

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geologie



Dita Rokosová

Přírodní hydraulické vápno a přírodní cement: možné východisko k udržitelnější budoucnosti
stavebních pojiv

Natural hydraulic lime and natural cement: a possible solution to more sustainable future of
construction binders

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Mgr. Richard Příkryl, Dr.

Praha, 2023

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 15. 5. 2023

.....
Dita Rokosová

Poděkování:

V první řadě bych chtěla poděkovat svému školiteli prof. Mgr. Richardu Přikrylovi, Dr. za odborné vedení, předané vědomosti, jeho čas a poskytnutou pomoc při tvorbě této práce.

Taktéž velmi děkuji Mgr. Michalu Rollovi za jeho cenné rady a připomínky se závěrečnými úpravami práce.

Nakonec bych chtěla poděkovat a vyjádřit vděčnost své rodině za jejich trpělivost a celoživotní podporu během mých studií. Zejména děkuji Daně Rokosové za motivaci a pomoc se správností textu a velký dík patří i Antonínu Menclovi, který mi je po celý život akademickým vzorem.

Abstrakt

Tato práce se zaměřila na problematiku výroby portlandského cementu z hlediska produkce emisí oxidu uhličitého. Emise CO₂ jsou produkovány během výroby tohoto hydraulického pojiva nejen při spalování paliv potřebných k výpalu cementářského slínku, ale primárně během procesu zvaného kalcinace. Alternativou portlandského cementu by mohla být pojiva typu přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna, která jsou vypalována za nižších teplot než portlandský cement. Výpalem za nižší teploty dochází k úspoře paliva potřebného k výpalu surovinové směsi a zejména nedojde k zahřátí směsi nad mez slinutí.

Tato bakalářská práce dále mapuje využívání paliv typu biomasy, tuhého komunálního odpadu atd., která se hojně využívají v České republice při výpalu slínku místo fosilních paliv. Jsou vytvořeny grafy na základě dat ze Svazu výrobců cementu ČR, které odhalují, mimo jiné, jak s rostoucím podílem využívání alternativních paliv stále narůstá spotřeba tepla potřebného k výpalu slínku.

V závěrečné části práce jsou předloženy tři geologické oblasti v České republice, kde pokračuje dlouhá historie výroby hydraulických pojiv až do současnosti. Tyto lokality jsou popsány a na základě předchozích analýz jsou prezentována tři horninová souvrství, na kterých by bylo možné zahájit těžbu vápenců sloužících k výrobě přírodního hydraulického vápna a přírodního hydraulického cementu.

Summary

The purpose of this thesis is to address the issue of carbon dioxide emissions in the production of Portland cement. CO₂ emissions are generated during the production of this hydraulic binder not only by burning fuels needed for the firing of cement clinker, but primarily during the process called calcination. Alternatives to Portland cement could be Roman cement and/or natural hydraulic lime, which are fired at lower temperatures than Portland cement. Firing at lower temperatures saves fuel needed for firing the raw material mixture, and particularly prevents the mixture from being heated above the sintering temperature.

This bachelor's thesis also analyses the use of biomass fuels, solid municipal waste, etc., which are widely used for clinker firing instead of fossil fuels in the Czech Republic. Graphs, based on data from the Czech Cement Industry Association, were created to demonstrate the relationship between the increasing proportion of alternative fuels and the rising consumption of heat required for clinker firing.

In the final part of the thesis, three geological areas in the Czech Republic, where a long history of hydraulic binder production continues until the present, are examined. These locations are described, and three rock formations are identified based on previous analyses, which offer potential for limestone mining to produce natural hydraulic lime and natural hydraulic cement.

OBSAH

1. Úvod	1
2. Hydraulická pojiva	2
2.1. Úvod do tematiky stavebních pojiv	2
2.2. Přírodní hydraulické vápno	3
2.3. Přírodní cement	4
2.4. Portlandský cement	5
3. Emise CO ₂ vznikající během výroby portlandského cementu	7
3.1. Zdroje emisí CO ₂ během jednotlivých kroků výroby portlandského cementu	7
3.2. Využití alternativních paliv při výrobě portlandského cementu	8
4. Geologické lokality ČR vhodné k těžbě hydraulických pojiv	11
4.1. Oblasti ČR s historií produkce hydraulických pojiv	11
4.2. Paleozoikum pražské pánve	12
4.2.1. Ložisko Kosoř – Hvížd'alka	13
4.2.2. Dvorecko-prokopské vápence	14
4.3. Vnější Západní Karpaty	14
4.3.1. Lom Kurovice	15
4.3.2. Kurovické vápence	16
4.4. Česká křídová pánev	16
4.4.1. Ložisko Úpohlavy – Chotěšov	17
4.4.2. Jílovité vápence a vápnité slínovce teplického souvrství	18
5. Diskuse	19
6. Závěr	22
7. Literatura	23

Seznam obrázků v textové části

- Obr. 1. Rankin-Wrightův ternární diagram základních hydraulických a vzdušných maltovin (Gregerová 1996).
- Obr. 2. Vznik hlavních složek slínku během výroby portlandského cementu v závislosti na teplotě výpalu (upraveno podle: Aitcin 2005).
- Obr. 3. Vážený průměr hmotnostní bilance v procesu výroby cementu (upraveno podle: Marceau et al. 2006).
- Obr. 4. Vývoj využívání alternativních paliv a odpadů bez biomasy od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data svazu výrobců cementu ČR).
- Obr. 5. Vývoj využívání alternativních paliv společně s biomasou od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data svazu výrobců cementu ČR).
- Obr. 6. Vývoj celkové spotřeby tepla na výpal slínku (MJ/t) od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data svazu výrobců cementu ČR).
- Obr. 7. Korelace celkové spotřeby tepla na výpal slínku a spotřeby alternativních paliv od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data svazu výrobců cementu ČR).
- Obr. 8. Mapa činných vápenek a cementáren v České republice (upraveno podle: ČGS 1 : 500 000).
- Obr. 9. Geologická mapa barrandienského paleozoika (upraveno podle: Kachlík 2003).
- Obr. 10. Geologická mapa ložiska Kosoř – Hvízd'alka (upraveno podle: ČGS 1 : 50 000).
- Obr. 11. Schematická mapa rozšíření jednotek vnějších Západních Karpat (Kachlík 2003).
- Obr. 12. Geologická mapa ložiska Kurovice (upraveno podle: ČGS 1 : 50 000).
- Obr. 13. Česká křídová pánev (upraveno podle: Kachlík 2003).
- Obr. 14. Geologická mapa ložiska Úpohlavy – Chotěšov (upraveno podle: ČGS 1 : 50 000).
- Obr. 15. Rozsahy hodnot celkové produkce CO₂ (kg CO₂/kg) a celkové spotřebované energie (MJ/kg) pro nejhodněji využívané stavební materiály (upraveno podle: Pöllman et al. 2022).
- Obr. 16. Porovnání pevnosti v tlaku různých cementů (upraveno podle: Hanein et al. 2022).

Seznam tabulek v textové části

- Tab. 1. Hlavní minerály vznikající během výpalu portlandského cementu (Pöllmann 2022).
- Tab. 2. Porovnání stupně hydratace alitu a belitu v portlandském cementu (upraveno podle: Kotsay a Jaskulski 2020).

1. Úvod

Stavební pojiva mají ve stavebnictví nezastupitelnou roli při pojení zrnitých systémů malt, betonu apod. (Hlaváč 1981). V současnosti se nejvíce používají hydraulická pojiva, někdy též obecně označovaná jako portlandský cement (Bárta 1961, Lea 1970, Boynton 1980, Blezard 2004, Bye 2011). Výroba těchto pojiv je však energeticky velmi náročná a pojí se s ní výrazná produkce emisí CO₂ (Cahn et al. 1997, Horváth 2004). CO₂ pochází nejen z uhličitánů, přítomných v surovinové směsi, ale také ze spalovaných fosilních i alternativních paliv, využívaných jako zdroj tepla pro výpal slínku (Lea 1970).

V cementárnách České republiky se jako palivo sloužící k výpalu cementářského slínku nejhojněji využívá biomasa, tuhý komunální odpad a použité pneumatiky; podíl fosilních paliv v posledních dvou desetiletích výrazně poklesl. Tato alternativa fosilních paliv nemusí vždy dosáhnout výhřevnosti uhlí nebo zemního plynu, používaných při výpalu stavebních pojiv v minulosti. Paliva, potřebného k vypálení slínku, se totiž spotřebuje výrazně více. To sebou nese vyšší produkci emisí.

Ekologičtější alternativou portlandského cementu by mohla být v minulosti hojně využívaná přírodní hydraulická pojiva typu přírodního cementu či přírodního hydraulického vápna (Hill et al. 1992, Oates 1998, Gosselin et al. 2009). Tato pojiva se vypalují při nižších teplotách, než které jsou nutné k výrobě portlandského cementu, což znamená i menší energetickou náročnost výroby. Třebaže se při tepelném rozkladu karbonátů (zejména kalcitu), obsažených v těchto surovinách, rovněž uvolňuje CO₂, při následných procesech tuhnutí a tvrdnutí dochází k jeho zpětnému navázání do opětovně vznikajícího uhličitanu vápenatého. Způsob zpracování a použití těchto pojiv se však liší od běžného portlandského cementu, například kvůli delší době tuhnutí či odlišné pevnosti (Lanas et al. 2004, Grilo et al. 2014). Z tohoto důvodu nejsou tyto v minulosti hojně používané materiály v současné době tolik rozšířené, přestože je o ně zájem např. v oblasti péče o historické stavební konstrukce (Gosselin et al. 2009, Santhanam a Ramadoss 2022).

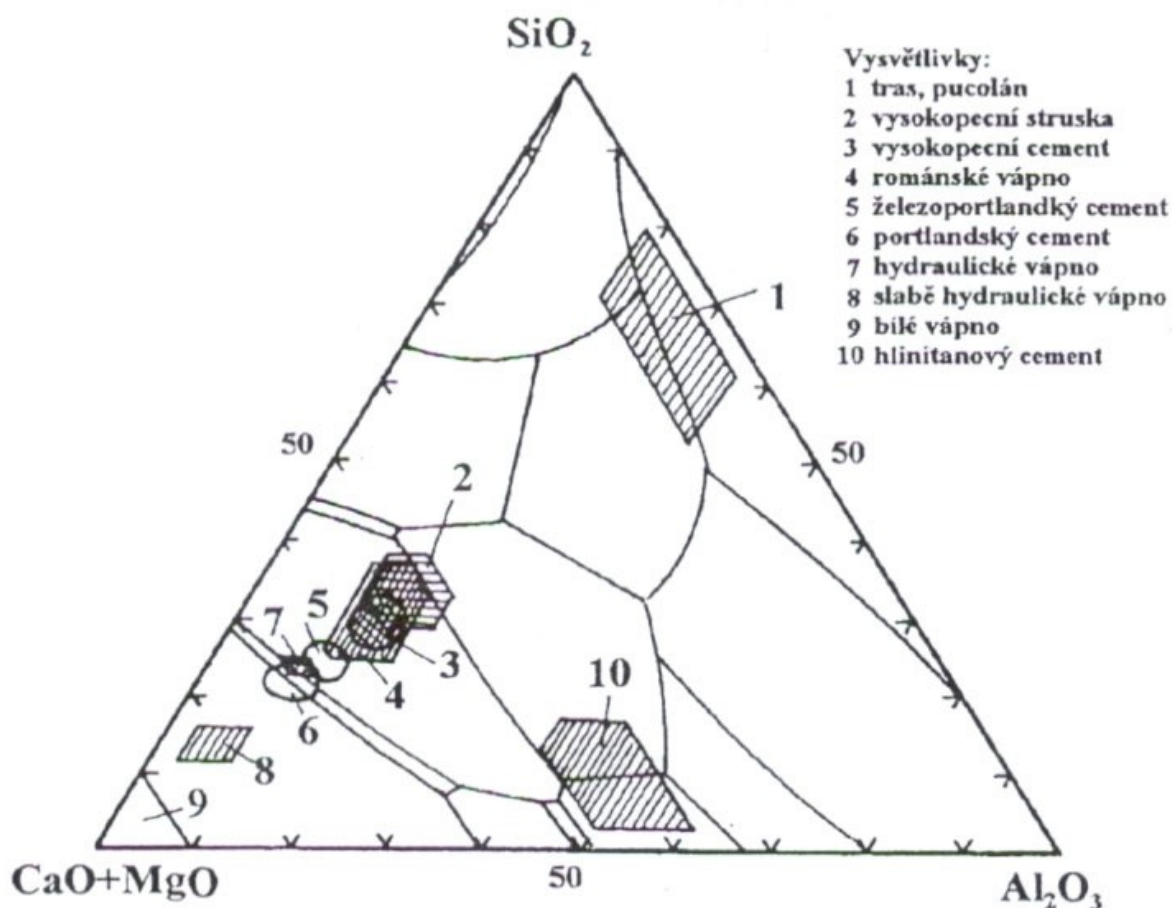
Oblast Českého masivu a české části Karpatské soustavy navíc nabízí řadu lokalit, na kterých by bylo možné obnovit těžbu vápenických surovin potřebných k výrobě přírodního cementu nebo přírodního hydraulického vápna (Kozlovcev 2018, Láník a Cikrt 2001). Mezi horniny, vhodné k výrobě těchto materiálů, patří zejména dvorecko-prokopské vápence (Kozlovcev a Příkryl 2015, 2017), nacházející se v pražské pánvi, dále vápence teplického souvrství z oblasti české křídové pánve a v neposlední řadě kurovické vápence z oblasti Karpatské soustavy.

Jedním z cílů této práce je shrnout základní znalosti o vápenických a cementářských surovinách a přiblížit výhody přírodních hydraulických pojiv. Dále je diskutována energetická a environmentální náročnost výroby portlandského cementu, problematika využívání paliv alternativních palivům fosilním a jsou zpracována data dostupná ze Svazu výrobců cementu. V závěrečné části se práce věnuje i seznámení se surovinovými zdroji přírodních hydraulických pojiv v České republice.

2. Hydraulická pojiva

2.1. Úvod do tematiky stavebních pojiv

Hydraulická pojiva jsou stavební hmoty, u kterých je možné po smíchání materiálu s vodou tuhnutí jak na vzduchu, tak pod vodou (Hlaváč 1981). Jednou z těchto stavebních surovin je portlandský cement, který momentálně na stavebním trhu nemá mnoho konkurentů. Dalšími materiály, řadícími se do této kategorie, jsou přírodní a umělé cementy a přírodní hydraulické vápno, které jsou některými svými fyzikálními a chemickými vlastnostmi do jisté míry portlandskému cementu podobné (Hill et al. 1992). Chemismus jak hydraulických, tak i vzdušných pojiv se nejčastěji vyjadřuje pomocí trojsložkového Rankin-Wrightova diagramu soustavy $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Obr. 1).



Obr. 1. Rankin-Wrightův ternární diagram základních hydraulických a vzdušných maltovin (převzato z Gregerové 1996).

Pro suroviny, využívané při výrobě přírodních hydraulických pojiv, je důležitá přítomnost tzv. nekarbonátových složek, mezi které se řadí křemité hmoty a jílové minerály. Těchto nekarbonátových složek by měla hornina obsahovat ideálně kolem 25 % a zbylých 75 % by mělo představovat CaCO_3 (Varas et al. 2004).

Rozdíly mezi jednotlivými druhy hydraulických pojiv tkví v odlišnosti teplot výpalu, v době tvrdnutí materiálu nebo v technických parametrech po utvrzení pojiva (Bárta 1961, Hlaváč 1981). Jednotlivá pojiva se rovněž liší v možnostech zpětného navázání CO_2 , uvolněného při tepelném rozkladu kalcitu ve vápenci. Poslední vlastnost ze zmíněných nyní představuje důležité téma v souvislosti s ekologií.

Portlandský cement v současnosti produkuje 8–10 % celkových světových průmyslových a energetických emisí CO₂ (Horváth 2004, Marceau et al. 2006).

Alternativou portlandského cementu by mohly být suroviny ze stejné kategorie hydraulických pojiv. Jedná se o přírodní hydraulické vápno a přírodní cement, hojně využívané v minulosti (Elsen et al. 2011). Právě tato dvě hydraulická pojiva mají potenciál k výraznému snížení produkce emisí CO₂, vznikajících během výpalu. Je tomu tak vlivem odlišných teplot výpalu, které se u přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna pohybují vždy pod mezí slinutí. Oba materiály se vypalují za teplot přibližně o 200–300 °C nižších, než během výpalu portlandského slínku (Gartner 2004).

Během výpalu a tuhnutí stavebních pojiv vzniká řada fází (Tab. 1), největší význam však má alit a belit. Alit vzniká v cementářském slínku při teplotách nad 1250 °C (např. Lea 1970). Hlavní hydraulickou fází pojiv typu přírodního hydraulického vápna a přírodního cementu je belit (Gualtieri et al. 2005).

Tab. 1. Hlavní fáze, vznikající během výpalu cementářského slínku a při tuhnutí portlandského cementu. V posledním sloupci: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; F = Fe₂O₃; H = H₂O; \$ = SO₃; c = CO₃; M = MgO (Pöllmann 2022).

Minerál	Cementářský název	Chemický vzorec	Cementářský vzorec
Hatrurit	Alit	Ca ₃ SiO ₅	C ₃ S
Larnit	Belit	β-Ca ₂ SiO ₄	C ₂ S
-	Celit	Ca ₃ Al ₂ O ₆	C ₃ A
Brownmillerit	Ferit	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	C ₄ AF
Tobermorit	C-S-H	Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ ·4H ₂ O	C-S-H
Portlandit	-	Ca(OH) ₂	CH
Ettringit	-	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26(H ₂ O)	C ₃ A·3C\$·H ₃₂
Kuzelit	Monosulfoaluminát	Ca ₄ Al ₂ (SO ₄)(OH) ₁₂ ·6H ₂ O	C ₃ A·C\$·H ₁₂
-	Hemikarboaluminát	Ca ₄ Al ₂ (CO ₃)0.5(OH) ₁₃ ·5.5H ₂ O	C ₃ A·0.5Cc·H ₁₂
-	Monokarboaluminát	Ca ₄ Al ₂ (CO ₃)(OH) ₁₂ ·5H ₂ O	C ₃ A·Cc·H ₁₁
Hydrotalcit	-	Mg ₆ Al ₂ (CO ₃)(OH) ₁₆ ·4H ₂ O	M ₆ AcH ₁₂
Katoit	Hydrogranát	Ca ₃ Al ₂ O ₆ ·6H ₂ O	C ₃ AH ₆

2.2. Přírodní hydraulické vápno

Vápno je technický název pro materiál o chemickém složení CaO o různém stupni čistoty (Oates 1998). Jako maltovina se vyrábí tepelným rozkladem přírodních vápenců při takové teplotě (v současné době 1000–1200 °C), aby produkt byl schopen dostatečně rychlé hydratace na Ca(OH)₂, který je pak hlavní aktivní složkou tohoto pojiva (Hlaváč 1981). Hydraulické vápno vzniká výpalem méně čistých vápenců, obsahujících minimálně 10 % nekarbonátových příměsí jako je křemitá hmota nebo jílové minerály (Hlaváč 1981).

Pojivové vlastnosti hydraulického vápna jsou známy již od starověku (např. Oleson et al. 2004, Jackson et al. 2010). Přírodní hydraulické vápno je v současné době využíváno zejména při rekonstrukcích historických budov kvůli jeho příznivějším vlastnostem v porovnání s portlandským cementem (Maravelaki-Kalaitzaki et al. 2005). Oproti portlandskému cementu se totiž vyznačuje odlišnou velikostí a distribucí pórů, která souvisí s průtokem vody v pojivu, únikem vlhkosti či krystalizací solí ve zdivu. Vápno je v porovnání s cementem taktéž plastičtější (Jirásek et al. 2010). Hydraulické vápno proto lépe odvádí vodu pryč ze stavby a lépe odolává různým degradačním vlivům (Sabbioni et al. 2001), aniž by docházelo k nadměrnému namáhání okolních stavebních hmot – např. přírodního kamene. Tyto vlastnosti činí z přírodního hydraulického vápna trvanlivější stavební materiál, než jakým je portlandský cement (Cowper 2000). V některých aplikacích má přírodní

hydraulické vápno v porovnání s portlandským cementem určité nevýhody: nižší pevnost a výrazně delší dobu tuhnutí (Gualtieri et al. 2005)

Dle hydraulických vlastností se zpravidla rozlišují tři typy hydraulického vápna: vápno silně, středně a slabě hydraulické (Cowper 2000). Vápno silně hydraulické má obsah hydraulických příměsí nad 15 %, vápno středně hydraulické obsahuje 10–15 % hydraulických příměsí a vápno slabě hydraulické má 5–10 % hydraulické složky. Obsah hydraulických složek ovlivňuje i pevnostní charakteristiky, vápno silně hydraulické vykazuje po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí minimální pevnost 4 MPa, zatímco vápno slabě hydraulické pouze 1,5 MPa (Bárta 1961).

Teplota výpalu hydraulického vápna nepřesahuje 1250 °C, což je minimální teplotní hranice potřebná pro tvorbu slínkových fází, zejména alitu (trikalciium silikát, C_3S), jenž je převládající fází v portlandském cementu (Gualtieri et al. 2005, Weber et al. 2007). V přírodním hydraulickém vápnu převládá fáze belit (dikalciium silikát, C_2S), doprovázená v menší míře gehlenitem (C_2AS) a ferritem (C_4AF) (Gualtieri et al. 2005). Oproti portlandskému cementu je ve vápnu přítomen volný CaO (obsah je nepříměrně úměrný hydraulicitě materiálu), často doprovázený portlanditem ($Ca(OH)_2$), případně též MgO (Weber et al. 2007).

Třebaže Česká republika patří k oblastem s velice dlouhou tradicí výroby a využitím přírodních hydraulických pojiv (např. Láník a Cikrt 2001), v současné době se zde nevyrábějí. Protože jsou však potřebná pro rekonstrukci historických budov, musí se dovážet ze zahraničí nebo nahrazovat materiály odlišnými. Příkladem materiálů, za které se hydraulická vápna nahrazují, jsou cementy o nižších pevnostních třídách a vzdušné vápno obohacené o umělé hydraulické nebo poculánové složky (Jirásek et al. 2010). V Evropě se přírodní hydraulické vápno vyrábí pouze v několika málo zemích: např. Itálii, Německu či Portugalsku.

2.3. Přírodní cement

Cement je hydraulické pojivo, jehož účinnými fázemi jsou vápenaté křemičitany, hlinitany a hlinitokřemičitany, popřípadě jiné sloučeniny podobného typu (Hlaváč 1981). Přírodní cement (česky též římský cement, anglicky Roman cement) byl patentován v roce 1796 Jamesem Parkerem a během 19. století byl v Evropě hojně využívaným stavebním materiálem (Hughes et al. 2008).

Přírodní cement se oproti portlandskému cementu vypaluje při teplotě pod mezí slinutí a vyrábí se z vápenců, přirozeně obsahujících dostatečné množství nekarbonátových složek (Weber et al. 2007, Hughes et al. 2008). Rozdíl mezi přírodním cementem a hydraulickým vápnem tkví v odlišné hydraulicitě, průběhu tuhnutí a tvrdnutí materiálu (Varas et al. 2004).

Optimální pevnosti dosahuje přírodní cement při teplotě výpalu již kolem 900 °C. Pro toto pojivo je typický třífázový vývoj pevnosti, který se vyznačuje počáteční vysokou pevností, dále několikátýdenním obdobím, kdy se pevnost nikterak nevyvíjí a konečnou fází trvající až jeden rok, při které se pevnost zvýší na téměř konečnou hodnotu (Hughes et al. 2008). Hlavním silikátem v přírodním cementu je stejně jako v přírodním hydraulickém vápnu belit.

Přírodní cementy jsou děleny na dvě kategorie. První je rychle tuhnoucí přírodní cement, pro který je využíván vápenec s 25–30% příměsí jílové složky. Tento materiál se vypaluje 12 až 20 hodin při teplotách 1000–1200 °C a tuhnutí nastává do třiceti minut. Druhou kategorií představuje pomalu tuhnoucí přírodní cement, pro který je využíván vápenec s vysokým obsahem SiO_2 a až se 40% příměsí jílové složky. Tento materiál se vypaluje 8 až 12 hodin při teplotách 800–1000 °C. Tuhnutí začíná v rozmezí 30 minut až 12 hodin (Varas et al. 2004).

Přírodní cement se v Evropě vyrábí jen velmi omezeně např. ve Francii. V současné době se používá k restaurování historických budov stejně, jako tomu je v případě přírodního hydraulického vápna.

2.4. Portlandský cement

Výroba předchůdců současného portlandského cementu byla patentována v roce 1824 britským zedníkem Josephem Aspdinem (Bárta 1961). Za pouhých 2 století existence tento typ pojiva zaujal naprosto dominantní postavení na trhu se stavebními pojivy, přičemž si bez něj nelze představit výrobu současného betonu (Lea 1970). V pojmu portlandský cement je zahrnuta řada druhů cementů s mírně odlišným složením (Bye 2011). Společnou charakteristikou pro všechny portlandské cementy jsou:

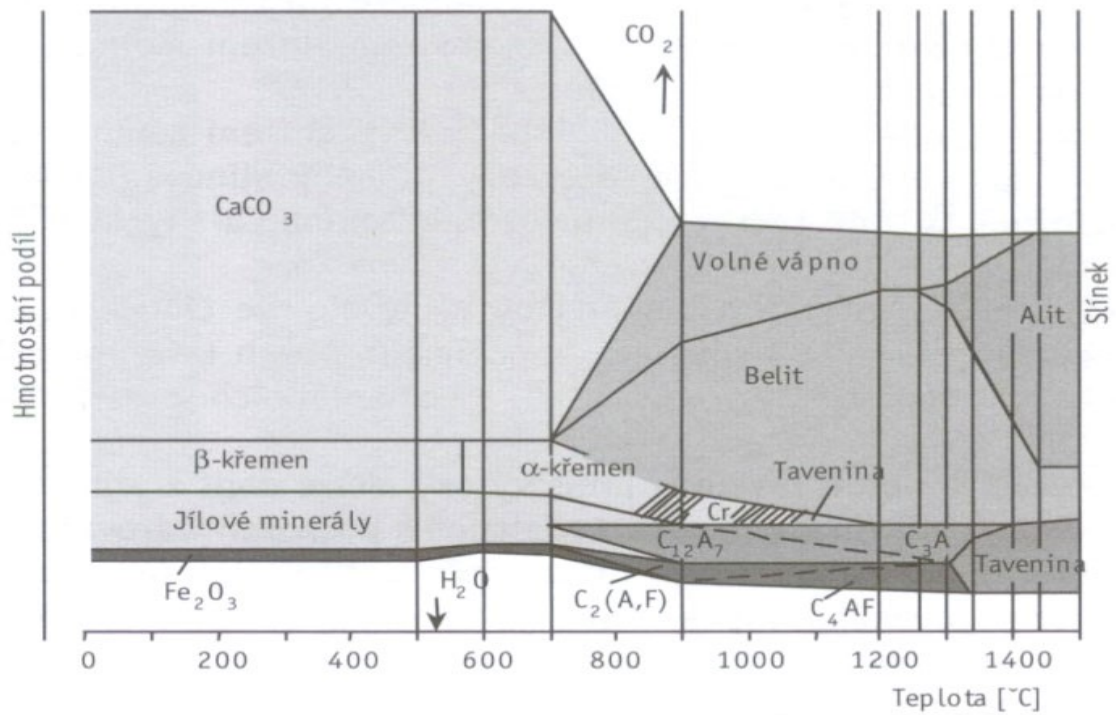
- 1) výrobní postup, spočívající ve výpalu pečlivě připravené surovinové směsi surovin nad mez slinutí; tím vzniká tzv. slínek, ze kterého se jemným mletím získá prášková hmota – portlandský cement
- 2) predikovatelné fázové složení, jež vzniklo vysokoteplotními reakcemi v surovinové směsi; produkt je hmota obsahující zejména křemičitany, v menší míře hlinitany a železitany vápníku a skelnou fázi (Hlaváč 1981).

Pro výpal portlandského slínku se optimálně hodí vápence s obsahem kalcitu v rozpětí 75–80 %, zbytek by měla tvořit křemítká hmota a jílové minerály. Ve většině případů jsou jako hlavní cementářská surovina používány vápence s vyšším obsahem karbonátové složky (80–90 %), potřebné SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 je pak dodáváno formou tzv. cementářských korekčních surovin (Hlaváč 1981).

Rozdrcený a homogenizovaný materiál se vypaluje v rotační peci při teplotách nad mezí slinutí, v rozpětí 1410–1450 °C po dobu 1 až 4 hodiny (Fennell et al. 2021). Slinováním se v oblasti technologie silikátů rozumí fyzikální proces zpevňování disperzních systémů za zvýšené teploty (Hlaváč 1981). Během tvorby slínku v materiálu probíhá celá řada fyzikálních a chemických procesů, mezi které patří sušení, rozklad pevných látek, vzájemné reakce složek v pevném stavu a později i tvorba taveniny a rozpouštění pevných složek v ní (Hlaváč 1981).

Počátek rozpadu pevných látek v surovině začíná kalcinací uhličitanů od teploty ~700 °C (Obr. 2). Touto reakcí se rozumí tepelný rozklad kalcitu na volné vápno a oxid uhličitý. Při překročení teplot 900–950 °C se začíná převládat vápenatý křemičitan belit (C_2S) a vápenaté hlinitany, při vyšších teplotách (nad 1250 °C) potom vápenatý křemičitan alit (C_3S). Alit je nejdůležitější fází portlandského slínku, který však při poklesu teploty pod 1250 °C přestává být stabilní a rozkládá se zpět na belit a volné vápno. Zabránění tomuto procesu se je možné rychlým ochlazením suroviny (Jirásek et al. 2010).

Hlavními fázemi portlandského cementu jsou rychle tuhnutí alit (C_3S), belit (C_2S), který tuhne pomaleji, dále trikalcium aluminát (C_3A), tetrakalcium alumino ferit (C_4AF) a sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, který se přidává při konečném mletí jako zpomalovač tuhnutí. Průměrné poměry zmíněných majoritních fází jsou v klasickém portlandském cementu následující: C_3S 55 hm. %, C_2S 17 hm. %, C_3A 10 hm. %, C_4AF 7 hm. % a sádrovec 6 hm. % (Young 2001).



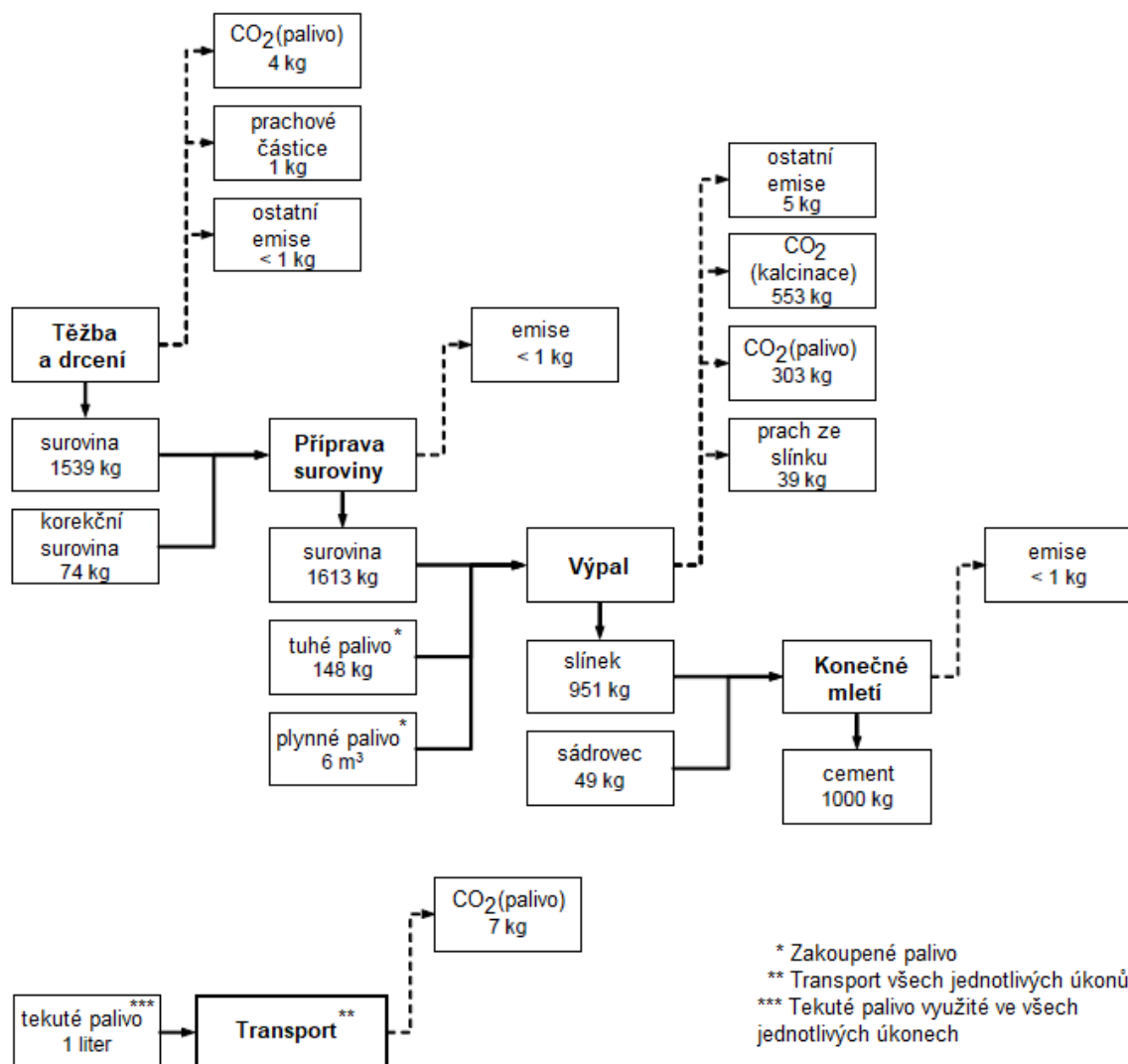
Obr. 2. Vznik hlavních složek slínku během výroby portlandského cementu v závislosti na teplotě výpalu (upraveno podle: Aitcin 2005).

Moderní cementy v současnosti definuje technická norma ČSN EN 197-1 ED. 2 (722101) Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití, která je v účinnosti od roku 2012.

3. Emise CO₂ vznikající během výroby portlandského cementu

3.1. Zdroje emisí CO₂ během jednotlivých kroků výroby portlandského cementu

Současná světová produkce hydraulických pojiv typu portlandského cementu se pohybuje kolem 4 miliard tun. S jejich výrobou je spojeno 8–10 % celkových ročních energetických a průmyslových emisí skleníkových plynů, zejména CO₂ (Fennell et al. 2021, Marceau et al. 2006). Při výrobě cementu dochází k tepelnému rozkladu uhličitánů obsažených ve vápenci, při němž se uvolňuje CO₂ do atmosféry. Tento proces představuje zhruba dvě třetiny celkových emisí CO₂ z celého procesu výroby portlandského cementu (Obr. 3), přičemž zbytek emisí je produkován spalováním paliv, která jsou potřebná na vytvoření žáru v rotační peci. Na výrobu jedné tuny portlandského cementu je potřeba přibližně 1600 kg výchozí suroviny v závislosti na druhu výpalu (Marceau et al. 2006).



Obr. 3. Vážený průměr hmotnostní bilance v procesu výroby cementu (upraveno podle: Marceau et al. 2006).

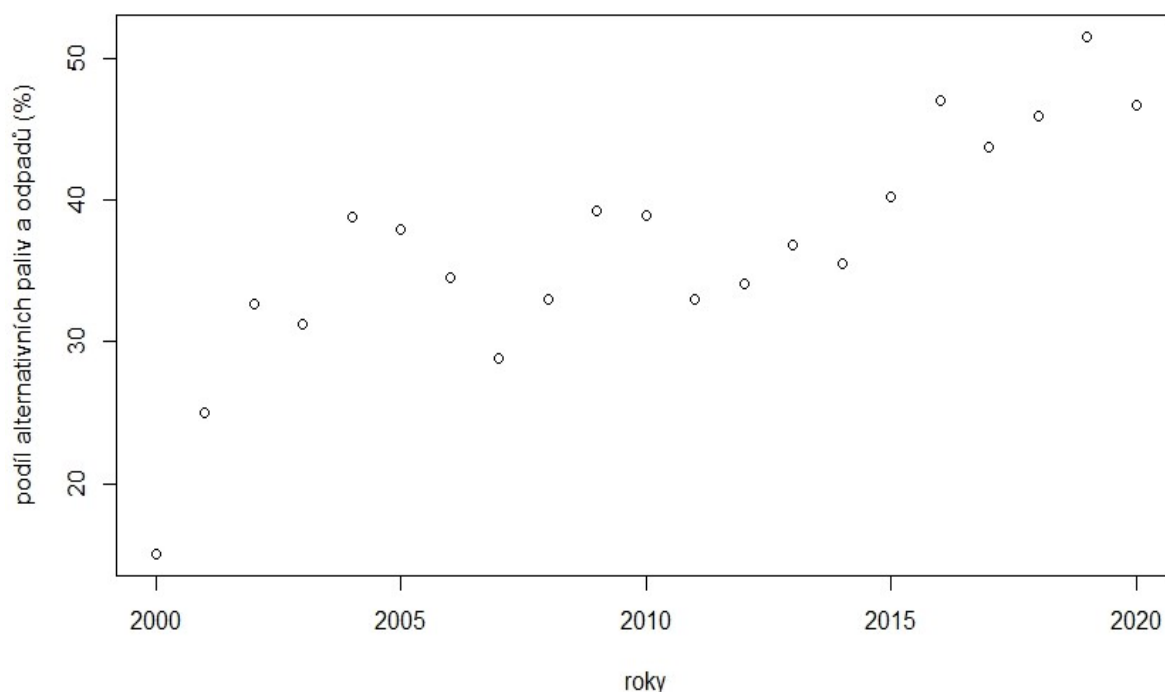
Nejvíce emisí z celého procesu výroby portlandského cementu (tj. z těžby, drcení, přípravy materiálu, výpalu a mletí) je vyprodukováno výpalem. Během této činnosti dochází současně ke kalcinaci, při které se uvolňuje ze suroviny ~550 kg CO₂ na jednu tunu vyrobeného cementu (tj. ~300 kg na tunu surového vápence) a ke spalování paliv, která emitují ~350 kg CO₂ na jednu tunu vyrobeného cementu

(Obr. 3). Kromě plynných emisí dochází při kalcinaci i k emisím prachovým, kterých se vyprodukuje zhruba 40 kg na jednu tunu cementu (Marceau et al. 2006). Emise vyprodukované spalováním odpadu jako náhrada fosilních paliv činí kolem 63 kg CO₂/GJ (Marceau et al. 2006).

3.2. Využití alternativních paliv při výrobě portlandského cementu

Snaha snížit emise CO₂ z cementářské výroby vedla v řadě zemí k využívání alternativních paliv (Mokrzycki a Uliasz-Bocheńczyk 2003, Chatziaras et al. 2014). Ta se mohou zdát smysluplnějším zdrojem energie, nicméně je nutné myslet na to, že ne všechna alternativní paliva mají stejnou kalorickou hodnotu (Chatziaras et al. 2014). Na stejné množství vyrobeného cementu se pak spálí alternativního paliva mnohem více, než v případě tradičních paliv v podobě např. uhlí či zemního plynu. Mezi alternativní paliva jsou řazeny suroviny jako například použité pneumatiky, tuhý komunální odpad a biomasa (Mokrzycki a Uliasz-Bocheńczyk 2003).

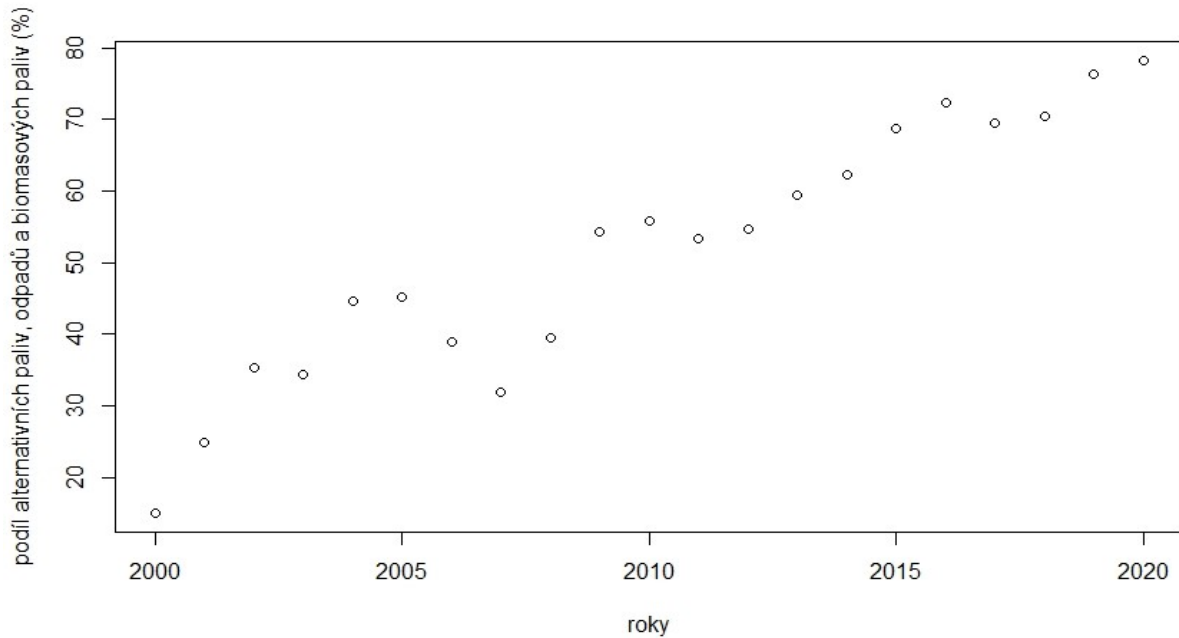
Z dat Svazu výrobců cementu ČR vyplývá, že spotřeba alternativních paliv za posledních dvacet let výrazně stoupla a fosilní paliva jsou v současnosti téměř zcela nahrazena novými palivy. Tento trend je znázorněn v grafu (Obr. 4), který ukazuje, že v roce 2000 činilo zastoupení alternativních paliv bez biomasy 15 %, v roce 2010 bylo zastoupení již 38,9 % a v roce 2020 dosáhl objem použitých alternativních paliv 46,7 %.



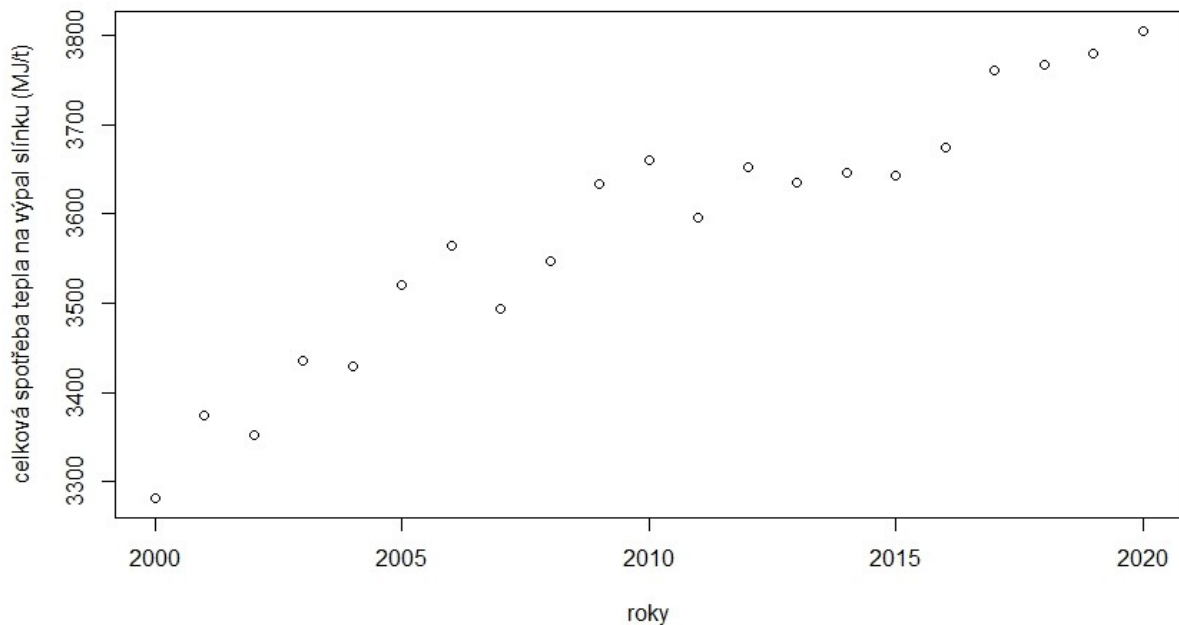
Obr. 4. Vývoj využívání alternativních paliv a odpadů bez biomasy od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data Svazu výrobců cementu ČR).

Pokud se k hodnotám spotřeby alternativních paliv přidá i biomasa, která se dle dat Svazu výrobců cementu ČR začala používat až o dva roky později, to jest od roku 2002, bude patrný stejný trend stále rostoucího využití těchto paliv. Na následujícím grafu (Obr. 5), kde je zpracována celková spotřeba biomasy a alternativních paliv společně lze vidět, že v roce 2020 poměr alternativních paliv vůči palivům fosilním vzrostl na 78,3 % a fosilní paliva tudíž v České republice recentně tvoří pouze malou část paliv, využívaných k výpalu cementářského slínku.

Z grafu (Obr. 5) je patrné, že alternativní paliva za poslední dvě desetiletí téměř nahradila paliva fosilní. Otázkou však stále zůstává, zda se tím výroba portlandského cementu stává více ekologickou. Odstranění fosilních paliv nutně neznamená odstranění emisí a zefektivnění výroby. Z analyzovaných dat naopak vyplývá, že celková spotřeba tepla na výpal slínku stále vzrůstá (Obr. 6-7). To znamená, že na výrobu stejného množství materiálu se v analyzovaném období spotřebovalo zřejmě více paliva.

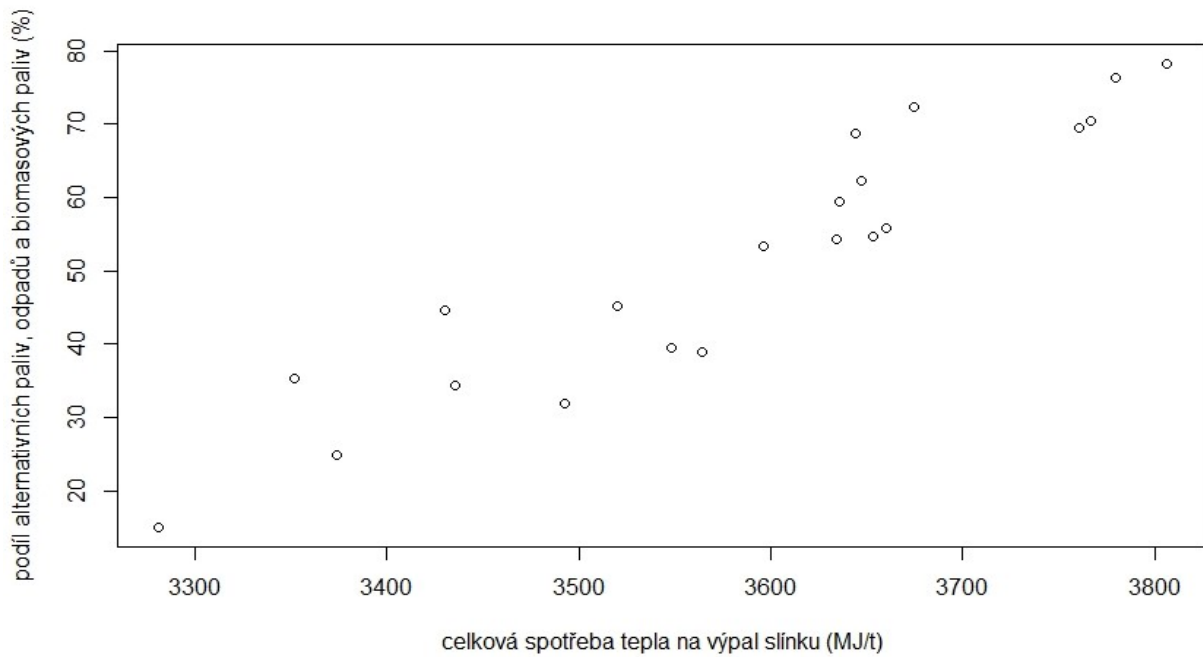


Obr. 5. Vývoj využívání alternativních paliv společně s biomasou od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data Svazu výrobců cementu ČR).



Obr. 6. Vývoj celkové spotřeby tepla na výpal slínku (MJ/t) od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data Svazu výrobců cementu ČR).

Na posledním grafu (Obr. 7) je znázorněna korelace mezi celkovou spotřebou tepla na výpal slínku a spotřebou alternativních paliv. Celková spotřeba tepla na výpal slínku je stále vyšší, stejně tak jako podíl odpadů, biomasy a dalších alternativních paliv.



Obr. 7. Korelace celkové spotřeby tepla na výpal slínku a spotřeby alternativních paliv od roku 2000 do roku 2020 (vlastní tvorba, data Svazu výrobců cementu ČR).

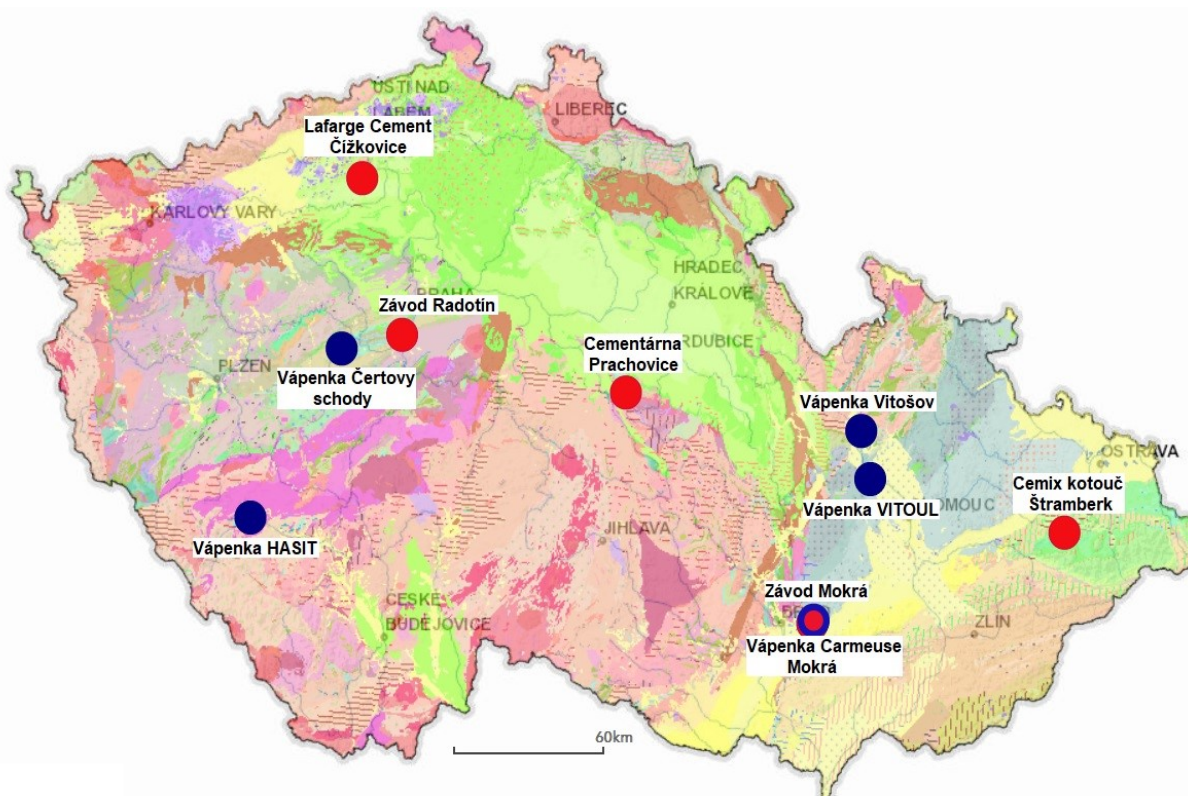
4. Geologické lokality ČR vhodné k těžbě hydraulických pojiv

4.1. Oblasti ČR s historií produkce hydraulických pojiv

V oblasti Českého masivu a Karpatské soustavy se nachází mnoho lokalit, ve kterých by bylo možné začít těžit horniny vhodné k výrobě přírodního cementu nebo přírodního hydraulického vápna. Jejich využívání v minulosti je věrohodně dokumentované (Lání a Cikrt 2001, Kozlovce 2018). Velkou výhodou je, že nároky na tyto suroviny jsou v podstatě stejné, jako na portlandský cement, a proto by se k těžbě těchto surovin daly bez problémů využít momentálně aktivní, či již nevyužívané lomy, které sloužily k účelu těžby vápenců na výrobu portlandského cementu.

Vápence se na území České republiky vyskytují zcela běžně, ne všechny tyto horniny však splňují kritéria k výrobě stavebních pojiv. Při výběru vhodné suroviny je nutné brát zřetel zejména na její chemismus, mineralogii a fyzikální vlastnosti. Během výběru lokalit vhodných k těžbě přírodních hydraulických pojiv, byla věnována pozornost analýzám provedeným v minulosti (viz zejména Kozlovce 2018) a na základě jejich výsledků byly vytipovány tři lokality, které by mohly být pro těžbu přírodního cementu a hydraulického vápna velmi vhodné.

Mezi oblasti s výskytem vápenců v České republice patří barrandienská oblast, středočeská ostrovní zóna, jihočeské a moravské moldanubikum, česká křídlová pánev, krkonošsko-jizerské krystalinikum, silezikum, Železné hory, orlicko-kladské krystalinikum, zábřežská skupina, vnější bradlové pásmo Západních Karpat a mnoho dalších oblastí, ve kterých již karbonátové horniny nejsou tak hojné jako ve výše zmíněných (Jirásek et al. 2010). V místech s dobře dokumentovanými zásobami bylo v minulosti založena řada vápenických či cementářských provozů, z nichž některé fungují dodnes (Obr. 8).

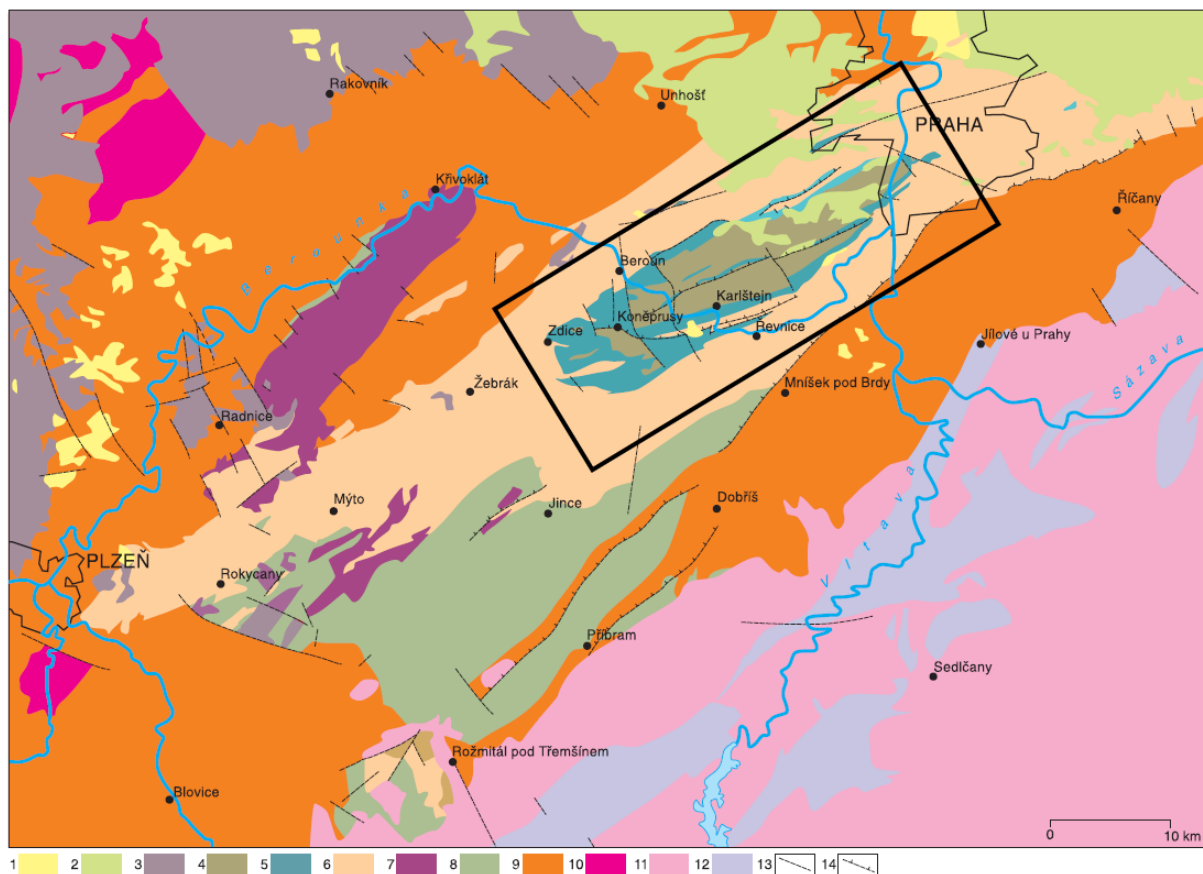


Obr. 8. Mapa činných vápenek a cementáren v České republice. Modře vápenky, červeně cementárny (upraveno podle: ČGS 1 : 500 000).

V této bakalářské práci byly vybrány tři geologické oblasti s třemi konkrétními ložisky vápenických / cementářských surovin, která by byla vhodná pro produkci přírodních hydraulických stavebních pojiv. Jedná se o oblast Barrandienu, české křídové pánve a vnějšího bradlového pásma Západních Karpat. Tyto lokality by byly ideální pro těžbu suroviny vhodná na výrobu přírodního hydraulického vápna a přírodního cementu vzhledem k příznivým vlastnostem vápenců, které se v těchto lomech nalézají. Nejdůležitější takovou vlastností pro tyto horniny je vysoká hydraulická, tedy obsah hydraulických složek, díky kterým je vyprodukované pojivo schopno tuhnout pod vodou a ve vlhkém prostředí. Zmiňovanými ložisky jsou Kosoř – Hvižďalka, Kurovice a Úpohlavy – Chotěšov.

4.2. Paleozoikum pražské pánve

Pražská pánev je geologická struktura nacházející se v Praze a v jejím okolí (Obr. 9). Je součástí tepelsko-barrandienské oblasti, která je centrální jednotkou Českého masivu s povrchovým výskytem hornin ve středních a západních Čechách. Tepelsko-barrandienská oblast je tvořena ze dvou strukturálních pater, konkrétně ze slabě kadomsky metamorfovaného fundamentu a na něm diskordantně uložených a varisky zvrásněných staropaleozoických sledů kambrického až středně devonského stáří. Od dalších jednotek je oddělena v severozápadní části tepelskou a v jv. části gföhlskou suturní linií. Sedimentace v této jednotce byla ukončena variskou orogenezí (Kachlík 2003).



Obr. 9. Geologická mapa barrandienského paleozoika se zvýrazněním pražské pánve. 1 neogenní kontinentální sedimenty, 2 svrchnokřídové kontinentální a mořské sedimenty, 3 svrchnokarbonské a permské kontinentální sedimenty, 4 devonské marinní sedimenty, 5 silurské marinní sedimenty a vulkanity, 6 ordovické marinní sedimenty a vulkanity, 7 svrchnokambrické vulkanické horniny, 8 kambrické kontinentální a mořské sedimenty, 9 proterozoické marinní sedimenty a vulkanity, 10 prevariské plutonity, 11 variské plutonity, 12 proterozoické a paleozoické metasedimenty a metavulkanity ostrovní zóny středočeského plutonu, 13 zlomové linie, 14 významné směrné přesmyky (upraveno podle: Kachlík 2003).

Pražská pánev představuje lineární depresi riftového charakteru, která je vyplněna sedimenty od spodního ordoviku po střední devon. Vrstvy z těchto geologických period leží diskordantně na kadomsky zvrásněném proterozoiku a jsou zvrásněny (nikoli metamorfovány) variskou orogenezí. Rozlohou zasahuje pražská pánev ke Starému Plzenci, na jihozápad přes Prahu až k Úvalům a Brandýsu nad Labem a v jejím severovýchodním cípu je ohraničena sedimenty svrchní křídly. Sedimentace hornin pražské pánve byla doprovázena vulkanickou činností a syndeformací pánve (Chlupáč et al. 1992).

Vývoj pražské pánve započal ve spodním ordoviku, kdy byla pánev zalita spodnotremadockým mořem. Na rozdíl od sousední starší příbramsko-jinecké pánve, má pražská pánev převahu marinních uloženin, odlišný směr podélné osy pánve a jiné plošné rozšíření. V ordoviku se z příbramsko-jinecké pánve stala elevační oblast, která do oblasti pražské pánve dodávala klastický materiál (Chlupáč et al. 1992).

V počátečním stádiu vývoje pánve tvořil pražskou pánev mělký záliv, který byl v průběhu času diferenciován na podélné a příčné segmenty o různé subsidenci. Z tohoto období je nejmocnější klabavské souvrství, které na Rokycansku dosahuje mocnosti 300 m. V siluru probíhaly výrazné synsedimentární deformace, které trvaly až do devonu a jejichž reliktem je například tachovický zlom. Silurské uloženiny jsou dochovány pouze v podobě denudačního zbytku v oblasti mezi Zdicemi a Prahou (Chlupáč et al. 1992).

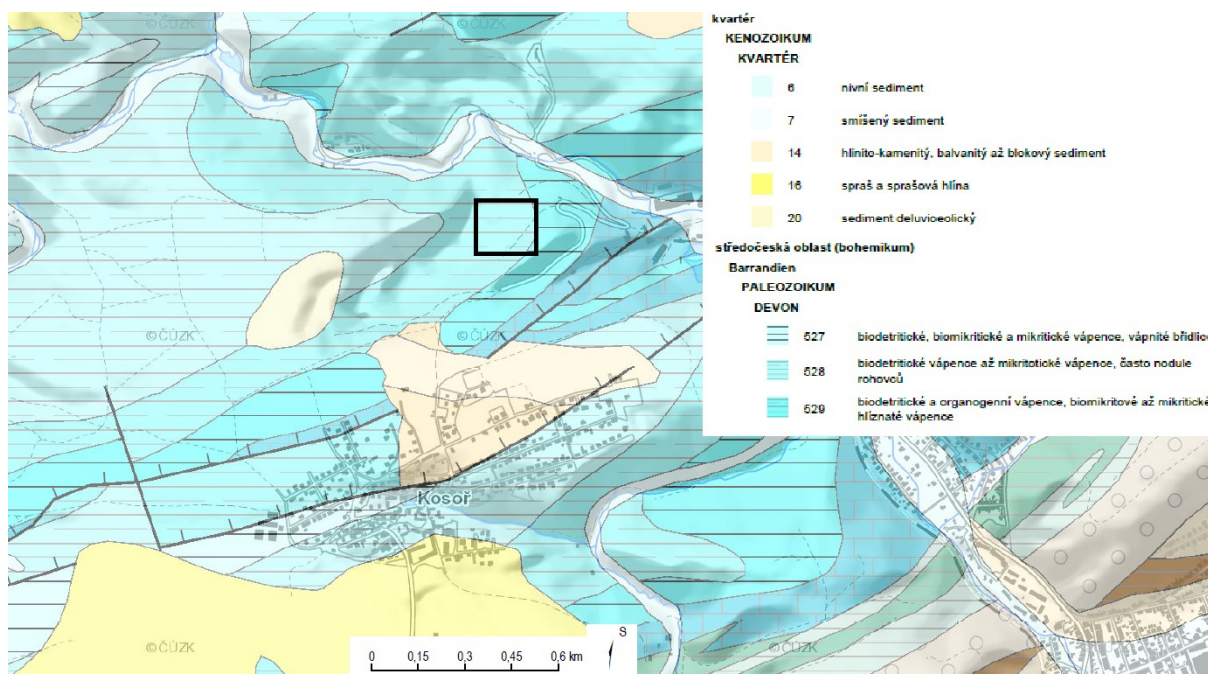
V devonu převládal v pražské pánvi karbonátový vývoj pokračující ze siluru. Pro devon v této oblasti je typická kombinace mikritových a biodetritických facií. Mikritové facie tvořily hlubší a klidnější prostředí, ve kterých probíhala jen velmi nízká turbulence. Maximální vývoj hlubokovodnějších facií se nachází v jihovýchodní části pánve. Biodetritické facie vznikaly pouze v mělkovodním prostředí, ve kterých probíhalo výrazné proudění mořské vody. Mělkovodní facie se nalézají v severozápadní a jihozápadní části pražské pánve (Chlupáč et al. 1992).

4.2.1. Ložisko Kosoř – Hvízd'alka

Lokalita Kosoř – Hvízd'alka se nachází na území Prahy 13 v katastrálním území Zadní Kopanina v okrese Praha-západ (Obr. 10). Těžba v lomu byla zahájena v roce 1958. Celkové geologické zásoby byly vypočteny na více než 72 miliónů tun. Lom nyní provozuje Českomoravský cement a.s. patřící pod Heidelberg Cement Group. V blízkosti ložiska je cementárna Lochkov, která vytěžené horniny zpracovává pro výrobu portlandského cementu.

Geologicky patří ložisko do jihovýchodní části chotečské synklinály v Barrandienu a horniny jsou devonského stáří. Podloží těžných vrstev tvoří radotínské a kosořské vápence, v bazální části ložiska leží slivenecké a řeporyjské vápence. Samotné ložisko pak představují vápence zlíchovské a dvorecko-prokopské. Polohy zlíchovských vápenců jsou v celém ložisku velmi nepravidelné a dosahují malých mocností, oproti tomu dvorecko-prokopské vápence dosahují v maximální mocnosti až 160 metrů. Z převážné části náleží oblast ložiska do devonského stupně prag, z menší části do stupně zlíchov (Hrzina a Štefek 2005).

Vytěžené dvorecko-prokopské vápence jsou využívány jako surovinová směs pro výpal cementářského slínku, některé polohy těchto vápenců však nedosahují potřebné kvality a zejména kvůli nízkému obsahu CaCO_3 je nutné suroviny obohacovat o vápencovou korekci o vysokém obsahu CaCO_3 a Al-korekci na bázi elektrárenského popílku (Hrzina a Štefek 2005).



Obr. 10. Geologická mapa ložiska Kosor – Hvízd'alka (upraveno podle: ČGS 1:50 000).

4.2.2. Dvorecko-prokopské vápence

Ložisko Hvízd'alka disponuje více typy vápenců o rozdílných složeních a vlastnostech. Analýzy vápenců z této lokality, provedené Kozlovcem (2018), odhalily, že nejvhodnější horninou pro výrobu přírodních hydraulických pojiv by byly dvorecko-prokopské vápence, které dosahují středně až silně hydraulických vlastností, ideálních pro výrobu přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna.

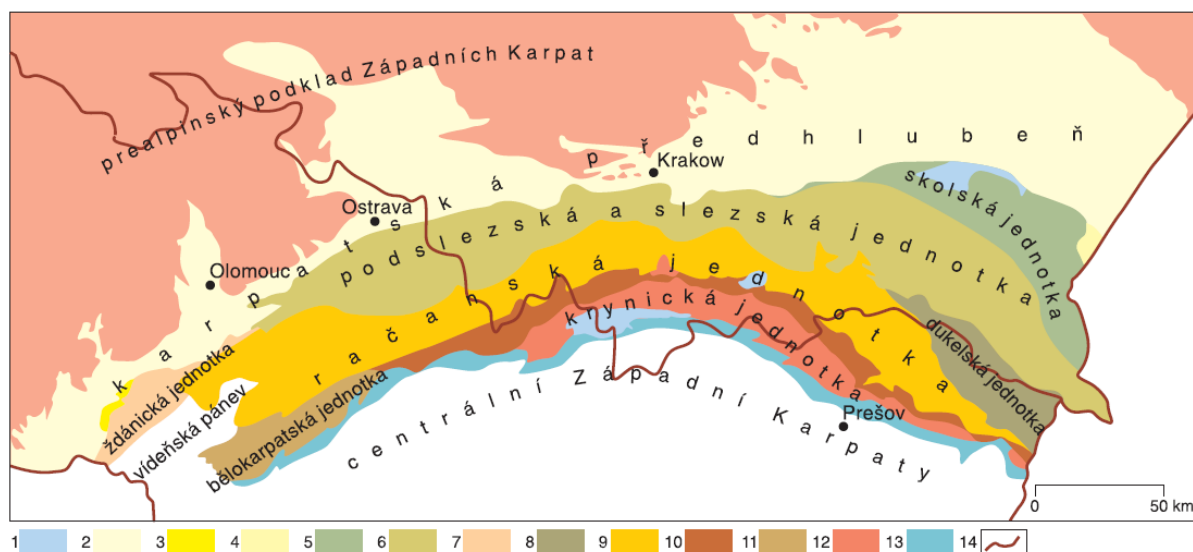
Dvorecko-prokopské vápence jsou horniny šedé až tmavě šedé barvy. Vyznačují se jemnozrnnou strukturou a hlíznatou texturou. Základní hmotu tvoří z nadpoloviční většiny mikrit s příměsí jílových minerálů, který vyplňuje i mezizrnný prostor a některé bioklasty. Detrit je složen z různých druhů bioklastů, převážně z tentakulitů. Společně s SiO_2 fázemi je hlavním horninotvorným minerálem kalcit a vedlejšími složkami jsou illit, kaolinit, dolomit a v menší míře i draselné živce. Nekarbonátové složky představují fylosilikáty a křemité hmoty (Kozlovcev 2018).

Hlavními oxidy vápenců jsou CaO , CO_2 , SiO_2 a Al_2O_3 . Na rozhraní mezi hlavním a vedlejším oxidem leží MgO . Analyzované vzorky hornin z tohoto ložiska ukázaly průměrné obsahy kalcitu kolem 75 %, dále 12 % křemité hmoty, 6 % jílových minerálů (ilit, kaolinit) a stopy draselného živce a dolomitu. Kolem stylolitů se nachází jako akcesorická složka pyrit v minerálních zrnech větších než 50 μm . Dalšími akcesoriemi je chlorit, hematit, reliktů organické hmoty a TiO_2 fáze v podobě rutilu a anatasu. (Kozlovcev 2018).

4.3. Vnější Západní Karpaty

Západní Karpaty tvoří jednu z částí orogenního pásma tethydních Alpid táhnoucího se od Španělska po jihovýchodní Asii. Na území České republiky leží tato část orogenního pásma na východní Moravě a ve východním Slezsku (Obr. 11). Vývoj Západních Karpat začíná koncem variské orogeneze, která dala vzniknout superkontinentu Pangea. Krátce po jejím vzniku se Pangea však začala rozpadat a během tohoto období se oddělila severní Afrika od variské Evropy a v oblasti dnešního Středozemního moře vznikl v průběhu triasu systém riftových pánví oddělujících pásy kontinentální kůry. Během jury a křídý docházelo k diferenciaci a rozšiřování těchto pánví (Kachlík 2003).

Během spodní jury začalo docházet k uzavírání některých riftových pánví, což vedlo ke kontinentálním kolizím jednotlivých mikrobloků. Od tohoto období se dají vymezit tři největší vlny kontinentálních kolizí: jura - spodní křída v rozmezí 160–120 Ma, svrchní křída v rozmezí 110–80 Ma a poslední vlna v terciéru 45–12 Ma (Kachlík 2003).



Obr. 11. Schematická mapa rozšíření jednotek vnějších Západních Karpat. 1 mocnější akumulace kvartérních sedimentů uvnitř jednotek flyšového pásma, neogenní předhlubně a vídeňská pánev; 2 vnější karpatská předhlubně v předpolí flyšových příkrovů, vnitřní předhlubně částečně zakryté čely příkrovů; 3 pouzdřanská jednotka, 4 stebnická jednotka, vnější skupina příkrovů; 5 skolská jednotka, 6 ždánická jednotka, 7 podslezská a slezská jednotka, 8 dukelská jednotka, vnitřní skupina příkrovů; 9 račanská jednotka, 10 bystrická jednotka, 11 bělohorská jednotka, 12 krynická jednotka, 13 bradlové pásmo, 14 státní hranice (Kachlík 2003).

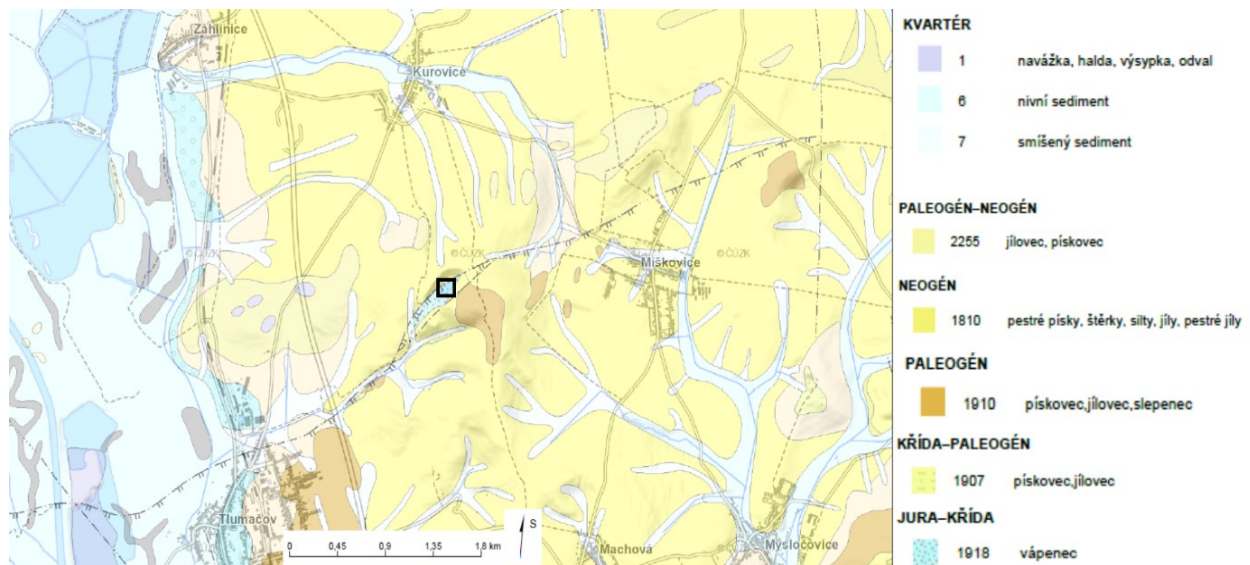
Karpaty se dělí na vnitřní část, centrální část a na vnější Západní Karpaty. Poslední zmíněné Západní Karpaty zasahují na území České republiky. Vnější Západní Karpaty představuje karpatská předhlubně tvořená miocenními klastickými sedimenty a dva akreční flyšové komplexy, tvořené pestrými komplexy hornin, které byly tektonicky shrnované z oceánského dna nebo odložené z okraje nadložní litosférické desky (Kachlík 2003).

4.3.1. Lom Kurovice

Kurovický lom byl otevřen mezi obcemi Kurovice a Tlumačov (okr. Kroměříž) (Obr. 12). Těžba na tomto ložisku započala podle dochovaných dobových fotografií před rokem 1840. Zdejší surovina byla nejdříve používána k pálení silně hydraulického vápna až přírodního cementu, později pro cementářský slínek. Lom byl spojen úzkokolejnou tratí s nedalekou cementárnou v obci Tlumačov. Cementárna v Tlumačově byla vystavěna v sedmdesátých letech 19. století Karlem Maxmiliánem hrabětem von Seilern-Aspangem a v novodobější historii provozoval lom i cementárnu Českomoravský cement, a.s. (Benešová et al. 1962, 1968).

V kurovickém lomu byl těžen jílovitý, tzv. kurovický vápenec svrchnojurského stáří a spodnokřídový tlumačovský slínovec. Obě horniny náleží do magurské skupiny příkrovů bradlového pásma. Lom je geologicky významný právě kvůli přítomnosti hranice mezi jurou a křídou a výskytem fosilií aptych amonitů. Lom je v současné době zatopen a poslední těžba zde proběhla v druhé polovině devadesátých let 20. století. Oblast je nyní přírodní památkou (Benešová et al. 1962, 1968). Vzhledem

k velkému geologickému potenciálu tohoto bývalého ložiska by byl vhodný průzkum dalších lokalit, patřících do stejných souvrství za účelem ověření možnosti těžby vápenické suroviny.



Obr. 12. Geologická mapa v okolí ložiska Kurovice (upraveno podle: ČGS 1:50 000).

4.3.2. Kurovické vápence

Z obou typů hornin, v minulosti těžených na ložisku Kurovice, se k výpalu přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna více hodí svrchnojurské kurovické vápence (Kozlovce 2018).

Kurovické vápence jsou karbonátové horniny béžové až šedé barvy. Základní hmota je tvořena jemnozrnným mikritickým kalcitem a detrit představují bioklasty s relikty hlavonožců, plžů a mřížovců. Základní hmotu protínají sekundární kalcitové žilky o mocnostech do 500 μm , které vznikaly v místech křehkého porušení. Základní hmotu tvoří i chalcedon s jílovými minerály jako jsou illit a kaolinit a lokálně se vyskytující zrna klastického křemene. Viditelné jsou i vysrážené oxyhydroxidy železa na povrchu některých bioklastů a zrn křemene (Kozlovce 2018).

Hlavními oxidy vápenců jsou CaO , CO_2 , SiO_2 a Al_2O_3 a na pomezí mezi vedlejším a hlavním oxidem leží Fe_2O_3 . Horninotvornými minerály kurovických vápenců jsou kalcit a SiO_2 fáze, zatímco z vedlejších složek jsou nejhojnější illit a kaolinit. Analyzované vzorky obsahovaly mezi 65–75 % kalcitu, přibližně 17 % SiO_2 , 5–9 % ilitu a kolem 3 % kaolinitu. Akcesorickými minerály byly dolomit, chlorit, draselný živec a sodný živec. Zdejší surovina se hodí pro výpal silně hydraulického vápna (Kozlovce 2018).

4.4. Česká křídová pánev

Česká křídová pánev (ČKP) tvoří plochu rozkládající se v severních Čechách, v Polabí a zasahuje až po Svitavsko (Obr. 13). Pánev je protažená v sz.-jz. směru a recentní maximální mocnost jejích sedimentů dosahuje až 900 metrů. Sedimentace v ČKP začala v dobách spodního až středního cenomanu ukládání sladkovodních sedimentů. Ve svrchním cenomanu tuto oblast zaplavila mořská transgrese a tím byla odstartována mořská sedimentace, která pokračovala až do santonu. V ČKP se dají charakterizovat tři hlavní fáze vyplňování: spodní až střední cenoman, svrchní cenoman až turon a coniac až santon (Kachlík 2003).

V první fázi byly vyplňovány dílčí deprese sedimenty říčních toků, které ústily do jezerních pánví. Jezerní pánve byly nadále pravděpodobně odvodňovány směrem k severu. V tomto období se ukládaly perucké vrstvy v podobě konglomerátů, červených pískovců a jezerních sedimentů s občasnými slojkami uhlí (Kachlík 2003).



Obr. 13. Česká křídová pánev (upraveno podle: Kachlík 2003).

Během svrchního cenomanu až turonu nastala transgrese mořské vody z Tethydy. V raných fázích transgrese byly ukládány lagunární sedimenty, v nadloží přecházející do marinních pískovců korycanského souvrství. Po ukončení hiátu, který nastal v turonu, byly sedimentovány opuky bělohorského souvrství a v severní části pánve pískovce jizerského souvrství (Kachlík 2003).

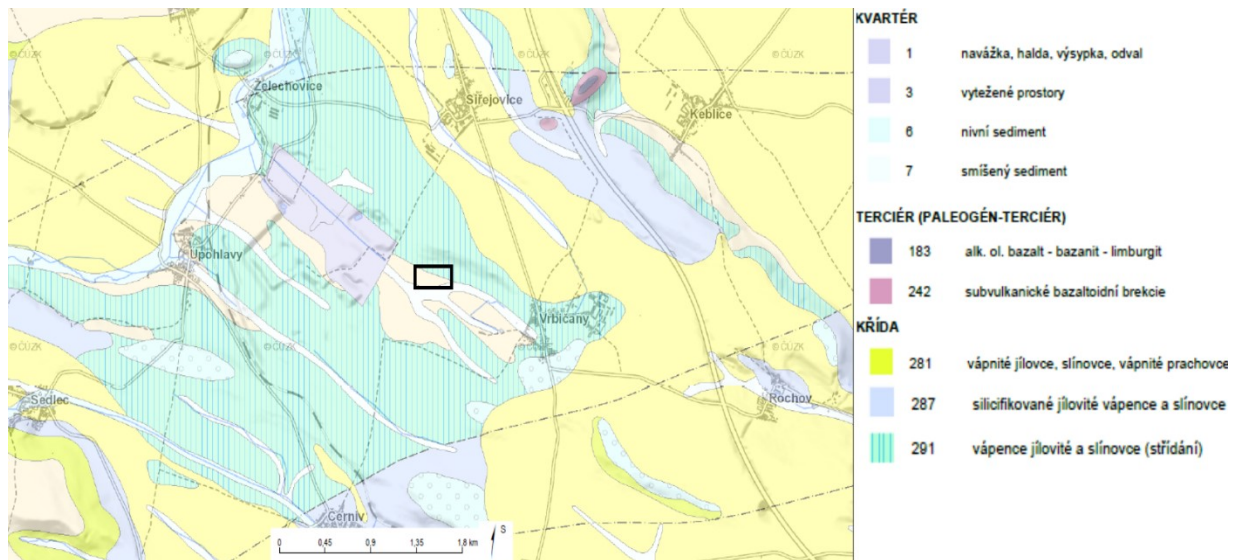
Poslední fázi vyplňování představovala velká transgrese, kterou představuje teplické souvrství. Jedná se o sedimenty prachovito-písčitého charakteru přecházející do slínovců. Vyvrcholení subsidence ztvárňuje březenské souvrství a souvrstvím nejmladším v této oblasti je merboltické, které je tvořeno jemnozrnnými pískovci (Kachlík 2003).

4.4.1. Ložisko Úpohlavy – Chotěšov

Ložisko Úpohlavy – Chotěšov (okr. Litoměřice) leží v sv. části oherské oblasti ČKP. Z pohledu tektonické pozice leží území v oherském riftu. Plocha ložiska činí zhruba 2 500 000 m² a je v činnosti od roku 1974. Historie těžby vápenických / cementářských surovin v této oblasti sahá až do 19. století a současný lom je v pořadí čtvrtý, který produkuje surovinu na výrobu stavebních pojiv. V minulosti zde byly horniny těženy i za účelem výroby přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna. Severní polovina ložiska je v současnosti již vytěžena (Hrzina et al. 2009).

Úpohlavy – Chotěšov vlastní Lafarge cement a.s., který je součástí skupiny Holcim. Cementárnu nacházející se v Čížkovicích s ložiskem spojuje od roku 1993 pásový dopravník, který nahradil automobilovou dopravu a kromě cementářské suroviny je produkována i surovina na odsiřování (Hrzina et al. 2009).

V oblasti ložiska se vyskytují křídové sedimenty cenomanu, turonu a coniacu a ložisko je vázáno na teplické souvrství svrchního turonu, které je tvořeno slínovci, jílovitými vápenci a vápnatými slínovci. Zájmovou surovinu pro výrobu cementu představuje jílovitý vápenec a vápnatý slínovec. První zmíněné horniny sedimentovaly v mělkém epikontinentálním moři jako kalový sediment usazený z jemného vápenato-jílového bahna s organicko-detritickou příměsí. Vápнатé slínovce se usazovaly v oblastech, kde byly v porovnání s jílovitým vápencem vyšší přínosy peltického materiálu z pevniny (Hrzina et al. 2009).



Obr. 14. Geologická mapa ložiska Úpohlavý – Chotěšov (upraveno podle: ČGS 1:50 000).

4.4.2. Jílovité vápence a vápнатé slínovce teplického souvrství

Teplické souvrství na ložisku Úpohlavý – Chotěšov dosahuje mocnosti 16–18 m a horniny využívané k výrobě cementu tvoří vrstvy o mocnosti zhruba 7,5 metru (Hrzina et al. 2009).

Hlavní zájmové suroviny představují jílovité vápence s obsahem CaCO_3 70–82 % a vápнатé slínovce s obsahem CaCO_3 60–70 %. Jílovité vápence jsou bělošedé až světle šedé karbonátové horniny, které jsou lavicovitě odlučné a jemnozrnné s mikrokystalickým kalcitem. V hornině se mimo dalších fosilií nachází primárně schránky dírkonošců. Vápнатé slínovce jsou světle šedé barvy a mají složení podobné jílovitým vápencům. Obsahují však větší množství jílových minerálů (Hrzina et al. 2009).

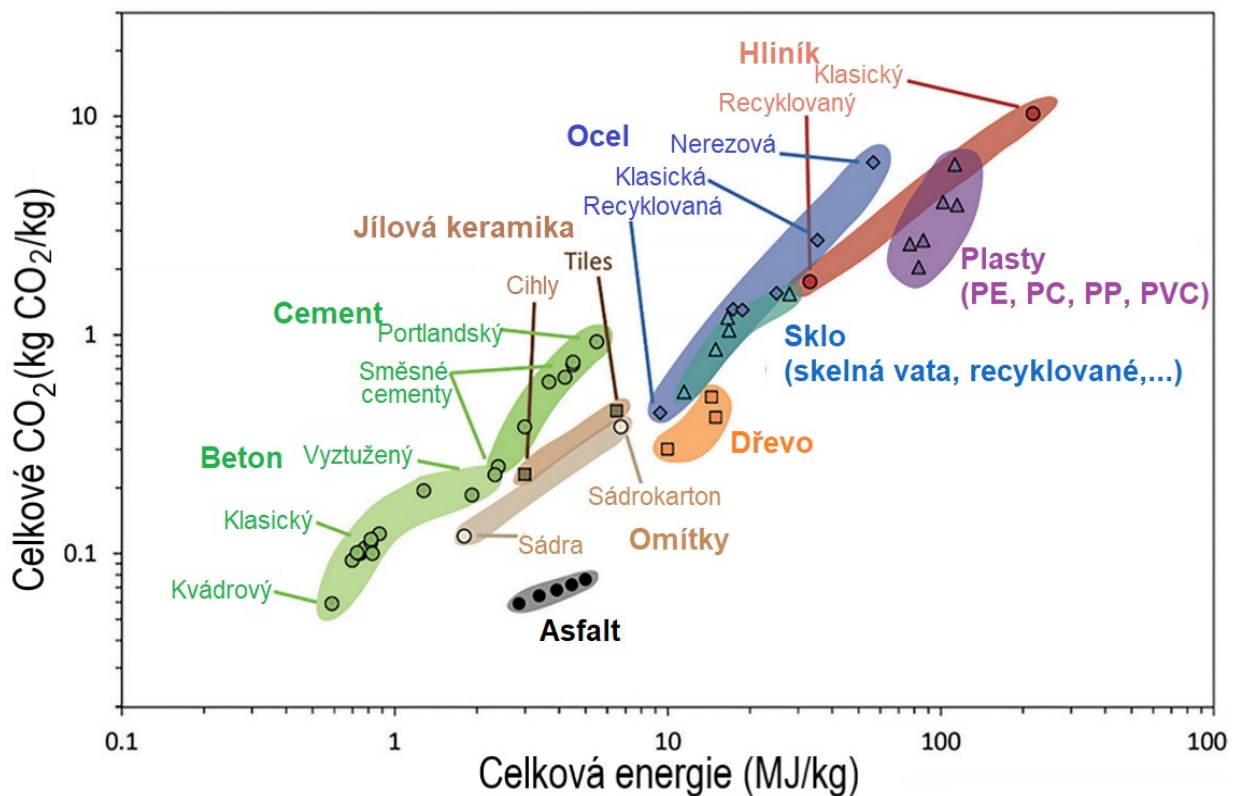
Průměrný obsah normativních minerálů teplického souvrství v analýzách Kozlovceva (2018) činil 66 % kalcitu, 12 % křemité hmoty, 11 % illitu a 2,5 % draselného živce. Dalšími minoritními složkami byly kaolinit, dolomit, pyrit, chlorit, oxihydroxidy železa a sodný živec. Výsledky analýzy těchto zkoumaných hornin potvrdily jejich silnou až velmi silnou hydraulicitu.

5. Diskuse

Lidstvo se v současnosti bez stavebních pojiiv neobejde. Beton, který se vyrábí primárně z portlandského cementu, představuje pilíře dnešní společnosti, ve které je hned po vodě druhým nejpoužívanějším materiálem. Betonu se ročně vyrobí ~25 miliard tun (Příkryl et al. 2016). Jeho nespornou výhodou je fakt, že žádný jiný stavební materiál není tak dostupný jako on. Přestože jsou beton a cement nesporně důležité materiály, na kterých je společnost závislá, pojí se na jejich výrobu velké množství emisí oxidu uhličitého (Pöllman et al. 2022).

Výrobou jedné tuny portlandského cementu se emituje do ovzduší kolem 850–875 kg CO₂ (Marceau et al. 2006). Obecně se dá říci, že 60 % emisí výroby portlandského cementu pochází z tepelného rozkladu vápence a 40 % z energie potřebné pro těžbu suroviny, výpal slínku a všech dalších procesů navázaných na výrobu (Pöllman et al. 2022). Současná roční produkce portlandského cementu činí 4-4,1 miliard tun (Curry 2022).

V porovnání s ostatními průmyslovými materiály (např. ocel, dřevo, plasty, atd.), které jsou taktéž důležité pro fungování dnešní infrastruktury, má hmotnostní jednotka betonu výrazně nižší energetickou a uhlíkovou stopu (Obr. 15). Přesto je cementářské odvětví zodpovědné za 8–10 % celkových antropogenních emisí oxidu uhličitého (Fennell et al. 2021, Marceau et al. 2006). Důvodem této enormní produkce emisí je obrovská kvantita vyrobeného cementu v porovnání s nižším množstvím jiných vyrobených průmyslových materiálů, které jsou energeticky a environmentálně více náročné.

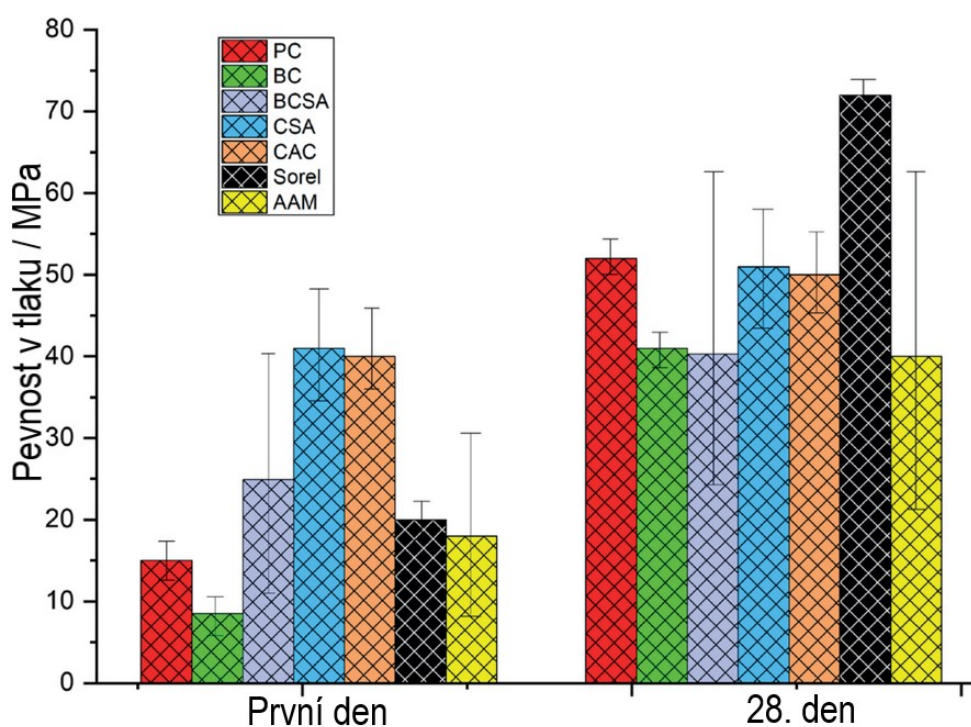


Obr. 15. Rozsahy hodnot celkové produkce CO₂ (kg CO₂/kg) a celkové spotřebované energie (MJ/kg) pro nejhojněji využívané stavební materiály (upraveno podle Pöllman et al. 2022).

Vysoká produkce emisí oxidu uhličitého u portlandského cementu je dobře známá, přesto se za posledních dvě stě let jeho složení příliš nezměnilo. Je proto na čase začít hledat alternativy a

pokračovat ve studiu vlastností jiných stavebních pojiv (Pöllman et al. 2022). Tato práce byla věnována alternativám portlandského cementu v podobě hydraulických pojiv přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna, mimo jiné kvůli významné historické zkušenosti s jejich využíváním v českých zemích (Láník a Cikrt 2001). Existuje však daleko více stavebních pojiv, jejichž náročnost na životní prostředí je nižší, než u portlandského cementu a které v České republice zatím nemají tradici.

Mezi pojiva, která se v současnosti používají a netěší se takové oblibě, jako portlandský cement, jsou například vápenato sulfoaluminátové cementy, vápenato aluminátové cementy, belitové cementy, alkalicky aktivované materiály, hořečnaté cementy, Sorelův cement a mnoho dalších. Každé stavební pojivo má specifické vlastnosti, podle kterých je nutné se řídit během výběru jejich aplikace. Portlandský cement je oblíbený i díky jeho univerzálnosti. V různých škálách využití jej však svými mechanickými vlastnostmi mohou nahradit jiná stavební pojiva (Obr. 16, Hanein et al. 2022).



Obr. 16. Porovnání pevnosti v tlaku různých cementů. Chybové sloupce ukazují rozsah mechanických vlastností uváděných v literatuře v závislosti na experimentálních podmínkách. PC = portlandský cement; BC = belitový cement; CAC = vápenato-aluminátové cementy; CSA = vápenato-sulfoaluminátové cementy; BCSA = CSA cementy, u kterých je hlavní fází belit; AAM = alkalicky aktivované cementy (upraveno podle: Hanein et al. 2022).

Vápenato sulfoaluminátové cementy (ang. zkratka CSA) se vypalují v rozmezí teplot 1250–1300 °C a jejich komerční výroba stoupla za posledních 60 let zejména v Číně a USA. Typickou vlastností těchto cementů je rychlé tuhnutí a jsou využívány jako samovyrovňovací stavební hmoty a jako činidla proti smršťování a expanzi betonu. U klasických CSA je hlavním minerálem ye'elimit, dále existují belitové CSA cementy (ang. zkratka BCSA), v nichž je hlavním minerálem belit, stejně jako tomu je v případě přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna. Jejich využití je limitováno dostupností bauxitu, nebo jiného zdroje hliníku, který je v tomto pojivu nezbytnou složkou (Hanein et al. 2022).

Dalším zástupcem jsou vápenato aluminátové cementy (ang. zkratka CAC), jejichž historie sahá do počátku 20. století. Vyrábí se zahrátím směsi bauxitu (nebo jiného zdroje hliníku), SiO_2 a vápence na $1550\text{ }^\circ\text{C}$. V tomto cementu je však vzhledem k vysoké teplotě výpalu diskutabilní jeho náročnost na životní prostředí. Využívají se např. jako žáruvzdorné cementy a cementy s odolností vůči kyselinám a sulfátům. Limitujícími faktory je stejně jako v předchozím případě dostupnost zdroje hliníku a dále nízká pevnost po utužení v porovnání s portlandským cementem (Hanein et al. 2022).

U belitových cementů (BC) nastává úplná či částečná substituce alitu belitem se zachováním (ferro)aluminátů ve stejném poměru jako v portlandském cementu. Vzhledem k nižšímu množství vápníku v belitu ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) v porovnání s alitem (Ca_3SiO_5), který je v portlandském cementu hlavní minerálem, a nižší teplotě výpalu o $100\text{ }^\circ\text{C}$, je možné snížit emise CO_2 během jeho výroby (Hanein et al. 2022). Největší nevýhodou cementů s obsahem belitu (včetně přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna) je nižší stupeň hydratace na počátku tuhnutí belitu (Tab. 2), která vede k nižší pevnosti. Až po jednom roce tuhnutí jsou pevnosti belitu a alitu srovnatelné (Kotsay a Jaskulski 2020).

Tab. 2. Porovnání stupně hydratace alitu a belitu během tuhnutí (upraveno podle: Kotsay a Jaskulski 2020).

Minerál	Stupeň hydratace (%)	
	První den tuhnutí	Po 28 dnech tuhnutí
Alit (C_3S)	25-35	78-80
Belit (C_2S)	5-10	20-50

Další alternativou portlandského cementu jsou alkalicky aktivované materiály (AAM) fungující na principu rozpouštění aluminosilikátů za alkalických podmínek a následném srážení nových aluminosilikátových gelů jako pojivových produktů (Hanein et al. 2022). Využívají se jako např. jako tepluvzdorné cementy a jako geopolymerní cementy k imobilizaci jaderných a jiných toxických odpadů (Shi et al. 2006).

Poslední alternativou zmíněnou v této práci je Sorelův cement, jinak známý pod názvem hořečnatý cement (Hlaváč 1981), vznikající reakcí mezi MgO a MgCl_2 . Výraznou nevýhodou Sorelova cementu je jeho omezená voděodolnost. Nelze ho dále používat v betonu s ocelovým vyztužením, jelikož přítomností chloridů v kombinaci s nízkou voděodolností bude ve vlhkých podmínkách ocelová výztuž korodovat. V suchých podmínkách je však jeho škála využití široká (zděné výplně, ohnivzdorné cementy, atd.) a v testu pevnosti (Obr. 16) dosáhl po 28 dnech největší pevnosti ze všech testovaných pojiv (Hanein et al. 2022).

Z předchozích uvedených příkladů je zřejmé, že kromě portlandského cementu existuje celá řada dalších stavebních pojiv, která by portlandský cement mohla v budoucnu buď úplně, nebo z velké části nahradit. Nejedná se tedy jen o přírodní cement a přírodní hydraulické vápno, kterými se tato práce zabývala primárně a které mají velký potenciál díky surovinovým zdrojům v České republice, ale existuje velké množství dalších alternativ.

Nástup nové generace stavebních pojiv, které by se staly dominantními ve stavebnictví, však komplikuje fakt, že zkoušení nových materiálů a celkové prozkoumání jejich vlastností trvá mnoho let a jejich zakomponování do trhu s nabídkou trvá ještě déle. Portlandský cement má dvě stě let dlouhou tradici využívání, jeho vlastnosti a chování v různých podmínkách jsou dobře známy a i když jeho roli pomalu nahrazují udržitelnější pojiva, bude hlavním stavebním pojivem pro výrobu cementu ještě mnoho let.

6. Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na porovnání některých aspektů výroby hydraulických pojiv typu portlandského cementu a přírodních hydraulických pojiv, s ohledem na jejich energetickou a environmentální náročnost z hlediska množství vyprodukovaného CO₂. Práce našla korelaci mezi celkovou spotřebou tepla na výpal slínku a podílem alternativních paliv použitých k výpalu portlandského cementu. Za posledních dvacet let v České republice výrazně stoupla popularita využívání alternativních paliv v podobě tuhého komunálního odpadu, biomasy a použitých pneumatik s nadějí na učinění výroby portlandského cementu ekologičtější. Grafy vytvořené autorkou této práce naznačují, že alternativní paliva ale spíše naopak činí produkci stavebních pojiv méně efektivní a na výpal stejného množství produktu je potřeba dodávat stále více tepla.

Práce se dále zabývala jinými hydraulickými stavebními pojivy, jimiž by bylo reálné nahradit portlandský cement. Takovými materiály jsou přírodní cement a přírodní hydraulické vápno. Tato pojiva mají nejen bohatou historii a jsou velmi dobře známá a prozkoumaná, ale taktéž je jejich produkce výrazně méně ekologicky náročná. Při výpalu přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna dochází k nižší produkci emisí zásluhou dvou hlavních faktorů: prvním, o něco méně významným faktorem je nižší teplota výpalu, která vede k úspoře paliva a druhým, mnohem významnějším faktorem je zpětné návazání CO₂ uvolněného během tepelného rozkladu karbonátu.

Závěrečným úkolem této práce bylo vymezit oblasti či lokality, z nichž by bylo možné získat surovinu použitelnou při výpalu přírodního cementu nebo přírodního hydraulického vápna. Tato bakalářská práce vyhodnotila na základě dostupných analýz tři lokality, na kterých se nachází karbonátové horniny vhodné k účelu výroby stavebních hydraulických pojiv. Lokalitami jsou ložisko Kurovice z oblasti vnějších Západních Karpat, dále Kosoř – Hvížd'alka z oblasti pražské pánve v tepelsko-barrandienské oblasti a posledním ložiskem Úpohlavy – Chotěšov, nacházející se v české křídové pánvi. Všechna tato ložiska obsahují souvrství s karbonáty o vysoké hydraulicitě a jsou velmi vhodná pro výrobu přírodního cementu a přírodního hydraulického vápna. V současnosti na ložiskách Úpohlavy – Chotěšov a Kosoř – Hvížd'alka probíhá těžba karbonátů k výrobě portlandského cementu. Kurovický lom je nečinný a jeho relikty je přírodní památkou. Těžba by nemusela být nutně spojená pouze s těmito konkrétními lomy, ale spíše se souvrstvími, ze kterých by se dal karbonát těžit.

7. Literatura

- Aïtcin P.-C., 1998. *High-Performance Concrete*. E & FN Spon. Londýn, 591 str.
- Apostolopoulou M., Bakolas A., Kotsainas M., 2021. Mechanical and physical performance of natural hydraulic lime mortars. *Construction and Building Materials* 290: 123272.
- Bárta R., 1961. *Chemie a technologie cementu*. Nakladatelství Československé akademie věd. Praha, 1108 str.
- Benešová E., Hanzlíková E., Matějka A., 1962. *Příspěvek ke geologii kurovického bradla*. Zpráva geologického výzkumu v roce 1961, Praha, str. 185–186.
- Benešová E., Eliáš M., Matějka A., 1968. Geology of the Kurovice klippe. *Sborník geologických věd* 13: 7–33.
- Blezard R.G., 2004. *The History of Calcareous Cements*. In: Hewlett P.C. (ed.) *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4th ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, str. 1–24.
- Boynton R.S., 1980. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 592 str.
- Bye G.C., 2011. *Portland Cement*. 3rd ed., ICE Publishing, London, 209 str.
- Cahn D., Greer W., Moir R., 1997. Atmospheric CO₂ and the U.S. Cement Industry. *World Cement* 28(8): 64–68.
- Cowper A.D., 2000. *Lime and Lime Mortars*. Donhead Publishing Ltd. Shaftesbury. First Published in 1927 for the Building Research Station, London, 96 str.
- Curry K.C., 2022. Cement. In: *U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2018*. U.S. Geological Survey, Reston (VI), 33 str.
- ČSN EN 197-1 ED. 2 (722101), 2012. *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Český normalizační institut, Praha, 36 str.
- Elsen J., Mertens G., Snellings R., 2011a. Portland cement and other calcareous hydraulic binders: history, production and mineralogy. In: Christidis G.E. (ed.) *Advances in the Characterization of Industrial Minerals*. European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, Vol. 9, European Mineralogical Union, London, str. 441–479.
- Fennell P.S., Davis S.J., Mohammed A., 2021. Decarbonizing cement production. *Joule* 5(6): 1305–1311.
- Gartner E.M., 2004. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research* 34(9): 1489–1498.
- Gosselin C., Verges-Belmin V., Royer A., Martinet G., 2009. Natural cement and monumental restoration. *Materials and Structures* 42(6): 749–763.
- Gregerová M., 1996. *Petrografie technických hmot*. Skripta PřF Masarykovy univerzity v Brně, Brno, 139 str.
- Grilo J., Santos Silva A., Faria P., Gameiro A., Veiga R., Velosa A., 2014b. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials* 51: 287–294.
- Gualtieri A.F., Viani T.A., Montanari C., 2005. Quantitative phase analysis of hydraulic limes using the Rietveld method. *Cement and Concrete Research* 36(2): 401–406.

- Hanein T., De la Torre A., Zhang Z., Provis J., 2022. Alternative Non-Portland Binders. *Elements* 18(5): 314–320.
- Hill N., Holmes S., Mather D., 1992. *Lime and Other Alternative Cements*. Intermediate Technology Publications, London, 328 str.
- Hlaváč J., 1981. *Základy technologie silikátů*. Nakladatelství technické literatury, Praha, 516 str.
- Horváth A., 2004. Construction materials and the environment. *Annual Review of Environment and Resources* 29: 181–204.
- Hrzina P., Štefek V., 2005. *Závěrečná zpráva a výpočet zásob ložiska Kosor – Hvižd'alka v dobývacím prostoru Zadní Kopanina I*. GET, s.r.o., Praha, 23. str., 14 příl.
- Hrzina P., Koroš I., Krutský N., Pechar T., 2009. *Závěrečná zpráva Úpohlavy – Chotěšov 2009 (č. ložiska B3 063700), etapa: těžební průzkum, surovina: vápence jílovité*. GET, s.r.o., Praha, 87 str., 76 příl.
- Hughes J.J., Sugden D. B., Jaglin D., Mucha D., 2008. Calcination of Roman cement: A pilot study using cement – stones from Whitby. *Construction and Building Materials* 22(7): 1446–1455.
- Chatziaras N., Psomopoulos C.S., Themelis N.J., 2014. Use of alternative fuels in cement industry. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment*. Vol. 1, str. 521–529.
- Chlupáč I., Havlíček V., Kříž J., Kukul Z., Štorch P., 1992. *Paleozoikum Barrandienu*. Vydavatelství Českého geologického ústavu. Praha, 296 str., 19 příl.
- Jackson M., Deocampo D., Marra F., Scheetz B., 2010. Mid-Pleistocene pozzolanitic volcanic ash in ancient Roman concretes. *Geoarchaeology* 25(1): 36–74.
- Jirásek J., Sivek M., Láznička P., 2010. *Ložiska nerostů*. Anagram, Ostrava, ISBN 978-80-7342-206-6 CD
- Kachlík V., 2003. *Geologický vývoj území České republiky*. SÚRAO Praha, 65 str.
- Kotsay G., Jaskulski R., 2020. Belite cement as an ecological alternative to Portland cement - a review. *Materials Structures Technology* 2(1): 70–76.
- Kozlovcev P., 2018. *Vliv mineralogického složení suroviny na vznik fází při výpalu hydraulického vápna a přírodního cementu*. Přírodovědecká fakulta UK Praha, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, 184 str., 14 příl.
- Kozlovcev P., Příkryl R., 2015. Devonian micritic limestones used in the historic production of Prague hydraulic lime ('pasta di Praga'): characterization of the raw material and experimental laboratory burning. *Materiales de Construcción* 65(319): e060
- Kozlovcev P., Příkryl R., 2017. Compositional characteristics and experimental burning of selected Lower Palaeozoic limestones from the Prague Basin (Barrandian area, Czech Republic) suitable for the production of natural hydraulic lime. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 76(1): 21–37.
- Lanas J., Pérez Bernal J.L., Bello M.A., Alvarez Galindo J.I., 2004. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research* 34(12): 2191–2201.
- Láník J., Cikrt M., 2001. *Dvě tisíciletí vápenictví a cementářství v českých zemích*. Svaz výrobců cementu a vápna Čech, Moravy a Slezska, Výzkumný ústav maltovin Praha spol. s.r.o., Praha, 201 str.
- Lea F.M., 1970. *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3rd ed., Edward Arnold Publishers Limited, London, 727 str.

Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Karatasios I., Kilikoglou V., 2005. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research* 35(8): 1577–1586.

Marceau, M., Nisbet M.A., Van Geem M., 2006. *Life cycle inventory of Portland Cement manufacture*. Portland Cement Association, Skokie (IL), 113 str.

Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A., 2003. Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy* 74(1-2): 95–100.

Oates J.A.H., 1998. *Lime and limestone. Chemistry and technology, production and uses*. 1st ed., Wiley-VCH, Weinheim, 455 str.

Oleson J.P., Brandon C., Cramer S.M, Cucitore R., Gotti E., Hohlfelder R.L., 2004. The ROMACONS Project: A contribution to the historical and engineering analysis of hydraulic concrete in Roman maritime structures. *The International Journal of Nautical Archaeology* 33(2): 199–229.

Pöllmann H., Snellings R., Valentini L., 2022. Cement and Concrete—Past, Present, and Future. *Elements* 18 (5): 295–299.

Přikryl R., Török Á., Gómez-Heras M., Miskovsky K., Theodoridou M., 2016. Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society. In: Přikryl R., Török Á., Gómez-Heras M., Miskovsky K., Theodoridou M. (eds.) *Sustainable use of traditional geomaterials in construction practice*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 416, str. 1–22.

Sabbioni C., Zappia G., Riontino C., Blanco-Varela M.T., Aguilera J., Puertas F., Van Balen K., Toumbakari E.E., 2001. Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars. *Atmospheric Environment* 35(5): 539–548.

Santhanam K., Ramadoss R., 2022. Restoration of an ancient temple at Parvathamalai in Tamil Nadu to preserve cultural heritage. *The European Physical Journal Plus* 137(5): 549.

Shi C., Roy D., Krivenko P., 2006. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. Taylor & Francis, Londýn, 376 str.

Varas M.J., Alvarez de Buergo M., Fort R., 2005. Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification. *Cement and Concrete Research* 35(11): 2055–2065.

Weber J., Gadermayr N., Kozłowski R., Mucha D., Hughes D., Jaglin D., Schwarz W., 2007. Microstructure and mineral composition of Roman cements produced at defined calcination conditions. *Materials Characterization* 58(11-12): 1217–1228.

Young J.F., 2001. Portland Cements. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, str. 7768–7773.

Internetové zdroje:

Svaz výrobců cementu ČR (2008). <https://www.svcement.cz/> [citováno 20. 6. 2022]

Svaz výrobců vápna ČR (2022). <http://www.svvpapno.cz/> [citováno 17. 4. 2023]

Geologická mapa 1 : 500 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [citováno 15. 4. 2023]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr500/>

Geologická mapa 1 : 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [citováno 25. 2. 2023]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>