

# Zbiorniki z betonu sprężonego do przechowywania LNG

Tadeusz J. Marchaj

## 1. FAKTY DOTYCZĄCE BETONU W HISTORII CYWILIZACJI.

Odkrycie fenomenu, że wypalane wapno zmieszane z wodą może stworzyć cement, zostało dokonane bardzo dawno i prawdopodobnie jak inne odkrycia było wynikiem przypadku. Taki surowy cement wapienny był w użyciu w okresie przed trzema tysiącami lat naszej ery, a być może nawet wcześniej. Wypalany gips był używany w zaprawach, gdy były budowane piramidy w Gizie. Starożytni Rzymianie, konstruktorzy wielkich budowli, byli pierwszymi, którzy używali wypalane wapno mieszane z kruszywem dodawanym do betonu. Następnym udoskonaleniem mieszanek betonowych było dodawanie pozzolanu, skruszonej do stanu proszku skały wulkanicznej. Jako domieszka do betonu została użyta około pierwszego wieku A.D. W 122 roku naszej ery, wielki architekt Cesarz Hadrian, który zbudował mur nazwany jego imieniem

– Mur Hadriana, stojący po dziś dzień na granicy Szkocji. Jego ukoronowaniem w architektonicznych budowach wykonanych w betonie jest sławna kopuła Panteonu w Rzymie. Nawet teraz, po prawie dwóch tysiącach lat, wielka kopuła jest jeszcze największą tego typu budowlą w świecie, o rozpiętości 43,3 m, większa nawet od kopuły nad katedrą Świętego Piotra.

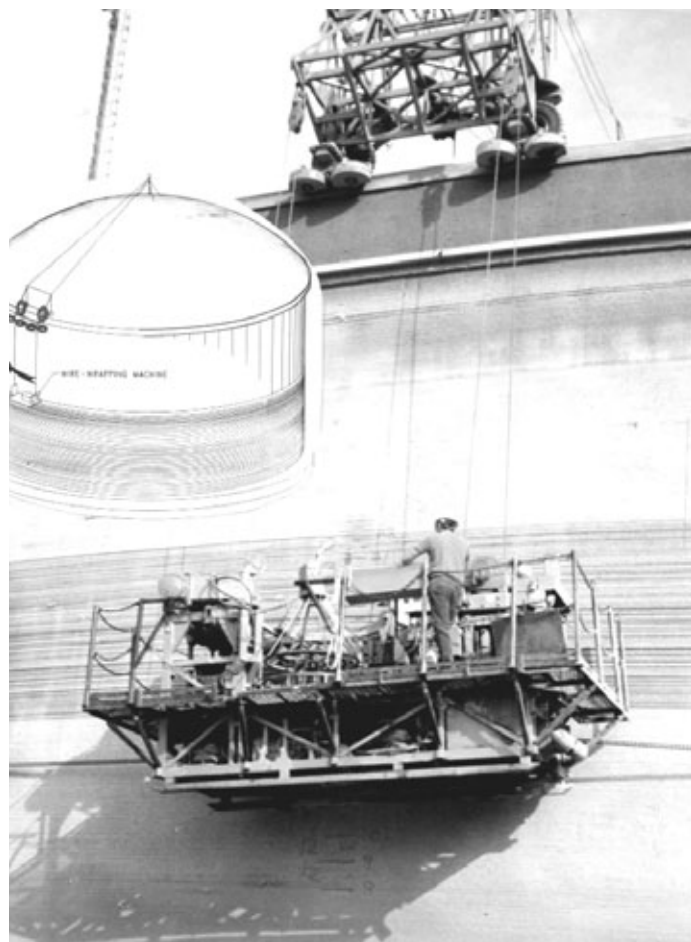
Większość dorobku w dziedzinie betonu u starożytnych Rzymian przeminęło wraz z upadkiem Rzymskiego Imperium. Przez następnych 1500 lat, nie było żadnego postępu w użyciu i rozwoju betonu, który naukowo ponownie został odkryty w XVI wieku przez Philiberta de L'orme. Wydane przez niego specyfikacje betonu uszeregowane według składników mieszanki stały się znowu kamieniem milowym w postępie rozwoju betonu.

W osiemnastym wieku chemia betonu została poznana i lepiej zrozumiana, jak również wiele eksperymentów zostało przeprowadzonych, aby poznać naturę cementu.

W początku dziewiętnastego wieku został wydany pierwszy patent dla Joseph'a Aspdin na nowy proces produkcji cementu Portland. Był to początek istnienia cementu Portland, takim, jakim go znamy dzisiaj na całym świecie. Oczywiście ten XIX-wieczny Portland cement nie był dokładnie tym, co jest znane obecnie jako Portland cement. Znamienne udoskonalenia zostały wprowadzone w zakresie jego wytrzymałości jak również odporności na zniszczenie oraz różnorodność typów cementu. Przez standaryzację jego produkcji cement stał się bardzo znanym i odpowiedzialnym elementem betonu.

Do połowy dziewiętnastego wieku, concrete jako materiał był używany tylko, gdy strukturalne rozwiązanie wymagało wysokiej odporności na naciski (łuki, kopuły, fundamenty, ściany). W tym czasie, francuski farmer Joseph Louis Lambot wymyślił ideę: połączenie stali z betonem, aby osiągnąć możliwości pracy betonu w zakresie przenoszenia naprężeń na rozciąganie. Stało się to początkiem ery betonu zbrojonego. Jest w tym coś fascynującego, dowiedzieć się, że pierwsze zastosowanie tego pomysłu zostało użyte w budowie betonowej łodzi używanej na małym jeziorze we Francji. W niedługim czasie po tym, nowa era się rozpoczęła – era betonu sprężonego.

Pomimo tego, że idea żelaznej obręczy opasującej drewniane beczki była znana od wieków, współczesna wiedza o sprężonym betonie była wynikiem wysiłków i doświadczeń wielkiej liczby inżynierów i naukowców w ciągu ostatnich osiemdziesięciu lat. Część z nich brała udział w rozwoju betonu sprężonego przez rozwiązywanie tylko problemów technicznych. Część dała nam podstawową wiedzę o istocie fenomenu betonu sprężonego.



Rys 1. Nawijarka karuzelowa 401

Jest bardzo właściwie wspomnieć takie nazwiska jak: **R.H.Dill** z Aleksandrii, Nebraska (USA), który w latach 1923-1925 po raz pierwszy zaproponował budowanie betonowych belek wolnych od naprężeń rozciągających, używając wysoko-wartościowych na rozciągane stalowych drutów w betonie, po osiągnięciu przez niego wymaganej dojrzałości. (Idea post-tensioning).

**R.E. Freyssinet** i **Jean Seailles**, Neuilly-sur-Seine koło Paryża, którzy w 1928 roku złożyli wnioski na patenty rozważające użycie wstępnie rozciągniętych prostych prętów przed umieszczeniem betonu wokół nich. (Idea pre-tensioning).

**Freyssinet był pierwszym**, który posiadał jasny pogląd na:

- Różną rolę stali i betonu w betonie sprężonym,
- potrzebę używania wysoko-wartościowego betonu,
- potrzebę używania wysoko-wartościowej stali do sprężania (8000 kg/cm<sup>2</sup> do 10000 kg/cm<sup>2</sup>).
- straty w sprężaniu na skutek kurczenia się betonu i jego pełnienia.

F. Dischinger, Berlin, który w 1939 r. opublikował swoją podstawową i wartościową rozprawę matematyczną na temat efektu czasu na kurczenie się betonu i jego pełnienia. Pierwsze zastosowanie sprężonego betonu w budowie zbiorników na ciecze zostało wykonane w 1922 roku przez **W.H. Hewetta** z Minneapolis, USA, który wyeliminował rozciąganie w ścianach zbiornika przez użycie rozciągniętych stalowych prętów opasujących zbiornik.

W 1948 roku **PRELOAD COMPANY** z Nowego Yorku zbudowała maszynę do nawijania na ścianach zbiornika drutów stalowych będących w stanie silnego naciągu. W ciągu następnych lat maszyna (zwana popularnie „karuzelówką”) uczyniła triumfalny postęp we wszystkich częściach świata. Jej praca polega na tym, że stalowy drut wprowadza się w stan wysokiego naprężenia w czasie operacji „przeciągania”go przez kalibrowane „oczko” ze spieków ceramicznych. Średnica „oczka” musi być o tyle mniejsza, aby siła potrzebna do przeciągania, była wymagana siłą napięcia w stalowym drucie.

W roku 1990 **PRELOAD CO.** wprowadziła do użytku zmodernizowaną karuzelówkę „różnicową”. Konstruktorzy: B. Busch, T. Marchaj i A. Tripp użyli całkiem nową ideę. Praca tych maszyn polega na zasadzie, że długość wypuszczanego drutu stalowego z kół napinających, jest mniejsza od drogi przebytej przez maszynę. Ta różnica musi być skompensowana wydłużeniem drutu stalowego, a co za tym idzie, napięciem i siłą w drucie. Karuzelówka, może opasać zbiornik drutami pokrytym plastykiem.

Pokrycie plastykiem może zabezpieczyć drut przed korozją.

Użycie karuzelówek zostało szeroko zastosowane w budowie zbiorników ulokowanych nad i poniżej poziomu gruntu. W okresie ich używania projekty, technologia i konsekwentnie standardy i kody dla budowania zbiorników do przechowywania cieczy zostały wprowadzone do użytku.

Potrzeba budowy zbiorników z betonu sprężonego dla cieczy kriogenicznych pojawiła się jako rezultat szerokiej akcji badawczej po słynnej katastrofie zbiorników na LNG w Cleveland w 1944 roku, gdy metalowy zbiornik wykonany z 3,5% stali Ni, pękł, bez definitywnie ustalonych powodów. Poważne ofiary w ludziach i olbrzymie straty materialne zatrzymały rozwój zbiorników metalowych na minimum 15 lat, ale doprowadził do zebrania danych potrzebnych do selekcji odpowiednich materiałów pracujących w bardzo niskich temperaturach. W wyniku tych poszukiwań beton sprężony uznany został jako jeden z materiałów nadających się doskonale do użycia w budowie zbiorników do przechowywania cieczy kriogenicznych.

Pierwszy zbiornik do przechowywania skroplonych gazów (ciekły tlen) został zbudowany dla Linde Co. w Chicago przy współpracy z Preload Company w 1952 roku.

Tablica 1 Gazowe Terminale dla skroplonych gazów, zaprojektowane i skonstruowane przez PRELOAD COMPANY jako zbiorniki z betonu sprężonego.

Location	Owner	Year of completion	Type	Nature of product	No. of tanks	Storage capacity per tank
Chicago, USA	Union Carbide	1952	Storage tank	liquid oxygen	1	2 650 m <sup>3</sup>
Nantes, France	Gaz de France	1961	Storage tank	LNG	1	2 000 m <sup>3</sup>
Barcelona, Spain	Enagas S.A.	1969	Storage tank	LNG	2	40 000 m <sup>3</sup>
Philadelphia, USA	Philadelphia Electric Co.	1972	Dike	LNG	1	63 000 m <sup>3</sup>
Buzzards Bay Mass, USA	Buzzards Bay	1973	Storage tank	LNG	1	8 700 m <sup>3</sup>
Philadelphia, USA	Philadelphia Gas Works	1974	Storage tank	LNG	2	92 500 m <sup>3</sup>
Billingham Durham England	I.C.I. Ltd.	1974	Dike	Ammonia	3	18 000 m <sup>3</sup>
Belfast, North Ireland	Richardsons Fertilizers Ltd. I.C.I.	1974	Dike	Ammonia	1	4 500 m <sup>3</sup>
Cork-Eire, South Ireland	Nitrigin Eirean Teoranta	1975	Dike	Ammonia	1	18 000 m <sup>3</sup>
		1975	Dike	Propane	1	18 000 m <sup>3</sup>
New York, USA	Distrigas N.Y.	1975	Storage tank	LNG	2	143 000 m <sup>3</sup>
Cumberland R.I., USA	Valley Gas Co.	1975	Storage tank	LNG	1	4 000 m <sup>3</sup>
Winnipeg, Canada	Greater Winipeg Gas Co.	1975	Storage tank	LPG	1	40 000 m <sup>3</sup>
Avon County, England	British Gas Ltd.	1975	Dike	LNG	1	69 250 m <sup>3</sup>
Avon County, England	British Gas Ltd.	1975	Dike	LNG	1	58 900 m <sup>3</sup>
Seal Sands, England	Monsanto Ltd.	1977	Dike	Ammonia	1	18 000 m <sup>3</sup>
Billingham Durham, England	I.C.I. Ltd.	1977	Dike	Ethylene	1	14 000 m <sup>3</sup>
Geleen, Holland	DSM (Dutch State Mines)	1977	Dike	Butane	1	6 000 m <sup>3</sup>
Geleen, Holland	DSM (Dutch State Mines)	1977	Dike	Ethylene	1	11 000 m <sup>3</sup>
Barcelona, Spain	Enagas S.A.	1978	Storage tank	LNG	1	80 000 m <sup>3</sup>
Rozenburg, Holland	I.C.I. Ltd.	1978	Dike	Propylene	1	4 000 m <sup>3</sup>
Avon County, England	British Gas Ltd.	1978	Dike	LNG	1	58 900 m <sup>3</sup>

## 2. SYSTEMY ZBIORNIKÓW Z BETONU SPRĘŻONEGO.

Technologia zbiorników z betonu sprężonego do przechowywania LNG ma swoją historię. Szczególnie rozwiązania pewnych zbiorników lub tylko ich elementów, są tylko odbiciem nowych zadań dla projektantów i konstruktorów, a wymaganych przez właścicieli lub regulujące władze. Rozwiązania bezpieczeństwa dotyczące lokalizacji i operowania zakładów LNG, ocena przeprowadzonych testów i raporty dostarczone przez Instytucje działające w zakresie procesów gazowych, bardzo często mają pierwszeństwo przed oceną ekonomiczną projektów. Projektowanie i technologia budowy są dostępne do wykonania zmian, aby zmniejszyć potencjalnie istniejące niebezpieczeństwo wypadków.

Poniżej podane zostaną rozwiązania dotyczące współczesnych zbiorników z betonu sprężonego na ciecze kriogeniczne wraz z oceną bezpieczeństwa konceptu projektu. Podczas, gdy nie ma tak wiele zbiorników z betonu sprężonego w porównaniu z ilością metalowych zbiorników, to jednak przyczyną tego stanu, jest nie techniczne odrzucenie koncepcji betonu sprężonego, lecz po prostu była to kwestia ich ceny. Zbiorniki z betonu sprężonego nie były konkurencyjne ekonomicznie, do momentu rozważania ich bezpieczeństwa, w krytycznych momentach ich używania.

Niedostatek stali stopowych oraz szybki wzrost ich cen, rozsądny krytycyzm wymagań bezpieczeństwa poważnie zmienił stosunek kosztu zbiorników metalowych do zbiorników z betonu sprężonego. Konsekwencją tego jest to, że obecnie zbiorniki z betonu sprężonego są konkurencyjne ekonomicznie w porównaniu ze zbiornikami stalowymi.

Pierwszy zbiornik do przechowywania skroplonego tlenu został zbudowany w 1952 roku koło Pittsburga w USA o pojemności 1000 m<sup>3</sup> (prototyp) oraz drugi w 1954 roku w Chicago o pojemności 2650 m<sup>3</sup>. Obydwa zbiorniki zostały użyte przez Linde Company dla przechowywania skroplonego tlenu w jej zakładach produkcyjnych.

Skroplony tlen, może istnieć pod normalnym ciśnieniem, w temperaturze -183°C. Jako gaz jest niepalny, lecz ze względu na jego chemiczną aktywność: jest bardzo niebezpieczny w przechowywaniu (podsycy palenie). Poważne eksplozje i wielkie pożary były spowodowane w rezultacie zaniedbań w rygorystycznym stosowaniu przepisów.

Pierwszy 1000 m<sup>3</sup> zbiornik, składa się z zewnętrznej ściany z betonu sprężonego, oraz płaskiej podłogi i pokrywającej kopuły z betonu zbrojonego. Wewnętrzny zbiornik jest również zbudowany jako zbiornik z betonu sprężonego pokryty betonową kopułą. Cienka podłoga ze stali s/s spoczywa na betonowej podłodze pokrytej izolacją (foam-glass).

Ściany zbiorników nie miały żadnych płyt stalowych uszczelniających możliwe przenikanie tlenu (gazowego).

Cylindryczna ściana wewnętrzna spoczywa na płytach: grafitowo-azbestowych i jest wolna do przesunięć na wspierającym pierścieniu fundamentowym.

Właściwe sprężenie betonu: obwodowe oraz pionowe zabezpiecza ścianę przed wszystkimi możliwymi naprę-

żeniami rozciągającymi, które mogą się pojawić w czasie: schładzania (cool-down), normalnych warunków przechowywania, oraz odgrzewania zbiornika (warm-up).

Cylindryczna ściana została sprężona obwodowo przez nawinięcie na niej 4,1 mm średnicy, na zimno przeciąganego drutu stalowego przy napięciu wytwarzającym jego rozciąganie o wartości 10000 kg/cm<sup>2</sup> (naprężenie do 18000 kg/cm<sup>2</sup>) wprowadzone w drut przez przeciągnięcie go przez oczko o średnicy 3,6 mm. Sprężenie pionowe zostało wykonane przez 12 drutów o średnicy 5 mm usytuowanych w odstępach 120 cm i naciąganych po ośmiu dniach od umieszczeniu betonu w formach ściany.

Zbudowanie zbiorników było kulminacją pionierskich wysiłków, pełnych testów i projektów z udanym zakończeniem po prawie czterech latach. Zbiornik z betonu sprężonego (przy użyciu drutów ze stali węglowej) osiągnął z pełnym powodzeniem temperaturę przechowywania -183°C.

Około sześć lat potem w Styczniu 1959 roku, American Gas Association rozpoczął projekt: „Prestressed Concrete Tanks for LNG”, który został wykonany w Instytucie Gas Technology przez Preload Company. Projekt w detalu został wykonany po przeprowadzonych eksperymentach oraz testach w laboratoriach. Zachowanie się zbiornika zarówno w warunkach różnych temperatur jak i różnych obciążeń było zadawalające i zgodne z przewidywaniami.

Zebrane dane i osiągnięcia znajomość problemów pozwoliła rozpocząć budowę zbiorników z betonu sprężonego w skali przemysłowej. Koszt zbudowanego przez AGA zbiornika eksperymentalnego został pokryty przez szereg gwarantów łącznie z Gaz de France oraz Sahara Gas (S.E.G.A.N.S.).

W następstwie tego, **GAZ de FRANCE** we współpracy z **PRELOAD COMPANY** zbudował 2000 m<sup>3</sup> zbiornik na LNG w Nantes (France).

Zbiornik był konstrukcją dwuskorupową. Wewnętrzny zbiornik to kesonowa konstrukcja ze sklejki drewnianej pokrytej od strony wewnętrznej 0,5 mm grubości szczelną membraną z metalu Invar-u, zbiornik zewnętrzny był zbiornikiem z betonu sprężonego, którego strona wewnętrzna była w kontakcie z kesonami wypełnionymi perlitem. Ściana zewnętrzna (jak i cały zbiornik) spoczywał na fundamentowej płycie betonowej podpartej na palach betonowych. Ciśnienie płynu w zbiorniku było przejmowane przez obwodowe sprężenie zbiornika drutami chronionymi przez pneumatycznie natryskiwany torkret. Naprężenia w ścianie powodowane przez gradient temperatury w poprzek ściany jak również momenty gnące w ścianę na skutek sił tnących u podstawy ściany, jak i kopuły, były równoważone przez pionowe sprężenie ściany.

Kopuła zbiornika wykonana została z betonu zbrojonego. Testy tego zbiornika zostały przeprowadzone 1968 roku i zakończyły się sukcesem. Procedura testu i końcowe efekty stały się sławne wśród ludzi kompanii, którzy brali udział w projekcie tego zbiornika. Test tolerował wlanie ciekłego azotu do zbiornika, który nie miał zainstalowanego systemu

cieplnej izolacji, a temperatura ścian i podłogi, była normalną temperaturą otoczenia. Tak więc zbiornik był obiektem nagłej zmiany temperatury około 220°C. Trudno sobie wyobrazić gorsze warunki schładzania jak w tej akcji. Gradient temperatury w poprzek podłogi osiągnął 4°C/cm. Dolna część ściany musiała przyjąć gradient temperatury 8,5°C/cm, na skutek wyższej temperatury otoczenia. Bardzo małe pęknięcia rozwinęły się w podłodze, które potem zamknęły się, podczas gdy w ścianie, pęknięcia wcale się nie pojawiły.

Budowa dwóch zbiorników o pojemności 40000 m<sup>3</sup> każdy, rozpoczęła się w Marcu 1967 roku w Barcelonie (Hiszpania) dla **ENAGAS S.A.** Były to zbiorniki składające się z wewnętrznych ścian z betonu sprężonego oraz ze zbrojonej betonowej kopuły. Zewnętrzna ściana oraz pokrycie kopuły betonowej było ze stali węglowej. Przestrzeń pomiędzy ścianami (beton sprężony i ściana stalowa) została wypełniona perlitem, jak również przestrzeń pomiędzy kopułami: betonową i stalową.

Podłoga wewnętrzna została wykonana ze stali 9% Ni spoczywającej na izolacji piankowej PCV i zbrojonym betonowym fundamencie. Zewnętrzna podłoga została wykonana ze stali węglowej. Wewnętrzna ściana (beton sprężony) w czasie schładzania zbiornika jest wolna do przesunięcia się i dlatego spoczywa na płytkach grafitowo-azbestowych. Wewnętrzna podłoga jest połączona ze ścianą wewnętrzną przy użyciu zdeformowanej części podłogi w kształcie pętli. Ściana wewnętrzna jest pokryta płytą ze stali węglowej, w dolnej części ze stali 9% Ni.

Jest warto wspomnieć w tym momencie, że zbiorniki te zostały zbudowane, spełniając warunki bezpieczeństwa wymagane ówczesnie; lecz ekonomicznie były tańsze od zbiorników całkowicie metalowych.

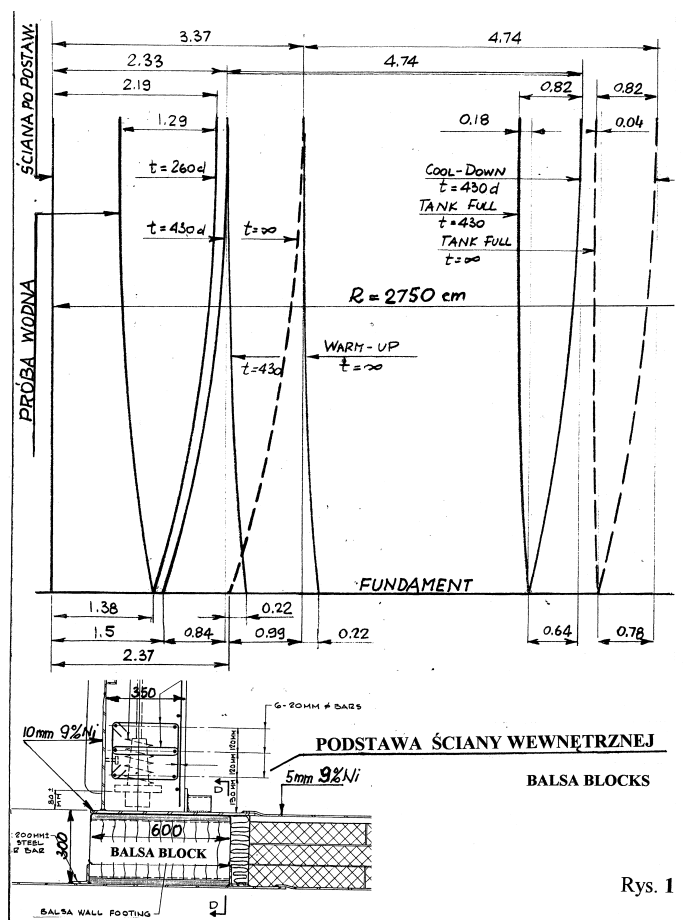
W Marcu 1973 roku rozpoczęła się budowa w Philadelphii dwóch zbiorników dla **PHILADELPHIA GAS WORKS** o pojemności 92500 m<sup>3</sup> każdy. Kontraktorem była Walsh Company zaś projektantem Preload Technology. Wybór warunków projektu był dyktowany przez Philadelphia Gas Commission – PGW ciało rządzące. Bardzo specyficzne wymagania dla projektu były wynikiem warunków w otoczeniu, w którym zbiorniki miały być budowane.

Fundamenty zbiornika zostały umiejscowione na 2200-tu palach każdy, ponieważ podłoże w obrębie zbiorników tego wymagało. Przed umieszczeniem płyty fundamentowej, rury plastikowe o średnicy 5 cm zostały umieszczone w glebie dla zastosowania systemu ogrzewania fundamentów przy użyciu gorącej cieczy. Wysoce korozyjna natura gleby nie pozwalała na zastosowanie metalowych rur dla instalacji przewodów elektrycznych do ogrzewania.

Wewnętrzny zbiornik jest 70 metrowej średnicy ścianą z betonu sprężonego: obwodowo i pionowo, spoczywającą na betonowych płytach fundamentowych, które z kolei spoczywają na izolacji cieplnej ze styropianu. Ten sam materiał jest umieszczony pod całą podłogą ze stali 9% Ni. Wewnętrzna kopuła została zbudowana z betonu zbrojonego.

Zewnętrzna ściana ochronna składa się z 8 mm płyty ze stali węglowej jako bariery gazowej oraz 3 m szerokiej ściany ochronnej z betonu chudego i obwodowo oraz pionowo sprężonej ściany betonowej 0,32 m szerokiej u podstawy i 0,18 m szerokiej u wierzchołka. Ściana ochronna jest 0,6 m wyższa od normalnego poziomu płynu na wysokości 24 m od podstawy w zbiorniku. Zewnętrzna stalowa kopuła jest oparta na drewnianych słupkach wspartych na betonowej wewnętrznej kopule. Metalowa kopuła spoczywająca na słupkach, traci z nimi kontakt, gdy ciśnienie w zbiorniku wrasta do wielkości 0.07 kg/cm<sup>2</sup>. Przy wyższych ciśnieniach metalowa kopuła pracuje jak membrana. Dlatego pierścień kompresyjny jest umieszczony na peryferiach metalowej kopuły.

Zewnętrzna płyta podłogowa jest ze stali węglowej grubości 5 mm. Izolacją cieplną ściany oraz kopuły jest warstwa perlitu szerokości 1,2 m. Aby zapobiec powstawaniu zbyt wielkich momentów gnących przy podstawie ściany, w momencie operacji schładzania lub przy normalnych zmianach poziomu płynu w zbiorniku lub jego odgrzewania, ściana spoczywa na płytkach pokrytych teflonem dla zmniejszenia tarcia. Pionowo sprężone betonowe panele ściany zbiornika, były prefabrykowane z dala od zbiornika, dostarczane na miejsce i ustawiane przy użyciu dźwigu. Panele



Rys 2. Przesunięcia ściany wewnętrznej

Rys. 1

były potem łączone razem za pomocą spawania końców prętów zbrojenia. Przestrzeń pomiędzy panelami wypełniona była wysokiej jakości betonem. Odstępy między panelami w czasie ich montażu były szerokości 0,20 m przy typowej szerokości paneli 2,5 m. Ściana wewnętrzna miała na zewnętrznej stronie umieszczoną płytę ze stali węglowej grubości 5 mm (zwanej po angielsku – liner). Płytki zamykające połączenie paneli były spawane na zewnętrznej stronie 5 mm płyty zewnętrznej. Płyta zewnętrzna do wysokości 0,6 m przy podstawie była ze stali 9% Ni. i była przyspawana do płyty podłogowej wewnętrznej ze stali 9% Ni. Po zakończeniu ustawiania oraz spawania połączeń paneli, ściany zostały obwodowo sprężone drutami i pokryte pneumatycznie natryskiwanym torkretem. Ostatnia warstwa torkretu była grubości 2 cm na ostatniej warstwie sprężających drutów.

W celu przeprowadzenia operacji schładzania, zbiornik został wyposażony w system wtryskiwaczy umieszczonych na elastycznych przewodach podwieszonych pod izolacyjnym sufitem. Zgodnie z programem schładzania przez wtryskiwacze na początku schładzania dostarczany był ciekły azot a potem LNG w ilościach zgodnych z programem.

Wszystkie przewody rurowe przechodzące przez skorupę zbiornika umieszczone zostały w kopule stalowej zbiornika. Na wypadek nieprzewidywanego wycieku LNG z przewodów nad stalową kopułą, była ona chroniona przez aluminiowe rynny skierowujące wyciek przez przewody do specjalnego basenu, zbudowanego do tego celu na poziomie gruntu zbiornika. Pojemność basenu była obliczona na 10 minutowy wyciek przy wszystkich pracujących pompach napełniających zbiornik.

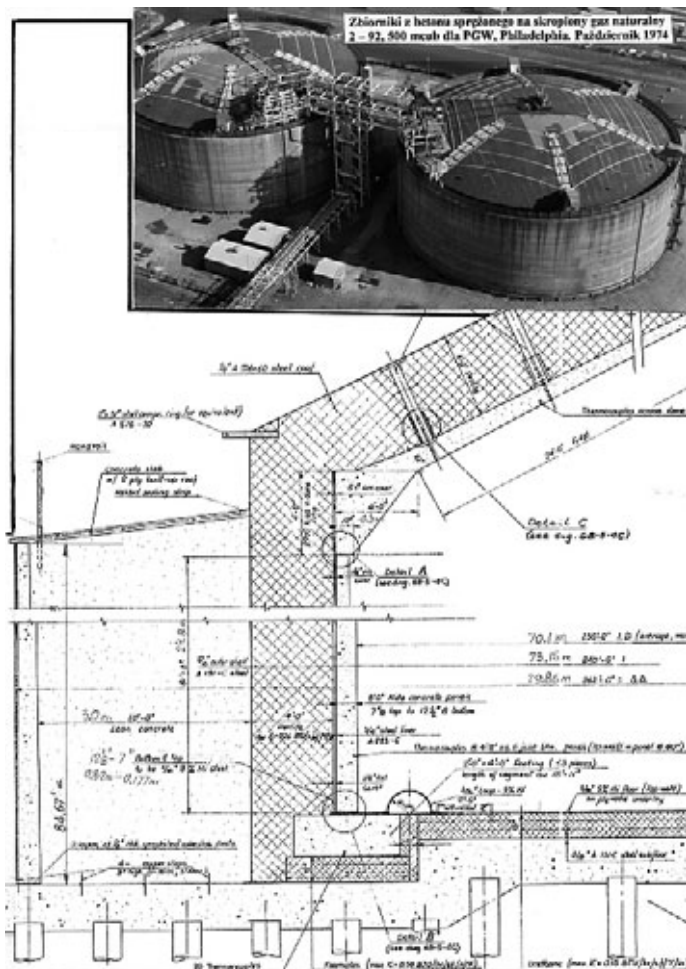
Zbiorniki są chronione na wypadek pożaru przez bardzo złożony system gaśniczy, składający się z suchego proszku oraz ekspandującej piany, uruchamiany automatycznie przez gaz, ultrafioletowe promieniowanie lub ręcznie.

Dla kontroli operacji wymiany gazów w zbiorniku (purgig operation), zbiorniki wyposażone są w małej średnicy rury, w systemie izolacji podłogowej i przestrzeni wypełnionej perlitem. Dla kontroli operacji schładzania, użyty został system termopar, umieszczonych w krytycznych punktach zbiornika, a odczyty dokonywano w pomieszczeniu kontrolnym.

Dwa zbiorniki o pojemności 143 000 m<sup>3</sup> każdy, dla **Gas Terminal Distrigas** na Staten Island w Nowym Yorku zostały zbudowane w Kwietniu 1974 roku. Obydwa były gotowe do schładzania od tego czasu. Zbiorniki były gotowe w stanie mechanicznej akceptacji, włącznie z próbami wodnymi oraz próbami ciśnienia powietrza w zbiornikach.

Cabot Corporation, właściciel Distrigas zorganizował specjalny komitet, aby dokonać przeglądu różnych wariantów projektu, dostarczonych dla tego celu przed końcową decyzją. Komitet składał się z inżynierów konsultantów ze Stanów Zjednoczonych, którzy reprezentowali wszystkie dyscypliny techniczne biorąc pod uwagę specyfikę projektu.

Zbiorniki posiadały ściany z betonu sprężonego: pierwsza składana z paneli prefabrykowanych, o średnicy



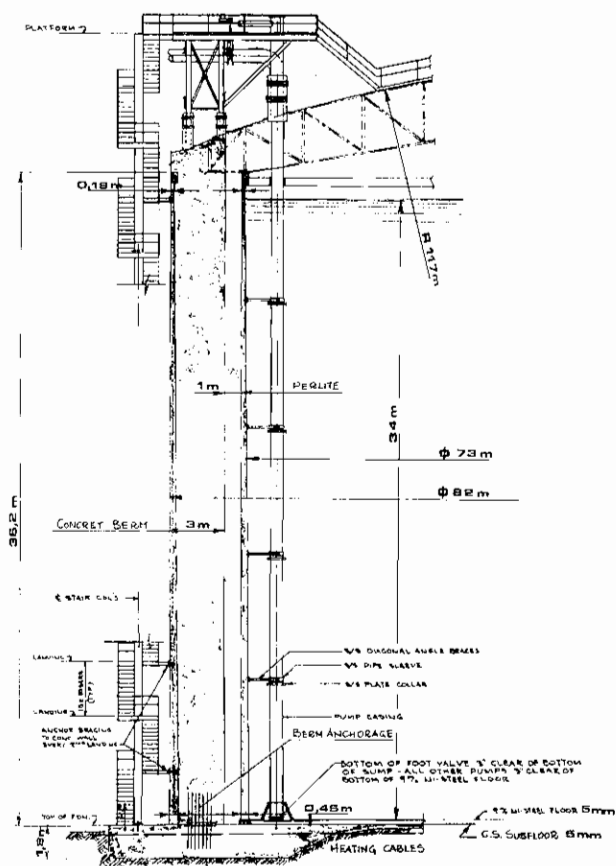
Rys 3. Zbiorniki z betonu sprężonego

wewnętrznej 82 m i grubości 0,45 m u podstawy oraz 0,18 m u wierzchołka, druga ściana jest z betonu świeżego układanego (cast in place) w kontakcie ze ścianą pierwszą oraz ścianą trzecią składaną z paneli o średnicy wewnętrznej 73 m i grubości 0,45 m u podstawy oraz 0,18 m u wierzchołka.

Ściana trzecia jest zewnętrzną formą dla ściany drugiej. Trzecia ściana (zbudowana z paneli) i druga ściana ze świeżego betonu, razem tworzą ścianę ochronną o łącznej szerokości 3 m.

Przestrzeń pomiędzy ścianą ochronną i ścianą trzecią jest 1 m szeroka i została wypełniona perlitem (izolacja termiczna).

Ściana pierwsza zbudowana z paneli spoczywa na blokach z drzewa balsa chronionych przez fiberglass i pokryty teflonem, w celu zmniejszenia sił tarcia, które może się rozwinąć w okresie sprężania ściany oraz przy wszystkich zmianach temperatury ściany w czasie schładzania lub odgrzewania zbiornika. Podłoga wewnętrzna zbiornika jest spawana z 5-cio mm płyt ze stali 9% Ni, spoczywająca na izolacji piankowej grubości 0,22 m (styrofoam) chronionej przez 5 cm płyty betonowe. Podłoga jest przyspawana do 10 mm płyty u podstawy ściany ze stali 9% Ni.



Rys 4. Zbiornik LNG w Nowym Jorku (143 000 m<sup>3</sup>)

Zewnętrzna podłoga spoczywa na betonie przykryta spawanymi między sobą arkuszami cienkiej stali nierdzewnej o grubości 0,5 mm przyspawanymi na peryferiach do płyty 9% Ni pod ścianą, która z kolei jest przyspawana do pionowej płyty 9% Ni na ścianie (liner). Poniżej betonu fundamentu znajdują się kable elektrycznego ogrzewania gruntu pod zbiornikiem w celu uniknięcia tworzenia się „lodowych soczewek” mogących unieść podstawę zbiornika. Stalowa kopuła jest zaprojektowana na ciśnienie 0,18 kg/cm<sup>2</sup>.

System izolacji sufitowej podwieszony na prętach pod konstrukcją kopuły eliminuje wpływ ciepła do przestrzeni przechowywania płynu pozwalając utrzymać kopułę w temperaturze prawie równej temperaturze otoczenia. Izolacją sufitu jest fiberglas o grubości 0,80 m. Izolacja nie jest szczelna i pozwala na przepłynięcie gazu do wszystkich miejsc pod kopułą. Wszystkie przewody gazowe oraz przewody do instrumentów przechodzą do wnętrza zbiornika tylko przez kopułę oraz izolację sufitową.

Urządzenia dla rozpoznania niebezpiecznych sytuacji w obrębie zbiorników składają się z sześciu podstawowych systemów, a mianowicie:

- 1) System rozpoznawania istnienia mieszaniny palnej,
- 2) System wykrywania ognia,
- 3) System wykrywania dymu,

- 4) System gaszenia przy użyciu suchych materiałów chemicznych,
- 5) System selektywnego gaszenia wodą,
- 6) System zalewania wodą (deluge-potop).

Każdy zbiornik posiada małej średnicy przewody umieszczone pod podłogą oraz w przestrzeni wypełnionej perlitem, aby mieć możliwość wymiany gazów w obrębie każdej przestrzeni. Operacja schładzania zbiornika odbywa się pod kontrolą termopar umieszczonych w krytycznych miejscach każdego zbiornika.

Zbiorniki zbudowane zostały zgodnie ze wszystkimi standardami bezpieczeństwa i odpowiedzialności. Były one konstruowane nie tylko aby spełnić ustalone wymagania kodów i standardów w USA, ale wszystkie stosowane w USA federalne, stanowe i lokalne wymagania.

W wielu wypadkach projekty inżynierskie aktualnie przekroczyły specyfikację. Całkowity projekt został przeglądnięty i zatwierdzony przez Board of Standards and Appeals of the City of New York and the New York State Public Service Commission. Specjalnymi elementami bezpieczeństwa, które nie były wymagane przez istniejące standardy i kody, były:

- a) Ochronna Ściana betonowa (ściana trzecia i druga) została zaprojektowana na horyzontalną siłę uderzenia BOEING 747 Jambo przy szybkości lądowania 360 km/h. Położenie zbiornika było na linii podejścia samolotu do lądowania w Newark Airport.
- b) Zbiorniki mogą wytrzymać całkowite wypalenie się LNG bez jego wycieku.
- c) Zbiornik może się wypalić bez zagrożenia bezpieczeństwa drugiego zbiornika.
- d) Zbiorniki były zaprojektowane na siłę dwa razy większą na jaką się projektuje konstrukcje w rejonie Nowego Jorku w wypadku trzęsienia ziemi.
- e) Zbiorniki wytrzymają wszystkie huragany dotąd zarejestrowane.

### 3. OCENA RYZYKA SYSTEMÓW PRZECHOWUJĄCYCH LNG

Jest całkowicie jasne dla każdego, że warunki bezpieczeństwa są fundamentalnym problemem do rozwiązania dla właściciela, projektanta oraz społeczeństwa już na samym początku dyskusji nad projektem. To uczucie jest oparte na zanotowanym doświadczeniu dotyczącym przechowywania LNG, na wypadkach, które się zdarzyły i czasami na wyobraźni ludzi związanych z procesami oraz obchodzeniu się z gazami. Jest oczywiste, że władze i konstruktorzy muszą odpowiedzieć na bardzo wiele pytań i jest rzeczą naturalną, że odpowiedzi będą się różniły, szczególnie, gdy ekonomiczny aspekt będzie brany pod uwagę.

W czasie i po wypadku, mogą zaistnieć nieobliczalne konsekwencje finansowe.

Aby zabezpieczyć wymagany stopień bezpieczeństwa, musimy rozpatrzeć w detalach, dwa elementarne problemy, dla których musimy znaleźć rozwiązanie:

Pierwszy problem to zbudować zbiornik w wybranym miejscu, który będzie wystawiony na całą aktywność otoczenia i ludzi. Drugi problem, jest prostą odwrotnością pierwszego problemu – budując zbiornik (zawierający olbrzymią ilość energii), w wybranym miejscu, gdy stanie się wypadek, chronić ludzi i otoczenie przed skutkami niekontrolowanego rozpuszczenia tej energii ze zbiornika w formie wylania się jego zawartości i konsekwentnie pożaru.

Rozwiązaniem tych dwóch problemów jest zbiornik na LNG z właściwie wybranym stopniem bezpieczeństwa. Rozwiązanie bezpieczeństwa w odniesieniu do zbiorników można otrzymać używając następujących zasad:

1. Zbiornik musi być chroniony w taki sposób, że nie mogą zaistnieć takie okoliczności, że zewnętrzna ściana zawiedzie w przechowywaniu płynu w wewnętrznym zbiorniku. Maksymalną katastrofą może być tylko – całkowite wypalenie się zawartości zbiornika.
2. Chronić zewnętrzną ścianę od niebezpieczeństw, które mają już znaczenie dla sprawy bezpieczeństwa, ale pozwolili działać przeciwko potencjalnemu niebezpieczeństwu, w chwili obecnej tylko przewidywanego, jeszcze nie grożącego, przez permanentne planowanie akcji w przyszłych wydarzeniach.
3. Projektować zbiorniki na warunki, które będą zapobiegały możliwie największej liczbie przypadków, co w żargonie projektantów nazywa się to: „pisanie scenariuszy”.

Powyższe zasady mogą być zastosowane przy obecnej technologii; zostały one użyte w co najmniej czterech instalacjach Preload'a.

Rozwiązanie pierwszego problemu, zbudowanie zbiornika na LNG, który jest wystawiony do otoczenia i ludzkiej aktywności, jest wykonanie typowego projektu zbiornika z respektem dla wszystkich odpowiednich kodów i standardów w wybranej okolicy. Między problemami, które mogą być wymagane jest typowy projekt na trzęsienie ziemi oraz tornado, jak również projektowe obliczenia zachowania się zbiorników w wypadku rozlania się LNG oraz pożaru wewnątrz lub zewnętrznej ściany zbiornika. Ocena ryzyka, która zalicza się do projektu i która musi być ewaluowaną, należą:

- możliwości eksplozji w okolicy,
- zrodzone przez tornado pociski,
- możliwości kolizji z ruchem na lądzie lub z powietrza,
- terrorystyczny atak w okresie pokojowym,
- konwencjonalne bronie w wojnie cywilnej lub międzynarodowej.

Rozwiązanie drugiego problemu, budowy zbiornika na LNG i ochrona otoczenia i ludzi od energii wypuszczonej ze zbiornika, jest wykonanie typowych studiów rozprzestrzeniania się palnej mieszaniny gazu i powietrza i ciepłej radiacji w wypadku pożaru. Konkluzje wyciągnięte ze studiów powinny być załącznikiem do projektu zbiornika.

## 4. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW UŻYWANYCH W BUDOWIE ZBIORNIKÓW DLA LNG

Zbiorniki z betonu sprężonego projektowane i budowane w latach 1960-1970 używały ostatnich osiągalnych informacji o materiałach. Przez ich użycie i przebyte testy zostały uznane za odpowiednie do budowy kriogenicznych zbiorników, a poprzez akcje w ramach „quality assurance – QA” i „quality control – QC” w czasie projektowania oraz budowy zostało osiągnięte potwierdzenie tego, że konstrukcja będzie prezentowała przewidywane rezultaty w czasie projektowania, jak również we wszystkich operacyjnych warunkach. Dane z próby ciśnienia oraz próby wodnej zbiornika 143000 m<sup>3</sup> LNG tank dla DISTRIGAS w N.Y. przeprowadzonej w lutym 1973 r. pokrywały się z danymi projektu (wyniki obliczone) z minimalną różnicą od wyników testów.

### 4.1. KRIOGENICZNE WŁAŚCIWOŚCI BETONU

Beton nie jest materiałem jednorodnym i dlatego fizyczno-mechaniczne właściwości każdego betonu zależą od aktualnych składników w projektowanej mieszance, włącznie ze stosunkiem woda/cement, rodzaju kruszywa, dodatków chemicznych, wielkości porcji oraz metody pielęgnacji.

Na pytanie, jak własności betonu twardniejącego w normalnej temperaturze zmieniają się po schłodzeniu do bardzo niskiej temperatury jaka istnieje w zbiorniku, musi być znana odpowiedź przed rozpoczęciem obliczeń strukturalnych. Najbardziej ważnymi własnościami betonu, które musimy znać oraz ich zmiany w zależności od temperatury są: wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie, współczynnik sprężystości betonu, współczynniki rozszerzalności cieplnej, przewodności cieplnej oraz ciężaru właściwego.

Dostępne w literaturze dane nie pokrywają wszystkich danych potrzebnych do wykonania projektów. Obecnie wszystkie specyfikacje projektów wymagają przeprowadzenia testów, które określą wszystkie powyżej podane własności, a które muszą być przeprowadzone wg obowiązujących norm, na materiałach jakie będą użyte w projekcie.

Dane z literatury fachowej oraz dane z testów przeprowadzonych dla zbiornika ENAGAZ w Barcelonie podaję poniżej dla przykładu:

#### 4.1.1. Wytrzymałość na ściskanie oraz rozciąganie betonu

Wszystkie testy wykazują, że zawartość wody w betonie przed zamrożeniem, ma bardzo ważny wpływ na zmiany betonu w bardzo niskich temperaturach. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu o dużej wilgotności, gdy stwardnieje w normalnej temperaturze otoczenia wzrasta bardzo znacznie po schłodzeniu do około -160°C. Wytrzymałość na ściskanie wzrasta trzykrotnie. Wytrzymałość betonu wysuszonego w powietrzu wzrasta około 1,5 raza. Beton wysuszony w piecu nie wykazuje dających się ocenić zmian w niskich temperaturach. Dlatego, wytrzymałość betonu w temperaturach kriogenicznych może być

aktualnie większa od wytrzymałości betonu w temperaturach otoczenia. PRELOAD opiera swoje obliczenia projektowe na wytrzymałości betonu w temperaturze otoczenia, nie biorąc pod uwagę większej wytrzymałości betonu, która rozwija się w temperaturach kriogenicznych.

Wytrzymałość betonu na ściskanie (28 dniowy beton),  $f_c' = 330 \text{ kg/cm}$

Wytrzymałość betonu na rozciąganie  $f_r = 0,1 * f_c'$

Cykle temperaturowe betonu poprzez zamrażanie, a potem odgrzewanie, generalnie nie wywołuje szkodliwego efektu w betonie, chociaż tylko pełne cykle temperaturowe, które mogą mieć znaczenie, są te, które są rezultatem całkowitego schładzania zbiornika a potem całkowitego rozgrzania. Straty w wytrzymałości betonu po 25 pełnych cyklach cieplnych są zazwyczaj około 20%. Po 10 pełnych cyklach temperaturowych straty wytrzymałości betonu są mniej jak 10%. Zazwyczaj betonowe zbiorniki są w użyciu tylko raz na całe „życie” (raz na 40 lat min.).

#### 4.1.2. Współczynnik sprężystości betonu

Współczynnik sprężystości stwardniałego betonu w normalnej temperaturze wzrasta po schłodzeniu do temperatury – 160°C o około 50%. Wysuszony w powietrzu (relative humidity 50%) współczynnik sprężystości wzrasta tylko 10%, podczas gdy beton wysuszony w piecu współczynnik sprężystości w kriogenicznych temperaturach pozostaje praktycznie ten sam.

#### 4.1.3. Współczynnik rozszerzalności cieplnej

Współczynnik rozszerzalności cieplnej zmienia się w zależności od użytego kruszywa i projektu mieszanki, do tego stopnia, że aktualne wartości wyselekcjonowanego betonu muszą być użyte. Dla wybranego materiału (kruszywo oraz pozostałe składniki) testy muszą być wykonane i we wszystkich obliczeniach dane z testów mogą być dopiero użyte. Współczynnik rozszerzalności cieplnej wilgotnego albo suchego betonu jest mniejszy gdy temperatura jest niższa.

Współczynnik rozszerzalności cieplnej w temperaturach (od +20°C do -165°C), wyniósł  $L=0,0000086 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Ciepło właściwe betonu  $c=0,2 \text{ kcal /kg.}^\circ$

#### 4.1.4. Przewodnictwo ciepłe

Przewodnictwo ciepłe zależy od kruszywa oraz od zawartości wody w mieszance betonu, wzrasta ono, gdy temperatura spada i jest ono około 50% do 100% większe w niskich temperaturach. Przewodnictwo ciepłe betonu jest około 1,5 kcal/m h °C w normalnych temperaturach, a około 2.5 do 3 kcal/m h °C w niskich temperaturach.

Projekt mieszanki był następujący:

Cement : 350 kg / m<sup>3</sup>.

Piasek 900 kg/m<sup>3</sup>, naturalnie przepłukany z rzeki (0-8 mm).

Kruszywo małe (5-12 mm) : 350kg/m<sup>3</sup>, granit.

Kruszywo duże (12-19 mm) : 620 kg/m<sup>3</sup>, granit.

Woda / cement stosunek (W/C): 0,44.

Domieszki: redukujący wodę plasticizer Pozzolit 8.

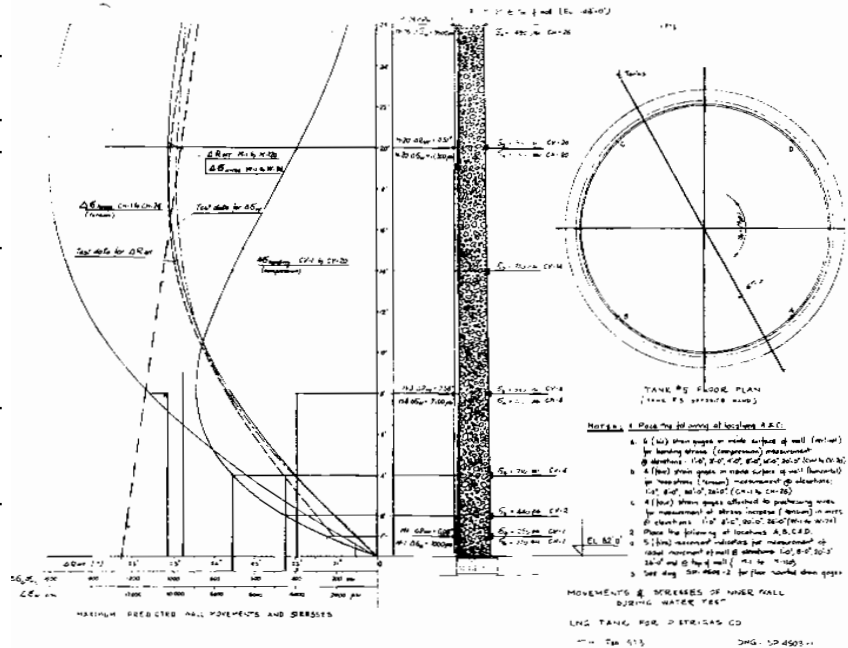
Air – entrainment agent MBVR.

### 4.2. Kriogeniczne właściwości drutów i kabli ze stali węglowej

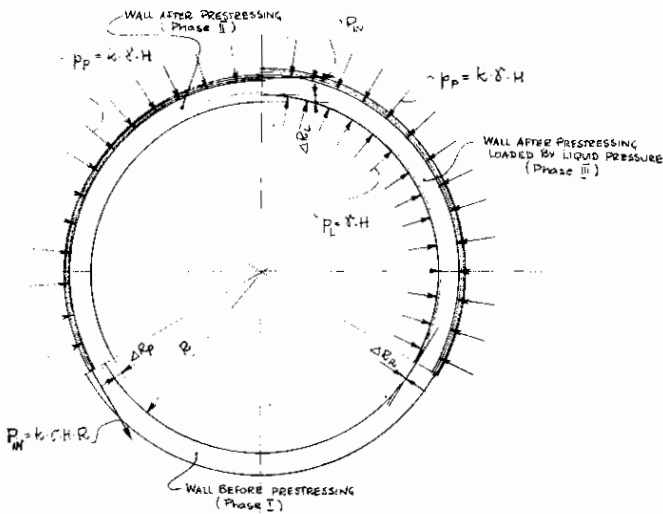
Druty z wysoko węglowej stali zademonstrowały zadawalające zachowanie w kriogenicznych warunkach, a szczególnie w użyciu jako elementy sprężające.

Druty używane przez PRELOAD w obwodowym sprężaniu betonu są produkowane z ciągłych niespawanych prętów. Standartowa metoda stosowana przez Preload w sprężaniu drutów, jest oparta na przeciąganiu ich przez redukujące oczko w czasie układania ich na ścianach zbiornika. Proces ten powoduje zmniejszanie przekroju drutu o około 25% (średnicy 5,2 mm do 4,5 mm) i ostatnim stopniem w metalurgicznym zabiegu drutu, kiedy rozwijał się wysoki stopień wymaganej orientacji włókien, stwarzający mechaniczne właściwości, które są dużo lepsze od materiału wyjściowego, (który nie był jeszcze obiektem operacji przeciągania drutu na zimno).

Operacja przeciągania wprowadza początkowe naprężenia rozciągające w drucie położonym na ścianie około 10,500 kg/cm<sup>2</sup> i jest de facto, ostatnia próba sprawdzająca drut, gdy każdy jego cm położony na ścianie, przeszedł test, a nie taki, który był wynikiem przypadkowego wyboru sprawdzanej próbki. Ponadto, stres w drucie jest w tym mo-



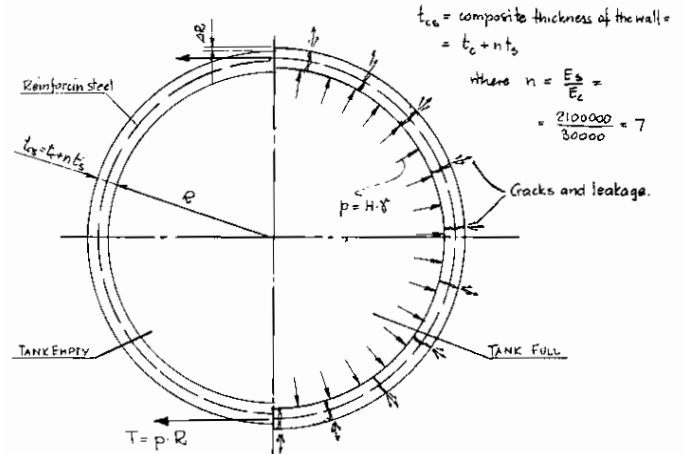
Rys 5. Wykres próby wodnej wewnętrznej ściany zbiornika na LNG



PHASE I (TANK BEFORE PRESTRESSING)  
 $\Delta R = 0$ ;  $\epsilon = \frac{\Delta R}{R} = 0$ ;  $\sigma = E_c \epsilon = 0$

PHASE II (TANK AFTER PRESTRESSING)  
 $\Delta R_p = \frac{P_p R^2}{t E_c} = \frac{k \delta H R^2}{t E_c}$ ;  $\epsilon = \frac{\Delta R_p}{R} = \frac{k \delta H R}{t E_c}$ ;  $\sigma = E_c \epsilon = \frac{k \delta H R}{t}$

PHASE III (TANK AFTER PRESTRESSING LOADED BY LIQUID PRESSURE)  
 $\Delta R_e = \Delta R_p - \Delta R_L = \frac{(k-1) \delta H R^2}{t E_c}$ ;  $\epsilon = \frac{(k-1) \delta H R}{t E_c}$ ;  $\sigma = E_c \epsilon = \frac{(k-1) \delta H R}{t}$  because  $k > 1$  (always)



$t_{cc} = \text{composite thickness of the wall} = t_c + n t_s$   
 where  $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{210000}{30000} = 7$

Elongation of tank radius  $= \Delta R = \epsilon \cdot R = \frac{\sigma}{E_c} R = \frac{\delta \cdot H \cdot R^2}{E_c \cdot t}$   
 Strain in the wall  $= \epsilon = \frac{\Delta R}{R}$  (the same for concrete and steel)  
 henceforth: stress in steel  $\sigma_s = E_s \epsilon$   $\sigma_s = \frac{E_s \cdot E_c}{E_s} = \frac{\sigma_s}{n}$   
 " " concrete  $\sigma_c = E_c \epsilon$

If tank was design for  $\sigma_s = 1000 \text{ kg/cm}^2$   
 Stress in concrete will be  $\sigma_c = \frac{\sigma_s}{n} = 143 \text{ kg/cm} \gg f_r = 35 \text{ kg/cm}^2$   
 where  $f_r = \text{ultimate strength of concrete in tension} = 35 \text{ kg/cm}^2$   
**WALL WILL CRACK - the only working element is steel.**

### Rys 6.

mencie na najwyższym poziomie, który drut może osiągnąć, gdyż w późniejszym czasie nastąpią straty naprężenia na skutek: deformacji elastycznej, kurczenia się betonu, pełzania betonu, relaksacji w samych drutach lub stosunkowo niewielkiej (gry + -) w naprężenia na skutek różnicy we współczynnikach rozszerzalności cieplnej betonu oraz stali drutów i ich aktualnych różnic temperaturowych.

Na początku historii zbiorników z betonu sprężonego zostały przeprowadzone testy (lata: 1951 – test Linde, oraz 1960 – test A.G.A.) potwierdzające w metalurgicznych określeniach stosowność użycia drutów w sprężaniu betonu.

Konkluzje były:

1. Druty sprężające przedstawiają sobą mikrostrukturę, która pokrywa się z kierunkiem naprężenia.
2. Wytrzymałość drutów, w chwili przeciągania jak i w momencie ułożenia ich na ścianie jest przynajmniej tak duża w temperaturze pracy, jak w temperaturze otoczenia. Wszystkie dostępne dane z testów wykazały, że wytrzymałość doraźna drutów jest 10% do 30% większa w niskich temperaturach.
3. Wytrzymałość drutów w chwili przeciągania jak i w momencie ułożenia ich na ścianie jest dużo większa w temperaturze pracy jak jest wymagane aby przejść naprężenia jakie dozna w momencie obciążenia.

### Rys 7.

4. Zbiorniki są owinięte wielokrotnie drutami stwarzając strukturę z wielokrotnym zabezpieczeniem środków potrzebnych na przejście obciążenia. System uzwojenia zbiorników można porównać do zawieszenia mostu na wielu kablach.
5. Druty są pokryte torkretem i związane ze ścianą tak, że uszkodzenie każdego drutu nie spowoduje rozprzestrzeniania się pęknięcia wśród innych drutów. Pęknięty drut zostanie umiejscowiony w torkrecie w niewielkiej odległości od miejsca pęknięcia drutu około 1 m.

Rezultaty testów wykazują, że normalna węglowa stal zbrojeniowa, podobnie jak druty sprężające beton, kable także mogą być użyte w warunkach kriogenicznych. Jednakże, ponieważ pręty zbrojenia nie mają idealnie rozciągającej się ziarnistej struktury, U.S. code NFPA 59-A (National Fire Protection Association), ogranicza naprężenia w prętach w następujący sposób:

Pręty zbrojeniowe pracujące na rozciąganie w obszarach, które mogą osiągnąć temperaturę LNG mają określone dozwolone naprężenia: maksymalne:

$\frac{1}{2}'' \text{Ø}$ ( 12,7 mm ) i mniejsze	: 12,000 psi ( 844 kg/cm <sup>2</sup> )
$\frac{3}{4}'' \text{Ø}$ ( 19,05 mm )	: 10,000 psi ( 703 kg/cm <sup>2</sup> )
1''Ø ( 25,4 mm )	: 8,000 psi ( 563 kg/cm <sup>2</sup> )

Dalszy ciąg artykułu w kolejnym numerze.