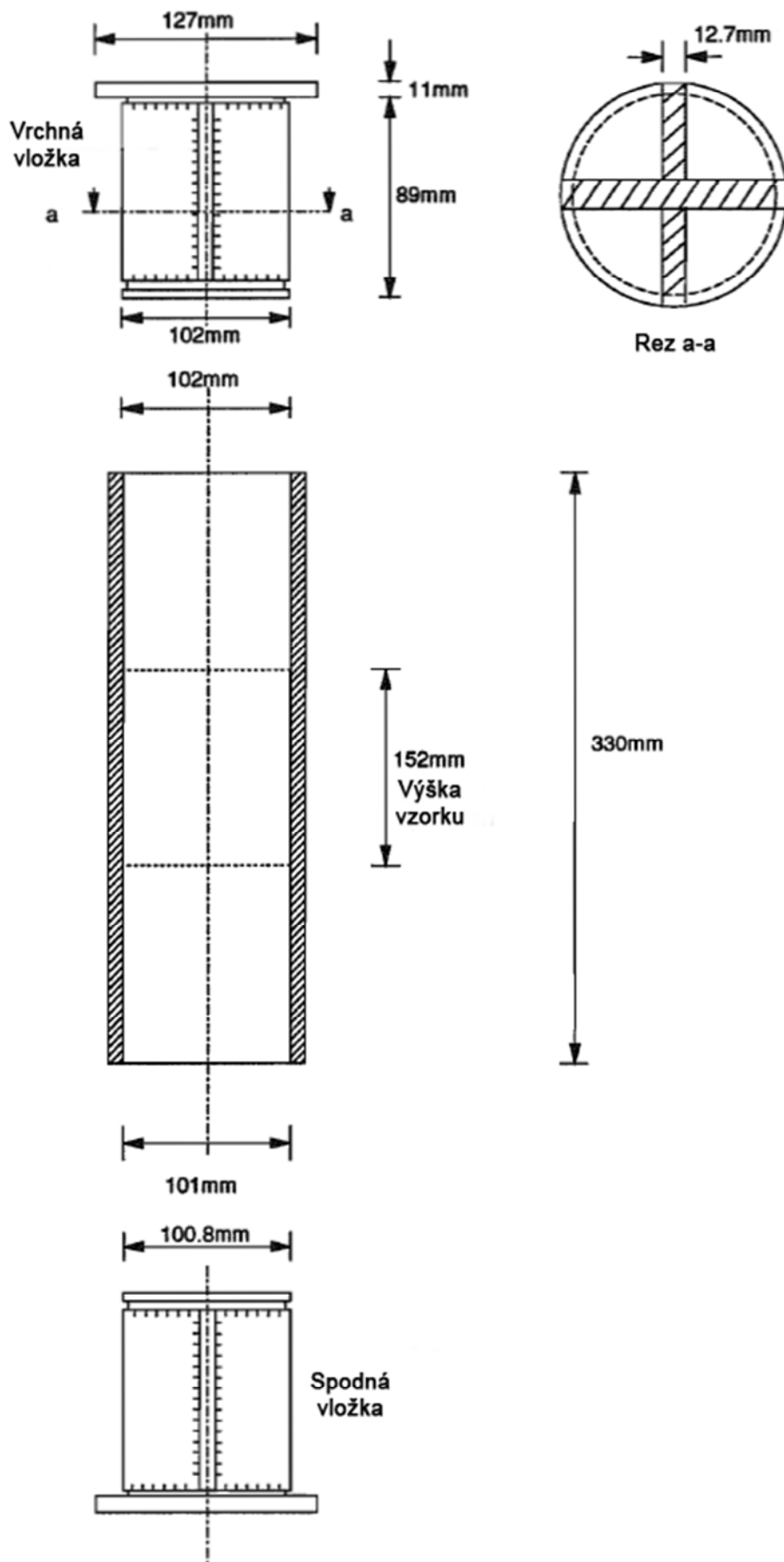
Ako prvý krát sa mrazovými zdvihmi v Anglicku začali zaoberať v roku 1967 a ich priebeh je postupne zaznamenávaný v radách TRRL správ. Prvá správa bola napísaná Croneyom a Jacobsom (1967) v ktorej sa zaoberali klasifikáciou materiálov v závislosti na ich mrazovej citlivosti. Materiály boli rozdelené do troch skupín na mrazovo citlivé, mrazovo nízko citlivé a materiály necitlivé na mráz. Dôvodom bolo napomôcť inžinierom v dopravnom staviteľstve v rozhodovaní sa vo vhodnosti použitia jednotlivých materiálov do konštrukcie vozoviek. [6]

Test mrazových zdvihov

Test pozostáva z umiestnenia zhutnených vzorkov jednotlivých materiálov do izolovanej komory v ktorej je spodná časť vzorku uložená pod vodou. Teplota vody je konštantne udržiavaná na 4 °C zatiaľ čo teplota vzduchu sa udržiava na -17 °C. Výsledný mrazový zdvih vzorku sa meria po 96 hodinách. [6]

Príprava skúšobných vzorkov

Skúšobné vzorky sú vyrobené niekoľko dní pred samotným testom k tomu, aby sa potvrdilo že sú adekvátnej pevnosti, vyhotovené za optimálnej vlhkosti pri maximálnej objemovej hustote. Zrnitostné testy vysušeného materiálu sú prevedené na vzorkoch pred a po skúške mrazových zdvihov. Častice väčšie ako 37,5 mm sú odstránené. Po pridaní potrebného množstva vody sa miešanie prevádza v betónovej miešačke. Každý jeden vzorček je zhutnený v oceľovej valcovej forme s vnútorným priemerom 102 mm. Forma je opatrená po oboch stranách vložkami ako je znázornené na obrázku 2.16 a samotné zhutnenie vzorku sa prevádza pomocou vibračného kladiva. Po zhutnení sa koncové vložky odstránia a vzorček sa z formy vytlačí pomocou hydraulického lisu. Po vytlačení si vzorček musí zachovávať svoj tvar a nesmie dochádzať k pozvoľnému vypadávaní zrn. Následne sa vzorček obalí navoskovaným papierom tak aby 50 mm prečnievalo nad povrchom vzorku a na samotný vrch sa položí disk o priemeru 95 mm a hrúbke 5 mm. Disk má uprostred závit o priemeru 10 mm, ktorý slúži na umiestnenie mosadznej tyčky. Vzorček obalený navoskovaným papierom sa uloží do keramickej poréznej formy priemeru 102 mm o hrúbke steny 13 mm. Veľkosť pórov formy je 110 µm. Vzorček i disk sú umiestnené na medenom nosiči. [6]



Obr. 2.16: Forma a koncové vložky na prípravu vzorkov [6]

Zmrazovacia komora

Zmrazovacia komora (obr. 2.17) je izolovaná skriňa o vnútorných rozmeroch 600 x 600 x 550 mm. Na dne skrini je umiestnená vaňa s vodou, nad ktorou sa nachádza drevená podperná konštrukcia (obr. 2.18) schopná uniesť naraz až 9 vzorkov. Výška vodnej hladiny je konštantne udržiavaná pomocou prístroja CDL (constant level device) umiestneného vo vnútri zmrazovacej komory. Výška vody musí byť udržiavaná tak, aby vrch porézneho disku pod každým vzorkom nebol pokrytý vodou, ale aby bol udržiavaný vo vlhkom stave (výška vodnej hladiny je cca 1 mm pod vrchom porézneho disku). [6]

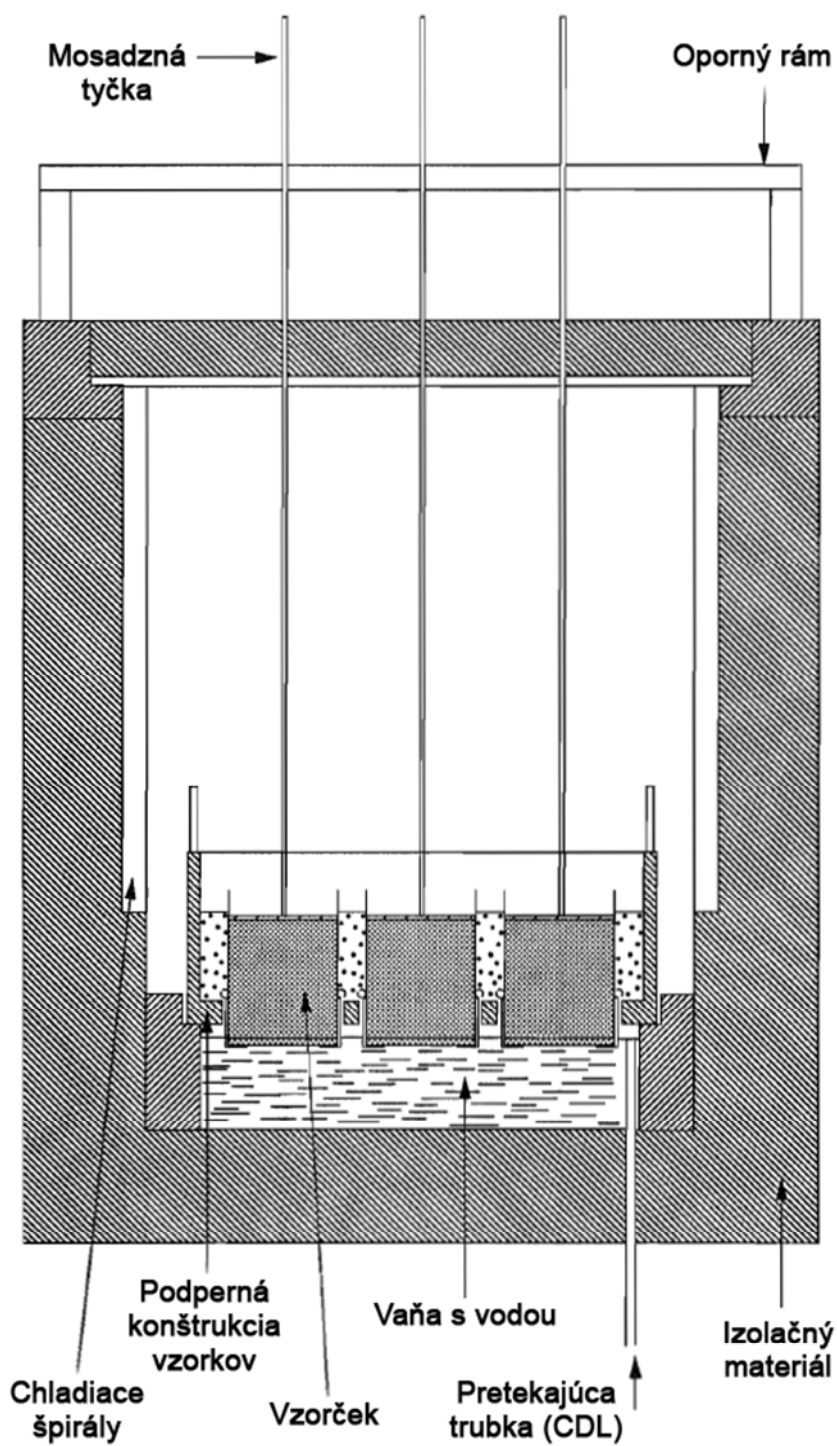
Vzorky sú umiestnené v otvoroch drevenej podpernej konštrukcie a priestor medzi nimi je vyplnený hrubým pieskom až po samotný vrch vzorkov. Na monitorovanie mrazových zdvihov slúžia mosadzné tyčky osadené na povrchu vzorkov. Prechádzajú cez rám izolovanej skrini a prírastok ich výšky je totožný s veľkosťou mrazového zdvihu vzorku. Styk mosadznej tyčky a veka skrine je opatrený bavlnou aby sa predišlo tvoreniu ľadu a následnému skresávaniu výsledkov. Zdvih mosadznej tyčky, resp. výška mrazového zdvihu sa zaokrúhľuje na najbližších 0,5 mm. Taktiež sa behom celého cyklu musí kontrolovať teplota vody ako i teplota vzduchu. Pre správne meranie sa teplota vody musí pohybovať v rozmedzí 3 °C až 4,5 °C a teplota vzduchu v rozmedzí -16 °C až -18 °C. Teploty sú nepretržite merané a vykresľované pomocou grafu. Pokiaľ niektorá z teplôt prekoná povolené rozpätie, skúška sa považuje za neplatnú. Mrazové zdvihy sa zaznamenávajú každých 24 hodín po dobu 4 dní. [6]

Klasifikácia materiálov

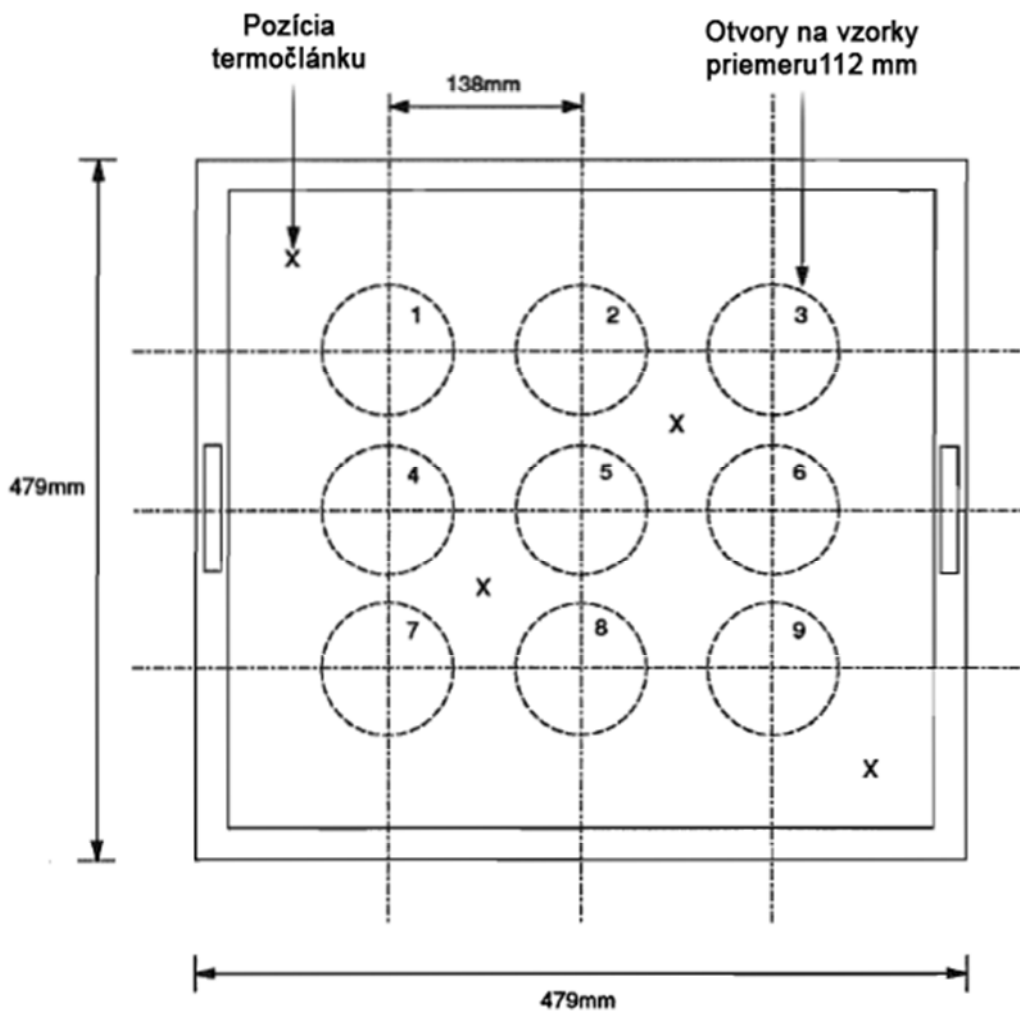
Po spriemerovaní výsledných výšok mrazových zdvihov skúšaných vzorkov sa materiály klasifikujú podľa mrazovej citlivosti do nasledovných kategórií:

- a) pokiaľ priemerná výška zdvihu je menšia ako 9 mm, považuje sa materiál za mrazovo necitlivý
- b) ak je priemerná hodnota mrazového zdvihu vyššia ako 15 mm, je materiál klasifikovaný ako mrazovo citlivý
- c) keď sa hodnota zdvihu pohybuje od 9,1 až 14,9 mm, môže sa materiál považovať za nezistený

Ak klasifikácia materiálu padne do poslednej kategórie, vzorky musia byť zaslané do iných laboratórií na ďalšie testovanie. Pokiaľ celkový priemer mrazových zdvihov bude určený tromi laboratóriami hodnotou menej ako 12 mm, môže byť materiál klasifikovaný ako mrazovo necitlivý. [6]



Obr. 2.17: Zmrazovacia komora [6]

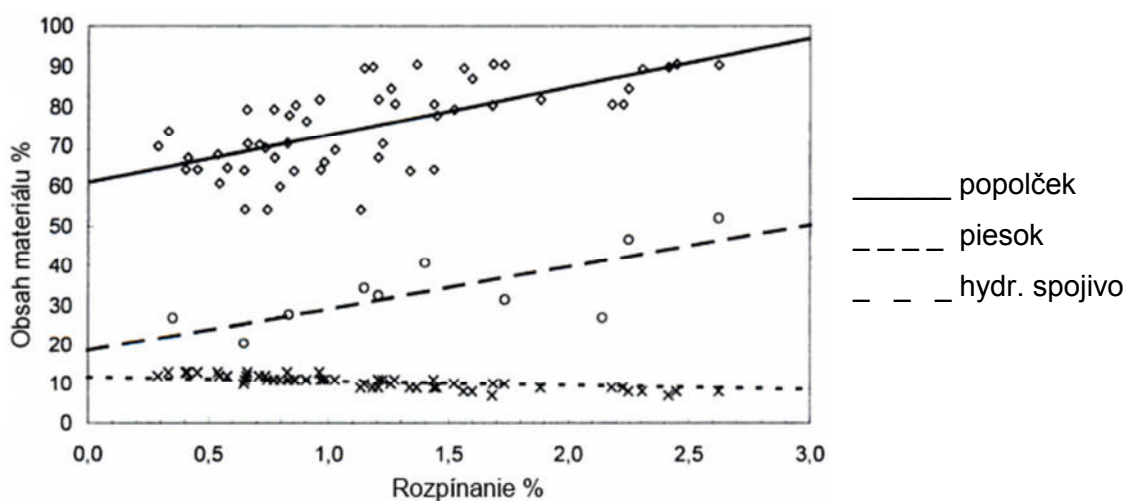


Obr. 2.18: Podperná konštrukcia na uloženie vzorkov v skrini [6]

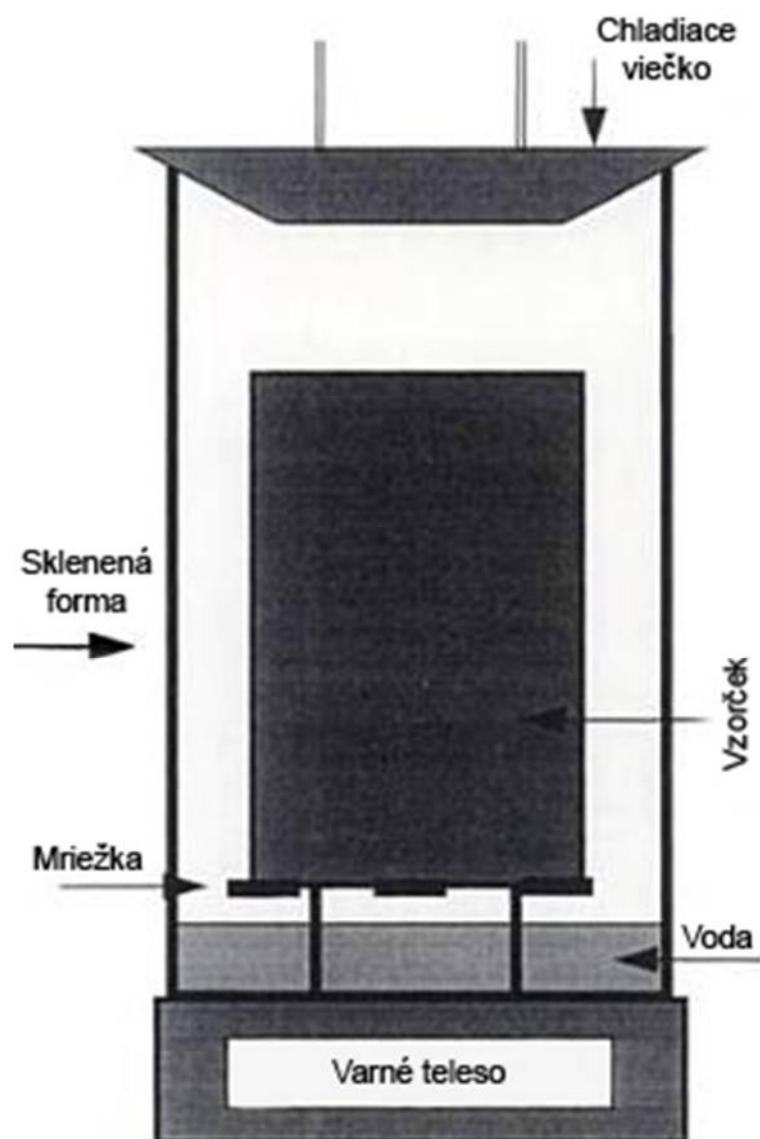
Záverom je treba dodať, že táto metóda vystihuje hlavne namrzavosť materiálov, avšak v zahraničí sa často prelána stanovenie namrzavosti a tzv. odolnosti proti mrazu a vode. V niektorých zemiach Európskej únie sa toto stanovenie namrzavosti materiálov používa i pre zmesi stmelené hydraulickým spojivom do spodných podkladových vrstiev.

2.6.3 Nemecko

Na Technickej Univerzite v Mníchove vyvinuli novú metódu nazývanú **parný test**, ktorá umožňuje na základe svojich výsledkov rozhodovať o stupni stability hydraulicky stmelenej zmesi. Ako sa ukázalo, výsledky skúšky sú zrovnateľné s metódou mrazových cyklov. Výsledok skúšky je stanovený z priemeru hodnôt nameraných minimálne na 3 skúšaných vzorkoch, ktoré majú tvar valca. Valček musí byť vyhotovený podľa patričných noriem o štíhlostnom pomere 0,83 (priemer vzorku $d = 100$ mm a výška vzorku $h = 120$ mm). Vzorky sú hutnené na vibračnom stole. Po vyhotovení sa uložia na 28 dní do vzduchotesnej komory, kde sa udržiava stála teplota 20 °C a relatívna vlhkosť vzduchu $> 95\%$. Po vyzretí valčekov sa na ich vrchnú a spodnú stranu upevnia kovové platne. Celý takto upravený valček sa uloží na mriežku na dne skleneného valca priemeru $d = 150$ mm a výšky $h = 300$ mm na prevedenie samotného parného testu. Pod mriežkou sa nachádza približne 1 liter vody. Na vrchu skleneného valca je uložené chladiace viečko ktoré behom testu znižuje množstvo pary v nádobe. Pod valcom sa nachádza varné teleso pomocou ktorého sa vzorček vo vnútri vystavuje postupne 21 parným cyklom. Jeden cyklus sa skladá z uloženia vzorku do sklenenej nádoby po dobu 8 hodín na vystavenie účinkom pary pri teplote približne 70 °C a uskladnenia vzorku mimo parné teleso pri teplote vzduchu 20 °C na dobu 16 hodín. Sklenená forma umožňuje pozorovať chovanie vzorku behom testu. Výsledok skúšky sa vykreslí do grafu ako je znázornené na obrázku 2.19, kde je zobrazená skúška vykonaná na vzorkoch s obsahom hydraulického spojiva, piesku a popolčeku. Celý prístroj na prevedenie parného testu je znázornený na obrázku 2.20. Výsledkom skúšky je rozpínanosť vzorku v závislosti na obsahu a druhu použitého materiálu. [7]



Obr. 2.19: Výsledok skúšky v grafe [7]



Obr. 2.20: Parný prístroj [7]

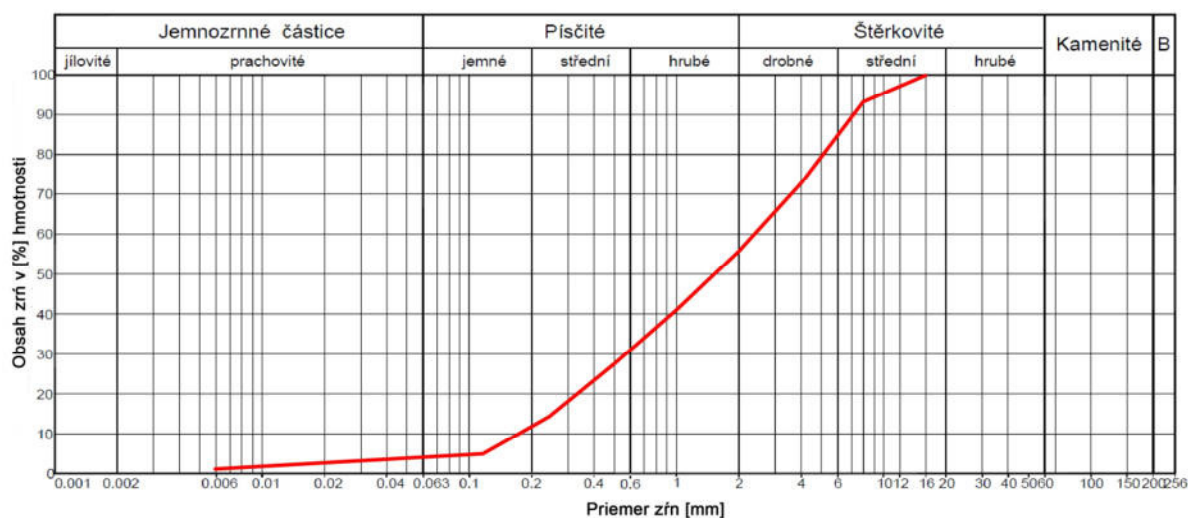
3. PRAKTICKÁ ČASŤ

3.1 Materiál

Skúšky boli prevádzkané na betónovom recykláte frakcie 0-16 mm. Ako prvá sa vykonala zrnitostná skúška materiálu sadou sít 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 a 32 mm, ako je znázornené na obrázku 3.1. Z tejto skúšky sa vykreslila čiara zrnitosti materiálu znázornená na grafe 3.1.



Obr. 3.1: Zrnitostná skúška



Graf 3.1: Krivka zrnitosti materiálu

Z krivky zrnitosti je zrejmé, že sa jedná o štrkopieskový recyklát o zložení približne:

- 5% jemnozrnných častíc
- 50% piesku
- 45% štrku.



Obr. 3.2: Betónový recyklát

Číslo nesterjnozrnosti C_u :

Charakterizuje sklon strednej časti krivky zrnitosti a je definované ako pomer priemeru zrn d_{60}/d_{10} . D_{60} , resp. D_{10} je hodnota priemeru zrn odpovedajúca 60%, resp. 10% prepadu zrn sieťového rozboru. Podľa hodnoty tohto čísla sa zeminy rozdeľujú na stejnozrnné ($C_u < 6$), stredne nesterjnozrnné ($6 < C_u < 15$), a nesterjnozrnné ($C_u > 15$). [22]

Číslo nesterjnozrnosti použitého betónového recyklátu je:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{2,50}{0,18} = \mathbf{13,9}$$

- čo charakterizuje zmes ako stredne nesterjnozrnnú, blížiacu sa hodnote zemín nesterjnozrnných. Zmes je vhodná pre stavbu pozemných komunikácií.

Číslo krivosti C_c :

Charakterizuje približne tvar krivky zrnitosti. Určuje sa ako pomer priemerov zrn ($d_{30})^2/(d_{60} \cdot d_{10})$. Je to pomocná hodnota v klasifikácii zemín. Zeminý s hodnotami $C_c = 1$ až 3 sú považované za dobre zrnité, čiže majú plynulé krivky zrnitosti. Hodnoty nižšie a vyššie patria zeminám s chýbajúcimi frakciami, ktoré môžu mať nepriaznivé vlastnosti ako napríklad vymývanie jemnejších častíc z materiálu. [22]

Číslo krivosti krivky zrnitosti použitého materiálu je:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{0,6^2}{0,18 \cdot 2,50} = 0,8$$

- čo charakterizuje krivku zrnitosti materiálu s mierne prerušenými frakciami. Nakoľko sa materiál uvažuje ako plnivo do stmelených vrstiev, hodnota krivosti 0,8 nie je zásadnou prekážkou použitia tohto materiálu.

3.2 Laboratórne skúšky**3.2.1 Zhutniteľnosť**

Táto skúška umožňuje odhadnúť objemovú hmotnosť zmesi v závislosti na vlhkosti zmesi, ktorá môže byť dosiahnutá na staveniskách a uvádza referenčný parameter pre posúdenie objemovej hmotnosti zhutnenej vrstvy zmesi.

Objemová hmotnosť sa stanovuje pomocou Proctorovej skúšky, ktorá môže byť prevádzaná na zariadení buď Proctor standard alebo Proctor modifikovaný. Jedná sa o stanovenie urovnávacej laboratórnej objemovej hmotnosti zo vzťahu objemovej hmotnosti suchej zmesi a vlhkosti. [10]

Tab. 3.1 Rozdelenie hutniacich zariadení Proctor [10]

Zariadenie	Hmotnosť pechu	Výška pádu	Počet vrstiev	Hutniaca energia
Proctor standard	2,5 kg	305 mm	3	0,6 MJ/m ³
Proctor modifikovaný	4,5 kg	457 mm	5	2,7 MJ/m ³

Skúšobné zariadenia a pomôcky

Formy sú oceľové valce, v ktorých prebieha samotné hutnenie zmesí. Sú vybavené snímateľným nástavcom o výške najmenej 50 mm a snímateľnou oceľovou základnou doskou. Vnútorý povrch musí byť hladký a ich rozmery v závislosti na type hutnenia sú uvedené v tabuľke 3.2. Ich priemer musí byť minimálne štvornásobkom hodnoty D zmesi. [10]

Tab. 3.2: Rozmery foriem [10]

Proctorův moždíř	Průměr d_1 mm	Výška h_1 mm	Tloušťka	
			Stěna w mm	Základní deska t mm
A	100,0 ±1,0	120,0 ±1,0	7,5 ±0,5	11,0 ±0,5
B	150,0 ±1,0	120,0 ±1,0	9,0 ±0,5	14,0 ±0,5
C	250,0 ±1,0	200,0 ±1,0	14,0 ±0,5	20,0 ±0,5

Hutniace zariadenie sa skladá z pechu, ktorý voľne dopadá na definovanú vrchnú časť zmesi vo forme. [10]



Obr. 3.3: Hutniace zariadenie Proctor [5]

Priebeh skúšky

Po dôkladnom premiešaní skúšaného materiálu s vodou a spojivom sa zmes hutní v ocelevej valcovej forme. Údery hutniaceho pechu sa rozdelia rovnomerne po obvode a je treba sa presvedčiť, že pech dopadá vždy voľne a neprekáča mu zmes vo vodiacej tyči alebo na nej. Hrúbka jednotlivých hutnených vrstiev by mala byť približne rovnaká. Samotný priebeh skúšky sa u zariadení Proctor standard a Proctor modifikovaný líši, čo je aj znázornené v tabuľke 3.1. Na oceľovú formu sa uloží nástavec kvôli tomu, aby posledná hutnená vrstva mohla byť približne 1 cm nad hranou formy, čím sa zaručí potrebná výška výsledne zhutneného vzorku. V prípade, že po sňatí nástavca je výška

hnutného vzorku nad hranou formy, musí sa prebytočná zmes odstrániť a povrch zarovnať. Akékoľvek hrubé častice, ktoré boli postupne odstránené behom procesu zarovnávania, sa nahradia jemnejšími časticami zo vzorku, ktoré sa dobre vtlačia dovnútra. Následne sa zhutnená zmes zváži aj spolu s formou a zaznamená sa hmotnosť vlhkého vzorku m_w . Potom sa určí vlhkosť odberom vzorku zo zhutnenej zmesi následným výpočtom podľa vzťahu:

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100$$

w – vlhkosť vzorku (%)

m_w – hmotnosť vlhkého vzorku (g)

m_d – hmotnosť vysušeného vzorku (g)

Vlhkosti by mali byť také, aby optimálna vlhkosť, pri ktorej sa dosiahne maximálnej objemovej hmotnosti suchej zmesi, ležala blízko stredu rozmedzia. [10]

Vyhodnotenie

Zo známych rozmerov sa vypočíta objem formy V . Následne sa vypočíta:

- objemová hmotnosť zhutnenej vlhkej zmesi ρ podľa rovnice:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 1000$$

ρ – objemová hmotnosť zhutnenej vlhkej zmesi (kg/m^3)

m_1 – hmotnosť formy a základnej dosky (g)

m_2 – hmotnosť formy, základnej dosky a zhutnenej zmesi (g)

V – objem formy (cm^3)

- objemová hmotnosť zhutnenej suchej zmesi ρ_d podľa rovnice:

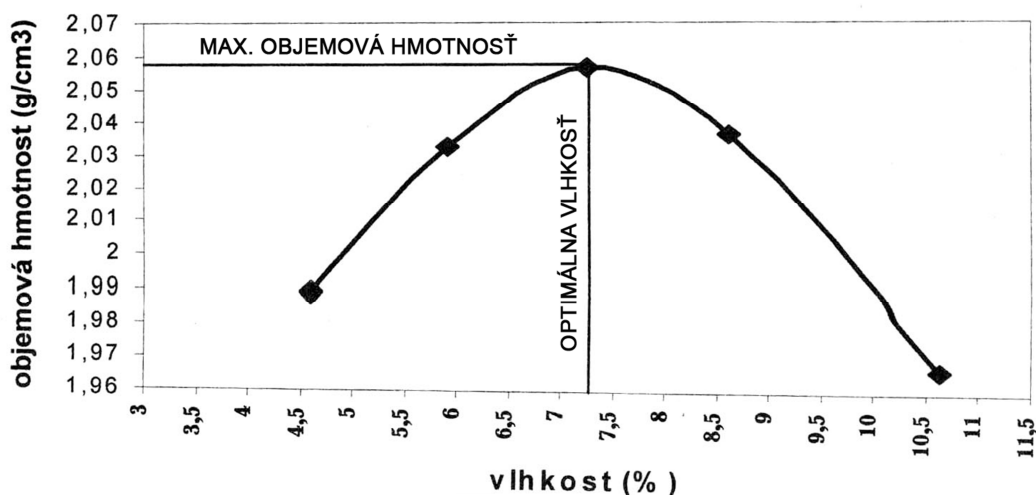
$$\rho_d = \frac{100 \cdot \rho}{100 + w}$$

ρ_d – objemová hmotnosť zhutnenej suchej zmesi (kg/m^3)

ρ – objemová hmotnosť zhutnenej vlhkej zmesi (kg/m^3)

w – vlhkosť zmesi v percentách (%)

Grafické vyjadrenie sa spraví tak, že hodnoty objemovej hmotnosti suchej zmesi, získané sériou stanovenia, sa vynesú na osu Y a odpovedajúce vlhkosti na osu X. Vynesenými bodmi sa preloží spojitá krivka, a zistí sa poloha maxima na tejto krivke. Odčítajú sa hodnoty maximálnej objemovej hmotnosti suchej zmesi a vlhkosti odpovedajúce tomuto bodu. [10]



Graf 3.2: Proctorova krivka [5]

3.2.2 Pevnosť v prostom tlaku

Podstatou skúšky je, že je teleso vystavené postupne rastúcej tlakovej sile až do jeho porušenia. Zaznamená sa maximálne zaťaženie skúšobného telesa pri porušení a vypočíta sa pevnosť v tlaku. [12]

Pred samotným skúšaním pevnosti v prostom tlaku sa musia skúšobné telesá najskôr vyhotoviť podľa nasledovného postupu. Po navážení potrebného množstva betónového recyklátu, spojiva a vody sa po dôkladnom premiešaní zmes uloží do formy pod hydraulický lis. Forma má tvar valca alebo kocky o štíhlostnom pomere 1, čiže jej priemer, resp. dĺžka hrany ako i výška sú rovnaké. Formy na valce sa používajú rozmerov 100 mm, 150 mm a 160 mm, formy na kocky majú dĺžku svojej hrany buď 100 mm alebo 150 mm. Samotné zaťažovanie hydraulickým lisom prebieha 3 x 5 minút, pričom vždy po 5 minútach sa zmes vo forme musí dotlačiť na požadovaný tlak, nakoľko tlak postupne klesá ako sa zmes vo forme dohutňuje. Po 15 minútach sa vzorček z formy vytlačí a uloží sa do vyzrievajúcej komory na 28 dní vyzrieť. V komore sa udržiava relatívna vlhkosť vzduchu 90% až 100%. Po 28 dňoch sa môže pristúpiť ku skúške pevnosti v tlaku na skúšobnom lise.

Presnosť skúšobného lisu a indikácia zaťaženia musí umožňovať zaťažovanie a meranie s presnosťou na $\pm 1\%$. Skúšobný lis musí mať dve oceľové tlačene dosky, ktoré musia byť najmenej tak veľké, v lepšom prípade väčšie, než sú povrchy telesa, na ktoré má byť použité zaťaženie. [12]

Horná a spodná plocha skúšobného telesa musí mať toleranciu rovnobežnosti maximálne 2 mm na 100 mm. Telesá, ktoré nespĺňujú tento požiadavok, musia byť vylúčené alebo upravené brúsením, prípadne opatrené krycou vrstvou. Poškodené telesá sa nesmú skúšať. [12]

Zaťaženie sa musí zvyšovať stálym a plynulým spôsobom bez rázov tak, aby k porušeniu došlo v priebehu 30 s až 60 s po zahájení zaťažovania. Maximálna sila F pri porušení musí byť zaznamenaná. Doba medzi vybratím skúšobných telies zo stavu ich zretia a zaťažením má byť čo najkratšia, aby sa zabránilo strate vlhkosti. [12]

Pevnosť v prostom tlaku sa vždy stanovuje z priemeru pevností aspoň 3 skúšobných telies pre jednu zmes. Pokiaľ sa jedna z hodnôt líši o viac alebo menej než 20 % od priemeru hodnôt ostatných dvoch skúšobných telies, musí byť táto hodnota vylúčená a priemer sa vypočíta zo zostávajúcich dvoch hodnôt.

Výsledná pevnosť v prostom tlaku sa vypočíta podľa nasledovného vzorca: [12]

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

R_c – pevnosť v tlaku skúšobného telesa (MPa)

F – maximálna sila pri porušení skúšobného telesa (N)

A_c – plocha prierezu skúšobného telesa (mm^2)

3.2.3 Mrazové cykly

Príprava zmesi, výroba skúšobných telies, ako i spôsob vyzrievania vzorčiekov sú rovnaké ako u skúšky pevnosti v prostom tlaku. Po skončení 28 dní potrebných na vyzretie vzorčiekov vo vyzrievajúcej komore sa skúšobné valčeky umiestnia na plstenú podložku. Podložka je čiastočne ponorená vo vode a vzorky sa nechajú kapilárne nasýtiť do ustálenej hmotnosti tak, aby prírastok hmotnosti po dobu najmenej 1 hodiny neprekročil 1 %. Zároveň skúšobné telesá nesmú prísť do priameho styku s vodou. Po nasýtení sa uložia do mraziacej skrine na dobu 6 hodín (± 30 minút) pri teplote podľa tabuľky 3.3. Po procese zmrazenia sa skúšobné telesá vyberú z mraziacej skrine a na dobu 18 hodín (± 30 minút) sa uložia opäť na plstenú podložku čiastočne ponorenú vo vode. Týmto je jej umožnené ďalšie nasycovanie vodou pomocou kapilárnej vzliňavosti. Súčasne prebieha proces rozmrazovania pri teplote $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ďalej skúška pokračuje novým zmrazením a opakuje sa v predpísanom počte cyklov napr. 7, 10 alebo 13 krát pre spodnú podkladovú vrstvu (viz. Tab. 3.3) v závislosti na klimatickej oblasti v ktorej je stmelená vrstva navrhnutá a to najmenej na 3 skúšobných telesách. Po skončení posledného cyklu sa skúša pevnosť v tlaku podľa ČSN EN 13286-41. [9]

Aby daná zmes vyhovela mrazovým cyklom, nesmie jej pevnosť v prostom tlaku prevádzaná na vzorčekom vystavených mrazovým cyklom klesnúť pod 85 % pevnosti v prostom tlaku nameranej na vzorčekom nevystavených mrazovým cyklom.

Tab. 3.3: Teploty zmrazovania a počty cyklov zmrazovania [9]

Vrstva vozovky	Teplota zmrazovania ($^{\circ}\text{C}$)	Počet cyklov podľa návrhového indexu mrazu dané oblasti ($^{\circ}\text{C} \times \text{den}$)		
		do 350	350 až 600	nad 600
horní podkladní vrstva	-20 ± 2	10	13	16
spodní podkladní vrstva	-15 ± 2	7	10	13
ochranná vrstva	-10 ± 2	5	7	10

3.3 Postup prípravy a skúšania, zhodnotenie výsledkov

3.3.1 Proctorova skúška

Objemová hmotnosť stmelenej zmesi zhutneného betónového recyklátu mala byť zisťovaná zariadením Proctor modifikovaný, lenže nakoľko sa v tej dobe v laboratóriu nachádzal iba prístroj na skúšanie Proctor standard, bolo potrebné prepočítať počet úderov na jednotlivé vrstvy z dôvodu rovnakej výslednej hutniacej energie 2,70 MJ/m³. Počet úderov bol prepočítaný z 25 na 38, na všetkých päť hutnených vrstiev podľa nasledovného vzorca:

$$E = \frac{m \cdot h \cdot x \cdot n \cdot g}{V} \rightarrow x = \frac{E \cdot V}{m \cdot h \cdot n \cdot g} = \frac{2,70 \cdot 942}{4,5 \cdot 305 \cdot 5,9 \cdot 81} = 37,8 \rightarrow \mathbf{38}$$

E – špecifická hutniaca energia, pre PM 2,56 až 2,80 (MJ/m³)

m – hmotnosť pechu (kg)

h – výška dopadu pechu (m)

x – počet úderov na jednu vrstvu (ks)

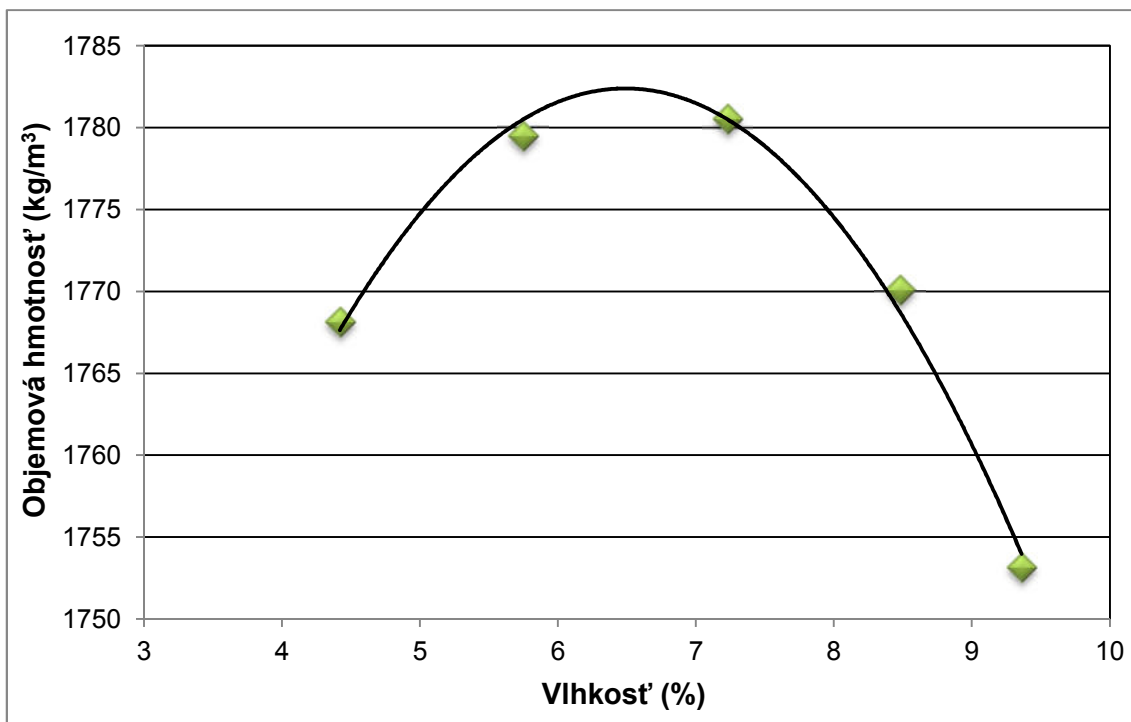
n – počet hutnených vrstiev (ks)

g – gravitačné zrýchlenie (m/s²)

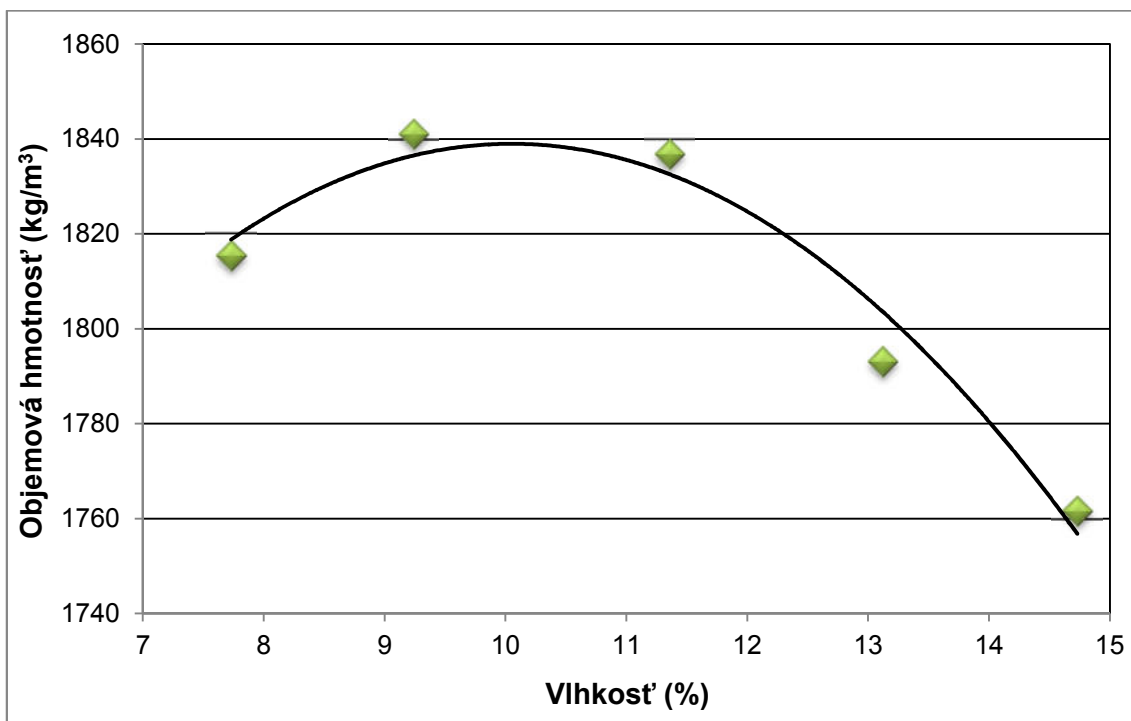
Celkom sa skúšali 4 zmesi, dve so zmesným cementom a dve s Doroportom TB 25. Maximálna objemová hmotnosť a optimálna vlhkosť zhutneného betónového recyklátu sa najskôr zisťovala s pridaním 6% hm. spojiva a neskôr s 10% hm. spojiva tak ako u cementu tak i Doroportu TB 25. Pre každú skúšanú zmes sa pripravilo 5 skúšobných dávok zmesi s postupne rastúcou vlhkosťou. Ich hodnoty suchých objemových hmotností a im odpovedajúce vlhkosti sú uvedené v tabuľke 3.4.

Tab. 3.4: Výsledky Proctorovej skúšky modifikovanej

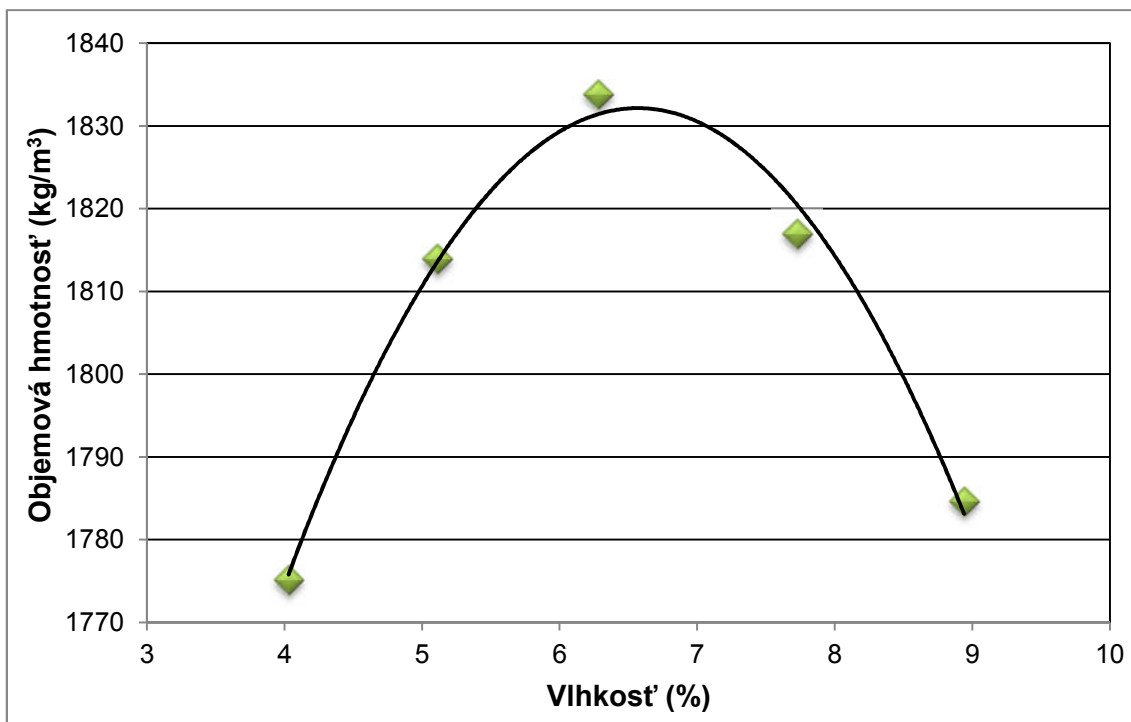
Spojivo	Vlhkosť (%)	Objemová hmotnosť (kg/m ³)	Spojivo	Vlhkosť (%)	Objemová hmotnosť (kg/m ³)
Cement 6 %	4,42	1768,14	Doroport TB 25 6 %	4,03	1775,11
	5,75	1779,49		5,11	1813,89
	7,23	1780,52		6,28	1833,78
	8,48	1770,07		7,73	1816,90
	9,36	1753,14		8,94	1784,62
Cement 10 %	7,73	1815,53	Doroport TB 25 10 %	6,12	1865,81
	9,24	1841,08		7,96	1874,38
	11,36	1836,90		10,72	1875,07
	13,12	1793,11		12,56	1866,27
	14,73	1761,67		14,19	1857,73



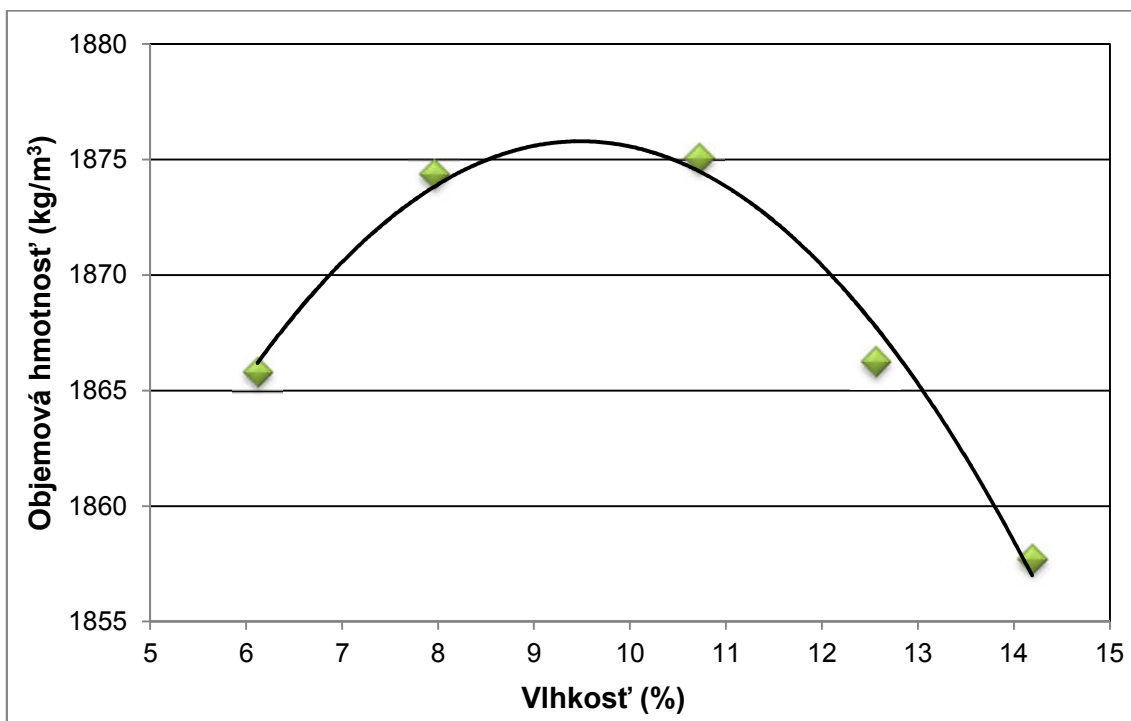
Graf 3.3: Cement 6,0% - optimálna vlhkosť 6,5%



Graf 3.4: Cement 10,0% - optimálna vlhkosť 10,0%



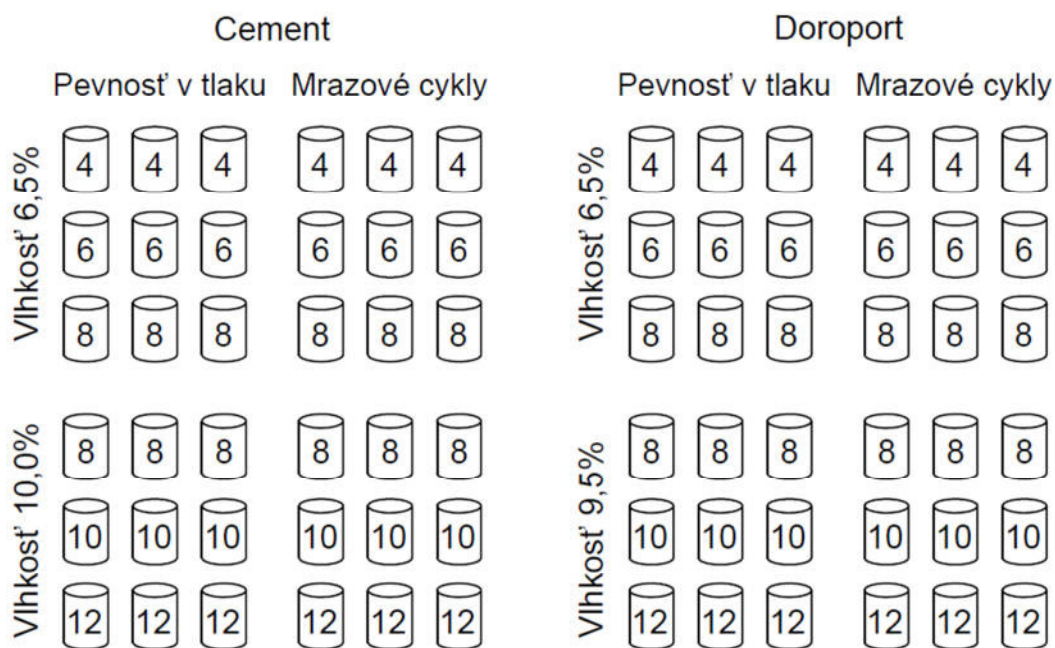
Graf 3.5: Doroport TB 25 6,0% - optimálna vlhkosť 6,5%



Graf 3.6: Doroport TB 25 10,0% - optimálna vlhkosť 9,5%

3.3.2 Príprava skúšobných telies

Betónový recyklát sa najskôr preosial cez sito veľkosti 22 mm pre prípadné odstránenie väčších nežiaducich častíc. Skúšobné telesá sa vyhotovovali vo forme tvaru valca, ktorej priemer ako i výška boli 100 mm. Zo známeho objemu valcovej formy a objemovej hmotnosti betónového recyklátu sa vypočítalo množstvo materiálu potrebného na zhotovenie jedeného valčeka. Skúšobné telesá sa zhotovovali s dvomi spojivami, a to konkrétne so zmesným cementom a Doroportom TB 25. Skúšky sa prevádzkali na 12 rôznych zmesiach, kde na každú zmes sa vyhotovovali 3 skúšobné telesá na skúšku pevnosti v prostom tlaku po 28 dňoch tuhnutia a 3 skúšobné telesá na vystavovanie 10 mrazovým cyklom po 28 dňoch tuhnutia s následným skúšaním pevnosti v prostom tlaku. Číže dokopy sa vyhotovilo 72 skúšobných telies, ako je aj prehľadne znázornené na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Rozdelenie skúšobných telies

Pripravená zmes sa po dôkladnom premiešaní uložila do valcovej formy pod hydraulický lis znázornený na obrázku 3.5. Lisom sa na zmes vyvodzoval jednoosý tlak 400 kg/cm^2 po dobu 15 minút (obr. 3.6). V dôsledku postupného dohutňovania zmesi vo forme tlak postupne klesal. Preto bolo potrebné každých 5 minút previesť dotlakovanie na hodnotu potrebného tlaku.



Obr. 3.5: Hydraulický lis



Obr. 3.6: Hutniaci tlak

Po 15 minútach, čiže po uplynutí doby potrebnej na zhutnenie zmesi, sa valček z formy vytlačil pomocou ručného hydraulického lisu znázorneného na obrázku 3.7. Vyhotovený valček bol označený a uložený do vyzrievajúcej komory na dobu 28 dní. To je doba potrebná na vyzretie valčeka zaspolupôsobením spojiva obsiahnutého v zmesi. V komore sa udržuje relatívna vlhkosť vzduchu na hodnote 90% až 100% pomocou vani s vodou umiestnenej na dne vzduchotesnej komory. Tým je zabezpečené, že behom tuhnutia a tvrdnutia zmesi nedochádza k odparovaniu vody potrebnej k hydratácii spojiva a prípadnému vzniku trhlín, ktoré by mohli značne ovplyvňovať výsledky skúšky.



Obr. 3.7: Ručný hydraulický lis na vytlačenie valčekov z formy



Obr. 3.8: Vyhotovené valčeky

3.3.3 Pevnosť v prostom tlaku

Pevnosť v prostom tlaku bola skúšaná na lise znázornenom na obrázku 3.9. Lis je napojený na počítač, ktorý zaznamenáva a vyhodnocuje priebeh skúšky. Zaznamenáva sa sila potrebná na porušenie vzorku v KN a pretvorenie vzorku v mm.



Obr. 3.9: Lis na skúšanie pevnosti v tlaku

3.3.3.1 Pevnosť v prostom tlaku – Cement, $w_{opt} = 6,5\%$

1.- Obsah spojiva 4%



Obr. 3.10: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.5: Výsledky skúšky 1

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	25,18	2,50	3,21	-
2	19,01	1,84	2,42	vylúčený
3	26,21	2,27	3,34	-
			3,28	

2.- Obsah spojiva 6%



Obr. 3.11: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.6: Výsledky skúšky 2

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	29,99	2,50	3,82	-
2	17,96	2,47	2,28	vylúčený
3	27,53	2,54	3,51	-
			3,67	

3.- Obsah spojiva 8%



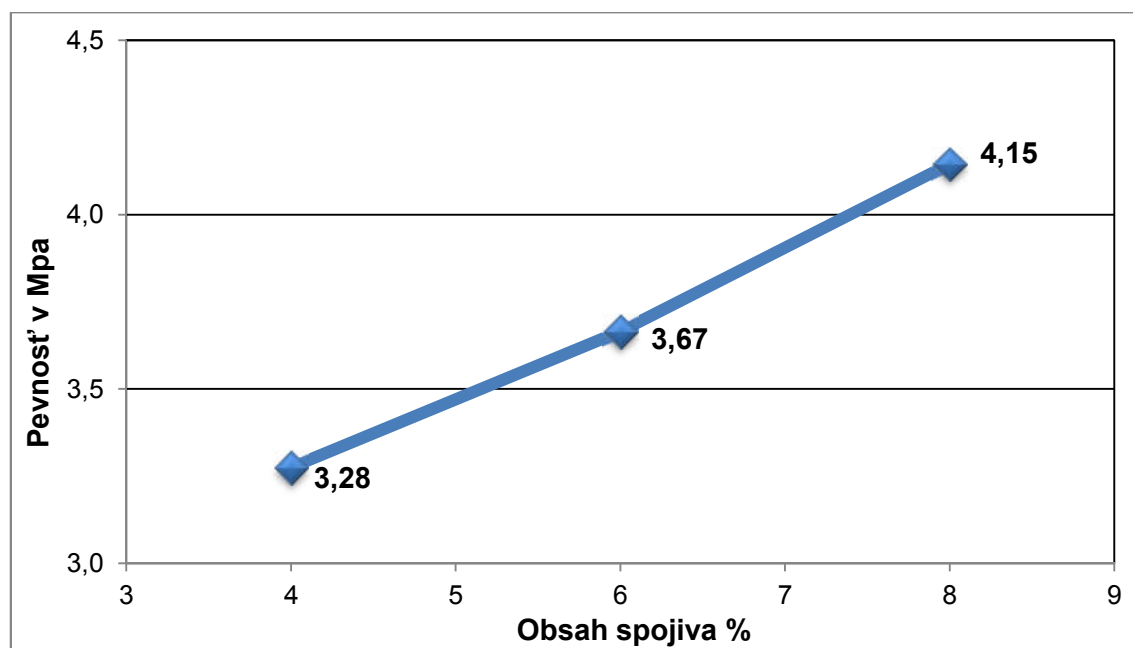
Obr. 3.12: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.7: Výsledky skúšky 3

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	42,14	2,62	5,36	vylúčený
2	34,20	1,90	4,35	-
3	30,97	2,80	3,94	-
			4,15	

Klasifikácia stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (CEM) do tried pevností:

- 4% - $C_{1,5/2,0}$
- 6% - $C_{1,5/2,0}$
- 8% - $C_{3/4}$



Graf 3.7: Pevnosť v prostom tlaku – cement, $w_{opt} = 6,5\%$

3.3.3.2 Pevnosť v prostom tlaku – Cement, $w_{opt} = 10,0\%$

1.- Obsah spojiva 8%



Obr. 3.13: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, cement 8%, $w_{opt} = 10,0\%$

Tab. 3.8: Výsledky skúšky 4

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	54,34	2,16	6,92	-
2	56,55	2,04	7,20	-
3	52,07	1,88	6,63	-
			6,92	

2.- Obsah spojiva 10%



Obr. 3.14: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, cement 10%, $w_{opt} = 10,0\%$

Tab. 3.9: Výsledky skúšky 5

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	61,22	1,63	7,79	-
2	49,94	2,67	6,35	vylúčený
3	61,30	2,10	7,80	-
			7,80	

3.- Obsah spojiva 12%



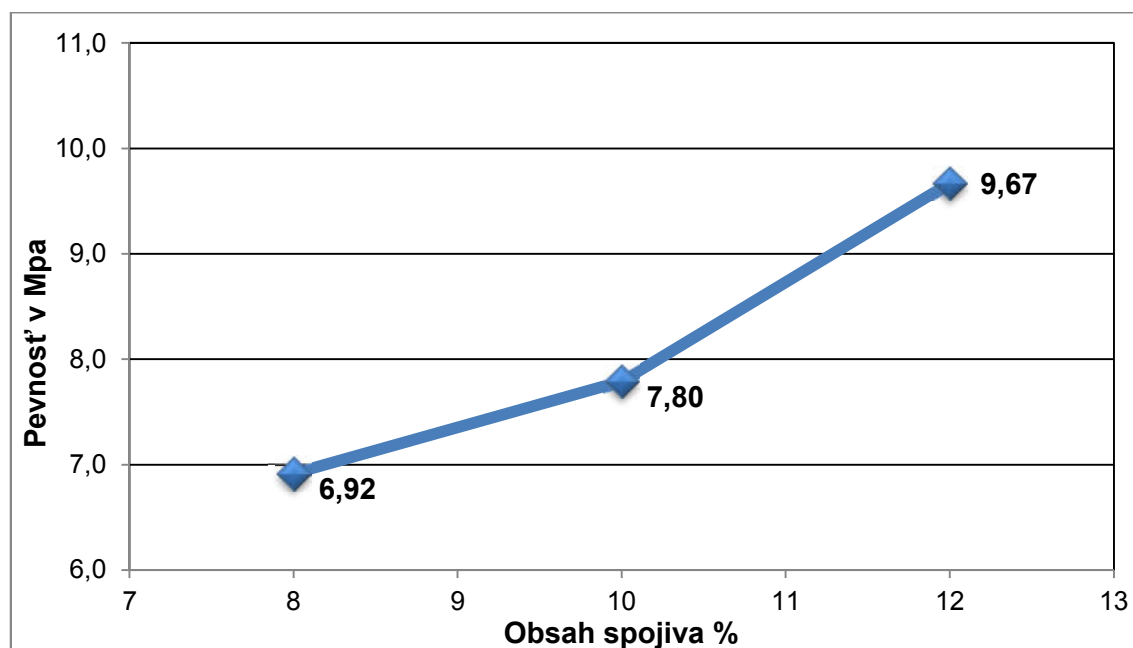
Obr. 3.15: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, cement 12%, $w_{opt} = 10,0\%$

Tab. 3.10: Výsledky skúšky 6

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	79,53	2,0	10,12	-
2	66,35	1,91	8,45	-
3	81,99	1,94	10,44	-
			9,67	

Klasifikácia stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (CEM) do tried pevností:

- 8% - C_{5/6}
- 10% - C_{5/6}
- 12% - C_{5/6}



Graf 3.8: Pevnosť v prostom tlaku – cement, $w_{opt} = 10,0\%$

3.3.3.3 Pevnosť v prostom tlaku – Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

1.- Obsah spojiva 4%



Obr. 3.16: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.11: Výsledky skúšky 7

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	23,19	2,07	2,95	-
2	20,18	2,78	2,57	-
3	28,19	1,89	3,59	vylúčený
			2,76	

2.- Obsah spojiva 6%



Obr. 3.17: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.12: Výsledky skúšky 8

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	32,90	2,26	4,19	-
2	29,26	2,34	3,73	-
3	27,94	2,17	3,56	-
			3,83	

3.- Obsah spojiva 8%



Obr. 3.18: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.13: Výsledky skúšky 9

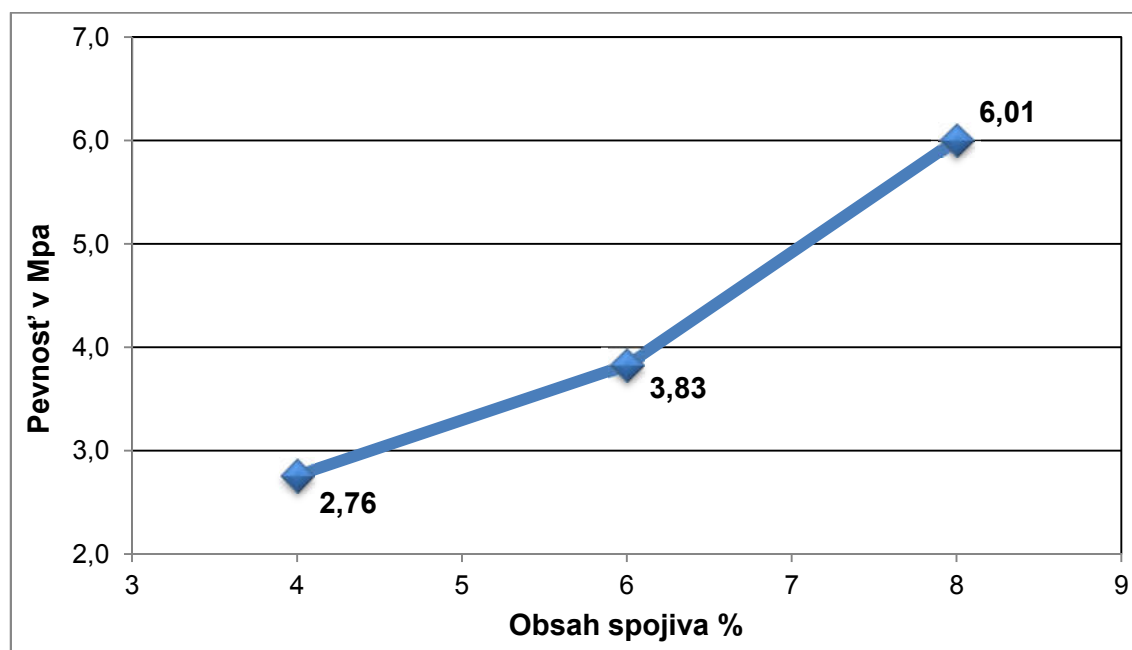
Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	52,34	2,13	6,66	-
2	44,52	2,07	5,67	-
3	44,71	2,77	5,69	-
			6,01	

Klasifikácia stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (Doroport TB 25)

do tried pevností: - 4% - $C_{1,5/2,0}$

- 6% - $C_{1,5/2,0}$

- 8% - $C_{3/4}$



Graf 3.9: Pevnosť v prostom tlaku – Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

3.3.3.4 Pevnosť v prostom tlaku – Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

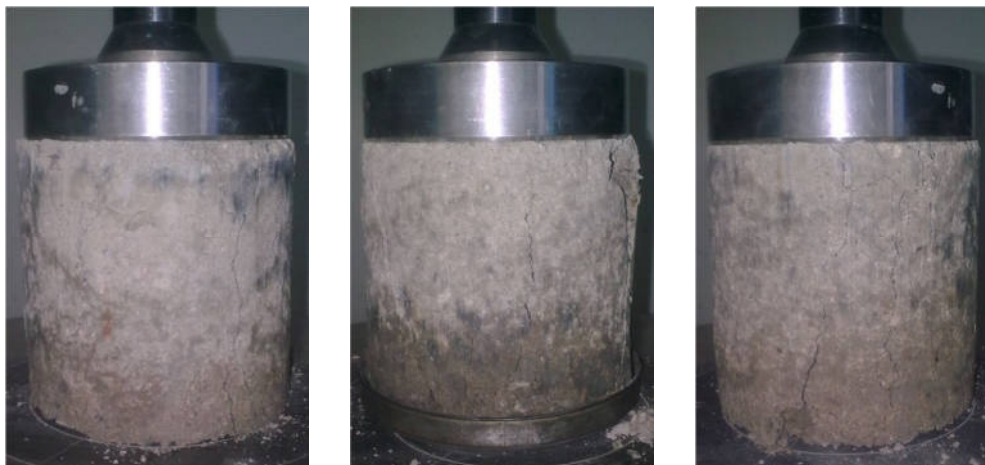
1.- Obsah spojiva 8%

Obr. 3.19: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$

Tab. 3.14: Výsledky skúšky 10

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	41,77	2,27	5,32	-
2	27,85	2,32	3,55	vylúčený
3	39,52	1,58	5,03	-
			5,18	

2.- Obsah spojiva 10%

Obr. 3.20: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$

Tab. 3.15: Výsledky skúšky 11

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	41,65	2,07	5,30	-
2	41,61	2,04	5,30	-
3	42,93	1,58	5,47	-
			5,36	

3.- Obsah spojiva 12%



Obr. 3.21: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$

Tab. 3.16: Výsledky skúšky 12

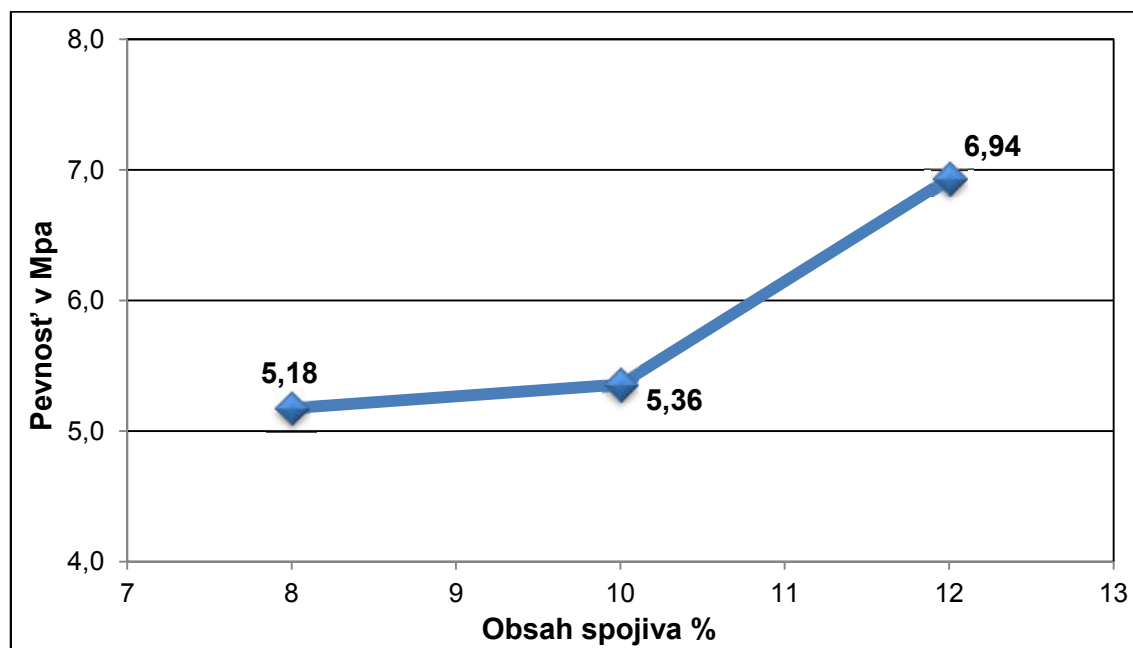
Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	48,46	2,70	6,17	-
2	56,55	1,84	7,20	-
3	58,46	1,87	7,44	-
			6,94	

Klasifikácia stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (Doroport TB 25)

do tried pevností: - 8% - C_{3/4}

- 10% - C_{3/4}

- 12% - C_{3/4}



Graf 3.10: Pevnosť v prostom tlaku – Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

3.3.4 Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch

Vzorky po 28 dňoch tuhnutia boli najskôr vystavené 10 mrazovým cyklom a následne skúšané na pevnosť v prostom tlaku. Skúšobné valčeky sa pred prvým zmrazením, ako i následne medzi jednotlivými cyklami vo fáze rozmrazovania, umiestnili na plstenú podložku (obr. 3.22). Podložka bola čiastočne ponorená do vody tak, aby u vzorkoch na nej uložených dochádzalo k ďalšiemu postupnému nasycovaniu vodou vplyvom kapilárnych síl.



Obr. 3.22: Vzorky uložené na plstenej podložke (fáza rozmrazovania)

Po 18 hodinách rozmrazovania a ďalšieho postupného nasycovania vodou boli valčeky uložené na 6 hodín do mraziaceho boxu (obr. 3.23).



Obr. 3.23: Vzorky uložené v mraziacom boxe (fáza zmrazovania)

3.3.4.1 Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch – Cement, $w_{opt} = 6,5\%$

1.- Obsah spojiva 4%



Obr. 3.24: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.17: Výsledky skúšky 13

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	18,10	2,06	2,30	-
2	20,32	2,97	2,59	-
3	16,15	2,22	2,06	-
			2,32	

2.- Obsah spojiva 6%



Obr. 3.25: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.18: Výsledky skúšky 14

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	38,33	2,57	4,88	-
2	31,67	2,37	4,03	-
3	23,94	2,30	3,05	vylúčený
			4,46	

3.- Obsah spojiva 8%



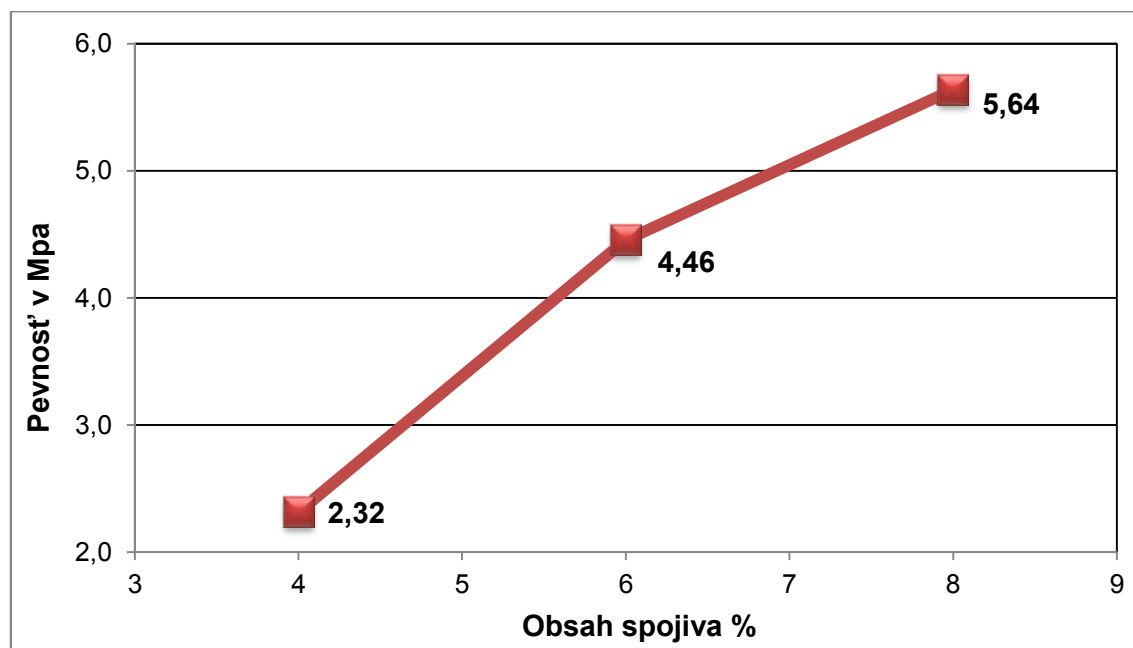
Obr. 3.26: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.19: Výsledky skúšky 15

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	41,25	2,36	5,25	-
2	49,35	2,30	6,28	-
3	42,37	2,66	5,39	-
			5,64	

Klasifikácia odolnosti proti mrazu a vode stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (CEM) do tried pevností:

- 4% - C_{1,5/2,0}
- 6% - C_{3/4}
- 8% - C_{3/4}



Graf 3.11: Pevnosť v prostom tlaku po MC – cement, $w_{opt} = 6,5\%$

3.3.4.2 Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch – Cement, $w_{opt} = 10,0\%$

1.- Obsah spojiva 8%



Obr. 3.27: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, cement 8%, $w_{opt} = 10,0\%$

Tab. 3.20: Výsledky skúšky 16

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	55,81	1,75	7,11	vylúčený
2	46,12	2,35	5,87	-
3	42,22	3,17	5,38	-
			5,63	

2.- Obsah spojiva 10%



Obr. 3.28: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, cement 10%, $w_{opt} = 10,0\%$

Tab. 3.21: Výsledky skúšky 17

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	51,76	2,08	6,59	-
2	52,82	1,94	6,73	-
3	39,39	2,12	5,01	vylúčený
			6,66	

3.- Obsah spojiva 12%



Obr. 3.29: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, cement 12%, $w_{opt} = 10,0\%$

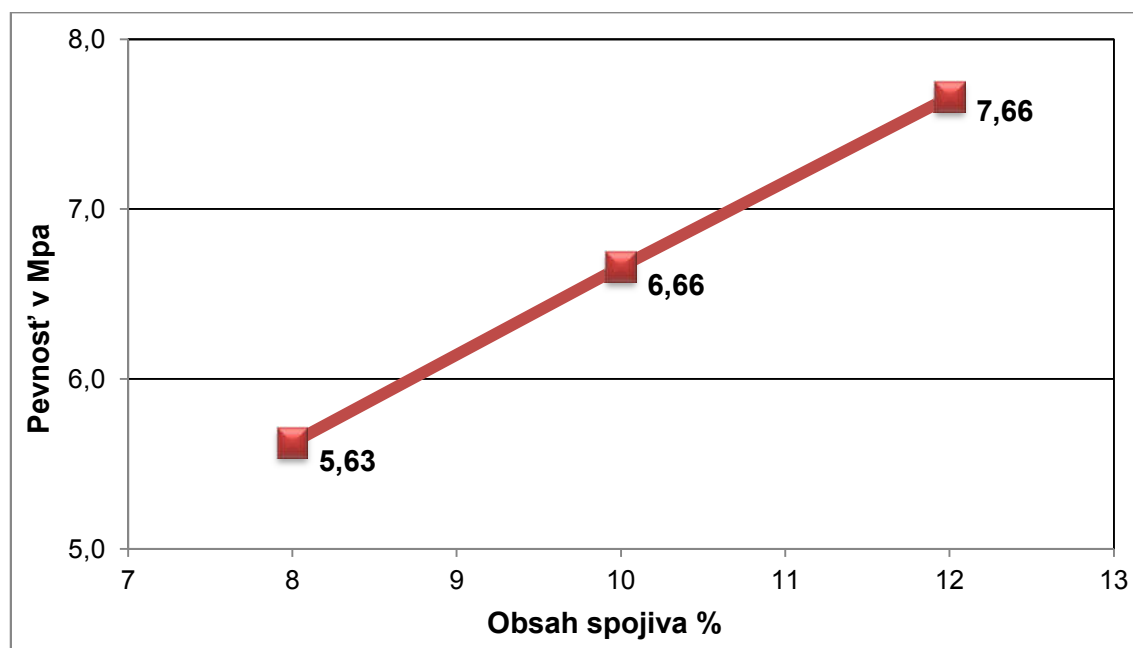
Tab. 3.22: Výsledky skúšky 18

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	60,13	2,10	7,66	-
2	78,26	2,49	9,96	vylúčený
3	38,43	2,97	4,89	vylúčený
			7,66	

Klasifikácia odolnosti proti mrazu a vode stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (CEM) do tried pevností: - 8% - C_{3/4}

- 10% - C_{5/6}

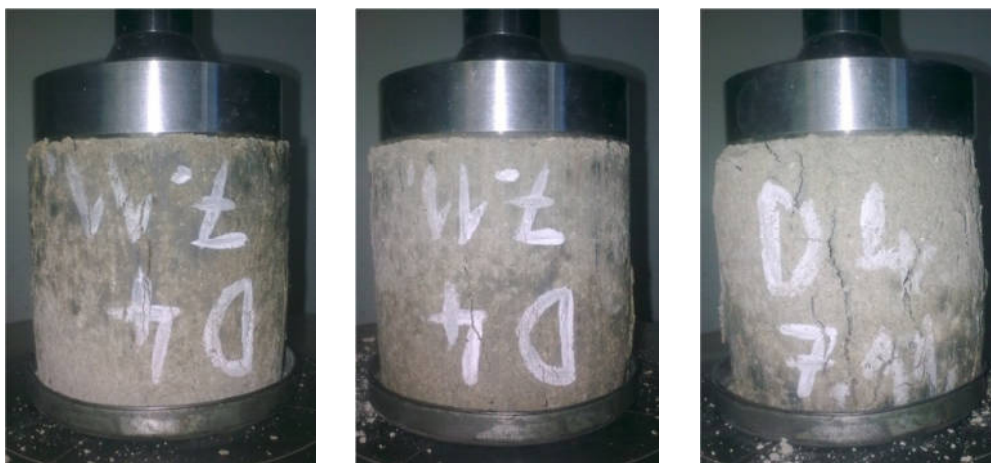
- 12% - C_{5/6}



Graf 3.12: Pevnosť v prostom tlaku po MC – cement, $w_{opt} = 10,0\%$

3.3.4.3 Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch – Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

1.- Obsah spojiva 4%



Obr. 3.30: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.23: Výsledky skúšky 19

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	22,98	2,41	2,93	-
2	17,24	1,98	2,20	vylúčený
3	21,07	3,17	2,68	-
			2,81	

2.- Obsah spojiva 6%



Obr. 3.31: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.24: Výsledky skúšky 20

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	30,50	1,93	3,88	-
2	28,50	1,96	3,63	-
3	25,90	2,17	3,30	-
			3,60	

3.- Obsah spojiva 8%



Obr. 3.32: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$

Tab. 3.25: Výsledky skúšky 21

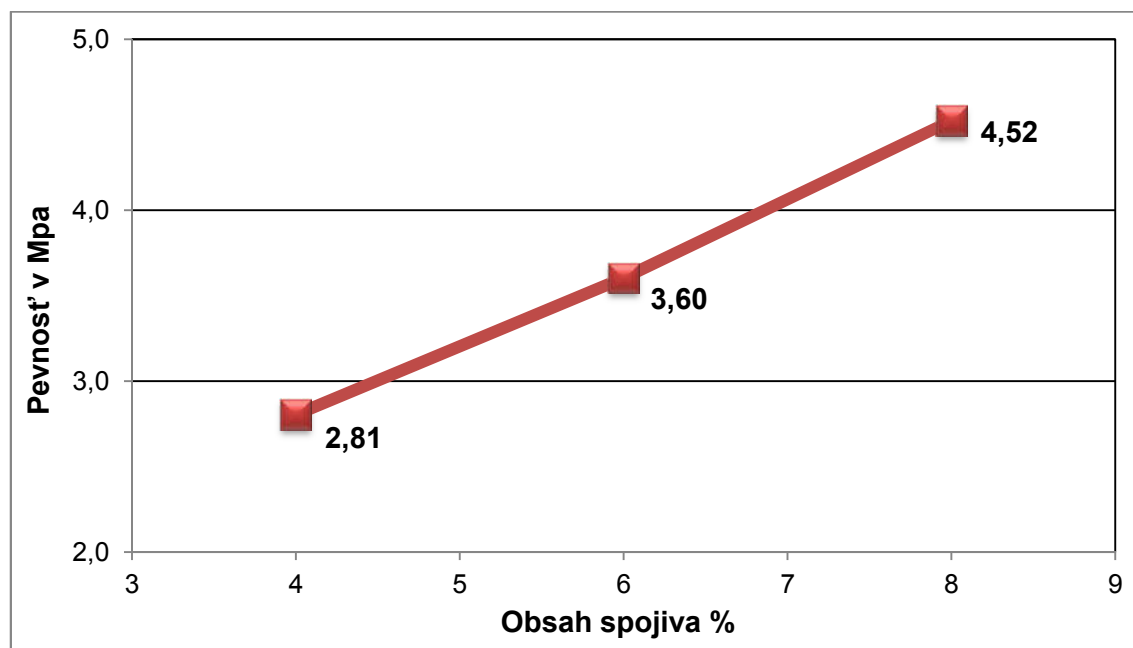
Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	36,92	2,10	4,70	-
2	37,28	2,11	4,75	-
3	32,39	2,09	4,12	-
			4,52	

Klasifikácia odolnosti proti mrazu a vode stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (Doroport TB 25) do tried pevností:

- 4% - C_{1,5/2,0}

- 6% - C_{1,5/2,0}

- 8% - C_{3/4}



Graf 3.13: Pevnosť v prostom tlaku po MC – Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

3.3.4.4 Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch – Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

1.- Obsah spojiva 8%



Obr. 3.33: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$

Tab. 3.26: Výsledky skúšky 22

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	40,42	2,65	5,15	-
2	46,38	2,09	5,90	-
3	21,53	2,44	2,74	vylúčený
			5,53	

2.- Obsah spojiva 10%



Obr. 3.34: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$

Tab. 3.27: Výsledky skúšky 23

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	43,16	2,45	5,50	-
2	29,84	2,35	3,80	vylúčený
3	48,24	2,49	6,14	-
			5,82	

3.- Obsah spojiva 12%



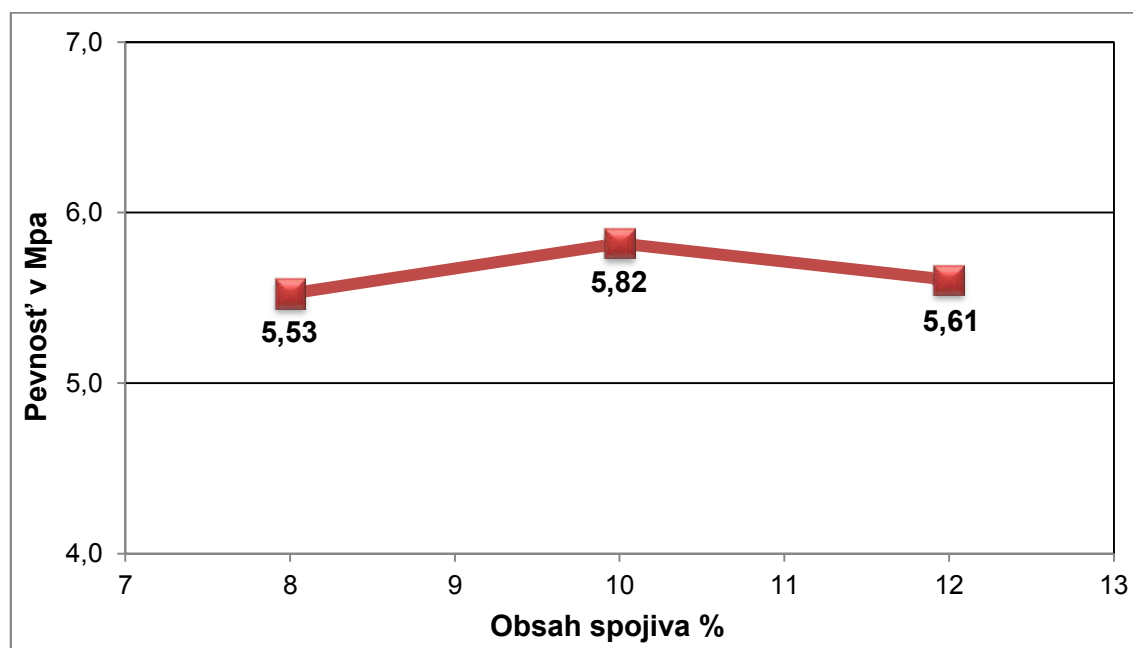
Obr. 3.35: Vyskúšané valčeky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$

Tab. 3.28: Výsledky skúšky 24

Označenie	Sila [KN]	Pretvorenie [mm]	Pevnosť v tlaku [MPa]	Poznámka
1	42,14	2,41	5,36	-
2	45,93	3,05	5,85	-
3	34,44	3,28	4,38	vylúčený
			5,61	

Klasifikácia odolnosti proti mrazu a vode stmelených zmesí s recyklátom podľa použitého spojiva (Doroport TB 25) do tried pevností:

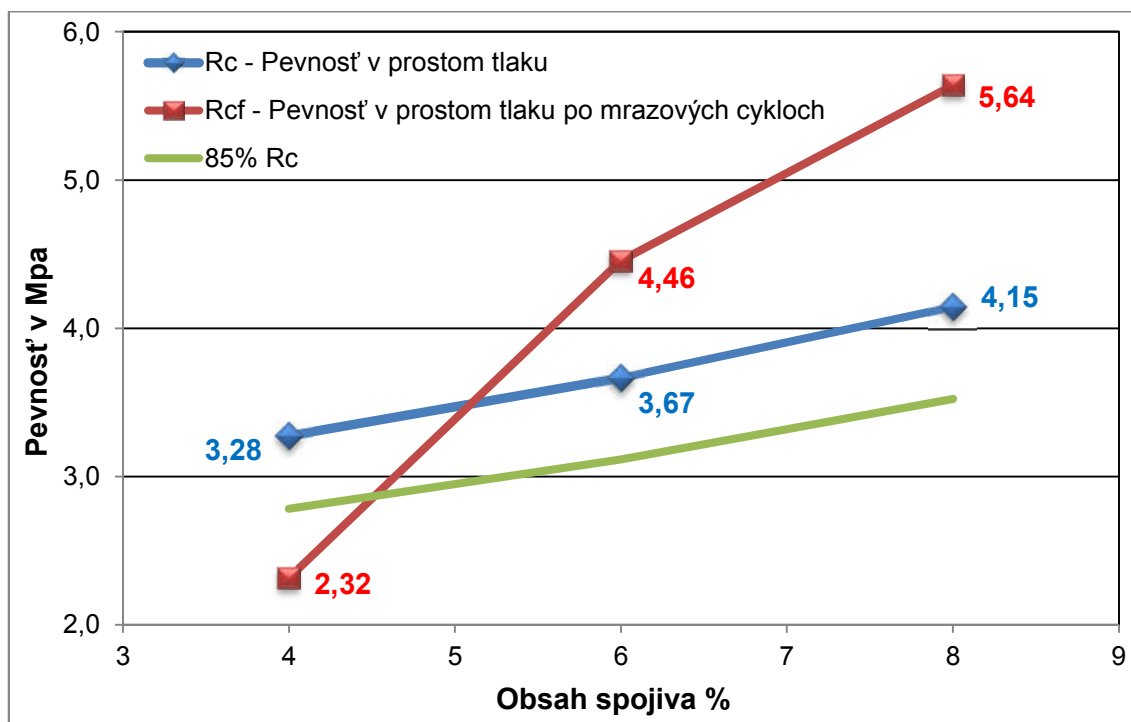
- 8% - C_{3/4}
- 10% - C_{3/4}
- 12% - C_{3/4}



Graf 3.14: Pevnosť v prostom tlaku po MC – Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

3.3.5 Výsledná odolnosť proti mrazu a vode

3.3.5.1 Cement, $w_{opt} = 6,5\%$

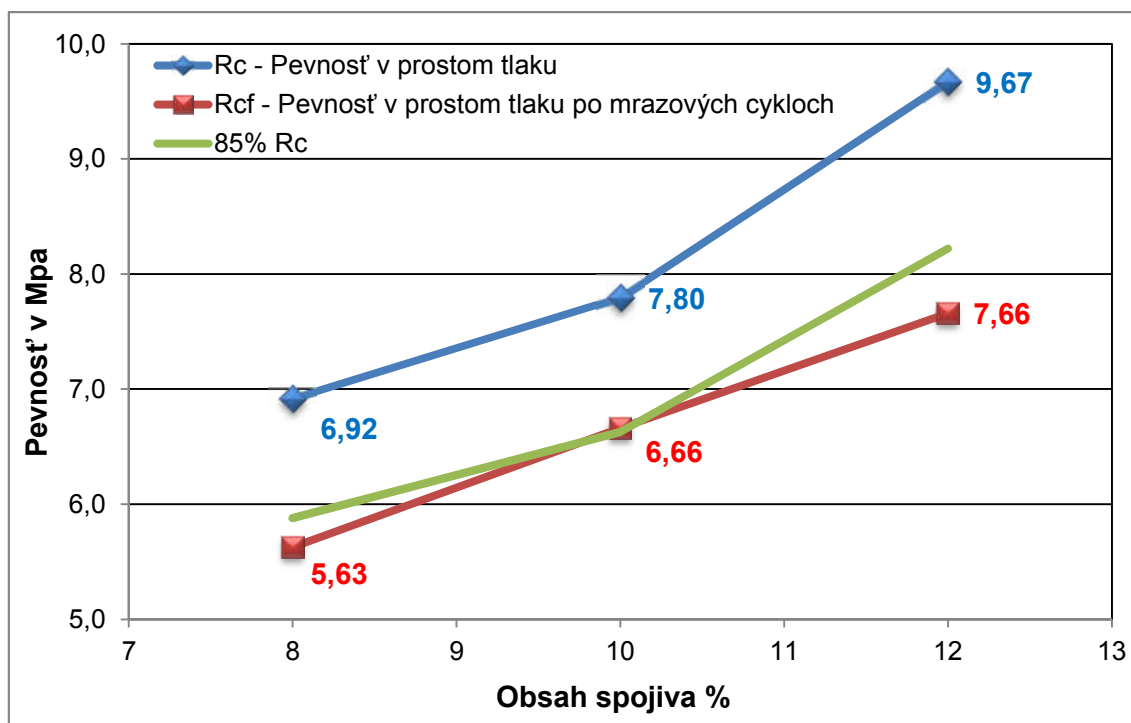


Graf 3.15: Odolnosť proti mrazu a vode, cement, $w_{opt} = 6,5\%$

Na grafe je vidieť postupný nárast pevností v prostom tlaku u vzorkoch vystavených mrazovým cyklom oproti vzorkom mrazovým cyklom nevystaveným. Zrejme vzorky s obsahom spojiva 6% a 8% počas vyzrievania v komore nemali dostatočnú vlhkosť na plné prebehnutie hydraulikkej reakcie. Táto reakcia potom pokračovala behom mrazových cyklov vo fáze rozmrazovania, keď sa vzorky uložili na plstenú podložku nasýtenú vodou. Z výsledkov tejto skúšky vyplýva, že zmes s obsahom spojiva 4% na odolnosť proti mrazovým cyklom nevyhovuje. Naopak, zmesi s obsahom spojiva 6% a 8% sa javia ako vyhovujúce, nakoľko ich pevnosti v prostom tlaku po mrazových cykloch nielenže vyhoveli požiadavku 85% R_c , ale dokonca rapídne prevýšili samotné pevnosti v prostom tlaku u vzorkoch nevystavených mrazovým cyklom.

Tab. 3.29: Porovnanie dosiahnutých pevností 1

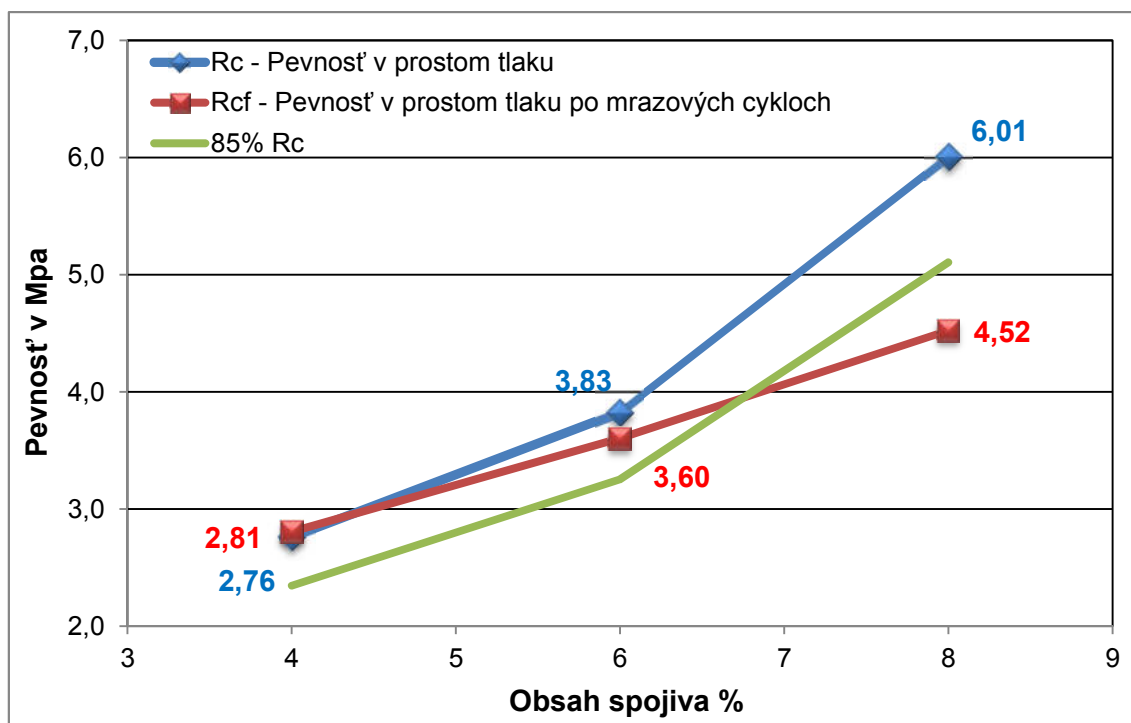
Obsah spojiva [%]	R_c [MPa]	R_{cf} [MPa]	%	Poznámka
4%	3,28	2,32	71%	nevyhovuje
6%	3,67	4,46	122%	vyhovuje
8%	4,15	5,64	136%	vyhovuje

3.3.5.2 Cement, $w_{opt} = 10,0\%$ Graf 3.16: Odolnosť proti mrazu a vode, cement, $w_{opt} = 10,0\%$

Z výsledkov tohto grafu je patrné že pri optimálnej vlhkosti zmesi 10% je problematické vyhovieť mrazovým cyklom. U zmesí s obsahom spojiva 8% a 12% mrazové cykly znížili výslednú pevnosť v prostom tlaku pod prijateľnú hranicu a u zmesi s obsahom spojiva 10% je požiadavka na 85% R_c splnená len veľmi tesne. Preto z výsledkov tejto skúšky usudzujem, že cement ako spojivo do podkladových vrstiev môže spôsobovať poruchy konštrukčných vrstiev, kvôli jeho nízkej odolnosti proti mrazovým cyklom. Nízka odolnosť je pravdepodobne spôsobená rýchlym nárastom počiatočných pevností s následným vznikom mikrotrhlín.

Tab. 3.30: Porovnanie dosiahnutých pevností 2

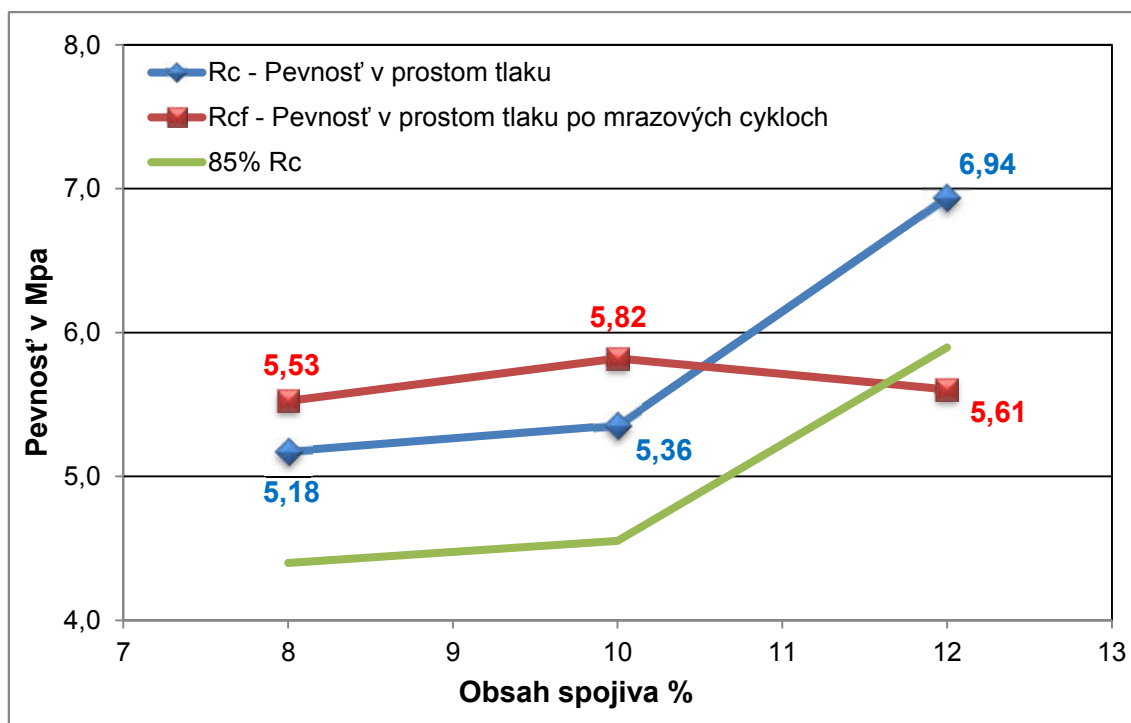
Obsah spojiva [%]	R _c [MPa]	R _{cf} [MPa]	%	Poznámka
8%	6,92	5,63	81%	nevyhovuje
10%	7,80	6,66	85%	vyhovuje
12%	9,67	7,66	79%	nevyhovuje

3.3.5.3 Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$ Graf 3.17: Odolnosť proti mrazu a vode, Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

Z grafu vyplýva, že pri optimálnej vlhkosti 6,5% je zmes s obsahom spojiva 4% a 6% vyhovujúca mrazovým cyklom. Dokonca u obsahu spojiva 4% je pevnosť po mrazových cykloch mierne vyššia ako pevnosť v tlaku skúšaná na vzorkoch po 28 dňoch tuhnutia. Zvýšená pevnosť je spôsobená pravdepodobne pokračujúcou hydraulickou reakciou prebiehajúcou počas mrazových cyklov vo fáze rozmrazovania. Naopak, zmes s obsahom spojiva 8% sa po skúške pevnosti mrazových cyklov javí ako nevyhovujúca. Zrejme kvôli vyššiemu obsahu spojiva nebolo možné dosiahnuť takej hydraulickej reakcii ako u predošlých dvoch percentuálnych zastúpení spojív.

Tab. 3.31: Porovnanie dosiahnutých pevností 3

Obsah spojiva [%]	R_c [MPa]	R_{cf} [MPa]	%	Poznámka
4%	2,76	2,81	102%	vyhovuje
6%	3,83	3,60	94%	vyhovuje
8%	6,01	4,52	75%	nevyhovuje

3.3.5.4 Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$ Graf 3.18: Odolnosť proti mrazu a vode, Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

Na tomto grafe je vidieť že sa plne prejavila najdôležitejšia vlastnosť Doroportu TB 25, a tou je postupný nárast pevností. Predpokladám, že behom mrazových cyklov vo fáze rozmrazovania a postupného nasycovania vodou dochádzalo k priebehu ďalšej hydraulickej reakcii v zmesi, čo sa odrazilo aj na náraste pevnosti po mrazových cykloch. Zmesi s obsahom spojiva 8% a 10% nielenže vyhoveli požiadavku 85% pevnosti v prostom tlaku, ale ich pevnosť bola o niečo vyššia ako samotná pevnosť v prostom tlaku nameraná na vzorkoch nevystavených mrazovým cyklom. Zmes s obsahom spojiva 12% už mrazovým cyklom nevyhovela. Z výsledkov tohto grafu vyplýva, že Doroport TB 25 je vhodným spojivom do stmelených podkladových vrstiev prevádzaných z betónového recyklátu a to konkrétne s obsahom spojiva 8% a 10%.

Tab. 3.32: Porovnanie dosiahnutých pevností 4

Obsah spojiva [%]	R _c [MPa]	R _{cf} [MPa]	%	Poznámka
8%	5,18	5,53	107%	vyhovuje
10%	5,36	5,82	109%	vyhovuje
12%	6,94	5,61	81%	nevyhovuje

4. ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo určenie vhodnosti používania betónového recyklátu s prídavkom spojív vo forme stmelenej zmesi do konštrukčných vrstiev pozemných komunikácií porovnaním výslednej odolnosti proti mrazu a vode. Nakoľko sú tieto stmelené zmesi v okolitých štátoch Európskej únie ešte stále považované za málo vhodné kvôli ich nízkej odolnosti, snažil som sa dokázať, že pri použití správneho množstva spojiva a vody, môžu byť výsledky priaznivé.

Skúšky boli prevádzané na 12 rozličných zmesiach spracovaných do tvaru valčekov, ktorých pevnosť v prostom tlaku bola porovnávaná s pevnosťou po mrazových cykloch. Nato aby daná zmes vyhovela, musela jej pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch dosiahnuť hodnoty aspoň 85% pevnosti v prostom tlaku, tak ako je tomu u stmelených zmesí z prírodného kameniva. Používali sa dva v Českej republike najpoužívanejšie spojivá pre tieto zmesi a to cement V/A (S-V) 32,5 R a Doroport TB 25.

Zo skúšok zmesí stmelенých cementom vyplýva, že odolnosť proti mrazu a vode je splnená iba u zmesí s obsahom spojiva 6% a 8%. Ich pevnosti v prostom tlaku po mrazových cykloch sú výrazne vyššie (122%, 136%) ako pevnosti v tlaku skúšané na vzorkoch nevystavených mrazovým cyklom. Avšak môže to byť spôsobené tým, že behom mrazových cyklov vo fáze rozmrazovania, došlo k predĺženiu hydraulickej reakcii, čo viedlo k vyššej výslednej pevnosti. Zmes s obsahom spojiva 12% sa po zhodnotení výsledkov javí ako nevyhovujúca a u zmesi s 10% spojiva vyšla výsledná odolnosť presne na hranici 85%. Zrejme je to spôsobené tým, že cement ako spojivo je charakteristické rýchlym vývojom počiatočných pevností.

Z vykonaných skúšok zmesí stmelенých Doroportom TB 25 je zrejmé, že sa jedná o spojivo vhodnejšie do stmelенých podkladových vrstiev. Zmesi s obsahom spojiva 4% a 6% požiadavku na odolnosť proti mrazu a vode vyhovujú. Ich namerané pevnosti v prostom tlaku po mrazových cykloch dosahovali hodnôt 102% a 94%. Zmesi s obsahom spojiva 8% a 10% hodnotím ako vysoko odolné voči účinkom mrazu a vode, keďže ich výsledné namerané pevnosti po mrazových cykloch dosahovali hodnôt 107% a 109%.

Z výsledkov tejto práce usudzujem, že spojivo vhodnejšie do stmelенých zmesí konštrukčných vrstiev, hlavne z hľadiska posúdenia odolnosti proti účinkom mrazu a vode, je **Doroport TB 25**. Jeho vlastnosť postupného nárastu pevnosti zaručuje vyššiu výslednú kvalitu konštrukčnej vrstvy v pozemnej komunikácii i po opakovanom zaťažovaní nepriaznivými klimatickými podmienkami.

Zároveň sa dá na základe výsledkov konštatovať, že požadovaná hodnota pevnosti v prostom tlaku po mrazových cykloch **0,85 Rc** je pre tento typ stmelených zmesí prílišná. Stálo by za úvahu zvážiť úpravu tejto hodnoty pevnosti v norme ČSN EN 14227-1 až 5 napr. na hodnotu **0,75 Rc**.

ZOZNAM LITERATÚRY

1. Použitá

- [1] Stehlík D.: Technické podmínky pro užití recyklovaných stavebních materiálů do pozemních komunikací, Sborník přednášek konference Recycling 2011 – Brno
- [2] Kudrna J.: Recyklace a využití druhotných surovin při stavbě a opravě pozemních komunikací
- [3] Piatriková K.: Použitie recyklovaného materiálu do hydraulicky stmelených podkladových vrstiev vozovky
- [4] Mahdalová I.: Navrhování a stavba pozemních komunikací
- [5] Doc. Dr. Ing. Michal Varaus: Pozemní komunikace II – skriptum k přednáškám, VUT v Brně, Fakulta stavební
- [6] Margaret Mary O`Mahony: Recycling of materials in civil engineering
- [7] Ravindra K Dhir, Tom D Dyer, Kevin A Paine: Use of incinerator ash

2. Doporučená

- [8] ČSN EN 14227-1 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 1: Směsi stmelené cementem
- [9] ČSN EN 14227-5 Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 5: Směsi stmelené hydraulickými silničními pojivy
- [10] ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška
- [11] TP 210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací; VUT v Brně, Fakulta stavební, ústav pozemních komunikací, Schváleno ministerstvem dopravy dne 15.12.2010 s účinností od 1.1.2011
- [12] ČSN EN 13286-41 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směrím stmelených hydraulickými pojivy

3. Doplnková

- [13] Drviče betónového recyklátu, dostupné z:
<http://www.finlay.hydrex.sk/drvice.php>
- [14] Ceny prírodného kameniva, dostupné z:
<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDkQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.kamenolombarnartice.cz%2Fcenik.doc&ei=q5rWUpP-EuXY7Ab7rIDYBg&usq=AFQjCNEbHvte3rccHrULOzwhZ6yoWAM8tA>
- [15] Ceny recyklovaných materiálov, dostupné z:
<http://www.dufonev.cz/pdf/cenik/cenik.pdf>
- [16] Environmentálne riziká recyklátov, dostupné z:
<http://www.envigroup.cz/www/aktuality/aktualita-477.html>
- [17] Cement - výroba, druhy, značenie, dostupné z:
<http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>
- [18] Cement, dostupné z:
http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html
- [19] Doroport TB 25, dostupné z:
<http://www.holcim.cz/produkty-a-sluzby/specialni-hydraulicka-pojiva/georoc-doroport-tb-25.html>
- [20] Doroport TB 25, dostupné z:
http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/georoc-pro-geotechnicke-inzenyrstvi-a-pozemni-stavitelstvi_12295.html
- [21] Pokládka podkladových vrstiev, dostupné z:
<http://www.falticeni.ro/pofoto.php?startdir=str.%20Plesesti%20Gane/3%20Plesesti%20Gane%20asternere%20strat%20egalizare%20doroport>
- [22] Zrnitosť zemín, dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Zrnitost_zemin

ZOZNAM SKRATIEK

PK	Pozemná komunikácia
SDO	Stavebný a demolačný odpad
RSM	Recyklovaný stavebný materiál
MC	Mrazové cykly
TP	Technické podmienky
R_c	Pevnosť v prostom tlaku
R_{cf}	Pevnosť v prostom tlaku po mrazových cykloch
w_{opt}	Optimálna vlhkosť
C_u	Číslo nestejnozrnosti
C_c	Číslo krivosti

ZOZNAM OBRÁZKOV

- Obr. 2.1: Konštrukcia cestnej vozovky [3]*
- Obr. 2.2: Priečny rez pozemnou komunikáciou [5]*
- Obr. 2.3: Schéma procesu recyklácie [1]*
- Obr. 2.4: Čel'ust'ový drvič [13]*
- Obr. 2.5: Odrazový drvič [13]*
- Obr. 2.6: Kužel'ový drvič [13]*
- Obr. 2.7: Proces výroby cementu [18]*
- Obr. 2.8: Proces výroby cementu [17]*
- Obr. 2.9: Druhy cementov [17]*
- Obr. 2.10: Normalizované označenie [17]*
- Obr. 2.11: Úprava podkladových vrstiev [21]*
- Obr. 2.12: Úprava podkladových vrstiev [21]*
- Obr. 2.13: Konštrukčné vrstvy pozemných komunikácií [5]*
- Obr. 2.14: Mohrova kružnica – stmelené zmesi [5]*
- Obr. 2.15: Obor zrnitosti kameniva [8]*
- Obr. 2.16: Forma a koncové vložky na prípravu vzorkov [6]*
- Obr. 2.17: Zmrazovacia komora [6]*
- Obr. 2.18: Podperná konštrukcia na uloženie vzorkov v skrini [6]*
- Obr. 2.19: Výsledok skúšky v grafe [7]*
- Obr. 2.20: Parný prístroj [7]*
- Obr. 3.1: Zrnitostná skúška*
- Obr. 3.2: Betónový recyklát*

- Obr. 3.3: Hutniace zariadenie Proctor [5]
- Obr. 3.4: Rozdelenie skúšobných telies
- Obr. 3.5: Hydraulický lis
- Obr. 3.6: Hutniaci tlak
- Obr. 3.7: Ručný hydraulický lis na vytlačenie valčekov z formy
- Obr. 3.8: Vyhotovené valčky
- Obr. 3.9: Lis na skúšanie pevnosti v tlaku
- Obr. 3.10: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.11: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.12: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.13: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, cement 8%, $w_{opt} = 10,0\%$
- Obr. 3.14: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, cement 10%, $w_{opt} = 10,0\%$
- Obr. 3.15: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, cement 12%, $w_{opt} = 10,0\%$
- Obr. 3.16: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.17: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.18: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.19: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$
- Obr. 3.20: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$
- Obr. 3.21: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku, Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$
- Obr. 3.22: Vzorky uložené na plstenej podložke (fáza rozmrazovania)
- Obr. 3.23: Vzorky uložené v mraziacom boxe (fáza zmrazovania)
- Obr. 3.24: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.25: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.26: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.27: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, cement 8%, $w_{opt} = 10,0\%$
- Obr. 3.28: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, cement 10%, $w_{opt} = 10,0\%$
- Obr. 3.29: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, cement 12%, $w_{opt} = 10,0\%$
- Obr. 3.30: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.31: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.32: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$
- Obr. 3.33: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$
- Obr. 3.34: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$
- Obr. 3.35: Vyskúšané valčky na pevnosť v tlaku po MC, Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$

ZOZNAM TABULIEK

- Tab. 2.1: Vlastnosti Doroportu TB 25 [19]*
- Tab. 2.2: Minimálny obsah spojiva [8]*
- Tab. 2.3: Charakteristická pevnosť v tlaku [8]*
- Tab. 2.4: Klasifikácia podľa pevnosti v tlaku [9]*
- Tab. 3.1 Rozdelenie hutniacich zariadení Proctor [10]*
- Tab. 3.2: Rozmery foriem [10]*
- Tab. 3.3: Teploty zmrazovania a počty cyklov zmrazovania [9]*
- Tab. 3.4: Výsledky Proctorovej skúšky modifikovanej*
- Tab. 3.5: Výsledky skúšky 1*
- Tab. 3.6: Výsledky skúšky 2*
- Tab. 3.7: Výsledky skúšky 3*
- Tab. 3.8: Výsledky skúšky 4*
- Tab. 3.9: Výsledky skúšky 5*
- Tab. 3.10: Výsledky skúšky 6*
- Tab. 3.11: Výsledky skúšky 7*
- Tab. 3.12: Výsledky skúšky 8*
- Tab. 3.13: Výsledky skúšky 9*
- Tab. 3.14: Výsledky skúšky 10*
- Tab. 3.15: Výsledky skúšky 11*
- Tab. 3.16: Výsledky skúšky 12*
- Tab. 3.17: Výsledky skúšky 13*
- Tab. 3.18: Výsledky skúšky 14*
- Tab. 3.19: Výsledky skúšky 15*
- Tab. 3.20: Výsledky skúšky 16*
- Tab. 3.21: Výsledky skúšky 17*
- Tab. 3.22: Výsledky skúšky 18*
- Tab. 3.23: Výsledky skúšky 19*
- Tab. 3.24: Výsledky skúšky 20*
- Tab. 3.25: Výsledky skúšky 21*
- Tab. 3.26: Výsledky skúšky 22*
- Tab. 3.27: Výsledky skúšky 23*
- Tab. 3.28: Výsledky skúšky 24*
- Tab. 3.29: Porovnanie dosiahnutých pevností 1*
- Tab. 3.30: Porovnanie dosiahnutých pevností 2*
- Tab. 3.31: Porovnanie dosiahnutých pevností 3*

Tab. 3.32: Porovnanie dosiahnutých pevností 4

ZOZNAM GRAFOV

Graf 3.1: Krivka zrnitosti materiálu

Graf 3.2: Proctorova krivka [5]

Graf 3.3: Cement 6% - optimálna vlhkosť 6,5%

Graf 3.4: Cement 10% - optimálna vlhkosť 10,0%

Graf 3.5: Doroport TB 25 6% - optimálna vlhkosť 6,5%

Graf 3.6: Doroport TB 25 10% - optimálna vlhkosť 9,5%

Graf 3.7: Pevnosť v prostom tlaku – cement, $w_{opt} = 6,5\%$

Graf 3.8: Pevnosť v prostom tlaku – cement, $w_{opt} = 10,0\%$

Graf 3.9: Pevnosť v prostom tlaku – Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

Graf 3.10: Pevnosť v prostom tlaku – Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

Graf 3.11: Pevnosť v prostom tlaku po MC – cement, $w_{opt} = 6,5\%$

Graf 3.12: Pevnosť v prostom tlaku po MC – cement, $w_{opt} = 10,0\%$

Graf 3.13: Pevnosť v prostom tlaku po MC – Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

Graf 3.14: Pevnosť v prostom tlaku po MC – Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

Graf 3.15: Odolnosť proti mrazu a vode, cement, $w_{opt} = 6,5\%$

Graf 3.16: Odolnosť proti mrazu a vode, cement, $w_{opt} = 10,0\%$

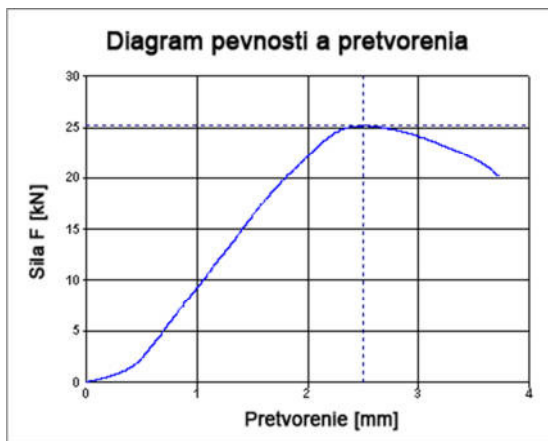
Graf 3.17: Odolnosť proti mrazu a vode, Doroport TB 25, $w_{opt} = 6,5\%$

Graf 3.18: Odolnosť proti mrazu a vode, Doroport TB 25, $w_{opt} = 9,5\%$

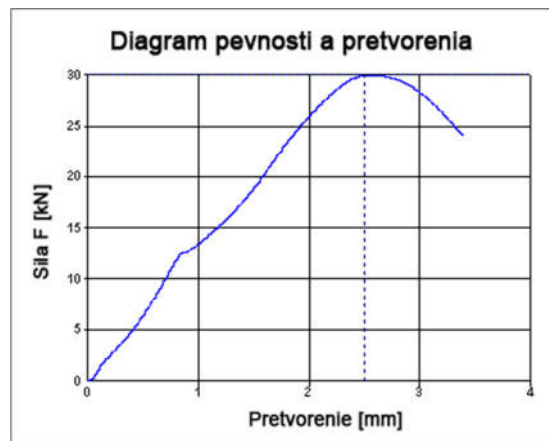
PRÍLOHY

A - Diagramy pevností v prostom tlaku

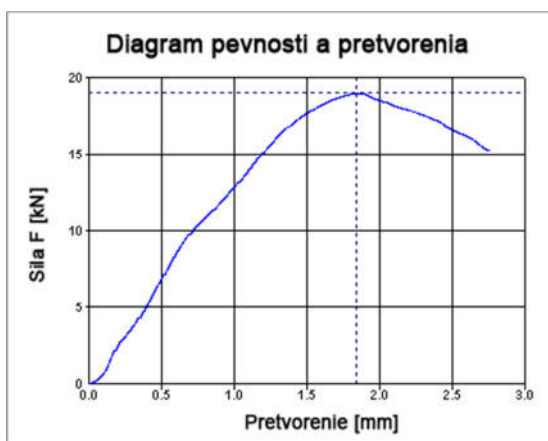
A_{1.1} – Cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



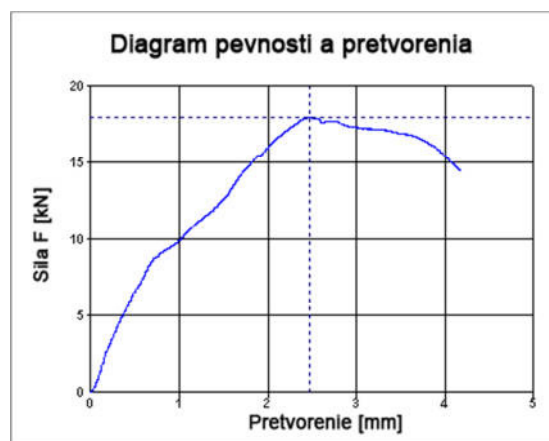
A_{2.1} – Cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



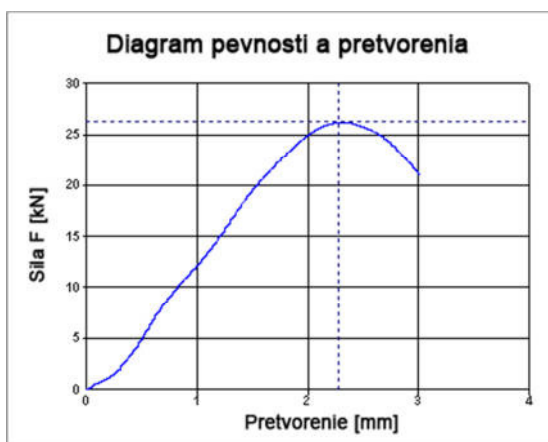
A_{1.2} – Cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



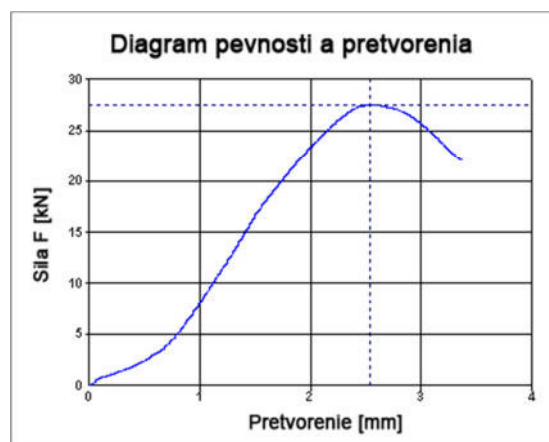
A_{2.2} – Cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



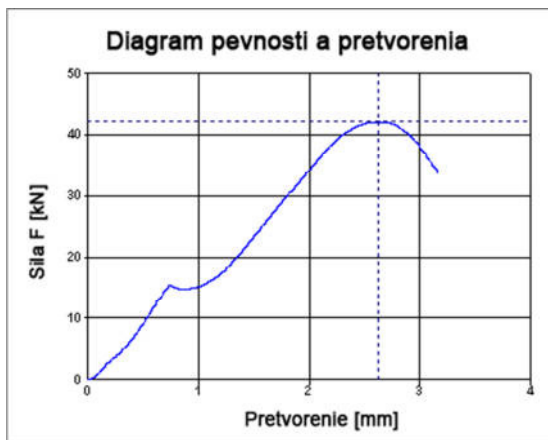
A_{1.3} – Cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



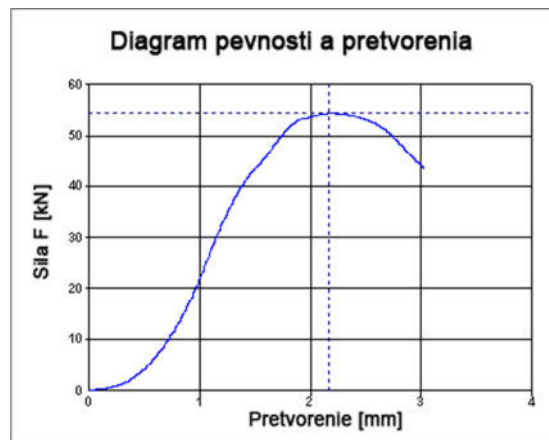
A_{2.3} – Cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



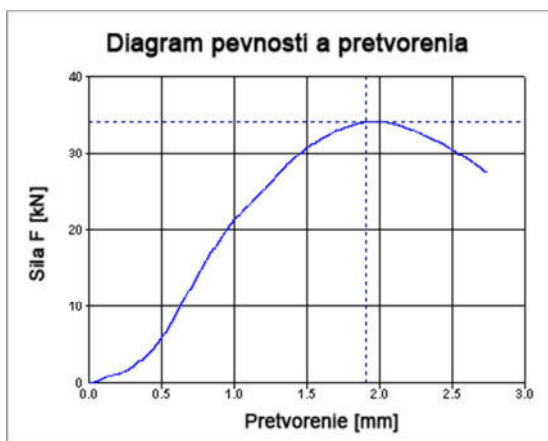
A_{3.1} – Cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



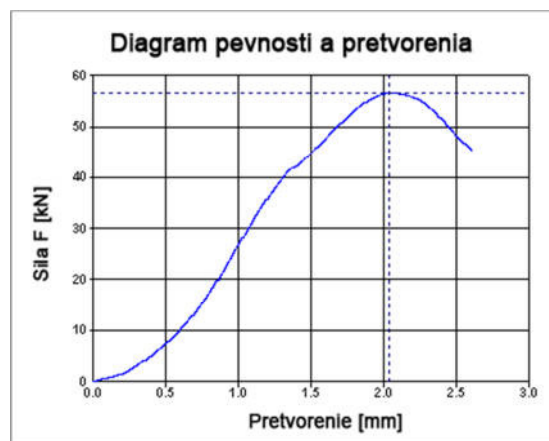
A_{4.1} – Cement 8%, $w_{opt} = 10\%$



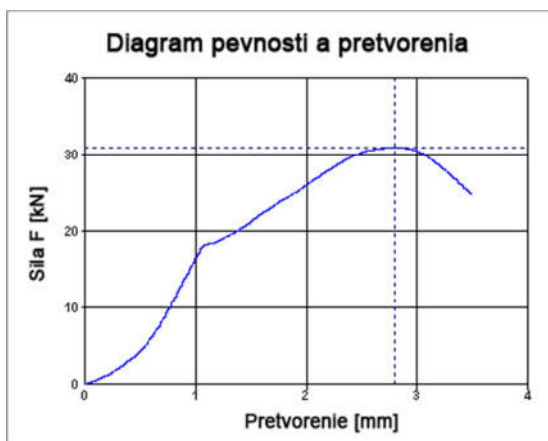
A_{3.2} – Cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



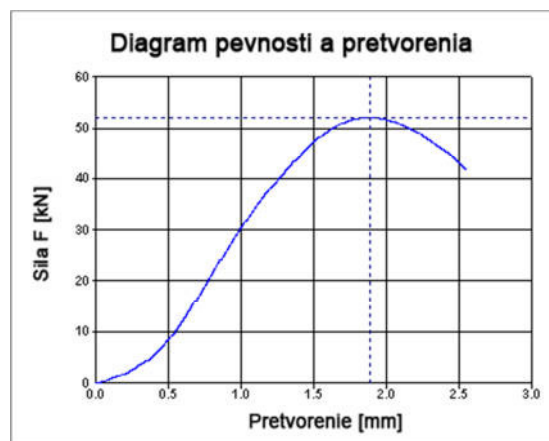
A_{4.2} – Cement 8%, $w_{opt} = 10\%$



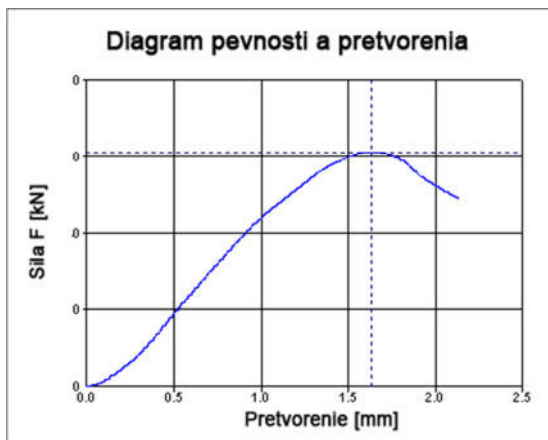
A_{3.3} – Cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



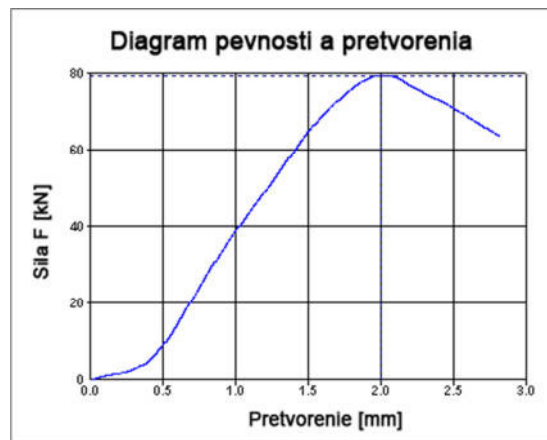
A_{4.3} – Cement 8%, $w_{opt} = 10\%$



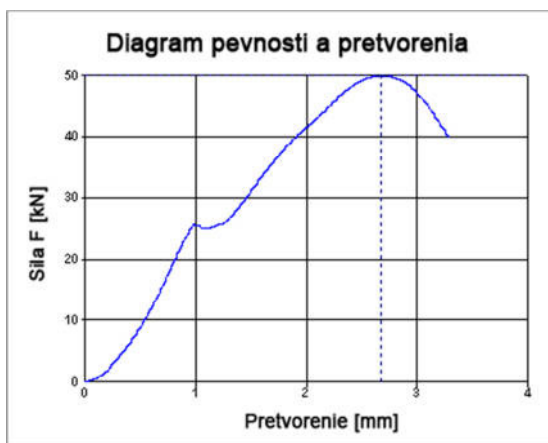
A_{5.1} – Cement 10%, $w_{opt} = 10\%$



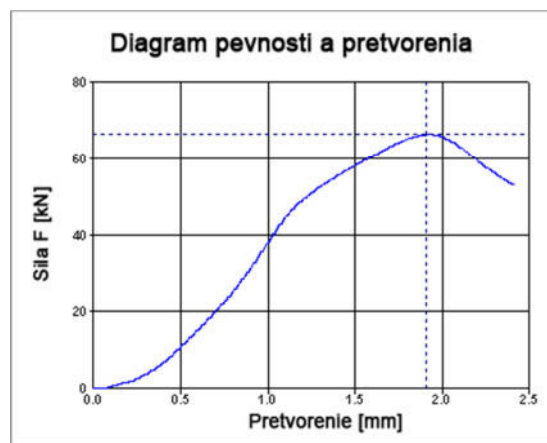
A_{6.1} – Cement 12%, $w_{opt} = 10\%$



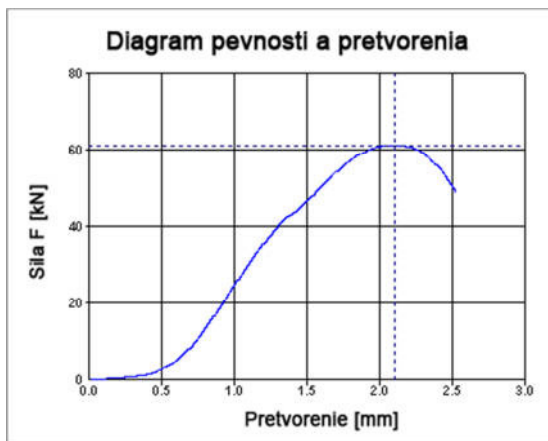
A_{5.2} – Cement 10%, $w_{opt} = 10\%$



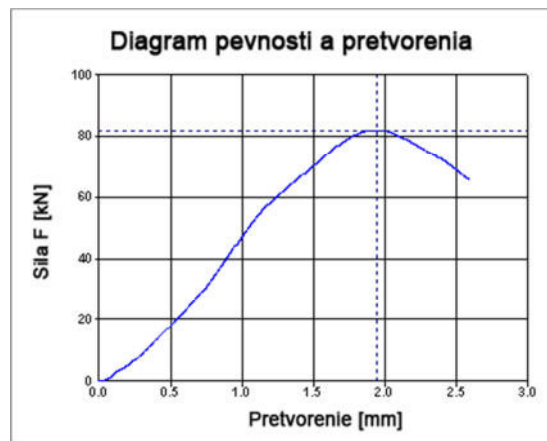
A_{6.2} – Cement 12%, $w_{opt} = 10\%$



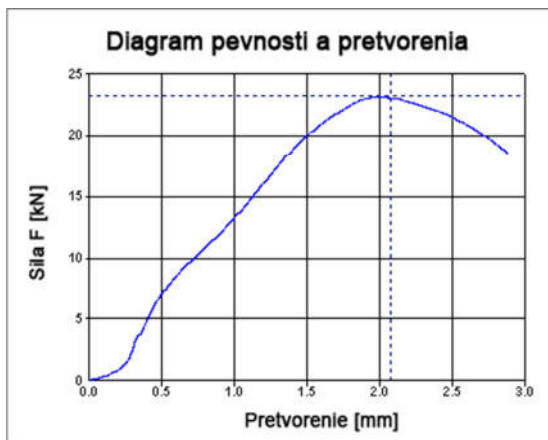
A_{5.3} – Cement 10%, $w_{opt} = 10\%$



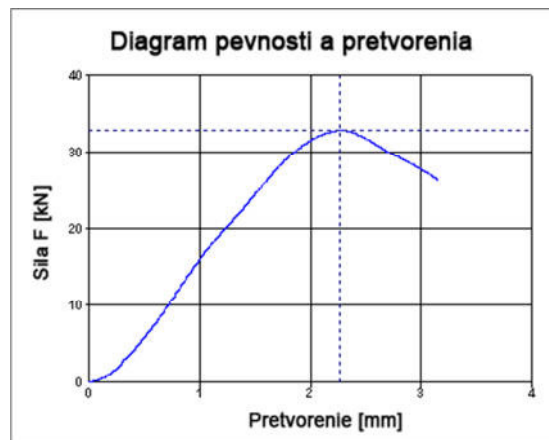
A_{6.3} – Cement 12%, $w_{opt} = 10\%$



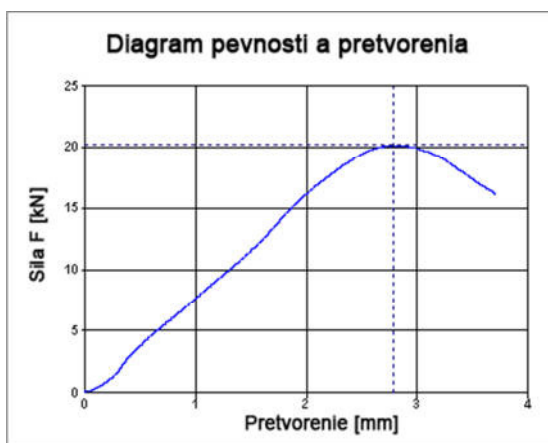
A_{7.1} – Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



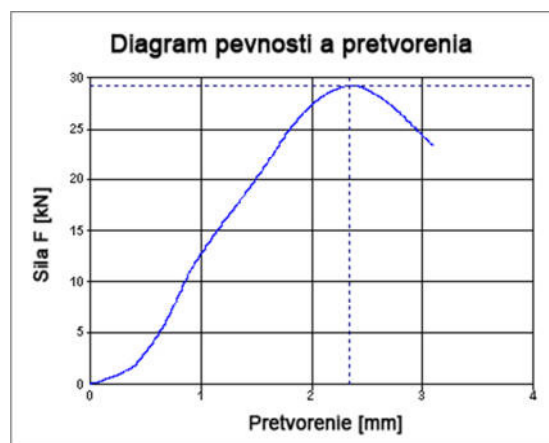
A_{8.1} – Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



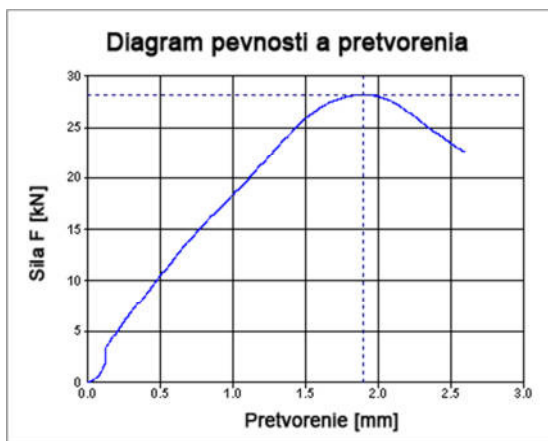
A_{7.2} – Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



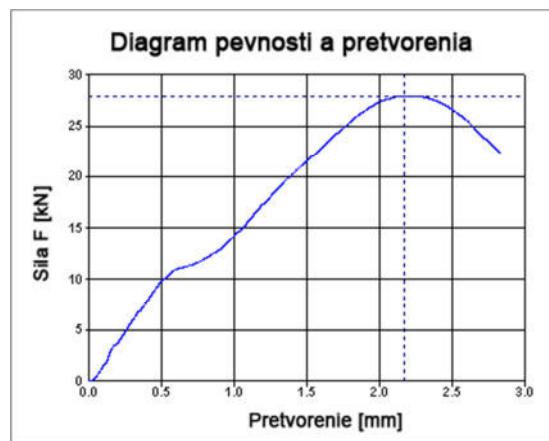
A_{8.2} – Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



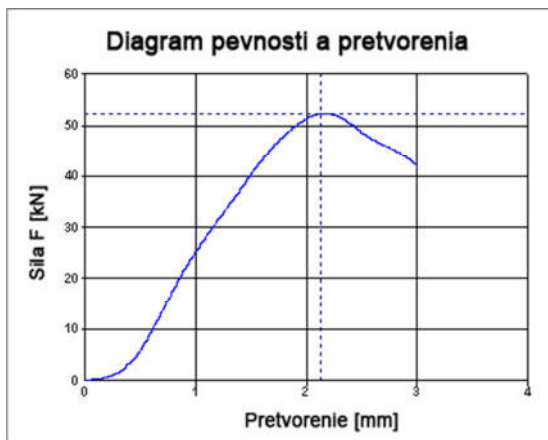
A_{7.3} – Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



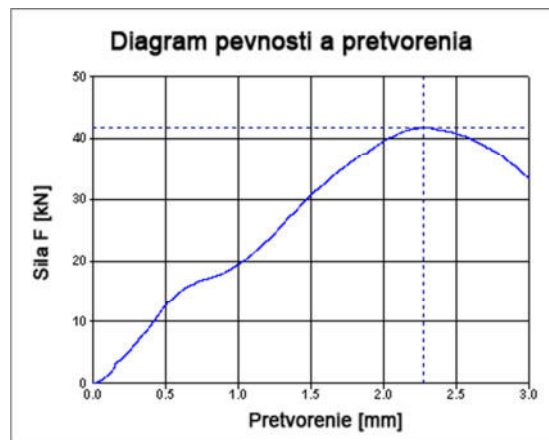
A_{8.3} – Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



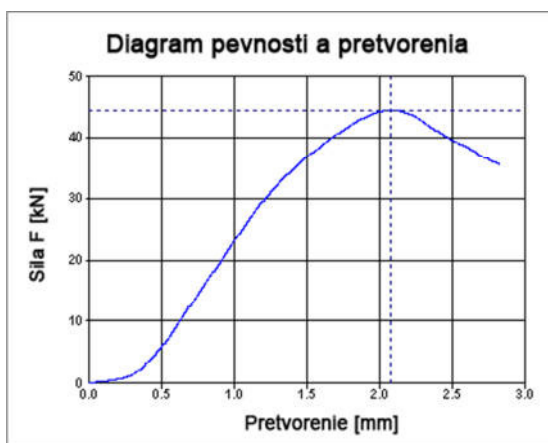
$A_{9,1}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



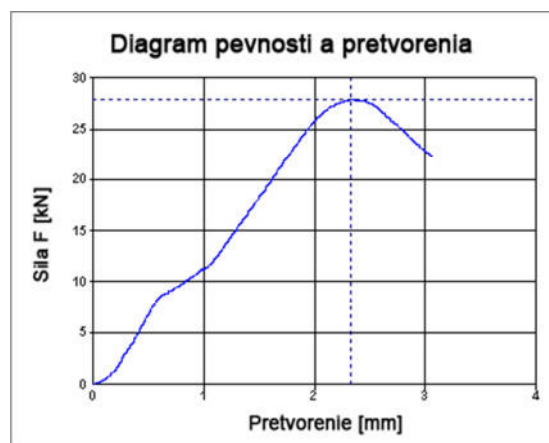
$A_{10,1}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$



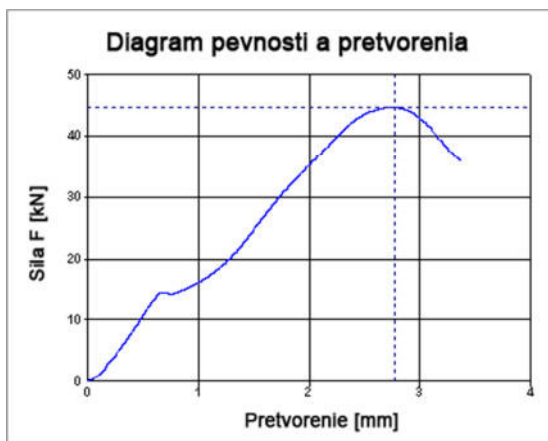
$A_{9,2}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



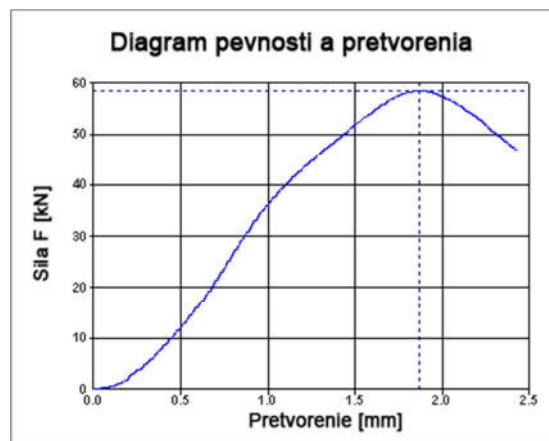
$A_{10,2}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$



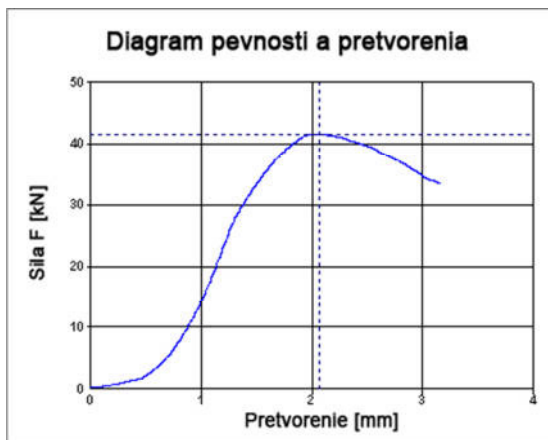
$A_{9,3}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



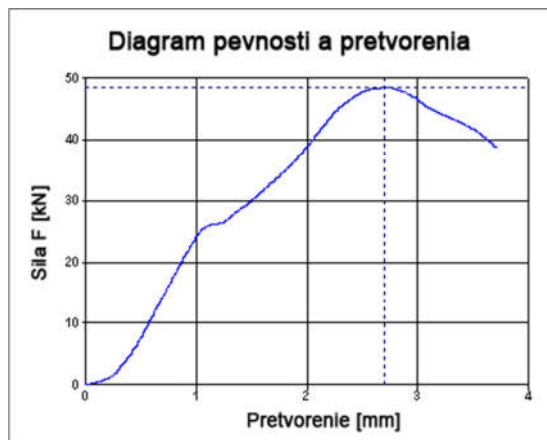
$A_{10,3}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$



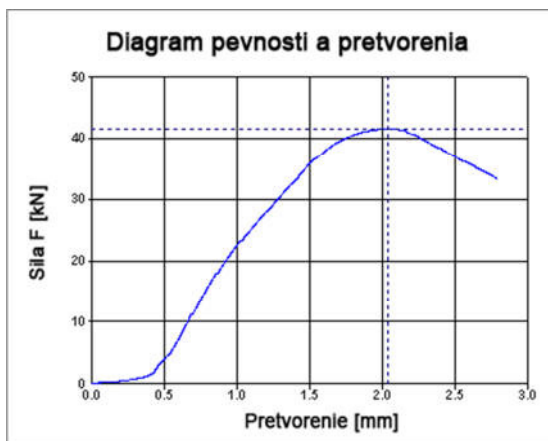
$A_{11.1}$ – Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$



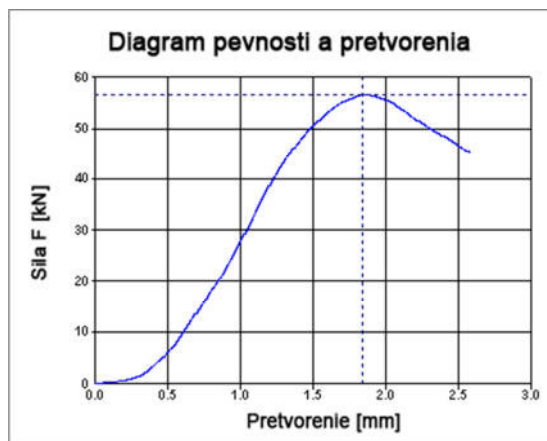
$A_{12.1}$ – Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$



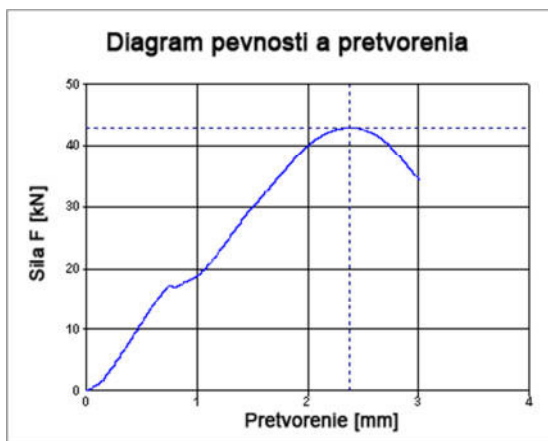
$A_{11.2}$ – Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$



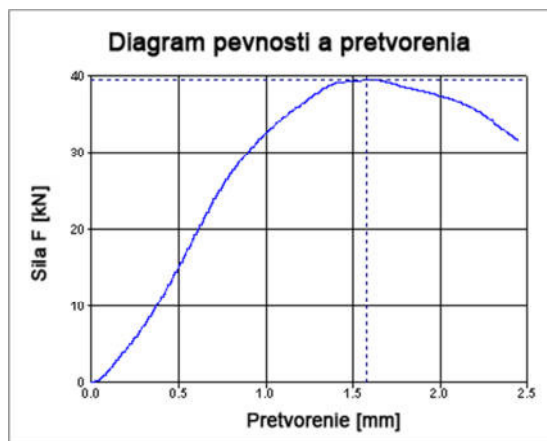
$A_{12.2}$ – Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$



$A_{11.3}$ – Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$

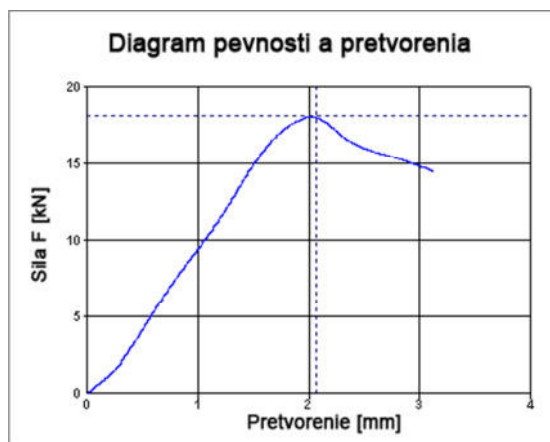


$A_{12.3}$ – Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$

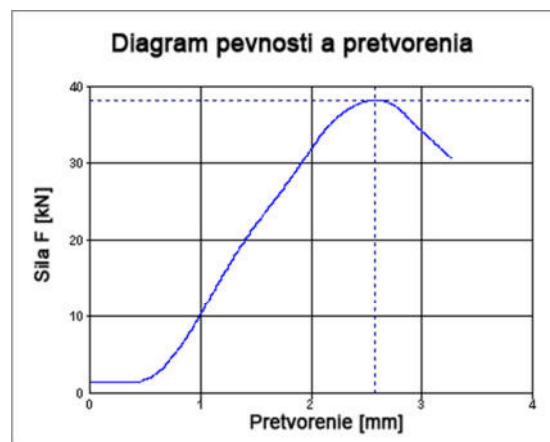


B - Diagramy pevností v prostom tlaku po mrazových cykloch

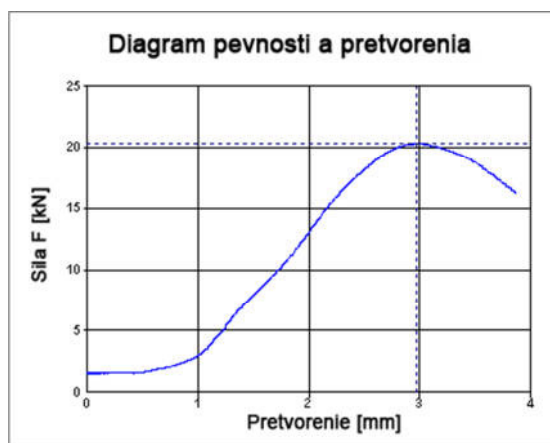
B_{1.1} – Cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



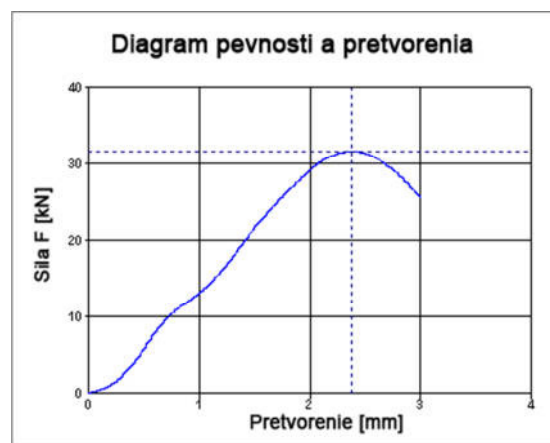
B_{2.1} – Cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



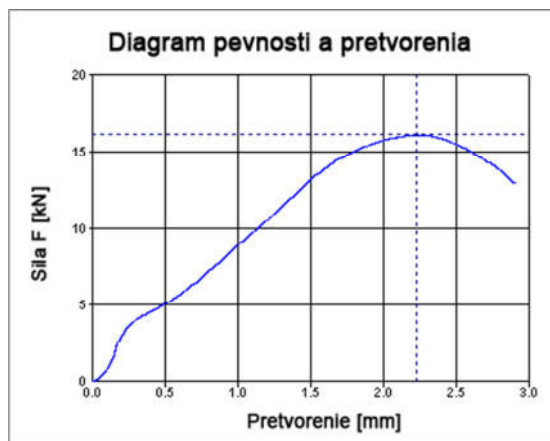
B_{1.2} – Cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



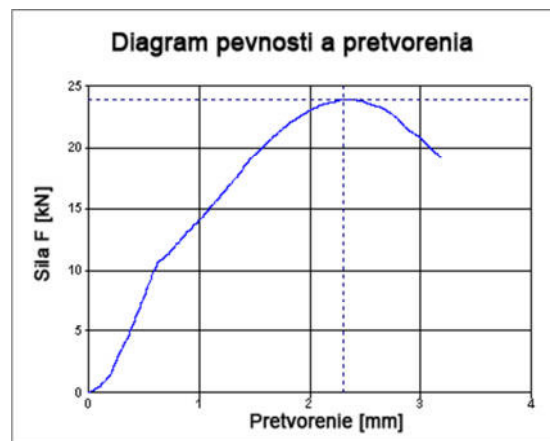
B_{2.2} – Cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



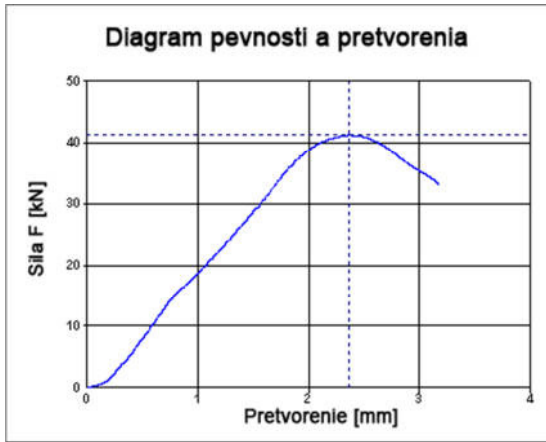
B_{1.3} – Cement 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



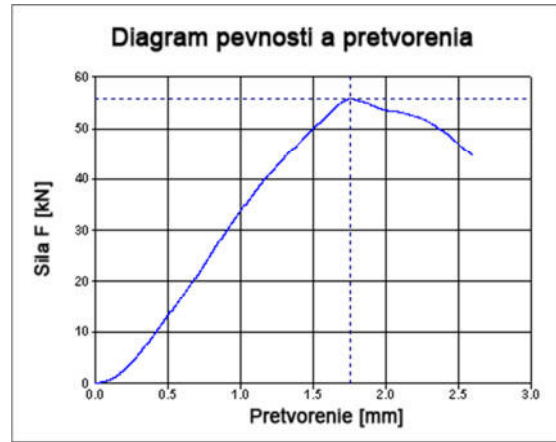
B_{2.3} – Cement 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



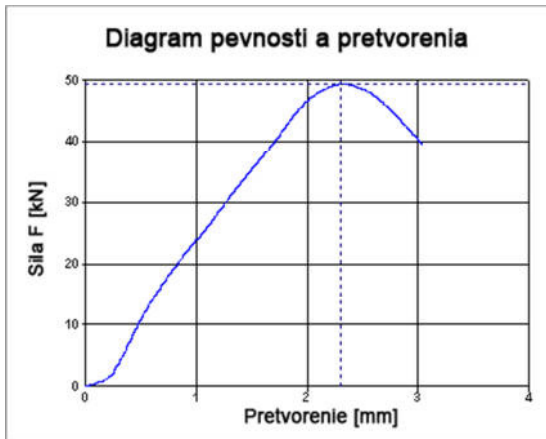
B_{3.1} – Cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



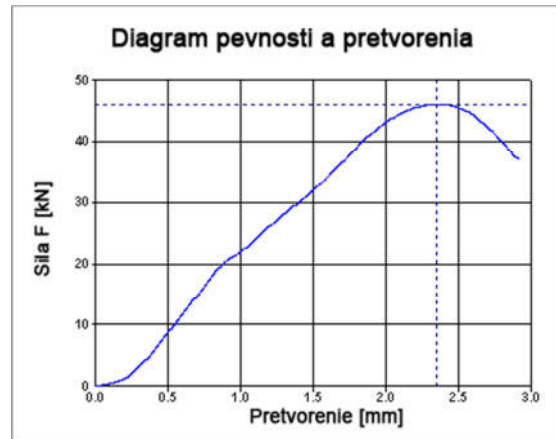
B_{4.1} – Cement 8%, $w_{opt} = 10\%$



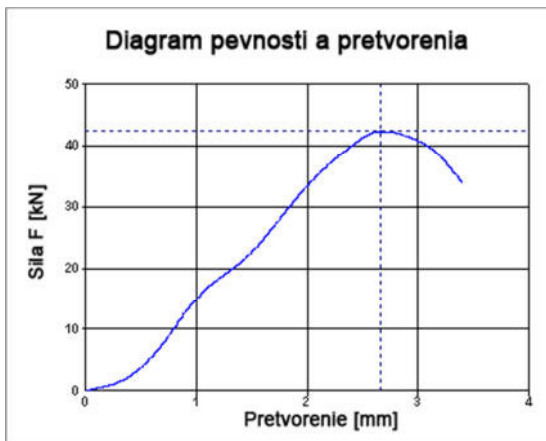
B_{3.2} – Cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



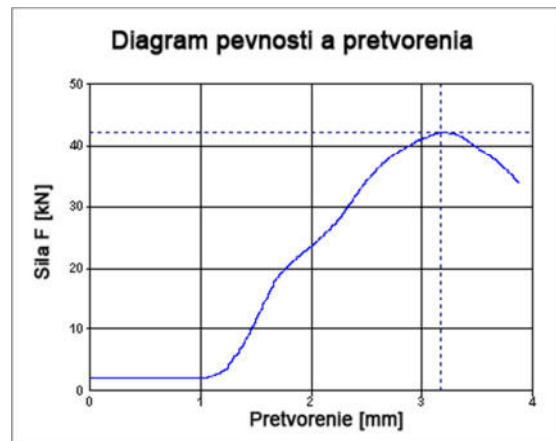
B_{4.2} – Cement 8%, $w_{opt} = 10\%$



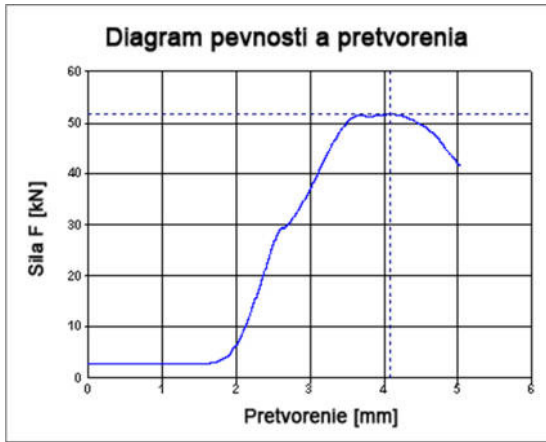
B_{3.3} – Cement 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



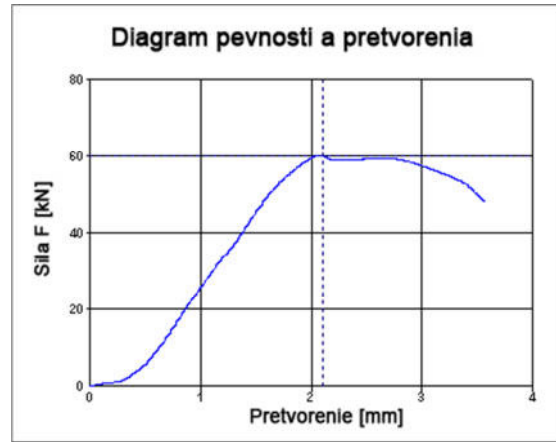
B_{4.3} – Cement 8%, $w_{opt} = 10\%$



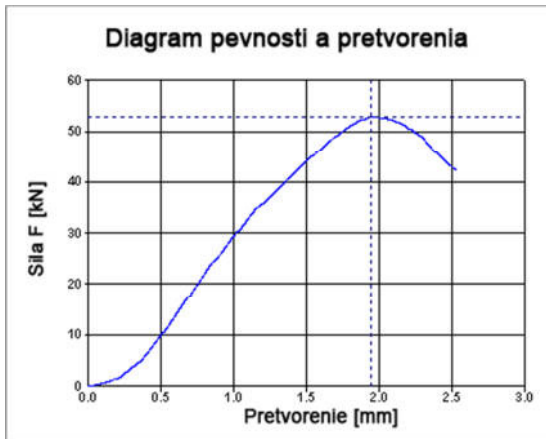
B_{5.1} – Cement 10%, $w_{opt} = 10\%$



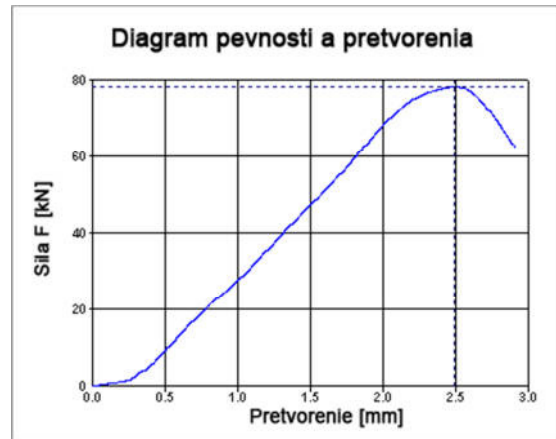
B_{6.1} – Cement 12%, $w_{opt} = 10\%$



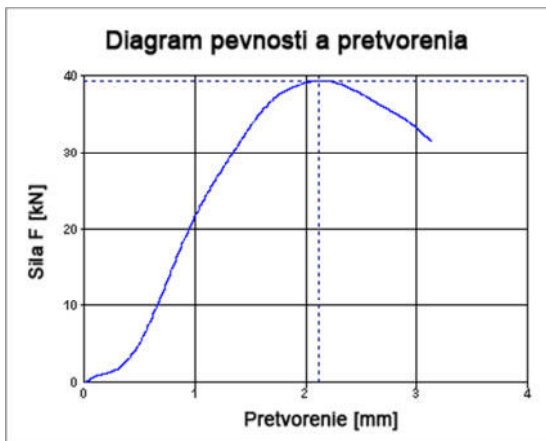
B_{5.2} – Cement 10%, $w_{opt} = 10\%$



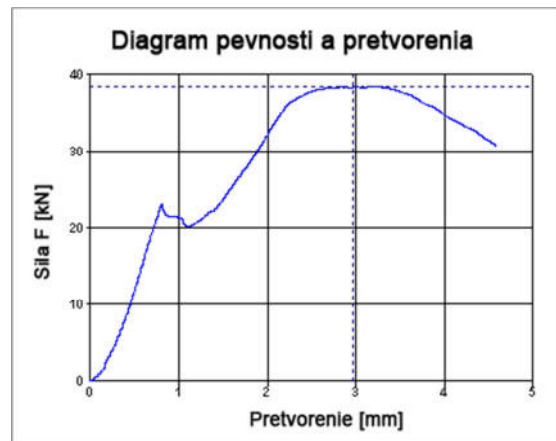
B_{6.2} – Cement 12%, $w_{opt} = 10\%$



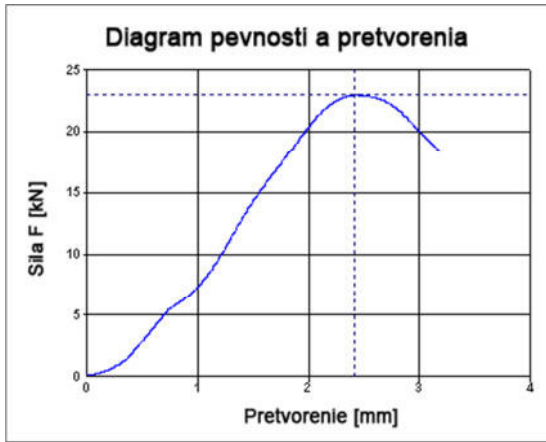
B_{5.3} – Cement 10%, $w_{opt} = 10\%$



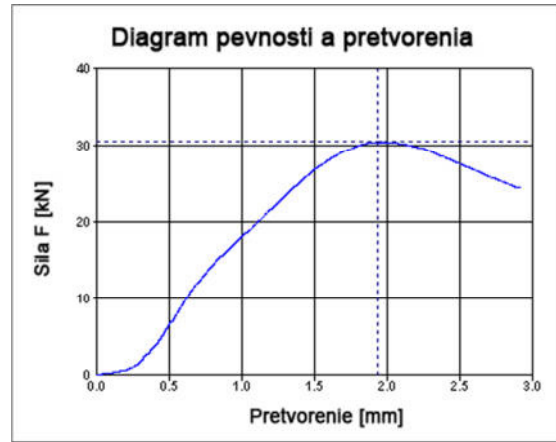
B_{6.3} – Cement 12%, $w_{opt} = 10\%$



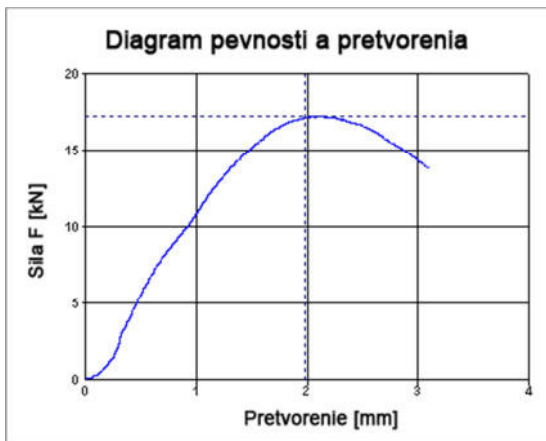
B_{7.1} – Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



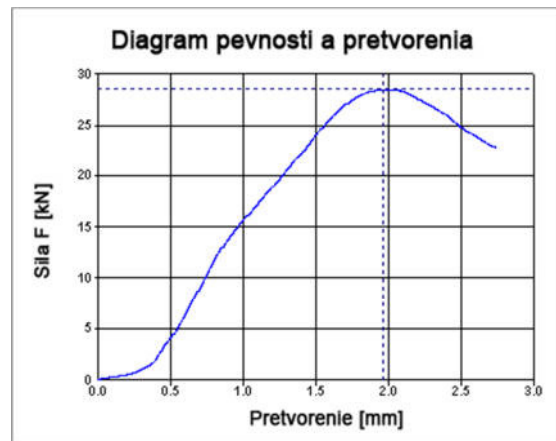
B_{8.1} – Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



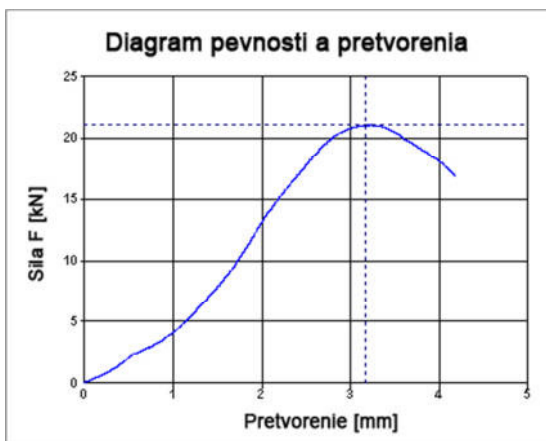
B_{7.2} – Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



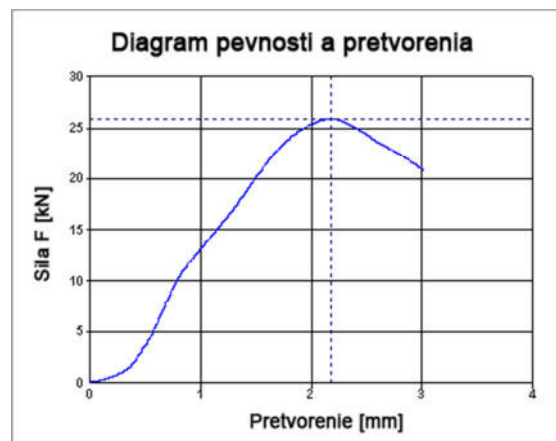
B_{8.2} – Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



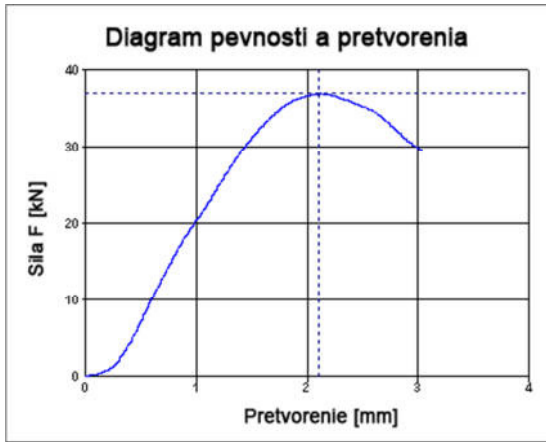
B_{7.3} – Doroport TB 25 4%, $w_{opt} = 6,5\%$



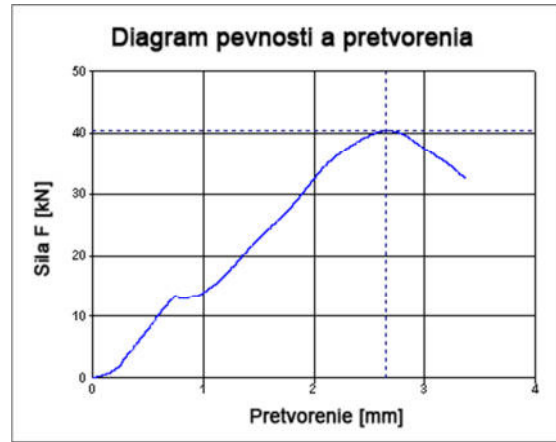
B_{8.3} – Doroport TB 25 6%, $w_{opt} = 6,5\%$



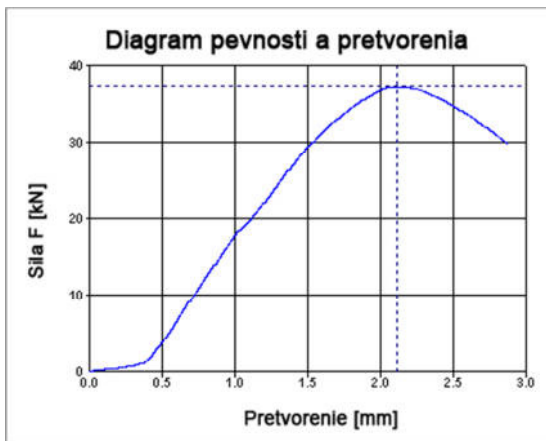
$B_{9,1}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



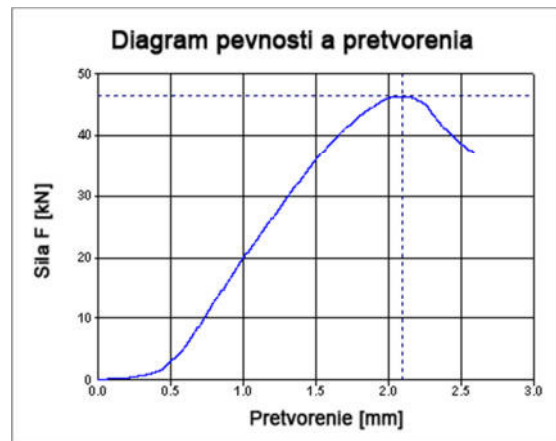
$B_{10,1}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$



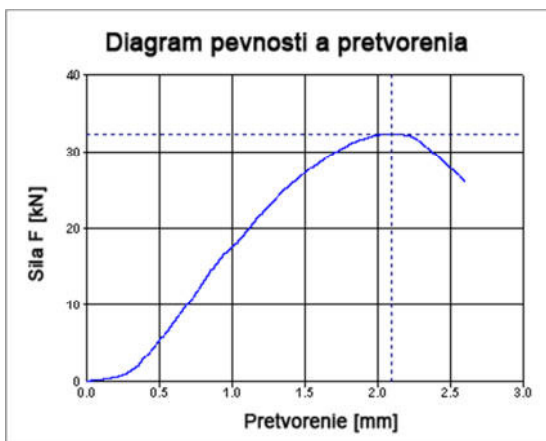
$B_{9,2}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



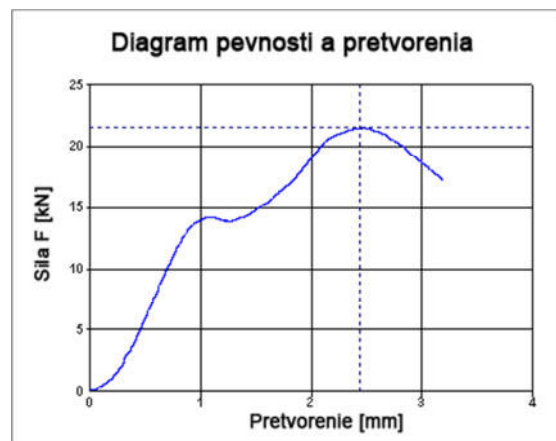
$B_{10,2}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$



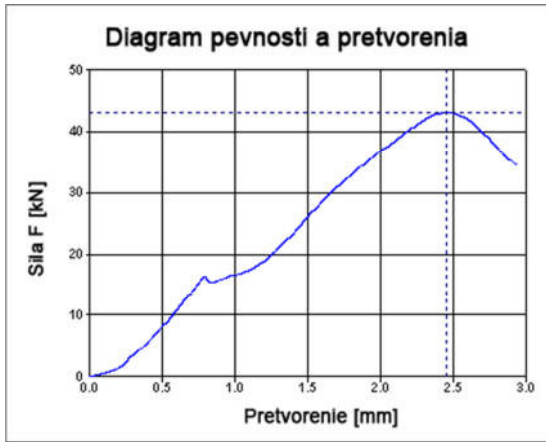
$B_{9,3}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 6,5\%$



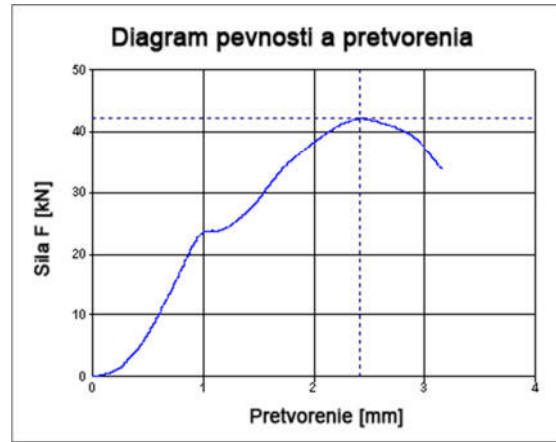
$B_{10,3}$ – Doroport TB 25 8%, $w_{opt} = 9,5\%$



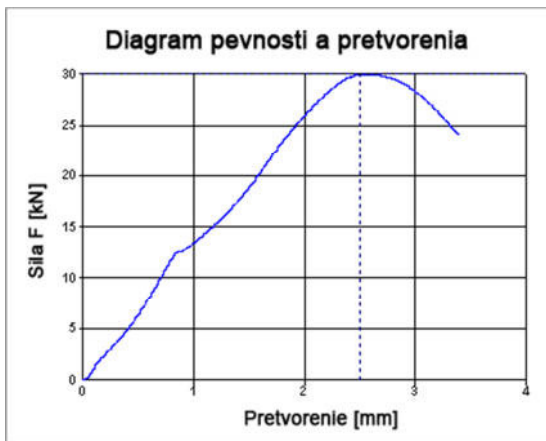
B_{11.1} – Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$



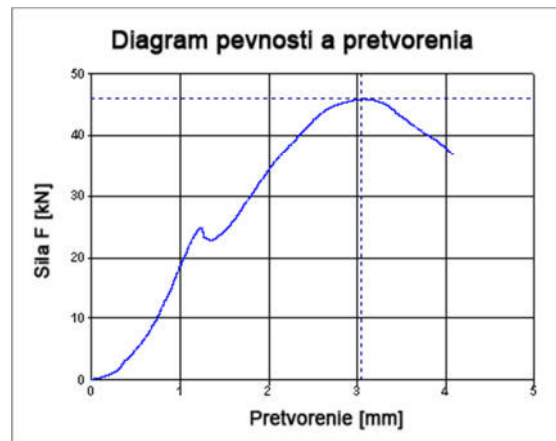
B_{12.1} – Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$



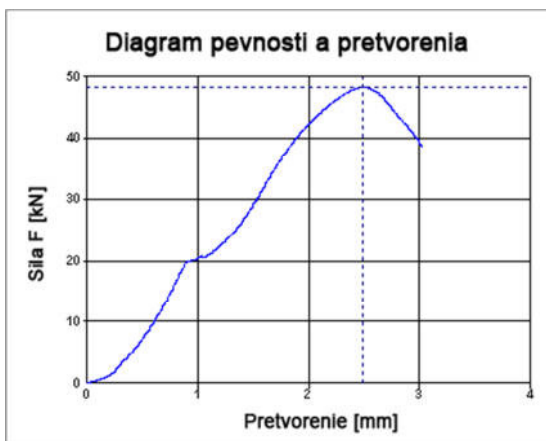
B_{11.2} – Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$



B_{12.2} – Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$



B_{11.3} – Doroport TB 25 10%, $w_{opt} = 9,5\%$



B_{12.3} – Doroport TB 25 12%, $w_{opt} = 9,5\%$

