

## Proč se rozpadají stavby z betonu a proč padají mosty?

Dlouhodobá trvanlivost, která by představovala alespoň století je z pohledu stavebních materiálů cílem snažení mnohých pracovišť. Obecně jsou známy a popsány vlivy změn povětrnostních podmínek na pískovec, vápenec a opuku jako na představitele některých přírodních materiálů, je pozorován dlouhodobý vliv povětrnosti na žulu, je znám i proces hydratace a rozpadu struktur živců, případně procesů zvětvování slídových minerálů. To jsou ovšem procesy v řádech několika století nebo i milionů let.

Z hlediska stavební činnosti člověka pak pozorujeme některé starověké stavby, řecké a římské, které jakoby odolávaly zubu času a přes veškerý negativní dopravní vliv s vysokými koncentracemi oxidů síry, NO<sub>x</sub> a CO<sub>2</sub> trvají a trvají, zatímco jiné, daleko mladší stavby stárnou poměrně rychle a vyžadují stálé opravy.

Má-li stárnutí přírodních látek řády staletí, pak „umělé“, tj. člověkem vytvořené materiály, zvláště pak takové, které vznikají při vysokých teplotách a jsou následně hydratovány, jsou náchylné k rychlejšímu rozpadu a stárnutí při ztrátě svých základních vlastností.

Nových vlastností materiálů je dosahováno významným energetickým vkladem. Platí ale, že vysoká energetická hladina materiálu však není trvale udržitelným stavem. Materiál, specificky materiál, který pro získání nových vlastností potřebuje hydrataci, která je dále nedílnou součástí jeho nové struktury nemůže vysokou hladinu energie dlouhodobě udržet a bude dříve nebo později hledat cestu ke snížení svého energetického stavu, tedy ke změně struktury na pokud možno původní, tj. přírodní stav.

Co z toho vyplývá? Jaký je rozdíl mezi stavbami moderními a starověkými? Proč starověké monumenty nepodléhají zkáze tak, jako stavby betonové? Jsou stále připomínané římské stavby (př. Pantheon v Římě) výjimkou nebo pravidlem? Je možno položit další a další otázky, ale ani jejich velkým množstvím se nehledá odpověď snadno.

Nejdřív trochu citátů ze starších pramenů:

Vitruviova kniha „Deset knih o architektuře“ (r. 56 př. n. l.) nám definuje latinské slovo „caementum“ (ve významu kamenný nebo kámen). Důležitost poznatků a znalostí starých Římanů je studována po mnoho století z mnoha pohledů a významů – hledá se nejlepší překlad a význam použitých materiálů. Ještě v roce 1838 francouzský vědec L. J. Vicat v oblasti pojiv upozorňuje: „..... , když není něco jasného u architektury řecké nebo římské je vždy třeba konsultovat Vitruvia.“

Slovo cement je dlouho používáno ve významu pojivo a nakonec je slovo **cement** názvem kategorie vysokoteplotních slínek. Podobně pak slovo **beton** ještě v roce 1838 vysvětluje francouzský generál Treussard takto: „*Beton není nic jiného než zdivo vytvořené z hydraulické malty a malých oblázků*“.

Můžeme se zastavit u „hydraulické malty“ podle Treussarda, který byl zodpovědnou osobou za stavbu mostů a silnic, stejně tak, jako pevností ve Francii.. Tedy osoba povoláná a důležitá, jeho poznatky a práce jsou prakticky ihned překládány do americké angličtiny a publikovány v *Journal of the Franklin Institute of the State of Pennsylvania* (1838).

V červnu 1838 stejného časopisu JFI, pan Courtios definoval hydraulický cement takto: „*Vytvořené série složené ze 7, 8 a 9 dílů jílu, míchaný s 3, 2 a 1 dílem vápna*“

*kalcinovaných společně a nehašených: barva je víceméně načervenalá a odpovídá vyššímu nebo nižšímu obsahu železitých oxidů v jílu.“*

Pokusy, hledání a nalézání má co do činění s kompozicí jílu a vápna a kalcinací, tedy teplotou při které dochází v obou materiálech ke změnám. Lze potvrdit, že teploty jsou nižší než 1000 °C protože v historických pracích se obvykle uvádí: „*velmi mírné pražení*“ nebo „*zahřívání na bod mezi třešňově červenou a teplotou kovářské výhně*“ (Vicat, 1837), p. 58–59.

Příspěvkem je i český popis: Časopis technologický Jednoty ku povzbuzení průmyslu v Čechách a rozšíření vědomostí v řemeslech, umělostech, obchodu a hospodářství domácím. Redakcí Jana Svatopluka Presla Doktora a c.k. profesora, oudu též Jednoty a jiných společností **V Praze 1839** V knížecí arcibiskupské tiskárně u Václava Špinky str. 172

*„Pročež se při vodních stavbách do malty přidávají všelijaké látky, jakéž spojení pak cement sluje. Přidaná látka musí na vápno tak účinkovati, aby tvrdlo a vodou netrpělo. K tomu se hodí všechny sloučeniny, větším dílem z křemenité zemi sestávající, jako: 2 díly hašeného vápna, 2 díly drobného říčního písku promíchané s přídatkem z 1 dílu drobné cihlové mouky (moučky) a 1 dílu nehašeného vápna; tato malta dosti čerstvě ve vodě tvrdne a drží.*

*Tyto látky účinkují na sebe tímto způsobem: Nehašené vápno a moučka z cihel polykají vlhkost ostatních dílů, tím vápno pískem spojené čerstvě tvrdne; při tom se sloučí také křemenina cihel a jakýmsi podílem hlíny a s vápnem, a tuto sloučeninu voda neporušuje.*

*Jde tak o směs jílového, tepelně upraveného materiálu a páleného vápna, u nichž působením vody dochází k vzájemné interakci. Spolu dávají vzniku nových látek hydraulických vlastností a vytvářejí stabilní a pevné hmoty.“*

Vysvětlení přináší až studium změn struktury jílových minerálů a to především v teplotách do 800°C, kdy není pozorováno ani sintrování, ani nejsou pozorovány vysokoteplotní změny, tj. tvorba spinelů a pozdějších mulitů. Teplota „**aktivace jílu**“ je tedy taková, kdy po úplné hydroxylaci dochází ke změnám orientace v uspořádání hliníkových iontů vůči okolním kyslíkovým iontům. Bylo zjištěno, že zásadní změnou je koordinace z přírodních šesti na koordinaci pěti kyslíků. Teplem vyprovokované uspořádání jemeta-stabilní a tím současně velmi aktivní. Hovoří se o teplotní aktivaci jílové složky. Tento excitovaný, tj. meta-stabilní stav dal dokonce materiálům nepřesný, ale obecný používaný výraz „meta-kaolin“, ten se stává fenoménem od 80. let 20. století.

Jsou-li pozorování a experimentátorské práce první poloviny 19. století správné, pak dochází vlivem hydratovaného vápenatého elementu k dalším změnám při tvrdnutí a tím i k tvorbě nových hmot. Až pomocí magnetické resonance bylo zjištěno, že v konečném stavu nového materiálu se **meta-stabilní pozice hliníkového iontu opětovně mění** a tentokrát na stav, kdy je obklopen pouze čtyřmi kyslíky! Je třeba zmínit, že hliníkový iont je vždy přes kyslíkový můstek vázán na iont křemíku a tedy nestojí v procesu změn osamocen, ale vždy ve vazbě, opět přes kyslíkový můstek na křemík.

Nevyrovnanost elektrických nábojů hliníkových iontů vzhledem ke změnám v koordinaci vyžaduje kompensaci, protože v blízkosti jsou čtyři záporné náboje kyslíků a proti nim jen tři kladné náboje hliníkového iontu. Přebytek záporného náboje musí být vyvážen a do kombinace přichází se svými dvěma kladnými náboji vápník – ten tak váže a především **stabilizuje dva hliníkové ionty** v postavení ke čtyřem kyslíkům. (Obecně však vyrovnání nábojů dosahuje i kov první skupiny tabulky prvků (Na, K, Rb a Cs) s tím, že vyrovnává vzhledem ke svému pozitivnímu náboji vždy jen jeden hliníkový iont v tetra-koordinaci.)

Tímto uspořádáním je dosaženo nejnižšího energetického stavu a nová hmota je stabilní a pevná. Vápenatý iont je pevně, tj. chemickou vazbou vázán s aluminium-silikátovým řetězcem a nemůže být ani odebrán, ani hydratován za vzniku hydroxidu nebo dokonce uhličitanu vápenatého. V té souvislosti je třeba pamatovat na to, že hybatelem, který transportuje vápenatý iont do místa, kde dochází k vyrovnání záporného náboje hliníkových iontů, je voda. Voda je transportní medium, které potřebuje na svoje působení čas a které pomalu a dlouhodobě z hmot odchází.

Umístění iontů vápníku je fixováno stabilní vazbou a stejně tak jsou s ním vázány původně jílové složky, po reakci (vytvrnutí). Je vytvořeno nové pole amorfní hmoty anorganického polymeru – tedy vzájemně propojené řetězce střídajících se atomů křemíku a hliníku, které jsou spojeny kyslíkovými můstky. Protože základní poměr těchto dvou stavebních kamenů struktury je 2 : 1 ( $\text{SiO}_2$  :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) lze si představit kratší či delší uspořádání těchto složek ve vápenatém prostředí nebo naopak, jak shora uvedeno, převládá jílová složka (7, 8 a 9 dílů) ku 3,2 a jednomu dílu páleného vápna. V každém případě je ale dosaženo kýženého – hydraulických vlastností materiálu, jak popsáno v historickém materiálu.

Porozumění textům a ověření experimentů z doby před rozšířením Portlandského cementu se dostáváme k pochopení procesů, které pomohly objasnit až sofistikované analytické metody konce 20. století – především pak studium pozice a změn koordinace hliníkových iontů v závislosti na změnách teploty „aktivace“ jílu. Magnetická resonance v pevném stavu objevila posun do penta a tetra koordinace a umožnila vysvětlení jevu stabilizace, vzniku nových pevných a kompaktních látek – nazvaných jejich znovu objevitelem, geopolymery.

Tyto staronové hmoty mají zásadní vliv na pevnost a stabilitu vazeb právě proto, že struktura, byť amorfní, je stabilizována chemickou vazbou a nemá v žádném případě charakter gelu, což dokazuje mimo jiné odolnost takových hmot k vysokým a velmi vysokým teplotám a současně struktura s velmi jemnou sítí mezo-pórů (střední velikost pórů kolem 20  $\mu\text{m}$ ) odolává změnám teplot (z teploty červeného žáru (700-800 °C) a následným prudkým ochlazením ve studené vodě není pozorován žádný vliv na pevnostní charakteristiku hmoty).

Nevýhodou a hlavním omezením použitím těchto hmot však byla obecně „nevysvětlitelnost vzniku hydraulických vlastností“. Proč se někde tvorba pevných hmot, malt a pojivových směsí, staviteli daří ale jinde, a bohužel mnohde, se kýženého výsledku nedosáhne? Na tento stav upozorňuje již Vikat: „(1837), Chapter X, p. 68: „*každý stavitel musí prostudovat materiál, který má k dispozici*“ a dále upřesnil: „*mimoto, je správné určit podíly (materiálů) v každé lokalitě*“ (str. 22)

Nemůžeme srovnávat dnešní stav neustálých převozů všeho možného tam a zpátky se stavem, kdy se stavělo hlavně z materiálů dostupných na místě stavby! Jak to měl chudák stavitel dělat? Měl omezené možnosti studia materiálů a vlastně jen jistotu ve výrobě vápna, k dispozici byl jistě i šterk nebo lomový kámen. Studium vlastností jílových materiálů se maximálně opíralo o zkušenosti místních hrnčářů a výrobců keramického zboží. (Hezkou ukázkou spolupráce je literární odkaz na holandské výrobce hliněných dlouhých dýmek z bílé se pálícího jílu – bezesporu velmi kvalitního kaolinitického materiálu). Takový materiál byl pro stavitele štěstím, jeho mořská mola budou pevná a trvanlivá.

V opačných případech byla situace velmi nejistá a hlavně nestandardní, i když již bylo zřejmé, že i barevně se pálící jíly mohou vytvářet velmi dobré hydraulické malty – někteří autoři pak jsou zavedeni na slepou kolej při zdůvodňování pevnosti a trvanlivosti, kterou přičítají obsahům oxidů železa.

Různé materiály na stavbách při stavu neobjasněnosti příčin vzniku žádaných vlastností pojiv pak vedly k neúspěchům. Spolu s dalšími vlivy konce 19. století pak vedly k zásadní změně. Především těžba uhlí, železných rud a železniční doprava, nebo obecně mechanizace důlní činnosti a stavební boom ve městech vedl k odklonu od stále nestabilní a nestandardní technologie používané až do druhé poloviny 19. století.

Mezi datem patentu (cement byl patentován J. Aspenem roku 1824 v Anglii) a skutečným masovým používáním cementu a betonu však stojí takřka století, teprve počátek 20. století a industrializace na evropském kontinentě je neodmyslitelně svázána s těžbou vápence a výrobou cementu (Německo, Francie, střední Evropa včetně Českých zemí). Energetické náročnost výroby slínku (teplota pálení 1520 °C), která dala základ výrobě Portlandského cementu, byla vyvážena stále se opakující stejnou kvalitou a jednoduchostí přípravy, kterou postupně zvládli takřka všichni: 3 : 1 (tři díly písku tří frakcí a jeden díl cementu). Lití do forem, postupně pak výroba a tvorba celých stavebních dílů – panelů s obrovskou úsporou práce v porovnání se zděním z cihel.

Všechno je najednou z betonu – mosty, tunely, cesty, dálnice a domy, energetická náročnost výroby slínku se rozpouští do obrovských množství vyráběného cementu. Dnes je slovo cement již synonymem pro označení Portlandského cementu a vzniká mnoho nedorozumění, je-li takto označenopojivo umožňujícího pevné spojení kamenné drti, nebo jak shora uvedeno, „malých oblázků“.

Podstata tvrdnutí cementu a betonu pak spočívá v existenci tzv. C – S – H gelu, který se tvoří ze základních složek cementu, tri a di-kalcium silikátu, které jsou základem cementářských slínků.

### **Proti sobě stojí dvě koncepce– koncepce gelu a koncepce polymeru**

Anorganický polymer, kde voda je hybatelem transportu kationtů do míst negativních nábojů není po správném vytvrnutí a stabilizaci, již na vodě nikterak závislý, protože ta není součástí jeho struktury i když může, jako tzv. zbytková být v mezích prostorů polymerních sítí. Není však nikdy součástí sítí a nevytváří v nich žádný podíl – geopolymerní anorganická síť není gelem.

Tisíce a tisíce vědeckých prací je napsáno o cementu a betonu, tisíce a tisíce lidí je zaměstnáno při jeho výrobě, miliony tun oxidu uhličitého je vypouštěno do atmosféry každou hodinu jako neoddelitelný důsledek rozpadu vápence při výrobě cementu. Nejrozšířenější stavební pojivo – cement má své přednosti a svá úskalí.

Základní rozdíl mezi koncepcí polymeru a koncepcí gelu je objasnění jevu stárnutí. Na jedné straně máme již 30-40 letí zkušenosti se zlepšujícími se vlastnostmi anorganických polymerů, kde se důvodně předpokládá, že jev propojování, tedy polymerace řetězců stále pokračuje. Na druhé straně pozorujeme stárnutí betonů, kde hydratovaný vápenatý křemičitan je vnějšími vlivy stále napadán – vápník se jakoby nechtěl smířit se stavem, kdy byl vysokou teplotou posunut do vysoké energetické hladiny a snaží se časem a vlivem okolního prostředí transformovat na své přirozenější, tj. přírodní energetické hladiny. Známý je specifický jev tvorby etringitu  $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$ , na povrchu betonových staveb se objevuje sádrovec ( $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), vápenec ( $\text{CaCO}_3$ ) a všechny typy hydratovaných forem vápníku.

Betonové stavby jsou nestabilní i při změnách teplot, nad 300-350 °C. Struktura praská, beton ztrácí pevnost a příčinou je právě gelová struktura C – S – H systému, voda se prudce odpařuje a způsobí kolaps konstrukce.

Jsou pozorovány i další druhy poškození nebo narušení betonových konstrukcí – příkladem mohou být panelové domy – boom 60. a 70. let minulého století nejen, že trvale změnil vzhled snad všech evropských měst a kolem historických sídel ve objevily věnce

betonových džunglí – stačilo 20 až 30 let a ty domy volají S.O.S! Železné výztuhy panelů se obnažují a beton odpadává z balkonů a lodžii, z domů někde doslova trčí železné pruty. Něco je samozřejmě dáno vlivem spěchu (splnění plánu!!), nedodržováním doby pro vyztužení panelů, nedokonalé propařování, nesprávně namíchanou směsí, když výroba běžela i když nefungovaly váhynebo se nemíchalo tak, jak nařizovala technologie. To vše bylo možné, ale pojivo jako takové je stále závislé na své hlavní složce –na gelu křemičitanu vápenatého.

Přidá-li se k výrobním nepřesnostem podíl konstrukčních chyb, jako zatékání vody, postavení základů na špatněisolovanýpodklad, kdy pórovitá struktura betonu bude narušována přirozeným, tj. zemitým alkalickým vodným roztokem je problém na světě. Vždy se zde jedná o základní vliv vody a jí způsobený přenos iontů.Příkladem je vznik tzv. sekundárního etringitu, jehož 26 molekul krystalické vody a krystalizační síla je taková, že beton se buď roztrhá, nebo změkne jako houba. (příklady jsou jak UK, tak v USA, především u mostů a pražců železničních kolejí).

Bohužel vedle skutečných historických budov a staveb z římských dob (a těch není mnoho pravděpodobně i proto, že právě nestandardnost směsí a neznalost důvodů vedoucích ke stabilním hmotám vedla k jejich rozpadu) nemáme moderní stavbu, která by byla příkladem potvrzujícím předpoklad zlepšujících se vlastností koncepcopolymerních struktur. Za to máme obrovské množství příkladů, kdy gelová C – S – H koncepce prohrává svůj boj s časem.

Portlandu trvalo skoro století než byl masově vyráběn, studován a zlepšován je dodnes, je nejrozšířenějším pojivem na světě a jeho hegemonie se zdá být nenarušitelná i když dnes víme, že každá vyrobená tuna vypustí do atmosféry 440 kg CO<sub>2</sub> z rozkladu vápence.

Často je velmi dobré se zastavit, nespěchat a podívat se zda-lib jsme něco z podstatných minulých znalostí nepřehlédli, nepodcenili nebo jsme jim jen prostě nerozuměli. Pokud jsme ale porozuměli, pokud jsme tajemství, nebo spíš zapomenutou znalost rozluštili, pak je logické, že by se všech výhod mělo využít – jen pro příklad, tepelnou aktivací jílu odchází do ovzduší jen vodní pára při podstatně nižších teplotách.

Není to podstatné?

Ing. Tomáš Hanzlíček  
vědecký pracovník

731165041  
hanzlicек@irsm.cas.cz