



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# TECHNOLOGIE ANORGANICKÝCH SAMOTVRDNOUCÍCH POJIVOVÝCH SYSTÉMŮ (GEOPOL)

TECHNOLOGY OF INORGANIC SELF-HARDENING BINDER SYSTEMS (GEOPOL)

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Helešic

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.

BRNO 2022

## Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jan Helešic</b>
Studijní program:	Slévárenská technologie
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Vítězslav Pernica, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2021/22

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

### **Technologie anorganických samotvrdnoucích pojivových systémů (GEOPOL)**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Anorganické slévárenské pojivo s názvem GEOPOL® je určeno ke snížení hladiny exhalací a zápachu při výrobě jader a odlitků s minimálním dopadem na životní prostředí. Při výrobě odlitků s tímto systémem pojiva je možné získat až 90 % ostřiva zpět do výroby. Pojivový systém vyhovuje rovněž pro odlévání všech typů slitin. Vytváří tak čistší a udržitelnější prostředí ve slévárně, což je v dnešní době jeden z požadavků na lepší ekologii a hygienu v průmyslové výrobě litých součástí. Úkolem diplomové práce bude optimalizovat nastavení formovací směsi s geopolymerním systémem v podmínkách školní slévárny VUT Brno.

#### **Cíle diplomové práce:**

- literární rozbor se zaměřením na anorganická pojiva, zejména pojivového systému s označením GEOPOL.
- připravit sérii laboratorních vzorků zastupující různé procentuální zastoupení regenerovaného ostřiva z mechanické otírky (školní slév.) a vzorky vyhodnotit.
- připravit vzorky z provozu školní slévárny a vyhodnotit je.
- diskuze výsledků.
- doporučení optimálního nastavení kontinuálního mísiče pro provoz školní slévárny VUT.

#### **Seznam doporučené literatury:**

JELÍNEK, P. Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv). Ostrava: P. Jelínek, 2004, 241 s. ISBN 80-239-2188-6.

BURIAN, A., P. ANTOŠ, M. KAJZAROVÁ, J. NOVOTNÝ, M. HRAZDĚNA a M. VYKOUKAL. Geopolymerní pojivový systém. Slévárenství. 2006, roč. 14, č. 12, s. 468 - 469. ISSN 0037-6825.

BURIAN, A., M. KAJZAROVÁ, J. NOVOTNÝ, M. HRAZDĚNA, P. FRAJKOR. Slévárenské formovací směsi s geopolymerním pojivovým systémem pro vytvrzování CO<sub>2</sub>. Slévárenství. 2006, č. 1. ISSN 0037-6825.

VYKOUKAL, M., A. BURIAN, M. PŘEROVSKÁ. Anorganické pojivové systémy v historii, v současnosti a budoucnosti. Slévárenství [online]. 65(11-12), 361-374 [cit. 2021-10-19]. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/ICvnJcBvR4AMzoSy>

HOLTZER, M., S. ŽYMANKOWSKA-KUMON, R. DAŇKO, A. KMITA. Elution of Mixed Moulding Sands with the GEOPOL Binder and Core Sands with the Phenolic Resin. Archives of Foundry Engineering [online]. 2013, 13(4), 53-56 [cit. 2021-10-19]. ISSN 1897-3310. Dostupné z: doi:10.2478/afe-2013-0081

POLZIN, H. Inorganic binders: for mould and core production in the foundry. Berlin: Schiele & Schön, 2014, 336 s. ISBN 978-37-949-0894-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je optimalizace formovací směsi s geopolymerním pojivem v provozu školní slévárny na fakultě strojní VUT v Brně. Prvním krokem je ověření chování směsi pro různá dávkování pojiva, tvrdidla a různé poměry nového písku a regenerátu. Je provedena celá řada zkoušek např. granulometrie, chemická povaha ostřiva, obsah spalitelných a vyplavitelných látek a pevnostní vlastnosti směsí ad. V druhé části práce je provedena zkouška formovacích směsí pro vybraná nastavení přímo v provozu školní slévárny a výsledky se poté srovnávají s laboratorním měřením. Výstupem práce je návodka obsahující doporučené nastavení mísiče v provozu školní slévárny.

### **Klíčová slova**

ostřivo, pojivo, tvrdidlo, GEOPOL, formování, zpracovatelnost, pevnost, geopolymer

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is focused on optimization the molding compound with a geopolymer binder in the operation of a school foundry at the Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology. The first step is to verify the behavior of the mixture for different dosages of binder, hardener and different ratios of new sand and regenerate. A number of tests are performed, eg granulometry, chemical nature of the sand, content of combustible and leachable substances and strength properties of mixtures, etc. In the second part of the work, a test of molding compounds is performed for selected settings directly in the operation of the school foundry and the results are then compared with laboratory measurements. The output of the work is a manual containing the recommended mixer settings in the operation of the school foundry.

### **Key words**

sand, binder, hardener, GEOPOL, molding, workability, strength, geopolymer

---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HELEŠIC, Jan. *Technologie anorganických samotvrdnoucích pojivových systémů (GEOPOL)* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140470>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vítězslav Pernica.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologie anorganických samotvrdnoucích pojivových systémů (GEOPOL) vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

místo, datum

---

Jan Helešic

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Vítězslavu Pernicovi Ph.D. za projevenou důvěru, cenné připomínky, rady, ochotu a vstřícný přístup při zpracování mé diplomové práce. Děkuji také laborantům firmy SANDTEAM s.r.o. a FORMSERVIS, spol. s.r.o., za věcné připomínky při zpracování experimentální části. Jako poslední bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu a trpělivost napříč celým studiem.

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	9
1 FORMOVACÍ SMĚSI .....	10
2 OSTŘIVO .....	11
2.1 Křemenné ostřívo .....	11
2.2 Nevýhody křemenných ostřiv .....	12
2.3 Nekřemenná ostřiva .....	13
3 POJIVO .....	18
3.1 Směsi I. Generace .....	18
3.2 Směsi II. generace .....	19
3.2.1 Organické pojivové systémy .....	19
3.2.2 Anorganické pojivové systémy .....	22
3.2.3 Geopolymery .....	24
3.3 Směsi III. generace .....	32
3.3.1 Vakuová forma .....	32
3.3.2 Magnetická forma – metoda Wittmoser .....	33
3.3.3 EFF - SET .....	33
3.4 Směsi IV. generace .....	34
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	35
4.1 Laboratorní testy .....	36
4.1.1 Stanovení vyplavitelných látek .....	36
4.1.2 Granulometrická skladba ostřiva .....	38
4.1.3 Hodnocení zrn ostřiva .....	41
4.1.4 Obsah spalitelných látek .....	43
4.1.5 pH vodného výluhu .....	45
4.1.6 Elektrická vodivost vodného výluhu .....	45
4.1.7 Stanovení pevnosti v ohybu .....	47
4.1.8 Zpracovatelnost – životnost (manipulační pevnost) .....	55
4.2 Provozní testy .....	59
4.2.1 Kontrola a nastavení mísiče .....	59
4.2.2 Pevnost v ohybu v provozu školní slévárny .....	63



4.2.3 Zpracovatelnost v provozu školní slévárny .....	68
5 TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ .....	70
ZÁVĚR.....	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	73
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	76
SEZNAM PŘÍLOH.....	77

---

## ÚVOD

Slévárství je jedna ze základních technologií zpracovávající kov, která má více jak tisíciletou historii. Tento nezastupitelný obor je velmi komplexní a přesto, že obecně patří mezi nejstarší technologie, stále se vyvíjí. K odlévání kovu jsou potřebné dvě základní věci – roztavený kov a forma, která je jakýmsi nástrojem pro vytvoření tuhého kovového produktu o daném tvaru. Tyto formy mohou být trvalé nebo netrvalé. Nejvyužívanějšími formami pro konvenční slévárství jsou ty netrvalé, které se vyrábí z různých formovacích směsí. Jedna z nich je předmětem této práce.

K výrobě formovací směsi zde zkoumané je zapotřebí tříložkový systém – ostřívo, pojivo a tvrdidlo. Tyto složky ve správném poměru a smícháním ve správném zařízení mají za následek vytvoření směsi s dobrou tekutostí, rychlým nárůstem pevnosti a vytvořením kvalitního a hladkého povrchu, který velmi dobře kopíruje model.

Firma SANDTEAM s.r.o, přišla s technologií GEOPOL jako reakcí na stále se zvyšující ekologické požadavky. Formovací směs s geopolymerním pojivem je ekologická varianta k vodnímu sklu s výrazně lepší rozpadavostí. Životní a pracovní prostředí je velké téma v jakémkoliv průmyslu. Pokud je to možné, měla by se každá firma či podnik snažit co nejvíce snížit svou ekologickou stopu a také dbát na bezpečí a zdraví svých zaměstnanců.

## 1 FORMOVACÍ SMĚSI

Formovací směsi jsou jedním ze základních prvků slévárenské technologie. Díky nim získává odlitek požadovaný tvar, vlastnosti a další důležité znaky. Jedná se o disperzní systém, tvořený dvěma základními složkami – ostřivem a pojivem. Ve většině případů obsahuje formovací směs třetí složku – přísadu, která se liší dle použité technologie a zlepšuje vlastnosti směsi. [1; 2]

Formovací směsi, se využívají na výrobu tzv. netrvalých forem. Jedná se o formy, které se po odlití rozbijí. Ze směsí lze také vyrábět jádra. Formy lze obecně rozdělit na [1; 2]:

- Trvalé (kokily) – kovové formy vhodné pro velké série odlitků (desítky až stovky tisíc). Využívají se pro gravitační odlévání nebo při lití za zvýšených sil pro tvarově velmi složité odlitky s vnitřními dutinami. Vyrábějí se nejčastěji obráběním kovového bloku.
- Polotrvalé (kombinované) – keramické formy pro malé série. Lze odlévat více než jeden kus, ale nemají tak velkou životnost jako formy kovové.
- Netrvalé (jednorázové) – pouze na jedno použití. Po odlití dochází k rozbití formy. Umožňují nejuniverzálnější výrobu.

Netrvalé formy mají stále největší zastoupení ve slévárenském provozu převážně z ekonomického a technologicky dostupného hlediska. V praxi je snaha o přiblížení se k ideální směsi. Ideální formovací směs by měla splňovat následující požadavky, které lze označit za technologické vlastnosti [3]:

- nízké náklady
- rozměrová stálost
- pevnost
- prodyšnost
- viskozita
- schopnost regenerace

Další dělení směsí je možné z hlediska použití. Modelová formovací směs se využívá jako nejkvalitnější směs přímo na model a je v přímém kontaktu s taveninou po odlití. Výplňová směs zabírá zbytek prostoru formy a nejsou na ni kladeny takové požadavky jako na směs modelovou. Jádrová směs slouží k výrobě jader. Zde jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu a jakost směsi, jelikož je jádro velmi tepelně namáháno a musí odolávat pronikání taveniny mezi póry. U všech druhů použití je kladen požadavek na dobrou rozpadavost po odlití. [2; 4]

U formovacích směsí je také důležité sledovat fyzikální vlastnosti [2]:

- Tepelná vodivost  $\gamma$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]: schopnost látky vést, přenášet teplo. U formovací směsi tato veličina ovlivňuje zabíhavost a průběh krystalizace. Největší vliv na tepelnou vodivost má typ ostřiva.
- Teplotní roztažnost  $\alpha$  [ $\text{K}^{-1}$ ]: jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla změní objem tělesa. Tato vlastnost ovlivňuje konečnou rozměrovou přesnost odlitku.
- Tepelná akumulace  $c$  [ $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ]: schopnost formy odvádět teplo z odlitku.
- Hustota směs  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]: faktor ovlivňující pevnost, prodyšnost atd.

## 2 OSTŘIVO

Ostřivo je hlavní složkou formovací a jádrové směsi tvořící až 98 % hmotnosti. Jedná se o zrnitý, žáruvzdorný materiál s velikostí zrn větší než 0,02 mm. Zrna menší než 0,02 mm se nazývají plavitelné podíly a může se jednat o křemenný prach, jíl, neplastické částice, živec a jiné. [2; 5]

Nejdůležitější vlastnosti ostřiva hned vedle aktivity povrchu zrna je granulometrie a hranatost zrn. Tyto dvě vlastnosti mají přímý vliv na prodyšnost, propustnost, objemovou hmotnost, tepelnou dilataci a vodivost. Vedle tohoto rozdělení také záleží na chemické povaze ostřiva [5]:

- kyselá (křemenné písky)
- neutrální (korund, šamot, chromit, zirkon)
- zásaditá (magnesit, olivín)

Při volbě ostřiva se vychází z kritérií, které určují jeho použití. Například při odlévání ocelí s křemíkem jako legujícím prvkem nelze použít bazická ostřiva, naopak zásadité přísady reagují s kyselým ostřivem. V obou případech vnikají sloučeniny s nižší žáruvzdorností a zapečeniny na povrchu odlitků. Proto se jeví jako vhodné použití neutrálních ostřiv, ale ta jsou zase limitována cenou a dostupností. Roli hraje také tvarová složitost odlitku, druh pojivové soustavy, a především ekonomická dostupnost. Poslední kritérium je důvod, proč jsou křemenné písky nejpoužívanějším ostřivem ve slévárnách. [5]

### 2.1 Křemenné ostřivo

Hlavním minerálem je křemen ( $\text{SiO}_2$ ), jenž je druhým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Krystalizuje v trigonálně trapezodrické soustavě nazývané beta-křemen. Vhodný křemenný písek pro formovací směsi musí být: [1; 5]

- vysoce pravidelný (jednotné vlastnosti)
- málo hranatý (čím menší povrch, tím menší spotřeba pojiva, nevýhodou je náchylnost ke změnám teplot)
- s vysoce aktivním povrchem (čistý, bez povlaků a nalepených částic)
- vysoce mineralogicky čistý ( $\text{SiO}_2 > 96\%$ )
- s minimální koncentrací jemných podílů.
- s nízkým obsahem živců (nízký bod tavení a snížení teploty spékání písků)
- s ideální velikostí zrn (min 0,1 mm max 0,5-0,6)

Česká republika má velmi bohaté zásoby křemenného písku různé kvality. Ty nejdůležitější lze rozdělit do čtyř skupin.

Písky křídového stáří, které jsou velmi málo znečištěné jílovými minerály. Obsahují malé procento plavitelných podílů (pod 0,5 %). Písky jsou prakticky bez živců a jsou vhodné pro slévárny ocelových odlitků. Jsou mineralogicky a chemicky velmi čisté. Mezi nejznámější naleziště patří Provodín, Střeleč a Srní. [5]

Písky moravské křídové tabule jsou tvarově podobné pískům české křídové tabule. Nejsou tak mineralogicky a chemicky čisté a obsah živců nepřekračuje 1 %. I tyto písky jsou vhodné pro ocelové odlitky. Nejznámější ložiska jsou v Dolní Lhotě, Boskovicích. Další naleziště se nachází ve Svitavách, zdejší písek obsahuje větší množství živců (3,5 %), a proto není vhodný pro ocelové odlitky. [5]

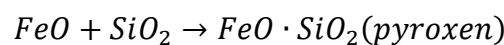
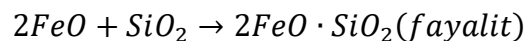
Váté písky mají vysokou kulatost způsobenou erozí při vzdušném a vodním transportu ze vzdálených míst. Ostatní vlastnosti závisí na daném místě. Šajdíkovy Humence se vyznačují nízkým obsahem plavitelných látek, ale větším množstvím živců (8 až 10 %), a proto nejsou vhodné pro ocelové odlitky. Jedná se o nejpoužívanější písek v ČR pro slévárny šedé litiny. [5]

Odpadní písky po plavení kaolinu patří mezi méně kvalitní písky. Obsahují více vyplavitelných podílů, mají menší chemickou čistotu a častokrát jsou velice porézní. Ovšem i tyto písky mají své místo v Českých slévárnách s furanovou směsí a skořepinami. [5]

## 2.2 Nevýhody křemenných ostřiv

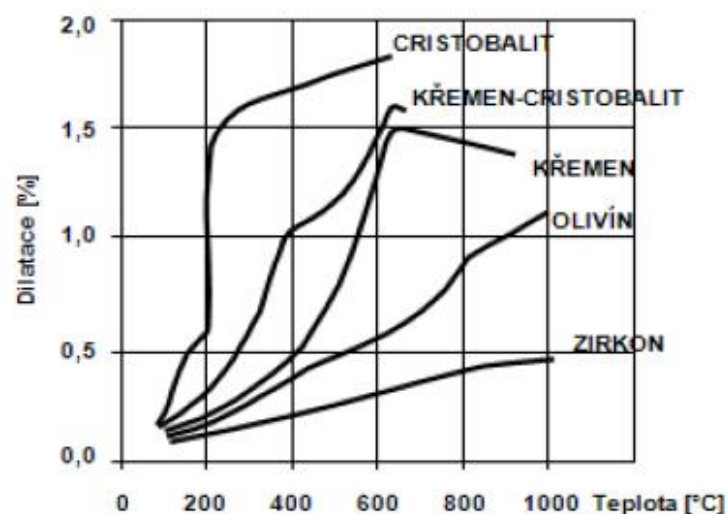
I když jsou křemenná ostřiva nejpoužívanější, řadí se k nim poměrně velké množství nevýhod jako je zvýšená reaktivnost, neplynulá tepelná dilatace, cristobalická expanze a silikóza. Tyto nevýhody pobízejí k využívání nekřemenných nebo umělých ostřiv. [3; 5]

Křemenná ostřiva jsou kyselá a za vyšších teplot dochází k reakci se zásaditými látkami za vzniku sloučenin (komplexních oxidů) s nižší teplotou tavení než železo. Tyto oxidy se nazývají fayalit (vznik při teplotách 1185 až 1205 °C) a pyroxen. [5]



Zapečeniny jsou způsobeny právě fayalitem, jelikož dochází k penetraci kovu do formy. U odlévání legovaných nebo masivních ocelových odlitků je snaha o náhradu křemenného ostřiva za ostřiva jiné chemické povahy s vyšší žáruvzdorností. [5]

Dalším nežádoucím vlivem je neplynulá tepelná dilatace, která je způsobena modifikačními změnami SiO<sub>2</sub>. Pod teplotami 700 °C dochází k vratné přeměně β↔α SiO<sub>2</sub> (573,1 – 573,2 °C).



Obr. 1 Tepelná dilatace různých druhů ostřiv [5]

Jedná se o rychlou změnu s objemovým zvětšením až 4 %. Dochází zde k nárůstu napětí a dilataci zrn, což způsobuje mikrodilataci formy. Častým jevem je vznik zálupů, výronků a zadrobenin. [5]

Při teplotách nad 900-1000 °C dochází k trvalé expanzi směsi a vzniku cristobalitu. Jedná se o přeměnu  $\alpha$  SiO<sub>2</sub> →  $\alpha$  cristobalit doprovázenou změnou krystalické mřížky z hexagonální na krychlovou. Změna je nevratná a s rostoucím tepelným namáháním, např. u jader, dochází k rychlejší a vyšší expanzi. Poté není zaručená rozměrová a tvarová přesnost odlitků. Cristobalitickou expanzi lze zmírnit přidáním bauxitu, jílu a oxidů železa, jež zvyšuje teplotu expanze nad teplotu formy či jádra. Při teplotách nad 1400 °C může docházet až k 15 % objemovém zvětšení. [2; 5]

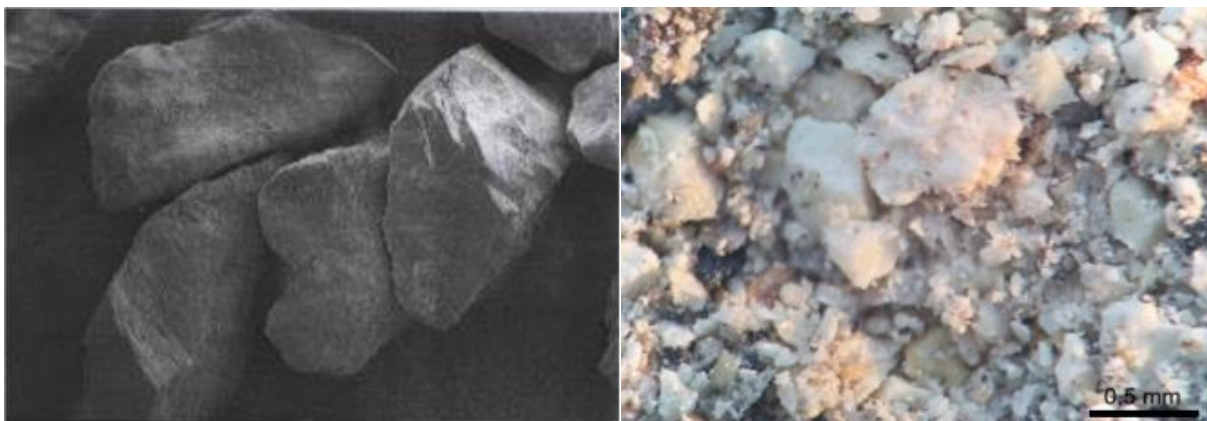
S křemenným pískem se pojí nemoc silikóza. Jedná se o vážné plicní onemocnění, které je způsobeno zanesením plic křemenným prachem s velikostí částic 0,0002 – 0,0003 mm. Tyto částice nelze z plic nijak odstranit a jedná se o dodnes nevyléčitelnou nemoc. I přes zpřísnující se hygienické normy je tato nemoc stále hrozbou. [5]

### 2.3 Nekřemenná ostřiva

Výše uvedené nevýhody podněcují využívání nekřemenných ostřiv, i když jsou obecně dražší než ostřiva křemenná. Hlavní výhody spočívají v níže uvedených vlastnostech.

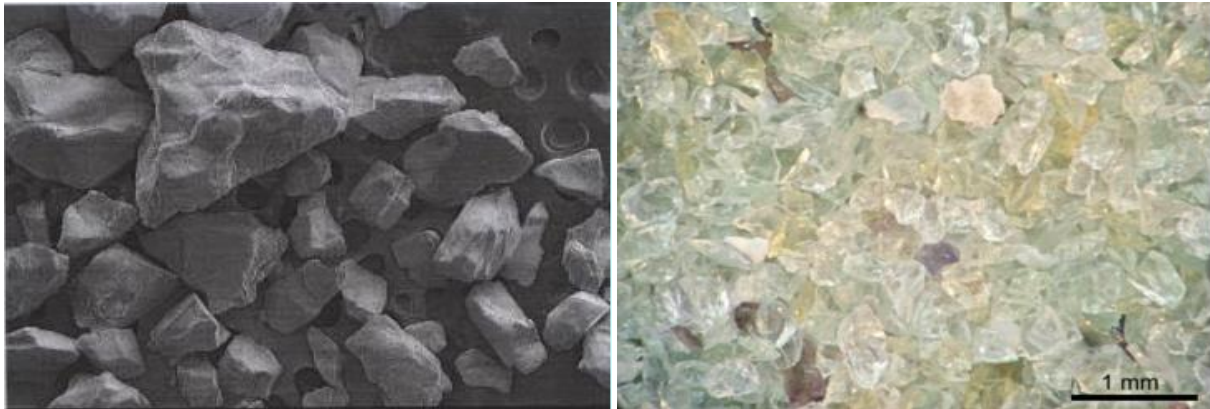
Nižší a lineární tepelná dilatace, což způsobuje vyšší rozměrovou přesnost. Lepší tepelná vodivost, která zlepšuje ochlazovací účinek formy a zmírňuje vznik zapečenin. Častokrát je snížena spotřeba pojiva a může dojít ke zlepšení hygienických podmínek. Největší výhodou je ovšem ve vyšší žáruvzdornosti a tepelné stabilitě, která zvyšuje jakost odlitků a zlepšuje rozpadavost po odlití. [5]

**Šamotový lupek** je vysoce žáruvzdorný aluminosilikát (mullit – 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2SiO<sub>2</sub>), který vzniká vypalováním žáruvzdorných břidličnatých jílu (lupků) při teplotách nad 1100 °C. Takto vypálený materiál se drtí a třídí na velikost zrn max. 3-5 mm. Ostřivo je ostrohranné s plynulou tepelnou dilatací, což omezuje vznik zálupů. Nejčastěji se pojí kaolinitickými jíly, vodním sklem a občas také organickými pojivy (fenolické a alkydové pryskyřice). Mají neutrální až slabě kyselý charakter. Bod tavení je 1850 °C. [5; 6]



Obr. 2 Povrch a tvar šamotového lupku [5; 7]

**Olivín** je materiál sopečného původu. Tvoří jej forsterit a fayalit ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). Výhodou je téměř lineární tepelná dilatace nižší než u křemenného ostříva. Nereaguje s MnO a dalšími zásaditými kysličníky a je vhodný pro odlévání austenitických manganových ocelí. Pojí se vodním sklem, cementy i oleji. Nevýhodou je vyšší plynatost než mají křemenná ostřiva. Naleziště se nacházejí v Norsku, USA a Japonsku. Teplota tání je  $1870\text{ }^\circ\text{C}$ . Vyznačuje se vysokou žáruvzdorností. [5; 6]



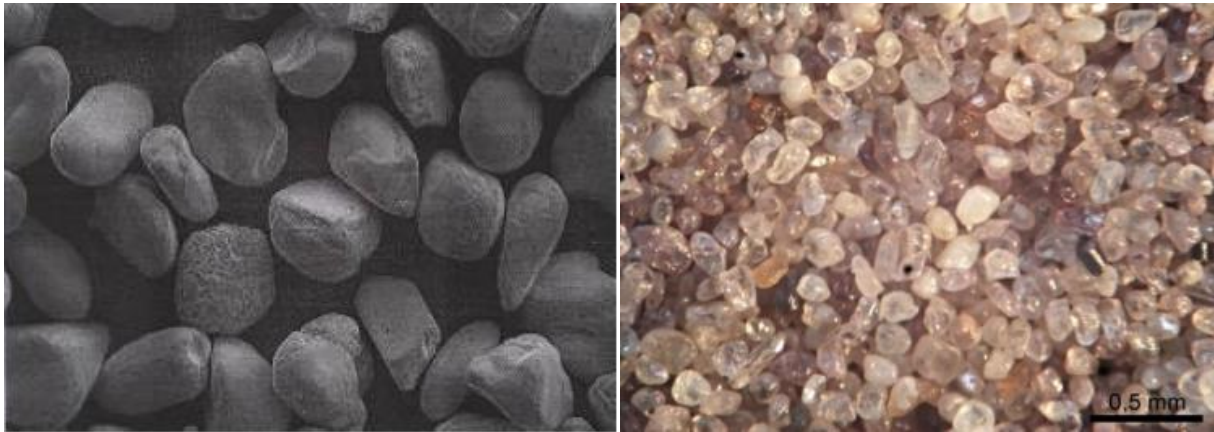
Obr. 3 Tvar a povrch olivínu [5; 7]

**Korund** je vzácný přírodní minerál, ale ve slévárenství se využívá uměle vytvořený elektrokorund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), vyráběný tavením bauxitu nebo jílu bohatých na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . V praxi se využívají dvě modifikace:  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  (alfa-korund), který je stálý a netečný k oxidům Fe. Vzniká při teplotách nad  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  z  $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$  (gama-korund). Teplota tání korundu je  $2050\text{ }^\circ\text{C}$ . Je vysoce žáruvzdorný, objemově stálý a chemicky odolný. Nepříznivá je jeho cena, a proto se využívá převážně jako plnivo do barviv pro těžké ocelové odlitky a namáhaná jádra. [5; 6]



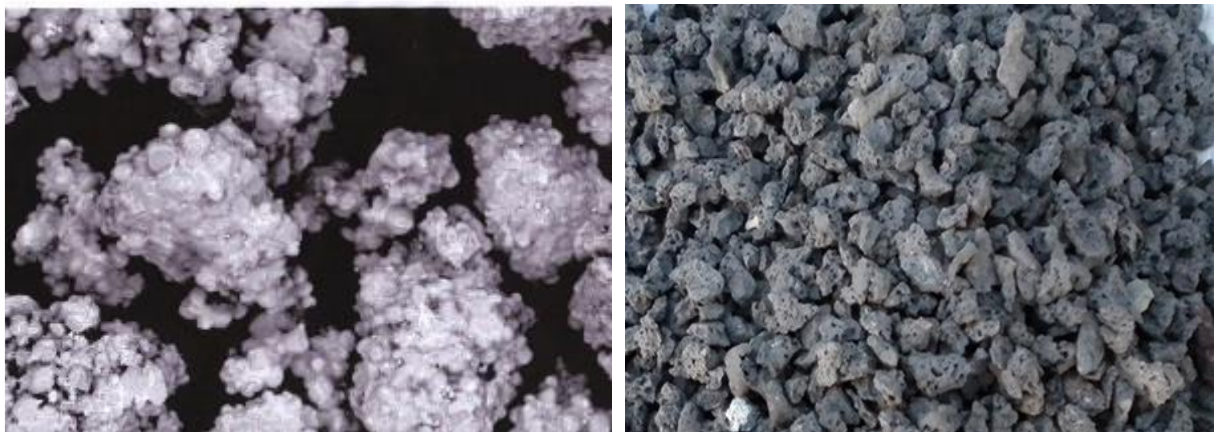
Obr. 4 Tvar a povrch elektrokorundu [5; 8]

**Zirkonsilikát** je název pro zirkonové písky obsahující  $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$  a  $\text{ZrO}_2$ . Oproti křemenným pískům mají lineární tepelnou dilataci, dvojnásobnou tepelnou vodivost a tím i vyšší ochlazovací účinek. Netečnost vůči oxidům Fe dává směsi odolnost proti penetraci a zapékání. Vhodné pro masivní odlitky a tepelně namáhaná jádra. Kvůli vysoké ceně se používá převážně jako plnivo nátěrů, námazků, popřípadě do keramických břecek. Teplota tavení písku je okolo  $1900\text{ }^\circ\text{C}$ . [5; 6]



Obr. 5 Tvar a povrch zirkonsilikátu [5; 7]

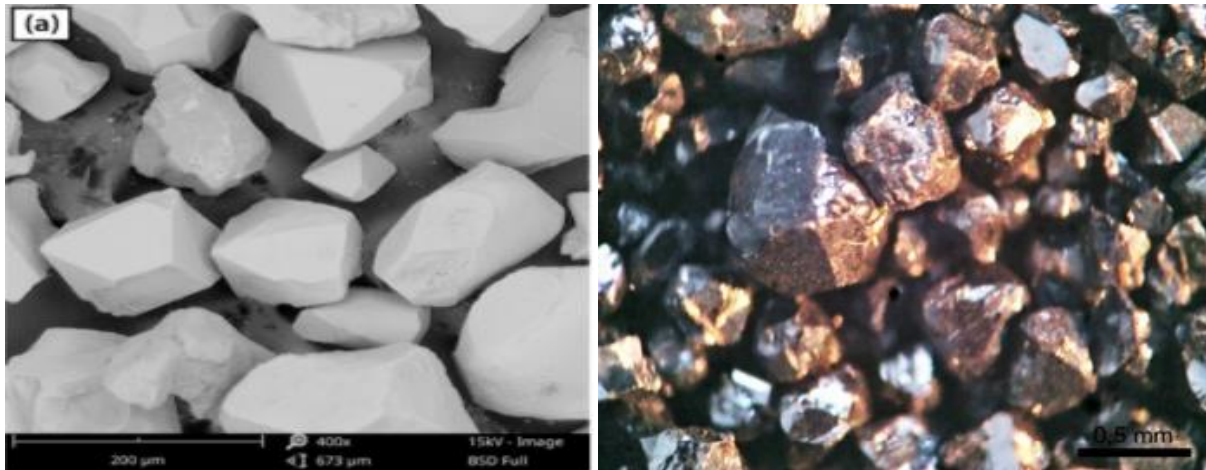
**Magnesitová bazická ostřiva** je souhrnný název pro vratný žáruvzdorný bazický materiál. Patří zde magnesit (85 % MgO), magnesitchrom (60 % MgO, do 20 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a chrommagnesit (40 % MgO, do 35 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Tato ostřiva se vyznačují vysokou tepelnou vodivostí, nízkou teplotní roztažností a odolností proti náhlým změnám teplot. Zdrojem jsou drcené odpadní cihly a tvarovky z magnesitu. Největší uplatnění nachází při pojení s vodním sklem. Nevýhodou je nemožnost pojení s furanovými pryskyřicemi, tvrditelnými kyselými katalyzátory – furany. Tato ostřiva snášejí teplotu nad 2000 °C. [5; 6]



Obr. 6 Tvar a povrch magnesitového ostřiva [5; 9]

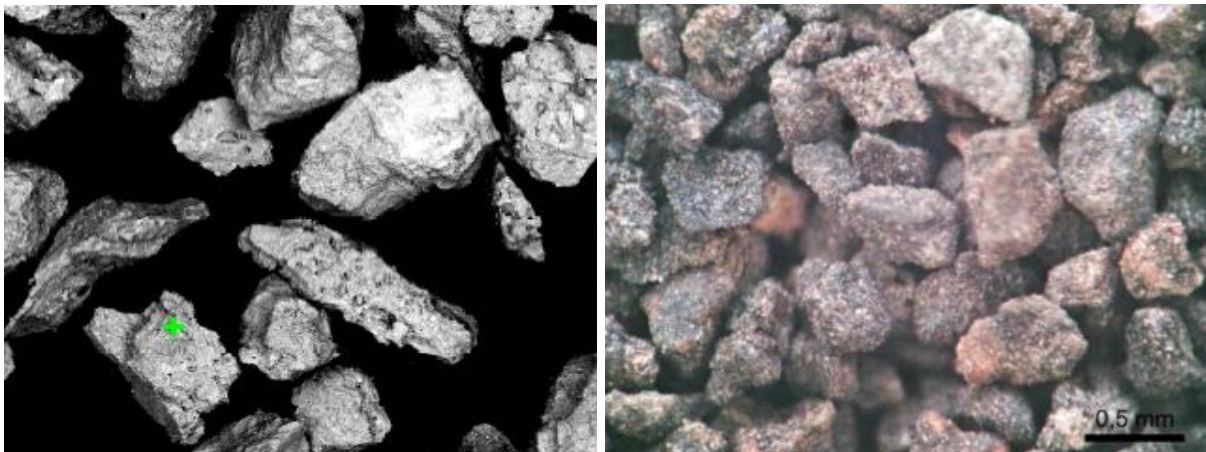
**Chromit** je přírodní minerál, který se dělí na dvě skupiny. Chemický chromit, jenž obsahuje větší množství chromu a s nižším obsahem chromu, ale vyšším obsahem hlíníku – keramický chromit. Pro slévárenské účely se používá převážně keramický chromit (min. 45-48 % Cr). Chromitové ostřivo má typicky černou barvu. Teplota tavení je 2180 °C. Využívá se pro výrobu manganových ocelových odlitků a pojivem je nejčastěji furanová a fenolická pojiva. Ze všech nekřemenných ostřiv má nejvyšší ochlazovací účinek. [5; 6]





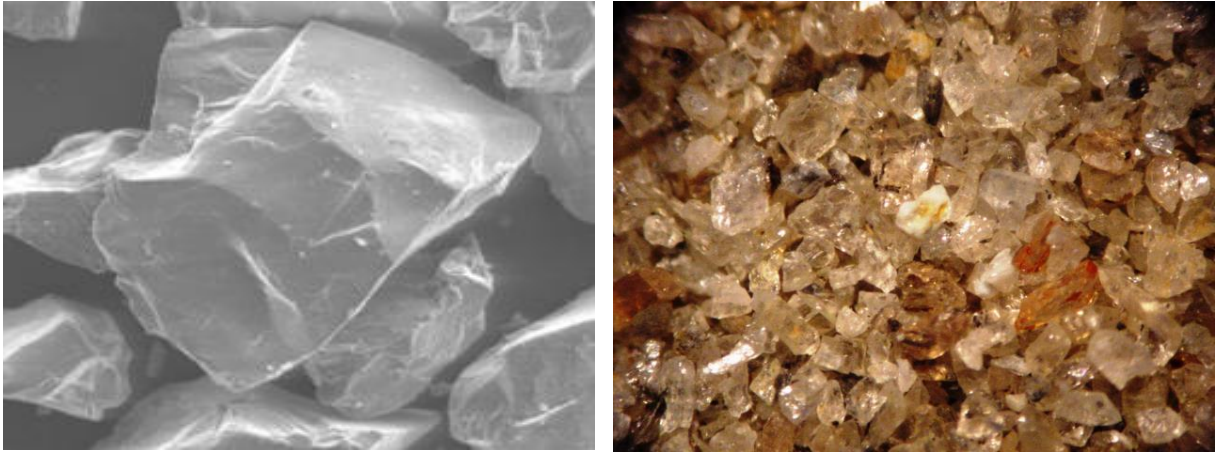
Obr. 7 Tvar a povrch chromitového písku [7; 10]

**Dunit** je ultrabazická vyvřelá hlubinná hornina. Hlavní obsah tvoří forsterit ( $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ ) a další minerály. Je levnější než magnesit a chromit s podobnými vlastnostmi, proto se často volí jako náhrada za tato ostřiva. Zrna jsou velmi hranatá a porézní, což způsobuje větší nasákavost. Lze je pojit vodním sklem, bentonitem či organickými pojivy ( $\text{CO}_2$ -resol). Nelze použít kyselá pojiva. [5; 6]



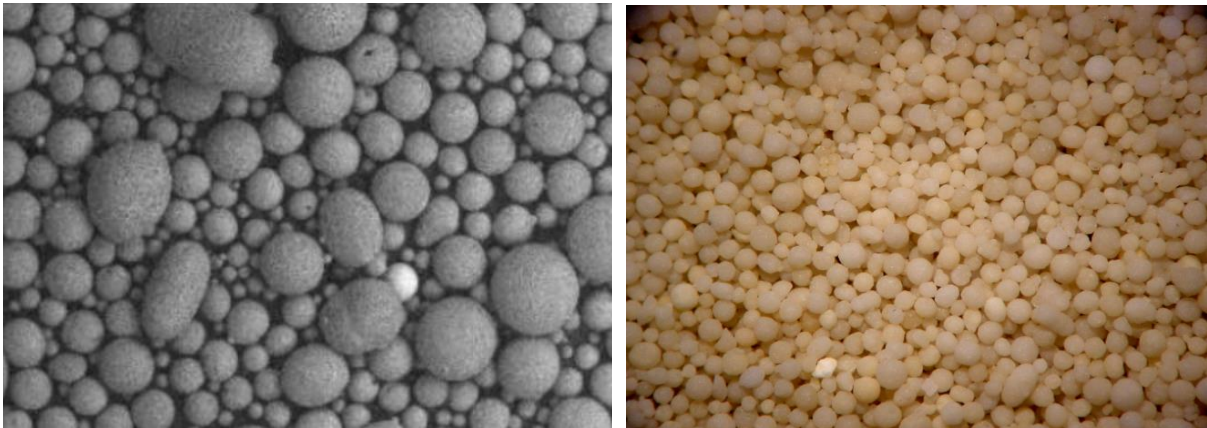
Obr. 8 Tvar a povrch dunitu (Magnolit)

**Kerphalit** je přírodní aluminosilikát na bázi andalusitu. Jedná se o žáruvzdorný ostrohranný a hranatý materiál. Teplota tavení je  $1850\text{ }^\circ\text{C}$ . Má minimální tepelnou dilataci a často se využívá jako náhrada zirkonového nebo chromitového ostřiva. Je chemicky stabilní a má neutrální pH a proto je možné ho míchat s křemenným ostřivem. Nevýhodou je nižší ochlazovací účinek. Kerphalit nachází využití pro technologie Croning, Hot-Box i Cold-Box a dá se pojit jak  $\text{CO}_2$ -resol tak bentonity. [5; 6]



Obr. 9 Tvar a povrch ostřiva Kerphalit [5; 11]

**Carabeads** je umělé ostřivo původem z Japonska. Jde o umělý aluminosilikát se širokou škálou zrnitosti. Teplota tavení je 1825 °C má minimální tepelnou roztažnost, výbornou tekutost a je chemicky inverzní. Lze využít pro vstřelování jader, pojení vodním sklem, furany i fenolickými pryskyřicemi. [5; 6]



Obr. 10 Tvar a povrch umělého ostřiva Carabeads [11; 12]

**Kovová ostřiva** se využívají pro technologii, kdy se kovové kuličky (ostřivo) váže pomocí sil elektromagnetického pole. Zrnitost je 0,1-0,5 mm. Jedná se o bezpojivovou technologii, jenž usnadňuje vytloukání, rozebírání a není potřeba regenerovat ostřivo. [5; 6]

### 3 POJIVO

Po ostřivu je pojivo hlavní složkou formovací směsi. Jedná se o plastickou, tekutou látku nebo také fyzikální sílu, které vytvářejí na zrnech ostřiva obálku a pomocí pojivových můstků je spojují dohromady. Pojivo by mělo být v takové formě, aby se mohlo rozmístit na površích a v pórech jednotlivých zrn. Mělo by smáčet povrch ostřiva a vytvářet adhezní spoje. Dále by mělo být schopno po určité době buďto se samovolně vytvrdit nebo vytvrdit zásahem zvenčí, poskytovat dostatečnou pevnost a další mechanické či technologické vlastnosti. [1]

Obecně jsou pojiva rozdělena na organická nebo anorganická, popřípadě uměle vytvořená nebo přírodní. V tuzemsku je obvyklé rozdělení pojivových systémů do čtyř kategorií tzv. generací. I. generace obsahuje směsi pojené jíly (kapilární tlak a van der Waalovy síly). Jedná se o nejstarší a dodnes stále používané systémy. II. generace značí formovací směsi pojené chemickými reakcemi mezi pojivem – tvrdidlem. Do III. generace patří pojení pomocí fyzikálních sil. V současné době je snaha o upřednostňování těchto technologií z hygienického i ekologického hlediska. Poslední IV. generace pracuje na bázi biologických procesů. Tyto technologie jsou stále ve fázi vývoje a testování. [4; 13]

#### 3.1 Směsi I. Generace

Jílová pojiva jsou nejstarší, avšak stále nejpoužívanější pojivové systémy ve slévárenství. Jílovina je směs látek, jejichž částice jsou menší než 0,002 mm. Jíl je směs látek s více než 50 % obsahem jíloviny. K pojení ostřiva dochází pomocí adhezních sil na rozhraní ostřivo – pojivo. Adheze je vyjádření faktorů (chemické, fyzikální a mechanické), které způsobují přilnutí dvou látek k sobě. [4]

Slévárenské jíly lze rozdělit do tří skupin [13]:

- **Jíly illitické** se vyznačují dobrou žáruvzdorností a bobtnatostí. Vhodné pro přírodní ostřiva, odlévání masivních odlitků a formy na sušení. Nejdůležitější jsou illity s obsahem železa – glaukonit.
- **Jíly kaolinitické**, jejichž hlavní složkou je kaolinit. Tyto jíly společně se šamotovým lupkem tvoří šamotovou formovací směs. Často se používaly na výrobu masivních ocelových odlitků a jader. Dnes jsou nahrazovány samotvrdnucími směsmi.
- **Montmorillonitické jíly**, jejichž základ tvoří montmorillonit. Tyto jíly se používají pro směsi na syrovo. Pokud je obsah montmorillonitu vyšší než 75-80 %, nazývá se bentonit. Bentonitová směs je nejpoužívanější formovací směs. Jedná se o ekonomickou, dostupnou a dnes již technologicky dobře zavedenou technologii, která se uplatňuje také v tzv. automatických formovacích linkách.

## 3.2 Směsi II. generace

Z důvodu vyšších požadavků na automatizaci a mechanizaci se po II. světové válce rozvíjejí směsi II. generace, které využívají vytvrzování na základě chemických reakcí. Tyto směsi lze rozdělit na organické a anorganické. Někdy se také nazývají směsi nevázné.

### 3.2.1 Organické pojivové systémy

Zde patří pojiva na bázi olejů, sacharidů a umělých pryskyřic. Směsi s těmito látkami se vyznačují vysokou pevností po vytvrzení, nízkou teplotou termodestrukce a velmi dobrou rozpádností po odlití. Výborná tekutost umožňuje snadné vstřelování a výrobu složitých jader a forem. Jsou snadno regenerovatelné, jak jednostupňovou mechanickou regenerací, tak také tepelnou regenerací v případě drahých ostřív. Značná nevýhoda je vysoká plynatost, která má nepříznivý dopad na životní prostředí. Dalšími jsou syntetické pryskyřice jako fenolické, furanové, polyuretanové a alkydové. Dnes převládají nad oleji a sacharidy. [1; 4; 13]

#### *Oleje*

Olejová pojiva jsou ve slévárenství zastoupená v malé míře. Nejčastěji se používají oleje nerozpustné ve vodě ať už živočišného nebo rostlinného typu. Proces vytvrzování je chemickou cestou buďto polymerizací nebo oxidací. Tato pojiva vynikají velmi dobrou tekutostí. K dosažení potřebné pevnosti je potřeba je vysoušet při 230 až 250 °C po dobu 2 až 3 hodin. Nevýhodami jsou nedostatečná pevnost oproti pevnosti směsí s umělými pryskyřicemi a velké množství plynů, které vznikají při odlévání. [13; 14]

#### *Sacharidy*

Používají se převážně pro výrobu jader jak ze směsí syrových, kde se vyznačují velmi dobrou pevností, tak vysušených. Sacharidy lze rozložit ve vodě a také absorbují vzdušnou vlhkost. Lze je rozdělit na monosacharidy, které se nazývají běžné cukry a polysacharidy.

Mezi monosacharidy patří například glukoprén, což je hnědý technický roztok glukózy, modifikovaný síranem amonným. Je vhodný pro výrobu jader vstřelováním (Hot-Box). Často se také používá jako přísada do bentonitových směsí. [13]

Melasa je tvořená sacharózou, vodou a alkalickým solemi. Aby melasa dosáhla potřebné pevnosti, je třeba jí tzv. karamelizovat. Směsi s tímto pojivem mají zvýšenou plynatost a je také omezená skladovatelnost kvůli absorpci vlhkosti. [13]

Dextronér je produkt při výrobě glukózy. Jedná se o louh složený z glukózové sušiny a solí. Aby bylo dosaženo vhodných mechanických vlastností, je potřeba směs sušit při 210 až 215 °C. Jeho uplatnění lze najít jako pojivo pro výrobu jader metodou Hot-Box. [13]

Druhou skupinou jsou polysacharidy, které se označují jako vysokomolekulární polykondenzáty. Patří zde škrob, což je koloidní roztok monosacharidů ve vodě. Jako pojivo se samotný škrob nepoužívá. Využívá se škrobový maz, což je opatrně vysušený a následně ochlazený škrob. Tato látka se používá jako přísada do bentonitových směsí v podobě dextrinu. [14]

### *Fenolické pryskyřice*

Jejich základ tvoří fenol ( $C_6H_5OH$  hydroxybenzen), jiným názvem kyselina karbolová. Tato látka slouží k přípravě umělých polykondenzačních fenolformaldehydových pryskyřic. Kondenzací fenolu a formaldehydu v kyselém prostředí vznikají fenolové pryskyřice typu Novolak. Probíhá-li reakce v zásaditém prostředí, vznikají rezoly. [2; 14]

Na začátku 40. let minulého století byl patentován systém na výrobu skořepinových forem pomocí termoplastické pryskyřice – Novolaku, znám jako metoda Croninga. Při této metodě lze vyrábět tenkostěnná, dutá jádra ze suché, dokonale sypké směsi, která se skládá z křemenného ostřiva a teplem tavitelné, tvrditelné FF-pryskyřice. Zdrojem tepla je ohřátý model nebo teplý jaderník (240-280 °C). Teplem neovlivněná (nenatavená) směs se odsype a vznikají takto tenké stěny a dutá jádra [1; 13]

K obalení zrn ostřiva dochází buďto za studena (tepla), kdy se alkoholický roztok pryskyřice míchá s ostřivem. Alkohol je poté při 100 °C ze směsi odstraněn. Nevýhodou je pomalá příprava a nutnost odstranění alkoholu ze směsi. Výhodou je možnost výroby směsi bez zvláštních zařízení. [13]

Obalování za horka využívá teplo ohřátého písku (130-150 °C), který roztaví novolakovou pryskyřici přímo v mísiči. Výhodou je kvalitnější směs, vysoký výkon, odpadají problémy s čistotou ovzduší. Nevýhodou je drahý nákup zařízení a vyšší nároky na energie. [13]

Metoda je dodnes používaná na výrobu například jader hydraulických elementů, tenkostěnná jádra vodních plášťů a skořepiny a jádra pro válce či klikové hřídele.

Metody, jenž využívají pryskyřice rezoly, se nazývají HOT-BOX, COLD-BOX a systémy NO-BAKE.

HOT-BOX je metoda, kdy k vytvrzování vstřelené vazné směsi dochází pomocí horkého kovového jaderníku (180–300 °C). Nejprve se vytvrzuje povrch a poté tepelnou akumulací dochází k vytvrzování celého průřezu. Touto metodou lze vyrábět pouze plná jádra, což je hlavní rozdíl oproti metodě C. Dříve byla využívána také sacharidová pojiva, ale ta se z důvodu navlhání při skladování přestala využívat. Namísto fenol-formaldehydových pryskyřic, lze také použít močovino-formaldehydové pryskyřice, furanovou pryskyřici a resol. Značnou nevýhodou metody HOT-BOX je uvolňování nepříjemného zápachu po odlití a uvolňování dusíku do odlitku – vznik dusíkových bodlin. Výhodou je rozpadavost za nízkých teplot, a proto je tato technologie vhodná pro slévárny neželezných kovů. [4; 13]

Cold – Box GISAG metoda využívá vytvrzování pomocí silné kyseliny. Princip spočívá ve smíchání ostřiva s rezolovou pryskyřicí, která se ve speciálním vstřelovacím jádrovém stroji velmi rychle smíchá s kyselinou a okamžitě vstřelí do jaderníku. Vytvrzení doprovází exotermická reakce. Manipulační pevnost dostává jádro již po 5 až 15 minutách. Čím větší je obsah katalyzátoru, tím rychlejší je náběh pevnosti, ale finální pevnost se snižuje. Finální pevnost se dostavuje po 4 hodinách. Nevýhodou je přebytek směsi, který se do jaderníku nedostane a potřeba speciálního vstřelovacího zařízení. [4; 13]

Cold – Box AlpHaset je druhá varianta technologie Cold – Box. Využívá alkalickou fenolickou pryskyřici a tvrdidlem je v tomto případě ester. Jelikož je možné tvrdidlo jednoduše dávkovat, lze velmi efektivně řídit reakci a přizpůsobit rozebírání jaderníku potřebám slévárny. Výhodou je nepřítomnost síry, fosforu a minimální obsah dusíku, což je vhodné při odlévání oceli a litiny s kuličkovým grafitem. Směs je možné úspěšně regenerovat suchou cestou s použitím až 90 % regenerátu. Mezi další výhody patří snížená citlivost na vznik výronků, bodlin a bublin, výskyt trhlin a malá citlivost na teplotu a vlhkost. Povrch odlitku je kvalitní a bez vad. [4; 13]

### ***Furanové pryskyřice***

Základem je furfurylalkohol, jenž se získává hydrolýzou pentozanů za vzniku furfuralu a následnou hydrogenací furfurylalkohol. Směsi pojené furany jsou vhodné pro metodu Hot-Box, samotvrdnoucí směsi s katalyzátory a s ovládaným ztužováním (SO<sub>2</sub> – proces)

Ve slévárnství se lze setkat se třemi typy furanových pryskyřic [13; 14]:

- Furanaminoaldehydová pojiva jsou na bázi furalu, furfurylalkoholu, formaldehydu a močoviny. Primární využití mají pro formy a jádra odlitků z šedé litiny.
- Furanketonaldehydové pojiva jsou na bázi furalu, acetonu a formaldehydu. Jsou vhodná pro odlitky z ocelí, jelikož pojivo neobsahuje dusík.
- Furalové – furanové pryskyřice lze dělit do skupin dle obsahu dusíku (0-11 %) a dle množství vody (max 30 %). S rostoucím množstvím furfurylalkoholu se zvyšuje kvalita směsi, ale také cena.

### ***Samotvrdnoucí furanové směsi***

Tyto směsi dosahují pevnosti pomocí kyselých katalyzátorů – trihydrogenfosforečná (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), benzensulfanová, paratoluensulfanová. Vytvrzování probíhá od povrchu formy do středu. U velkých forem a jader je potřeba směs osušovat, jelikož dochází k exotermické reakci a vzniku vody. Nevýhodou je uvolňování kyselých par a dodržování nízkých emisí. Další je vyšší obsah síry, jenž způsobuje snížení modifikačního účinku hořčíku při odlévání kuličkového grafitu, zhoršení pracovního prostředí a exogenní bubliny. Výhodou je výborná rozpadavost, snadná regenerace a kvalitní povrch odlitku. [4; 13; 14]

### ***SO<sub>2</sub> – proces (furanová pryskyřic)***

Polykondenzace furanové pryskyřice probíhá v kyselém prostředí kyseliny sírové. Zdrojem kyseliny sírové je oxidovaný oxid siřičitý. Katalyzátor je metyletylketon a peroxid vodíku (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Vstřelování směsi probíhá pomocí klasického vstřelovacího stroje. Vzduch je smíchán s SO<sub>2</sub>, směs vstřelena do jaderníku a profouknuta směsí vzduchu a kyseliny. Přebytek plynu je sorbován ve speciální sorpční pračce a neutralizován v roztoku NaOH. Výhodou je dlouhá životnost směsi (až 24 h), neomezená skladovatelnost, vysoká pevnost a nízký vývin plynů při odlití. Odlitky vynikají velmi dobrým povrchem a nízkým počtem povrchových vad. Velkou nevýhodou je hygiena a bezpečí při práci s SO<sub>2</sub>. Jedná se o silně aromaticky a velmi jedovatý plyn. [4; 13; 14]

### ***Polyuretanová pojiva***

Tato pojiva se dělí na dvě skupiny – alkyd-olejové polyuretany a fenolické polyuretany (PEP-SET a COLD-BOX Ashland).

Alkyd-olejové polyuretany jsou více složkový systém, jenž obsahuje modifikovanou alkydovou pryskyřici, katalyzátor a reaktant na bázi izokyanátu. Vytvrzení směsi probíhá nejdříve při reakci pryskyřice s izokyanátem. Tím se získá manipulační pevnost. Poté se díky oxidačnímu vytvrzení zvedne pevnost 2-3 krát. Tuto fázi lze urychlit přisoušením (150-200 °C), kdy jedna hodina sušení odpovídá přibližně 96 hodinám vytvrzování při pokojové teplotě. Pojivo je vhodné také pro olivínová a chrommagnezitová ostřiva. Je potřeba sledovat vlhkost ostřiva, jelikož už při 0,25% vlhkosti dochází ke zpomalení vytvrzování. [13; 14]

PEP-SET je trojsložkový samotvrdnoucí systém, obsahující fenolformaldehydový rezol, polymerní izokyanát a aminový katalyzátor. Vytvrzování je rovnoměrné v celém objemu jádra a nedochází ke vzniku žádných vedlejších produktů. Tímto systémem lze pojit všechny druhy ostřiv. Silně kyselá a alkalická ostřiva urychlují vytvrzování směsi. Různým dávkováním

katalyzátoru lze řídit rozebírací čas od několika sekund až po 3 hodiny. Opět je doporučena vlhkost ostřiva max. 25 %. [13; 14]

COLD-BOX Ashland je dvousložkový systém obsahující umělou a vytvrditelnou pryskyřici (epoxidová, polyesterová, alkydová, ropné polymery atd.). Nejčastěji se využívá modifikovaná fenolická pryskyřice. Tyto dvě látky mezi sebou reagují velmi pomalu, proto se přidává katalyzátor (TEA – triethylamin, DMEA – Dimethylethanolamin, DMIA – dimetylisopropylamin). TEA je těkavá, zápalná a výbušná látka těžší než vzduch. Při práci s ní platí velmi přísné hygienické a bezpečnostní předpisy. Častěji se využívá DMEA. [13; 14]

Výroba jader probíhá nejdříve smícháním pryskyřice a ostřiva v průběžném míšiči, vstřelením do jaderníku a poté je směs profouknuta buďto aerosolem katalyzátoru nebo je katalyzátor smíchán s nosným plynem (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>). Přebytný plyn je neutralizován v kyselině fosforečné nebo spalován v hořáku na zemní plyn. Lze využívat křemenná i nekřemenná ostřiva. Podmínkou je minimální vlhkost (max. 0,1 %) a teplota písku (max. 35 °C). Jádra jsou vytvořena v řádech sekund a lze je okamžitě skládat. Výhodou je velmi kvalitní povrch odlitků, dobrá rozpadavost a skladovatelnost. [13; 14]

### 3.2.2 Anorganické pojivové systémy

Z ekologického, zdravotního, hygienického i technologického hlediska se v druhé polovině 20. století objevují anorganické pojivové systémy. Mezi nejpoužívanější patří cement, sádra, alkosoly, hydrosoly, vodní sklo a geopolymery.

#### *Cement*

V České republice téměř nevyužívaný pojivový systém, avšak Německo či Francie dodnes cement ve svých slévárnách využívá. Cement je směs tzv. slínkových materiálů, které tvoří převážně oxidy, z nichž nejčastěji se jedná o oxidy křemíku, hliníku a železa. Společně se šamotovou směsí jsou často používány pro masivní odlitky z litiny či oceli. Pojit lze téměř jakákoliv ostřiva, nejčastěji křemen, olivín a šamot. Cement velmi dobře váže vodu, poté tuhne a vysouší se, přičemž dochází k vytvrzování celé formovací směsi. Vytvrzení je ovšem velmi pomalé, u klasického cementu až 48 h. Přidáním mikromletých cementů, melasy nebo rychlotvrdnoucího cementu lze zkrátit bod vytvrzování na 6 hodin. [13; 14]

Cementovému pojivu se někdy přezdívá hydraulický, jelikož je schopný tuhnout pod vodou a zachovává si své mechanické vlastnosti. Výhodou je velmi vysoká pevnost po vytvrzení, nízká cena, minimální pěchování, není potřeba sušit směs, nezávislost na vlhkosti prostředí a ostřiva. Velkou nevýhodou je velmi špatná rozpadavost, náročné a nákladné rozebírání a čištění odlitků a horší vyjímání modelů. Z těchto důvodů je toto pojivo vhodné převážně pro tvarově jednoduché odlitky. [13; 14]

#### *Sádra*

Vyrábí se tepelným rozkladem sádrovce za vzniku hemihydrátu síranu vápenatého (CaSO<sub>4</sub> · ½ H<sub>2</sub>O). Ve formovací směsi představuje sádra pojivo i ostřivo. Využívá se pro výrobu přesných odlitků s požadavky na velmi kvalitní povrch. Po smíchání sádry s vodou a dalšími přísadami dochází k vytvoření tzv. břěčky, která po určité době vytvrdne. Největší problém sádry je její nízká prodyšnost, která zamezuje odvodu plynu z formy při lití. Ke zvýšení prodyšnosti se forma suší (200 °C) a žihá (450 °C). K vyšší prodyšnosti se přidávají látky, které vytvářejí malé bublinky za vzniku napěněné formy. [13; 14]

***Alkosolové pojivo***

Jedná se o koloidní roztok oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ), kde nejznámější a nejpoužívanější je Etylsilikát. Tato látka se využívá k výrobě keramických forem pomocí technologie vytavitelného modelu. Vytvrzení probíhá při rozkladu etylsilikátu pomocí kyseliny solné nebo čpavkem. Pokud se tento koloidní roztok ve formě gelu opatří žáruvzdorným materiálem na povrchu, dochází k vytvoření pevné slupky. Forma se musí žíhat k odstranění vody, vytvrzení a získání potřebné pevnosti. Dnes se jedná o méně používané pojivo na obalování jednak z ekologického důvodu, tak také kvůli vyšší tendenci praskání. [14; 15]

***Hydrosolové pojivo***

Rozdílem oproti alkosolům je skutečnost, že jsou koloidní látky rozptýleny ve vodě a ne v alkoholu. Hydrosolové břechky mají oproti alkosolovým horší smáčivost voskového modelu, proto je nutno přidávat smáčedla (mýdlo, sulfonové alkoholy). Hydrosol má také menší pevnosti a horší pojivové vlastnosti, ale žíháním při teplotě  $900\text{ }^\circ\text{C}$  se tyto rozdíly srovnávají. Dnes se využívají převážně tato pojiva. [14; 15]

***Vodní sklo***

Je koloidní roztok křemičitanu sodného ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Toto pojivo bylo patentováno na konci 50. let minulého století a od té doby se tato technologie stala velmi progresivní a přenesla mnohou pozornost na chemicky pojené formovací směsi. Lze nalézt také názvy jako chemicky tvrzené směsi nebo CT-směsi. Dle způsobu vytvrzování lze rozdělit technologii na ovládané ztužování ( $\text{CO}_2$ -proces, teplý vzduch, mikrovlny) nebo bez ovládaného ztužování (ST-směsi, samotvrdnoucí směsi). [13; 15]

$\text{CO}_2$ -proces umožnil výrobu jader a forem bez dlouhého sušení oproti organickým pojivům. Vytvrzování probíhá průchodem  $\text{CO}_2$ , kde chemicky reaguje s vodním sklem a dochází k transformaci na gel kyseliny křemičité, jenž po určité době vytvrde. Vedlejším produktem je uhličitan sodný, který se při vyšších teplotách rozkládá na hydroxid sodný a je velmi škodlivý. Takto vytvrzená směs má velké pevnosti a je vhodná pro těžké litinové i ocelové odlitky. Nevýhodou  $\text{CO}_2$  procesu je nulová vaznost před vytvrzením. Tato vlastnost znemožňovala vytahování modelů z formy před vytvrzením. Použitím speciálně upraveného vodního skla s přísadou sacharózy se zvýšila vaznost před vytvrzením. Další nevýhodou je malá pevnost po vytvrzení oproti směsím s organickými pojivy, horší rozpadavost, vysoká spotřeba  $\text{CO}_2$  a špatná regenerovatelnost ostřiva. [13; 15]

Další variantou ovládaného ztužování vodního skla je studeným nebo teplým vzduchem. Výhodou je, že je proces vratný, jelikož dochází pouze k dehydrataci křemičitanu sodného. Na podobném principu funguje vytvrzování pomocí mikrovln, ale tato technologie je energeticky velmi náročná. Obdobné je vytvrzování Joulovým odporovým teplem směsi (průchod stejnosměrného elektrického proudu). [13; 15]

Směsi s vodním sklem jsou nadále předmětem zlepšování, využívají se přísady na zlepšení rozpadavosti, aktivování vodního skla fyzikální cestou, snižování množství alkálií a další. Pozornost je věnována také reaktivitě křemenných písků s oxidy kovů v alkalickém prostředí. To má za následek využívání nekřemenných ostřiv. [13; 15]

Samotvrdnoucí směsi jsou mladší skupinou, které pracují na odlišném fyzikálně-chemickém principu. Děj probíhá buďto s exotermickou reakcí, u které se zvedá teplota formy či jádra nebo bez citelné exotermické reakce bez zvyšování teplot.

Je-li směs vytvrzena práškovými čistými kovy (Al, Zn, ad.) nebo práškovými FeSi, CaSi, nazývá se N-metoda (Nishyama-proces). Později Super N-metoda, u které byla zlepšena



tekutost směsi. Princip vytvrzování je na základě reakce alkalických roztoků s kovy za vzniku vodíku a tepla, jenž podporuje dehydrataci vodního skla. Nevýhodou je vznik vodíku, který tvoří výbušnou směs se vzduchem. [13; 15]

Druhou skupinou tvoří ST-směsi vytvrzené práškovými nebo kapalnými tvrdidly. Tyto reakce probíhají bez citelné exotermické reakce. Zdrojem práškových tvrdidel jsou samorozpadavé strusky s vysokým obsahem dikalciumsilikátu a trikalciumsilikátu. Nevýhodou je nerovnoměrná reakce s vodním sklem za vzniku míst s různou reaktivitou a nemožnost samotného řízení reaktivity. Proto jsou dnes nejpoužívanější tvrdidla na bázi kapalin esterů. [13; 15]

### 3.2.3 Geopolymery

Je název jednak pro způsob přípravy (geosyntéza) a také pro výsledný produkt nebo skupinu látek (polymery). Polymery nejsou pouze syntetické organické makromolekulární látky jako plasty, biopolymery atd., ale patří zde i čistě anorganické látky vzniklé polymerizací či polykondenzací. Geopolymer je synteticky vytvořený anorganický alumosilikátový polymer.

#### *Historie*

S geopolimery se pojí jeden z nejstarších lidských výtvorů a divů světa – pyramidy. Francouzský vědec Joseph Davidovits zkoumal záhadu pyramid a navrhl teorii, že stavební kameny nebyly dopravovány po rampách, ale že staří Egypťané již před 4500 lety znali tento materiál. Jeho hypotéza se opírá o několik faktů, které nelze vyvrátit. Pomocí laboratorních zkoušek zjistil, že nerost, ze kterého jsou pyramidy postaveny, obsahuje vodu, pohlcuje záření a obsahuje nepatrné vzduchové bubliny, což není u přírodního kamene možné. Po řezu kvádrem z pyramidy bylo možné pozorovat hutnější spodní část kamene. Některé složky vzorků z pyramid jsou amorfní a také se v nich daly najít vlasy. Davidovits tedy navrhl teorii, že Egypťané využili období záplav, transportovali písek z okolí, který napěchovali do dřevěných forem a přidali aktivační prostředky jako vodu, jíl, sůl a vápenec. Slunce směs vysušilo a vytvrdilo na litý kámen. Tato teorie byla postupem času přijata za správnou a ověřenou dalšími vědci. [16]

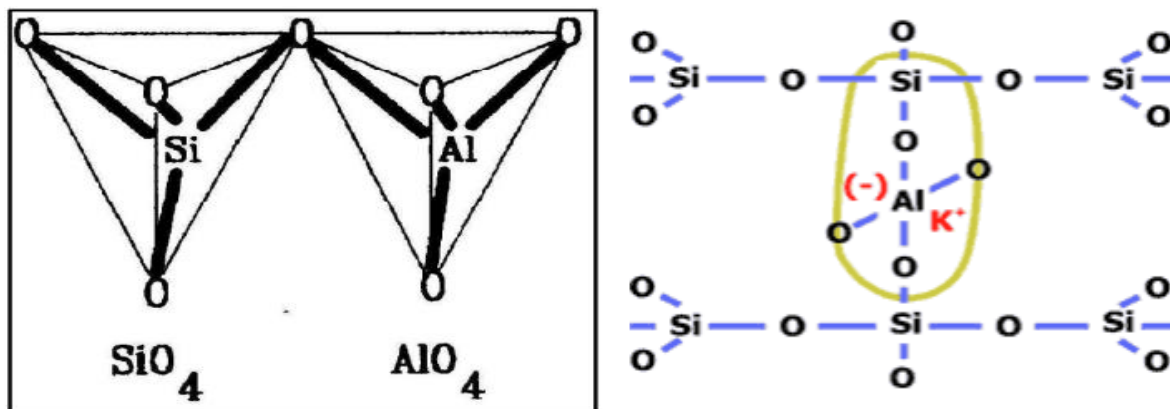
Bavíme-li se pouze o alkalické aktivitě pojivových systémů, lze datovat první zmínky do roku 1930. Německý vědec H. Kühn zkoumal tuhnutí hydroxidu draselného s mletou granulovanou struskou. V následujících letech se problematice věnoval také prof. Gluhkovsky, který popsal využití aluminosilikátů s roztoky sloučenin alkalických kovů a pojmenoval je „gruntocementy“. Ty byly prakticky využívány ve stavebnictví v bývalém Sovětském svazu. V České republice se průkopníkem v této oblasti stal prof. Brandštetr. Od konce 90. let se geopolimerům věnují doc. Škvára a doc. Rovnaník. [17; 18]

Právě zmíněný prof. Davidovits v 70. letech minulého století zavedl, nazval a popsal alkalicky aktivované aluminosilikátové materiály – geopolymery. V roce 1972 založil ve Francii institut Cordi-Geopolymere, zabývající se tímto materiálem. Vytvořil také strukturní model geopolimeru, typ polysialate-siloxo, vytvořený aktivací metakaolinu a předpokládá v podstatě monolitický polymer. [17; 18]

Geopolymery se nejdříve začaly využívat ve stavebnictví, a to jako povrchová žáruvzdorná úprava dřevotřískových desek nebo pojivo do betonů. Dále se objevily v automobilovém průmyslu, kde firma Porsche patentovala nosič katalyzátoru z geopolimeru. Do podvědomí sléváren se geopolymery dostávají až v posledních letech. Využívají se jako ekologická pojivová směs, kterou v ČR jako první zavádí společnost SAND TEAM, spol. s.r.o. [19]

### Charakteristika

Lze je popsat jako materiály na rozhraní mezi klasickými anorganickými pojivy, skelnými a keramickými materiály. Patří do skupiny minerálních pojiv, které jsou velice podobné přírodním zeolitům, jelikož mají podobnou polymerní strukturu Si-O-Al. Strukturu tedy tvoří křemík a hliník (popílky, strusky, kaolinitické látky), které reakcí s alkalickým aktivátorem vytváří polysialát – řetězec tetraedrů. [15]



Obr. 11 Základní strukturní jednotka geopolymery

Empiricky lze geopolymery zapsat jako  $(M_n\{-(Si-O)_z-Al-O\}_n \cdot wH_2O)$ .  $M$  je označení pro zásadité látky (draslík, sodík, vápník),  $n$  je stupeň polykondenzace,  $z$  je počet tetraedrických jednotek (1, 2 nebo 3). Kompozity tvoří trojrozměrné amorfní struktury, kde jsou tetraedry nepravidelně vázány polykondenzací přes kyslíkový můstek. Pokud geopolymer neobsahuje vápenné složky a je připravován alkalickou aktivací metakaolinu hydroxidem sodným, nazývá se pravý geopolymer. [18]

### Geopolymerace

Je název pro postup výroby geopolymery. Samotný proces je velmi obtížné popsat a v průběhu let se vytvořilo mnoho teorií. Prof. Glukhovský uvádí, že pokud se dostane základní materiál ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ) do zásaditého prostředí dochází k jeho rozpouštění. Rozsah závisí na složení základního materiálu, koncentraci alkalického roztoku, rychlosti míchání a době rozpouštění. [19]

Jelikož je rozpouštění aluminosilikátů velmi rychlé, dochází k vytvoření přesyceného roztoku aluminosilikátu. Ten obsahuje monomery  $[Al(OH)_4]^-$ ,  $[SiO(OH)_3]^-$  a  $[SiO_2(OH)_2]^{2-}$ , které kondenzují a vytvářejí Al-Si gel. Snížená koncentrace  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  na povrchu hlinito-křemičitých částic má za následek další rozpouštění. Tento gel začíná po určité době tvrdnout na geopolymer. [18; 20]

Důležitou látkou v geopolymeraci je křemičitan, jenž reaguje a podléhá polykondenzaci s hlinitany do té doby, než se  $Al_2O_3$  rozpustí z povrchu materiálu. Faktory, které ovlivňují tyto reakce, jsou vyšší pH, vyšší teplota a velikost atomu kationtu a alkalického kovu. Během geopolymerní reakce dochází k uvolňování vody a je uvolňována z matrice během vytvrzování a sušení. Voda slouží jako reaktivní prostředí, ve kterém se rozpouští komponenty a usnadňuje se zpracovatelnost směsi během manipulace. [18; 20; 17]

### **Základní vlastnosti a aplikace**

Za pokojové teploty jsou geopolymery amorfni látky. Za vyšších teplot přechází amorfni struktura na mikrokystalickou. Srovnáme-li geopolymery s konvenčními materiály, cena je zde velkou nevýhodou. Ovšem mechanické i fyzikální vlastnosti jsou mnohem lepší. Ve stavebnictví je výhodou geopolymery dobrá izolační vlastnost a vyšší tepelná odolnost, což má velký význam z hlediska požární bezpečnosti. Mezi základní vlastnosti patří nerozpustnost ve vodě a dobrá odolnost proti kyselinám a zásadám. Geopolymerní báze má schopnost uzavírat do své sítě další materiály. Lze například využít polystyrénové kuličky ke zvýšení tepelné izolace, přidáním celulózy lze zvýšit akustickou izolaci a pevnost v tahu. Přidáním čedičového plniva lze několikanásobně zvýšit pevnost, což se jeví jako alternativa například pro mostové konstrukce s téměř neomezenou životností a vyšší pevností. Při přípravě geopolymery se vznik emisí CO<sub>2</sub> snižuje o více než 50 %. Teplotní odolnost dosahuje 900–1000 °C. Využití se našlo také v restaurování sochařských a stavebních památek z kamene, keramiky a umělého kamene. Významnou roli, hlavně v poslední době, hrají geopolymery také ve slévárenství jako velmi kvalitní, ekologicky přívětivé a dostupné pojivo formovacích směsí. [17; 19; 20]

### **Geopolymery ve slévárenství**

Geopolymery pro stavebnictví mají dlouhodobý proces vytvrzování v řádu několika hodin. To není pro slévárenství prakticky použitelné, a proto se využívá geopolymerní prekurzor, u kterého je možné řídit vytvrzování od několika sekund až po několik hodin. Prekurzor znamená, že geopolymery nevzniká při vytvrzování, ale už samotné pojivo je geopolymery s nízkým stupněm polymerizace. Firma SAND TEAM, spol. s r.o. dodává kompletní technologii pro zavedení geopolymery do slévárny s názvem GEOPOL. Tato technologie se dělí na samotvrdoucí směsi (ST) a směsi vytvrzované zásahem zvencí. [21; 22]

První použití geopolymery ve slévárenství bylo ve Francii na začátku 21. století, kde se tímto pojivem zhotovovala jádra pro tlakové lití a odlitky se zalitými kovovými částmi. Byla použita samotvrdoucí směs s křemenným ostřivem a dávkování pojiva 6-7 %. V roce 2005 bylo v německých slévárnách testováno samotvrdoucí pojivo RUDAL, které přineslo pozitivní výsledky. Zlepšila se zpracovatelnost, rozpadavost a ekologie slévárny. V roce 2003 byl geopolymerní systém zaveden do slévárny ZPS-SLÉVÁRNA, a.s. Zlepšila se ekonomie, technologie a ekologie výroby. Dnes využívá systém Geopol přes 50 sléváren v Česku, Německu, Slovensku, USA, Polsku atd. [21; 22]

Technologie GEOPOL využívá tři druhy pojiva a každé má své specifické využití.

Tabulka 1 Rozdělení základních pojiv a jejich specifikace [25]

GEOPOL <sup>®</sup> 618	Pojivo určené pro samovolné vytvrzování. Vhodné pro směsi s regenerátem i novým ostřivem, jádrovou i modelovou směs. Vytvrzování pomocí tekutých tvrdidel řady SA nebo GEOFIX.
GEOPOL <sup>®</sup> 510	Pojivo určené pro směsi vytvrzované plynným CO <sub>2</sub> . Není doporučeno využívání regenerátu. Směsi jsou vhodné pro výrobu jader vstřelováním. Možnost přidat akcelerátor GEOTEK pro okamžitou pevnost směsi.
GEOPOL <sup>®</sup> W10	Pojivo využívá vytvrzování teplem z jaderníku v rozsahu teplot 100 až 200 °C a teplem profukovaného vzduchu. Pro zlepšení vlastností se přidává prášková přísada GEOTEK W

**Samotvrdnoucí směsi – GEOPOL® ST**

Tato technologie využívá tekutý geopolymerní prekurzor, čiré barvy a nízké viskozity. Kapalina je bez výrazného zápachu a na vzduchu velmi pomalu tuhne. K vytvrzování se využívá tvrdidlo buďto řady SA, CE nebo GEOFIX, které zvyšuje stupeň polymerizace a poté dochází k vytvrzení. Jako pojivo je využíván GEOPOL 618. Díky adheznímu oddělení pojivové obálky od zrn ostřiva, je možno směs takto vytvrzenou velmi jednoduše regenerovat. Regenerované ostřivo lze využít zpět v provozu slévárny a zlepšuje se tímto ekologie a ekonomie slévárny. [15; 24]

Zpracovatelnost směsi lze nastavit od 2 do 90 minut v závislosti na použitém tvrdidle a jeho množství. Takto lze řídit i dobu rozebírání, což přispívá k maximální optimalizaci formovací směsi ve slévárně. Je důležité, aby zhutnění směsi neprobíhalo po překročení doby zpracovatelnosti. Směs poté nedosahuje požadovaných vlastností z důvodu narušení pojivových vazeb. Zpracovatelnost ovlivňuje typ a množství tvrdidla viz. tabulka 2. Dávkování tvrdidla řady SA je 14–18 hm. % na množství pojiva. U řady GEOFIX je dávkování v rozmezí 8–15 hm. % vztažených na množství pojiva. Množství pojiva se pohybuje v rozmezí 1,4 až 2 hm. % na množství ostřiva. Řada SA je citlivější na množství regenerátu než řada GEOFIX, jelikož obsahuje více alkálií a solí, které urychlují vytvrzování. Pozorovatelným jevem je, že při použití většího množství či rychlejšího tvrdidla, dojde k rychlejšímu nárůstu pevnosti, ale jeho konečná pevnost je nižší než při použití pomalejších tvrdidel. Naopak může docházet k nárůstu pevnosti až po dobu 48 h. [25; 26]

Tabulka 2 Rozdělení tvrdidel a jejich rychlostí vytvrzování [25]

Označení	Reaktivita	Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]
SA 71-72	POMALÁ	1,16-1,19
SA 73-74	STŘEDNÍ	
SA 75-76	RYCHLÁ	
CE 50, 75	VELMI POMALÁ	1,08-1,13
GEOFIX 00	POMALÁ	1,10
GEOFIX 01-02	STŘEDNÍ	
GEOFIX 03	RYCHLÁ	

Při jednoduché mechanické otírce (primární regenerace) lze využít až 50-60 % regenerovaného ostřiva. Je-li zavedena sekundární regenerace, lze využít až 100 % regenerátu. Takové množství se však nedoporučuje pro jádrové směsi. Samotná kvalita regenerátu je ovlivněna kvalitou vratné směsi, průběhem a způsobem regenerace. Odvíjí se od dávkování pojiva, tvrdidla a množství písku, který byl v kontaktu s kovem při lití a chladnutí. Pojivovou obálku nestačí pouze otřít, ale také závisí na schopnosti odprášení. Prachové podíly značně ovlivňují dávkování pojiva a jeho schopnost pojít zrna. Možnost regenerace směsi s geopolymery je značně vyšší než při použití vodních skel. [25; 26; 27]

Ostřivo samotné má důležitý význam při dávkování pojiva a tvrdidla. Křemenný písek s hladkými oblými zrny umožňuje dávkovat nižší množství pojiva a tvrdidla. Hranatá ostřiva množství zvyšují. Tekutost a spěchovatelnost hranatých ostřiv je také horší. Důležitá je také střední velikost zrn. Čím větší měrný povrch ostřiva, tím větší je spotřeba pojiva. Naopak příliš malá velikost středního zrna může způsobovat problémy s odvodem plynů z formy. Ideální teplota ostřiva je 20 až 29 °C. [25; 26; 27]

Obecné výhody ST směsí: ekologie, nulový vývin plynu při odlévání, jednoduchá regenerace, kvalitní povrch odlitků, snížené dávkování pojiva/tvrdidla, využití křemenných i nekřemenných ostřiv, odlévání železných i neželezných kovů, dobrá rozpadavost, zlepšení hygienických podmínek v provozu, minimální tvorba bublin a výronků na odlitcích.

### **Směsi vytvrzované CO<sub>2</sub> – GEOPOL CO<sub>2</sub>**

Vytvrzování pomocí plynného CO<sub>2</sub> je při použití geopolymerů obdobné jako při směsi s vodním sklem nebo alkalickou rezolovou pryskyřicí. Pojivem je zde Geopol 510 a jeho dávkování je oproti vodnímu sklu poloviční. Rozsah dávkování je 2,3 až 3 % na hmotnost ostřiva. Tato hodnota je blízká při použití organického rezolu. Pro dosažení ideálních vlastností se využívá akcelerátor GEOTEK, jenž se dávkuje v rozmezí 0,5 až 0,8 %. Jeho použití zrychluje vytvrzování a snižuje spotřebu CO<sub>2</sub>. [15; 25; 28]

Tabulka 3 Rozdělení tvrdidel a jejich rychlostí vytvrzování [25]

Akcelerátor	Použití
GEOTEK 001	Základní akcelerátor.
GEOTEK 005	Použití pro snížení zbytkové pevnosti.
GEOTEK 007	Pro potřeby pomalejšího vytvrzování a lepšího vstřelování.

Tato technologie se uplatňuje při výrobě jader vstřelováním. Směs má vynikající tekutost a snadno vyplňuje dutiny jaderníku. Vyniká také velmi dobrou skladovatelností, nejméně 24 hodin. Udávané hodnoty pevnosti ihned po vytvrzení jsou 0,3 až 0,4 MPa ve stříhu, což umožňuje téměř okamžitou manipulaci s jádrem. Při skladování může pevnost narůstat až dvojnásobně. Delším skladováním pevnost nijak neklesá. Jádra je nutné skladovat bez přístupu CO<sub>2</sub> z ovzduší. [25; 28]

Směsi s vodním sklem vytvrzené CO<sub>2</sub> vykazují tzv. první a druhé maximum zbytkových pevností při teplotách 200 °C a 800 °C. Díky tomu mají tyto směsi špatnou rozpadavost. Geopolymery tyto vlastnosti postrádají při teplotách 200 °C a při teplotě 800 °C je možnost použitím správného akcelerátoru (GEOTEK 005) snížit zbytkové pevnosti oproti vodnímu sklu na pětinu. [26; 28]

Výhodou této technologie je šetrnost k životnímu prostředí, nízké dávkování pojiva a plynného CO<sub>2</sub> při použití akcelerátoru, dobrá rozpadavost po odlití. Směsi jsou vhodné pro vstřelování a netvoří se bubliny a výronky na odlitcích.

### **Směsi vytvrzované teplem – GEOPOL W**

Tato technologie se také využívá pro výrobu jader, ovšem vytvrzování probíhá teplem. Princip technologie spočívá ve vstřelení směsi do horkého jaderníku a následné vytvrzení směsi profukováním jaderníku teplým vzduchem. Teploty jaderníku i vzduchu se pohybují mezi 100 až 200 °C. Skladování jader je možné za běžných podmínek a nedochází k deformaci. Použitím teplot 150 až 200 °C dochází k ještě delší skladovatelnosti a zabraňuje se zpětnému navlhání směsi. Pevnost jader dosahuje 2,5 – 4,5 MPa pevnosti v ohybu. [25; 29]

Do směsi lze přidat práškovou přísadu GEOTEK W, která působí na sníženou navlhavost jader a zvyšuje pevnost za tepla i studena. Často je tato metoda srovnávána s technologií PUR Cold - Box, kde má srovnatelné pevnosti při nižších vytvrzovacích časech a má mnohem lepší rozpadavost. Dávkování pojiva GEOPOL W je v rozmezí 1,5 až 1,8 hm. d. a GEOTEK W

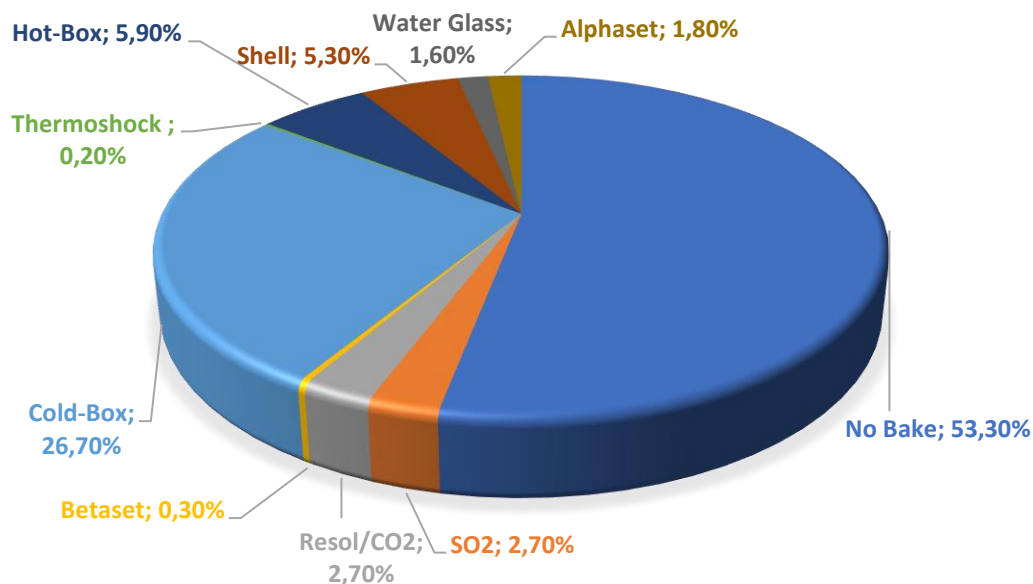
v rozmezí 0,75 až 0,90 hm. d. Technologii lze využít pro odlitky z neželezných kovů a také litinové odlitky. Lze použít křemenná i nekřemenná ostřiva. [25; 29]

Výhodou technologie je výroba jader s vysokou pevností a dlouhou skladovatelností. Možnost vyrábět složitá tenkostěnná jádra. Odlitky mají kvalitní povrch a dochází k velmi malému vývinu plynů. Jedná se o bezemisní technologii (BTEX, PAH) s minimálním vlivem na životní prostředí. Jádra mají výbornou rozpadavost a ostřivo je snadno regenerovatelné. Technologie je vhodná i pro velké série. [29]

### **Ekologie geopolymerních pojiv**

Snahou posledních let je zlepšit prostředí sléváren jednak pro jejich zaměstnance, ale také pro okolí slévárny jako takové. Tlak vyvíjí jednak předpisy v oblasti životního prostředí, ale také tlak sociální. Stále zvyšující se náklady na řešení těchto enviromentálních problémů jdou proti snahám sléváren tyto procesy zavádět. Dalším faktorem, jenž omezuje modernizaci a zlepšení ekologie sléváren je nevole využití nových procesů a postupů ze strany personálu a vedení. Takový přístup je neudržitelný, a proto se již lze setkat například s výměnou organických formovacích směsí za směsi anorganické, investic do vzduchotechniky a dalších zařízení, které zvyšují kvalitu pracovního i životního prostředí.

Mezi hlavní zdroje škodlivých látek patří pojiva nebo přísady do směsí pro formy či jádra (pryskyřice, alkálie, nosiče lesklého uhlíku atd.). Tyto složky působením vysoké teploty při kontaktu formy a roztaveného kovu více či méně vytvářejí spousty škodlivých látek. Dvě hlavní skupiny látek jsou BTEX: benzen, toluen, etylbenzen a xyleny. Druhou skupinou jsou polycyklické aromatické uhlovodíky – PAH. Tyto látky jsou karcinogenní a mutagenní a představují velké riziko pro pracovníky sléváren. Jako další faktor se sleduje obsah fenolu, formaldehydu, furfurylalkoholu, styrenu, SO<sub>2</sub> a čpavku. Bohužel jsou tyto látky přímou součástí technologií pro přípravu směsí a dle obr. 12 je toto zastoupení stále poměrně velké. [32]



Obr. 12 Zastoupení chemicky vázaných směsí na formy a jádra k roku 2015 [32]

Všechny tyto látky jsou generovány v procesu pyrolýzy (tepelný rozklad) organických sloučenin používajících se ve slévárně. Ve slévárně je lze najít jednak ve formě plynů, ale také na povrchu prachových částic hned po zalévání forem roztaveným kovem. Dostávají-li se tyto látky do kontaktu s pískem, může docházet k následné kontaminaci prostředí, kde se odpadní písek využívá. Významným zdrojem prachových částic je vytloukání a regenerace. Je důležité sledovat regenerované ostřívo, neboť obsahuje větší množství emisí a zakomponování tohoto ostřiva zpět do procesu slévárny může mít za následek vyšší emise. Emise jsou také generovány při přípravě směsí, výrobě forem a jader, sušení, skladování a aplikací nátěrů. Množství těchto emisí je znatelně menší než při pyrolýze. [32]

Z pohledu kompletního množství emisí produkované slévárnou tvoří kvantitativně až 96 % organická pojiva, při použití bentonitu je to až 90 % emisí z celé slévárny. Při využití anorganických systémů se uvolňují převážně oxidy kovů při tavení a čištění odlitků. Tab. 4 ukazuje obsah BTEX u směsi s anorganickým pojivem. Byl změřen pouze benzen, a to pouze z důvodu využití tvrdidla, jenž obsahuje organické sloučeniny. Hodnoty byly přibližně 10x menší než při využití bentonitu či furanových pryskyřic. To z něj dělá v porovnání s jinými velmi ekologické a šetrné pojivo jak pro zaměstnance, tak pro životní prostředí. [32]

Tabulka 4 Obsah plynů a koncentrace BTEX z formovací směsi s anorganickým pojivem [32]

Číslo série	Objem plynů [dm <sup>3</sup> /kg form. směs.]	Obsah BTEX v plynech [mg/kg formovací směsi]				
		benzen	toluen	etyl-benzen	xyleny	Σ BTEX
<b>1</b>	9,909	37,00	0,58	0,015	-	<b>37,60</b>
<b>2</b>	9,277	33,37	0,49	0,041	0,058	<b>33,96</b>

Pro srovnání lze v tabulce 5 nalézt hodnoty PAH a BTEX pro organickou formovací směs, jenž využívá furanovou pryskyřici. Je zde také zahrnut vliv poměru regenerovaného ostřiva a ostřiva nového. SP 100 značí ostřívo se 100 % nového písku, R50P50 značí 50 % regenerovaného písku a 50 % nového písku a R100 značí 100 % regenerovaného písku. U vzorku R100 jsou hodnoty BTEX trojnásobně větší než při použití nového ostřiva. Množství celkového plynu je také vyšší téměř dvojnásobně. Hodnoty PAH jsou na tom velmi podobně. Vzorek R100 má téměř dvojnásobně vyšší hodnoty než vzorek SP100. [32]

Tabulka 5 Obsah plynů a koncentrace BTEX/PAH z formovací směsi s organickým pojivem [32]

Číslo série	Objem plynů [dm <sup>3</sup> /kg form. směs.]	Obsah BTEX/PAH v plynech [mg/kg formovací směsi]					ΣPAH [mg/kg form. směs.]
		benzen	toluen	etyl-benzen	xyleny	ΣBTEX	
<b>SP100</b>	11,71	348,86	25,15	0	0	374,01	<b>9,90</b>
<b>R50P50</b>	17,75	896,08	55,77	0,71	2,03	954,59	<b>14,59</b>
<b>R100</b>	24,23	1,075,68	86,66	1,17	6,16	1169,67	<b>17,57</b>

Z výše uvedených důvodů dnes řada sléváren přechází na ekologická řešení jako je například technologie GEOPOL<sup>®</sup>. Trend snižování ekologických zátěží ve slévárnách je celosvětové téma, vyvíjí se tak nová šetrnější pojiva, která již nachází svá uplatnění v provozu. V USA se technologie GEOPOL<sup>®</sup> stala jednou z devíti technologií, jenž splňuje oficiální stanovisko na

změnu enviromentální stopy slévárenství a je dokonce upřednostňována proti technologii s vodním sklem. [32]

### **Regenerace geopolymerních směsí**

Regenerací ostřiva se myslí takový proces, který navrátí ostřivo z použité formovací směsi do provozu slévárny s vlastnostmi podobnými nebo lepšími než ostřivo nové. Důvodů k regeneraci ostřiva je několik. Cena nového ostřiva neustále roste a procesy spojené s úpravou ostřiv do kýžené podoby jsou stále ekonomicky nevýhodnější. Náklady na dopravu nového písku a odvoz upotřebených písků také působí nepříznivě na výslednou cenu. Poměrně velká snaha je v omezení vytváření nových lokalit k těžbě písků, které devastují krajinu. Posledním důvodem jsou technologické vlastnosti. Regenerované ostřivo má nižší nasákavost organických pojiv, zakulacenější zrna, nižší náchylnost k tvorbě vad z napětí atd. Na druhou stranu může také obsahovat větší množství prachových podílů a vyšší množství alkálií, což působí nepříznivě při využívání anorganických pojiv. Stupeň a typ regenerace se odvíjí jak od použitého pojiva, tak také od ekonomicko-technologických prostředků slévárny. [5; 26]

### **Suchá regenerace**

*Mechanická* – oddělování pojivových obálek třením a údery. Jedná se o nejuniverzálnější, investičně i provozně méně nákladnou technologii než ostatní postupy. Efektivnost mechanické regenerace závisí na typu použitého pojiva. Organická pojiva mají velmi nízkou adhezni pevnost, a proto se snadno regenerují. Vodní skla mají naopak velmi vysoké adhezni pevnosti a jsou obtížně regenerovatelné tímto postupem. Geopolymerní pojiva mají vysokou kohezni pevnost a dochází k odtržení pojiva od zrna a nedochází k porušení v oblasti pojivových můstků, jako je tomu u vodního skla. [5; 26]

*Pneumatická* – tření a rozrušování obálek zrn probíhá v proudu stlačeného vzduchu nárazem a třením např. o litinový talíř. Tato metoda je o něco efektivnější a přináší vyšší návratnost, intenzivnější zakulacování a pokles hranatosti. [5; 26]

### **Mokrý regenerace**

Metoda spočívá v praní zbytků pojiva z obálek ostřiva. Metoda je nejčastěji využívána pro směsi s vodním sklem. Tento postup přináší více nevýhod než kterákoliv jiná metoda regenerace. Největší problém spočívá ve vodním hospodářství. Voda rozpouští řadu solí ze směsí, které způsobují kontaminaci a je potřeba ji odsolovat a chemicky čistit. Pořizovací cena zařízení je velmi vysoká. Praný písek je navíc potřeba vysoušet. Dnes se technologie využívá minimálně. [5; 26]

### **Tepelná regenerace**

Technologie pracuje na principu spalování pojiva v přebytku vzduchu za teplot 450–900 °C. Využívá se výhradně pro organická spalitelná pojiva a drahá ostřiva, kdy je tepelná regenerace levnější než nový písek. Zařízení je velmi nákladné, jelikož musí obsahovat proces na ochlazování ostřiva a neutralizaci plynných zplodin. Výhodou je velmi kvalitní regenerace, snížení plynatosti a obsahu N<sub>2</sub>, což vede ke snížení dusíkových bodlin. Klesá také obsah síry. Zdrojem tepla může být buďto zemní plyn, infračervené záření nebo kyslíkové zařízení. Ze všech zmíněných postupů se ostřivo regenerované teplem nejvíce blíží novému ostřivu. [5; 26]

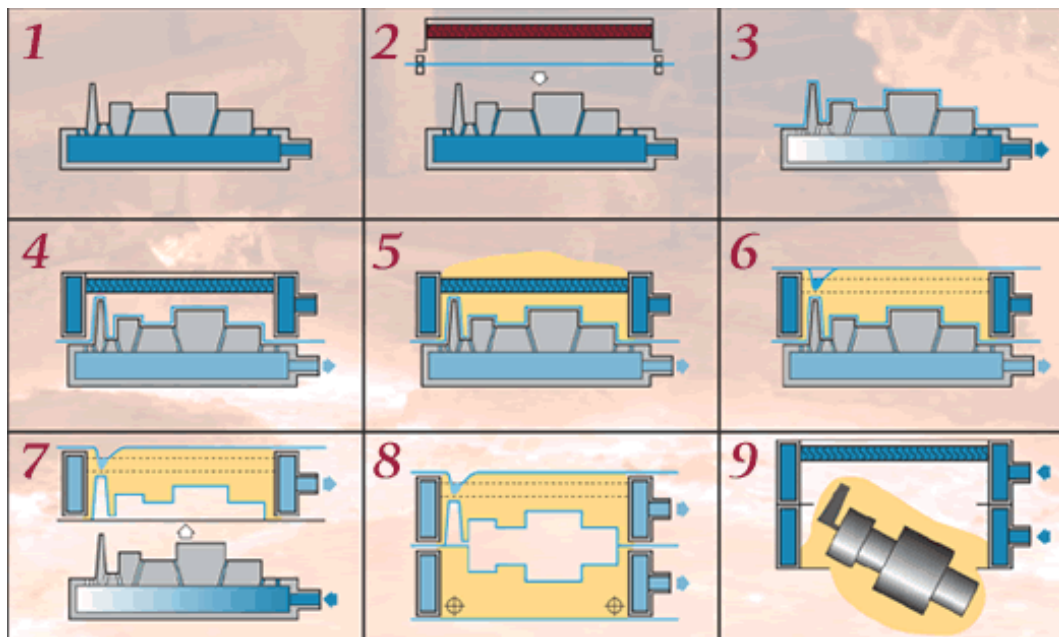


### 3.3 Směsi III. generace

Hnacím motorem přechodů z různých technologií, např. z organických na anorganická pojiva je téměř vždy ekologie, hygiena a bezpečnost. V některých konkrétních případech také mechanické vlastnosti jednotlivých technologií. To samé platí při III. generaci. Pojení ostřiva je způsobeno fyzikálními principy, a tudíž směs neobsahuje žádné pojivo. Odpadá znečištění ostřiva a prostředí. Nejčastěji zde řadíme vakuové, magnetické a zmrazené formy.

#### 3.3.1 Vakuová forma

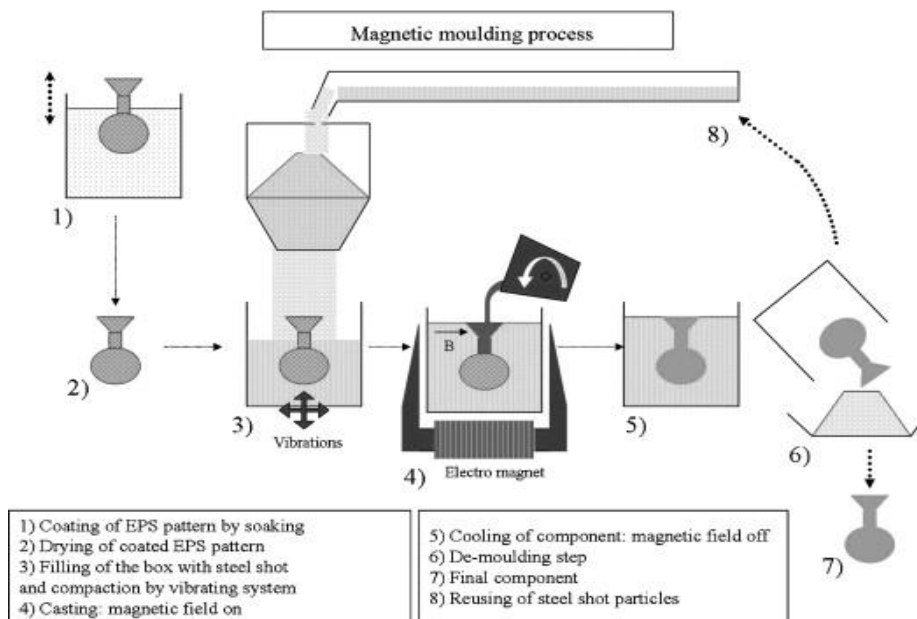
Někdy také označován jako V-proces. Princip spočívá v umístění speciálního prodyšného modelu na modelovou desku, pod kterou je vakuová skříň. Na něj je položena ohřátá (50-100 °C) termoplastická fólie (etylvinylacetát) o tloušťce 0,05-0,1 mm. Pod modelem se vytvoří vakuum (40-50 kPa) a fólie se těsně přisaje. Speciální model je poté osazen těsným formovacím rámem a celý se zasype suchým ostřivem, ztuhne a celá horní část je uzavřena překrytím další fólií. Jak model, tak rám jsou napojeny na vývěvy. Skrze formovací rám se odsaje vzduch, formy drží tvar a pod modelem se poté přeruší vakuum a tlak vzduchu v komoře pod modelem se vyrovná s atmosférickým. Dojde tím k oddělení formy od modelu. Druhá polovina formy se vyrobí totožným způsobem. Ke složení forem dochází za stálého připojení na vývěvy. Vršky forem se otáčejí na speciálních stolicích. Po složení formy, která je stále pod vakuem, se přistoupí k procesu lití. Při lití se fólie, která byla kolem modelu, spálí. Případné plyny (téměř zanedbatelné) projdou ostřivem pryč. Po odlití a ztuhnutí kovu se přeruší vakuum v rámech a forma se rozpadne. Ostřivo je možné znova použít až ze 100 %. Důležitá je jeho granulometrie, jelikož výrazně ovlivňuje pevnost, tvrdost, prodyšnost i odolnost proti penetraci kovu. Lící teplota je o 20-25 °C vyšší než při lití do klasických forem a rychlost lití je 1,5 - 2krát vyšší. Nedochází k téměř žádným exhalacím, poněvadž je využito jen čistého ostřiva bez pojiv. Přináší to ekologické řešení, avšak za cenu omezeného použití jednoduchých tvarů odlitků. Tuhnutí odlitků je výrazně pomalejší kvůli vakuu. [1; 2; 13]



Obr. 13 Schéma V-procesu [30]

### 3.3.2 Magnetická forma – metoda Wittmoser

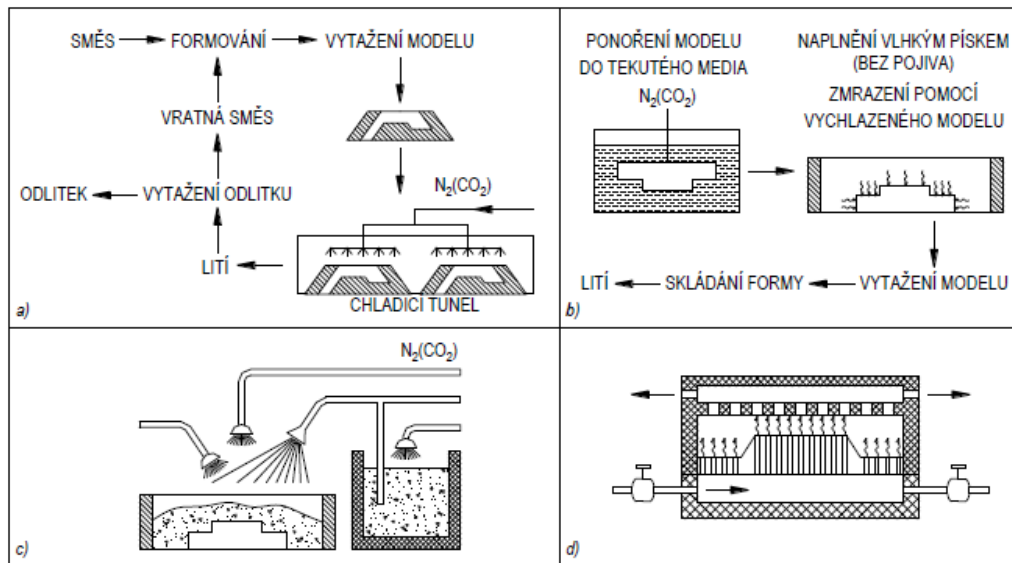
Tato technologie patří mezi první, kde se využilo fyzikálního principu formování. Pěnový jednorázový model je opatřen žáruvzdorným nátěrem a vložen do formovacího rámu. Ten je zasypan ostrivem ve formě ocelových broků. Vlivem elektromagnetického pole zaujímá kovové ostřívo svoji neměnnou polohu. Forma nabude určité pevnosti a je připravena k procesu lití, které probíhá přímo na pěnový model. Po odlití, ztuhnutí a zchladnutí se zruší magnetické pole a forma se rozpadne. Ocelové broky jsou po zchladnutí připraveny na další lití. Technologie není dodnes zvláště rozšířená, ale přináší rovněž výhody pro životní prostředí vzhledem k absenci chemických přísad, vytvořených odpadů apod. Zvýšený odvod tepla z odlitku přináší oproti předchozí metodě a pískovým formám jemnou mikrostrukturu. [1; 2; 13]



Obr. 14 Schéma formování magnetickou silou [31]

### 3.3.3 EFF - SET

Tato technologie využívá jako pojivo led. Směs je složena z ostříva, vody a někdy se používá také jílu. Princip zmrazování je prováděn například ponořováním forem a jader do lázně z kryogenní kapaliny, vstřelováním do podchlazeného jaderníku, profukování jádra nebo formy chladícím médiem. Výhodou této technologie je vysoká pevnost po zmrazení, s vyšší vlhkostí pevnost roste, vysoká rozpadavost forem, ekonomie, odpadá regenerace a možné využití drahých ostřív, poměrně vysoký ochlazovací účinek, což má za následek vyšší mechanické vlastnosti a lepší jakost povrchu. Nevýhodou je dokonalost modelového zařízení, omezená skladovatelnost jader a forem, bezpečnost práce při práci s kryogenní technikou. Technologie je použitelná pro výrobu odlitků z neželezných kovů. [1; 2; 13]



Obr. 15 Schéma formování mrazem [13]

### 3.4 Směsi IV. generace

Tyto formovací směsi využívají jako pojivo biogenní látky. Základem těchto pojiv jsou nejčastěji proteiny a většinu pojivového systému tvoří řetězce aminokyselin a polypeptidové molekuly. Nejznámější technologií je GMBOND, kterou vyvinula firma General Motors. Pojivo je ve formě prášku, které po rozpuštění ve vodě a smíchání s ostřivem a následnou dehydratací vytvoří pevnou a kvalitní formovací směs. Výhodou je nulová toxicita pojiva, utváření reverzibilních vazeb, a tedy jednoduchá recyklace, o 90% nižší emise těkavých organických látek, vysoká pevnost a kvalita povrchu odlitků. Nejčastěji se využívají pro odlitky z hliníkových slitin. [1; 2; 13]

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem práce bylo optimalizovat technologické vlastnosti formovací směsi s geopolymerním pojivem v provozu školní slévárny VUT v Brně. Práce byla rozdělena na dvě hlavní části - laboratorní testování a provozní zkouška. Laboratorní část zkoušek zahrnuje komplexnější hodnocení použitého ostřiva, regenerátu a formovací směsi. Pro posouzení pevnostních vlastností směsí byl navrhnout plánovaný experiment DOE v programu Minitab. Byl použit plný obecný faktoriál. V prvních krocích bylo provedeno obeznámení se s pracovištěm, zaznamenání nastavení dávkování mísiče, zjištění stavu mechanické otírky a odběr regenerátu pro zkoušku, nastavení odsávání, druh pojiva a tvrdidla, odběr nového písku.

*Okrajové podmínky:*

Meze experimentu pro dávkování pojiva a tvrdidla byly nastaveny s ohledem na možnosti mísiče společně se základním doporučeným dávkováním vycházející přímo z návodky výrobce.

Tabulka 6 Dávkování kapalných složek

	Doporučení výrobce	Možnosti mísiče
POJIVO	1,4 - 2 %	1,6 – 2 %
TVRDIDLO	14–18 %	bez omezení
REGENERÁT	Max 50 %	40 – 60 %

Z důvodu omezení mísiče bylo zvoleno dávkování pojiva pro všechny testy v rozmezí 1,6 – 2 % s krokem 0,2 %. Pro dávkování tvrdidla se zvolilo výrobcem doporučené rozmezí tedy 14–18 % s krokem 2 %. Dodavatel ostřiva uvádí, že lze využít 50 % regenerátu z primární regenerace. Byl tedy zvolen postupný nárůst množství regenerátu ve směsi tak, aby bylo lehce překročeno doporučených 50 %.

K přípravě laboratorních vzorků pro pevnosti v ohybu byly zvoleny:

- 1,6 %, 1,8 %, 2 % pojivo GEOPOL 618
- 14 %; 16 %; 18 % tvrdidlo SA 73
- 15, 30, 45, 60 % regenerátu
- 1, 2, 4, 24 h vytvrzování

Minitabem bylo zjištěno, že se jedná o 36 různých kombinací. Aby byly hodnoty statisticky významné, zvolily se 4 zkušební trámečky pro jednu kombinaci. Pro jeden daný poměr ostřiva se jedná o 144 zkušebních trámeček. Pro laboratorní testy pevnosti v ohybu je potřeba zhotovit 576 zkušebních trámeček.

K přípravě provozních testů pro pevnosti v ohybu byly zvoleny:

- 1,6 %, 1,8 %, 2 % pojivo GEOPOL 618
- 14 %; 16 %; 18 % tvrdidlo SA 73
- 40, 60 % regenerátu a 100 % nového ostřiva
- 1, 2, 4, 24 h vytvrzování

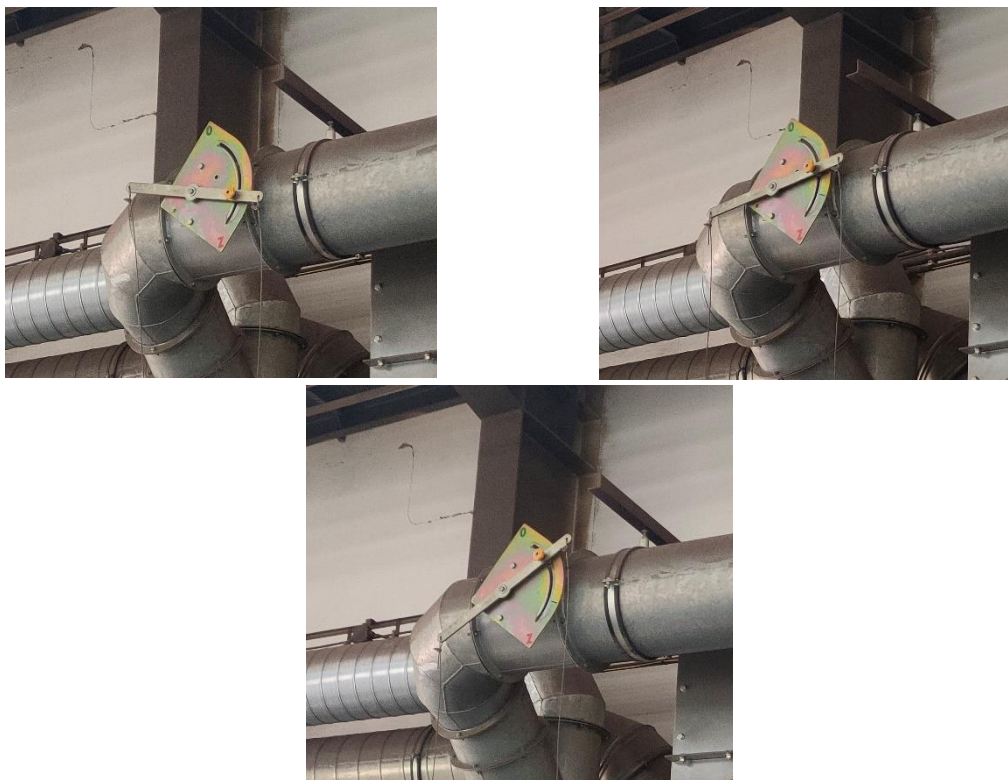
Pro provozní testy pevnosti v ohybu je potřeba zhotovit 432 zkušebních trámeček. Počet zkušebních trámeček pro jednu sérii je stejný jako v případě laboratorních experimentů. Každý poměr ostřiva je testován z hlediska statistiky.

## 4.1 Laboratorní testy

Sledované vlastnosti ostřiva jsou granulometrická skladba, množství plavitelných a spalitelných látek, elektrická vodivost a hodnota pH. Sledované mechanické vlastnosti jsou pevnost v ohybu a zpracovatelnost – životnost jenž jsou závislé na kombinacích pojivo/tvrdilo/ostřivo.

### 4.1.1 Stanovení vyplavitelných látek

Všechny podíly s menším průměrem zrna než 0,02 mm se nazývají vyplavitelné látky. Stanovení vyplavitelných látek je založeno na různé rychlosti sedimentace částic o různé velikosti. Zařízení na mechanickou regeneraci má nastavitelné množství vzduchu, kterým se profoukává regenerované ostřivo a zbavuje ho takto prachových podílů. Bylo otestováno trojí nastavení klapky přívodu vzduchu, viz. obrázek 16.



Obr. 16 Tři polohy klapky přívodu vzduchu

*Postup měření:*

Z každé várky se odebral vzorek o hmotnosti min. 100 g, který se vysušil na konstantní hmotnost. Do kádinky se navážilo  $50 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$  vysušeného vzorku. Přidalo se 250 ml destilované vody a 10 ml 1% roztoku NaOH. Obsah kádinky se nechal 4-5 min. povařit a poté 10 minut míchat. Po zchladnutí na pokojovou teplotu se doplnila kádinka ostrým proudem vody 1-2 cm pod okraj. Po deseti minutách stání se stáhla suspenze násoskou (obr. 17). Opět se doplnilo 10 ml roztoku NaOH a kádinka byla doplněna ostrým proudem vody. Po 10 minutách sedimentace se stáhla suspenze násoskou. Tento postup se opakoval do té doby, než byla hladina nad ostřivem čirá. V dalších krocích se nepřidával roztok NaOH a doba sedimentace se zkrátila na 5 minut. Po posledním stažení byl přebytek vody odstraněn a ostřivo bylo sušeno po dobu 2 hod. při  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vysušený vzorek byl zvážen a výsledek zaznamenán.

*Vyhodnocení:*

$$ML = \frac{m_s - m_o}{m_s} * 100 [\%] \quad (4.1)$$

kde: VL – vyplavitelné látky

$m_s$  – hmotnost vysušeného ostřiva před plavením [g]

$m_o$  – hmotnost vysušeného ostřiva po plavení [g]

Tabulka 7 Naměřené a vypočítané hodnoty vyplavitelných podílů

druh ostřiva/ poloha ventilu	hmotnost před plavením [g]	hmotnost po plavení [g]	vyplavitelné látky [%]
REG. - 1/4	50,02	49,31	1,38
REG. - 1/2	50,01	49,35	1,30
REG. - 3/4	50,03	49,34	1,32
BK 27	100,16	99,91	0,25

Dle vzorce 5.2. bylo zjištěno množství vyplavitelných látek. Všechny výsledky jsou zaznamenány v tabulce č. 6. Lze pozorovat, že nastavení ventilu profuku nemá na množství vyplavitelných látek vliv. Ventil se ovšem nesmí otevřít úplně, jinak dochází ke vtahování samotných zrn ostřiva a ucpávání filtračního zařízení a ztrátě ostřiva. Poměrně vysoká hodnota plavitelných látek může způsobovat horší kontakt pojiva se zrny ostřiva a tím zvyšovat spotřebu pojiva.

Bylo také testováno čisté ostřivo BK 27, jehož plavitelné podíly jsou přibližně 5x menší než u ostřiva regenerovaného. Výrobce udávané množství vyplavitelných látek je max. 0,2 %. Drobný rozdíl mohl být způsoben nepřesnou výškou hladiny v kádince, malá vzdálenost ústí násosky od hladiny písku a nasávání větších částic.

#### 4.1.2 Granulometrická skladba ostřiva

Vlastnosti formovacích směsí jsou velmi závislé na granulometrické skladbě ostřiva. Sleduje se hodnota průměrné zrnitosti -  $d_{50}$ ,  $d_{25}$  a  $d_{75}$ , jenž odpovídají průměrům ok sít, kterým odpovídá 25% a 75% z celkové hmotnosti ostřiva, stupeň stejnorodosti S, kterým udává pravidelnost zrnění. Dále číslo zrnitosti podle AFS a log W. Všechny tyto hodnoty je možno odečíst ze součtově křivky zrnitosti a pomocí výpočtů.

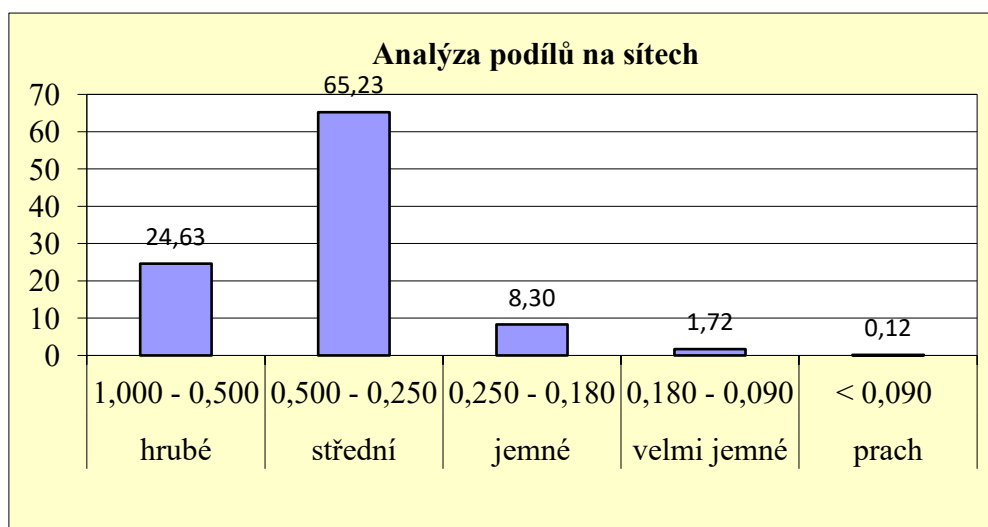
*Postup měření:*

Na experiment bylo použito 100 g nového ostřiva (tab. 8) a 100 g regenerátu (tab. 9) po plavení, aby se písek zbavil podílů menších než 0,02 mm. Písek je na speciálním zařízení proséván sadou sít. Byl použit prosévací přístroj firmy Fritsch typ analysete 3 SPARTAN s dobou prosévání 10 min. Po ukončení prosévání se odebraly jednotlivá síta a frakce na nich získané byly přeneseny na papír a zváženy s přesností na 0,01 g. V tabulce č.8 a č.9 jsou uvedeny velikosti ok sít a zůstatky na sítěch.

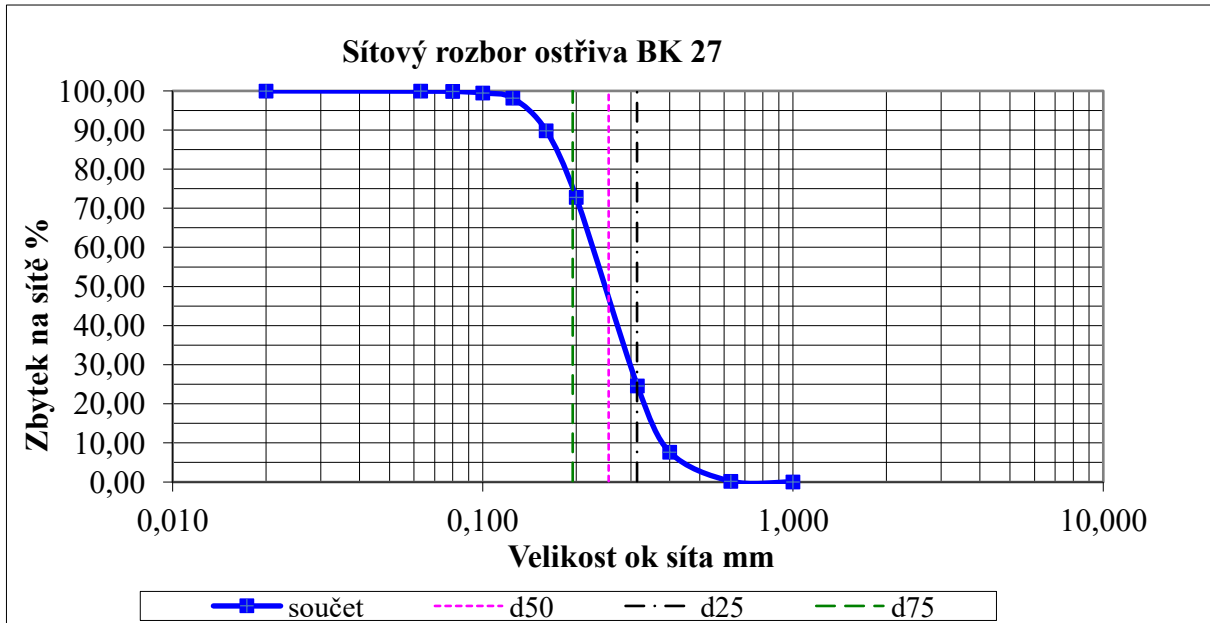
*Vyhodnocení:*

Tabulka 8 Hodnoty frakcí na sítěch a vypočtené sledované hodnoty

Síta	zbytek		součet		
[mm]	[g]	[%]	[%]		
1,000	0,01	0,01	0,0	$d_{50}$ mm:	0,25
0,630	0,21	0,21	0,2	$d_{75}$ mm:	0,19
0,400	7,46	7,47	7,7	$d_{25}$ mm:	0,31
0,315	16,93	16,95	24,6	Pravidelnost zrnitosti ostřiva $d_{75}/d_{25}$ %	62,02
0,200	48,12	48,16	72,8	AFS	54
0,160	17,05	17,07	89,9	Podíly ostřiva pod 0,090 mm	0,53
0,125	8,29	8,30	98,2	log w	63,3
0,100	1,31	1,31	99,5	log w %	60,8
0,080	0,41	0,41	99,9	$r_s$ Sypná obj. hmotnost ostřiva $g/cm^3$	0
0,063	0,06	0,06	99,9	$S_{th}$ Teoretický povrch $cm^2/g$ :	95,09
0,020	0,06	0,06	100,0	$MK_{calc}$ Střední velikost zrn mm	0,26
Celkem	99,91	100		$n_{th}$ Teoretický specifický počet zrn 1000 ks/g	90



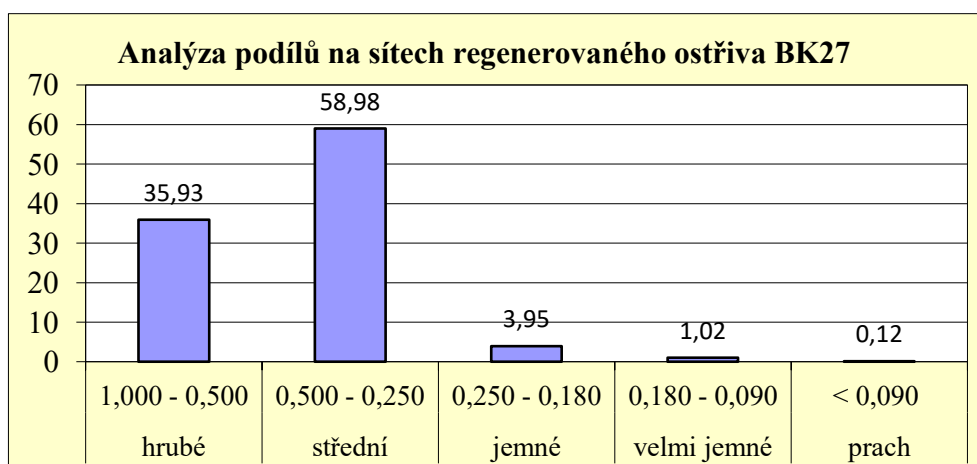
Obr. 17 Graf analýzy podílů na sítěch ostřiva BK 27



Obr. 18 Graf analýzy podílů na sítích ostřiva BK 27

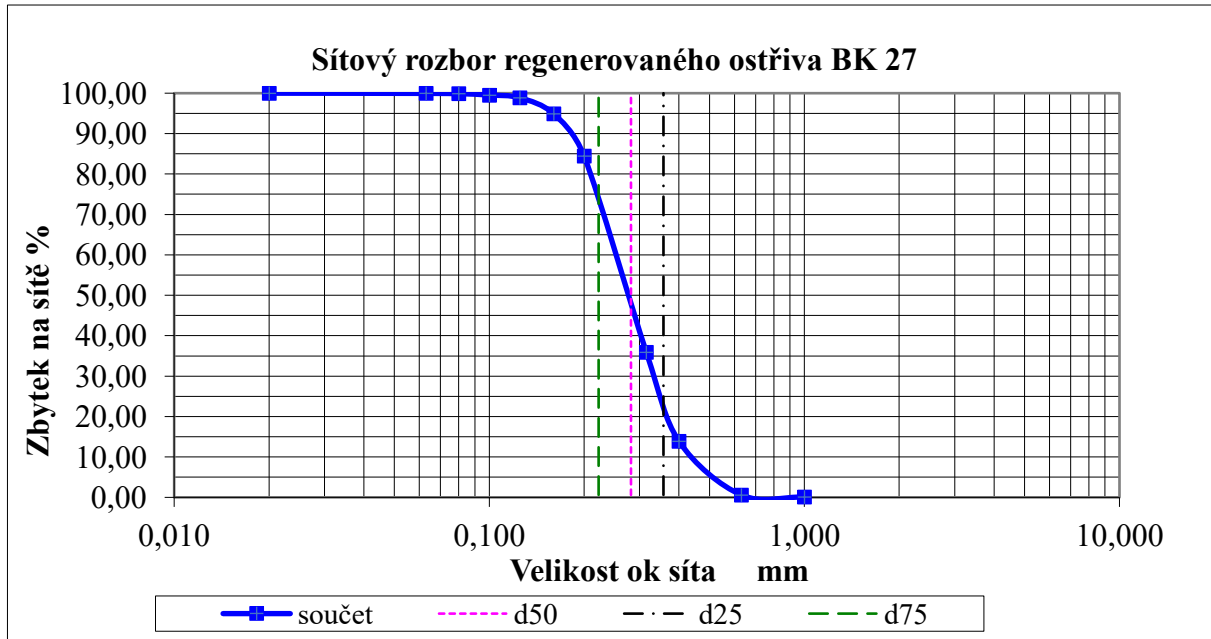
Tabulka 9 Hodnoty frakcí na sítích a vypočtené sledované hodnoty regenerovaného ostřiva

Síta	zbytek		součet		
[mm]	[g]	[%]	[%]		
1,000	0,08	0,08	0,1	d <sub>50</sub> mm:	0,28
0,630	0,52	0,53	0,6	d <sub>75</sub> mm:	0,22
0,400	13,12	13,28	13,9	d <sub>25</sub> mm:	0,36
0,315	21,79	22,05	35,9	Pravidelnost zrnitosti ostřiva d <sub>75</sub> /d <sub>25</sub> %	62,26
0,200	47,92	48,49	84,4	AFS	48
0,160	10,36	10,48	94,9	Podíly ostřiva pod 0,090 mm	0,46
0,125	3,90	3,95	98,9	log w	61,3
0,100	0,68	0,69	99,5	log w %	58,9
0,080	0,33	0,33	99,9	r <sub>s</sub> Sypná obj. hmotnost ostřiva g/cm <sup>3</sup>	0
0,063	0,07	0,07	99,9	S <sub>th</sub> Teoretický povrch cm <sup>2</sup> /g:	84,63
0,020	0,05	0,05	100,0	MK <sub>calc</sub> Střední velikost zrn mm	0,30
Celkem	98,82	100		n <sub>th</sub> Teoretický specifický počet zrn 1000 ks/g	66



Obr. 19 Graf analýzy podílů na sítích regenerovaného ostřiva BK 27





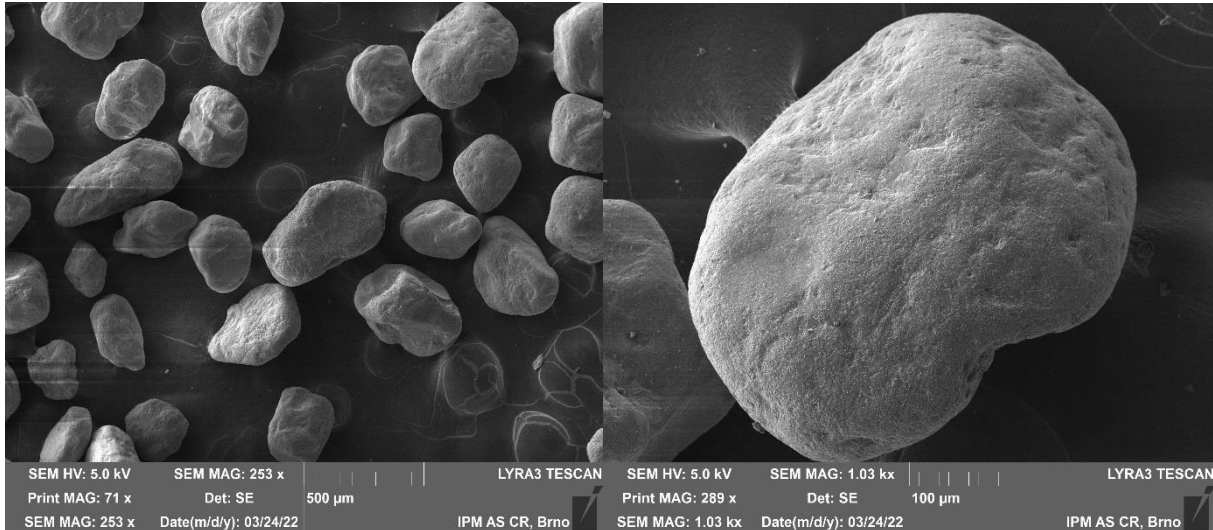
Obr. 20 Sítový rozbor regenerovaného ostřiva BK 27

Dle výsledků sítového rozboru lze potvrdit, že čisté ostřivo BK 27, má stejnou průměrnou hodnotu zrnitosti jakou udává výrobce viz. příloha č.5. Čím více se blíží pravidelnost zrnitosti hodnotě 100, tím více má ostřivo monofrakční charakter. Nový písek i regenerát mají tuto hodnotu téměř totožnou. Log W také udává charakter ostřiva a u obou ostřiv jsou hodnoty podobné. Obdobou střední hodnoty  $d_{50}$  je hodnota AFS, která vyjadřuje jedním číslem granulometrický charakter ostřiva.

V porovnání má regenerát o něco vyšší hodnotu středního zrna a celá křivka je posunuta směrem doprava. Pravidelnost zrnitosti, která udává, jak moc je ostřivo monofrakční, je u obou typů ostřiva velmi podobné. Čím je hodnota blíže 100, tím má ostřivo více monofrakční charakter. Nejpatrnější rozdíl je v množství hrubých zrn zachycených na sítích 1 mm až 0,5 mm. Je nutno brát také v potaz, že před sítovým rozбором bylo ostřivo proséváno přes síto s oky velikosti 2 mm, jenž reprezentuje stejný postup, který se uplatňuje při plnění mísiče regenerovaným ostřivem, aby došlo k odstranění hrubých podílů.

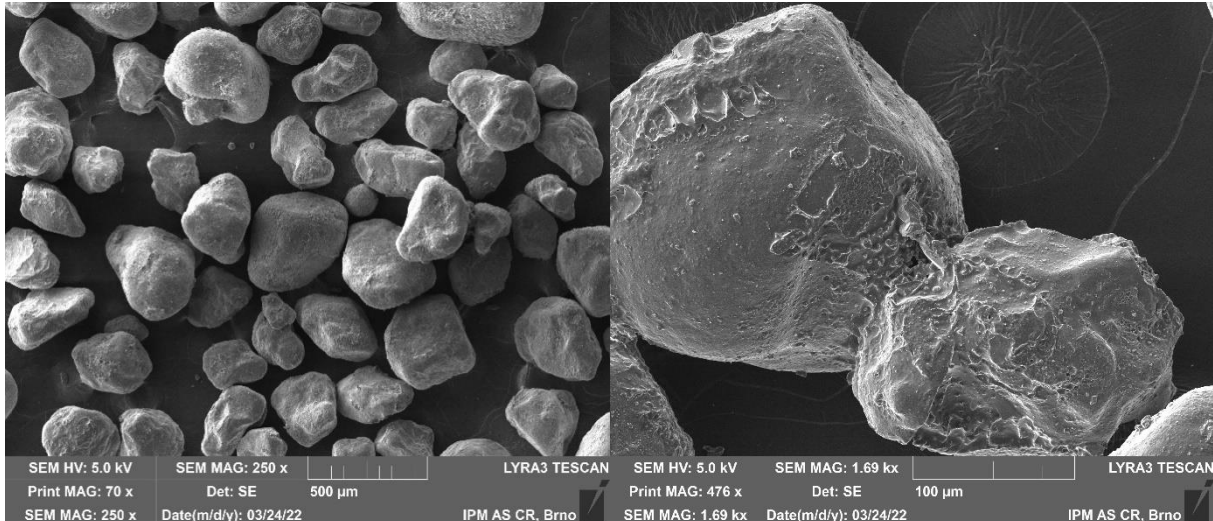
### 4.1.3 Hodnocení zrn ostřiva

Pro porovnání zrn nového a regenerovaného ostřiva byl použit rastrovací elektronový mikroskop Tescan LYRA 3 XMU FEG/SEMxFIB. Tento elektronový mikroskop je také vybaven fokusovaným sloupcem iontového paprsku, mikromanipulátorem a systémem vstřikování plynu.



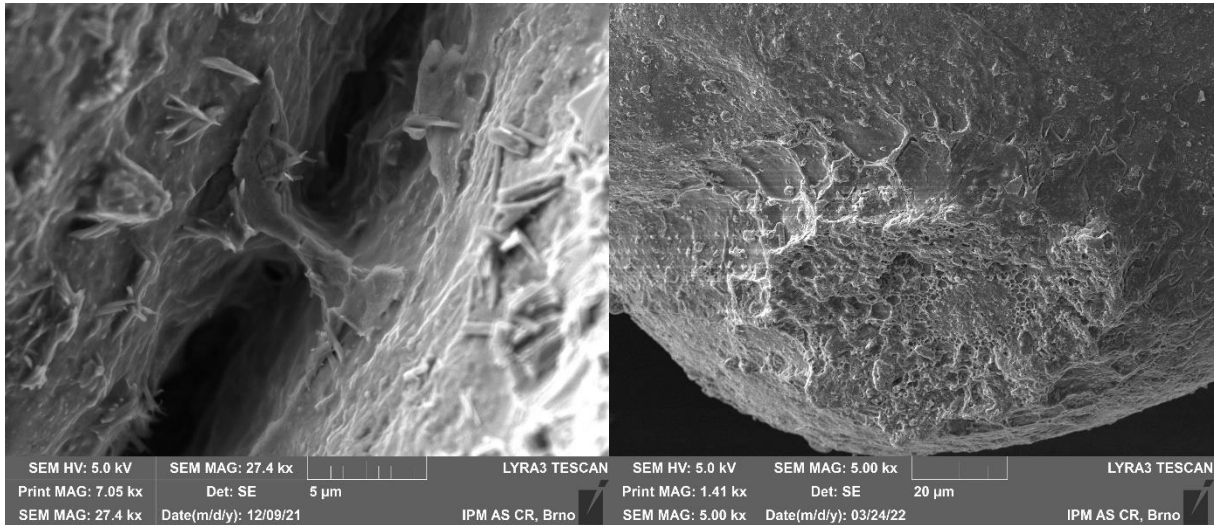
Obr. 21 Ukázka ostřiva BK 27 a detail zrna

Ostřívo BK 27 má poměrně pravidelný charakter, zrna jsou kulatá a téměř bez nečistot.

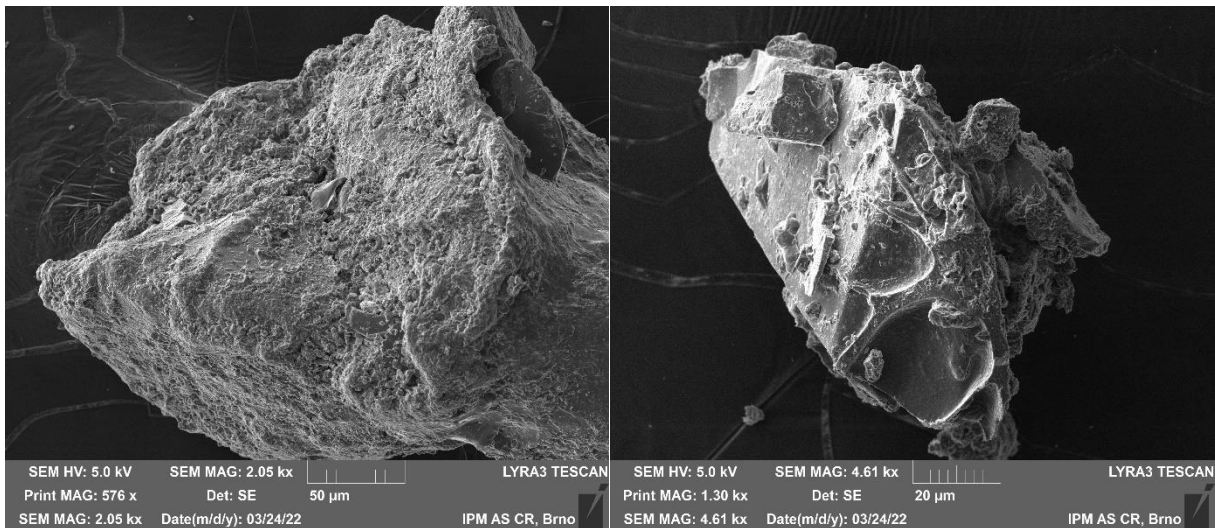


Obr. 22 Snímek regenerátu BK 27 s detailem dvou spojených zrn

Regenerované ostřívo si stále zachovává kulatý tvar zrna, obsahuje ovšem větší množství nečistot, jako jsou zbytky pojiva, nátěry, kovy a další části. Na zrnech se nevyskytují trhliny ani póry, které by zvyšovaly nasákavost pojiva.



Obr. 23 Detail pojivového můstku a adhezni odtržení můstku.



Obr. 24 Nečistoty obsažené v regenerovaném ostřivu

Na snímku 24 lze pozorovat detail pojivového můstku mezi dvěma zrny ostřiva. Snímek vedle ukazuje adhezni odtržení, které je pozorovatelné na několika zrnech. Mechanickou otírkou se tyto útvary obroušují.

#### 4.1.4 Obsah spalitelných látek

Formovací směs, ať už před nebo po regeneraci, obsahuje teplem rozložitelné látky v určitém množství, které udává kvalitu regenerace. K testování byly odebrány tři vzorky regenerovaného ostřiva a poté tři vzorky vytvrzené formovací směsi bez regenerace.

##### Postup měření:

Do porcelánových kelímků byly vsypány odebrané vzorky. Vzorky před regenerací byly ručně nadrceny, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí v žíhací peci. K žíhání byla použita žíhací pec s automatickou regulací. Žíhací teplota byla nastavena na 950 °C a doba žíhání byla 1 hodinu. Před žíháním byly všechny vzorky vysušeny na konstantní hmotnost. Po vyžíhání byly vzorky uloženy v exikátoru, aby nedošlo k úletu hořících látek, popřípadě navlhnutí a tím ke zkreslení výsledků. K vážení byla využita váha s přesností 0,001 g.



Obr. 25 Žíhací pec



Obr. 26 Vzorek formovací směsi v žíhacím kelímku

##### Vyhodnocení:

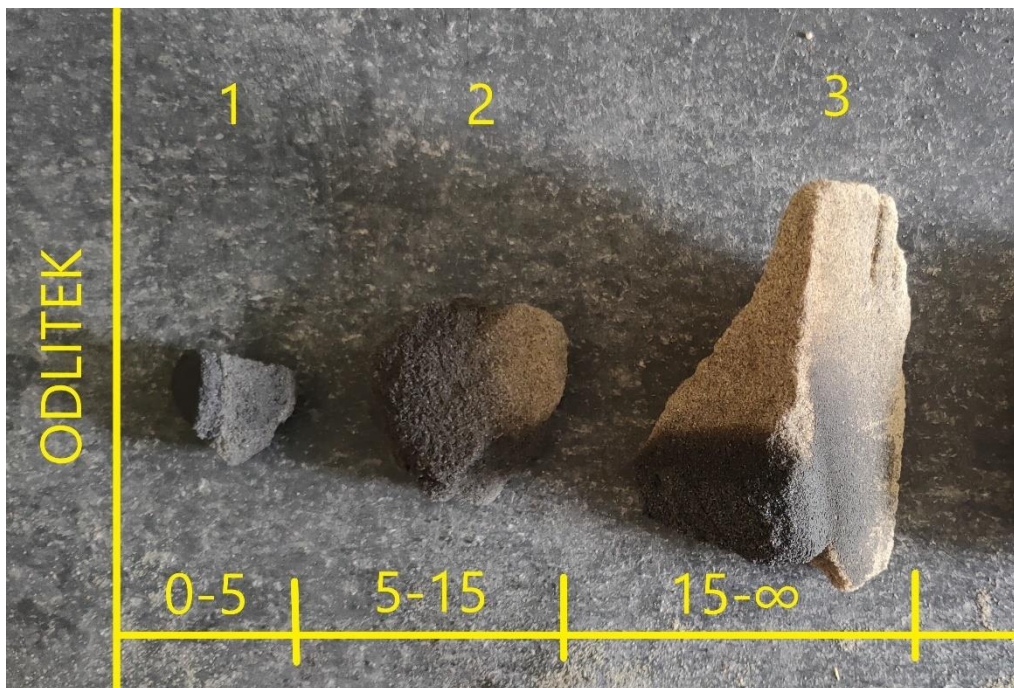
Tabulka 10 Množství spalitelných látek

ostřivo	$m_{\text{před}}$ [g]	$m_{\text{po}}$ [g]	spalitelné [g]	%
100 % REG.	10,002	9,918	0,084	<b>0,84</b>
	9,998	9,915	0,083	<b>0,83</b>
	10,001	9,92	0,081	<b>0,81</b>
				<b>0,83</b>

ostřivo	$m_{\text{před}}$ [g]	$m_{\text{po}}$ [g]	spalitelné [g]	%
100 % BK27	4,317	4,268	0,049	<b>1,14</b>
	4,956	4,901	0,055	<b>1,11</b>
	5,012	4,945	0,067	<b>1,34</b>
				<b>1,19</b>

Vzorky, které prošly regenerací, obsahují přibližně o 30 % méně spalitelných látek než směs bez regenerace. Je to dáno mechanickou otírkou, která odstraňuje určitý podíl spalitelných látek a následného odprášení proudem vzduchu. A také tepelné ovlivnění forem, ze kterých se regenerát získává.

Druhý test byl proveden v provozu školní slévárny. Vzorky byly odebrány z formy, do které byl odlit kov. K měření se použila formovací směs, složená ze 40 % regenerátu a 60 % nového písku, která byla v přímém kontaktu s taveninou a přibližně do vzdálenosti 5 cm od odlitku (vzorek č. 1), směs částečně ovlivněná ve vzdálenosti 5-15 cm od odlitku (vzorek č. 2), směs, která se nacházela v blízkosti rámu formy a byla minimálně teplotě ovlivněná a přibližně 15 a více cm od odlitku (vzorek č. 3).



Obr. 27 Vzorky formovací směsi s různou vzdáleností od odlitku

Tabulka 11 Hodnoty spalitelných látek formovací směsi z provozu školní slévárny

č.v	Poměr ostřiva	Vzdálenost [mm]	pH	Vodivost [uS/cm]	$m_{\text{před}}$ [g]	$m_{\text{po}}$ [g]	spalitelné [g]	%
1	40 % REG. 60 % BK 27	100	9,61	114,5	3,456	3,447	0,009	<b>0,26</b>
2	40 % REG. 60 % BK 27	50	10,25	369	3,747	3,724	0,023	<b>0,61</b>
3	40 % REG. 60 % BK 27	20-30	10,41	687	3,505	3,462	0,043	<b>1,23</b>

Obsah spalitelných látek společně s elektrickou vodivostí klesá se zvyšujícím se tepelným působením na směs. Chemická podstat (pH), je ve všech případech téměř stejná kromě vzorku č. 1, u kterého došlo ke spálení drtivé většiny pojivových látek.

#### 4.1.5 pH vodného výluhu

Hodnota pH stanovuje chemickou charakteristiku ostřiva a popřípadě množství různých příměsí jako jsou živce, kovy, uhličitany atd. Jakékoliv nečistoty, zbytky pojivového systému, zbytky nátěrů, kyslíčků kovů atd. ve velké míře ovlivňují chemickou povahu ostřiva.

*Postup měření:*

K testování bylo zvoleno čisté ostřivo BK 27 a regenerované ostřivo, ale také poměry nového ostřiva a regenerátu, jež odpovídají poměrům, které se využívaly při měření pevnosti v ohybu. Pro samotné měření bylo odebráno  $10 \pm 0,1$  g zkoumaného ostřiva. Do kádinky bylo vsypáno ostřivo a přidáno 200 ml destilované vody. Pomocí lopatkového míchadla se po dobu 5 minut směs míchala. K měření pH se využil přístroj firmy inoLab pH/Cond level 1. Před měřením bylo potřeba přístroj kalibrovat pomocí tzv. bufferů s předepsanou hodnotou pH. Po kalibraci byla sonda vložena do výluhu a odečetla se hodnota na přístroji.

*Vyhodnocení:*

Tabulka 12 Hodnoty pH ostřiva

ostřivo	pH	teplota [°C]
100 % BK 27	7,05	21,4
15 % REG 85 % BK 27	8,45	21,7
30 % REG 70 % BK 27	9,67	21,5
45 % REG 55 % BK 27	9,78	21,8
60 % REG 40 % BK 27	9,93	21,7
100 % REGENERÁT	10,52	21,8

Čisté křemenné ostřivo BK 27 má téměř neutrální charakter, což souhlasí s charakteristikou udávanou dodavatelem ostřiva (pH = 6,9). Jelikož je ve školní slévárně pouze jednostupňová regenerace s mechanickou otírkou, obsahuje regenerát zbytky pojiva i tvrdidla. Tyto složky jsou obě silně zásadité, a proto lze pozorovat rostoucí hodnotu pH s rostoucím množstvím regenerátu. Vyšší hodnota pH může indikovat silnější znečištění a poté ovlivnění vlastností samotné směsi.

#### 4.1.6 Elektrická vodivost vodného výluhu

Hodnota elektrické vodivosti udává informaci o množství příměsí, které zvyšují vodivost, jako jsou soli, zbytky kovu, nátěry a další. Lze také získat informaci o čistotě ostřiva a kvalitě jeho úpravy.

*Postup měření:*

Pro testování byly zvoleny stejné vzorky jako pro test pH vodného výluhu, tedy čisté ostřivo BK 27, regenerované ostřivo, dále různé poměry dvou typů ostřiv. Pro samotné měření bylo odebráno  $10 \pm 0,1$  g zkoumaného ostřiva. Do kádinky se vsypalo ostřivo a přidalo 200 ml destilované vody. Pomocí lopatkového míchadla se po dobu 5 minut směs míchá. K měření elektrické vodivosti byl použit přístroj firmy inoLab pH/Cond level 1.

*Vyhodnocení:*

Tabulka 13 hodnoty elektrické vodivosti ostřiva

<b>ostřivo</b>	<b>el. vodivost [<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>]</b>	<b>teplota [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>
100 % BK 27	11,3	21,4
15 % REG 85 % BK 27	71,6	21,7
30 % REG 70 % BK 27	133,2	21,5
45 % REG 55 % BK 27	188,4	21,8
60 % REG 40 % BK 27	257	21,7
100 % REG (26.3.2022)	458	21,8
100 % REG (14.3.2022)	680	21,4

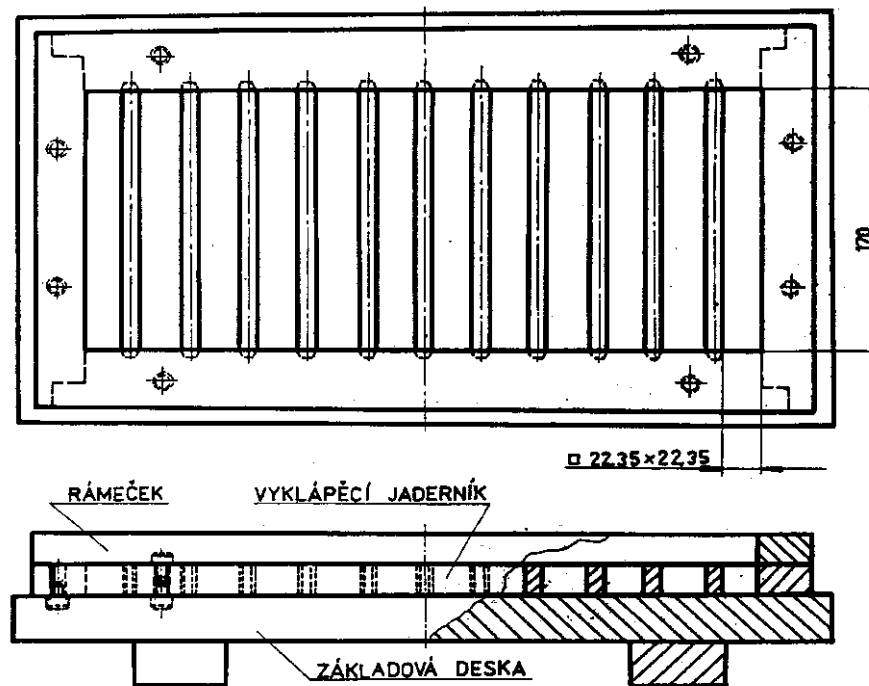
Dle tabulky 12 má čisté ostřivo BK 27 velmi nízkou vodivost z důvodu absence nečistot a příměsí. S rostoucím obsahem regenerovaného ostřiva roste elektrická vodivost téměř lineárně. Bylo zjištěno, že elektrická vodivost ostřiva je v provozu školní slévárny velmi proměnlivá, což značí rozdílnou kvalitu regenerátu. Jednou z příčin je nekonstantní velikost odlitků odlévaných ve slévárně, což má za následek různé množství písku, které bylo při odlévání vystaveno tepelnému působení taveniny. Takto tepelně ovlivněné ostřivo má nižší hodnotu elektrické vodivosti než ostřivo, které nebylo vystaveno tepelnému působení, například výplňová formovací směs. To lze pozorovat na hodnotách měřených v rámci dvou týdnů. Dne 14.3.2022 byla změřena hodnota, která velmi přesahuje výrobcem doporučenou hodnotu elektrické vodivosti regenerovaného ostřiva. O dva týdny později byla hodnota elektrické vodivosti na přípustné hranici.

#### 4.1.7 Stanovení pevnosti v ohybu

Pevnost je základním parametrem pro hodnocení formovacích směsí. Samotvrdnoucí směsi lze posuzovat dle pevnosti v ohybu nebo v tlaku. V experimentální části byla zvolena pevnost v ohybu. Dalším parametrem je časový interval, ve kterém se pevnost měří – 1, 2, 4, 24 hodin.

*Postup měření:*

K výrobě směsi byl použit kuchyňský míšič KENWOOD. Do míšiče bylo naváženo  $4000 \pm 10$  g a pomocí digitální váhy odměřeno dané množství pojiva a tvrdidla dle dané série. Po zapnutí míšiče a homogenizaci ostříva bylo přidáno tvrdidlo a 30 sekund mícháno, poté bylo přidáno pojivo, které bylo mícháno 45 sekund. Hotová směs byla nasypána do speciálního dřevěného jaderníku (obr. 28), zhutněna pryžovou palicí a povrch jaderníku zarovnan do hladka (obr. 29). Po vytvrzení byly jaderníky rozebrány a zkušební trámečky přeraženy v intervalech 1, 2, 4, 24 hodin od zhotovení. Výsledná hodnota byla odečtena z měřícího přístroje typu LRU – D (obr. 30).



Obr. 28 Dřevěný jaderník pro přípravu ST trámečků [34]





Obr. 29 Dřevěný jaderník s vytvrzenými trámečky



Obr. 30 Pevnostní přístroj LRU-D s ohybovými čelistmi

*Způsob vyhodnocení:*

Působením ohybového zatížení na normalizovaný zhutněný trámeček dojde k jeho destrukci. Zatížení při namáhání na ohyb je vyjádřeno ze vztahu:

$$P_o = \frac{M_o}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (4.1)$$

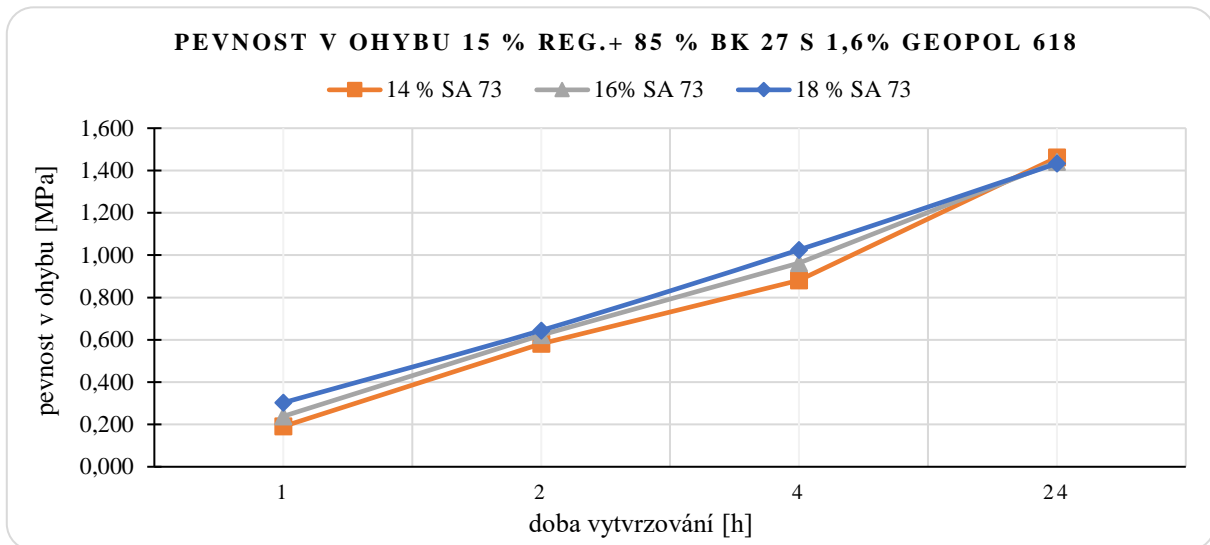
Kde:  $P_o$  – pevnost v ohybu [MPa]

$M_o$  – ohybový moment vyvozený zatížením [N.m]

$W_o$  – moment odporu v ohybu zkušebního tělíska [m<sup>3</sup>]

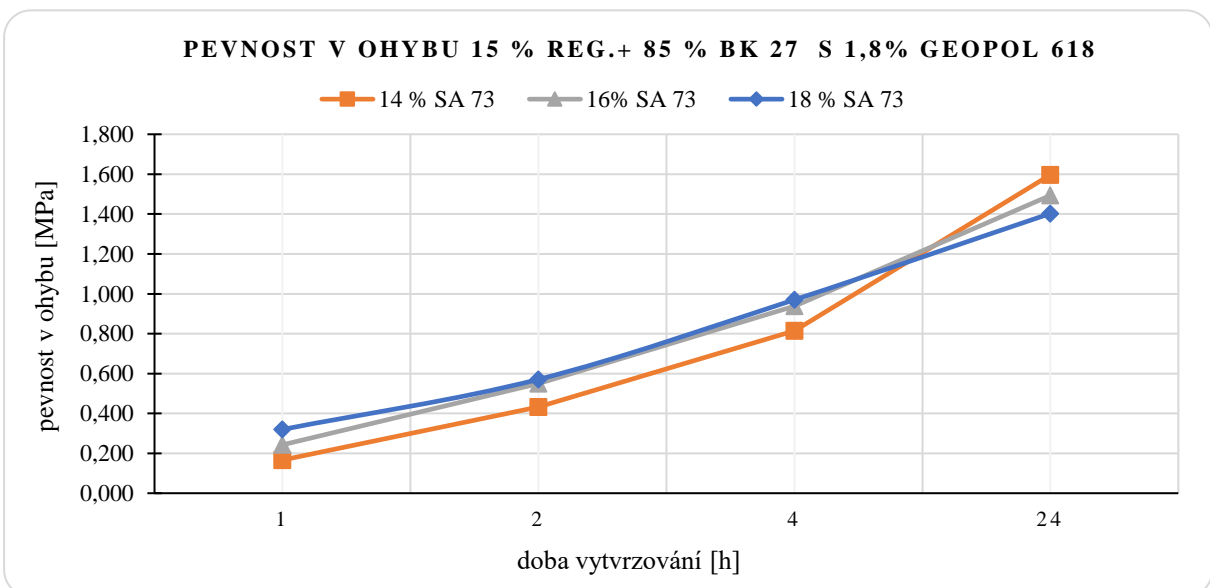
### Vyhodnocení směsí s 15 % regenerátu

Níže uvedené výsledky vycházejí z devíti různých kombinací pojiva – 1,6; 1,8; 2 % a tvrdidla 14; 16; 18 %.



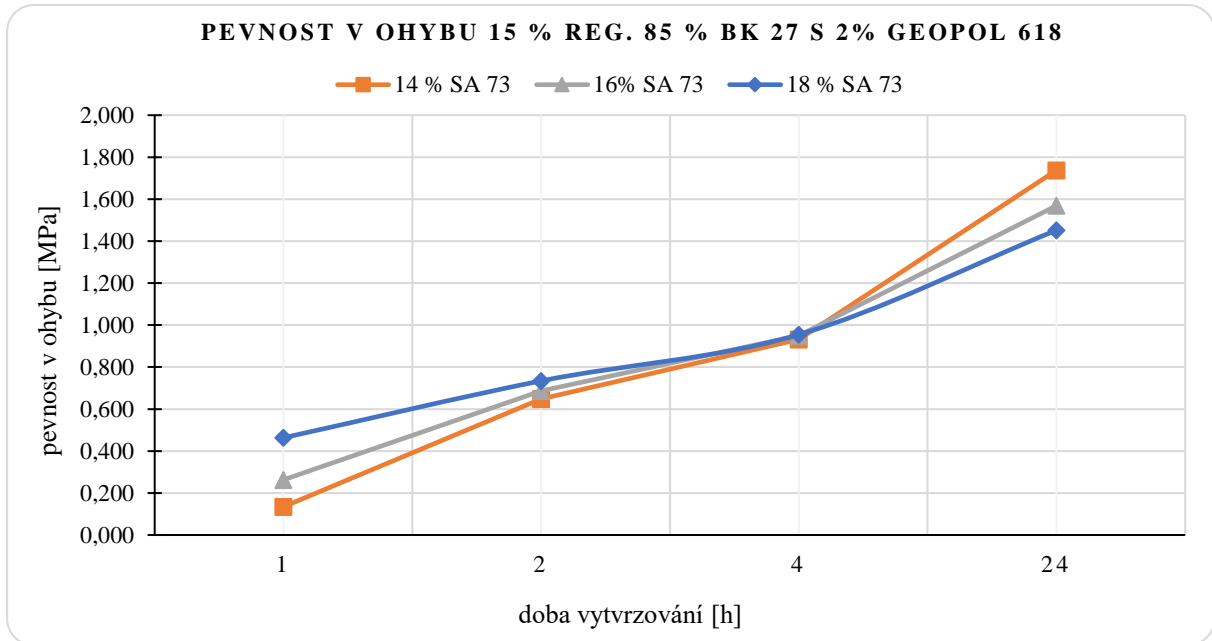
Obr. 31 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Dle grafu 31 lze pozorovat, že nárůst pevnosti za čas je při všech třech koncentracích tvrdidla téměř lineární. Rozdíl průběhu pevnosti směsi s obsahem 14 % nebo 18 % tvrdidla je zanedbatelný a konečné pevnosti po 24 hodinách jsou skoro totožné. V tomto případě se ukazuje, že dávkování tvrdidla nemělo význam



Obr. 32 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Z grafu 32 vyplývá, že nárůsty pevností jsou pro všechny směsi téměř totožné. Konečná pevnost po 24 hodinách je u směsi s 14 % o 200 kPa vyšší než u směsi s 18 % tvrdidla.



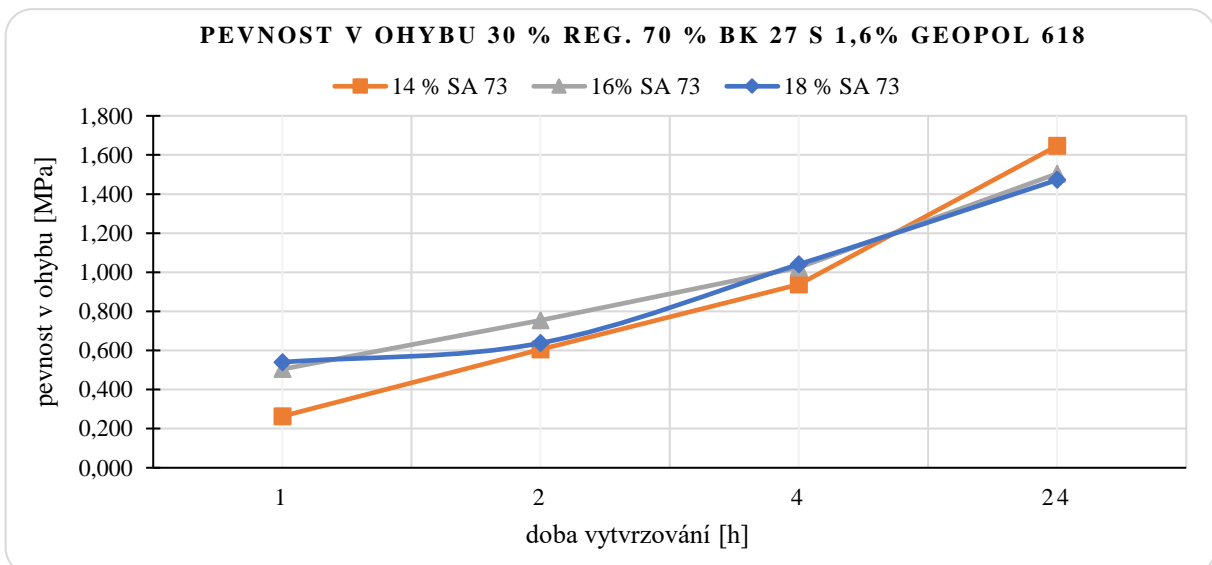
Obr. 33 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

U směsí z grafu 33, je možné pozorovat vyšší rozdíl pevnosti (300 kPa) po první hodině vytvrzení u vzorků s 14 % a 18 % tvrdidla. Směs s 14 % tvrdidla má o 300 kPa vyšší pevnost po 24 hodinách než směs s 18 % tvrdidla. Ze všech tří sérií dosahuje směs s dávkováním 2 % pojiva pevností vyšších jak 1,4MPa. Opakovaně bylo zaznamenáno, že konečné pevnosti měřené při 24 hodin jsou u nižších dávkování tvrdidla vyšší a opačně.

Výsledky plánovaného experimentu ukázaly, že celá série vzorků má koeficient spolehlivosti  $R^2 = 99,05 \%$ . Nejvýznamnější faktor ovlivňující pevnost je doba vytvrzování, obsah pojiva a interakce tvrdidla s časem vytvrzování. Směrodatná odchylka je přibližně 100 kPa. Výsledky jsou zobrazeny v příloze č. 7.

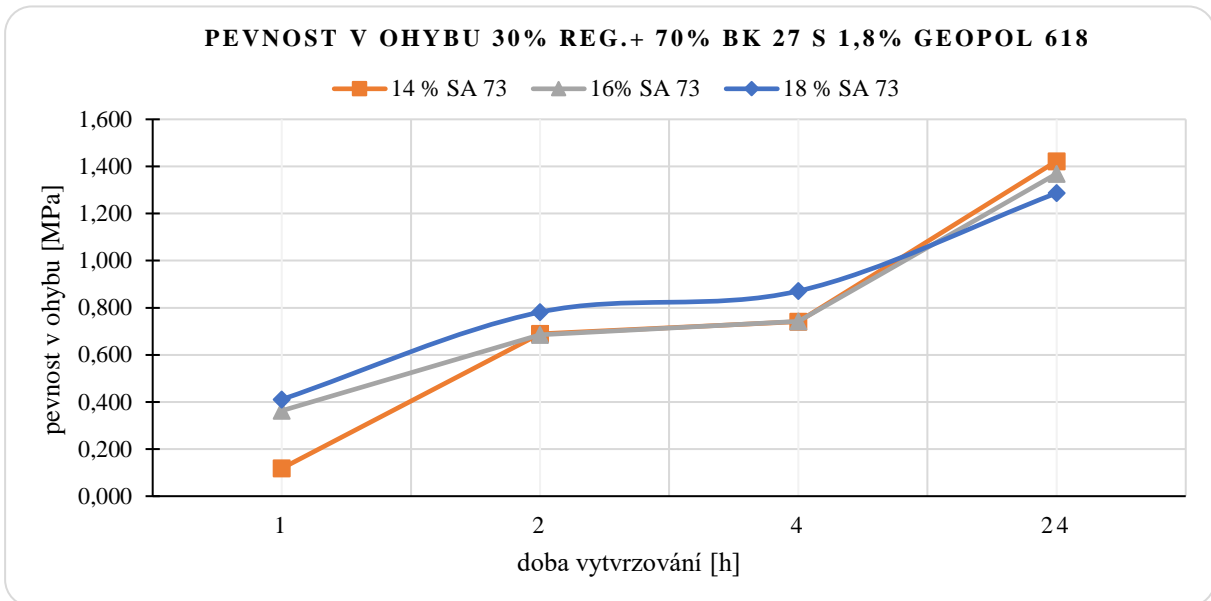
#### *Vyhodnocení směsí s 30 % regenerátu*

Níže uvedené výsledky vycházejí z devíti různých kombinací pojiva – 1,6; 1,8; 2 % a tvrdidla 14; 16; 18 %.



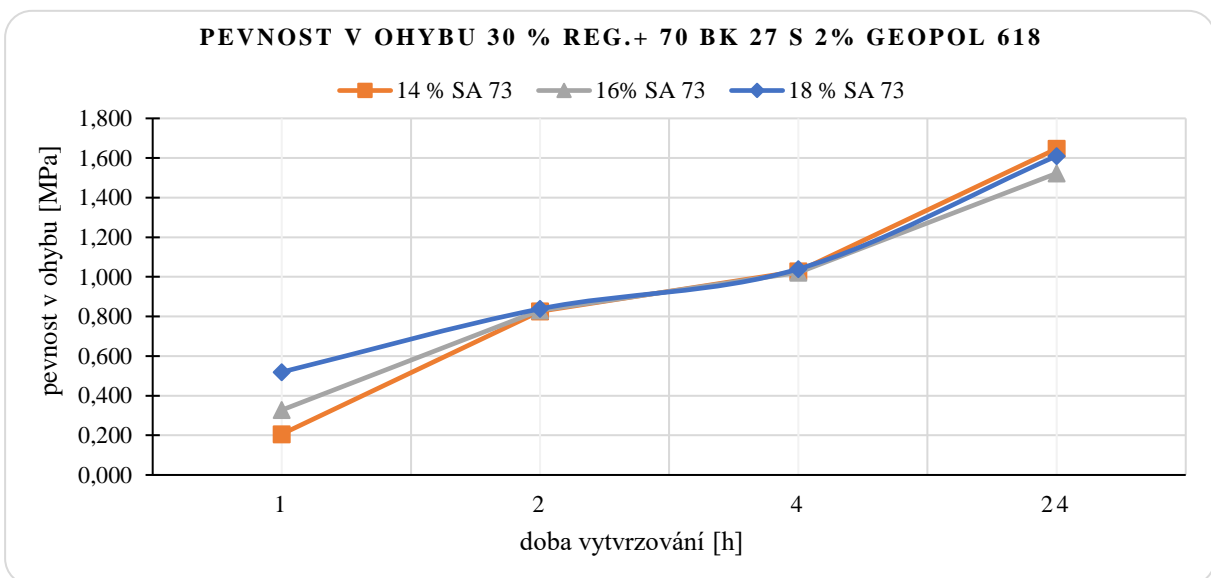
Obr. 34 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Směs s 14 % tvrdidla má dle grafu 34 o 250 kPa nižší pevnost po první hodině než ostatní dvě směsi. Nárůst pevnosti je velmi podobný a konečná pevnost pro 14 % tvrdidla je o 200 kPa vyšší.



Obr. 35 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Série vzorků dle grafu 35 vykazuje nelineární nárůst pevností. Po první hodině má směs s 14 % tvrdidla o 250 kPa nižší pevnost než směsi s 16 a 18 % tvrdidla. Rozdíl v konečných hodnotách pevností mezi 14 a 18 % tvrdidla je přibližně 150 kPa a je nejnižší ze všech tří sérií.



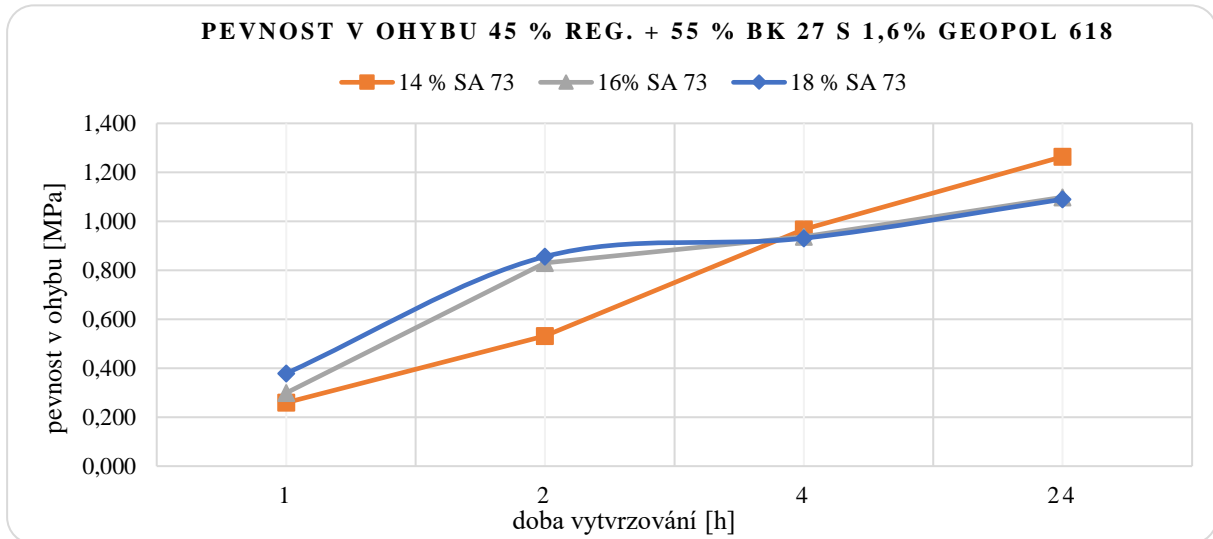
Obr. 36 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Z grafu 36 vyplývá opět nelineární nárůst pevností. Pevnosti po první hodině u směsi s 14 % tvrdidla je o 300 kPa nižší než směs s 18 % tvrdidla. Mezi konečnými pevnostmi není významný rozdíl. Nejvyšší konečná pevnost je pro směs se 1,6 % a 2 % téměř totožná. Všechny konečné pevnosti po 24 hodinách jsou vyšší než 1,5 MPa.

Z přílohy č. 7 vyplývá, že koeficient spolehlivost je  $R^2 = 96,95 \%$ . Hlavními faktory je čas vytvrzení a obsah pojiva. Interakce tvrdidla s časem vytvrzení není z pohledu pevnosti statisticky významná. Směrodatná odchylka činí přibližně 170 kPa.

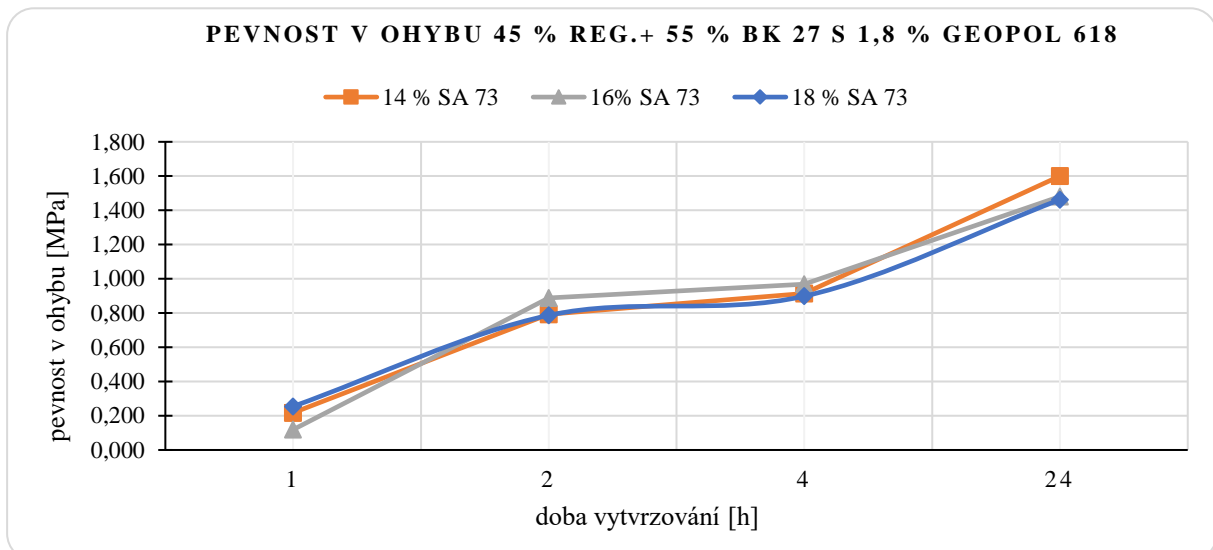
### Vyhodnocení směsí s 45 % regenerátu

Níže uvedené výsledky vycházejí z devíti různých kombinací pojiva – 1,6; 1,8; 2 % a tvrdidla 14; 16; 18 %.



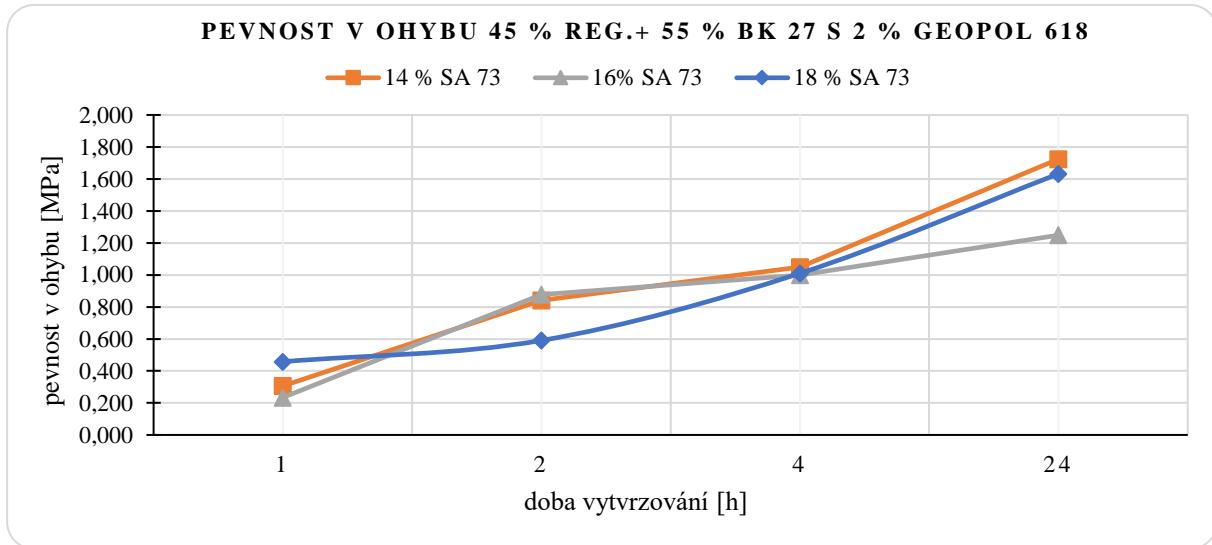
Obr. 37 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Z grafu 37 vyplývá, že směs s 14 % tvrdidla má skoro lineární nárůst pevnosti a o 200 kPa vyšší konečnou pevnost než směsi s 16 a 18 % tvrdidla, které mají nelineární nárůst pevnosti. Rozdíl mezi pevnostmi po 2 a 24 hodinách pro směsi s 16 a 18 % tvrdidla činí pouze 230 kPa, což poukazuje na rychlý nárůst pevnosti v prvních 2 hodinách. Konečné pevnosti se pohybují od 1,1 do 1,26 MPa.



Obr. 38 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Dle grafu 38 mají všechny tři směsi nelineární nárůst pevností. Počáteční i průběžné pevnosti jsou velmi podobné. Konečná pevnost pro směs s 14 % tvrdidla je o 150 kPa vyšší než ostatní. Konečné pevnosti směsí dosahovaly od 1,46 do 1,6 MPa.



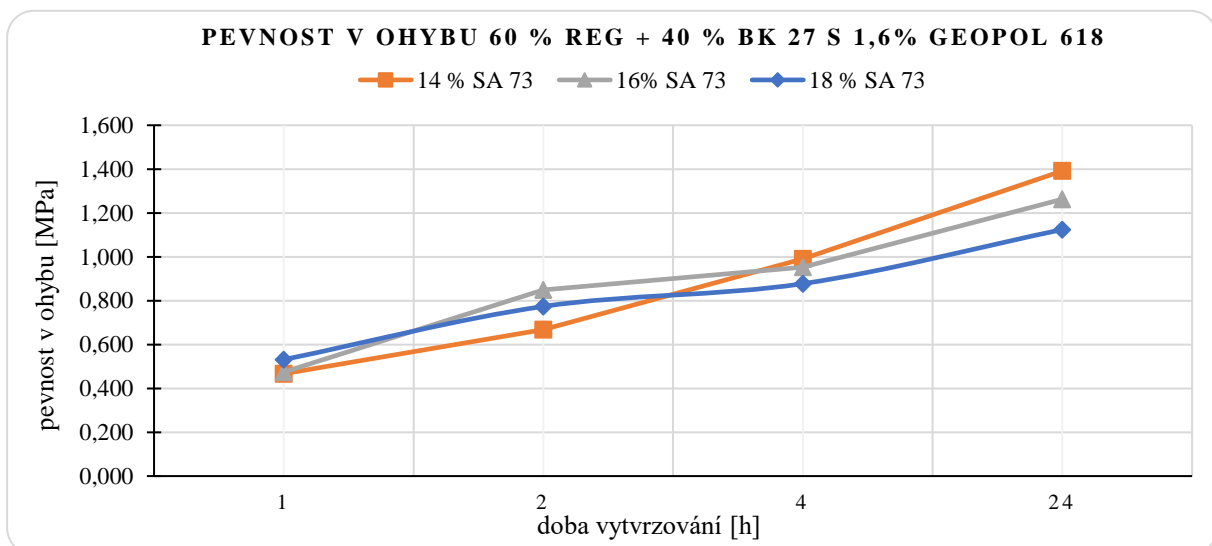
Obr. 39 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Z grafu 39 je možné pozorovat o 200 kPa vyšší pevnosti pro směs s 18 % tvrdidla po první hodině. Směsi se 14 a 16 % tvrdidla mají velmi podobný průběh v prvních čtyřech hodinách. Konečná pevnost u směsi s 14 % a 18 % je o 400 kPa vyšší než u směsi s 16 % tvrdidla. Nejnižších pevností dosáhla překvapivě právě tato směs a činila průměrně 1,25 MPa. Pro ostatní krajní meze tvrdidla 14 a 18 % byly zaznamenány pevnosti 1,73 a 1,63 MPa.

Po tuto sérii je koeficient spolehlivosti  $R^2 = 95,93 \%$ . Obsah tvrdidla je pro tuto sérii statisticky nevýznamný faktor. Hlavními faktory je opět čas vytvrzení a obsah pojiva. Méně významná je interakce pojiva s časem vytvrzení. Hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 7. Směrodatná odchylka této série je přibližně 200 kPa.

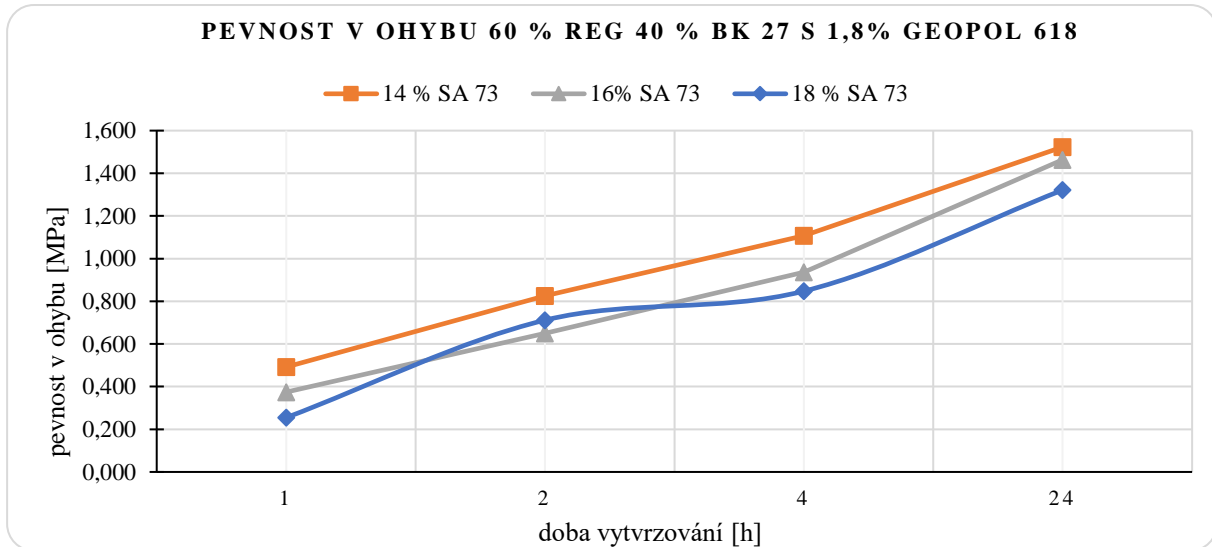
#### ***Vyhodnocení směsi s 60 % regenerátu***

Níže uvedené výsledky vycházejí z devíti různých kombinací pojiva – 1,6; 1,8; 2 % a tvrdidla 14; 16; 18 %.



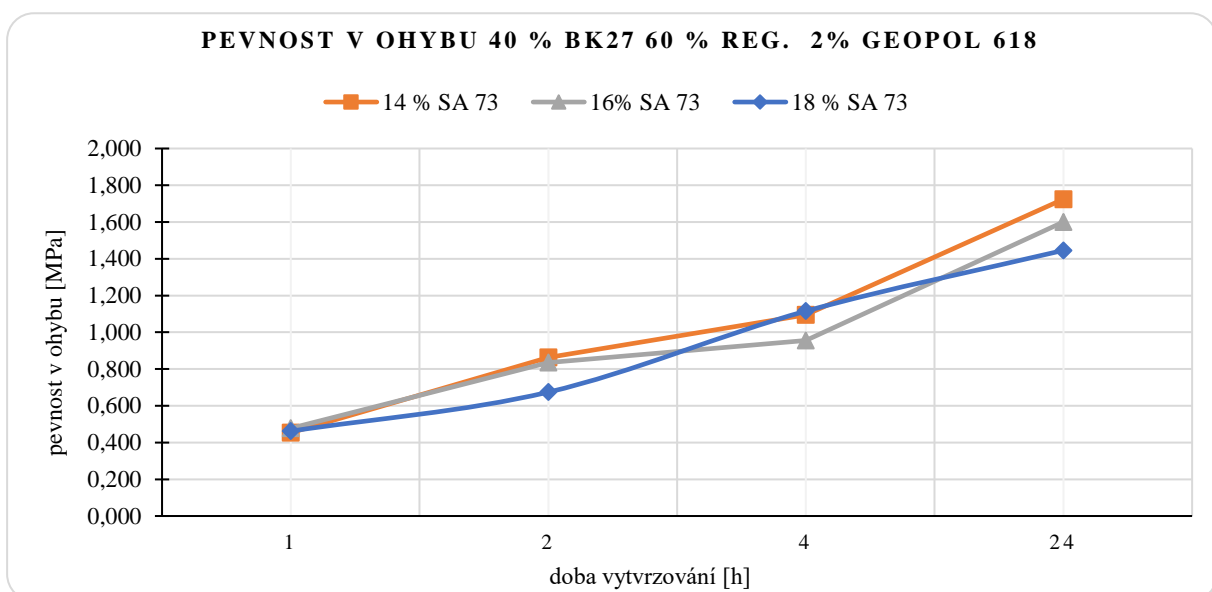
Obr. 40 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Graf 40 ukazuje lineární nárůst pevnosti pro směs s 14 % tvrdidla a také o 250 kPa vyšší konečnou pevnost než směs s 18 % tvrdidla. Průběh pevností pro 16 a 18 % tvrdidla je velmi podobný. Směsi dosahovaly pevnosti v průměru od 1,1 do 1,4 MPa.



Obr. 41 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Z grafu 41 je patrné, že směs s 14 % tvrdidla dosahuje v celém průběhu vytvrzování nejvyšších hodnot pevnosti. Počáteční i konečná pevnost převyšuje směs s 18 % tvrdidla o více než 200 kPa. Konečné pevnosti jsou v rozmezí 1,32 až 1,52 MPa.



Obr. 42 Graf závislosti pevnosti na době vytvrzování s různým množstvím tvrdidla

Poslední série vzorků dle grafu 42 má totožné počáteční pevnosti (1 h) se všemi třemi obsahy tvrdidla. Konečná pevnost pro 14 % tvrdidla je o 300 kPa vyšší než pro 18 % tvrdidla. Směs s 14 % tvrdidla má jako jediná téměř lineární nárůst pevnosti. Průměrné hodnoty dosažených pevností jsou od 1,45 MPa do 1,72 MPa a při dávkování 2% pojiva se řadí mezi nejpevnější z testovaných směsí pro 60 % regenerátu.

Koeficient spolehlivosti této série vzorků je  $R^2 = 95,81\%$ . Hlavní faktor ovlivňující pevnost je čas vytvrzení. Dalšími významnými faktory jsou obsah pojiva a tvrdidla. Nejméně statisticky významná je interakce pojiva s tvrdidlem a tvrdidla s časem vytvrzení. Směrodatná odchylka je rovna 180 kPa.

#### 4.1.8 Zpracovatelnost – životnost (manipulační pevnost)

Jedná se o nejdelší dobu, po kterou je směs po zaformování schopna uchovat důležité vlastnosti ke zhotovení kvalitních forem a jader. Při překročení tohoto časového úseku – tzv. zpracovatelnosti, je směs často znehodnocena a může dojít ke ztrátě pojivové schopnosti.

Měření zpracovatelnosti bylo uskutečněno pomocí digitálního vaznoměru +GF+ (obr. 43). Vaznoměr obsahuje čidlo, které se zatlačuje do líce formy a je zaznamenáván odpor proti vnikání pod povrch v určitém časovém intervalu.

Doba rozebírání 200 kPa je teoretický čas, kdy je možné například vyjímat jednoduché modely a rozebírat jednoduché formy a jádra. Doba rozebírání 350 kPa je čas, kdy je možno vyjímat a rozebírat složitější jádra a formy. V praxi se pracuje výhradně s hodnotou 350 kPa.

##### *Postup měření*

Hlavní faktory, které ovlivňují zpracovatelnost, je množství a typ tvrdidla. Jelikož je v této práci využíván pouze jeden druh tvrdidla – SA 73, zaměřilo se tedy pouze na různá množství tvrdidla. Dalším sledovaným faktorem je množství regenerátu ve směsi, který by měl teoreticky urychlovat vytvrzovací reakci z důvodu jeho alkalické povahy.

Byla připravena směs složená ze 100 % nového písku BK27 se stejným množstvím pojiva – 1,8 % a nejnižším a nejvyšším množstvím tvrdidla – 14 % a 18 %. V další sérii bylo sledováno, zda množství pojiva ovlivňuje zpracovatelnost. Jako poslední bylo vytvořeno 7 různých poměrů nového písku a regenerátu při zachování stejného množství pojiva – 2 % i tvrdidla – 18 %.

Měření času začíná hned po smísení pojiva s tvrdidlem, jelikož v té době již začíná vytvrzovací reakce. Směs byla zaformována do válcového přípravku (obr. 44), lehce upěchována a povrch zarovnan, aby se zamezilo co nejmenším odchylkám v měření.



Obr. 43 Vaznoměr +GF+ (PFP)

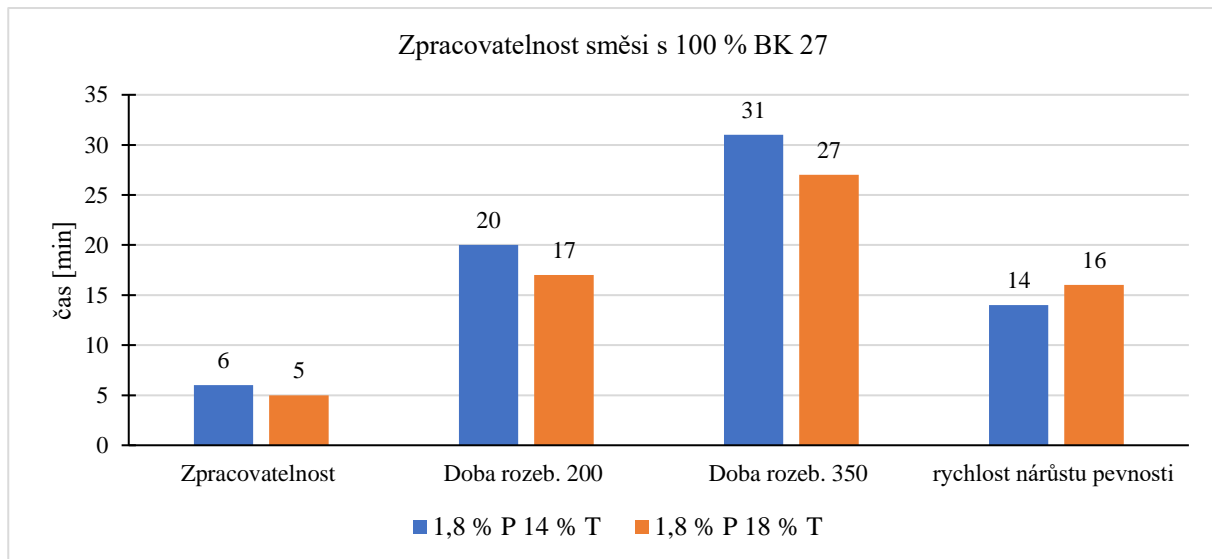


Obr. 44 Zkušební váleček pro měření zpracovatelnosti.

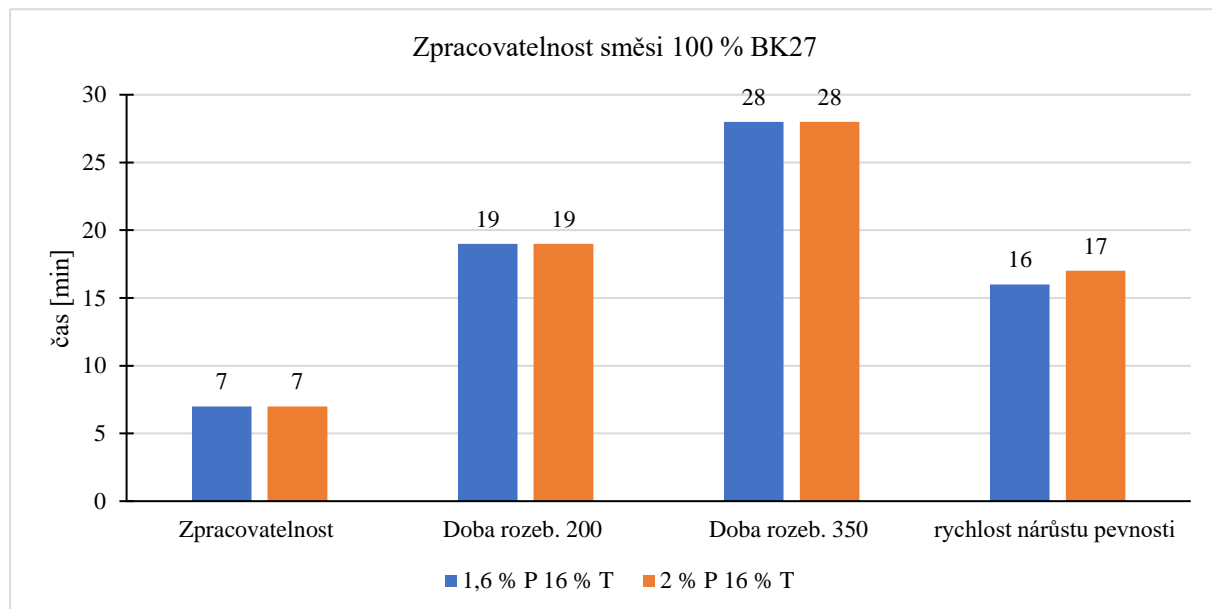


### Vyhodnocení:

Hodnoty odečtené z přístroje v daných intervalech jsou zpracovány do diagramu vaznost – čas a proložením přímkou mezi body v intervalech vaznosti 3,3 – 33 N/cm<sup>2</sup>. Dosažení manipulační pevnosti v praxi považujeme při překročení hodnoty 350 kPa. Vzorek označen 1,8 % 14 % T znamená 1,8 % pojiva GEOPOL 618, 14 % tvrdidla SA 73. Poměr ostřiva 15-85 značí směs s 15 % regenerátu a 85 % nového ostřiva.

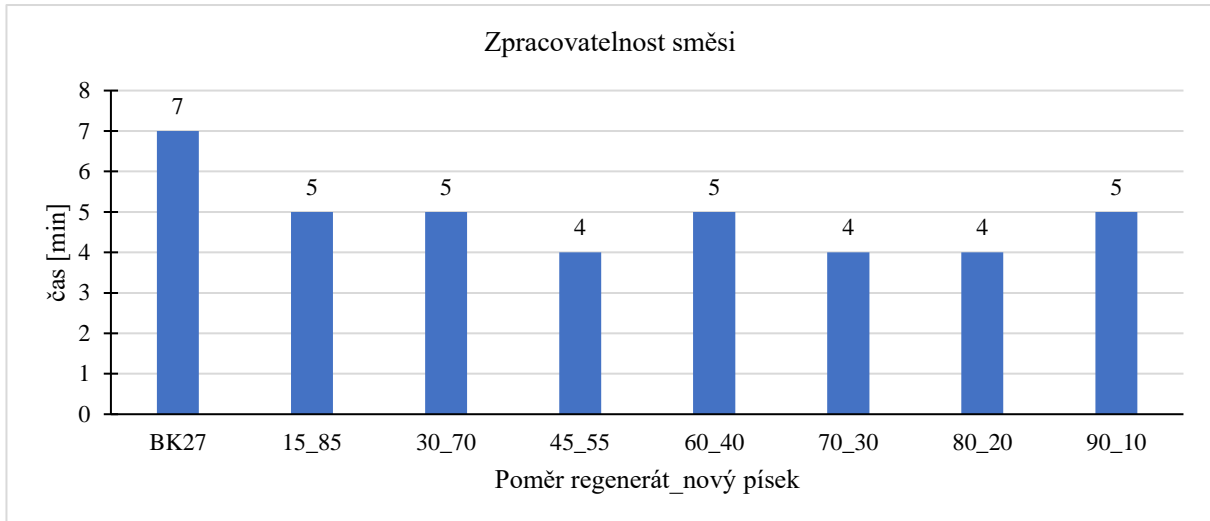


Obr. 45 Graf závislosti množství tvrdidla na zpracovatelnosti směsi.

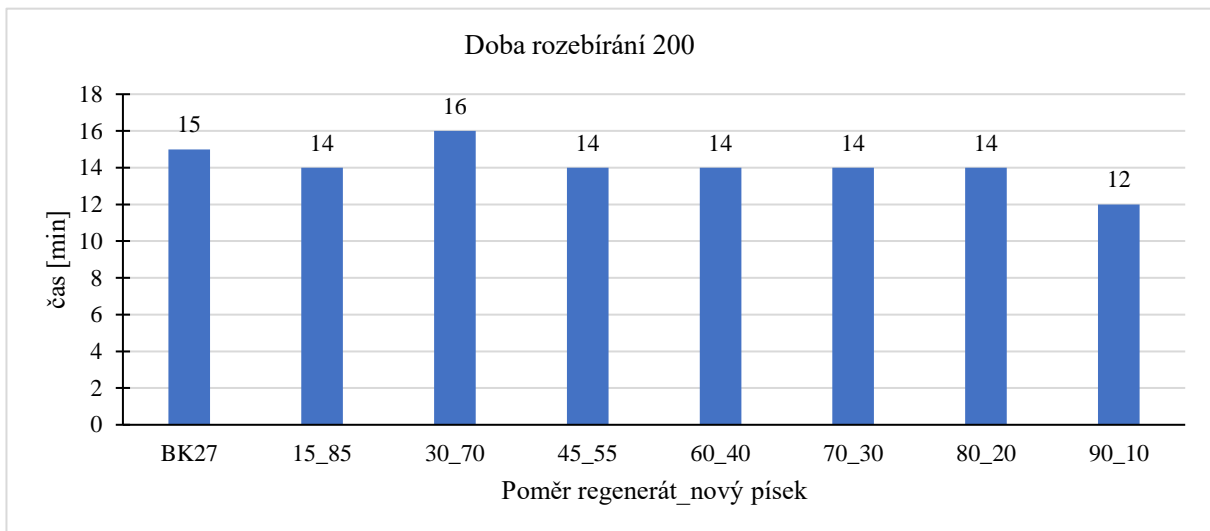


Obr. 46 graf závislosti množství pojiva na zpracovatelnosti směsi.

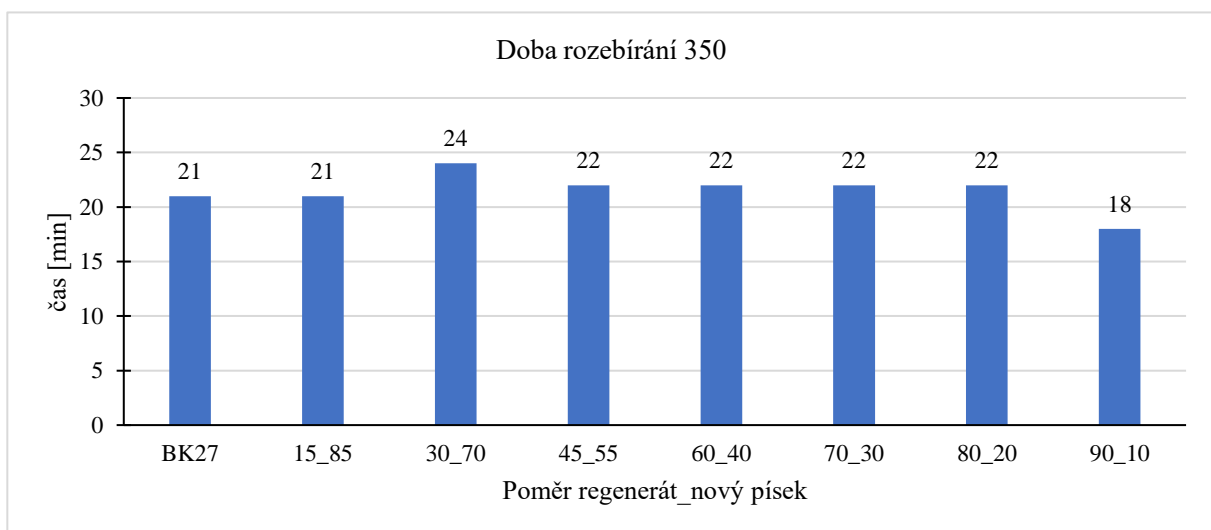
Z grafu 45. lze pozorovat, že množství tvrdidla nemá tak velký vliv na dobu zpracovatelnosti, jak bylo předpokládáno. Větších rozdílů by bylo možné dosáhnout ještě větším rozestupem krajních hodnot tvrdidla, nebo využitím tvrdidla jiné řady např SA 71-72 nebo GEOFIX 00. Tato tvrdidla jsou značně pomalejší. Dle grafu 46 bylo zjištěno, že pojivo nemá na zpracovatelnost žádný vliv.



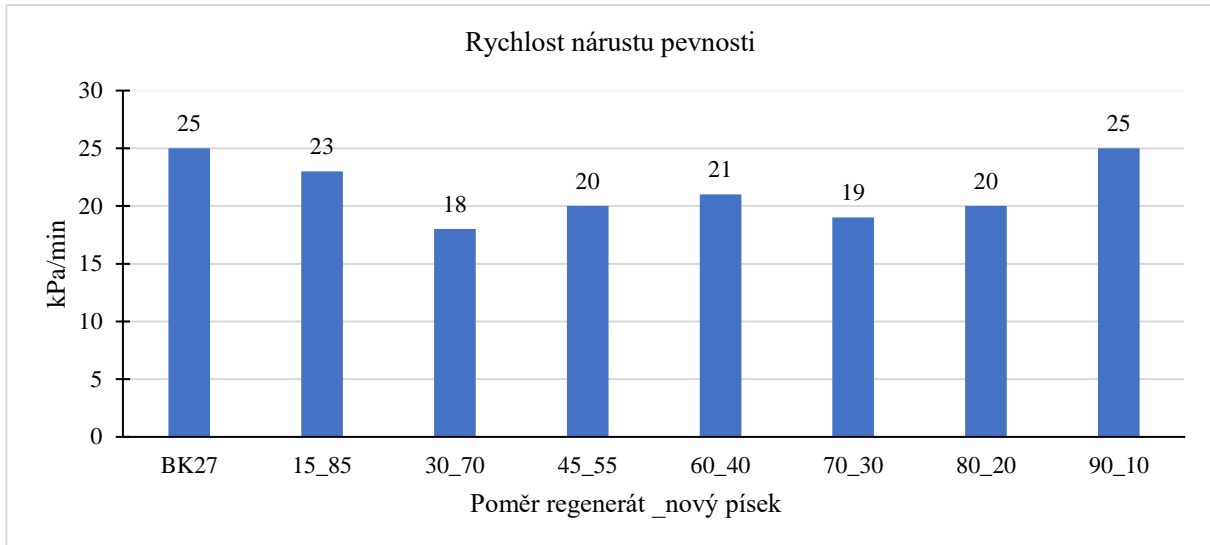
Obr. 47 Graf porovnávající zpracovatelnost směsi s různým poměrem ostřiva



Obr. 48 Graf porovnávající dobu rozebírání směsi s různým poměrem ostřiva



Obr. 49 Graf porovnávající dobu rozebírání směsi s různým poměrem ostřiva



Obr. 50 Graf porovnávající nárůst pevnosti směsi s různým poměrem ostřiva

Dle grafu 47. je patrné, že zvyšující se množství regenerátu nemá na zpracovatelnost směsi téměř žádný vliv. Průměrná zpracovatelnost je 4,5 minuty. Zpracovatelnost nového ostřiva je o dvě minuty delší než u směsi s regenerátem. Doba rozebírání 350 dle grafu 49 je pro všechny případy velmi podobná a činí v průměru 22 minut. Výjimkou je směs s 90 % regenerátu. Zde mohlo dojít buďto k nepřesnému měření, nebo již dochází k velkému ovlivnění vlastnosti směsi složené převážně z regenerátu. Rychlost nárůstu pevnosti vyobrazená v grafu 50 je již rozkolísaná, avšak pro směsi s regenerátem 30 až 80 % můžeme říct, že okolo 20kPa za minutu.

## 4.2 Provozní testy

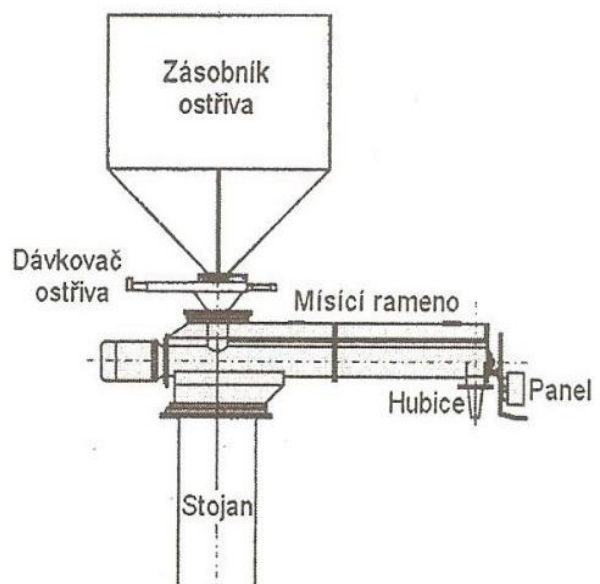
Systém GEOPOL je v provozu školní slévárny primární formovací technologií. Využívá se polský písek Bukowno s označením BK27, geopolymerní pojivo GEOPOL 618 a tvrdidla řady SA 72-73. Všechny suroviny jsou dodávány firmou SANDTEAM s.r.o. Slévárna využívá pouze primární regeneraci na principu mechanické otírky. Takto regenerovaný písek je prosíván ručně sítím a znovu využíván.

### 4.2.1 Kontrola a nastavení mísiče

Školní slévárna využívá k úpravě a plnění formovací směsi jednoramenný průběžný mísič GM4 o výkonu 1-4 tun/hod (obr. 51). Mísič je základem formovacího pracoviště. Nad strojem se nachází dvoukomorový zásobník pro nové ostřívo a regenerát. Nové ostřívo je do slévárny dováženo ve velkoobjemových vacích o hmotnosti přibližně 1 tuna. Zde je přesypáno do bádie se spodní výpustí, kterým se plní zásobník. Regenerát je skladován ve vacích a plnění probíhá stejným způsobem.



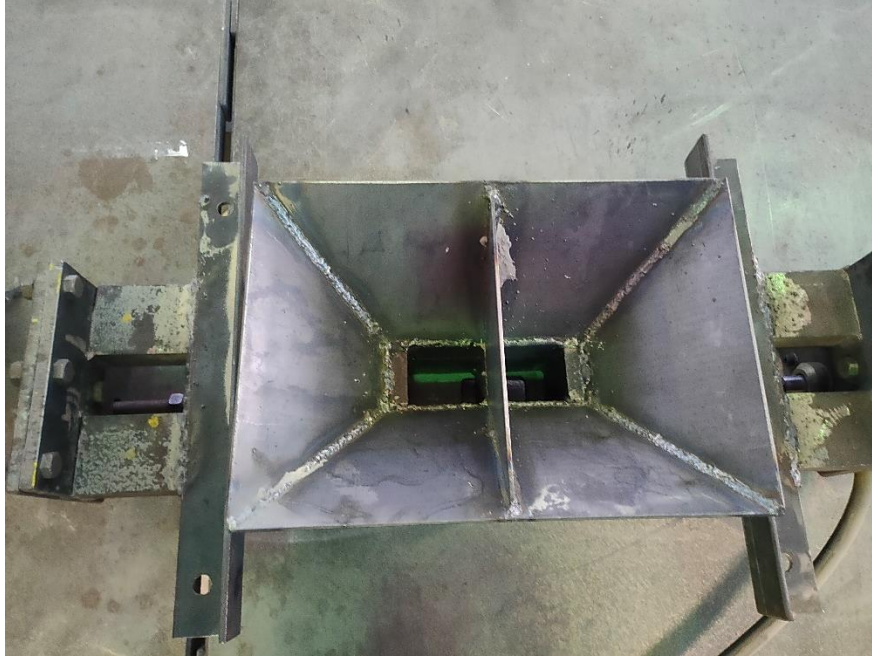
Obr. 51 Jednoramenný průběžný mísič GM4



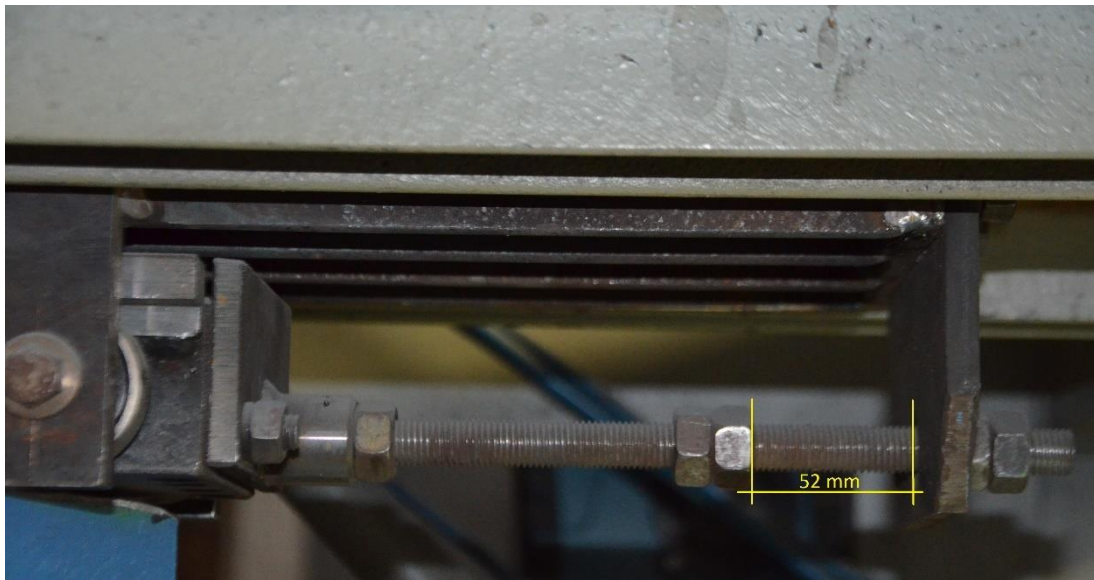
Obr. 52 Schéma průběžného mísiče [33]

*Dávkování ostřiva.*

Poměr ostřiv se nastavuje v dávkovači (obr. 54) pomocí dávkovacího hradítka, jenž se nachází pod zásobníkem ostřiva a je ovládán pneumaticky. Velikost otvoru se řídí nastavením dorazu na přední části dávkovače (obr. 53).



Obr. 53 Těleso dávkovače ostřiva



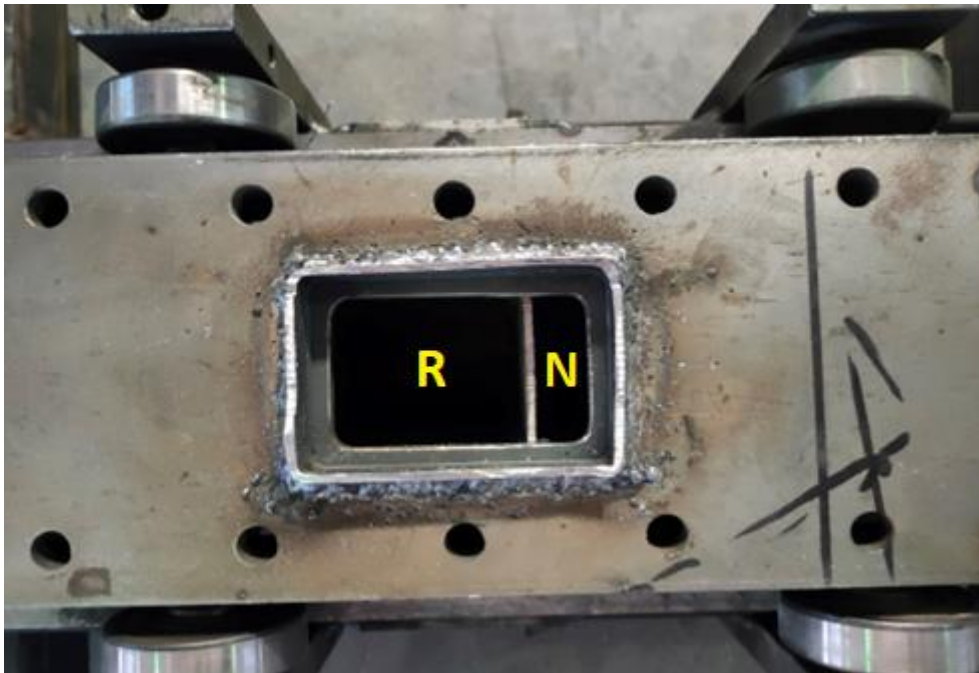
Obr. 54 Nastavitelný doraz pro dávkovací hradítko

Ostřivo prochází skrze dávkovač otvorem o délce 65 mm. Tato vzdálenost je předělena příčkou, která odděluje komoru nového písku a regenerátu. Dle výchozího nastavení procházel regenerát otvorem o délce 52 mm a nové ostřivo otvorem o délce 13 mm (na obr. 55 označení N). Otvor je obdélníkového tvaru, ale zanedbává se jeho celková plocha a udává se pouze délka, jelikož délka přesně odpovídá nastavení dorazu, který je tvořen ze závitové tyče a matic (obr. 54). Matice svou vzdáleností odpovídají otvoru v komoře dávkovače.

K ověření poměru ostřiv bylo v prvním kroku do obou komor nasypáno 15 kg nového písku. Mísíč byl uveden do chodu bez pojiva i tvrdidla. Po vyprázdnění jedné z komor se mísíč zastavil, zvažilo se množství ostřiva a poté byl mísíč opět zapnut a bylo zvaženo zbývající množství ostřiva. Takto bylo zjištěno, že pro délku otvoru 52 mm, odpovídá množství regenerátu přibližně 63–64 %.

Test byl zopakován, ale s použitím regenerátu v jedné komoře a novým pískem ve druhé. Bylo zjištěno, že pro otvor délky 52 mm (na obr. 55 označení R) odpovídá množství regenerátu na výstupu přibližně 39–42 %. Takto velký rozdíl může být způsoben horší tekutostí regenerátu a nutností průchodu ostřiva přes síto na dně zásobníku.

Při zvětšení otvoru v dávkovači na 54 mm, bylo množství regenerátu již okolo 60 %. Důvodem takto velké změny dávkování, která nastala při rozdílu dvou milimetrů je způsoben konstrukcí dávkovače a pozicí klapky na mísíči, která udává celkový průtok směsi do mísící komory. Klapka se nenachází přesně pod otvorem dávkovače, ale je posunuta směrem ke komoře s novým pískem, a proto dochází ke skokovému nárůstu množství regenerátu již při takto malé změně délky. Klapka mísíče ovládá celkové množství směsi, které vstupuje do mísící komory. Délka otvoru po otevření klapky je 15 mm a proudí jím 31,2 kg ostřiva za minutu.



Obr. 55 Dávkovací hradítko

Z opakovaných měření bylo zjištěno, že množství písku vstupujícího do komory nemá s délkou otevření klapky lineární závislost. Nelze ho tak v provozu řídit snadným označením polohy na šroubu klapky. Faktory, které mohou ovlivňovat tuto skutečnost, jsou např. tekutost ostřiva, vlhkost a hrubost regenerátu, čistota síta, přesnost měření, množství písku, které zůstává na stěnách zásobníku a v celém systému mísíče – komora pod dávkovačem a mísící komora.

### *Dávkování pojiva a tvrdidla*

Pojivo je skladováno v IBC kontejneru a tvrdidlo ve vratných přenosných zásobnících. Obě složky jsou dopravovány do mísiče pomocí zubového čerpadla. Dávkování tekutých složek je řízeno potenciometrem, který ovládá frekvenční měnič, jenž řídí otáčky elektromotoru čerpadla.

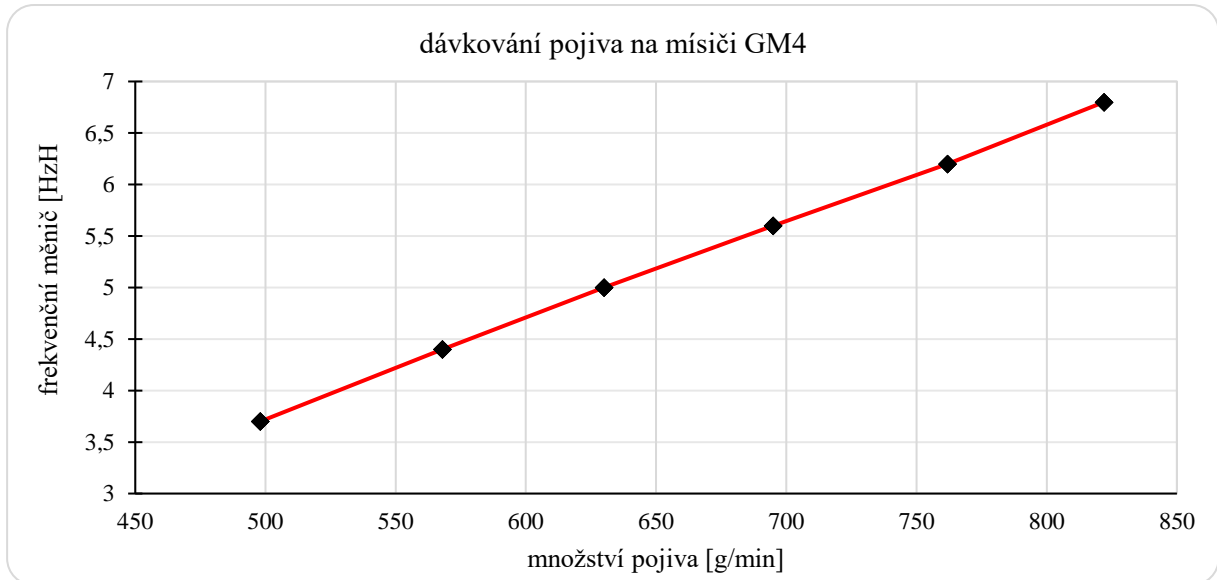
Obě kapalné látky jsou přivedeny do komory mísiče až za klapkou pro přívod ostřiva. Tvrdidlo přichází do kontaktu s ostřivem jako první, aby došlo k částečnému promíchání s ostřivem ještě před přidáním pojiva. Vytvrzovací reakce začíná okamžitě při kontaktu pojiva s tvrdidlem.



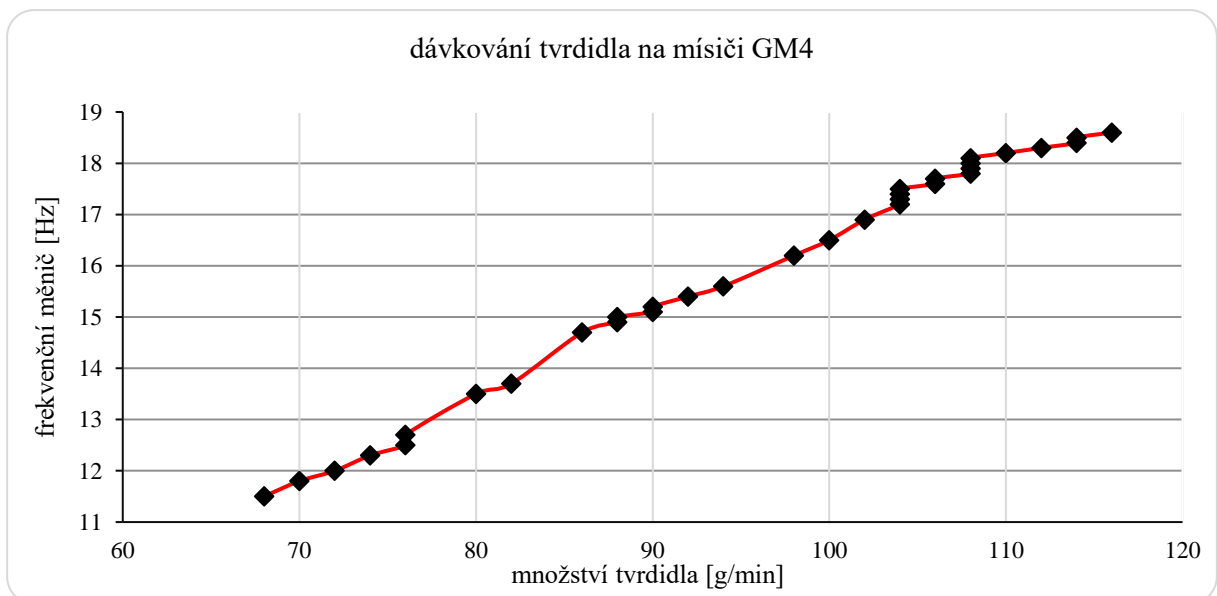
Obr. 56 Přívod kapalných látek do mísicí komory

Ke kontrole dávkování pojiva se využil kelímk, váha s přesností na jeden gram a stopky. Mísič ve školní slévárně je osazen třicestným ventilem (obr. 56), který je namontován na plášti mísiče. Tímto ventilem lze kontrolovat, zdali kapalina proudí do mísiče nebo mimo něj. Měření probíhalo odměřením hmotnosti pojiva za 60 sekund. Nejmenší krok frekvenčního měniče je přibližně 0,6 Hz, a tudíž nelze zvolit libovolnou hodnotu pojiva, ale pouze množství s krokem přibližně 0,2 %.

Pro nastavení tvrdidla se využil totožný postup měření jako v případě měření pojiva. Frekvenční měnič lze v tomto případě nastavit mnohem jemněji. Nejmenší krok je zde 0,1 Hz. Nejmenší procentuální krok tvrdidla nelze přesně určit, jelikož dochází k výkyvu naměřených hodnot a nárůst není lineární.



Obr. 57 Graf závislosti množství pojiva na hodnotě frekvenčního měniče



Obr. 58 Graf závislosti množství tvrdidla na hodnotě frekvenčního měniče

Z výsledného měření byla vytvořena tabulka doporučeného dávkování pro obsluhu mísiče, která je uvedena v příloze č. 1.

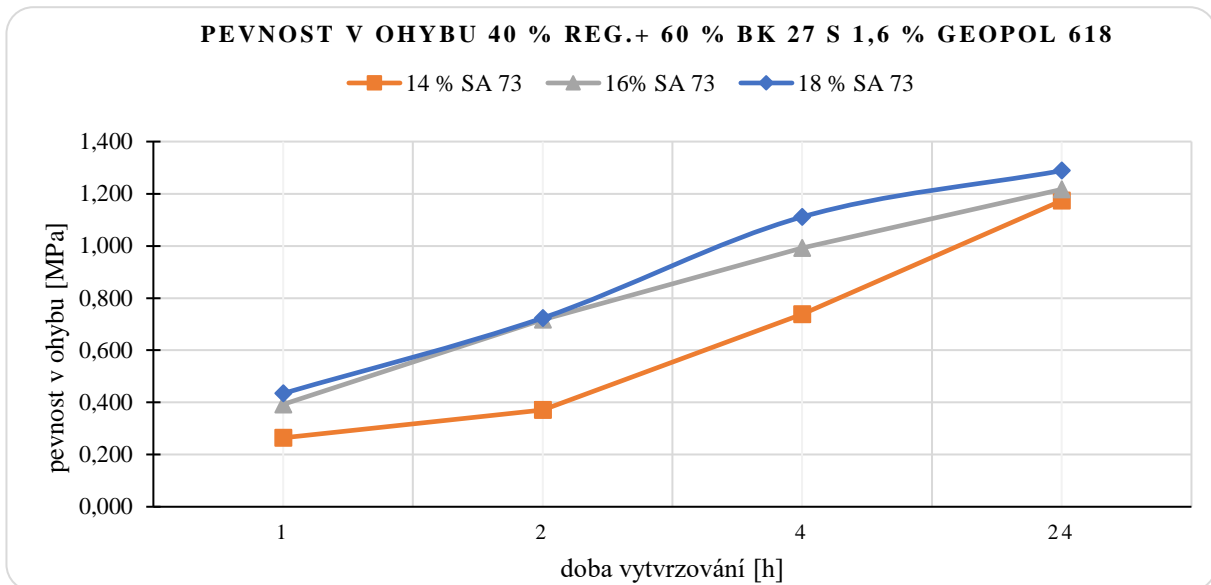
#### 4.2.2 Pevnost v ohybu v provozu školní slévárny

Série laboratorních vzorků sloužily jako standardní hodnoty pevností a zpracovatelnosti, jelikož se jedná o přesně kontrolovaný proces přípravy od přesného dávkování ostřiva, pojiva a tvrdidla až po dobu míchání atd. Provozní testy byly zatíženy chybou, jako je změna tekutosti regenerátu z důvodu navlhání a výkyvů v dávkování pojiva patrné z grafu 57. V případě provozních testů je porovnáván vliv množství regenerátu na konkrétní směs o stejném množství pojiva.

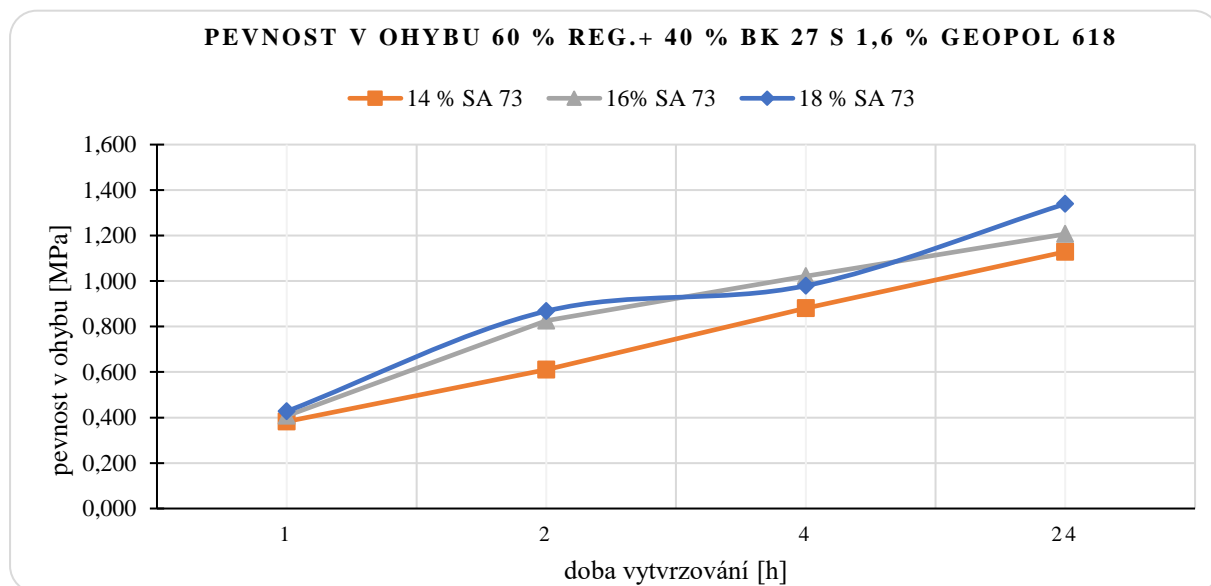


**Vyhodnocení směsi s 40 a 60 % regenerátu a 1,6 % pojiva:**

Níže uvedené výsledky jsou pro dvě různé hodnoty regenerátu a stejné množství pojiva – 1,6 %



Obr. 59 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla SA 73

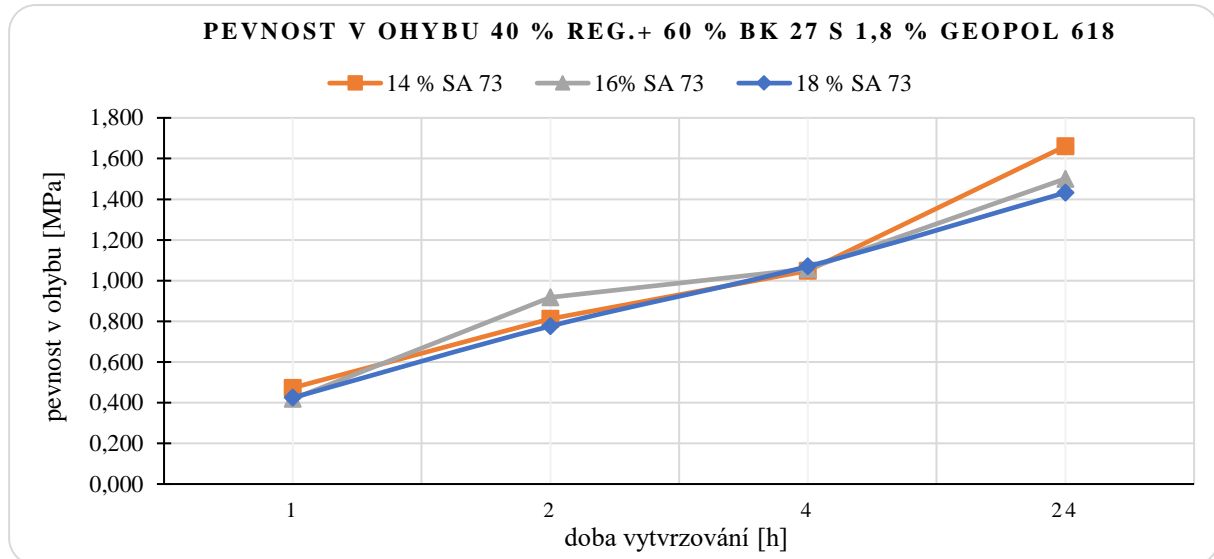


Obr. 60 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla

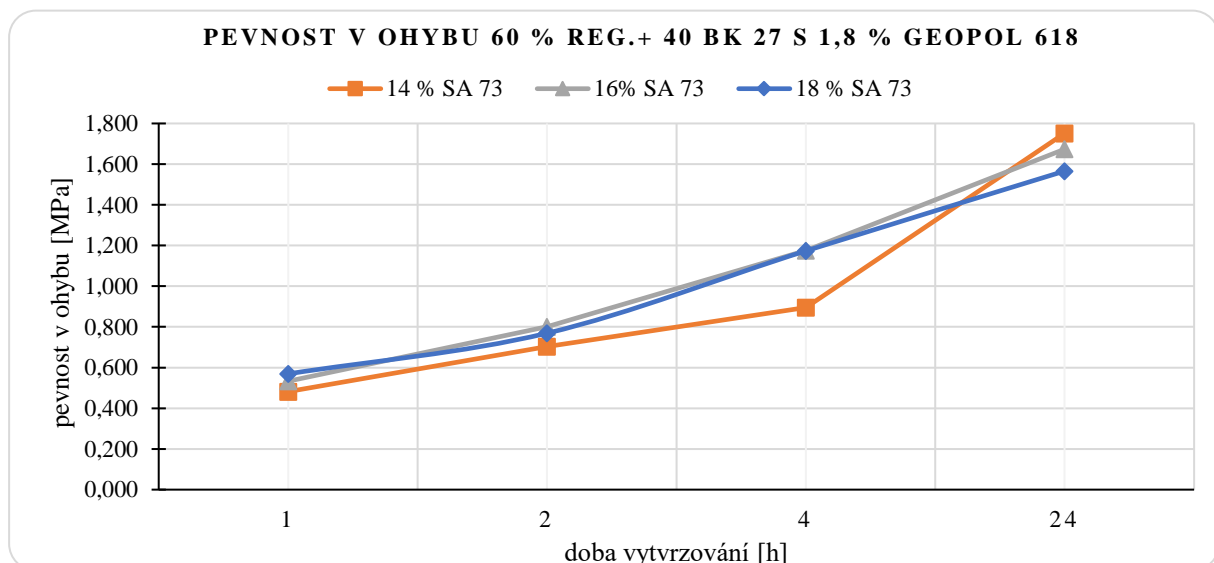
Z grafů 59 a 60 lze pozorovat, že vzorky s obsahem 14 % tvrdidla mají nejnižší počáteční i konečné pevnosti. Konečná pevnost pro obě směsi je nejvyšší v případě 18 % tvrdidla s rozdílem 50 kPa pro 40 a 60 % regenerátu. Pro obě směsi vykazuje 14 a 16 % tvrdidla téměř lineární nárůst pevností.

**Vyhodnocení směsi s 40 a 60 % regenerátu a 1,8 % pojiva:**

Níže uvedené výsledky jsou pro dvě různé hodnoty regenerátu a stejné množství pojiva – 1,8 %



Obr. 61 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla

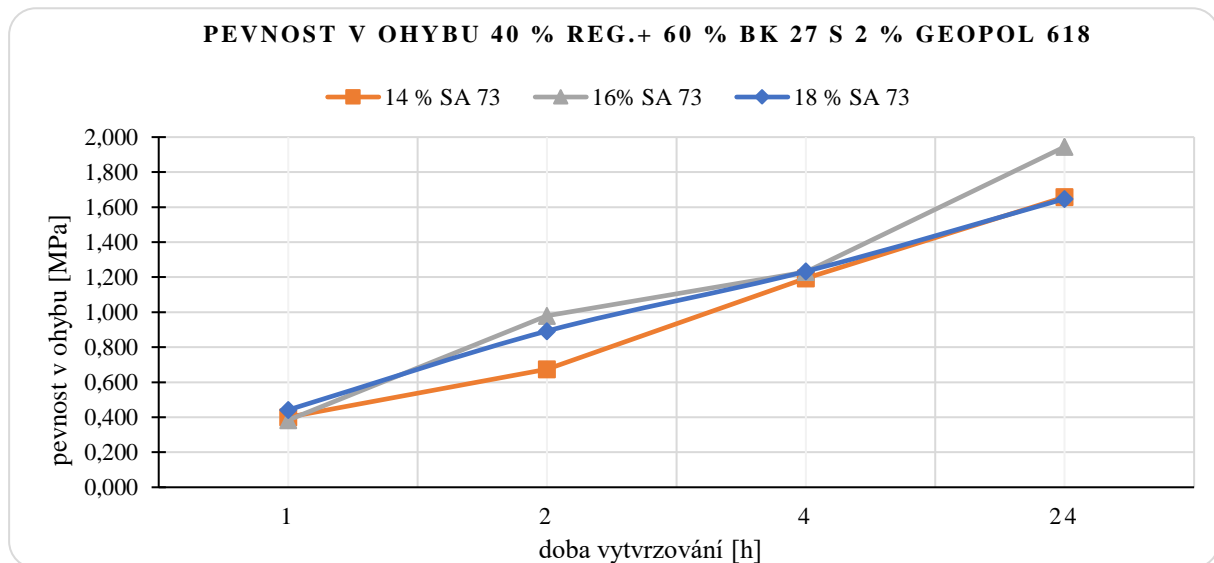


Obr. 62 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla

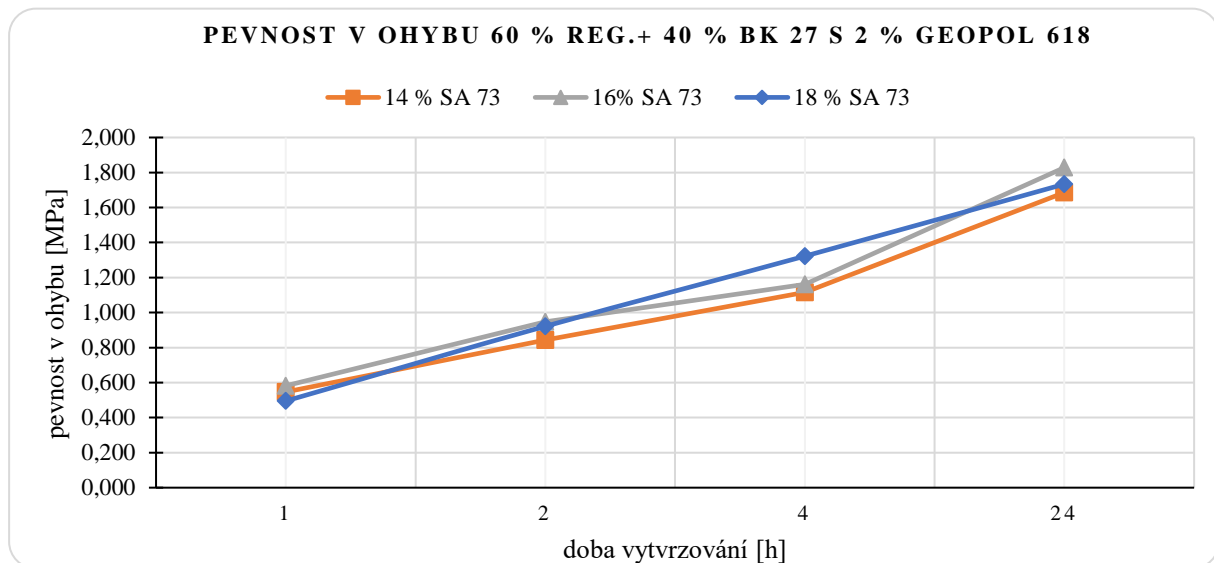
Pevnosti po 1. hodině v obou případech z grafů 61 a 62, jsou téměř stejné. Směs s 40 % regenerátu vykazuje lineárnější nárůst pevností než směs s 60 %. Pevnost po 24 hodinách je v případě obou směsí nejvyšší s použitím 14 % tvrdidla. Pro 60 % regenerátu je tato hodnota o 100 kPa vyšší než pro směs s 40 %.

**Vyhodnocení směsi s 40 a 60 % regenerátu a 2 % pojiva:**

Níže uvedené výsledky jsou pro dvě různé hodnoty regenerátu a stejné množství pojiva – 2 %



Obr. 63 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla



Obr. 64 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla

Grafy 63 a 64 ukazují téměř lineární nárůst pevností pro obě množství regenerátu. Počáteční pevnost pro 60 % regenerátu je o 100 kPa vyšší než u směsi s 40 % regenerátu. Dle grafu 63 je možné pozorovat, že směs s 16 % tvrdidla má o 300 kPa vyšší pevnost než směsi s 14 a 18 %. Konečná pevnost s 16 % tvrdidla je vyřazena z porovnání, jelikož se jednalo o jediný případ, kdy je pevnost pro tento obsah tvrdidla nejvyšší.

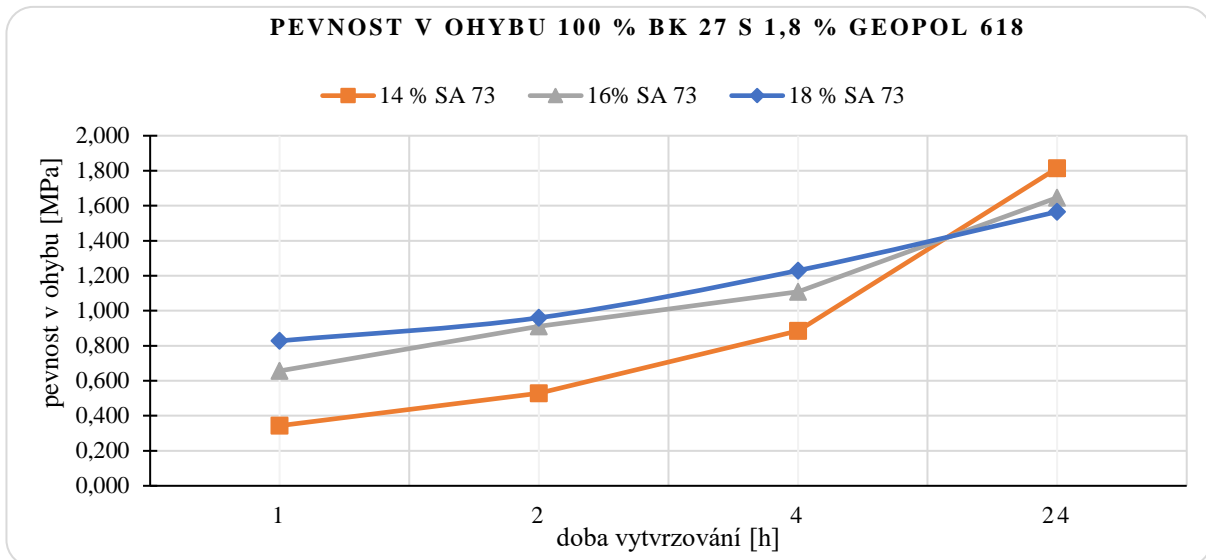
Pro sérii vzorků s 40 % regenerátu je koeficient spolehlivosti  $R^2 = 98,20 \%$ . Nejvýznamnějším statistickým faktorem ovlivňující pevnost je čas vytvrzování a obsah pojiva. Směrodatná odchylka hodnot je přibližně 140 kPa.

Pro sérii vzorků s 60 % regenerátu je hodnota koeficientu spolehlivosti  $R^2 = 98,71 \%$ . Nejvýznamnější faktor ovlivňující pevnost je čas vytvrzení a obsah pojiva. Dalším významným

faktorem je obsah tvrdidla a interakce pojiva s časem vytvrzení. Směrodatná odchylka je rovna přibližně 110 kPa. Statistiky nevýznamná je interakce pojiva s tvrdidlem.

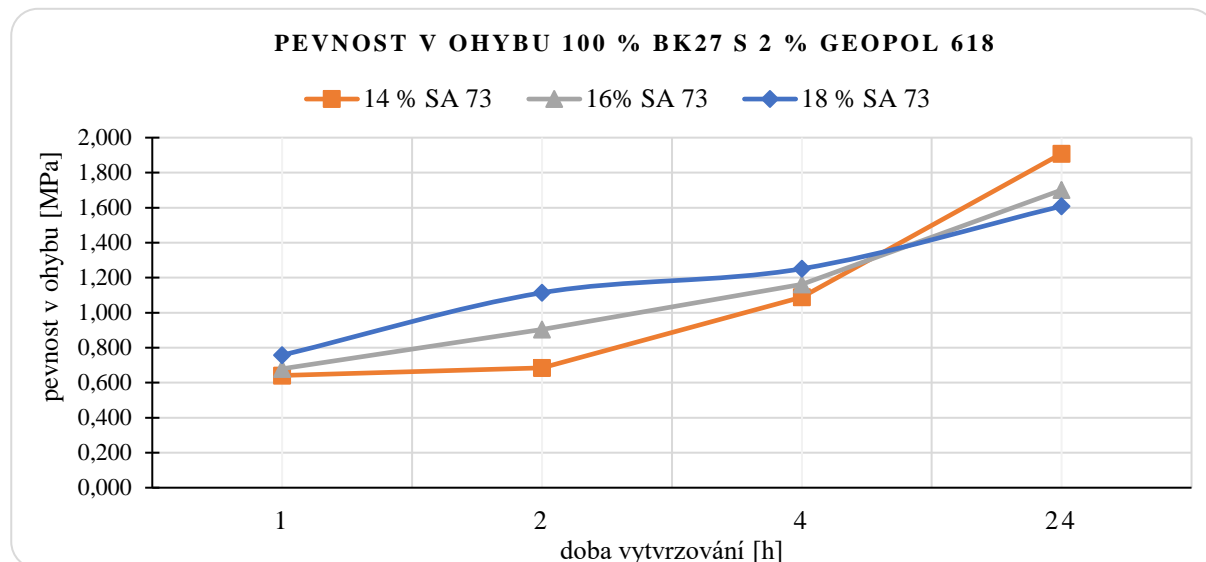
### Vyhodnocení směsi s 100 % nového ostřiva BK 27:

Níže uvedené výsledky jsou pro stejný typ ostřiva a různé množství pojiva – 1,8 a 2 %



Obr. 65 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla

Z grafu 65 je možné pozorovat, že vzorek s 14 % tvrdidla má o 500 kPa menší pevnost po první hodině než u směsi s 18 % tvrdidla. Konečná pevnost pro 14 % tvrdidla je o 250 kPa vyšší než směs s 18 % tvrdidla. Mezi pevnostmi pro 16 a 18 % tvrdidla není velký rozdíl kromě počáteční pevnosti, kde rozdíl činí 200 kPa.



Obr. 66 Graf závislosti pevnosti směsi na době vytvrzování s různou koncentrací tvrdidla

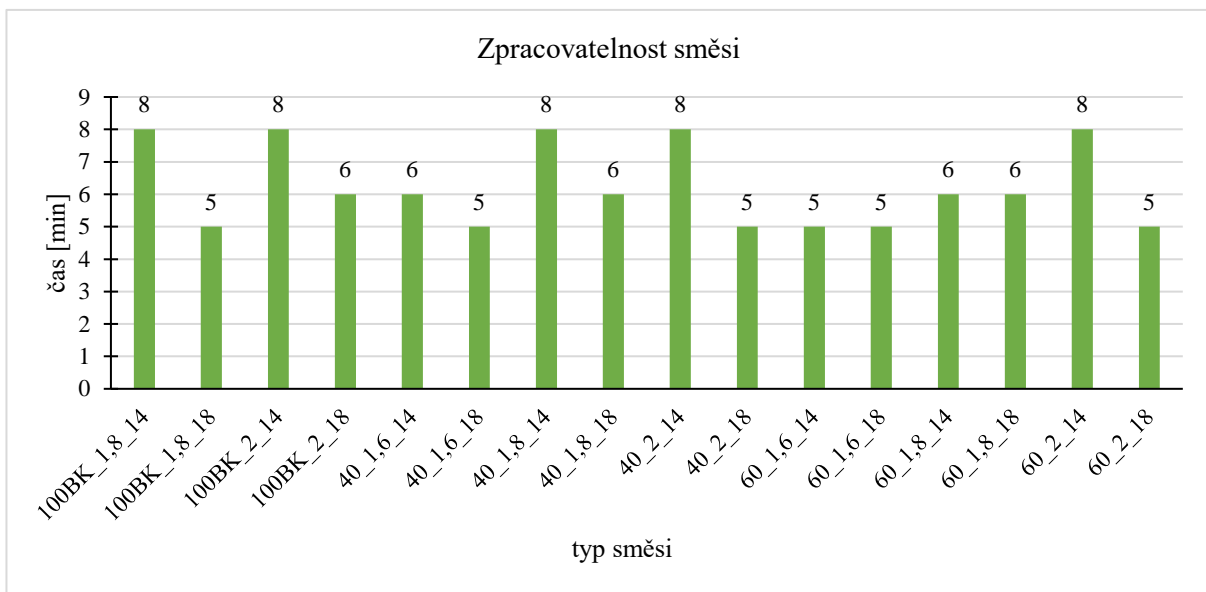
Pevnost po 1 hodině je dle grafu 66 pro všechny obsahy tvrdidla podobná. Konečná pevnost pro 14 % tvrdidla je o 300 kPa vyšší než u směsi s 18 % tvrdidla. Směs s 14 % tvrdidla má téměř stejnou pevnost po první a druhé hodině vytvrzování.

Pro sérii se 100 % ostřiva BK 27 v provozu je koeficient spolehlivosti roven  $R^2 = 99,33 \%$ . Jedná se o nejvyšší hodnotu ze všech testovaných sérií vzorků. Nejvýznamnější faktor

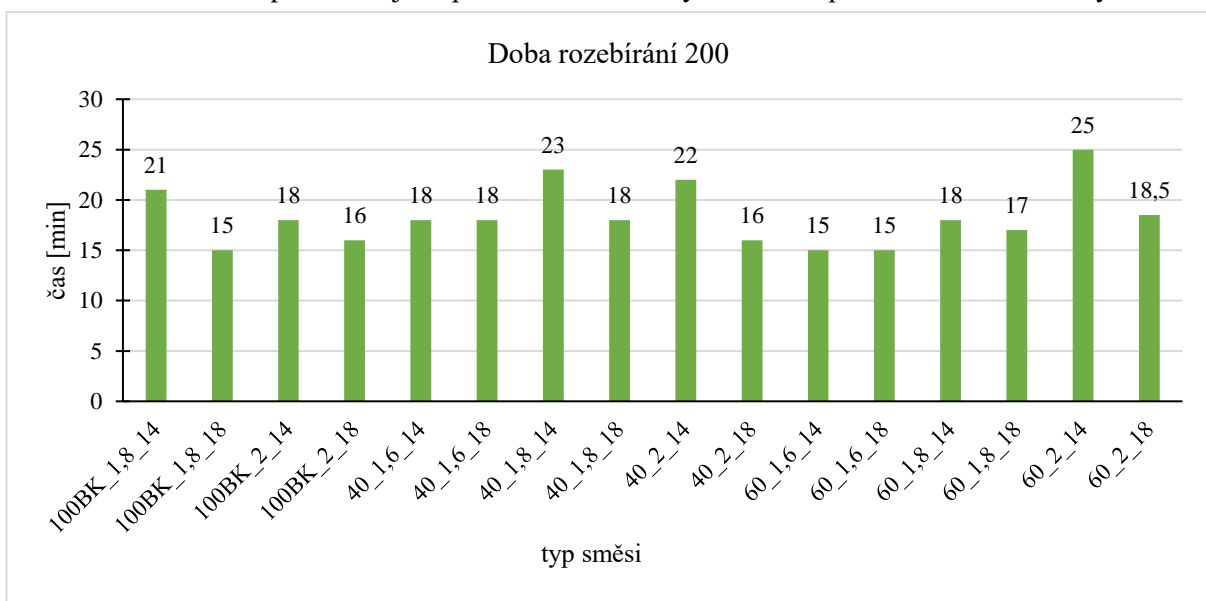
ovlivňující pevnost je čas vytvrzení. Obsah pojiva, tvrdidla a interakce tvrdidla a času vytvrzení má podobný statistický význam. Interakce pojiva a času vytvrzení není statisticky významná. Směrodatná odchylka souboru je přibližně 80 kPa.

### 4.2.3 Zpracovatelnost v provozu školní slévárny

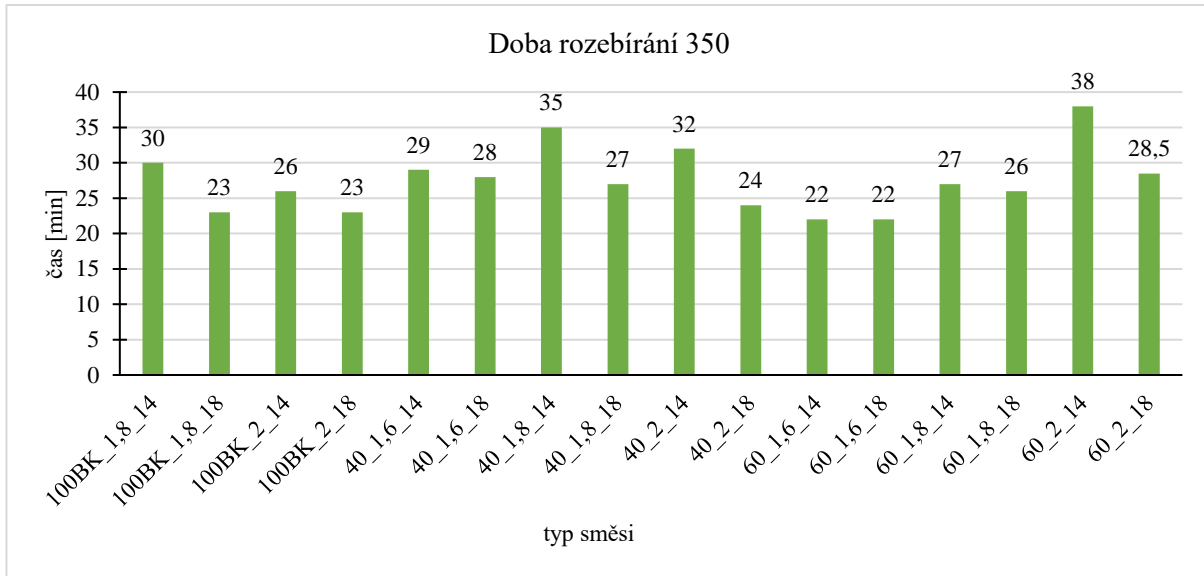
Zpracovatelnost byla měřena v provozu pro každou směs, která je v kapitole 4.2.2. Byla snaha o zjištění určité závislosti mezi množstvím regenerátu ve směsi společně s množstvím tvrdidla. Samotný test obsahuje velké množství proměnných, které ovlivňují výsledné měření. Velmi záleží na hrubosti povrchu, velikosti, upěchování a uhlazení povrchu testovacího tělesa. Postup měření je popsán v kapitole 4.1.8.



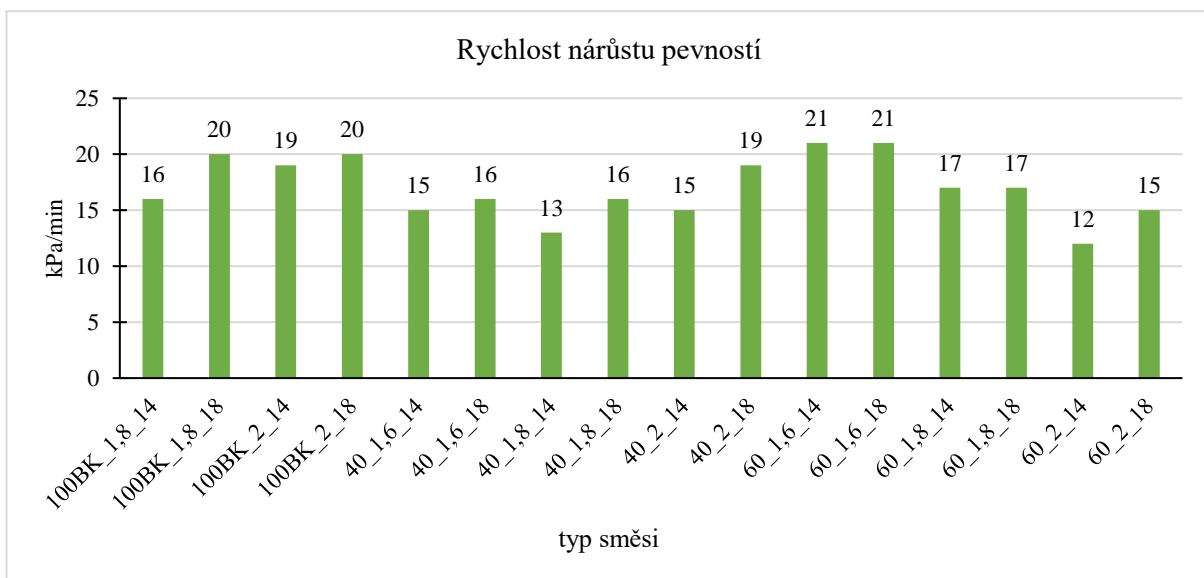
Obr. 67 Graf porovnávající zpracovatelnost různých směsí v provozu školní slévárny



Obr. 68 Graf porovnávající dobu rozebírání různých směsí v provozu školní slévárny



Obr. 69 Graf porovnávající dobu rozebírání různých směsí v provozu školní slévárny



Obr. 70 Graf porovnávající manipulační pevnost různých směsí v provozu školní slévárny

Zpracovatelnost směsi v provozu školní slévárny vykazuje v mnoha případech nepravidelné chování a výsledky neodpovídají předpokladům. Pouze ve třech případech - 40\_1,8\_14 (40 % regenerátu, 1,8 % pojiva, 14 % tvrdidla), 40\_2\_14 a 60\_2\_14 dochází ke snížení doby zpracovatelnosti s rostoucím množstvím tvrdidla. Směsi s 1,6 % pojiva vykazují ve všech zkouškách i ve zkouškách pevnosti v ohybu odchylky, které mohou být způsobeny nepřesným dávkováním pojiva do směsi a z tohoto důvodu také neodpovídající množství tvrdidla vzhledem k pojivu. Pro srovnání je uvedena také zpracovatelnost čisté směsi. Zpracovatelnost je stejná jako všechny testované vzorky s 14 % tvrdidla.

## 5 SOUHRN VÝSLEDKŮ

### Hodnocení ostřiva

Ostřívo používané v provozu školní slévárny bylo testováno z pohledu granulometrie, obsahu plavitelných a spalitelných látek, chemické povahy a elektrické vodivosti, aby byly zjištěny výchozí vlastnosti, které ovlivňují formovací směs.

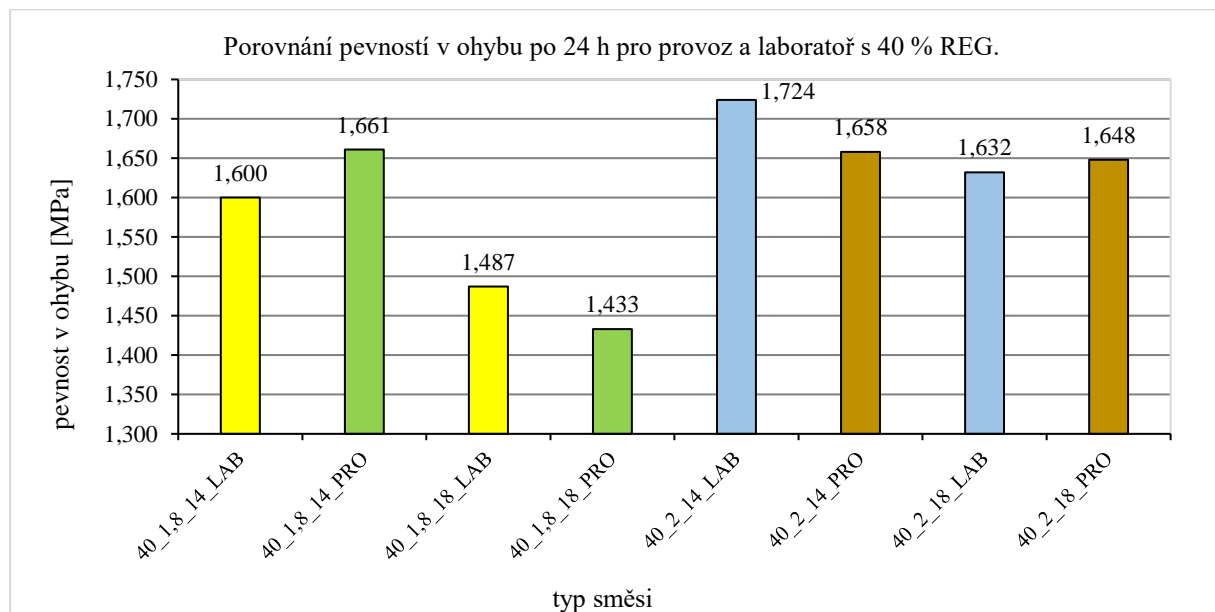
Granulometrická skladba jak nového ostřiva, tak regenerátu ukázala, že hodnota středního zrna je v rozmezí uváděná dodavatelem. Obě ostřiva jsou z pohledu granulometrie velmi podobná. Regenerát má přibližně o 10 % více hrubých podílů (1 – 0,5 mm)

Dle tabulky 10, která obsahuje údaje o množství spalitelných látek z laboratoře (100 % BK 27), bylo zjištěno, že směs z průběžného mísiče obsahuje přibližně o 15 % méně spalitelných látek. Tabulka 11 ukazuje zvyšování obsahu spalitelných látek a vodivosti s rostoucí vzdáleností směsi od odlitku ve formě.

### Hodnocení pevnosti v ohybu

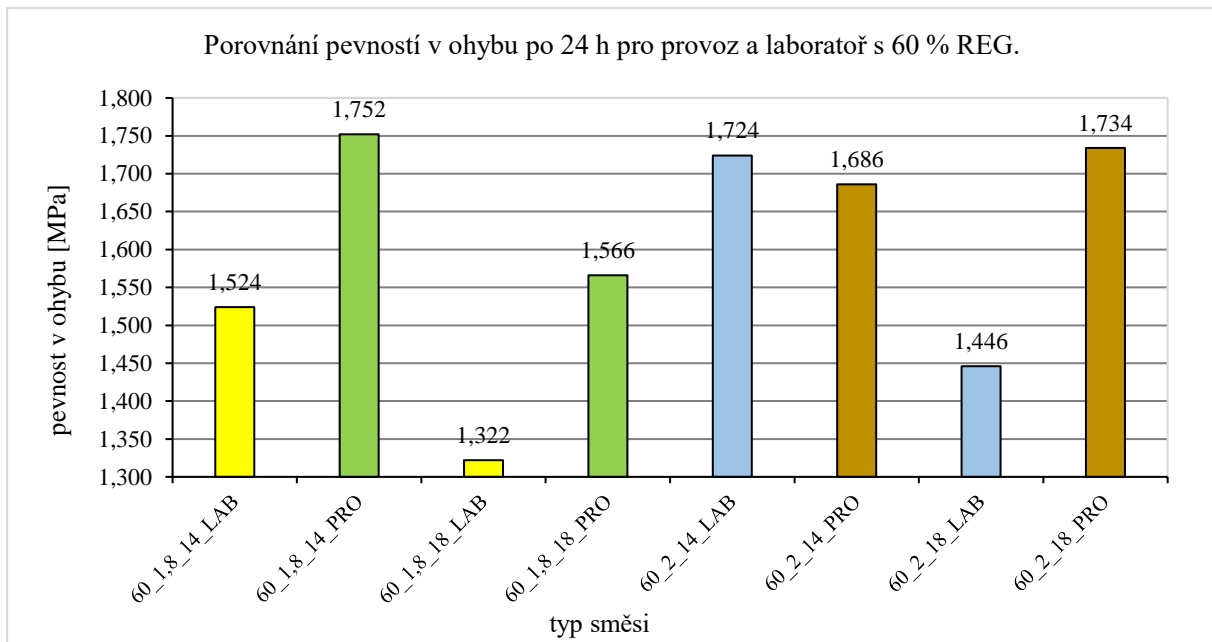
K porovnání laboratorních (LAB) a provozních (PRO) vzorků byly zvoleny pouze série s 40 a 60 % regenerátu a 1,8 a 2 % pojiva. Vzorky s obsahem 1,6 % pojiva v provozu vykazují nízké a chybové hodnoty, proto jsou z porovnání vyřazeny. Laboratorní směsi s 15 a 30 % regenerátu nemají zastoupení pro porovnání mezi laboratoří a provozem, protože mísič nedovoloval tak nízké nastavení dávkování regenerátu. Z důvodů velkého množství hodnot jsou porovnávány pouze pevnosti po 24 hodinách.

(Pozn.: 40\_1,8\_14 = 40 % regenerátu, 1,8 % pojiva, 14 % tvrdidla)



Obr. 71 Graf porovnávající pevnosti v ohybu z provozu a laboratoře

Dle grafu 71 je patrné, že nejvyšší provozní pevnosti má směs s 1,8 % pojiva a 14 % tvrdidla. Tato směs má také nejdelší zpracovatelnost – 8 minut. Obdobných pevností dosahují provozní směsi s 2 % nehledě na obsah tvrdidla. Nejnížší pevnosti dosahuje směs s 1,8 % pojiva a 18 % tvrdidla. Pro využití směsi v provozu s 40 % regenerátu je tedy zásadní, jaký je požadavek z pohledu doby zpracovatelnosti, s tím je spjatá také doba rozbírání a zda je potřeba brát v potaz spotřebu pojiva.



Obr. 72 Graf porovnávající pevnosti v ohybu z provozu a laboratoře

Z grafu 72 vyplývá, že nejvyšší provozní pevnost má směs s 1,8 % pojiva a 14 % tvrdidla (1,752 MPa). Hodnota je o 230 kPa vyšší než pro odpovídající směs z laboratoře a přibližně o 100 kPa vyšší než pro směs s 40 % regenerátu a stejným množstvím pojiva a tvrdidla. Velmi podobná je také pevnost provozní směsi s 2 % pojiva a 18 % tvrdidla (1,734 MPa). Obecně dosahují směsi s 60 % regenerátu průměrně o 100 kPa vyšší pevnosti než směsi s 40 % regenerátu.

#### *Hodnocení zpracovatelnosti*

Zpracovatelnost není z celkového porovnání laboratorních a provozních zkoušek posuzována. Nebyla testována laboratorní zpracovatelnost všech sérií jako v případě pevnosti v ohybu, jelikož se při testování vlivu regenerátu na směs neprokázala významnější změna doby zpracovatelnosti. Jediný patrný rozdíl je mezi čistým ostřivem, které má o 2-3 minuty delší zpracovatelnost a regenerátem. Pro většinu směsí z provozu bylo zjištěno, že při použití 14 % tvrdidla je doba zpracovatelnosti přibližně 8 minut. S použitím 18 % tvrdidla se tato doba snižuje v průměru na 5 minut.



## ZÁVĚR

Teoretická část se zabývá rozdělením křemenných a nekřemenných ostřív. Byly přiblíženy jejich výhody a nevýhody s bližším zaměřením na křemenné ostřívo, které se využívá v provozu školní slévárny. V další části byly vypsány jednotlivé generace pojivových systémů s detailním zaměřením na geopolymerní pojiva.

Experimentální část spočívala v testování formovací směsi v laboratorním a provozním prostředí a následném porovnání výsledků. Cílem práce bylo navržení optimálního nastavení mísiče a doporučení pro práci s technologií GEOPOL.

Z důvodu velmi kolísavé kvality regenerátu bylo doporučeno průběžné měření elektrické vodivosti směsi a tomu přizpůsobení poměru ostřiva, aby nedocházelo ke stále zhoršující se kvalitě regenerátu. Dále bylo doporučeno kvalitní prosévání regenerátu před plněním zásobníku mísiče, aby nedocházelo k ucpání síta. Vhodné by bylo sledování vlhkosti regenerovaného ostřiva, jelikož vlhkost významně ovlivňuje pojivový systém. Z důvodu konstrukce, množství regenerátu ve slévárně a ekonomicko-technického hlediska bylo doporučeno využívat dvojí množství regenerátu a to 40 % a 60 %.

Dle pevnostních testů nebylo doporučeno použití směsi s 1,6 % pojiva, jelikož mísič v takto nízkém nastavení nepracoval správně a docházelo zde ke kolísání dávkování pojiva. Řešením by byla výměna čerpadel za jiný typ s možností jemnějšího nastavení dávkování. Pro výrobu velkých forem s velkým množstvím formovací směsi bylo doporučeno použití 14 % tvrdidla, aby nedošlo k nespojení vrstev formovací směsi ve formě. Pro výrobu forem, do kterých by bylo potřeba odlévat co nejdříve (např. po 6-12 hodinách), je možné využít 60 % regenerátu, 2 % pojiva a 18 % tvrdidla. Tato směs již po čtyřech hodinách dosahuje vysokých pevností vhodných pro odlévání běžných odlitků. Pro velmi kvalitní povrchy, vysoké pevnosti, tenké stěny a složité formy je doporučeno využít čisté ostřívo BK 27 s 2 % pojiva a 14 % tvrdidla. Na úkor pomalejšího nárůstu pevností je možné dosáhnout pevnosti v ohybu téměř 2 MPa.

Z důvodu optimalizace technologie je doporučeno vytvoření provozního deníku, který by sloužil pro zaznamenávání pravidelných testů ostřiva (vodivost, pH, vlhkost) a formovací směsi (pevnost, zpracovatelnost). Pro podrobnější optimalizaci technologie by bylo vhodné zkoumat vliv nastavení zde zjištěných parametrů na kvalitu odlitků, jako je např. kvalita povrchu odlitku po odlití. Tím by se mohla zabírat například další závěrečná práce.

*Shrnutí doporučení:*

- zavedení provozního deníku
- pravidelné měření vodivosti a vlhkosti ostřiva
- pravidelné měření zpracovatelnosti a pevnosti v ohybu
- nevyužívat v provozu nižší dávkování pojiva než 1,8 %.
- sledování vlastností směsi v různých ročních obdobích a zapisovat změny do provozního deníku
- zavedení kvalitnější regenerace
- pravidelná údržba mísiče
- výměna zubového čerpadla za čerpadlo dávkovací
- konstrukční úprava dávkovače ostřiva

**SEZNAM POUŽÍTYCH ZDROJŮ [35]**

1. HORÁČEK, Milan. Teorie slévání. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1991. ISBN 80-214-0293-8.
2. JELÍNEK, Petr. Slévárenství. 5. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1282-3.
3. RUSÍN, Karel. Disperzní formovací materiály. 2., nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
4. DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
5. JELÍNEK, Petr. Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí: ostríva. Ostrava: Petr Jelínek, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
6. VÁVRA, Václav a Zdeněk LOSOS. Oxidy a hydroxidy. Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium [online]. Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita, Brno., 2006, 2013 [cit. 2022-02-26]. Dostupné [http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_7\\_5\\_oxidy/kap\\_7\\_5\\_oxidy.htm#7.5.3.2](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_7_5_oxidy/kap_7_5_oxidy.htm#7.5.3.2).
7. CUPÁK, Petr a Kamilo TOMÁŠ. Zkušenosti s nekřemennými ostrívy ve slévárně oceli ŠMERAL Brno, a.s. Slévárenství. Brno: Svaz sléváren ČR, 2006, č. 6, s. 222 - 226. ISSN 0037-6825
8. Elektrokorund zwykły - PPH Rewa. Surowce dla przemysłu - metale, szkło, elektrokorund, węgiel krzemu - PPH Rewa [online]. Copyright © 2017 [cit. 01.03.2022]. Dostupné z: <https://pph-rewa.pl/produkt/elektrokorund-zwykly/>
9. Fused magnesia chrome sand-Liaoyang Chenglong mineral products Co., Ltd. Fused magnesia chrome sand\_Fused chromium sand\_Fused aluminum chrome sand-Liaoyang Chenglong mineral products Co., Ltd [online]. Copyright © 2019 [cit. 01.03.2022]. Dostupné z: <http://en.chenglongref.com/product/675.html>
10. ZHAO, Qing, LIU, Chengjun, SHI, Peiyang, SUN, Lifeng, JIANG, Maofa, SAXEN, Henrik and ZEVENHOVEN, Ron. Cleaner Production of Chromium Oxide from Low Fe(II)-Chromite. Minerals [online]. 19 May 2020. Vol. 10, no. 5, p. 460. DOI 10.3390/min10050460. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/min10050460>
11. Special sand. Giesserei Lexikon [online]. Dostupné z: <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexikon/Encyclopedia/show/special-sand-4334/?cHash=1984c83802660281473b5978941cd092>
12. VASKOVÁ, Iveta, László VARGA, Ingo PRASS, Viktoria DARGAI, Martin CONEV, Martina HRUBOVČÁKOVÁ, Marianna BARTOŠOVÁ, Branislav BULKO a Peter DEMETER. Examination of Behavior from Selected Foundry Sands with Alkali Silicate-Based Inorganic Binders. Metals [online]. 2020, 10(2), 235. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met10020235

13. JELÍNEK, Petr. Slévárenské formovací směsi II. část: Pojivové soustavy formovacích směsí. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 80-7078-326-5.
14. JELÍNEK, Petr. Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv). [Ostrava]: P. Jelínek, 2004. ISBN 80-239-2188-6.
15. VYKOUKAL, Michal, Alois BURIAN a Markéta PŘEROVSKÁ. Anorganické pojivové systémy v historii, v současnosti a budoucnosti. Slévárenství [online]. 2017, 65(11-12), 361-374 [cit. 2022-03-06]. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/ICvnJcBvR4AMzoSy>
16. Davidovits J., Morris M.: The Pyramids. An enigma solved, Hippocrene N.Y. Books, 1988.
17. DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. In Proceedings of 2002 Conference on GÉOPOLYMER. Saint-Quentin, France, 2002, 1□16.
18. DAVIDOVITS, J. Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology. In Proceedings of the 2nd International Conference on GÉOPOLYMER'99. Saint-Quentin, 1999.
19. SLAVÍK, Roman, BEDNAŘÍK, Vratislav, VONDRUŠKA, Milan. [Http://odpady.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000\\_d](http://odpady.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000_d) [online]. 2004, 19.4.2006 [cit. 2022-03-06]. Dostupný z WWW: [http://odpady.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000\\_d](http://odpady.ihned.cz/c4-10066110-18251200-E00000_d)
20. DOLEŽAL, J., ŠKVÁRA, F., SVOBODA, P. Concrete based on Fly ash Geopolymer. [online]. 2006. [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <[http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/documents/publikace/2006/ibausil\\_2006\\_text\\_verzebook.pdf](http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/documents/publikace/2006/ibausil_2006_text_verzebook.pdf)>
21. The Environmentally-Friendly Inorganic Binder System: GEOPOL®. | foundry-planet.com - B2B Portal. Foundry-planet.com | B2B Portal for Technical and Commercial Foundry Management [online]. Copyright © 2004 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.foundry-planet.com/d/the-environmentally-friendly-inorganic-binder-system-geopolR>
22. MARTINÁK, Rostislav a Stanislav ŠOLAR. Výroba velkých odlitků v ZPS SLÉVÁRNA, a.s. Slévárenství. 2010, 5-6.
23. HOLTZER, M., S. ŽYMANKOWSKA-KUMON, R. DAŇKO, A. KMITA. Elution of Mixed Moulding Sands with the GEOPOL Binder and Core Sands with the Phenolic Resin. Archives of Foundry Engineering [online]. 2013, 13(4), 53-56 [cit. 2021-10-19]. ISSN 1897-3310. Dostupné z: doi:10.2478/afe-2013-0081

24. BURIAN, A., P. ANTOŠ, M. KAJZAROVÁ, J. NOVOTNÝ, M. HRAZDĚNA a M. VYKOUKAL. Geopolymerní pojivový systém. Slévárenství. 2006, roč. 14, č. 12, s. 468 - 469. ISSN 0037-6825.
25. Technologie GEOPOL®. SAND TEAM – výroba jader a pojiv [online]. Copyright © Sand Team [cit. 18.05.2022]. Dostupné z: <https://www.sandteam.cz/technologie-geopol/>
26. BURIAN, A., M. KAJZAROVÁ, Z. KRAHULA a J. Novotný. Další rozvoj technologie GEOPOL s anorganickým pojivem. Slévárenství. 2011, roč. 59 č. 3-4, s. 66-68.
27. POLZIN, H. Inorganic binders: for mould and core production in the foundry. Berlin: Schiele & Schön, 2014, 336 s. ISBN 978-37-949-0894-3.
28. BURIAN, A., M. KAJZAROVÁ, J. NOVOTNÝ, M. HRAZDĚNA, P. FRAJKOR. Slévárenské formovací směsi s geopolymerním pojivovým systémem pro vytvrzování CO2. Slévárenství. 2006, č. 1. ISSN 0037-6825
29. 61. zasedání OK Ekonomické konané 10. – 11.9.2019 – Technologie Geopol® W – SAND TEAM, spol. s r.o. – Odborná komise ekonomická. Odborná komise ekonomická [online]. Copyright © 2016 [cit. 06.03.2022]. Dostupné z: <http://www.okeko.cz/2019/10/11/61-zasedani-ok-ekonomicke-konane-10-11-9-2019-technologie-geopol-w-sand-team-spol-s-r-o/>
30. V-Process Casting - TPi Arcade. Aluminum Sand Castings & Rapid Protoypes - TPi Arcade [online]. Copyright © 2022 TPi Arcade [cit. 06.03.2022]. Dostupné z: <https://tpicast.com/process/>
31. P.M.Geffroy, M. Lakehal, J. Goñi, E. Beaugnon a J.F. Silvain. Thermal and mechanical behaviour of grey cast iron and ductile iron castings using magnetic molding and lost foam processes. Journal of Materials Processing Technology. 2009, 209(8), 4103-4111. ISSN 0924-013. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.002>
32. HOLZER, M, A. KMITA a R. DÁNKO. Vývoj plynů při tepelném rozkladu formovacích směsí - srovnání anorganických a organických pojiv. Slévárenství. 2015, 63(7-8), 240-247. ISSN 0037-6825.
33. CHRÁST, Jaroslav. Slévárenská zařízení. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-456-7.
34. FORMSERVIS, spol. s.r.o. *Zkoušení formovacích a jádrových směsí: Metody a postupy*. Brno: Formservis, spol. s.r.o., 2010
35. CITACE PRO: Generátor citací [online]. Brno: Citace.com, 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

**Symbols**

Označení	Legenda	Jednotka
AFS	Číslo zrnitosti	[-]
C	tepelná kapacita	[J. K <sup>-1</sup> ]
d <sub>50</sub>	velikost středního zrna	[mm]
d <sub>25</sub>	střední hodnota zrna	[mm]
d <sub>75</sub>	střední hodnota zrna	[mm]
Log W	charakter ostřiva	[-]
M <sub>0</sub>	ohybový moment	[N.m]
R <sup>2</sup>	koeficient spolehlivosti	[%]
S	Směrodatná odchylka	[-]
VL	vyplavitelné látky	[%]
W <sub>0</sub>	moment odporu v ohybu	[m <sup>3</sup> ]
γ	tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
α	teplotní roztažnost	[K <sup>-1</sup> ]
ρ	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Zkratky**

Označení	Legenda
REG	regenerát
POJ	pojivo
TVR	tvrdidlo
BTEX	benzen - toluen - ethylbenzen - xylen
PAH	polycyklické aromatické uhlovodíky
BK 27	písek Bukowno 27
TEA	triethylamin
DMEA	dimethylethaloamin
DMIA	Dimetylipropylamin
DOE	Design of Experiments
ST	samotvrdnoucí

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Návodka mísiče GM4 a technologie GEOPOL

Příloha 2 Hodnoty laboratorních ohybových pevností

Příloha 3 Hodnoty provozních ohybových pevností

Příloha 4 Hodnoty odečtené z vaznoměru

Příloha 5 Výstup plánovaného experimentu z programu Minitab

Příloha 6 Technický list písku BK 27

Příloha 7 Technický list technologie GEOPOL ST

Příloha 8 Technický list tvrdidla pro geopolymerní pojivo

## Příloha 1

## Návodka mísiče a doporučení pro obsluhu

	DÁVKOVÁNÍ POJIVA A TVRDIDLA				DOPORUČENÍ PRO OBSLUHU MÍSIČE				
	potenciometr	frekv. měnič [Hz]	pojivo [g/min]	pojivo [%]	POPIS	OSTŘIVO	POJIVO	TVRDIDLO	
P O J I V O	42-48	3,2	264	1,4	Jednoduchá forma	-	-	-	
	50-56	3,7	498	1,6					
	58-64	4,4	568	1,8	Složitá forma	100% BK 27	1,8/2 %	14%	
	66-72	5	630	2		40/60 % REG	1,8	14%	
	74-80	5,6	744	2,2	Jádra	100 % BK 27	2%	14%	
	potenciometr	frekv. měnič [Hz]	tvrdidlo [g/min]	pojivo [%]					
1,5	231	11,8	70	14	Rychle vytvrzení	60 % REG	2%	18%	
	242	12,3	74	15					
	265	13,5	80	16	Vysoká pevnost	100 % BK 27	2	14	
	280	14,1	84	17		60 % REG	2	14/18 %	
	299	15,2	90	18	Složitá forma+tenké stěny	100 % BK 27	2%	14%	
	potenciometr	frekv. měnič [Hz]	tvrdidlo [g/min]	pojivo [%]					
1,8	265	13,5	80	14	Velká forma/dlouhé formování	-	1,8%	14%	
	289	14,7	86	15		2%			
	299	15,2	90	16					
	310	16	96	17					
	337	16,9	102	18					
	ZPRACOVATELNOST								
	potenciometr	frekv. měnič [Hz]	tvrdidlo [g/min]	tvrdidlo [%]	OSTŘIVO	TVRDIDLO	ČAS [MIN]	SKLÁDÁNÍ FORMY	
2,0	293	14,9	88	14	100 % BK 27	14	8	±28	
	308	15,6	94	15		18	5	±23	
	326	16,5	100	16	40 % REG	14	8	±33	
	349	17,6	106	17		18	5	±25	
	368	18,5	114	18	60 % REG	14	8	±33	
						18	6	±24	
						[min]	[min]		
DÁVKOVÁNÍ OSTŘIVA									
ROZTEČ ŠROUBŮ NA DÁVKOVAČI				REGENERATU					
52 mm				40%					
54 mm				60%					

## Příloha 2

## Hodnoty laboratorních ohybových pevností

1/3

Tabulka P2 1

15 % REG. / 1,6 % POJ. / 14 % TVR.					15 % REG. / 1,6 % POJ. / 16 % TVR.					15 % REG. / 1,6 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,184	0,589	1,044	1,449	Mpa	0,186	0,611	0,993	1,410	Mpa	0,372	0,684	1,12	1,345
	0,157	0,566	0,871	1,452		0,239	0,618	0,918	1,382		0,352	0,659	1,078	1,453
	0,289	0,568	0,694	1,504		0,297	0,648	0,976	1,532		0,252	0,602	0,949	1,449
	0,132	0,601	0,918	1,44		0,232	0,615	0,967	1,439		0,235	0,632	0,954	1,485
	<b>0,191</b>	<b>0,581</b>	<b>0,882</b>	<b>1,461</b>		<b>0,239</b>	<b>0,623</b>	<b>0,964</b>	<b>1,441</b>		<b>0,303</b>	<b>0,644</b>	<b>1,025</b>	<b>1,433</b>

Tabulka P2 2

15 % REG. / 1,8 % POJ. / 14 % TVR.					15 % REG. / 1,8 % POJ. / 16 % TVR.					15 % REG. / 1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,149	0,433	0,833	1,534	Mpa	0,199	0,574	0,911	1,488	Mpa	0,316	0,559	0,975	1,356
	0,175	0,427	0,834	1,572		0,273	0,576	0,972	1,499		0,334	0,533	0,998	1,429
	0,151	0,449	0,795	1,689		0,244	0,505	0,969	1,495		0,313	0,591	0,935	1,437
	0,191	0,419	0,799	1,591		0,255	0,544	0,903	1,491		0,316	0,601	0,973	1,389
	<b>0,167</b>	<b>0,432</b>	<b>0,815</b>	<b>1,597</b>		<b>0,243</b>	<b>0,550</b>	<b>0,939</b>	<b>1,493</b>		<b>0,320</b>	<b>0,571</b>	<b>0,970</b>	<b>1,403</b>

Tabulka P2 3

15 % REG. / 2 % POJ. / 14 % TVR.					15 % REG. / 2 % POJ. / 16 % TVR.					15 % REG. / 2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
MPa	0,152	0,671	0,872	1,739	MPa	0,217	0,762	0,935	1,636	MPa	0,467	0,779	0,948	1,428
	0,132	0,621	0,929	1,782		0,263	0,73	0,907	1,453		0,476	0,688	0,967	1,496
	0,126	0,617	0,986	1,721		0,355	0,617	0,975	1,627		0,478	0,703	1,005	1,566
	0,129	0,681	0,938	1,708		0,217	0,639	0,982	1,559		0,432	0,767	0,899	1,318
	<b>0,135</b>	<b>0,648</b>	<b>0,931</b>	<b>1,738</b>		<b>0,263</b>	<b>0,687</b>	<b>0,950</b>	<b>1,569</b>		<b>0,463</b>	<b>0,734</b>	<b>0,955</b>	<b>1,452</b>

Tabulka P2 4

30 % REG. / 1,6 % POJ. / 14 % TVR.					30 % REG. / 1,6 % POJ. / 16 % TVR.					30 % REG. / 1,6 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,304	0,513	1,002	1,489	Mpa	0,522	0,856	1,084	1,515	Mpa	0,558	0,619	1,061	1,434
	0,289	0,588	0,913	1,769		0,514	0,862	1,010	1,502		0,552	0,668	0,988	1,501
	0,230	0,624	0,804	1,580		0,489	0,663	0,998	1,402		0,516	0,657	0,943	1,492
	0,231	0,694	1,032	1,747		0,493	0,633	1,007	1,598		0,534	0,608	1,170	1,462
	<b>0,264</b>	<b>0,605</b>	<b>0,938</b>	<b>1,646</b>		<b>0,505</b>	<b>0,754</b>	<b>1,025</b>	<b>1,504</b>		<b>0,540</b>	<b>0,638</b>	<b>1,041</b>	<b>1,472</b>

Tabulka P2 5

30 % REG. / 1,8 % POJ. / 14 % TVR.					30 % REG. / 1,8 % POJ. / 16 % TVR.					30 % REG. / 1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,120	0,733	0,690	1,474	Mpa	0,444	0,803	0,740	1,375	Mpa	0,413	0,813	0,882	1,199
	0,130	0,615	0,782	1,248		0,319	0,583	0,702	1,464		0,411	0,831	0,869	1,145
	0,110	0,638	0,793	1,363		0,377	0,643	0,762	1,372		0,408	0,723	0,857	1,102
	0,112	0,772	0,700	1,605		0,312	0,714	0,764	1,265		0,411	0,759	0,876	1,701
	<b>0,118</b>	<b>0,690</b>	<b>0,741</b>	<b>1,423</b>		<b>0,363</b>	<b>0,686</b>	<b>0,742</b>	<b>1,369</b>		<b>0,411</b>	<b>0,782</b>	<b>0,871</b>	<b>1,287</b>



Tabulka P2 6

30 % REG. / 2 % POJ. / 14 % TVR.					30 % REG. / 2 % POJ. / 16 % TVR.					30 % REG. / 2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,208	0,795	1,142	1,438	Mpa	0,313	0,815	1,066	1,435	Mpa	0,511	0,828	1,124	1,580
	0,211	0,829	0,926	1,785		0,366	0,794	1,017	1,616		0,534	0,788	0,921	1,556
	0,199	0,978	1,036	1,712		0,317	0,833	0,976	1,506		0,518	0,836	0,962	1,682
	0,207	0,703	1,011	1,652		0,315	0,885	1,029	1,533		0,515	0,902	1,152	1,622
	<b>0,206</b>	<b>0,826</b>	<b>1,029</b>	<b>1,647</b>		<b>0,328</b>	<b>0,832</b>	<b>1,022</b>	<b>1,523</b>		<b>0,520</b>	<b>0,839</b>	<b>1,040</b>	<b>1,610</b>

Tabulka P2 7

45 % REG. / 1,6 % POJ. / 14 % TVR.					45 % REG. / 1,6 % POJ. / 16 % TVR.					45 % REG. / 1,6 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,329	0,525	1,104	1,159	Mpa	0,274	1,087	1,000	1,080	Mpa	0,494	0,960	0,879	1,042
	0,212	0,522	0,906	1,221		0,259	0,775	0,952	1,045		0,382	0,861	0,929	1,102
	0,258	0,515	0,942	1,319		0,333	0,669	0,892	1,133		0,340	0,790	1,001	1,144
	0,238	0,567	0,919	1,357		0,329	0,789	0,904	1,135		0,299	0,812	0,914	1,072
	<b>0,259</b>	<b>0,532</b>	<b>0,968</b>	<b>1,264</b>		<b>0,299</b>	<b>0,830</b>	<b>0,937</b>	<b>1,098</b>		<b>0,379</b>	<b>0,856</b>	<b>0,931</b>	<b>1,090</b>

Tabulka P2 8

45 % REG. / 1,8 % POJ. / 14 % TVR.					45 % REG. / 1,8 % POJ. / 16 % TVR.					45 % REG. / 1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,125	0,706	0,826	1,761	Mpa	0,127	0,977	0,905	1,590	Mpa	0,277	0,856	0,819	1,498
	0,199	0,767	0,847	1,491		0,119	0,875	0,984	1,437		0,234	0,743	0,915	1,446
	0,123	0,839	1,105	1,626		0,108	0,822	0,981	1,483		0,288	0,763	0,986	1,471
	0,422	0,859	0,879	1,522		0,122	0,880	1,005	1,412		0,220	0,784	0,874	1,432
	<b>0,217</b>	<b>0,793</b>	<b>0,914</b>	<b>1,600</b>		<b>0,119</b>	<b>0,889</b>	<b>0,969</b>	<b>1,481</b>		<b>0,255</b>	<b>0,787</b>	<b>0,899</b>	<b>1,462</b>

Tabulka P2 9

45 % REG. / 2 % POJ. / 14 % TVR.					45 % REG. / 2 % POJ. / 16 % TVR.					45 % REG. / 2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,326	1,199	1,165	1,672	Mpa	0,229	0,997	1,195	1,141	Mpa	0,471	0,463	1,037	1,504
	0,284	0,779	0,885	1,732		0,252	0,890	0,984	1,347		0,435	0,536	0,995	1,716
	0,256	0,457	0,969	1,723		0,231	0,802	0,838	1,111		0,529	0,698	0,912	1,793
	0,358	0,929	1,180	1,770		0,223	0,823	0,976	1,395		0,396	0,665	1,096	1,514
	<b>0,306</b>	<b>0,841</b>	<b>1,050</b>	<b>1,724</b>		<b>0,234</b>	<b>0,878</b>	<b>0,998</b>	<b>1,249</b>		<b>0,458</b>	<b>0,591</b>	<b>1,010</b>	<b>1,632</b>

Tabulka P2 10

60 % REG. / 1,6 % POJ. / 14 % TVR.					60 % REG. / 1,6 % POJ. / 16 % TVR.					60 % REG. / 1,6 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,412	0,705	1,163	1,483	Mpa	0,514	1,036	1,133	1,223	Mpa	0,500	0,839	0,810	1,192
	0,482	0,611	1,129	1,377		0,425	0,786	0,844	1,287		0,532	0,700	0,887	1,107
	0,498	0,657	0,706	1,381		0,445	0,721	0,782	1,247		0,584	0,712	0,889	0,967
	0,475	0,702	0,964	1,326		0,513	0,853	1,054	1,294		0,509	0,844	0,924	1,231
	<b>0,467</b>	<b>0,669</b>	<b>0,991</b>	<b>1,392</b>		<b>0,474</b>	<b>0,849</b>	<b>0,953</b>	<b>1,263</b>		<b>0,531</b>	<b>0,774</b>	<b>0,878</b>	<b>1,124</b>

Tabulka P2 11

60 % REG. / 1,8 % POJ. / 14 % TVR.					60 % REG. / 1,8 % POJ. / 16 % TVR.					60 % REG. / 1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,576	0,884	1,515	1,518	Mpa	0,454	0,569	0,929	1,465	Mpa	0,277	0,756	0,819	1,314
	0,468	0,851	0,924	1,588		0,337	0,673	0,917	1,433		0,234	0,743	0,811	1,276
	0,425	0,746	0,933	1,457		0,313	0,616	0,903	1,478		0,288	0,663	0,886	1,362
	0,498	0,821	1,056	1,531		0,393	0,739	0,995	1,478		0,220	0,684	0,874	1,334
	<b>0,492</b>	<b>0,826</b>	<b>1,107</b>	<b>1,524</b>		<b>0,374</b>	<b>0,649</b>	<b>0,936</b>	<b>1,464</b>		<b>0,255</b>	<b>0,712</b>	<b>0,848</b>	<b>1,322</b>

Tabulka P2 12

60 % REG. / 2 % POJ. / 14 % TVR.					60 % REG. / 2 % POJ. / 16 % TVR.					60 % REG. / 2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,453	0,882	1,265	1,815	Mpa	0,418	0,791	0,927	1,646	Mpa	0,443	0,796	1,177	1,507
	0,467	0,827	1,037	1,670		0,499	0,735	0,995	1,563		0,449	0,626	1,099	1,503
	0,448	0,828	0,927	1,704		0,519	0,873	0,911	1,725		0,460	0,623	1,066	1,343
	0,445	0,912	1,148	1,707		0,474	0,942	0,985	1,466		0,495	0,652	1,118	1,429
	<b>0,453</b>	<b>0,862</b>	<b>1,094</b>	<b>1,724</b>		<b>0,478</b>	<b>0,835</b>	<b>0,955</b>	<b>1,600</b>		<b>0,462</b>	<b>0,674</b>	<b>1,115</b>	<b>1,446</b>

## Příloha 3

## Hodnoty provozních pevností v ohybu

1/2

Tabulka P3 1

100 % BK 27/1,8 % POJ. /14 % TVR.					100 % BK 27/1,8 % POJ. /16 % TVR.					100 % BK 27/1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,375	0,507	0,894	1,868	Mpa	0,675	0,928	1,121	1,648	Mpa	0,800	0,923	1,275	1,644
	0,348	0,518	0,882	1,772		0,662	0,894	1,101	1,643		0,897	0,982	1,187	1,579
	0,332	0,552	0,887	1,825		0,691	0,909	1,119	1,692		0,804	0,964	1,267	1,449
	0,319	0,537	0,876	1,793		0,598	0,911	1,095	1,602		0,811	0,971	1,191	1,591
	<b>0,344</b>	<b>0,529</b>	<b>0,885</b>	<b>1,815</b>		<b>0,657</b>	<b>0,911</b>	<b>1,109</b>	<b>1,646</b>		<b>0,828</b>	<b>0,960</b>	<b>1,230</b>	<b>1,566</b>

Tabulka P3 2

100 % BK 27/2 % POJ. /14 % TVR.					100 % BK 27/2 % POJ. /16 % TVR.					100 % BK 27/2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,610	0,661	1,148	1,901	Mpa	0,722	0,906	1,139	1,656	Mpa	0,764	1,156	1,243	1,664
	0,608	0,707	0,993	1,906		0,612	0,920	1,188	1,777		0,774	1,098	1,272	1,569
	0,659	0,692	1,105	1,982		0,711	0,900	1,157	1,702		0,768	1,099	1,225	1,657
	0,688	0,682	1,112	1,846		0,673	0,889	1,166	1,669		0,724	1,103	1,264	1,544
	<b>0,641</b>	<b>0,686</b>	<b>1,090</b>	<b>1,909</b>		<b>0,680</b>	<b>0,904</b>	<b>1,163</b>	<b>1,701</b>		<b>0,758</b>	<b>1,114</b>	<b>1,251</b>	<b>1,609</b>

Tabulka P3 3

40 % REG. / 1,6 % POJ. / 14 % TVR.					40 % REG. / 1,6 % POJ. / 16 % TVR.					40 % REG. / 1,6 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,228	0,356	0,852	1,098	Mpa	0,374	0,820	1,072	1,196	Mpa	0,469	0,745	1,155	1,275
	0,262	0,419	0,642	1,380		0,417	0,634	0,901	1,271		0,405	0,732	1,085	1,332
	0,295	0,322	0,671	1,099		0,395	0,699	0,992	1,209		0,413	0,719	1,099	1,318
	0,272	0,385	0,786	1,118		0,384	0,718	1,001	1,191		0,451	0,699	1,106	1,229
	<b>0,264</b>	<b>0,371</b>	<b>0,738</b>	<b>1,174</b>		<b>0,393</b>	<b>0,718</b>	<b>0,992</b>	<b>1,217</b>		<b>0,435</b>	<b>0,724</b>	<b>1,111</b>	<b>1,289</b>

Tabulka P3 4

40 % REG. / 1,8 % POJ. / 14 % TVR.					40 % REG. / 1,8 % POJ. / 16 % TVR.					40 % REG. / 1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,466	0,791	1,118	1,614	Mpa	0,404	0,812	1,026	1,563	Mpa	0,400	0,714	1,134	1,715
	0,495	0,866	0,929	1,693		0,408	0,882	1,075	1,503		0,452	0,820	1,035	1,249
	0,472	0,801	1,098	1,666		0,441	0,995	1,088	1,445		0,431	0,794	0,998	1,418
	0,459	0,793	1,047	1,671		0,420	0,982	1,041	1,492		0,415	0,777	1,114	1,348
	<b>0,473</b>	<b>0,813</b>	<b>1,048</b>	<b>1,661</b>		<b>0,418</b>	<b>0,918</b>	<b>1,058</b>	<b>1,501</b>		<b>0,425</b>	<b>0,776</b>	<b>1,070</b>	<b>1,433</b>

Tabulka P3 5

40 % REG. / 2 % POJ. / 14 % TVR.					40 % REG. / 2 % POJ. / 16 % TVR.					40 % REG. / 2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,425	0,685	1,112	1,531	Mpa	0,374	0,934	1,088	2,011	Mpa	0,467	0,916	1,214	1,797
	0,383	0,695	1,264	1,754		0,363	1,040	1,325	2,040		0,459	0,849	1,212	1,635
	0,393	0,676	1,191	1,665		0,402	0,995	1,213	1,912		0,433	0,911	1,258	1,618
	0,401	0,640	1,206	1,682		0,395	0,946	1,294	1,815		0,408	0,894	1,249	1,541
	<b>0,401</b>	<b>0,674</b>	<b>1,193</b>	<b>1,658</b>		<b>0,384</b>	<b>0,979</b>	<b>1,230</b>	<b>1,945</b>		<b>0,442</b>	<b>0,893</b>	<b>1,233</b>	<b>1,648</b>

Tabulka P3 6

60 % REG. / 1,6 % POJ. / 14 % TVR.					60 % REG. / 1,6 % POJ. / 16 % TVR.					60 % REG. / 1,6 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,386	0,637	0,956	1,114	Mpa	0,436	0,927	1,051	1,243	Mpa	0,422	0,898	0,915	1,337
	0,378	0,598	0,811	1,059		0,384	0,816	1,083	1,156		0,441	0,897	0,991	1,329
	0,372	0,597	0,912	1,149		0,388	0,764	0,960	1,231		0,413	0,869	1,008	1,358
	0,394	0,610	0,846	1,193		0,421	0,799	0,990	1,197		0,433	0,807	1,004	1,333
	<b>0,383</b>	<b>0,611</b>	<b>0,881</b>	<b>1,129</b>		<b>0,407</b>	<b>0,827</b>	<b>1,021</b>	<b>1,207</b>		<b>0,427</b>	<b>0,868</b>	<b>0,980</b>	<b>1,339</b>

Tabulka P3 7

60 % REG. / 1,8 % POJ. / 14 % TVR.					60 % REG. / 1,8 % POJ. / 16 % TVR.					60 % REG. / 1,8 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,532	0,704	0,911	1,681	Mpa	0,564	0,885	1,267	1,665	Mpa	0,588	0,862	1,293	1,485
	0,434	0,629	0,898	1,845		0,550	0,762	1,117	1,736		0,562	0,671	1,194	1,641
	0,442	0,770	0,855	1,773		0,519	0,746	1,130	1,619		0,553	0,764	1,116	1,559
	0,519	0,708	0,916	1,709		0,499	0,807	1,184	1,675		0,573	0,779	1,091	1,579
	<b>0,482</b>	<b>0,703</b>	<b>0,895</b>	<b>1,752</b>		<b>0,533</b>	<b>0,800</b>	<b>1,175</b>	<b>1,674</b>		<b>0,569</b>	<b>0,769</b>	<b>1,174</b>	<b>1,566</b>

Tabulka P3 8

60 % REG. / 2 % POJ. / 14 % TVR.					60 % REG. / 2 % POJ. / 16 % TVR.					60 % REG. / 2 % POJ. / 18 % TVR.				
t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24	t[h]	1	2	4	24
Mpa	0,566	0,918	1,119	1,749	Mpa	0,576	0,982	1,229	1,844	Mpa	0,503	1,004	1,290	1,717
	0,565	0,784	1,107	1,661		0,657	0,902	1,051	1,824		0,483	0,977	1,425	1,711
	0,519	0,852	0,992	1,695		0,567	0,916	1,169	1,834		0,502	0,877	1,358	1,740
	0,537	0,819	1,248	1,638		0,528	0,993	1,197	1,810		0,492	0,829	1,216	1,766
	<b>0,547</b>	<b>0,843</b>	<b>1,117</b>	<b>1,686</b>		<b>0,582</b>	<b>0,948</b>	<b>1,162</b>	<b>1,828</b>		<b>0,495</b>	<b>0,922</b>	<b>1,322</b>	<b>1,734</b>

Příloha 4

Hodnoty odečtené z vaznoměru

BK27		15_85		30_70		45_55		60_40	
čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost
[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]
4	29	3	29	4	25	2	20	4	17
7	29	6	34	6	29	4	34	6	25
9	32	9	43	8	34	6	38	8	38
12	42	11	51	10	42	8	42	10	63
15	102	12	102	12	76	10	81	12	85
18	230	15	166	14	98	12	119	14	136
21	520	18	290	16	127	14	157	16	196
		19	345	18	209	16	204	18	302
		20	392	20	290	18	324	19	354
				22	449	20	379	20	371
70_30		80_20		90_10		BK 1,8_14		BK27 1,8_18	
čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost
[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]
2	29	4	25	2	12	4	8	2	8
4	29	6	38	4	22	6	18	4	8
6	34	8	46	6	25	8	25	6	21
8	68	10	63	8	38	12	51	8	25
10	98	12	97	10	68	14	85	10	31
12	110	14	132	12	105	16	104	12	55
14	145	16	221	14	209	18	132	16	102
16	182	18	277	16	285	20	185	18	157
18	320	19	332	18	469	22	233	21	405
20	383	20	379			24	375		
BK27 1,6_16		BK27 2_16		100 BK 2 % 14 %		100 BK 2 % 18 %		100BK 1,8 % 18 %	
čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost
[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]
4	21	4	17	2	8	2	0	6	8
7	21	9	21	12	12	9	8	12	12
9	21	12	34	14	17	10	12	14	17
12	34	15	51	16	35	12	17	16	34
15	75	18	89	17	105	14	72	18	68
18	145	21	213	18	285	16	168	20	149
21	332	24	422	20	307	18	371	22	255
				22	366			24	443
40REG 1,6% 14%		40REG 1,6% 18%		60REG 1,6% 14%		60REG 1,6% 18%		60REG 1,8% 14%	
čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost	čas	pevnost
[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]
2	0	2	0	2	0	2	8	2	8
8	25	6	12	4	12	4	8	6	8
10	29	8	12	6	21	6	21	8	12
12	106	10	29	8	34	8	29	12	38
14	153	12	38	10	63	10	46	16	93
16	170	14	76	12	89	12	68	20	187
20	204	16	110	14	110	14	136	24	337
22	226	18	183	16	217	16	213	26	405
24	268	20	251	18	315	18	307		
26	370	22	366	20	383	20	405		

## Výsledky plánovaného experimentu pro laboratorní směs 15 % REG + 85 % BK 27

16.5.2022 15:17:08

Welcome to Minitab, press F1 for help.

**Multilevel Factorial Design**

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 36 Total runs: 144  
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3; 4

**Results for: 15\_85 LAB.****General Linear Model: PEVNOST versus POJIVO; TVRDIDLO; ČAS VYTVRZENI**

Factor	Type	Levels	Values
POJIVO	fixed	3	1,6; 1,8; 2,0
TVRDIDLO	fixed	3	14; 16; 18
ČAS VYTVRZENI	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
POJIVO	2	0,18650	0,18650	0,09325	33,10
TVRDIDLO	2	0,08135	0,08135	0,04067	14,44
ČAS VYTVRZENI	3	30,59073	30,59073	10,19691	3619,81
POJIVO*TVRDIDLO	4	0,01225	0,01225	0,00306	1,09
POJIVO*ČAS VYTVRZENI	6	0,14502	0,14502	0,02417	8,58
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	6	0,45965	0,45965	0,07661	27,20
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	12	0,14470	0,14470	0,01206	4,28
Error	108	0,30423	0,30423	0,00282	
Total	143	31,92442			

Source	P
POJIVO	0,000
TVRDIDLO	0,000
ČAS VYTVRZENI	0,000
POJIVO*TVRDIDLO	0,366
POJIVO*ČAS VYTVRZENI	0,000
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	0,000
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	0,000
Error	
Total	

S = 0,0530751 R-Sq = 99,05% R-Sq(adj) = 98,74%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	0,28900	0,19050	0,02654	0,09850	2,14 R
23	0,35500	0,26300	0,02654	0,09200	2,00 R
73	1,04400	0,88175	0,02654	0,16225	3,53 R
75	0,69400	0,88175	0,02654	-0,18775	-4,08 R
97	1,12000	1,02525	0,02654	0,09475	2,06 R
115	1,68900	1,59650	0,02654	0,09250	2,01 R
130	1,45300	1,56875	0,02654	-0,11575	-2,52 R
143	1,56600	1,45200	0,02654	0,11400	2,48 R
144	1,31800	1,45200	0,02654	-0,13400	-2,92 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Výsledky plánovaného experimentu pro laboratorní směs 30 % REG + 70 % BK 27

16.5.2022 15:48:51

Welcome to Minitab, press F1 for help.

### Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 36 Ttal runs: 144  
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3; 4

### Results for: 30\_70 LAB

#### General Linear Model: PEVNOST versus POJIVO; TVRDIDLO; ČAS VYTVRZENI

Factor	Type	Levels	Values
POJIVO	fixed	3	1,6; 1,8; 2,0
TVRDIDLO	fixed	3	14; 16; 18
ČAS VYTVRZENI	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	
P						
POJIVO	2	0,67758	0,67758	0,33879	44,40	0,0
00						
TVRDIDLO	2	0,14097	0,14097	0,07048	9,24	0,0
00						
ČAS VYTVRZENI	3	24,25864	24,25864	8,08621	1059,71	0,0
00						
POJIVO*TVRDIDLO	4	0,05087	0,05087	0,01272	1,67	0,1
63						
POJIVO*ČAS VYTVRZENI	6	0,40625	0,40625	0,06771	8,87	0,0
00						
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	6	0,56147	0,56147	0,09358	12,26	0,0
00						
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	12	0,10562	0,10562	0,00880	1,15	0,3
26						
Error	108	0,82410	0,82410	0,00763		
Total	143	27,02550				

S = 0,0873532 R-Sq = 96,95% R-Sq(adj) = 95,96%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
47	0,97800	0,82625	0,04368	0,15175	2,01 R
109	1,48900	1,64625	0,04368	-0,15725	-2,08 R
114	1,24800	1,42250	0,04368	-0,17450	-2,31 R
116	1,60500	1,42250	0,04368	0,18250	2,41 R
117	1,43800	1,64675	0,04368	-0,20875	-2,76 R
139	1,10200	1,28675	0,04368	-0,18475	-2,44 R
140	1,70100	1,28675	0,04368	0,41425	5,48 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Výsledky plánovaného experimentu pro laboratorní směs 45 % REG + 55 % BK 27

16.5.2022 16:16:22

Welcome to Minitab, press F1 for help.

### Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 36 Total runs: 144  
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3; 4

### Result: 45\_55 LAB

### General Linear Model: PEVNOST versus POJIVO; TVRDIDLO; ČAS VYTVRZENÍ

Factor	Type	Levels	Values
POJIVO	fixed	3	1,6; 1,8; 2,0
TVRDIDLO	fixed	3	14; 16; 18
ČAS VYTVRZENÍ	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	
P						
POJIVO	2	0,39554	0,39554	0,19777	19,45	0,00
0						
TVRDIDLO	2	0,04325	0,04325	0,02162	2,13	0,12
4						
ČAS VYTVRZENÍ	3	23,21135	23,21135	7,73712	760,75	0,00
0						
POJIVO*TVRDIDLO	4	0,15152	0,15152	0,03788	3,72	0,00
7						
POJIVO*ČAS VYTVRZENÍ	6	0,95237	0,95237	0,15873	15,61	0,00
0						
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENÍ	6	0,62846	0,62846	0,10474	10,30	0,00
0						
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENÍ	12	0,48174	0,48174	0,04014	3,95	0,00
0						
Error	108	1,09840	1,09840	0,01017		
Total	143	26,96262				

S = 0,100848 R-Sq = 95,93% R-Sq(adj) = 94,61%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
8	0,42200	0,21725	0,05042	0,20475	2,34 R
45	1,19900	0,84100	0,05042	0,35800	4,10 R
47	0,45700	0,84100	0,05042	-0,38400	-4,40 R
49	1,08700	0,83000	0,05042	0,25700	2,94 R
79	1,10500	0,91425	0,05042	0,19075	2,18 R
93	1,19500	0,99825	0,05042	0,19675	2,25 R

R denotes an observation with a large standardized residual.



## Výsledky plánovaného experimentu pro laboratorní směs 60 % REG + 40 % BK 27

16.5.2022 16:23:13

Welcome to Minitab, press F1 for help.

### Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 4  
Base runs: 36 Total runs: 144  
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3; 4

### Results for: 60\_40 LAB

#### Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 4  
Base runs: 36 Total runs: 144  
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3; 4

### Results for: Worksheet 4

#### General Linear Model: PEVNOST versus POJIVO; TVRDIDLO; ČAS VYTVRZENI

Factor	Type	Levels	Values
POJIVO	fixed	3	1,6; 1,8; 2,0
TVRDIDLO	fixed	3	14; 16; 18
ČAS VYTVRZENI	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	
P						
POJIVO	2	0,35764	0,35764	0,17882	21,72	0,00
0						
TVRDIDLO	2	0,35598	0,35598	0,17799	21,62	0,00
0						
ČAS VYTVRZENI	3	18,53953	18,53953	6,17984	750,71	0,00
0						
POJIVO*TVRDIDLO	4	0,11360	0,11360	0,02840	3,45	0,01
1						
POJIVO*ČAS VYTVRZENI	6	0,49889	0,49889	0,08315	10,10	0,00
0						
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	6	0,17804	0,17804	0,02967	3,60	0,00
3						
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	12	0,29975	0,29975	0,02498	3,03	0,00
1						
Error	108	0,88906	0,88906	0,00823		
Total	143	21,23248				

S = 0,0907304 R-Sq = 95,81% R-Sq(adj) = 94,46%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
49	1,03600	0,84900	0,04537	0,18700	2,38 R
73	1,16300	0,99050	0,04537	0,17250	2,20 R
75	0,70600	0,99050	0,04537	-0,28450	-3,62 R
77	1,51500	1,10700	0,04537	0,40800	5,19 R
78	0,92400	1,10700	0,04537	-0,18300	-2,33 R
79	0,93300	1,10700	0,04537	-0,17400	-2,21 R
81	1,26500	1,09425	0,04537	0,17075	2,17 R

## Výsledky plánovaného experimentu pro provozní směs 40 % REG

---

**9.5.2022 11:49:00**


---

Welcome to Minitab, press F1 for help.

**Multilevel Factorial Design**

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 36 Total runs: 144  
 Base blocks: 1 Total blocks: 4

Number of levels: 3; 3; 4

**Results for: 40 % REG. Provoz****Multilevel Factorial Design**

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 36 Total runs: 144  
 Base blocks: 1 Total blocks: 4

Number of levels: 3; 3; 4

**Results for: Worksheet 6****General Linear Model: PEVNOST versus Pojivo; Tvrdidlo; cas**

Factor	Type	Levels	Values
Pojivo	fixed	3	1,6; 1,8; 2,0
Tvrdidlo	fixed	3	14; 16; 18
cas	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pojivo	2	1,83118	1,83118	0,91559	196,81	0,000
Tvrdidlo	2	0,30444	0,30444	0,15222	32,72	0,000
cas	3	23,53509	23,53509	7,84503	1686,32	0,000
Pojivo*Tvrdidlo	4	0,48529	0,48529	0,12132	26,08	0,000
Pojivo*cas	6	0,76643	0,76643	0,12774	27,46	0,000
Tvrdidlo*cas	6	0,30807	0,30807	0,05134	11,04	0,000
Pojivo*Tvrdidlo*cas	12	0,20715	0,20715	0,01726	3,71	0,000
Error	108	0,50243	0,50243	0,00465		
Total	143	27,94008				

S = 0,0682068 R-Sq = 98,20% R-Sq(adj) = 97,62%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
86	0,92900	1,04800	0,03410	-0,11900	-2,01 R
101	1,08800	1,23000	0,03410	-0,14200	-2,40 R
110	1,38000	1,17375	0,03410	0,20625	3,49 R
129	1,71500	1,43250	0,03410	0,28250	4,78 R
130	1,24900	1,43250	0,03410	-0,18350	-3,11 R
133	1,53100	1,65800	0,03410	-0,12700	-2,15 R
140	1,81500	1,94450	0,03410	-0,12950	-2,19 R
141	1,79700	1,64775	0,03410	0,14925	2,53 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

## Výsledky plánovaného experimentu pro provozní směs 60 % REG

16.5.2022 16:41:04

Welcome to Minitab, press F1 for help.

### Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 36 Total runs: 144  
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 3; 3; 4

### Results for: 60 % REG. provoz

#### General Linear Model: PEVNOST versus POJIVO; TVRDIDLO; ČAS VYTVRZENI

Factor	Type	Levels	Values
POJIVO	fixed	3	1,6; 1,8; 2,0
TVRDIDLO	fixed	3	14; 16; 18
ČAS VYTVRZENI	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	
P						
POJIVO	2	1,65492	1,65492	0,82746	274,31	0,0
00						
TVRDIDLO	2	0,28697	0,28697	0,14348	47,57	0,0
00						
ČAS VYTVRZENI	3	21,52270	21,52270	7,17423	2378,34	0,0
00						
POJIVO*TVRDIDLO	4	0,04238	0,04238	0,01060	3,51	0,0
10						
POJIVO*ČAS VYTVRZENI	6	0,88345	0,88345	0,14724	48,81	0,0
00						
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	6	0,13776	0,13776	0,02296	7,61	0,0
00						
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	12	0,30860	0,30860	0,02572	8,53	0,0
00						
Error	108	0,32578	0,32578	0,00302		
Total	143	25,16256				

S = 0,0549226 R-Sq = 98,71% R-Sq(adj) = 98,29%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
49	0,92700	0,82650	0,02746	0,10050	2,11 R
66	0,67100	0,76900	0,02746	-0,09800	-2,06 R
83	0,99200	1,11650	0,02746	-0,12450	-2,62 R
84	1,24800	1,11650	0,02746	0,13150	2,76 R
94	1,05100	1,16150	0,02746	-0,11050	-2,32 R
101	1,29300	1,17350	0,02746	0,11950	2,51 R
106	1,42500	1,32225	0,02746	0,10275	2,16 R
108	1,21600	1,32225	0,02746	-0,10625	-2,23 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Výsledky plánovaného experimentu pro provozní směs 100 % BK 27

16.5.2022 16:47:45

Welcome to Minitab, press F1 for help.

### Multilevel Factorial Design

Factors: 3 Replicates: 4  
 Base runs: 24 Total runs: 96  
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Number of levels: 2; 3; 4

### Results for: 100 % BK 27 Provoz

#### General Linear Model: PEVNOST versus POJIVO; TVRDIDLO; ČAS VYTVRZENI

Factor	Type	Levels	Values
POJIVO	fixed	2	1,8; 2,0
TVRDIDLO	fixed	3	14; 16; 18
ČAS VYTVRZENI	fixed	4	1; 2; 4; 24

Analysis of Variance for PEVNOST, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	
P						
POJIVO	1	0,17528	0,17528	0,17528	107,71	0,00
0						
TVRDIDLO	2	0,51195	0,51195	0,25597	157,31	0,00
0						
ČAS VYTVRZENI	3	15,17047	15,17047	5,05682	3107,66	0,00
0						
POJIVO*TVRDIDLO	2	0,12739	0,12739	0,06369	39,14	0,00
0						
POJIVO*ČAS VYTVRZENI	3	0,00469	0,00469	0,00156	0,96	0,41
6						
TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	6	1,20515	1,20515	0,20086	123,44	0,00
0						
POJIVO*TVRDIDLO*ČAS VYTVRZENI	6	0,09565	0,09565	0,01594	9,80	0,00
0						
Error	72	0,11716	0,11716	0,00163		
Total	95	17,40773				

S = 0,0403388 R-Sq = 99,33% R-Sq(adj) = 99,11%

Unusual Observations for PEVNOST

Obs	PEVNOST	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
54	0,99300	1,08950	0,02017	-0,09650	-2,76 R
79	1,98200	1,90875	0,02017	0,07325	2,10 R
86	1,77700	1,70100	0,02017	0,07600	2,18 R
89	1,64400	1,56575	0,02017	0,07825	2,24 R
91	1,44900	1,56575	0,02017	-0,11675	-3,34 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

## Příloha 6

### Technický list křemenného písku BK

**SAND TEAM**

Technický list

## KŘEMENNÝ PÍSEK BK

Křemenné písky z lokality Bukowno jsou přírodní prané písky, vhodné pro výrobu slévárenských forem a jader.

	BK 23	BK 27	BK 31	BK 33	BK 35
Střední zrno $d_{50}$	0,23	0,27	0,31	0,35	0,38
Teplota spékání	1500°C	1500°C	1500°C	1500°C	1500°C
Obsah $SiO_2$	Min. 97,3				
Obsah $Fe_2O_3$	Max. 0,21 %				
Obsah Uhlíkatů	Max. 0,20 %				
Rozsah pH	Okolo 6,9				
Vyplavitelné podíly	Max. 0,2%				

#### Vlastnosti:

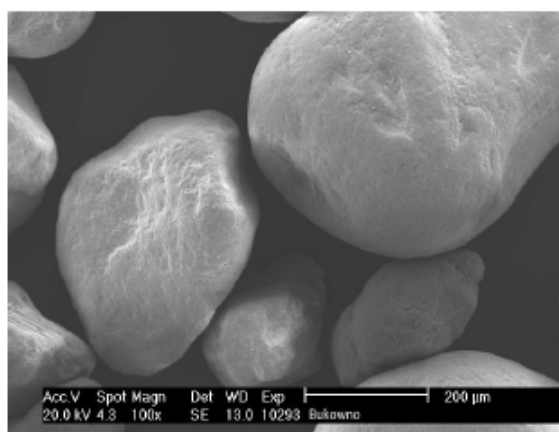
- Oválný tvar zrn s hladkým povrchem bez eroze
- Odolnost zrn proti tříštění při pseudopravě
- Možnost použití tohoto ostřiva pro výrobu forem a jader určených pro odlévání neželezných kovů, litiny i oceli
- Při použití regenerace ostřiv lze dosáhnout sníženého dávkování pojiv

#### Balení:

Volně ložené v sušeném i mokřém stavu  
(silokamion, sklopky)

Big Bag á 1 t

Papírové pytle á 25 kg



Křemenný písek z pískovny Sibelco lokalita Bukowno je upravený přírodní produkt. Výše uvedená data jsou střední hodnoty (použitá metodika dle norem PN-85/H-11001 a PN-81/H-11074). Spotřebitel by měl ověřit vhodnost tohoto produktu pro své použití.

Tel.: +420 517 324 961-9  
Fax: +420 517 324 960  
E-Mail: [sandteam@sandteam.cz](mailto:sandteam@sandteam.cz)

SAND TEAM, spol. s r.o.  
Holubice 331, 683 51 Holubice  
[www.sandteam.cz](http://www.sandteam.cz)

TB/OŘ/v8/4.2.2020



## Technický list

## TECHNOLOGIE GEOPOL® ST

### POJIVA PRO TECHNOLOGII SAMOTVRDNOUCÍCH SMĚSÍ

**Charakteristika:**

Anorganické geopolymerní pojivo TECHNOLOGIE GEOPOL® ST je určené pro výrobu slévarenských forem a jader, vytvrzovaných tvrdidly. Pojivo, anorganický geopolymerní prekurzor, má nízký stupeň polymerace. Působením tvrdidla se zvyšuje stupeň polymerace a dochází k tvorbě anorganického polymeru s vysokou pojivou schopností.

Díky adhezivnímu oddělení pojivové obálky má tento pojivový systém dobrou rozpadavost po odlití. Lze jej dobře mechanicky regenerovat s možností vysokého využití regenerátu. Prostřednictvím vysokého využití regenerátu zpět do výroby přispívá pojivový systém GEOPOL® k řešení ekologie ve slévárenství.

Zpracovatelnost směsi je možno nastavit v rozmezí od 2 do 90 minut. Typ tvrdidla rovněž ovlivňuje dobu rozebírání. Lze tedy říci, že vhodným výběrem nebo kombinací tvrdidel SA nebo GEOFIX lze nastavit požadované parametry pro konkrétní výrobu. Zpět pro výrobu forem a jader lze využít 85% regenerátu při použití účinné otírky, např. regenerátor typ AT, vyvinutý v SAND TEAM, spol. s r.o.

Pojivový systém je šetrný k životnímu prostředí a k pracovníkům slévárny. V celém výrobním procesu (příprava směsi, výroba jader, skladování, odlévání, vytloukání, regenerace) nedochází k tvorbě kouřů, dýmů a nevyvíjí se zápach.

**Oblast použití:**

- Pojivo je určeno pro přípravu směsí vytvrzovaných kapalnými tvrdidly.
- Pojivo je určeno pro odlitky z oceli, litiny a neželezných kovů.
- Pojivo GEOPOL® je vhodné pro většinu křemenných i nekřemenných ostřiv a pro regeneráty.

**Typy pojiv:**

- GEOPOL 618 ... pojivo pro všeobecné použití.
- GEOPOL 620 ... pro odlitky z litiny a oceli, zlepšená rozpadavost při vyšších teplotách.
- GEOPOL 550 ... pojivo pro všeobecné použití, zejména v kombinaci s novým ostřivem.

**Donoručené dávkování:**

- GEOPOL 618 1,6 až 2,0 hmotných dílů.
- GEOPOL 620 1,6 až 2,0 hmotných dílů.
- GEOPOL 550 1,6 až 2,0 hmotných dílů.
- Tvrdidla řady SA, GEOFIX 12 až 18 hmotných dílů na množství pojiva.

**Vlastnosti pojiv:**

Vlastnosti pojiv		GEOPOL 618	GEOPOL 620	GEOPOL 550
Práh polymerace	% Na <sub>2</sub> O	5,8 až 6,3	5,8 až 6,5	5,8 až 6,3
pH	---	12 až 14	12 až 14	12 až 14
Hustota	g.cm <sup>-3</sup>	1,49 až 1,52	1,49 až 1,53	1,49 až 1,52
Viskozita EN ISO 2431: 4 mm	sec	25 až 40	25 až 50	25 až 40

**Doprava a skladování:**

- Pojivo není pro přepravu klasifikováno jako nebezpečné a nepodléhá nařízení ADR.
- Skladovat v uzavřených obalech při teplotě minimálně 10 °C. Zaručená skladovatelnost pojiva GEOPOL® při 20 °C je 6 měsíců.

**Balení a skladování:**

- Kontejnery 1000 lt, sudy 200 lt.

## Technický list

## TVRDIDLA PRO GEOPOLYMERNÍ POJIVO

**Charakteristika a oblast použití:**

- Kapalná tvrdidla určená pro vytvrzování slévarenský anorganických geopolymerních pojiv na bázi polysialátů

**Použití:**

- Tvrdidla jsou určena především pro pojivo GEPOL<sup>®</sup>
- Použitím různých tvrdidel lze nastavit zpracovatelnost směsi v rozmezí od několika minut do několika hodin. Čistota a stabilita vlastností surovin zajišťuje dosažení konstantní doby zpracovatelnosti.

**Vlastnosti:**

Označení	Hustota při 20 <sup>o</sup> C	Reaktivita	Vzhled	Skladovatelnost při 20 <sup>o</sup> C
SA 71	1,11 – 1,18	pomalá	bezbarvý	24 měsíců
SA 72				
SA 73				
SA 74		střední		
SA 75		rychlá		
SA 76				
CE 50	1,13	velmi pomalá		
CE 75	1,08			

**Dávkování:**

Doporučené dávkování se pohybuje v rozmezí 12 až 18% vztažených na množství pojiva. Dávkování je ovlivněno použitým typem pojiva a danými provozními podmínkami

**Balení a skladování:**

- Kontejnery 1000 l
- Sudy 200 l
- Nejsou zvláštní nároky na skladování

**Ekologické podmínky:**

- Tvrdidla nejsou pro přepravu klasifikována jako nebezpečná