

Witold Chodyń¹

Paweł Pindel²

BETONOWE CHŁODNIE KOMINOWE O PODWYŻSZONEJ ODPORNOŚCI NA ŚRODOWISKO KWAŚNE (pH<4)

Od połowy lat osiemdziesiątych XX wieku budowane chłodnie kominowe węglowych bloków energetycznych służą nie tylko chłodzeniu wody technologicznej, ale również odprowadzaniu oczyszczonych i odsiarczonych spalin. Skutkuje to dodatkowym obciążeniem powierzchni betonu wynikającym z agresji siarczanowej. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem było stosowanie powłok ochronnych kwasoodpornych.

Aby zapewnić trwałą ochronę betonu konstrukcyjnego, powłoki chemoodporne muszą być regularnie kontrolowane i odnawiane. Wiąże się to z kosztownymi pracami renowacyjnymi oraz kosztami wynikającymi z czasowego wyłączenia bloku energetycznego z eksploatacji.

W warunkach niemieckich czas remontu i konserwacji bloku energetycznego elektrowni opalanej węglem brunatnym wynosi około 6 tygodni. Czas renowacji powłok chemoodpornych chłodni kominowej o powierzchni wewnętrznej 65.000 m² to około 12 tygodni. Przy kosztach postoju bloku energetycznego wynoszących około 1mln EUR/dzień oznacza to stratę wynoszącą 42 mln EUR wynikającą z przedłużającego się remontu chłodni.

Poszukiwano możliwości uniknięcia tych niedogodności. Wraz z rozwojem technologii produkcji betonów o podwyższonej odporności na środowisko kwasowe stało się możliwe zaprojektowanie, przetestowanie i wdrożenie pod koniec lat dziewięćdziesiątych technologii

¹ mgr inż., MC-Bauchemie Sp.z o.o., Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej

² mgr inż., MC-Bauchemie Sp.z o.o., Stowarzyszenie Producentów Chemii Budowlanej

wznoszenia chłodni kominowych z betonów odpornych na działanie kwasów. Umożliwiło to uniknięcia dodatkowych powłok ochronnych. Zwiększono nieprzerwany remontami czas pracy chłodni kominowej do wartości porównywalnej z żywotnością samego bloku energetycznego.

Elektrownia Neurath, Niemcy

Wymagające przedsięwzięcie, jakim jest budowa nowych elektrowni węglowych wymusza zastosowanie zaawansowanych rozwiązań w zakresie wykonawstwa i technologii betonu. Połączenie sił i kompetencji AlpineBauDeutschland i MC-Bauchemie zaowocowało powstaniem nowatorskiego projektu. Była to budowa dwóch chłodni kominowych dla RWE-Power AG w Neurath koło Grevenbroich (DE)

Budowa ruszyła w 2006 roku i należała do największych w Europie. W szczytowej fazie zatrudniała do 4000 pracowników. Miała zapewnić w 2010 roku 2200 MW energii dostarczonej krajowej sieci energetycznej.

Ponad 2,2 mld EUR miał kosztować koncern RWE-Power projekt „BoA 2&3” czyli „Elektrownia węgla brunatnego o zoptymalizowanej technologii (BoA)”

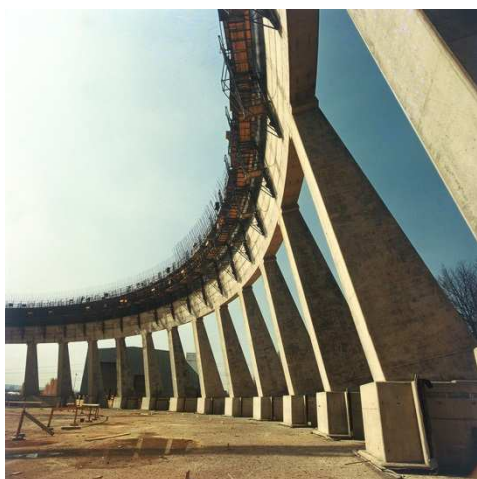
Pierwszy obiekt w technologii BoA powstał w pobliskim Niederaussem. Chłodnia kominowa tej elektrowni wyróżniła się nowatorskimi rozwiązaniami. Powstała tam chłodnia kominowa nowej generacji o niespotykanych dotychczas parametrach. Jej wysokość wynosi 200 m, średnica przy podstawie 145 m. Do 2012 roku była najwyższą chłodnią kominową świata. Przy obiekcie tej wielkości wymagania dotyczące materiałów i technologii wznoszenia są szczególnie wysokie. Został tu, po wszechstronnych badaniach, zastosowany beton wysokiej odporności na agresję kwasową. Jako jeden z niewielu oferentów, firma MC-Bauchemie, jako dostawca produktów na bazie mikrokrzemionki, została zaangażowana w program badawczy i wdrożeniowy przy projekcie.

Po przeszło dziesięciu latach eksploatacji chłodnia kominowa w Niederaussem w znakomitym stanie technicznym i stanowi doskonałą rekomendację dla zastosowania betonów wysokiej jakości do budowy nowoczesnych chłodni kominowych. Sukces tej technologii dał asumpt do jej zastosowania przy budowie obu chłodni kominowych w Neurath.

Budowa

Przy budowie tak odpowiedzialnego obiektu sięgnięto po sprawdzonego wykonawcę. Firma AlpineBauDeutschland od wielu lat buduje chłodnie kominowe. Zapewniło to wysoką jakość prac budowlanych przy zachowaniu napiętego harmonogramu robót. Beton dostarczała wytwórnia betonu zbudowana na placu budowy. Wytwórnia „na miejscu” zapewniała ścisłą kontrolę nad jakością betonu i wpływała na obniżenie kosztów produkcji.

Wznoszenie obu 173-metrowych gigantów przebiegało w technologii deskowań przestawnych. Wbudowano ok. 11 000 m³ betonu kwasoodpornego (SRB) w każdą z chłodni. Po wykonaniu pierścieniowego fundamentu żelbetowego wylano cokoły będące podstawą dla prefabrykowanych żelbetowych słupów. Belki oczepu pierścienia nośnego wykonano również z prefabrykatów i uzupełniono betonem monolitycznym tworząc podstawę płaszcza chłodni. Następnie przystąpiono do montażu specjalnie zaprojektowanego przez AlpineBau szalunku przestawnego na dolnym wieńcu. Samoczynnie, hydraulicznie kroczące rusztowanie dzięki swojej konstrukcji umożliwiło szalowanie odcinków o zmiennych przekrojach. Ramowe poszycie szalunku było przestawiane ręcznie. Wbudowany beton wymagał oddzielenia od kroczącego szalunku. Zapewniło to warunki do wiązania i twardnienia betonu bez wstrząsów i wibracji i chroniło przed powstaniem rys.



Beton betonowi nierówny

Przetarg na obie chłodnie przewidywał zastosowanie betonu o wysokiej odporności na środowisko kwasowe. Pozwoliło to na rezygnację z kosztownego i czasochłonnego wykonania powłok ochronnych wewnątrz płaszcza chłodni. Wyeliminowało również potrzebę koniecznych przerw w eksploatacji potrzebnych na remont powłok chemoodpornych. Bazując na projekcie badawczym Uniwersytetu Technicznego w Berlinie, który sformułował podstawy teoretyczne dla składu betonu opracowano w centrum kompetencyjnym AlpineBau przy współudziale specjalistów z MC-Bauchemie recepturę betonu o podwyższonej odporności na kwasy (SWB)

Tablica 1.Receptura betonu SWB

Skład betonu SWB		
Materiał	Oznaczenie	Ilość (kg/m ³)
cement	CEM I 42,5 R-HS/NA	251
popiół lotny	EFA KM/C	74
Mikrokrzemionka slurry	CentrlitFume S2	8% (c+p)
woda	w/c = 0,40	123
superplastyfikator	MURAPLAST FK 62.30-WT	2,5% (c+p+m)
piasek kwarcowy	0,1-0,6 mm	50
piasek	0-2 mm	623
żwir	2-8 mm	294
żwir	8-16 mm	967

Pierwszą cechą charakteryzującą ten beton jest jego wyjątkowa szczelność. Drugą- przez zastosowanie dobranych spoiw- zapewnienie wysokiej odporności matrycy cementowej na agresywne czynniki zewnętrzne. Dodatkowo wdrożono specjalnie dobrany sposób mieszania i kolejność dozowania składników.

Technologia betonu

Koncepcja nowego betonu opierała się na dwóch zasadach technologicznych. Pierwsza to osiągnięcie najgęstszego upakowania składników mieszanki betonowej. Przesłanką było dążenie do minimalizacji ilości zaczynu cementowego, jako najbardziej podatnego na agresję elementu betonu. Zastosowano równanie *Fullera i Thompsona*

opisujące skład ziarnowy mieszanek zapewniający maksymalne upakowanie poszczególnych frakcji:

$$P=(d/D)^n \times 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

Gdzie:

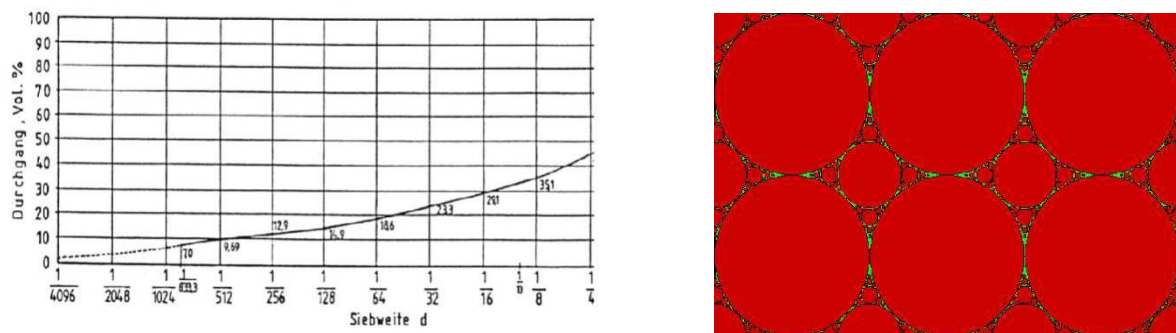
P – sumaryczna ilość kruszywa przechodząca przez sito o średnicy d [%]

D – rozpatrywana frakcja kruszywa o średnicy d [mm]

D – maksymalna średnica frakcji kruszywa w mieszance [mm]

n - parametr opisujący stopień wypełnienia stosu. Dla osiągnięcia maksymalnego upakowania ziaren Fuller i Thomson podają wartość $n=0,5$

Obliczenia przeprowadzono w pełnym zakresie uziarnienia, sięgającym w głąb najdrobniejszych frakcji. Wykres uziarnienia w zakresie drobnych frakcji oraz schemat graficzny przedstawiono na rys. 1



Rys. 1. Wykres uziarnienia drobnych frakcji wg zasady *Fullera & Thompsona*

Drugą zasadą przy projektowaniu betonu było zastosowanie spoiwa w możliwie dużym stopniu odpornego na działanie środowiska kwaśnego. Zastosowany w chłodniach beton SWB zawierał siarczanoodporny cement CEM I 42,5 R-HS/NA. Jako dodatek pucolanowy zastosowano popiół lotny. Dla zapewnienia optymalnej urabialności użyto specjalnie dla tego betonu opracowanego superplastyfikatora PCE Muraplast FK 62.30 WT.

Dla zapewnienia maksymalnej szczelności matrycy cementowej i zapewnienia ciągłości uziarnienie do poziomu „nano” użyto mikrokrzemionki Centrilite Fume S2. Jest to wysoko reaktywna mikrokrzemionka w postaci odpornej na sedymentację zawiesiny. Jej uziarnienie jest 50-100 razy mniejsze niż cementu. Wypełnia ona przestrzenie między ziarnami cementu. W procesie hydratacji cementu dochodzi do reakcji pucolanowej mikrokrzemionki z

występującym w zaczynie wodorotlenkiem wapnia w wyniku czego powstaje uwodniony krzemian wapnia. Następuje uszczelnienie struktury betonu. Jako klasę wytrzymałości przyjęto, po uzgodnieniu z nadzorem i instytutem materiałoznawstwa MBF z Berlina – audytorem zewnętrznym betonu kwasoodpornego, klasę betonu C60/75.

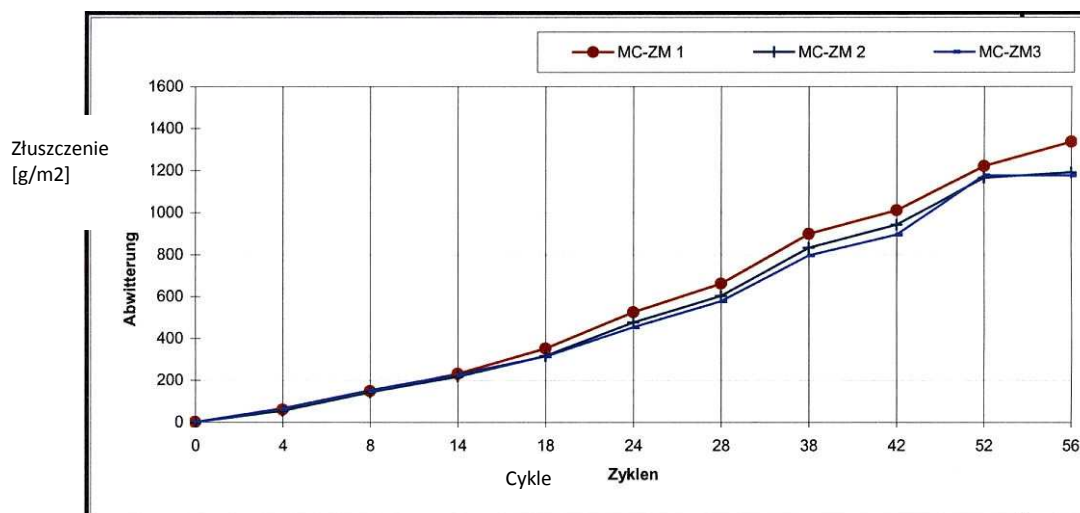
Badania betonu

Badania trwałości betonu i zaprawy przeprowadzono w MPA – Berlin – Brandenburg i Uniwersytecie Technicznym w Berlinie.

- odporność na działanie mrozu i soli odladzających.

Aby uzyskać informację o potencjalnych uszkodzeniach betonu wskutek mikropełnięć matrycy cementowej poddano próbki betonu 56 cyklom zamrażania i rozmrażania w roztworze NaCl.

Badane betony cechowały się wartościami złuszczenia poniżej połowy dopuszczalnej wartości (1500 g/m^2) co świadczy o wysokiej odporności na sole odladzające i szczelności matrycy. (Rys. 2)



Rys.2. Złyżczenie betonu SWB z dodatkami MC-Bauchemie

- porowatość

Porowatość ma znaczny wpływ na szczelność i trwałość betonu. Łączna porowatość to suma objętości wszystkich porów powietrznych w mineralnych składnikach betonu. Beton o

wysokiej szczelności zwykle posiada łączną porowatość w granicach 15%. Beton o wysokich właściwościach, jaki udało się zaprojektować charakteryzował się porowatością na poziomie 10% vol.

- dyfuzja chlorków

Dyfuzja chlorków jest dobrym kryterium opisującym szczelność i oczekiwaną trwałość betonu. Betony wysokowartościowe powinny się charakteryzować współczynnikiem dyfuzji chlorków o wartości poniżej $1 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$. Beton badany osiągał wartości dwukrotnie niższe, na poziomie $0,5 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$

- odporność na działanie kwasu siarkowego

Największym wyzwaniem dla technologów betonu było opracowanie procedury badawczej symulującej agresję kwasową na wewnętrzny płaszcz chłodni.

Skąd bierze się zagrożenie? Jak już wspomniano na wstępie niniejszego opracowania, w nowoczesnych chłodniach kominowych zrezygnowano z kominów spalinowych. Oczyszczone spaliny są kierowane przez czopuchy osadzone w płaszczu chłodni na wysokości ok 50 m. Silna konwekcja unosi spaliny, wraz z parą, wysoko w powietrze.

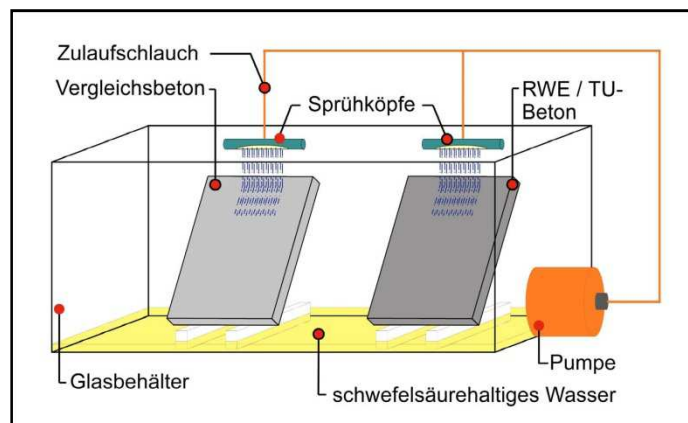
Pomimo odsiarczania, pewna część związków siarki zawartych w spalinach z węgla brunatnego nie zostaje wychwycona. Dwutlenek siarki w połączeniu z wodą z pary wodnej i opadów atmosferycznych tworzy kwas siarkowy.

W przypadku badania agresji kwasowej na betony używane w budownictwie lądowym, komunikacyjnym i komunalnym przeprowadzenie badań symulujących rzeczywistą pracę konstrukcji jest dosyć proste. W przypadku chłodni kominowych, gdzie dochodzi do symultanicznego oddziaływania spalin, wody destylowanej, kwasu, temperatury, mrozu i ultrafioletu rzecz jest o wiele bardziej skomplikowana.

Właściwą procedurę badawczą opracowano w Instytucie Materiałoznawstwa Budowlanego MBA w Berlinie.

Płytki z betonu odpornego na środowisko kwaśne i betonu kontrolnego po zaformowaniu i sezonowaniu umieszczono w komorze klimatycznej, gdzie poddano je 12 tygodniowemu cyklowi starzeniowemu.

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 3.



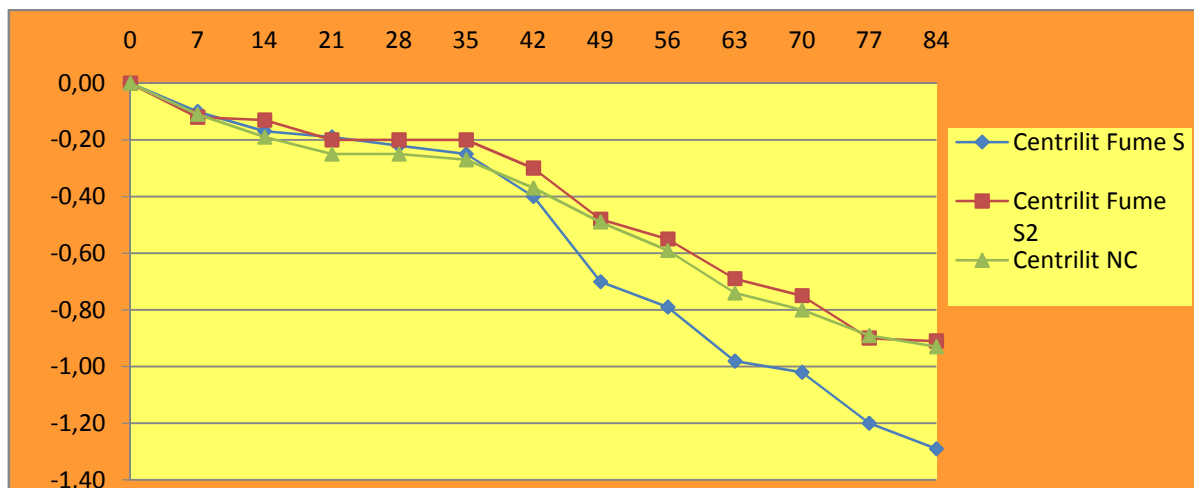
Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego próbek betonu SWB

Próbki przechowywane w roztworze kwasu siarkowego u $\text{pH}=3,5$ co 7 dni były wyjmowane z kąpieli kwasowej, i naprzemiennie zraszane wodą i szczotkowane celem usunięcia zdegradowanego betonu. Dodatkowo próbki były naświetlane promieniowaniem UV symulującym działanie słońca. Każdorazowo określano ubytek masy.



Rys 4. Widok próbek betonu po cyklu badań na odporność kwasową. Z lewej – beton kontrolny, z prawej beton SWB

Rysunek 5 przedstawia wykres procentowego ubytku w czasie masy betonu w zależności od zastosowanego dodatku: klasycznej mikrokrzemionki Centrilite Fume S, modyfikowanej mikrokrzemionki Centrilite Fume S2 i najnowszego dodatku na bazie glinokrzemianów - Centrilite NC.



Rys. 5. Procentowy ubytek w czasie masy betonu w badaniu agresji kwasowej.

Beton badany wykazał się utratą masy w granicach 1%, co klasyfikuje go jako beton wysoce odporny na działanie kwasu siarkowego.

- zasadowość betonu

Aby uzyskać wysoką kwasoodporność, dąży się do przereagowania możliwie dużej ilości występującego w betonie $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do uwodnionych krzemianów wapnia poprzez zastosowania dodatków pucolanowych. Zasadowość reszkowa jest decydująca dla ochrony zbrojenia przed korzją. Zalecana zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to minimum 5%. Betony produkowane z dodatkami pucolanowymi MC-Bauchemie miały zasadowość od 5 do 8% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w masie.

Jakość decyduje

Eksperti od betonu z AlpineBau i MC-Bauchemie zadbali o zapewnienie jakości betonu. Jeszcze przed opuszczeniem zakładu produkcyjnego mikrokrzemionka i superplastyfikator zostały przebadane w laboratorium zakładowym zgodnie z procedurami ISO 9001. Kolejne badania prowadzono na bieżąco w mobilnym laboratorium AlpineBau na budowie.

Na podstawie badań wytrzymałościowych na bieżąco sprawdzano, czy parametry betonu odpowiadają obowiązującym normom. Każda szarża towaru była szczegółowo sprawdzana w

centrum kompetencyjnym materiałów i technologii AlpineBau. Zgodnie z wytycznymi procedur jakościowych pobrano następujące próbki materiałowe:

- 215 próbek cementu
- 70 próbek popiołu lotnego
- 250 próbek mikrokrzemionki
- 150 próbek superplastyfikatora
- 100 próbek kruszyw

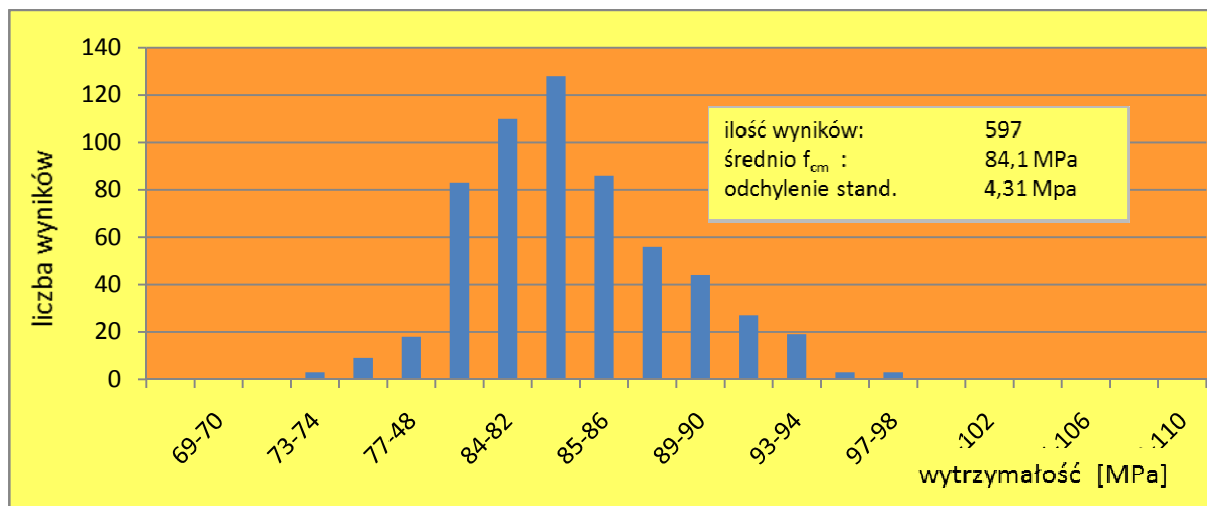
Do badań wytrzymałościowych użyto ok. 2000 próbek betonu.

Badanie świeżego betonu

Podstawowym wymogiem dla zachowania właściwej jakości betonu było utrzymanie praktycznie niezmienniej konsystencji betonu w całym okresie jego urabialności, tzn. w czasie 60 minut. Z powodu swojego specyficznego składu beton SWB był szczególnie czuły na warunki otoczenia a szczególnie na wahania ilości wody. Wymagało to wdrożenia ścisłego systemu zapewnienia jakości. Polegał on między innymi na badaniu konsystencji w ściśle określonych interwałach czasowych na stoliku rozplýwowym, pomiarach temperatury powietrza i betonu, zawartości wody i umożliwiała błyskawiczną reakcję na wahania parametrów.

Badania stwardniałego betonu

Minimalna wytrzymałość betonu umożliwiająca przestawienie szalunków to 14 MPa po 24h. Wytrzymałość tą osiągnęto w każdych warunkach, również w obniżonych temperaturach. Projektowana klasa betonu - C60/75. Na rys. 6 przedstawiono graficznie i statystycznie wytrzymałość 28-dniową. Odchylenie standardowe wyników wytrzymałościowych wyniosło $\sigma=4,31$ MPa. Tak niskie rozproszenie wyników świadczy o wysokiej jednorodności betonu.



Rys 6. Statystyka wytrzymałości 28-dniowej na ściskanie betonu SWB

Oprócz standardowych badań jedno- i dwudziestoosmiodniowych przeprowadzono również badania wytrzymałości po 2, 7, 56, 90, 180 i 360 dniach. Celem było określenie rozwoju wytrzymałości oraz ocena oczekiwanego poziomu późnej wytrzymałości. Niewielki wzrost wytrzymałości po normowym 28-dniowym okresie oceniono jako bardzo korzystny dla pracy konstrukcji.

Statystyka wytrzymałości na ściskanie								
parametr	1d	2d	7d	28d	56d	90d	180d	360d
minimum [Mpa]	5,0	17,0	35,0	73,0	79,0	79,0	78,5	79,0
maksimum [Mpa]	32,0	47,0	79,0	99,0	99,0	100,0	96,5	95,0
średnio [Mpa]	19,2	33,1	59,1	84,1	86,5	87,8	86,0	85,4
odchylenie stand. [Mpa]	4,83	5,77	10,72	4,31	5,16	5,74	5,35	4,27

Rys. 7. Rozwój wytrzymałości betonu SWB w czasie.

Moduł sprężystości i wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

W ramach procedur kontroli jakości określono moduł sprężystości betonu oraz wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu.

parametr	wytrzymałość na rozłupywanie [MPa]	moduł sprężystości [MPa]
minimum [MPa]	3,15	37400
maksimum [MPa]	5,05	51700
średnio [MPa]	4,04	46145

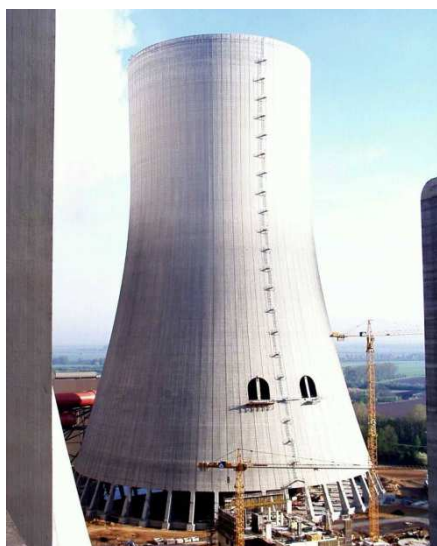
Rys 8. Wytrzymałość na rozłupywanie i moduł sprężystości betonu SWB

Kompetencje w budowie chłodni kominowych

Dodatkową ciekawostką jest, że również kanały transportujące i odprowadzające wodę, a także ruszty rozbryzgowe wykonane zostały z betonu o wysokiej odporności na kwasy. Elementy prefabrykowane z betonu SWB wykonała firma RekersBetonwerkSpelle. Domieszki i dodatki wyprodukowano w MC-Bauchemie GmbH.

Każda z dwóch bliźniaczych wież osiągnęła wysokość 173 m. Średnica płaszczka u podstawy to 120 m, w talii 66 m, w szczycie 70 m.

Dzięki współpracy wykonawcy z technologami stało się możliwe zrealizowanie tej nowatorskiej inwestycji z powodzeniem i w terminie.



Literatura

- [1] Frank Stengel, MC-Bauchemie „Kuehlturmbau – Projektreport”
- [2] Dr Thomas Sieber, MC-Bauchemie „Concrete technology for high-performance concrete – concrete with high resistance against sulphuric acid attack”