



# Dzieje betonu

*Wiek XX jest nazywany wiekiem triumfu atomu, krzemu i betonu. Rzym jest nazywany „betonową stolicą imperium”. Czy beton został po raz pierwszy zastosowany właśnie w Rzymie? Czy wcześniej niż powstało, jeszcze w starożytności, imperium rzymskie? Czy istnieją odpowiednie zapisy lub dokumentacja z badań archeologicznych potwierdzające datowania jego zastosowania? W tym opracowaniu chcemy przypomnieć dobrze lub mniej znane fakty z historii stosowania betonu.*

A zacznijmy od sprecyzowania pojęcia *beton*. Beton jest najczęściej postrzegany jako mieszanka trzech podstawowych składników: spoiwa, wody i wypełniacza, która po stwardnieniu może lepiej lub gorzej imitować kamień naturalny, jest przed stwardnieniem plastyczny i daje możliwość formowania przestrzennych kształtów konstrukcji. Różnorodność możliwych do użycia kruszyw (naturalnych, sztucznych, z recyklingu) i spoiw (gipsy, cementy, polimery) sprawia, że pojęcie betonu jest szerokie, a obecnie zaliczamy go do materiałów kompozytowych, w których zaczyn spełnia rolę matrycy, a kruszywo inkluzji. Użytkowe własności betonu stwardniałego zależą od materiałów składowych i należy analizować wpływ nie trzech, a pięciu składników, tj. cementu, domieszek, dodatków, kruszywa i wody.

Nie da się dokładnie określić czasu wynalezienia wiążących materiałów budowlanych. Wiadomo, że początkowo stosowano zaprawy z rozcieńczonej gliny lub itu z dodatkiem piasku i często sierści bydłowej. Potem zaczęto stosować zaprawy z wypalonego gipsu, a następnie wapna. Użycie wapna w budowlach tzw. kultury jerychońskiej, między innymi przy budowie muru wokół Jerycha, po-

twierdziły badania archeologiczne, a mury te powstały przed trzecim tysiącleciem p.n.e. Zapraw wapiennych używano w czasach powstawania mezopotamskich państw-miast i na tych terenach odkryto piece do wypału wapna (między innymi w okolicach Ur), datowane na 2500 i 2000 rok p.n.e. W Jerychu, Babilonie i Niniwie stosowano asfaltobeton, czyli mieszaninę naturalnego asfaltu, piasku i żwiru do spoinowania cegieł (często tylko suszonych) lub jako wykładziny uszczelniające zbiorniki wodne. W VII w p.n.e. w Armenii stosowano systemy irygacyjne doprowadzające wodę kanałami i tunelami. Systemy takie zaczęto stosować na Bliskim Wschodzie, aż po Afrykę. Król asyryjski Sanherib, który obrał za swą siedzibę Niniwę, po zapoznaniu się z systemem kanałów armeńskich nadzorował budowę takich kanałów wokół Niniwy, a za jego najwybitniejsze przedsięwzięcie uważa się doprowadzenie wody z rzeki odległej od Niniwy aż o 50 km specjalnym systemem kanałów i akweduktem. Sanherib szczytł się wybudowaniem tego kanału i akweduktu w 15 miesięcy. Aby zapobiec przeciekaniu wody z biegnącego górą koryta, pod najwyższą warstwą kamieni umieszczono warstwę betonu lub zaprawy wapiennej. Zapraw wapiennych używano przy wznoszeniu murów obronnych Troi i Myken. Na Krecie freski naścienne wykonywano na tynkach z wapna i zmielonego kamienia wapiennego. Zaskakująco precyzyjne jest wykonanie szczelnych cystern jerozolimskich z czasów Dawida. Istnieje pogląd, że starożytni Grecy sposób wykonywania zapraw wapiennych przyjęli od Persów, a dla podniesienia odporności tych zapraw na działanie wody dodawali drobno zmielony tuf wulkaniczny z wyspy Thera (Santorin). Zachowane w Pireusie pozostałości murów

portowych wykazały wielką trwałość takich zapraw, które w ciągu setek lat uległy mniejszej korozji pod wpływem wody morskiej niż łączone tymi zaprawami elementy kamienne. Zaprawa wapienna stosowana była także w odległych Chinach przy budowie Wielkiego Muru Chińskiego (550-300 p.n.e.). Rzymianie przejęli sztukę wypalania wapna od Greków i znacznie ją ulepszyli. Mamy na ten temat informację dzięki zapisom z około 160 roku p.n.e., zawartym w traktacie Porcjusza Katona Starszego, konsula i cenzora z epoki republiki. Do wypału wapna Katon zaleca kamień wapienny biały, czysty, bez domieszki piasku i gliny. A piec do wypalania wapna opisał następująco: „... *Piec winien być szeroki na 10, wysoki na 20 stóp, a ku górze zwężać się do około 3 stóp. Od spodu znajduje się krata (ruszt) na dwukomorowym palenisku. Gdy trzeba usunąć popiół z jednej komory, w drugiej może płonąć ogień*”. Takie rzymskie piece mielerzowe były rozpowszechnione na terenach Cesarstwa Rzymskiego.

Zdecydowaną przewagę nad architekturą religijną miało w starożytnym Rzymie budownictwo świeckie, a ponadto budowle inżynierskie: kanały, akwedukty, łaźnie, mosty, ujęcia wód górskich i porty. Poza tradycyjnymi materiałami budowlanymi, czyli drewnem, kamieniem ciosowym, gliną, cegłą wypalaną, na szeroką skalę wprowadzono zaprawy wapienne i niestosowany wcześniej beton, uzyskany przez spojenie drobnych i grubszych kamieni zaprawą wapienną.

Początkowo jako  **dodatki**  polepszające wytrzymałość zapraw i ich odporność na wodę stosowano mielone cegły, skorupy i dachówki, zazwyczaj będące odpadami produkcyjnymi. Drobny przemiał tych dodatków zapewniał, że były to sztucznie sporządzane  **dodatki hydrauliczne** .

Około III wieku p.n.e. zaczęto stosować dodatek popiołów wulkanicznych spod Wezuwiusza i z innych stron Italii. W potężnych pokładach występują one w okolicach Puteoli i nazwano je *pulvis puteolanus*. Stąd pochodzi i dzisiaj używana nazwa dodatki pulcolanowe. Kiedy wytrzymałość i trwałość nowego materiału stała się oczywista, zaczęto go stosować coraz szerzej. Warstwę betonu układano w drewnianym deskowaniu, albo pomiędzy wymurowanymi już licówkami z kamienia lub cegły. Zaczęto wznosić mury z cienkimi licówkami z kamienia lub cegły (taką wymurowaną licówkę można nazwać szalunkiem traconym), a następnie układano warstwę betonu z domieszką żwiru oraz kawałków połamanych cegieł i dachówek, w którą wciskano jeszcze większe kamienie i układano kolejną warstwę. Z czasem mury stały się bryłami betonu. W epoce murów betonowych dawne nazwy wiązań murarskich nabrały nowych znaczeń: *opus testaceum* – to mur betonowy obłożony cegłą; *opus incertum* – mur betonowy obłożony nieregularnymi kawałkami kamienia; *opus reticulatum* – oznaczało obłożenie małymi ostrosłupami kamiennymi, ułożonymi w formie karcanego „karo”. Na lekkiej krążynie wznoszono łuk z cienkiej cegły, a łuk ten służył z kolei jako krążyna dla betonu. Stosowano łuki, kopuły i sklepienia w różnych budowlach.

Najślawniejsza świątynia starożytnego Rzymu – Panteon – imponuje ogromem i śmiałością konstrukcji, w której użyto także betonu o różnej gęstości. Panteon został zbudowany przez Marka Agryp-

pę, syna Lucjusza, zięcia Augusta (63 do 12 p.n.e.) i jego imię widnieje na fasadzie portyku. Dwukrotnie niszczył go pożar, a istniejąca do dziś budowla została odbudowana za czasów Hadriana, uważanego za największego budowniczego ze wszystkich cesarzy. Panteon jest przykryty potężną betonową kopułą o rozpiętości około 44 m, opartą na ścianach o grubości 6 m, tak wymodelowanych, aby wraz z wtopionymi w beton łukami odciążającymi właściwie przenosiły ciężar tej ogromnej kopuły. Zastosowano beton o zmieniającej się gęstości: u podstawy stosując gruz z wapiennego tufu i martwicy, później gruz ceglany, a w najwyższej partii pumeks. Dla zmniejszenia ciężaru masy betonu stosowano nie tylko kruszywo pumeksowe, ale umieszczano także puste garnki w miejscach, gdzie nie występowały zbyt wielkie naprężenia. Dla polepszenia odporności zapraw wapiennych na działanie wody powszechnie stosowano dodatek kruszonych dachówek ceramicznych, a potem wprowadzono dodatek pyłów wulkanicznych.

**Rzymski system sanitarny** był na tyle zaawansowany, że w roku 1842 powołano w W. Brytanii specjalną komisję królewską ds. poprawy warunków sanitarnych i zdrowotnych, która przedstawiła opis urządzeń sanitarnych rzymskiego Koloseum i amfiteatru w Weronie. Ten rzymski system sanitarny to planowe rozwiązania problemu zaopatrzenia miast w dobrą wodę źródłaną, czyli dobrze działający system wodociągów, kanalizacji i lokalizacji łaźni publicznych. Łaźnie publiczne wprowadzono w II wieku p.n.e., a pełnię rozkwitu osiągnęły w wieku I. Wodę do Rzymu, przed jego upadkiem, doprowadzano siedmioma akweduktami. Pierwszy z wielkiego systemu akweduktów Rzymu, Aqua Appia, zbudował Krassus w 312 p.n.e. Arkady, czyli mosty akweduktów, są najbardziej okazałą i widoczną ich częścią, których duża część była prowadzona przewodami wodnymi i tunelami. Na filarach arkad z kamienia lub cegły znajdował się właściwy betonowy kanał wodny, zaopatrzony w daszek łukowy lub dwuspadowy. Komisarzem wodnym Trajana był Sekstus Juliusz Frontinus, który około 100 n.e. dokładnie opisał akwedukty rzymskie. Jako komisarz wodny kierował niewielkim zespołem inżynierów, mierniczych i urzędników oraz 700 niewolnikami pracującymi jako nadzorcy, brygadziści, murarze, hydraulicy i tynkarze. Przewody wodne akweduktów stale pękały i przeciekały. Frontinus narzekał na niestaranne wykonawstwo, ale nie uwzględnił osiadania filarów arkad, a Rzymianie w ogóle ignorowali znaczenie rozszerzalności cieplnej. Rozszerzanie się i kurczenie wielokilometrowej długości kanału betonowego musiało mieć miejsce wskutek różnic temperatur gorącego dnia letniego i chłodnej nocy zimowej. W 537 roku oblegający Rzym Goci przerwali dopływ wody do miasta. Chociaż zniszczenia naprawiono, brak systematycznej konserwacji i utrzymania spowodował, że w X wieku akwedukty przestały działać, a mieszkańcy Rzymu musieli zadowolić się mulistą wodą z Tybru.

**Brukowane drogi rzymskie**  to masywne konstrukcje warstwowe, które w wielu miejscach przetrwały do czasów dzisiejszych (np. Via Appia z 312 p.n.e. zbudowana przez Krassusa). Budowę drogi rozpoczynano od wykopania rowu o głębokości około metra. Jeśli dno wykopu stanowił słaby



grunt, często wbijano pale wzmocniające. Następnie układano cztery do pięciu kolejnych warstw. Warstwa spodnia to piasek lub warstwa zaprawy. Następnie warstwa płaskich kamieni ułożonych na zaprawie zazwyczaj z dodatkiem pucolan. Na niej warstwa żwiru spojonego gliną lub betonem dzisiaj taką warstwę nazywamy podkładem, a na tej warstwa ubitego betonu (obecnie mówimy – posadowienie albo fundament). Nawierzchnię stanowi bryk z wielkich wielobocznych, dobrze wygładzonych, bloków twardego kamienia, ułożonych na betonie. Na obszarach, gdzie nie było dobrych surowców do wytwarzania betonu, bloki nawierzchni układane były na roztopionym otowie. Niestety właśnie te drogi najwcześniej zostały zdewastowane przez „poszukiwaczy” tego metalu.

Za czasów Augusta wybitnym budowniczym był wspomniany już wcześniej Agryppa, twórca między innymi Panteonu, pierwszych łaźni rzymskich i rozbudowy całego systemu wodociągów i kanalizacji. Niestety, nie zachowały się jego opracowania. Natomiast z tego samego okresu pochodzi dzieło Witruwiusza (Marcus Vitruvius Polio): O architekturze książę dziesięć (*De architectura libri Decem*). Witruwiusz korzystał z opracowań greckich i jego traktat jest podstawowym źródłem wiadomości o starożytnej sztuce, architekturze i technice. Wiele dzieł dotyczących tych tematów zaginęło, a czas oszczędził jedynie pracę Witruwiusza. Choć dzieło to zaginęło w wiekach średnich, jego rękopiśmienna kopia została odnaleziona w XV wieku, stając się bodźcem do odnowienia zapomnianych technik budowlanych i metod stosowania kamienia, cegły, zapraw i betonu.

Wiele informacji z dziedziny techniki zawiera najstarsza znana encyklopedia: Historia naturalna Pliniusza Starszego (ok. 60 rok n.e.). Pliniusz pisze w swych kronikach o wejściu w użycie margla oraz coraz powszechniejszym użyciu palonego wapna przy budowie domów i umocnień. Dobrze jest znane i często cytowane stwierdzenie Pliniusza: „Ruinarum urbis ea maxime causa, quod furto calcis sine ferumine suo **caementa** componuntur”. Lorient w 1774 r. rozumiał to stwierdzenie jako: „Główną przyczyną niszczenia budowli naszego miasta jest to, że wapna się oszczędza i używa się cementu bez materiału wiążącego”. Niewątpliwie od facjińskiego *caementum* powstała nazwa cement, ale samo stwierdzenie Pliniusza było dociekliwie analizowane i stwierdzono, że *caementum* (*caementa* w liczbie mnogiej) w tych dawnych, antycznych czasach oznaczało tłuczony kamień, ale także dodatek do wapna przyspieszający twardnienie i nadający własności hydrauliczne. Wi-

truwiusz pisał: „Istnieje pewien gatunek pyłu, który dzięki przyrodzonym właściwościom wytwarza rzeczy godne podziwu. Występuje on w okolicach Bajów i na gruntach municypalnych Wezuwiusza. Proszek ten zmieszany z wapnem i łamanym kamieniem nie tylko zapewnia trwałość, lecz nawet użyty przy budowie grobli w morzu twardnieje pod wodą... w Kampanii z wypalanej ziemi powstaje pył puteolański, w Etrurii z wypalanej substancji powstaje *carbuneulus*, piasek czarniawy. Oba nadają się doskonale do budowy murów, przy czym jeden wykazuje zalety przy budowach lądowych, drugi także i przy budowie grobli morskich” (ks. II, r. 2.). Seneka, żyjący w czasach Nerona, wspominał, że jeśli na puteolański proszek popada deszcz, staje się kamieniem. Użycie tego dodatku przy budowie tak ważnego dla Rzymian portu było szeroko znane, a co więcej miejscowość ta przez długi czas była centrum handlu pucolaną.

Witruwiusz podaje, że dla przygotowania wapna do zapraw murarskich korzystne jest użycie zwartego kamienia wapiennego, natomiast do prac tynkarskich, sztukatorskich i dla bielienia lepiej wypalić wapno z lekkich wapieni porowatych. Podobne zalecenia dotyczące wyboru surowca daje Pliniusz, który zaleca stosowanie wapienia z kamieniołomów dających wapien zwarty, często stosowany nawet do przygotowania żaren do mielenia, a nie wapienie z nadbrzeżów rzek.

Imperium rzymskie rozrastało się, uzyskując za Trajana (98-117 r.) największą terytorialną rozciągłość. Do Rzymu napływało coraz więcej jeńców i niewolników, ale także ludności wolnej z podbitych krajów, a wśród nich naukowców, rzemieślników i specjalistów wielu dziedzin

Wraz z upadkiem zachodniego Cesarstwa Rzymskiego nastąpił upadek i zapomnienie wielu dobrze rozwiniętych technik. Rozpadły się w gruzy rzymskie porty, drogi, akwedukty, bo zabrakło władzy silnej i oświeconej. Niemal zupełnie zanikła umiejętność czytania i pisanie. Wiele z rzymskich technik poprzez Bizancjum zachowało się na wschodzie i było stosowanych i rozwijanych w rejonie czarnomorskim i na Rusi, także stosowanie w zaprawach dodatków pucolanowych, mielonej cegły i powszechnego stosowania betonów.

Na odrodzenie się cywilizacji europejskiej wpłynął doptyw literatury z krajów, w których piśmiennictwo nigdy nie upadło. Benedyktyni działający na terenie Cesarstwa Rzymskiego uratowali niektóre z dzieł rzymskich, przepisując je wciąż na nowo. W Hiszpanii Żydzi dokonują licznych przekładów z arabskiego na łacinę. Jedyne uniwersalną siłą jednoczącą Europę, która ocalała z chaosu wieków często zwanych ciemnymi, pozostał Kościół. Mnisi i księża byli nauczycielami, filozofami i mecenasami sztuki. Wielkie przedsięwzięcia budowlane wymagały bowiem planu, dobrej organizacji i bogatego zamawiającego. W architekturze, sztuce i kulturze minionych wieków wyróżnia się określone, charakterystyczne style. Powstawały murowe budowle w stylu romańskim, wspaniałe katedry gotyckie, ale chrześcijańscy spadkobiercy rzymskiej kultury nie rozwinieli techniki spajania elementów murowych i stosowania betonu.

Około 354-430 roku św. Augustyn w piśmie *Państwo Boże* opisuje m.in. wapno i jego zastosowanie. Do zapraw wapiennych wprowadzano tłu-

czoną cegłę, stosowano dodatek mleka, maślan-ki lub oleju. W piecach wapienniczych o zasypie warstwowym, lokalnie, zaczęto stosować węgiel na przełomie XIII/XIV wieku. Stosowanie surowców lokalnych i różnorodność technik wypalania i przygotowania wapna powodowały ogromne zróżnicowanie właściwości zapraw.

Oryginał dzieła Witruwiusza zaginął, zachowały się jego odpisy przechowywane w różnych bibliotekach jako tak zwane kodeksy, niestety, wszystkie pozbawione materiału rysunkowego, a najstarszy z nich jest datowany na IX wiek. W roku 1414 w klasztorze w Monte Casino po raz pierwszy natrafiono i zainteresowano się odpisem dzieła pochodzącym prawdopodobnie z IX wieku. Ten odpis stał się podstawą pierwszego wydania traktatu drukiem w 1486 roku, co doprowadziło do powszechnego naśladowania wzorów klasycznych.

W XV wieku nastąpił renesans, czyli odrodzenie, w nauce, sztuce i architekturze. Jednym z wielu utalentowanych ludzi tej epoki był Leon Battista Alberti (1404-1472), który był malarzem, poetą, filozofem, muzykiem, architektem i inżynierem. Poza projektowaniem licznych pałaców i kościołów, około 1452 roku napisał po łacinie traktat o budownictwie *De re aedificatoria*, wydany w roku 1485, już po śmierci autora, i przetłumaczony na włoski, francuski, hiszpański i angielski. Po Albertim, czołowym architektem papieskim był Bramante i on odkrył na nowo i zastosował starą rzymską metodę wlewania płynnego betonu do drewnianych szalowań. Średniowieczna relacja mistrz – uczeń zaowocowała znakomitymi rezultatami, kształtując jednostki o perfekcyjnych umiejętnościach i szerokich zainteresowaniach. Pojawił się wybitni teoretycy i twórcy sztuki renesansu.

W 1556 r. Andrea di Pietro, zwany Palladio, opublikował traktat Cztery księgi o architekturze. Ten twórca wielu znamenitych budowli renesansu opisuje tynki jako właściwe wykończenie powierzchni murów ceglanych. Z jego dorobku korzystali liczni architekci aż do XIX wieku. Palladio dopuszcza więcej rodzajów wapieni nadających się do wypalania wapna. Zaleca stosowanie twardego trawertynu, powszechnie stosowanego jako kamień budowlany o wysokiej wytrzymałości. Wymienia także pewne rodzaje kamieni rzecznych, dopuszcza skały o wyraźnym zabarwieniu od szarego do czerwonego i gąbczaste tufy. Takie rozszerzenie gamy surowców świadczy o licznych doświadczeniach z wypaleniem miejscowych surowców i umiejętności otrzymywania dobrego wapna palonego, które dzisiaj nazywamy hydraulicznym. Palladio powtarza wcześniejsze zalecenia poprzedników odnośnie stosowania wapieni zwartych dla wypalania wapna do zapraw murarskich, a wapieni lekkich dla wypalania wapna przeznaczonego do zapraw tynkarskich.

W 1690 roku St. Soliski, jezuita, który zastąpił jako specjalista w zakresie mechaniki technicznej i jej zastosowania w budownictwie, opisał swoje doświadczenia w dziele *Architekt polski*.

Uważa się, że zabudowa i organizacja Paryża z XVII wieku nie dorównywały Rzymowi z czasów świetności. W wieku XVIII spotyka się we Francji wapna hydrauliczne (np. wapno z Metz) oraz stosowanie pucolan (tras holenderski i popiół z Tour- nay).

We Francji powstaje pierwszy ośrodek zajmujący się nauczaniem i pracami badawczymi: w roku 1747 powstaje pierwsza na świecie budowlana szkoła inżynierska: École Nationale des Ponts et Chaussées .

W 1748 roku Belidor publikuje dzieło *Architecture hydraulique*, w którym używa określenia **beton** dla mieszanki piasku, wody i wapna hydraulicznego. Mieszką tą zalewa się kruszywo ułożone w deskowaniu. I tak po prawie 1500 latach zapomnienia zainteresowano się poważnie betonem.

Dopiero **John Smeaton**, Anglik interesujący się budownictwem hydrotechnicznym, poszedł śladem zaleceń Witruwiusza i na podstawie systematycznych badań prowadzonych w latach 1756-59 stwierdził, że hydrauliczność wapna zależy od zawartości gliny w surowcu. Badania te oraz praktyczne zastosowanie opracowanego przez niego wapna do budowy latarni morskiej na skałach w rejonie Plymouth zapewniły mu miano „**ojca betonu**”.

W 1765 r., 21-letni wówczas A. Lavoisier zbadał rozpuszczalność gipsu naturalnego w wodzie. Twierdził, że gips ogrzewany traci wodę, a zarobiony wodą twardnieje, czyli ulega rehydratacji.

W 1789 roku ukazuje się podręcznik chemii A. Lavoisiera, w którym „**ojciec chemii**” wymienia 33 „pierwiastki”. Na tej liście: wapno, kaolin i krzemionka zostały zakwalifikowane jako „ziemie”. I choć autor miał wątpliwości, czy są pierwiastkami, nie udało się ich rozłożyć.

W 1796 r. **Parker** patentuje produkcję spoiwa z angielskich wapieni marglistych przez wypalanie w piecu do wypału wapna w nieco wyższej temperaturze, ale bez fazy ciekłej. Wypalony materiał nie gasi się wodą i przed użyciem wymagał zmielenia. Początkowo nazywany był cementem Parkera, ale około 1798 r. ukazała się broszura samego Parkera, w której użył nazwy **cement romański**, ponieważ jego cement charakteryzował się lekko brunatnym kolorem, jak rzymskie spoiwa hydrauliczne z wapna i dodatków pucolanowych. W następnych latach znaczną produkcję cementu romańskiego, poza Anglią i Francją, podjęto w Niemczech, Austrii i Rosji (w tym także na terenach obecnej Polski).

W latach 1790-1804 powstają podstawy chemii ilościowej, odkrycie praw stechiometrycznych.





We Francji inżynier wojskowy Lesagne rozpoczyna produkcję „cementu naturalnego” z otoczków występujących w okolicach Boulogne-sur-Mer.

W 1818 roku **Luis Joseph Vicat**, francuski inżynier wojskowy, opublikował wyniki swoich studiów i doświadczeń ze spoiwami. Na podstawie analiz chemicznych stwierdził, że nie istnieje dobre spoiwo hydrauliczne bez krzemianów. Jego zasługą było wskazanie na znaczenie proporcji surowców użytych do produkcji spoiw i klasyfikacja spoiw wapieniowych na:

- wapno zwykłe – domieszek poniżej 10%
- wapno hydrauliczne: 10-34% gliny i 66-90% wapna
- cementy: 40-60% gliny i 40-60% wapna.

Vicat pierwszy opracował urządzenie do badania wytrzymałości zaprawy wapiennej. Jego pomysłem było użycie igły do badania czasu wiązania zapraw. Urządzenie to pod nazwą aparatu Vicata stosowane jest do dzisiaj.

Najwięcej wiadomości dotyczących przygotowania wapna i zapraw wapiennych zawiera traktat Charleville'a z ponad 400 stronami tekstu. Liczne tablice zawierające składy i właściwości zapraw oraz osiem wielkich wklejek z rysunkami urządzeń. Jeszcze przed ukazaniem się drugiego wydania francuskiego traktatu, w 1825 roku Charleville, który nadzorował budowę Petersburga, na rozkaz Mikołaja Romanowa (późniejszego cara Mikołaja I), pełniącego funkcję generała-inspektora robót inżynieryjnych, przygotował zwięzły skrót traktatu, przewidziany do przetłumaczenia na język rosyjski. Charleville, opracowując traktat, znał wyniki prac Smeatona (1791 r.) i Vicata (z 1817 i 1818) dotyczące możliwości produkowania sztucznego wapna hydraulicznego. W swoim traktacie omawia więc możliwości produkcji zarówno naturalnego wapna hydraulicznego, czyli opartego na naturalnych surowcach, o właściwym dla nich składzie, ale także omawia możliwości zestawiania mieszanek surowcowych. W zależności od sposobu zmieszania i proporcji podstawowych składników, tzn. wapienia i gliny, Charleville wyróżnia trzy materiały hydrauliczne: 1) przy wypale naturalnej mieszanki, mającej właściwe proporcje gliny i wapna w postaci wapienia, powstaje „wapno hydrauliczne”, będące „naturalnym cementem”; 2) gdy zmieszają się niewypaloną glinę z czystym wapnem i wspólnie wypalą, to otrzymuje się wapno hydrauliczne będące „sztucznym cementem”; 3) można mechanicznie zmieszać, na zimno, wypaloną glinę i wapno, i także otrzymać wapno hydrauliczne, czyli tzw. sztuczny cement. W traktacie podano szereg teoretycznych rozważań, całkowicie zgodnych z dzisiejszymi, między innymi o roli krzemionki oraz tlenków glinu i żelaza, które reagują podczas wypalania z tlenkiem wapnia. Podkreślono wpływ postaci, w jakiej występuje krzemionka, na właściwości. I tak, krzemionka w postaci żeluz nadaje wapnu właściwości hydrauliczne, natomiast w formie piasku, czyli w formie krystalicznej, takich właściwości nie nadaje, ale obecność krzemionki żelowej zawartej w pucolanach znów zmienia korzystnie właściwości zaprawy wapiennej.

Spoivo hydrauliczne pod nazwą „cement portlandzki” opatentował w 1824 roku angielski murarz **Joseph Aspdin**. Przydomek „portlandzki” do-

dał Aspdin z powodu podobieństwa tego nowego tworzywa do powszechnie wówczas używanego kamienia budowlanego z okolic Portlandu. Pierwsza cementownia w Anglii powstała w 1825 roku. W 1828 roku William Aspdin, syn Josepha, dostarcza swój cement na budowę tunelu. Wybudowane wówczas w Anglii fabryki (między innymi słynna fabryka Robinsa) przez wiele dziesiątków lat zaopatrywały rynek światowy, w tym i rynek polski.

W 1853 roku powstaje pierwsza na terenie Polski cementownia w Sławkowie k. Olkusza, produkująca cement romański.

Na kontynencie europejskim pierwsza fabryka cementu portlandzkiego powstała w 1850 roku w Buxtehude koło Hamburga, a druga, w 1855 roku, w Boulogne sur Mer we Francji. I kolejna niemiecka w Zullchow pod Szczecinem, znana jako Stettiner Portland-Cement. W 1857 roku uruchomiono pierwszą polską cementownię, w Grodzcu (piąta na świecie).

W roku 1860 odbył się I Międzynarodowy Kongres Chemików w Europie, w którym wzięło udział 140 naukowców.

W roku 1867 J. Monier, paryski ogrodnik-przedsiębiorca, patentuje sposób produkcji pojemnika z siatki z żelaznych drutów „otynkowanej” zaprawą cementową. Następne jego patenty obejmowały wykonane w podobny sposób rury (1868 r.), płyty (1869 r.), arkady mostu łukowego (1873 r.) i podkłady kolejowe (1877).

1870 rok **Henri Le Châtelier** przedstawia teorię wiązania gipsu, według której wiązanie i twardnienie jest związane z jego krystalizacją. Zajmuje się badaniem pęcznienia cementu. Wprowadza tzw. pierścienie Le Châteliera, stosowane do dzisiaj. W 1887 roku publikuje wyniki badań nad zawartością glinianów i krzemianów wapnia.

Waldemar J. Affelt jako motto do swojej książki (*Dziedzictwo w budownictwie, albo o obiektach budowlanych jako dobrach kultury ksiąg dzieścię*, 1999 r) użył myśli Newtona: „Jeśliśm widział dalej, to stojąc na barkach gigantów”. W książce tej przytacza nazwiska wielu pionierów budownictwa betonowego. Początek naukowej technologii betonu stanowią niewątpliwie teoretyczne prace Francuza R. Fereta, opublikowane w latach 1890-1895, w których autor sformułował i udowodnił tezę, że wytrzymałość betonu zależy od stosunku absolutnej objętości cementu do objętości jam kruszywa, wypełnionych cementem, wodą i powietrzem. Określił również optymalne uziarnienie kruszywa, postulując, aby kruszywo było możliwie gęsto upakowane, a jamy zostały wypełnione piaskiem drobnym, najlepiej w proporcji 2/3 kamieni i 1/3 piasku. Zalecał nieciągłe uziarnienie kruszywa.

W 1907 r. W. Fuller i S. Tompson (USA) ogłosili wyniki i podali krzywe optymalnego uziarnienia, zalecając uziarnienie ciągłe. W 1918 r. L. Edwards (Kanada) wprowadził pojęcie „powierzchni właściwej stosu kul”.

W 1918 r. D. A. Abrams, z Lewis Institute w Chicago, pierwszy wprowadził pojęcie wskaźnika uziarnienia, pozwalającego charakteryzować zarówno kruszywa ciągłe jak i nieciągłe. Opracował ilościowe wartości wodożądności mieszanek w za-



leżności od stosunku cementu do kruszywa. Zaproponował metodę projektowania składu mieszanki betonowej, nazwaną „metodą najmniejszych współczynników”, opierając ją na sformułowanej przez siebie podstawowej zasadzie technologii betonu, mówiącej, że „*dla tych samych składników i warunków badania wytrzymałość betonu dobrze zagęszczonego, o określonym wieku, zależy wyłącznie od stosunku masy wody i cementu użytych do sporządzenia mieszanki*”. Tezę tę oparł na analizie wyników badań 50 tysięcy próbek betonu. Jest autorem koncepcji stosowania współczynnika wodno-cementowego (w/c) do wstępnego określania wytrzymałości betonu. Zaproponował sposób projektowania składu mieszanki betonowej, poczynając od ustalenia pożądanego stosu okruszowego kruszywa na podstawie krzywej przesiewu posiadanego kruszywa. W badaniach laboratoryjnych stosował znormalizowany zestaw dziewięciu sit, w których każde kolejne ma oczka dwukrotnie większe od poprzedniego. W 1917 roku Abrams zaprezentował sposób badania zawartości zanieczyszczeń organicznych kruszywa przy pomocy 10% roztworu wodorotlenku sodu, zmieniającego zabarwienie pod wpływem tych substancji. W badaniach laboratoryjnych używa się stożka Abramsa dla określenia konsystencji świeżej mieszanki betonowej.

W 1919 r. R. Young (USA) stwierdził, że najlepsze mieszanki dają kilkufrakcyjne uziarnienie o najmniejszej powierzchni właściwej.

W 1924 r. J. Bolomey (Szwajcaria) poddał krytyce wzór Fullera, zarzucając, że daje betony trudno urabialne i źle zagęszczalne z powodu braku drobnej frakcji. W roku 1930 opublikował współczynniki wodożądności dla poszczególnych frakcji kruszywa, nie proponując jednak własnej metody projektowania betonu.

Wykorzystując wzór wytrzymałości  $R_w = f(c, w)$  oraz współczynniki wodożądności frakcyjnej Bolomeya i dodając warunek szczelności betonu wg Fereta, Polak W. Paszkowski stworzył w 1934 roku analityczną metodę projektowania betonu.

Początkowe badania zaczynów cementowych i betonów najsystematyczniej prowadzone były we Francji, bo tam od 1747 roku istniała École Nationale des Ponts et Chaussées. Tam pracował np. Feret. W Polsce badaniami cementu, betonu i żelbetu zajmowano się na Politechnice Lwowskiej, zorganizowanej na wzór Politechniki Wiedeńskiej w 1877 roku, i powołanej już po I wojnie Politech-

nice Warszawskiej (1915 r.). W 1931 roku odbył się pierwszy Zjazd Żelbetników Polskich. Finansowaniem i prowadzeniem badań zaczęły także zajmować się różne stowarzyszenia producentów. Pierwszym przykładem takiej działalności może być Scandinavian Association of Portland Cement Manufactures z Danii i Norwegii, która w roku 1896 rozpoczęła badanie odporności betonu na działanie wody morskiej i mrozu w warunkach naturalnych. Bloki betonowe zostały umieszczone w trzech miejscach: na północy Norwegii, za Kołem Polarnym, w Danii na wybrzeżu Morza Północnego i w Szwecji u wybrzeży Bałtyku. Wyniki badań, przeprowadzonych po 10 i 20 latach kontaktu betonu ze środowiskiem silnie korozyjnym, przedstawił A. Poulsen na 5th Congress Internat. Assoc. Test. Mat. w Kopenhadze w 1909 roku i na 13th Internat. Congress Navigation w Londynie w 1923 roku, a następnie, w roku 1936, w Oslo. W Sztokholmie w 1938 roku odbyło się I Sympozjum Chemii Cementu. Doskonałą monografię dotyczącą cementów i betonów, niestety nigdy nieprzetłumaczoną na język polski, napisał F. M. Lea, wieloletni dyrektor Building Research Station z Anglii. Podczas II wojny ożywione badania prowadzono w USA, w National Bureau of Standards.

Kończąc to telegraficzne, z zachowaniem chronologii wydarzeń, przypomnienie faktów związanych z dziejami betonu, kończę je na początku XX wieku, w którym to nastąpił ten właściwy „triumf” betonu po zakończeniu II wojny światowej. Zwłaszcza w ostatnich 30 latach XX wieku nastąpił tak ogromny postęp w badaniach naukowych, technice wykonawczej i przekazywaniu informacji, że nie można tych faktów przedstawić w jednym krótkim opracowaniu. Przypomnimy tylko trzy budowle betonowe wykonane z użyciem cementu na terenach obecnej Polski: pochodzący z 1894 most żelbetowy w Drulitach na Kanale Elbląskim, bo jest uznawany za najstarszą konstrukcję betonową w Polsce; wiadukty kolejowe w Stańczykach z roku 1926, zwane „Akweduktami Północy”, ze względu na ich urodę i podobieństwo do tych historycznych rzymskich; i Halę Stulecia (dawniej Ludowa) z Wrocławia, zbudowaną w latach 1910-1913, wpisana na listę zabytków UNESCO. Ta „katedra demokracji”, jak ją nazwał jej twórca Max Berg, w czasie gdy powstała, miała kopułę o średnicy największej w świecie.

*oprac. dr inż. Lucyna Westfal*

