

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział
Inżynierii Sanitarnej i Wodnej



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Barbary Matlak

pt. „Kryteria oceny wodoszczelności
betonów hydrotechnicznych”

WARSZAWA

1984

390505



R.3981

[699.821.83 : 666.972.5]:043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII SANITARNEJ I WODNEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

Mgr inż. Barbary MATLAK

p.t. "KRYTERIA OCENY

WODOSZCZELNOŚCI BETONÓW

HYDROTECHNICZNYCH"



Promotor: Doc.dr inż. Czesław KEMPA

WARSZAWA - 1984 rok



196-15-85-D.

S P I S T R E S C I

=====

1. W S T E P	3
2. ANALIZA · STANU DOTYCHCZASOWEGO W ZAKRESIE KRYTERIOW OCENY WODOSZCZELNOSCI, METOD I APARATURY DO BADAN ORAZ WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKOW NA WODOSZCZELNOSC BETONU	5
2.1. Wprowadzenie	5
2.2. Stosowane kryteria oceny wodoszczelności betonu i metody badań	5
2.3. Aparatura do badań wodoszczelności betonu	10
2.4. Kształty i wymiary próbek	13
2.5. Terminy badań, warunki dojrzewania i sposób przygotowania próbek przeznaczonych do badań wodoszczelności betonu	14
2.6. Badanie wodoszczelności próbek	17
2.7. Wielkości ciśnień wody i czas badania	18
2.8. Czynniki wpływające na wodoszczelność betonu	19
2.8.1. Składniki betonu	19
2.8.1.1. Cement	19
2.8.1.2. Kruszywo	22
2.8.1.3. Woda	23
2.8.1.4. Domieszki i dodatki	24
2.8.2. Własności mieszanki betonowej i betonu	26
2.8.2.1. Urabialność mieszanki betonowej	26
2.8.2.2. Konsystencja mieszanki betonowej	28
2.8.2.3. Szczelność betonu	29
2.8.3 Wpływ warunków i czasu dojrzewania betonu	32

2.8.4. Wpływ innych czynników technologicz- nych na wodoszczelność betonów	36
3. CEL I ZAKRES PRACY	37
4. BADANIA WŁASNE	40
4.1. Aparatura do badań	40
4.1.1. Opis ogólny	40
4.1.2. Opis szczegółowy	40
4.1.2.1. Zbiornik ciśnieniowy	40
4.1.2.2. Doprowadzenie wody do próbek	43
4.1.2.3. Urządzenie do automatycznego utrzymywa- nia ciśnienia wody	47
4.2. Próbki do badań	47
4.2.1. Materiały do wykonania próbek	47
4.2.2. Receptury mieszanek betonowych do wykonania próbek	48
4.2.3. Wykonanie próbek do badań wodoszczelności betonu	51
4.2.4. Wielkość i kształt próbek	53
4.2.5. Sposób tłoczenia wody do próbek	54
4.3. Sposób obliczania wodochłonności jednostko- wej betonu	55
4.4. Wpływ bezpośredniego kontaktu sprężonego powietrza z wodą na wyniki badań wodoszczel- ności betonu	57
4.5. Badanie wpływu domieszek i dodatków na wodoszczelność betonu	62
4.5.1. Cel i zakres badań	62
4.5.2. Analiza wyników pierwszego etapu badań wodoszczelności betonów z domieszkami i dodatkami	63
4.5.2.1. Wpływ Klutanu N na wodoszczelność betonu	63

4.5.2.2. Wpływ Abiesodu P-1 na wodoszczelność betonu	64
4.5.2.3. Wpływ Roksolu B-1 na wodoszczelność betonu	65
4.5.2.4. Wpływ dodatku popiołu lotnego na wodoszczelność betonu	66
4.5.3. Podsumowanie analizy wyników pierwszego etapu badań wodoszczelności betonów z domieszkami i dodatkami	78
4.5.4. Analiza wyników drugiego etapu badań wodoszczelności betonów z domieszkami	78
4.5.4.1. Wpływ Klutanu N i Abiesodu P-1 na wodoszczelność betonu	79
4.5.4.1.1. Próbkki z betonu serii "A" - bez zmiany ilości cementu	79
4.5.4.1.2. Próbkki z betonu ze zmniejszoną o 10% ilością cementu/seria "A-1"/	79
4.5.4.2. Wpływ domieszki Roksol B-1 na wodoszczelność betonu	80
4.5.4.3. Wpływ polifosforanu sodu na wodoszczelność betonu	81
4.6. Badanie wpływu kierunku tłoczenia wody do próbek w stosunku do kierunku układania betonu	93
4.6.1. Opis badań i uzyskane wyniki	93
4.7. Wpływ kształtu i wielkości próbek na wyniki badań wodoszczelności betonu	102
4.8. Powtórne badanie wodoszczelności betonu	109
4.9. Ustalenie zależności między wodochłonnością jednostkową betonu, a ciśnieniem	122
5. WNIOSKI	137
WYKAZ LITERATURY	139
DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA PRZEPROWADZONYCH BADAN	146

1. W S T E P

Jedną z najważniejszych cech betonu hydrotechnicznego jest jego wodoszczelność. Wynika to nie tylko z wymagań stawianych budowlom hydrotechnicznym lecz także z wpływu tej cechy na inne np. mrozoodporność, odporność na działanie czynników atmosferycznych, agresję chemiczną itp.

Wzajemnie powiązanie tych własności z wodoszczelnością ujawnia się przede wszystkim w dłuższych okresach czasu, kiedy to niedostateczna szczelność betonu kontaktującego się z wodą prowadzi do szeroko rozumianych zmian korozyjnych ośrodka, osłabienia jego struktury i utraty trwałości. Wodoszczelność decyduje więc o długowieczności budowli.

Oprócz oczywistych problemów projektowania betonów wodoszczelnych niezwykle istotnym jest sposób oceny i badania tej własności betonu w warunkach laboratoryjnych i "in situ" oraz wzajemniej adekwatności uzyskiwanych wyników. Literatura przedmiotu wskazuje na znaczną różnorodność kryteriów oceny wodoszczelności oraz związaną z tym różnorodność metod badawczych. Zagadnienia te przeanalizowano w rozdziale 2 pracy.

Wśród kryteriów oceny wodoszczelności uwagę zwraca to, które jest oparte na wodochłonności jednostkowej betonu. Istotną zaletą tego kryterium jest fakt, iż realizująca je metoda badawcza nadaje się dobrze do stosowania bezpośrednio na obiekcie. Stwarza to możliwość uzasadnionych porównań wyników badań laboratoryjnych i prowadzonych "in situ". Jest to szczególnie cenne wobec aktualnie obowiązującego w kraju kryterium opartego o markę wodoszczelności [67]. Warunki badań laboratoryjnych związane z określeniem laboratoryjnym marki wodoszczelności oderwane są od panujących na obiekcie i prowadzą do wyników nieprzystawalnych do rzeczywistej wodoszczelności

betonu w konstrukcji. Nadto metoda badania betonu określająca markę jego wodoszczelności nie nadaje się do stosowania "in situ". Możliwość badania wodoszczelności betonu bezpośrednio w konstrukcji jest szczególnie ważna z powodu zależności tej cechy od wielu czynników technologicznych związanych z konkretnymi warunkami wykonawstwa. Na problemy te zwrócono uwagę w rozdziale 2.8.4. Wcześniej omówiono wpływ składników betonu, własności mieszanki betonowej oraz warunków i czasu dojrzewania betonu na jego wodoszczelność. Uznając zalety kryterium wodoszczelności opartego o wodochłonność jednostkową betonu poddałam analizie i doświadczalnej weryfikacji metodę badań realizującą to kryterium. W tym celu adaptowałam i udoskonaliłam aparaturę skonstruowaną w Zakładzie Budownictwa Wodnego Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej i przeprowadziłam na niej szereg badań szczegółowych.

Badania wpływu napowietrzenia wody tłocznej do próbek, kierunku jej tłoczenia oraz wielkości i kształtu ciał próbnych na wyniki badań wodoszczelności miały na celu określenie wpływu warunków badania na efekty próby.

W celu uzyskania betonów o szerokim zakresie zmienności wodoszczelności receptury betonów z serii porównawczych modyfikowano najpowszechniej stosowanymi domieszkami i dodatkami. Wyniki badań wodoszczelności tych betonów przeanalizowano pod kątem wpływu stosowanych dodatków i domieszek w rozdziale 4.5. W badaniach wpływu napowietrzenia wody tłocznej do próbek wykorzystano próbki już raz badane. Przy powtórным badaniu wodoszczelności stwierdzono wielokrotne zmniejszenie wodochłonności betonu i wzrost marki wodoszczelności. Zjawisko to omówiono w rozdziale 4.8. traktując je wprawdzie jako niezamierzony ale ciekawy efekt prowadzonych badań. Najważniejszym z punktu

widzenia praktyki fragmentem pracy było określenie zależności pomiędzy wodochłonnością jednostkową betonu, a ciśnieniem oraz określaną powszechnie marką wodoszczelności /rozdział 4.9/.

Opracowanie kończą wnioski i postulaty dotyczące dalszych wytyczonych przez pracę kierunków.

2. ANALIZA STANU DOTYCHCZASOWEGO W ZAKRESIE KRYTERIÓW OCENY WODOSZCZELNOŚCI, METOD I APARATURY DO BADAŃ ORAZ WPŁYWU RÓŻNYCH CZYNNIKÓW NA WODOSZCZELNOŚĆ BETONU.

2.1. W p r o w a d z e n i e

Jak już przytoczono wyżej, problem badania wodoszczelności betonu hydrotechnicznego jest zagadnieniem bardzo istotnym lecz również złożonym. W zakresie metodyki badań panuje zarówno w Polsce, jak i w świecie duża dowolność. Przeprowadzone przeze mnie studia literaturowe pozwoliły na dokonanie analizy stosowanych w różnych krajach kryteriów oceny i metod badania wodoszczelności w tym:

- aparatury do badań,
- kształtów i wymiarów próbek,
- sposobów przechowywania próbek,
- sposobów izolacji próbek,
- wielkości ciśnienia i czasu jego utrzymywania.

Przeanalizowano również wpływ na wodoszczelność składników betonu, dodatków i domieszek, technologii wykonania, warunków i czasu dojrzewania, struktury betonu oraz stanu naprężeń.

2.2. S t o s o w a n e k r y t e r i a o c e n y w o d o - s z c z e l n o ś c i b e t o n u i m e t o d y b a - d a ń.

Ocenę wodoszczelności betonów przyjmuje się na podstawie:

- kryterium przeciekania lub nieprzeciekania betonów po osiągnięciu pewnych wartości kryterialnych jak np.: ciśnienia, czasu, ich iloczynu /atmosfero-godzin/,
- kryterium filtracji określane na podstawie liczb kryterialnych takich jak: natężenie przepływu, droga strumienia w próbce,
- kryterium wodochłonności określone na podstawie wodochłonności jednostkowej betonu.

Ciśnienie wody na badaną próbkę przyjmuje się stałe, bądź stopniowo wzrastające, przy czym czas utrzymywania poszczególnych wysokości ciśnienia jest również różny.

Najczęściej stosowane jest kryterium oparte o nieprzeciekanie betonu przy danej wartości ciśnienia, przy stopniowym jego wzroście co 8 godzin o jedną atmosferę. Tego rodzaju kryterium stosuje się również w Polsce. Określenie tzw. marki wodoszczelności /oznaczonej np.: W-2, W-4 itd./ polega na ustaleniu wartości ciśnienia, przy którym cztery próbki spośród sześciu badanych nie wykazują oznak przesiąkania [67].

Inne z wymienionych metod stosowane są rzadko, można je spotkać w niektórych publikacjach [36,40,20] i normach związanych z badaniami wodoszczelności betonów.

Norma radziecka GOST-19246-74 stosuje jako kryterium wodoszczelności współczynnik filtracji betonu określony na podstawie zależności:

$$k = \frac{Q \cdot h}{S \cdot t \cdot \Delta p} \cdot \eta \quad [2 - 1]$$

gdzie:

k - współczynnik filtracji [cm/s]

Q - ilość przesączającej się przez próbkę wody [cm³]

h - wysokość próbki [cm]

S - powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [cm²]

t - czas badania, w którym mierzy się ilość przeciekającej wody [s]

$\Delta p = P_1 - P_2$ - wysokość różnicy nadośnięć na wejściu P_1 i wyjściu P_2 z próbki w cm słupa wody.

Wielkość P_1 jest równa wysokości nadośnięcia na stanowisku badawczym, wielkość P_2 przy swobodnym wypływie wody z próbki równa się zero.

η - bezwymiarowy współczynnik charakteryzujący lepkość wody zależny od temperatury.

Większość metod dotyczy oceny wodoszczelności betonu w próbkach. Istnieją również metody badań wodoszczelności betonu w konstrukcji. Takim przykładem są opracowane w Polsce "Wytyczne badania wodoszczelności betonu masywnych budowli wodnych za pomocą urządzenia do badania wodochłonności" [40,41].

Są to wytyczne w których omówiono sposób badania wodochłonności na obiekcie i podano zależności wiążące wodochłonność z marką wodoszczelności. Wodochłonność miarodajną q_m określoną jako ilość wody wtłoczoną do otworu w betonie w określonym czasie oblicza się według wzoru:

$$q_m = \frac{Q}{H_{cz} \cdot 0,1p} \cdot f \cdot e \cdot a \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{m i min} \cdot 0,1 \text{ atm}} \right] \quad [2 - 2]$$

w którym:

Q - wodochłonność otworu w cm^3/min /ilość wody w cm^3 wtłoczona do otworu w czasie 1 min/,

H_{cz} - głębokość czynna otworu [m],

p - ciśnienie wody w środku strefy tłoczenia [atm],

f - współczynnik przeliczeniowy pozwalający na porównywanie wyników uzyskanych przy różnych średnicach otworów,

e - współczynnik umożliwiający porównywanie wyników uzyskanych

przy różnych temperaturach,

a - współczynnik pozwalający porównywać wodochłonność betonu po różnym okresie twardnienia.

Wzór powyższy dotyczy otworów o długości $H_{oz} \geq 20+30d$ / gdzie:

d - średnica otworu.

Przy tłoczeniu wody w otwory krótkie o $H_{oz} \leq 20+30 / . d$ można obliczać wodochłonność na podstawie wzoru:

$$q = \frac{V}{t} \left[\frac{1}{h} \right] \quad [2 - 3]$$

gdzie:

V - objętość wody w 1 wtłoczono w beton w ciągu czasu t w godzinach.

Autor wytycznych S.Nowak podaje również wykresy umożliwiające na podstawie wodochłonności określenie współczynnika filtracji. Wykresy te sporządził on w oparciu o wyniki obliczeń teoretycznych i badań przeprowadzonych przez Elbakidze i Bondarenkę [13], którzy również podali wykreślne zależności współczynnika filtracji i wodochłonności betonu.

Do oceny wodoszczelności betonu stosowane może być ~~również~~ kryterium określające prędkość przepływu wody w ośrodku porowatym, którym jest również beton. Stolnikow [54] ustalił zależność pomiędzy prędkością przepływu wody, a marką wodoszczelności betonu. W badaniach swoich stosował próbki walcowe o wysokości równej 15 cm i ciśnienie stopniowo wzrastające co 8 godzin o jedną atmosferę. Uzyskane wyniki tych badań przytaczono w tabelicy 2.1.

Tablica 2.1. Zależność pomiędzy prędkością przepływu wody,
a marką wodoszczelności betonu [54]

Marka wodoszczelności	Prędkość przepływu wody w porach przy gradientcie ciśnienia równym jedności po 28 dniach dojrzewania [cm/s]
W - 2	$2,6 \cdot 10^{-6}$
W - 4	$8 \cdot 10^{-7}$
W - 6	$4 \cdot 10^{-7}$
W - 8	$2 \cdot 10^{-7}$
W - 14	$7 \cdot 10^{-8}$

Aby przejść od prędkości przepływu wody do wartości współczynnika filtracji Stolnikow [54] proponuje uwzględnić porowatość betonu. Przybliżona wartość współczynnika filtracji może być obliczona na podstawie następującego wzoru:

$$k = K_0 \cdot n_{28} \quad [2 - 4]$$

w którym:

k - współczynnik filtracji w cm/s po 28 dniach dojrzewania,

K_0 - współczynnik prędkości przepływu wody w cm/s

n_{28} - porowatość betonu po 28 dniach dojrzewania.

Badania i obliczenia przeprowadzone przez Stolnikowa wykazały, że współczynnik filtracji w większym stopniu niż współczynnik prędkości przepływu wody zależy od zmian zachodzących w betonie w czasie badania /np. zmiana porowatości, samouszczelnienie wynikające z pęcznienia i kolmatacji itp./. Ma to znaczny wpływ na dokładność określenia współczynnika filtracji betonu i utrudnia interpretację wyników badań. Ponadto zastosowanie prawa Darcy do obliczania współczynnika filtracji jest możliwe wówczas, gdy przepływ będzie ustalony, co wg Neville'a [43] może nastąpić

nawet po 10 dniach od początku badania.

Podane przykłady różnych kryteriów i metod stosowanych w świecie do oceny wodoszczelności betonu wskazują, że trudno jest porównywać wyniki badań uzyskane przez różnych badaczy.

2.3. Aparatura do badań wodoszczelności betonu.

W literaturze krajowej i zagranicznej [4,13,20,22,62] omawia się szereg rozwiązań aparatur do badań wodoszczelności betonu. W większości rozwiązań do uzyskania pożądanej wysokości ciśnienia wody, stosuje się sprężone powietrze, które działa bezpośrednio na wodę tłoczoną do próbek. Jest to duża wada tych aparatur, ponieważ powietrze rozpuszcza się w wodzie, a następnie uwalniając się z wody powoduje tzw. kolmatację gazową porów w betonie. Powyższe zjawisko ma wpływ na uzyskane wyniki badań i powoduje pozorne podwyższenie wodoszczelności betonu.

Określenie ilości tłoczonej wody do betonu w różnych typach aparatur może odbywać się bądź przez pomiar objętości wody /odozyty na wodowskazach/, bądź też przez określenie przyrostu masy próbek w trakcie badań.

W celu zapewnienia możliwości precyzyjnego określenia parametrów charakteryzujących wodoszczelność betonów, aparat stosowana w badaniach powinna być tak skonstruowana, aby spełniała następujące warunki:

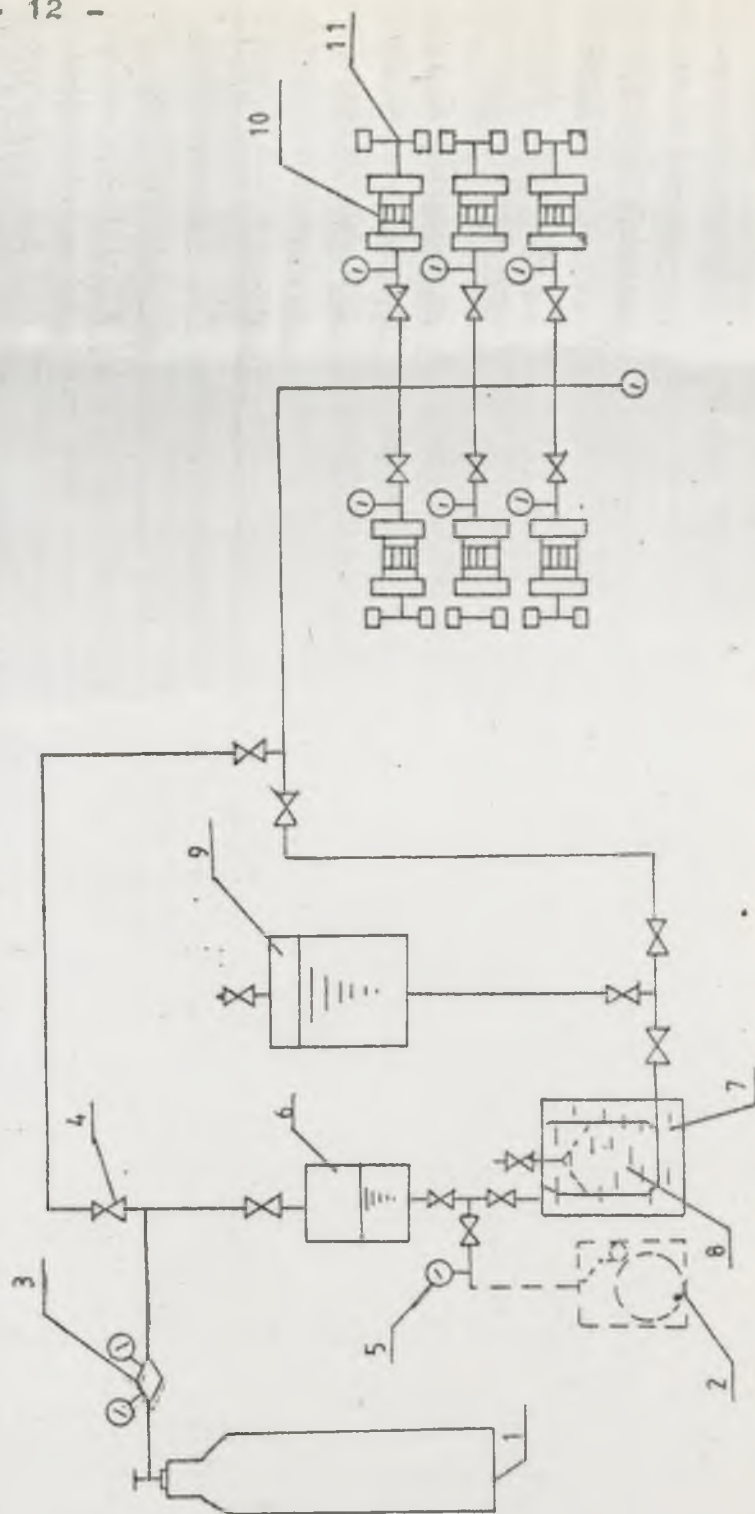
- wykluczała dostęp sprężonego powietrza do wody tłoczonej w beton,
- umożliwiała dokładny pomiar ilości tłoczonej wody do betonu w czasie.

Przykładowe rozwiązanie aparatury do badań wodoszczelności betonów podane przez obowiązującą normę polską BN-62/6738-0,5

nie posiada powyższych cech. Laboratoria w kraju stosują różne rodzaje aparatury i tak np.: Laboratorium Kontroli Jakości Betonów przy budowie stopnia wodnego we Włocławku i w Wiśle Czarnej stosowało zmodyfikowaną aparaturę normową [20].

Aparatura ta jest konstrukcji tłokowej i umożliwia utrzymywanie stałego ciśnienia wody w czasie badania, oraz pomiar ilości przesączającej się przez beton wody. Zaletą tej aparatury jest przekazywanie ciśnienia na wodę za pomocą tłoka przez co, unika się kontaktu wody ze sprężonym powietrzem. Wadą aparatury to, że konstrukcja tłokowa aparatury jest nietrwała i ulega częstym uszkodzeniom. Nie została ona szerzej rozpowszechniona.

Ciekawe rozwiązanie konstrukcyjne aparatury do badań wodoszczelności zaleca norma radziecka [71]. Schemat tej aparatury przedstawiono na rysunku 2.1. Jak wynika z przedstawionego schematu aparatura ta spełnia wymagania odnośnie oddzielenia sprężonego powietrza od wody tłoczonej w beton^Wde próbki i pozwala na dokładny pomiar ilości wody tłoczonej do próbek.



Rys.2.1. Schemat aparatury do badań wodoszczelności betonu [71].
Oznaczenia na rysunku: 1 - butla z gazem, 2 - pompa, 3 - reduktor, 4 - zawór, 5 - manometr, 6 - przekaźnik ciśnienia, 7 - pojemnik z wodą "odpowietrzoną", 8 - elastyczny pojemnik z wodą "odpowietrzoną", 9 - zapasowy pojemnik z wodą "odpowietrzoną", 10 - stanowisko badawcze, 11 - miernik ilości filtrującej wody.

2.4. Kształty i wymiary próbek.

W opracowaniu [20] dosyć szczegółowo omówiono stosowane w różnych krajach próbki do badań wodoszczelności i zestawiono w tablicy 2.2.

Tablica 2.2. Kształty i wymiary próbek stosowanych do badań wodoszczelności betonu [20].

Nazwa normy i państwo gdzie obowiązuje	Kształt próbki i-prosto- padościana i-walec	Wymiary próbek, v cm			maksymalna średnica ziarnu kru- szywa d _{max} [cm]	d s	s d _{max}
		bol średnica b [cm]	lub wysokość s [cm]	średni ca-po- wierz- chni na- kłada woda d [cm]			
PN-75/B-06250 POLSKA	P W	-	16 16	10	4,0	0,6	4,0
PN-62/6738-05-POLSKA	W	30	15	10	-	0,7	-
GOST-4800-05-ZSRR	W	15	15	15	8,0	1,0	1,9
GOST-19246-ZSRR	W	15	15	15	4,0	1,0	3,8
DIN-1048-RFN	P W	20 40	12 20	10 15	4,0 6,0	0,8 0,75	3,0 3,3
TGL-0-1048-NRD	P W	20 40	12 20	10 15	4,0 6,0	0,8 0,75	3,0 3,3
CSN-732025/56-CSSR	P P P P	30 40 40 30	12 15 20 15	10 10 10 12	4,0 8,0 10,0 4,0	0,8 0,7 0,5 0,5	3,0 1,9 3,0 3,0
ONORM-B-3302-AUSTRIA	W	20	20	15	7,0	0,75	2,2
USCWB-CID-SG-USA	W W	15 38	15 38	15 38	2,5 7,5	1,0 1,0	6,0 5,1
MSZ-4715-61-WĘGRY	W W	20 40	13 25	10 15	4,0 4,0	0,8 0,75	3,0 3,0

Jak widać z przytoczonej tablicy najczęściej stosowane są próbki w kształcie walca o średnicy od 15 cm do 40 cm i wysokości od 12 cm do 38 cm. Polskie normy [63,67] jak również projekty nowych norm [48,49] zalecają stosowanie próbek walcowych o średnicy 30 cm i wysokości 15 cm /norma dotycząca betonów hydrotechnicznych/ a 16 cm /norma dotycząca betonów zwykłych/.

W niektórych krajach normy dopuszczają stosowanie w badaniach wodoszczelności próbki walcowe oraz prostopadłościennie. Normy czeskie natomiast zalecają stosowanie wyłącznie próbek prostopadłościennych w trzech różnych wymiarach /tablica 2.2/.

Wielkość maksymalnego ziarna kruszywa w betonowych próbkach ograniczona jest przez wymiar próbek stosowanych do badań. W praktyce laboratoryjnej w Polsce przyjmuje się zaś aby wielkość maksymalnego ziarna kruszywa nie przekraczała 3 najmniejszego wymiaru próbki, co przy stosowanych w kraju próbkach ogranicza tę wielkość do 40 mm. Przy badaniu betonu o większym uziarnieniu odsiewa się z masy betonowej ziarna większe od 40 mm, co powoduje zmianę cech betonu, a tym samym błędną ocenę wodoszczelności betonu.

2.5. Terminy badań, warunki dojrzewania i sposób przygotowania próbek przeznaczonych do badań wodoszczelności betonu.

Jak wynika z informacji zawartych w normach i publikacjach w poszczególnych krajach występują duże rozbieżności dotyczące warunków i czasu dojrzewania próbek do momentu badania wodoszczelności.

Norma polska [67] zaleca przechowywanie próbek w formach

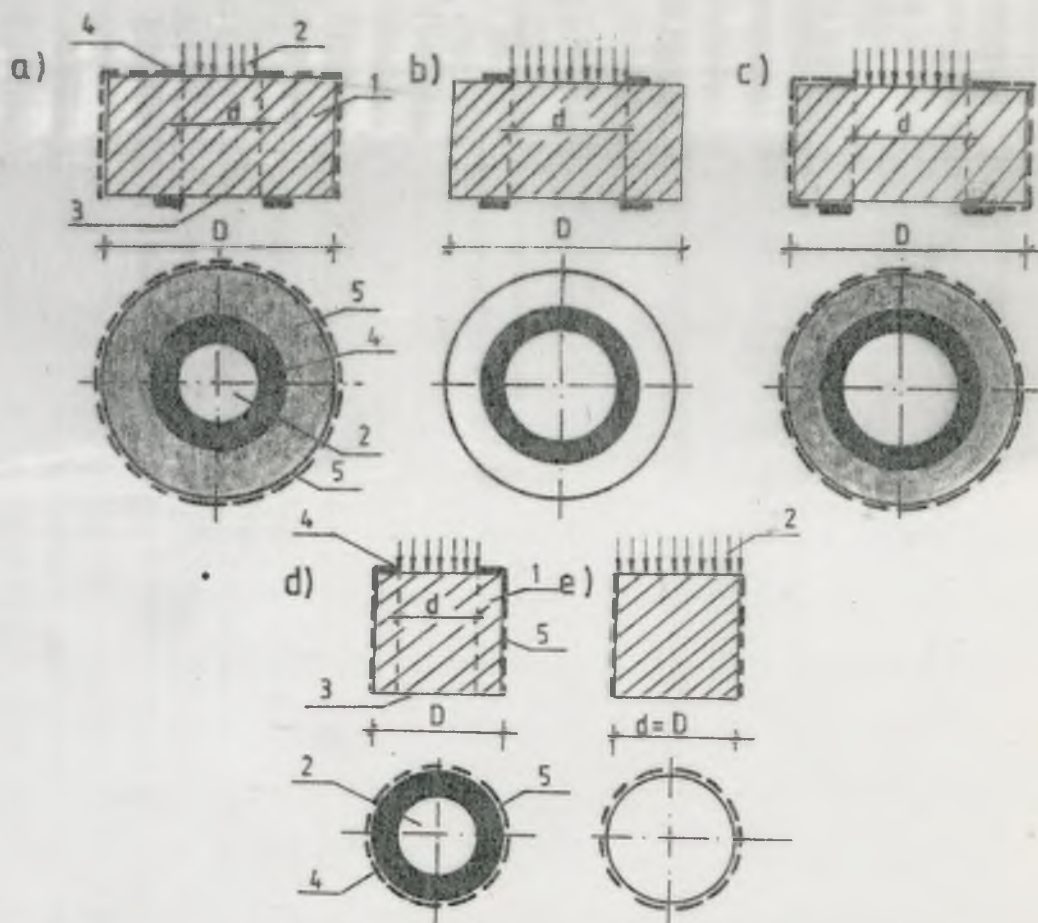
przez 24 h od czasu wykonania w pomieszczeniu o temperaturze $+20^{\circ}\text{C} \pm 2$. Po rozformowaniu z powierzchni górnych i dolnych próbek usuwa się mleczko cementowe. Tak przygotowane próbki umieszcza się na okres 90 dni w komorze klimatyzacyjnej o temperaturze otoczenia $+18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza 90%.

Na jeden dzień przed badaniem próbki przenosi się do pomieszczenia w którym będą badane. Przed badaniem wodoszczelności część powierzchni górnej i całe powierzchnie boczne próbek pokrywa się powłoką wodoszczelną/Rys.2.2/.

W Związku Radzieckim próbki przeznaczone do badań wodoszczelności przechowuje się 48 h w formach w pomieszczeniach o temp. $+20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ pod mokrymi tkaninami. Po rozformowaniu próbki przechowuje się w temperaturze $+20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza 90%. Na 24 h przed badaniem usuwa się z górnych powierzchni próbek mleczko cementowe i poddaje badaniom wodoszczelności. Niektórzy badacze radzieccy, a między innymi Stolnikow [54] zalecają przechowywanie próbek do momentu badania w wilgotnych trocinach.

Normy radzieckie [72,73] zalecają rozformowanie próbek po upływie 24 h od czasu ich wykonania. Po rozformowaniu oczyszcza się górne powierzchnie próbek z mleczka cementowego i przechowuje się w środowisku wodnym. Na 24 h przed badaniem próbki wyjmowane są z wody i przechowywane w komorze klimatyzacyjnej. Powierzchnie próbek, które przed badaniem pokrywa się powłoką wodoszczelną pokazano schematycznie na rysunku 2.2.c.

Okresy dojrzewania próbek podane w rozpatrywanych normach [63,67,70,71,72,73,74,75,77] wynoszą od 28 do 180 dni. Jedynie normy amerykańskie przewidują dłuższy okres dojrzewania niż 180 dni.



Rys.2.2. Powłoki wodoszczelne i miejsca doprowadzenia wody pod ciśnieniem przy badaniu wodoszczelności próbek[20]
a/ w Polsce, b/ w Austrii, c/ w NRD, RFN, CSRS, Węgry
d/ w Polsce, e/ w ZSRR, USA.

Oznaczenia: 1- próbka, 2-doprowadzenie wody pod ciśnieniem, 3-powierzchnia próbki do obserwacji przecieków wody, 4-uszczelka, 5-powłoka wodoszczelna.

Oznaczenia literowe wymiarów wg ^{tabl} 2.2.

2.6. Badanie wodoszczelności próbek

Badanie wodoszczelności betonu w laboratorium polega zwykle na tłoczeniu wody pod określonym ciśnieniem przez jedną z powierzchni próbek i obserwacji przecieków wody na przeciwległej powierzchni. Pozostałe powierzchnie próbek zabezpiecza się powłoką wodoszczelną uniemożliwiającą przecieki wody przez te powierzchnie.

Powierzchnie przez które tłoczy się wodę do badanych próbek mają kształt koła o różnych średnicach od 10 do 15 cm, a tylko norma USA zaleca średnicę 38 cm /tablica 2.2/.

Na rys.2.2. przedstawiono schematycznie rozmieszczenie powłok wodoszczelnych na powierzchniach próbek. Jak wynika z rys.2.2. w niektórych krajach wogóle nie nakłada się powłoki wodoszczelnej, w innych natomiast nakłada się powłokę na część powierzchni górnej i na powierzchnie boczne, a nawet częściowo na dolną, zaś jeszcze w innych na powierzchnie boczne.

Powłoka powinna charakteryzować się całkowitą szczelnością i taką przyczepnością do betonu, która uniemożliwi oderwanie jej pod działaniem ciśnienia wody. Istotne jest również, aby powłoka nie przyklejała się do aparatury. Przyklejanie się powłoki do urządzeń utrudnia pracę i wpływa na nieprecyzyjne określenie przyrostu masy próbek po badaniu.

Ciekawą metodę badań proponują autorzy opracowania [20]. Zalecają oni stosowanie do badań wodoszczelności próbek walcowych o średnicy 25 cm i wysokości 50 cm z wykonanym wewnątrz otworem przelotowym, do którego tłoczy się wodę, przez specjalnie skonstruowane końcówki. Jest to rozwiązanie bardzo interesujące ze względu na możliwość zastosowania aparatury zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i "in situ".



2.7. Wartości ciśnień wody i czas badania.

Wartości ciśnień wody oraz czas badania przy danym ciśnieniu są zróżnicowane w poszczególnych krajach. Obowiązujące w Polsce i ZSRR normy dotyczące badań betonu hydrotechnicznego zalecają stopniowe zwiększenie ciśnienia wody co 8 h o 1 atmosferę do maksymalnej wartości 8 atm. Podobny sposób podany jest w normach czeskich, z tą różnicą, że maksymalne ciśnienie wynosi 12 atm. W projekcie normy [48] dotyczącym badań betonów hydrotechnicznych zaleca się stosowanie ciśnienia od 0,2 do 1,2 MPa stopniowo wzrastającego o 0,2 MPa. Czas utrzymywania każdej wartości ciśnienia ma wynosić 24 h oprócz ciśnienia max. 1,2 MPa, które proponuje się utrzymywać przez 8 h.

Normy niemieckie [72,73] przewidują badanie przy ciśnieniu 1,3,5 i 7 atmosfer. Czas utrzymywania ciśnienia 1-nej atmosfery wynosi 48 godzin, natomiast pozostałych wartości po 24 godziny. W Austrii stosuje się maksymalne ciśnienie P większe o 50% od ciśnienia wody działającego na konstrukcję i nie mniejsze niż 7 atmosfer. W pierwszych dwóch dobach badania stosuje się ciśnienie 0,2 P , w trzeciej dobie 0,4 P , a w czwartej 0,6 P . Po czterech dobach badania podwyższa się ciśnienie do maksymalnej wartości P , które utrzymuje się przez 5 dni. W przypadku, gdy próbki nie przeciekają czas badania przedłuża się do zaobserwowania przecieków lecz nie dłużej niż do 15 dni.

2.8. Czynniki wpływające na wodoszczelność betonu.

2.8.1. Składniki betonu.

2.8.1.1. Cement.

Na wodoszczelność betonu ma istotny wpływ ilość cementu. Z jednej strony dla ograniczenia szkodliwych zjawisk termicznych /niebezpieczeństwo powstania rys/ występujących podczas hydratacji cementu w betonach masowych konieczne jest stosowanie możliwie małej ilości cementu. Z drugiej jednak strony wodoszczelność, mrozoodporność, a także urabialność betonu wymaga dostatecznej ilości spoiwa. Gierych [19] określa orientacyjną ilość cementu, którą należy stosować do betonów o wymaganej wodoszczelności i mrozoodporności na 50+ 55 kg/100 l zaprawy. Dolna granica /50 kg/100 l zaprawy/ dotyczy piasku o niskim punkcie pyłowo-piaskowym /30% i $W/C=0,6$, a górna granica 55 kg/100 l zaprawy/ dotyczy piasku o wysokim punkcie pyłowo piaskowym 50% i $W/C=0,5$.

Rodzaj cementu nie ma istotnego znaczenia dla wodoszczelności betonów pod warunkiem, że zastosowane będą skuteczne środki przeciw rysom skurczowym /odpowiednie rozwiązanie konstrukcji, technologii wykonania budowli i prawidłowego pielęgnowania betonu [19]. Przy dużych masach betonowych pożądany jest cement o niskiej kaloryczności i powolnym przebiegu hydratacji. Przebieg hydratacji związany jest przede wszystkim ze składem chemicznym cementu i jego miąższością. Reakcje uwodnienia zachodzą wolniej w cementach o niskiej zawartości glinianu trójwapniowego C_3A i miąższości ograniczonej do 3000 cm^2/g wg Blaina [19]. W składzie chemicznym cementów produkowanych w ostatnich latach w Polsce obserwuje się stały wzrost zawartości

ci alkaliów $/Na_2O + K_2O/$ [44]. Są one łatwo rozpuszczalne w wodzie i ulegają wymywaniu co prowadzi do powiększenia się porów, a następnie obniżenia wodoszczelności betonu [8].

Oprócz tego związki alkaliczne wchodzą w reakcje z aktywną /rozpuszczalną/ krzemionką znajdującą się w niektórych kruszywach co powoduje pęczenie betonu i jego zniszczenie. Zjawisko niszczenia betonu pod wpływem reakcji alkaliów z krzemionką nasila się przy dostępie dużej ilości wilgoci w betonie [44]. Zależność pomiędzy wodoszczelnością betonu, a składem granulometrycznym /miałkością/ cementu została stwierdzona przez wielu badaczy [8,25,30,43,53]. Stwierdzono [8], że cement o grubym przemiale będzie dawał zaczyn o porowatości większej w porównaniu z zaczynem wykonanym z cementu drobniejszego przy tym samym stosunku wodno-cementowym. Wynika z tego, że wodoszczelność betonu rośnie wraz ze wzrostem miałkości ziarn cementu. Uważa się [8,43], że główną przyczyną wodoszczelności betonów wykonanych z cementów o drobnym przemiale jest zwiększenie ilości materiału dostępnego procesowi hydratacji określonego przez całkowite pole powierzchni cementu. Z drugiej jednak strony drobniejsze zmielenie cementu zwiększa jego koszt, podwyższa egzotermię i przyspiesza starzenie się. Drobnny cement daje również silniejsze reakcje z kruszywem alkali-aktywnym oraz powoduje, że zaczyn cementowy wykazuje większy skurcz i większą skłonność do pęknięcia. Podczas wysychania zaczynu cementowego zwiększa się jego przepuszczalność prawdopodobnie dlatego, że skurcz może zrywać pewne połączenia żelowe, otwierając w ten sposób nowe przejścia dla wody [43].

Do wykonania betonów hydrotechnicznych używa się cementów niezbyt miałkich. Dla przykładu podam, że np.: w USA, W. Brytanii

[20], gdzie bierze się również pod uwagę wpływ przemiału cementu na wodoszczelność betonu - do wykonania betonów hydrotechnicznych stosuje się cementy niezbyt miękkie o powierzchni właściwej $1700+2000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Nie stwierdzono żadnego związku pomiędzy wytrzymałością normową cementu, a wodoszczelnością betonu [25].

Niekorzystny wpływ na wodoszczelność wykazują cementy odznaczające się małą więźliwością wody, gdyż występuje wówczas większe rozsegregowanie składników betonu [20]. Wskutek przemieszczania się wody w masie betonowej powstają pionowe kanaliki i tworzą się kawerny pod grubszymi ziarnami kruszywa. Te zjawiska wpływają na obniżenie szczelności betonu znacznie niż porowatość samego zaczynu.

Korzystny wpływ mokrego przemiału cementu /aktywizacja cementu/ na szczelność stwardniałego zaczynu cementowego omówiono w pozycji [20]. Proces ten powoduje zwiększenie dyspersji, naruszenie zewnętrznej warstwy hydratów tworzących się w początkowym okresie wiązania na ziarnach cementu, co umożliwia lepszą hydratację poszczególnych ziarn cementu. W konsekwencji następuje zwiększenie szczelności stwardniałego zaczynu cementowego, a więc i betonu. Zostało to potwierdzone na podstawie badań prowadzonych w Politechnice Warszawskiej przy obróbce zaczynu za pomocą fal ultradźwiękowych.

Zastosowanie do cementów portlandzkich dodatków pucolan lub trasów [8,9,19], wpływa szczególnie na zmniejszenie kaloryczności cementu i skurozu betonu, a tym samym ogranicza możliwość powstawania rys. Natomiast nie jest jednoznacznie wyjaśniony wpływ dodatków na wodoszczelność.

2.8.1.2. Kruszywo.

Do betonów hydrotechnicznych należy stosować kruszywo posiadające zwartą strukturę wewnętrzną. Jak wynika z badań Gierycha [18] stosowanie kruszywa o strukturze zwartej zmniejsza nasiąkliwość betonu i poprawia jego wodoszczelność.

Znaczący wpływ na wodoszczelność betonu może mieć uziarnienie kruszywa, które powinno być tak dobrane, aby stos okruszków posiadał wysoką szczelność [18,19,31,32]. Gierych [18,19] według swoich badań zaleca, aby szczelność stosu okruszkowego kruszywa do betonów wodoszczelnych i mrozoodpornych wynosiła $0,73+0,74$. Przy doborze ilości poszczególnych frakcji w stosie okruszkowym o dużej szczelności należy kierować się następującymi zasadami:

- punkt piaskowy kruszywa powinien być możliwie niski, aby ograniczyć do minimum zawartość zaprawy w betonie,
- proporcje frakcji w stosie okruszkowym powinny być tak dobrane, aby krzywa uziarnienia stosu była zbliżona do dolnych krzywych granicznych według aktualnie obowiązujących norm,
- zawartość dużych frakcji kruszywa powinna być w miarę możliwości jak największa.

Przy zwiększeniu wielkości ziarn kruszywa [22,31,32] i prawidłowo dobranym stosie okruszkowym można uzyskać wysoką wodoszczelność betonu przy małej ilości cementu. Nie należy jednak przekraczać maksymalnego wymiaru kruszywa ponad 150 mm, ponieważ na skutek dużej różnicy w odkształceniach kruszywa i zaprawy mogą powstać mikrorysy a nawet pęknięcia.

Do betonów o wysokiej wodoszczelności nie powinno stosować się kruszywa posiadającego ziarna płaskie i wydłużone. Wpływ takiego kruszywa na obniżenie wodoszczelności spowodowa-

-ny jest gorszą urabialnością masy betonowej i zwiększoną możliwością powstawania tzw. porów sedymentacyjnych pod płaskimi, poziomo ułożonymi ziarnami kruszywa [19,54].

Ziarna słabe i zwiertzałe obniżają wodoszczelność betonu wskutek zwiększenia jego nasiąkliwości.

Istotny wpływ na wodoszczelność betonu ma struktura warstwy kontaktowej zaczyn-kruszywo [18,27].

Niezwykle istotne jest, aby powierzchnia ziarn kruszywa nie była zanieczyszczona cząsteczkami gliniasto-iłowymi, które obniżają przyczepność zaczynu cementowego do powierzchni ziarn. Nie mogą to być również ziarna zawierające aktywną krzemionkę, która w obecności wody może wchodzić w reakcje z alkaliarni zawartymi w cemencie i tworzyć nietrwałe krzemiany wapniowe lub potasowe, osłabiające warstwę stykową zaczynu z kruszywem, a tym samym powodując obniżenie wodoszczelności betonu.

Piaski stosowane do betonów wodoszczelnych powinny mieć punkt pyłowo piaskowy w granicach 45-50% [19]. Ilość piasku w betonie wynika z potrzebnej ilości zaprawy, która powinna zabezpieczyć dobrą urabialność betonu, co chroni beton przed rozsegregowaniem i ułatwia prawidłowe zagęszczanie.

2.8.1.3. Woda.

Woda użyta do zarabiania betonu powinna odpowiadać warunkom zawartym w aktualnych normach przedmiotowych [64]. Jeżeli woda odpowiada tym warunkom, to w zasadzie spełnia ona rolę składnika niezbędnego do uaktywnienia spoiwa. W mieszance betonowej woda odgrywa również rolę lepiszcza i smaru, czyli jest aktywna fizycznie. Stwierdzono, że tylko część wody, a mianowicie w ilości około 20% ciężaru cementu może być chemicznie związana z cementem. Zatem o jakości zaczynu tzn. jego

wytrzymałości jak i porowatości decyduje ilość niezwiązanej wody w betonie [8,9,43].

Jeżeli chodzi o zanieczyszczenia chemiczne i organiczne wody zarobowej, to należy pamiętać, że do betonu nie można stosować wód silnie zakwaszonych i zasadowych oraz zawierających zanieczyszczenia organiczne /np.: tłuszcze, oleje i glony/ [45], ponieważ zanieczyszczenia te wpływają niekorzystnie na przebieg hydratacji cementu i obniżają wytrzymałość jak również wodoszczelność betonu.

2.8.1.4. Domieszki i dodatki.

Wpływ domieszek i dodatków stosowanych do betonów na ich własności, a więc i wodoszczelność szeroko omówiono w wielu pozycjach literaturowych [2,19,21,28,37,54,58]. Najszerzej stosowanymi w wielu krajach jak również w Polsce są domieszki o charakterze powierzchniowo-czynnym i dodatki o charakterze wypełniającym. Do grupy pierwszych należą m.in. Innymi powszechnie stosowany w kraju Klutan N, Abiesod P-1, Hydrobet. Ostatnio wprowadzono szereg innych domieszek np.: Roksol B-1 - środek napowietrzający [34] i polifosforan sodu - środek przedłużający czas wiązania.

Wyżej wymienione domieszki są w większości substancjami działającymi napowietrzająco na mieszanke betonową. Powodują podczas mieszania masy betonowej powstawanie zamkniętych pęcherzyków. Jak wykazały badania [19,28,54,58] efektem stosowania domieszek napowietrzających jest przede wszystkim poprawa wodoszczelności i mrozoodporności betonu /rezerva próżni/ oraz polepszenie urabialności, co ma szczególne znaczenie przy mieszankach o małej zawartości cementu, a zatem o niskiej egzotermii. Poprawę urabialności przez napowietrzenie tłumaczy

się tym, że pęcherzyki powietrza, zachowujące dzięki napięciu powierzchniowemu kształt kulisty działają jak drobne ziarna kruszywa o bardzo małym tarciu powierzchniowym [43,50].

Napowietrzenie betonu spowodowane domieszkami wpływa ponadto na zmniejszenie wydzielania się mleczka cementowego. Trwała zawiesina cząsteczek cementu w wodzie powoduje zmniejszenie oddzielania się wody od betonu. Z tego względu procesy sedymentacyjne zachodzą znacznie wolniej.

Działanie uszczelniające domieszek na wodoszczelność betonów może być wyjaśnione tym, że kuliste, zamknięte pęcherzyki powietrza przerywają drożność kapilar i hamują przepływ wody [28,50].

Stosowanie domieszek do masy betonowej powinno być każdorazowo przeanalizowane pod kątem uzyskania odpowiedniego efektu, gdyż z danych literaturowych jak również z moich badań wynika, że skuteczność działania domieszek nie jest tak jednoznaczna jak to podają ich producenci ale zależy od wielu dodatkowych czynników. Gierych [19] stwierdza, że do większości polskich cementów skuteczniejsze jest stosowanie Klutanu niż Abiesodu. Zostało to potwierdzone również badaniami przeprowadzonymi przeze mnie.

Oprócz domieszek, które wprowadza się do mieszanki betonowej w bardzo małych ilościach /0,1-0,3% w stosunku do ciężaru cementu/ do betonów stosuje się dodatki. Dodatki wprowadzane są do masy betonowej w większych ilościach niż domieszki i uwzględnia się je w obliczeniach jako składnik objętościowy mieszanki betonowej. Najczęściej stosowane są dodatki wypełniające i aktywne. Dodatki wypełniające wpływają na obniżenie porowatości betonu przez wypełnienie porów. Do grupy tych

dodatków należą różnego rodzaju mączki kamienne oraz dodatki pucolanowe [35,46,56]. Dodatki te nie zwasze jednak prowadzą do poprawy wodoszczelności betonu.

Do dodatków aktywnych należą popioły lotne tworzące pod wpływem wody trwałe związki z cementem. Popioły lotne znajdowały coraz szersze zastosowanie w wielu krajach do produkcji betonów hydrotechnicznych [23]. Również i w Polsce poświęcono wiele badań [46] nad możliwością zastosowania popiołów lotnych do betonów. Należy jednak popioły bardzo dokładnie przebadać pod kątem ich jednorodności, składu chemicznego, wpływu na własności betonu [46]. Jak narazie stosowanie popiołów do betonów na cementach hutniczych, które najczęściej używane są w hydrotechnice w kraju nie przyniosło oczekiwanych korzyści. Gierych [19] oraz radziecka norma [78], nie zalecają stosowania popiołów łącznie z cementami hutniczymi jak również do betonów mrozoodpornych i wodoszczelnych. Słuszność powyższego zalecenia w zupełności została potwierdzona moimi badaniami, których wyniki omówiono w niniejszej pracy.

2.8.2. Własności mieszanki betonowej i betonu.

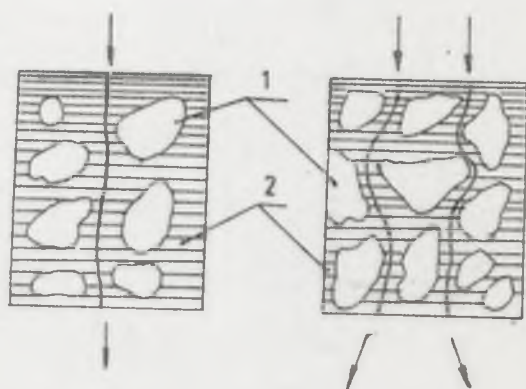
Do uzyskania betonu wodoszczelnego należy tak dobrać skład mieszanki, aby świeża masa betonowa charakteryzowała się odpowiednią urabialnością, konsystencją i szczelnością.

2.8.2.1. Urabialność mieszanki betonowej.

Mieszanka betonowa, z której ma być wykonany beton wodoszczelny powinna charakteryzować się urabialnością zapewniającą możliwość szczelnego wypełnienia form i uzyskania optymalnie zwartej, jednorodnej struktury betonu. Dobra urabialność mieszanki jest uwarunkowana dostateczną ilością i spoistością zaprawy w betonie [8,9,19,27]. Ilość zaprawy w celu uzyskania

dobrej urabialności wynikającej z jamistości żwiru, a jej spoiwość zależeć będzie od stosunku piasku do spoiwa. Stosunek ten powinien być tym większy im drobniejszy jest piasek użyty do betonu [19].

Należy jednak pamiętać o tym, że zaprawa decyduje o wodoszczelności betonu. Zbyt duża ilość zaprawy w betonie powoduje rozsuniecie większych ziarn kruszywa i skrócenie drogi filtracji, odwrotnie, mała ilość zaprawy w betonie wpływa na przedłużenie tej drogi. Schematycznie przedstawiono to na rys.2.3 [27].



Rys.2.3. Wpływ zawartości zaprawy w betonie na przenikanie wody.

1 - ziarna kruszywa

2 - zaprawa

Wydłużenie drogi filtracji powoduje zmniejszenie gradientu ciśnienia, a stąd prędkości przepływu, samego przepływu i wodochłonności. Zjawisko to korzystnie wpływa więc na poprawę wodoszczelności betonu. Jak wykazały badania przeprowadzone w Zakładzie Budownictwa Wodnego P.W. [31,32] możliwe jest uzyskanie betonów wodoszczelnych przy ilościach zapraw o wiele mniejszych od stosowanych dotychczas w betonach hydrotechnicznych w Polsce.

Jak już wspomniano powyżej na urabialność betonu ma wpływ nie tylko ilość ale i spoistość zaprawy. Spoistość ta w głównej mierze zależy od zawartości cementu i punktu pyłowo-piaskowego zwanego wskaźnikiem urabialności [19,27]. Poprawę urabialności można uzyskać również poprzez stosowanie różnego rodzaju domieszek /patrz p.2.8.1.4/.

2.8.2.2. Konsystencja mieszanki betonowej.

Z odpowiednią urabialnością mieszanki betonowej nierozzerwalnie wiąże się jej konsystencja, która z kolei zależy głównie od ilości wody zarobowej. Nadmiar wody odparowuje z betonu pozostawiając pory tzw.powietrzno-wodne. Pory te stanowią sieć połączonych kanalików, które w znacznym stopniu obniżają wodoszczelność betonu. Ilość wody wiąże się z wartością wskaźnika W/C. Pożądane jest, aby wskaźnik ten był jak najniższy. Zmniejszenie wskaźnika W/C bez pogorszenia urabialności i konsystencji osiąga się zwykle przez stosowanie odpowiednich domieszek najczęściej uplastyczniająco-napowietrzających /patrz p.2.8.1.4/.

W literaturze [57] można spotkać się z poglądem, że dla uzyskania betonu szczelnego najkorzystniejsza jest konsystencja plastyczna, z uwagi na trudność zagęszczania i możliwość powstawania porów w betonie o konsystencji gęstoplastycznej i wilgotnej. Taki pogląd obecnie jest już nieuzasadniony, gdyż przy stosowanych sposobach zagęszczania masy betonowej w dużych maszynach betonowych konstrukcji hydrotechnicznych istnieje możliwość prawidłowego zagęszczania betonów o konsystencji gęstoplastycznej.

2.8.2.3. Szczelność betonu.

Szczelność betonu, w tym również szczelność stwardniałego zaczynu cementowego jest podstawowym warunkiem uzyskania dobrej wodoszczelności, a tym samym zwiększonej odporności na agresję. Szczelność struktury betonu wynika nie tyle z ilości co z charakteru porów powietrznych w betonie. Pory zawarte w stwardniałym betonie podzielić można na dwie zasadnicze grupy:

- pory otwarte
- pory zamknięte.

Pory otwarte jak np.: raki i kawerny, kanaliki powietrzno-wodne, rysy i pęknięcia są bardzo niekorzystne w odniesieniu do wodoszczelności betonu.

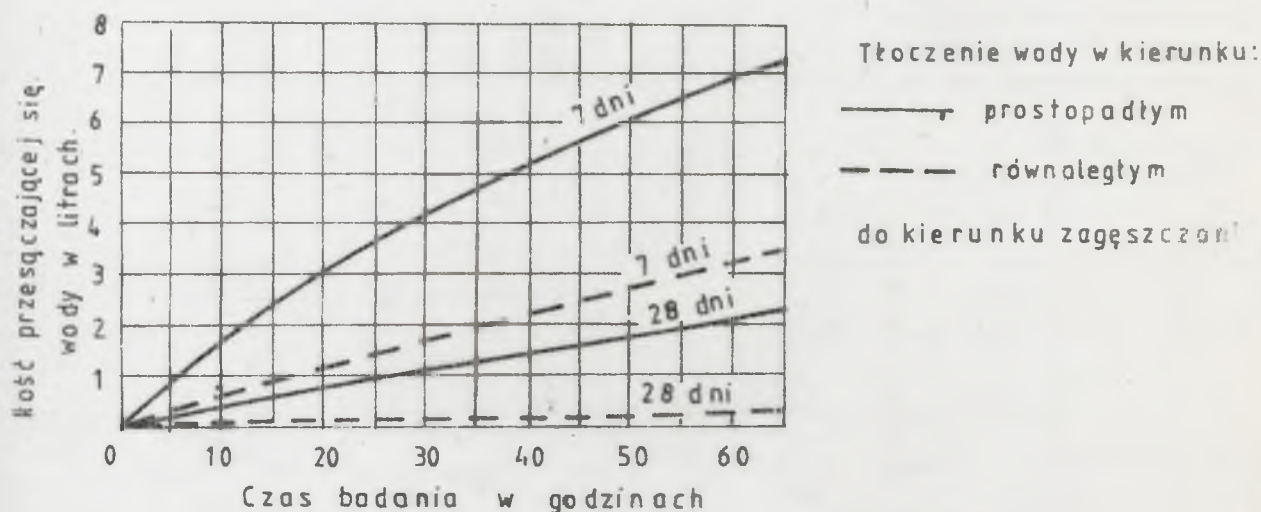
Pory zamknięte wytworzone najczęściej celowo przez działanie środków napowietrzających poprawiają wodoszczelność.

Otwarta sieć porów /kapilar, kanalików/ powstaje z dwóch przyczyn:

- wyparowania niezwiązanej chemicznie wody zarobowej /tzw.pory powietrzno-wodne/,
- sedymentacji.

Aby zmniejszyć do minimum ilość porów powietrzno-wodnych należy zmniejszyć ilość wody zarobowej, a więc i wskaźnik W/C /p.2.8.2.2/. Znaczący wpływ na wodoszczelność betonu mają zachodzące w masie betonowej procesy sedymentacyjne, gdyż powodują zwykle powstawanie w betonie porów otwartych. Woda jako lżejsza od pozostałych składników betonu wypływa do góry, przechwytyując najdrobniejsze cząsteczki cementu. Zachodzi zjawisko wydzielania mleczka cementowego, a w betonie powstają pionowe otwarte kanaliki. Pod grubymi ziarnami kruszywa oraz pod prętami zbrojenia powstają soczewki wypełnione wodą lub powietrzem. Pory te

jak wykazały badania [24,54] wpływają znacznie na obniżenie wodoszczelności betonu, szczególnie w kierunku prostym do kierunku układania betonu. Na rys.2.4 przedstawiono wpływ kierunku tłoczenia wody na wodoszczelność betonu. Z wykresów tych widać, że ilość przesączającej się wody zależy od kierunku przepływu wody w próbce betonowej.



Rys.2.4. Wodoszczelność betonu w zależności od kierunku tłoczenia wody [54].

Aby zapobiec tworzeniu się otwartych porów spowodowanych sedymentacją należy bardzo starannie dobierać uziarnienie kruszywa /patrz p.2.8.1.2/ oraz stosować odpowiednie domieszki napowietrzające-uplastyczniające, których działanie omówiono w p. 2.8.1.4.

Badaniem przyczyn powstawania porów i nieszczelności w betonach zajmował się Moszankow. Wyniki tych badań zamieścił w swojej książce Kirkasow [38].

Poniżej zamieszczono tablicę opartą o prace Moszankowa klasyfikującą różne rodzaje porów i nieszczelności oraz przyczyny ich powstawania, jak również wymiary, zawartość w objętości betonu i ich charakter.

Tablica 2.3. Charakterystyka nieszczelności w betonie [38].

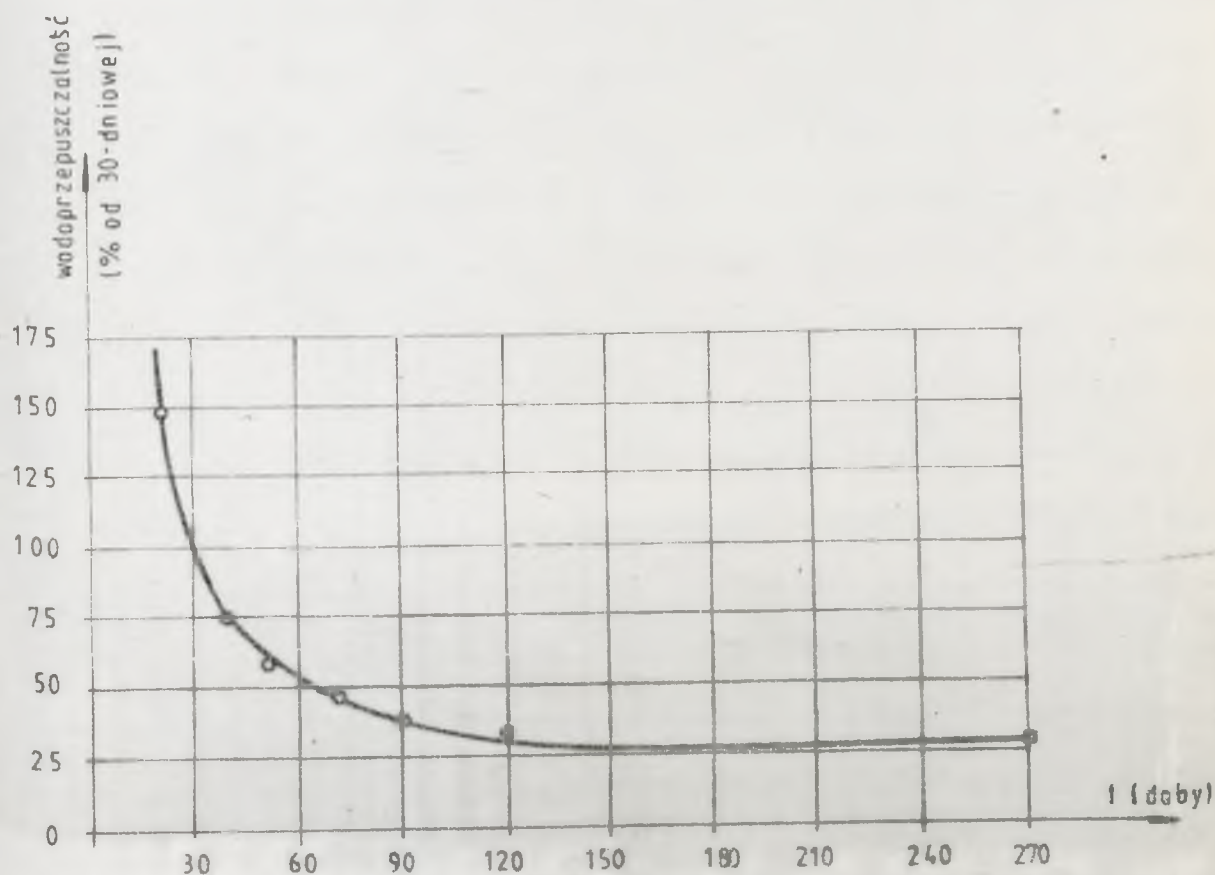
Rodzaj porów i nieszczelności	Podstawowe przyczyny powstawania nieszczelności	Typowe wymiary [mm]	Zawartość w obj. betonu %	Charakter porów i nieszczelności
1	2	3	4	5
Naturalne pory powietrzne	Niezamierzone wprowadzenie powietrza przy mieszaniu i układaniu betonu	0,1-5 mm	1-3	w większości zamknięte
Pory powietrzno-wodne	wyparowanie słabo związanej i nadmiernej ilości wody	1-50x x10 ⁻³ mm	do 15	
Pory i szczeliny poziome	Rozwarstwienie mieszanki beto nowej	0,1-1 mm	1-2	otwarte
Pory i szczeliny pod ziarnami grubego kruszywa	Rozwarstwienie międzyziarnowe	0,01-0,1 mm	0,1-1	
Pory żelu	Kontrakcja	5-20 x10 ⁻⁶ mm	0,5-1	zamknięte
Rysy skurozowe	Spadek wilgotności	1-5 mm	0-0,1	
Rysy termiczne	Szybki i znaczny spadek temperatury	zmienne	-	otwarte

Z danych przytoczonych w tablicy 2.3 wynika, że największy udział procentowy w objętości betonu mogą stanowić pory powietrzno-wodne /nawet do 15%/ oraz pory spowodowane rozsegregowaniem mieszanki /1-2%/. Pory te będą więc miały największy wpływ na wodoszczelność betonu zarówno ze względu na ich liczbę w betonie jak i to, że są to pory otwarte-połączone, a więc ułatwiające

przepływ wody. Nie bez znaczenia dla wodoszczelności są również inne wymienione w tabelicy nieszczelności.

2.8.3. Wpływ warunków i czasu dojrzewania betonu.

Na wodoszczelność betonu dojrzewającego w warunkach naturalnych oprócz wilgotności duży wpływ ma jego wiek. Jak wynika z badań, wodoszczelność betonu dojrzewającego w optymalnych warunkach wilgotnościowych znacznie zwiększa się z wiekiem betonu. Największy wzrost wodoszczelności można zaobserwować do okresu 90 dni. Na rys.2.5 przedstawiono przykładowo zależność wodoprzepuszczalności betonu od okresu jego dojrzewania /dojrzewanie w komorze klimatyzacyjnej w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$ i wilgotności względnej 90%/.



Rys. 2.5. Zależność wodoprzepuszczalności betonu od czasu jego dojrzewania [54].

Jak widać z rysunku najbardziej intensywny wzrost wodoszczelności, a spadek wodoprzepuszczalności betonu występuje w początkowym okresie dojrzewania tj. do 30 dni, następnie zaś 90 dni wzrost ten jest nieco mniejszy, a w okresie późniejszym znacznie mniejszy.

Doświadczenia przeprowadzone przez Stolnikowa [54] wykazały jednak, że po 365 dniach dojrzewania betonu w wodzie lub w wilgotnych trocinach wodoszczelność wzrasta o 200% w porównaniu z wodoszczelnością 90-cio dniową. Dojrzewanie betonu w takich warunkach jak stwierdza Stolnikow jest najkorzystniejsze, gdyż zapewnia znaczne i stałe podwyższenie wodoszczelności w czasie, co spowodowane jest długotrwałym procesem hydratacji.

Przy dojrzewaniu betonów w warunkach powietrzno-suchych następuje znaczna utrata wody wskutek jej odparowania. Zjawisko utraty wody w betonie jest przyczyną zwolnienia lub zaprzestania hydratacji cementu, co wpływa początkowo na opóźnienie wzrostu wodoszczelności, a w niektórych przypadkach /przy długich okresach intensywnego wysychania betonu/ nawet do jej obniżenia. Dlatego też zmiana wodoszczelności w czasie nierozdzielnie wiąże się z warunkami dojrzewania betonu. Badania Stolnikowa [54] wykazują, że największe różnice w wodoszczelności pomiędzy próbkami przechowywanymi w optymalnych warunkach wilgotnościowych, a próbkami w warunkach powietrzno-suchych występują po długich okresach czasu. Stwierdzono [54] również, że największy wzrost wodoszczelności w czasie długotrwałego dojrzewania betonu w warunkach dużej wilgotności występuje w betonach z dosyć wysoką wartością wskaźnika w/c /rzędu 0,7/, zaś betony o w/c rzędu 0,5 wykazują mniejszy wzrost wodoszczelności.

Według obowiązującej normy [63] dotyczącej betonu zwykłego

go jak również normy [69] dotyczącej betonu hydrotechnicznego, temperatura dojrzewania próbek betonowych powinna wynosić $+18 \pm 2^{\circ}\text{C}$, a wilgotność względna powietrza powyżej 90%.

Temperatura dojrzewania poniżej $+10^{\circ}\text{C}$ uważana jest jako obniżona, a temperatura powyżej $+25^{\circ}\text{C}$ jako podwyższona [63]. Jak wynika z danych przytoczonych przez Muszyńskiego [39a] temperatura poniżej $+10^{\circ}\text{C}$ wpływa na zwolnienie procesu wiązania cementu, co objawia się przede wszystkim w powolniejszym przyroście wytrzymałości. Przy spadku temperatury poniżej -1°C do -4°C następuje stopniowa zamiana części wody zarobowej w betonie w lód, co prowadzi do zahamowania procesu wiązania i twardnienia betonu. Przy zamarzaniu wody w betonie tworzą się w całej strukturze betonu igiełkowate kryształy lodu. Najbardziej niekorzystny wpływ niskiej temperatury na świeży beton zaznacza się, gdy zamarznięcie betonu nastąpi w początkowym okresie jego wiązania. Wówczas bowiem reakcja fizyko-chemiczna jest zatrzymana. Zamarzająca woda zwiększając swoją objętość powoduje rozsuniecie słabo związanych cząsteczek cementu i drobnego kruszywa. Po odtajaniu proces wiązania zostaje wznowiony, ale poszczególne ziarna cementu i kruszywa nie powracają do pierwotnego położenia. Po stwardnieniu beton taki uzyskuje niewielką wytrzymałość jest kruchy, rozsypuje się i nie jest wodoszczelny. Stopień zniszczenia struktury świeżego betonu znacznie wzrasta, gdy w okresie stwardnienia betonu następuje na przemian kilkakrotne zamarzanie i tajanie wody zawartej w betonie. Odporność na destrukcyjne działanie mrozu uzyskuje beton o wytrzymałości w granicach 8 MPa.

Temperatury otoczenia powyżej $+25^{\circ}\text{C}$, silne nasłonecznienie oraz niska wilgotność powietrza mogą wywołać niekorzystny wpływ na twardniejący beton, a w szczególności na jego wodoszczelność.

Te czynniki bowiem powodują:

- duże straty wody niezbędnej do wiązania cementu na skutek intensywnego parowania już podczas mieszania składników, a następnie w czasie układania i zagęszczania świeżej masy betonowej oraz w okresie twardnienia betonu,
 - znacznie przyspieszenie wiązania i twardnienia betonu, co powoduje utratę plastyczności świeżej masy oraz ograniczenie możliwości dobrego zagęszczenia betonu,
 - skurcz powierzchniowy betonu na skutek utraty wody /wysuszenie powierzchniowej warstwy/,
 - możliwość powstania rys i pęknięć, gdy beton jest jeszcze w stanie plastycznym i w początkowym okresie dojrzewania.
- W celu uniknięcia niekorzystnego wpływu czynników atmosferycznych na wodoszczelność betonu należy stosować staranną pielęgnację betonu możliwie najwcześniej po jego ułożeniu i zagęszczeniu /patrz p.2.8.4/.

Na wodoszczelność betonu ma również wpływ stan naprężeń. Szerokie badania w tym kierunku przeprowadzono w ZSRR. Stwierdzono [52], że wraz ze wzrostem naprężeń rozciągających następowało obniżenie wodoszczelności betonu. Przy wzroście naprężeń ściskających /do momentu powstania mikro-rys w betonie/ następował stopniowy wzrost wodoszczelności betonu. Doświadczenia [52] wykazały, że im mniejszy jest współczynnik filtracji betonu /przy jednakowych wytrzymałościach/, tym większy jest wpływ stanu naprężeń w betonie na jego wodoszczelność.

2.8.4. Wpływ innych czynników technologicznych na wodoszczelność betonów.

Uzyskanie betonu o wymaganej wodoszczelności zależy w dużym stopniu od jakości wykonawstwa. Istotnym jest zapewnienie jednorodności betonu, co w przypadku betonów hydrotechnicznych jest szczególnie trudne, gdyż betony te zawierają zwykle niezbyt duże ilości cementu, są gęstoplastyczne i wykonywane z kruszyw o dużych ziarnach.

Podstawowym warunkiem decydującym o jednorodności betonu jest jego urabialność, która z kolei zależy od jakości oraz od proporcji składników mieszanki betonowej /patrz p.2.3.2/. W cyklu produkcyjnym betonu należy przewidzieć urządzenia zapewniające dokładne dozowanie i wymieszanie wszystkich składników betonu w całej objętości zarobu. W dalszej kolejności uzyskanie szczelnego betonu zależy od prawidłowego i równomiernego zagęszczania masy betonowej. Zagęszczanie powinno wykluczać możliwość powstania kawern i raków w konstrukcji. Z danych literaturowych [27] wynika, że najlepsze zagęszczenie uzyskuje się przez zastosowanie vibratorów wglębnych o częstotliwości drgań powyżej 10000 na minutę. Czas wibrowania powinien być taki, aby wydzielone zostało powietrze z masy betonowej, ale by nie nastąpiło rozsegregowanie składników /nadmierne wydzielanie mleczka cementowego/. Ostatnio w krajach wysoko rozwiniętych stosuje się betony o konsystencji wilgotnej, które są zagęszczane warstwami przez walcowanie /podobnie jak nasypy ziemne/. Uzyskuje się w ten sposób bardzo szczelne betony.

Wykonawstwo powinno zapewnić również odpowiednią pielęgnację betonu w czasie jego dojrzewania. Pielęgnacja betonu może być prowadzona różnymi sposobami np. przez polewanie wodą czy

zabezpieczenie powierzchni przed nadmierną utratą wilgoci. Najczęściej popełnianym błędem w wykonawstwie jest niestarańna pielęgnacja i nieprzestrzeganie wymaganego okresu pielęgnacji.

W okresie zimowym świeży beton powinien być ochroniony przed zamarzaniem aż do momentu uzyskania wytrzymałości powyżej 8 MPa. Przy wykonywaniu betonów w temperaturze poniżej 0°C, składniki betonu należy podgrzewać, aby uniknąć zamarzania wody zarobowej. Można stosować również dodatki chemiczne obniżające temperaturę zamarzania wody. Beton wykonany w niskich temperaturach z podgrzewanych składników według Michajlewa [39] uzyskuje wodoszczelność 1,5 do 2 razy większą niż beton wykonywany ze składników nie podgrzewanych.

Przy układaniu betonu szczególnie w dużych masywach należy przestrzegać wszelkich zabiegów technologicznych zabezpieczających przed powstawaniem rys termicznych. W tym celu należy ustalić wysokość i wielkość bloków, tempo robót, przerwy technologiczne, w razie potrzeby stosować odpowiednie zabiegi obniżające temperaturę w czasie wiązania, prowadzić odpowiednią pielęgnację itp. [51].

3. CEL I ZAKRES PRACY.

W poprzednich rozdziałach zwrócono uwagę na problemy związane z trudnościami występującymi przy projektowaniu i wykonywaniu betonów wodoszczelnych, jak również ich badaniu i przyjmowaniu odpowiedniego kryterium do oceny tej niezmiennie ważnej cechy betonu hydrotechnicznego. Przeprowadzone studia literaturowe wykazały, że przyjmowane w różnych krajach kryteria oceny wodoszczelności znacznie różnią się od siebie. Różnice te wynikają przede wszystkim z przyjętej metodyki badań. Studia i badania związane z zagadnieniami wodoszczelności

betonu prowadzone przez wielu badaczy nie rozwiązały szeregu istotnych spraw np.: nie ustalono dotychczas jednoznacznego kryterium oceny wodoszczelności betonu w badaniach laboratoryjnych, a tym bardziej w konstrukcji.

W pracy postawiłam sobie zadanie przyjęcia metody badań i kryteriów oceny wodoszczelności betonu, które umożliwiłyby również określenie wodoszczelności betonu w konstrukcji.

Celem mojej pracy było:

- badania i analiza możliwych kryteriów wodoszczelności i wykazanie, że kryterium wodochłonności jest bardziej racjonalne i bardziej przydatne dla praktyki budowlanej niż stosowane obecnie kryterium nieprzeciekania,
- opracowanie metodyki badań wodochłonności i udoskonalenie do tego celu stosowanej w Zakładzie Budownictwa Wodnego aparatury,
- badania wpływu wybranych czynników na wodoszczelność umożliwiających dokonanie racjonalnego wyboru kryteriów oceny.

Badania miały również na celu ustalenie zależności pomiędzy obowiązującą według normy [67] marką wodoszczelności, a wodochłonnością jednostkową betonu stosowaną przeze mnie do oceny wodoszczelności. Ocena wodoszczelności na podstawie wodochłonności jednostkowej betonu stwarza możliwość opracowania metody badań "in situ" i porównywania uzyskanych wyników badań w konstrukcji z wynikami uzyskanymi w laboratorium.

Zakres pracy wynikał z zadań, które postanowiłam rozwiązać przy opracowywaniu kryteriów oceny wodoszczelności betonów hydrotechnicznych. Badania obejmowały następujące zagadnienia:

- udoskonalenie i adaptację opracowanej w Zakładzie Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej aparatury do badań wodoszczelności betonu, umożliwiającą precyzyjny pomiar ilości

tłoczonej wody do próbek,

- określenie wpływu "napowietrzenia" wody tłoczonej do próbek na wyniki badań wodoszczelności,
- określenie wpływu stosowanych domieszek i dodatków na wodoszczelność betonu,
- określenie wpływu kierunku tłoczenia wody do próbek na wyniki badań wodoszczelności,
- określenie wpływu wielkości i kształtu próbek na wyniki badań wodoszczelności,
- określenie zależności pomiędzy wodochłonnością jednostkową betonu, a ciśnieniem oraz marką wodoszczelności.

Badania prowadzone były na trzech typach próbek wykonanych z 25 mieszanek betonowych modyfikowanych domieszkami i dodatkami. Przebadano 600 sztuk próbek i uzyskano około 25 tysięcy wyników pomiarowych.

4. BADANIA WŁASNE

4.1. Aparatura do badań

4.1.1. Opis ogólny.

W Zakładzie Budownictwa Wodnego P.W. skonstruowana została oryginalna aparatura przeznaczona do badania wodoszczelności betonu. Aparatura ta została wprowadzona do projektu normy "Beton hydrotechniczny" [48]. Schematyczne rozwiązanie tej aparatury przedstawiono na rysunku 4.1. [48]. Jak widać z rysunku aparatura składa się z następujących zasadniczych części:

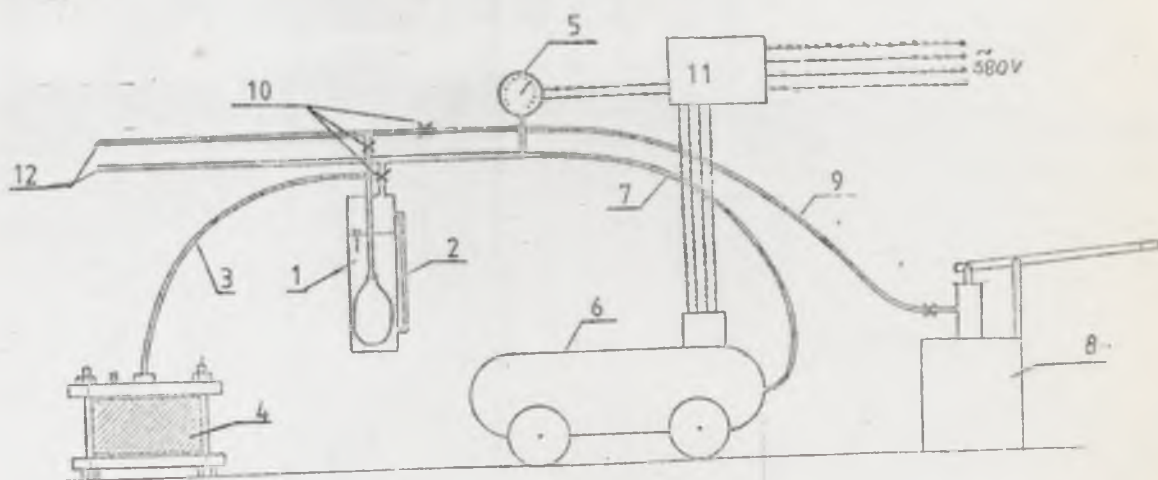
- zbiornika ciśnieniowego skonstruowanego w taki sposób, aby możliwe było oddzielenie wody tłoczonej do próbek od sprężonego powietrza i pomiar ilości wody wtlaczanej w beton,
- urządzeń doprowadzających wodę do badanych próbek, zaopatrzonych w oryginalne uszczelnienia,
- automatycznego urządzenia utrzymującego określone ciśnienie wody tłoczonej do próbek.

Ubytki wody spowodowane dużą wodochłonnością betonu lub jego przepuszczalnością można uzupełnić w czasie badania za pomocą ręcznej pompy.

4.1.2. Opis szczegółowy.

4.1.2.1. Zbiornik ciśnieniowy.

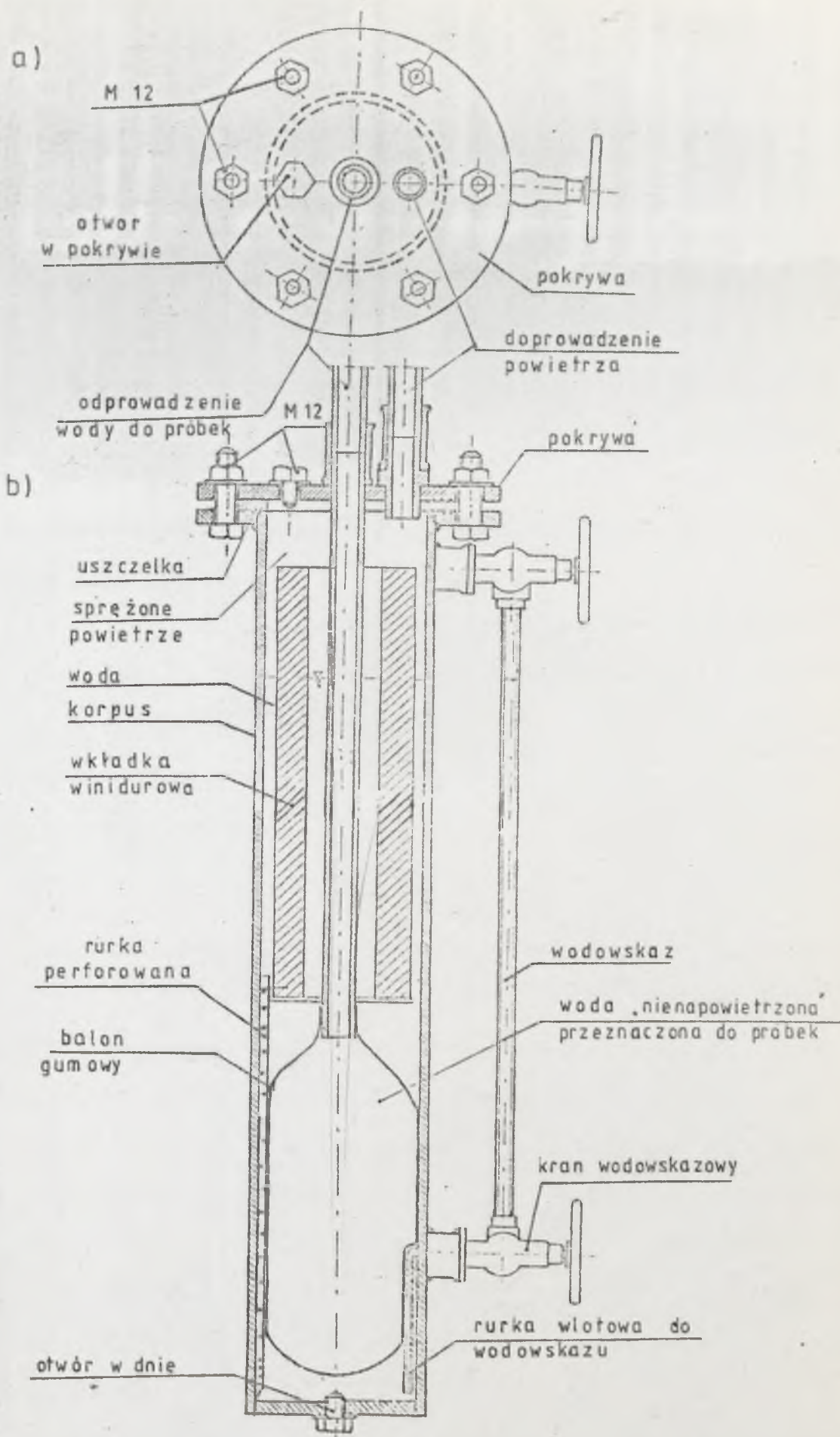
Podstawową część aparatury do badań wodoszczelności stanowi zbiornik ciśnieniowy /rys.4.2/ za pośrednictwem którego woda tłoczona jest do badanych próbek. Jak widać z rysunku woda tłoczona do próbek jest zabezpieczona przed kontaktem ze sprężonym powietrzem elastycznym balonem gumowym, zamurzonym w wodzie znajdującej się w zbiorniku. Ilość wody w balonie można uzupełnić za pomocą pompy /rys.4.1/. Woda znajdująca się w zbiorniku



Rys.4.1. Schemat aparatury do badania wodoszczelności betonu.

Oznaczenia: 1-zbiornik ciśnieniowy, 2-wodowskaz, 3-przewód doprowadzający wodę do próbki, 4-badana próbka, 5-manometr kontaktowy, 6-agregat ciśnieniowy, 7-przewód doprowadzający sprężone powietrze do instalacji 8 - pompa wodna, 9 - przewód doprowadzający wodę do instalacji, 10-zawory ciśnieniowe, 11-urządzenie do automatycznego utrzymywania określonego ciśnienia wody tłoczonej do próbek, 12-doprowadzenie powietrza i wody do dalszych próbek poddanych badaniu.

nie jest tłoczona do próbek lecz wywiera ciśnienie na wodę w balonie, co pozwala na pomiar ubytków wody z balonu /woda wtłoczona w beton/ przy pomocy wodowskazu zamieszczonego na zewnątrz zbiornika. Wewnątrz zbiornika znajduje się perforowana rurka miedziana umożliwiającą swobodny przepływ wody między górną, a dolną powierzchnią balonu. W pierwotnej wersji aparatu-



Rys. 4.2. Zbiornik ciśnieniowy.

a/ widok z góry

b/ przekrój pionowy

ry opracowanej w Zakładzie nie było tej rurki i przy uzupełnianiu wody w balonie mogło wystąpić podniesienie poziomu wody na wodowskazie, wskutek zablokowania przepływu wody przez balon przylegający ściśle do ścian zbiornika. Miało to oczywiście ujemny wpływ na wyniki pomiaru ilości wody wtłaczanej do próbek. Wewnątrz zbiornika umieszczona jest wkładka z rur winidurowych, której zadaniem jest zmniejszenie objętości wewnętrznej zbiornika i uzyskanie w ten sposób zwiększenia dokładności odczytów na wodowskazie. Odczyty na wodowskazie wykonywane są z dokładnością do 1 mm, co odpowiada objętości wody równej $3,64 \text{ cm}^3$.

Aparatura stosowana w moich badaniach składa się z 12-tu stanowisk badawczych, z których każde zaopatrzone jest w oddzielny zbiornik ciśnieniowy. Zawory ciśnieniowe umieszczone na instalacji powietrznej i wodnej umożliwiają wyłączenie poszczególnych stanowisk.

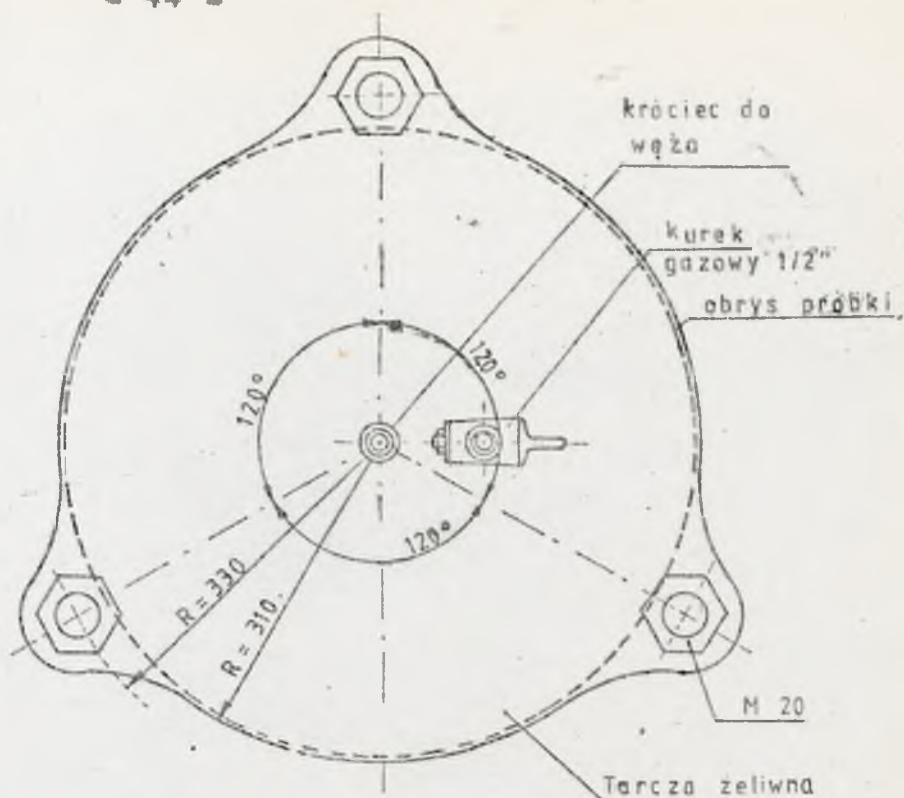
4.1.2.2. Doprowadzenie wody do próbek.

W badaniach stosowano dwa rodzaje urządzeń doprowadzających wodę do próbek betonowych, co wynikało z kształtu i rodzaju próbek stosowanych do badań /patrz p.4.2.4/. Przy badaniu wodoszczelności na próbkach walcowych o średnicy 30 cm i wysokości 15 cm oraz na kostkach sześciennych o boku 20 cm stosowano głowice żeliwne /rys.4.3/. W stosunku do aparatury zalecanej normą [67] wprowadzone zostały następujące zmiany:

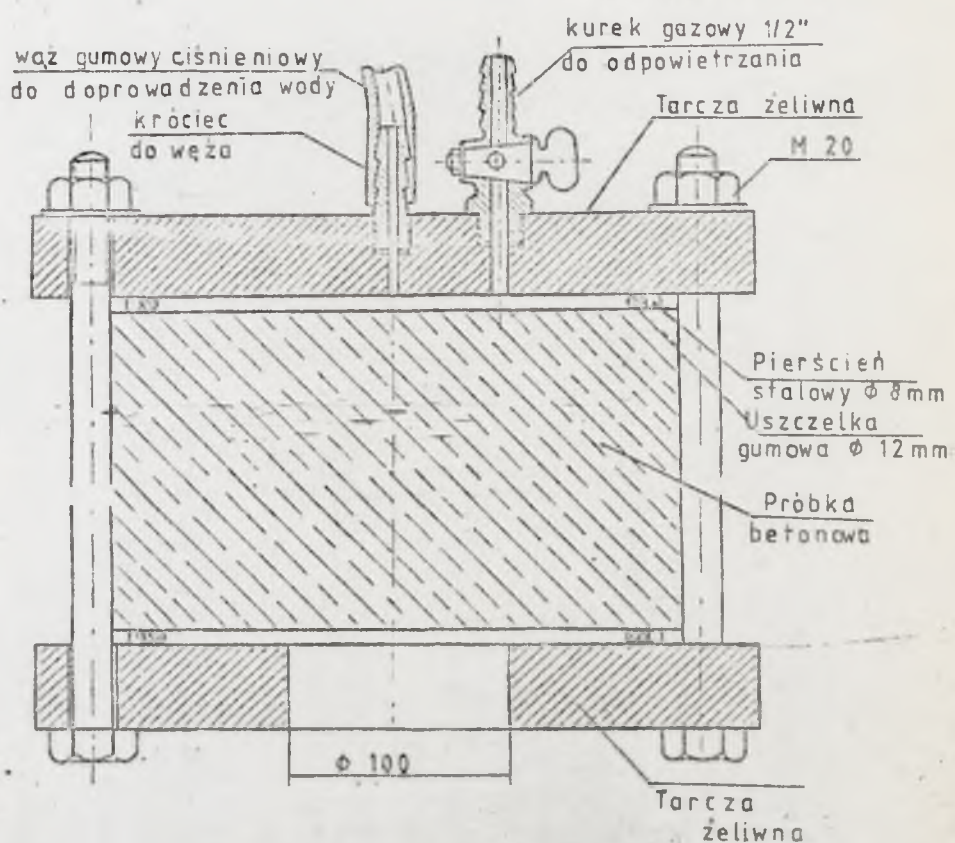
- zamocowano kurek gazowy na głowicy doprowadzającej wodę, który umożliwia odpowietrzenie przestrzeni pomiędzy próbką, a głowicą,
- połączono zbiornik ciśnieniowy z głowicą elastycznym węzłem

a)

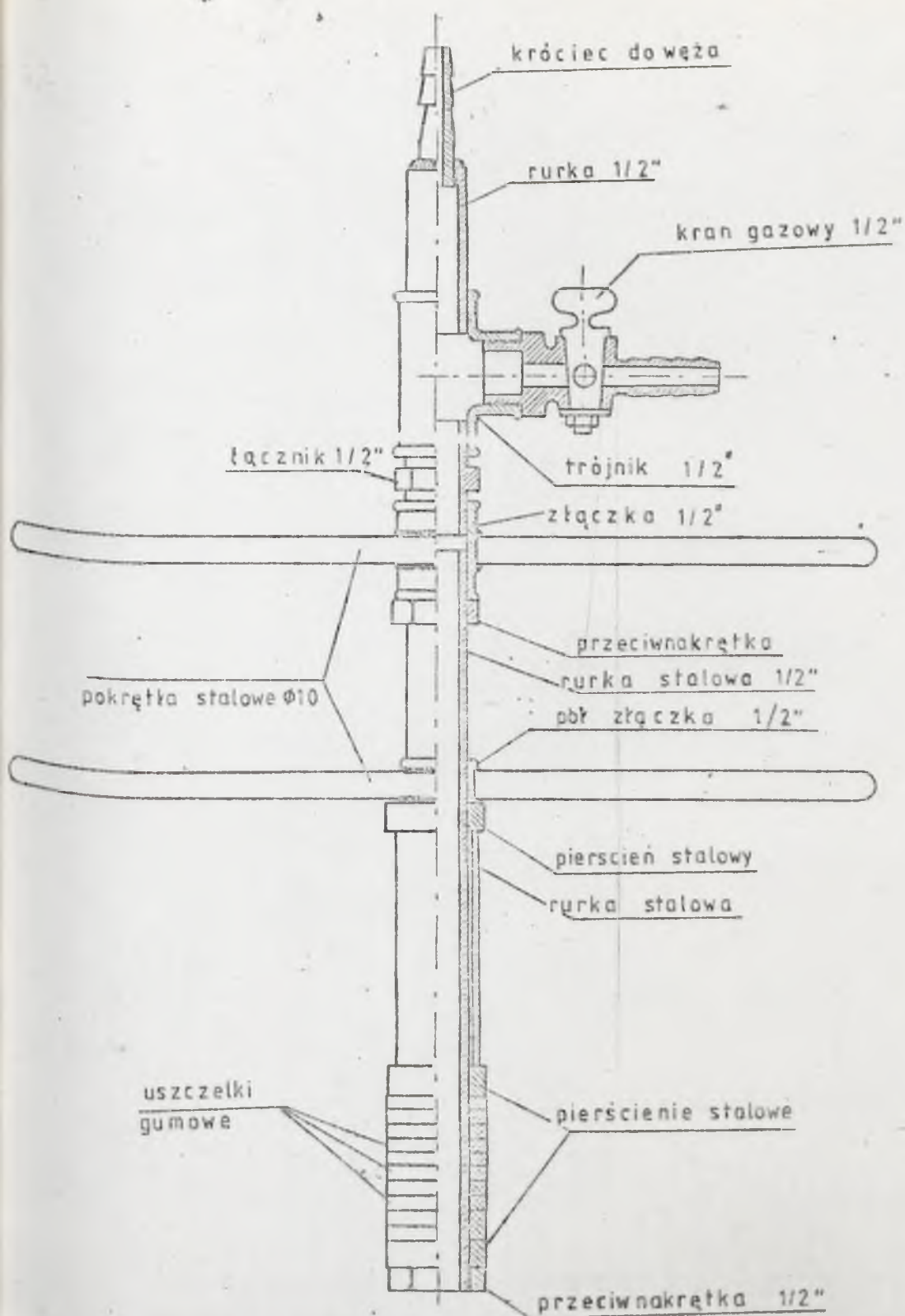
- 44 -



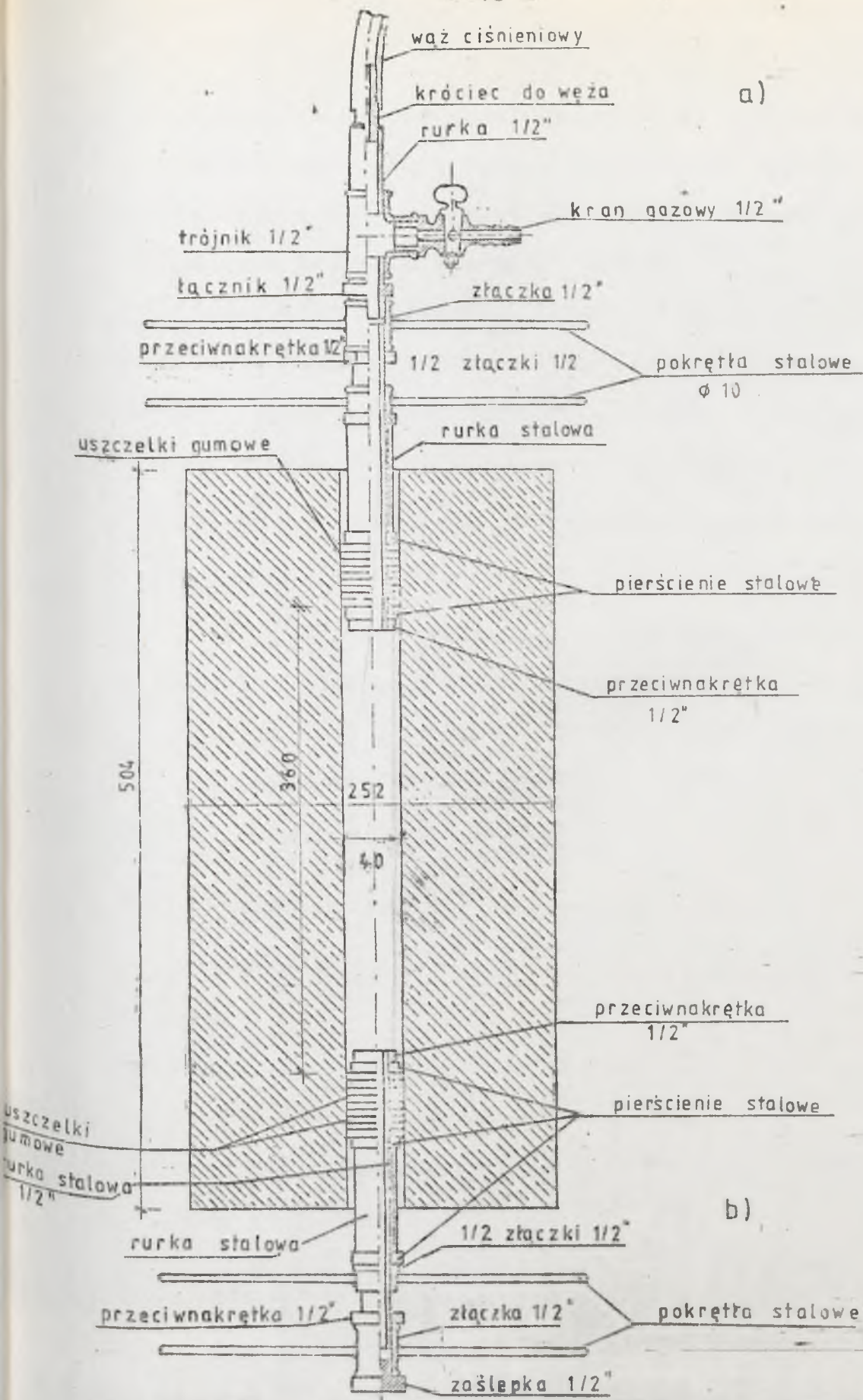
b)



Rys.4.3. Doprowadzenie wody pod ciśnieniem do próbek walcowych o średnicy 30 cm i wysokości 15 cm za pomocą głowic żeliwnych,
 a - widok z góry
 b - przekrój pionowy



Rys. 4.4. Końcówka z uszczelnieniem doprowadzając wodę do próbek z otworem /typ K-1/



Rys.4.5. Schemat badania próbek walcowych o średnicy 25 cm i wysokości 50 cm przy zastosowaniu końcówek

a - typ K-1

b - typ K-2

umożliwiającym dowolne ustawienie próbki podczas badania, co ułatwiało obserwację dolnej powierzchni próbek, - zastosowano proste uszczelnienie z pierścieni stalowych i gumowych pomiędzy głowicą a próbką.

Przy badaniu próbek walcowych o średnicy 25 cm i wysokości 50 cm wykonanych z otworem przelotowym stosowano specjalne końcówki, które przedstawiono na rys.4.4, a na rys.4.5. przedstawiono położenie tych końcówek w próbce.

4.1.2.3. Urządzenie do automatycznego utrzymywania ciśnienia wody.

W celu usprawnienia badań zastosowano automatyczne urządzenie, które umożliwiło utrzymywanie określonej wielkości ciśnienia za pomocą manometru kontaktowego. Dokładność wskazań tego manometru wynosi $\pm 0,025$ MPa.

4.2. P r ó b k i d o b a d a ń

4.2.1. Materiały do wykonania próbek.

Do wykonania mieszanek betonowych stosowano następujące składniki:

- piasek kopalny o uziarnieniu $0 + 2$ mm
- piasek wiślany o uziarnieniu $0 + 2$ mm
- Żwir o uziarnieniu $2 + 16$ mm
- kliniec bazaltowy $8 + 32$ mm
- grys sjenitowy $16 + 32$ mm
- cement hutniczy 25 z Cementowni Warszawa
- wodę wodociągową
- Klutan-N - domieszka napowietrzająco-uplastyczniająca
- Abiesod P-1 - domieszka napowietrzająca,

- Roksól B-1 - domieszka napowietrzająca
- Polifosforan sodu - domieszka opóźniająca czas wiązania cementu
- Popioły lotne z EC "Siekierki".

4.2.2. Receptury mieszanek betonowych do wykonania próbek.

Do wykonania mieszanek betonowych stosowano kruszywo mieszane /otoczkowe + łamane/. Ustalono składy dwóch stosów okruchowych o maksymalnej średnicy ziarn 40 mm. Składy granulometryczne stosów okruchowych podano w tablicy 4.1. Skład S-1 dobrano według normowych krzywych granicznych, a stosu S-2 według krzywej Fullera.

Tablica 4.1. Składy granulometryczne stosów okruchowych.

Stos okruchowy S-1			Stos okruchowy S-2		
wielkość frakcji mm	rodzaj kruszywa	zawartość frakcji %	wielkość frakcji mm	rodzaj kruszywa	zawartość frakcji %
0+2	piasek kopalny	30	0+2	piasek wiślany	25
2+4 4+8	zwir	13 7	2+4 4+8 8+16	zwir	10 15 21
8+16 16+32	kliniec bazaltowy	35 15	16+32	grys sjenitowy	29

Na bazie powyższych stosów okruchowych zaprojektowano wg 63 przy założeniu konsystencji gęstoplastycznej i klasy B-150 składy dwóch podstawowych mieszanek betonowych.

Na bazie tych mieszanek doświadczalnie ustalono 25 receptur składu betonów, stosując różnorodne domieszki i dodatki.

Składy poszczególnych mieszanek i ich oznaczenia zestawiono w tablicach 4.2 i 4.3.

Tablica 4.2. Składy mieszanek betonowych wykonanych na bazie stosu okruczowego
o symbolu S-1 /patrz tablica 4.1/

Składnik betonu	Ilość składnika w kg na m ³ betonu dla poszczególnych serii												
	1	2	2a	2b	3	3a	3b	4a	4	5	6	7	8
Kruszywo	2155	2155	2155	2155	2155	2155	2155	2155	2155	2102	2102	2155	2155
Cement	267	267	267	267	267	267	267	267	267	267	240	214	240
Woda	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148	148
Stosunek w/c	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,62	0,69	0,62
Nazwa domieszki i ilość w % w stosunku do ciężaru cementu	-	Klu- tan N 0,1%	Klu- tan N 0,2%	Klu- tan N 0,3%	Abie- sod P-1 0,1%	Abie- sod P-1 0,2%	Abie- sod P-1 0,3%	rok- sol B-1 0,05%	rok- sol B-1 0,1%	-	-	-	-
Dodatek popiołu [kg]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	52	35	17

Tablica 4.3. Składy mieszanek betonowych wykonanych na bazie stosu okruchowego o symbolu 3-2 /patrz tabela 4.1/

Składnik	Ilość składnika w kg na m ³ betonu dla poszczególnych serii oznaczonych symbolami											
	A	A-0	B-1	A-1	A-2	A-3	A-4	R	R-1	P	P-1	P-2
Kruszywo	2085	2085	2085	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106	2106
cement	250	250	250	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Woda	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133	133
Stosunek w/c	0,53	0,53	0,53	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Domieszka w % w stos. do ciężaru cementu	-	Klutan N 0,1%	Abie-sod P-1 0,1%	-	Klutan N 0,1%	Klutan N 0,2%	Klutan N 0,3%	Roksol B-1 0,05%	Roksol B-1 0,1%	Poli-fosforan sodu 0,1%	Poli-fosforan sodu 0,2%	Poli-fosforan sodu 0,3%

Wszystkie mieszanki sprawdzono metodą VE-Be i określono ich szczelność. Wykonano próbki kostkowe o boku 15 cm i po 90-ciu dniach dojrzewania określono wytrzymałość na ściskanie.

Wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych poszczególnych mieszanek i wytrzymałości betonu zestawiono w tablicy 4.4.

Z wymienionych w tablicy 4.2 i 4.3 mieszanek betonowych wykonano próbki przeznaczone do badań wodoszczelności.

4.2.3. Wykonanie próbek do badań wodoszczelności betonu.

Składniki przeznaczone do wykonania mieszanek betonowych ważono z dokładnością do 0,1 kg., dodatki i domieszki z dokładnością do 0,001 kg. Domieszki wprowadzano do mieszanki betonowej w roztworze wody zarobowej. Cement i kruszywo mieszano w betoniarni -ce wolnospadowej o pojemności 150 l w ciągu 1 minuty "na sucho", a następnie po dodaniu wody mieszano przez dalsze 3 minuty.

Masę betonową nakładano z nadmiarem w formy co po zawibrowaniu wystarczało zwykle do pełnego wypełnienia objętości formy.

Mieszanke zagęszczano na stole vibracyjnym o częstotliwości drgań około 4000 na minutę. Po 24h próbki rozformowywano i do momentu badania przechowywano w komorze klimatyzacyjnej w temperaturze $18 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i przy wilgotności względnej powietrza powyżej 90%. Okres przechowywania próbek wynosił 90 dni. Przed rozpoczęciem badania próbki wyjmowano z komory klimatyzacyjnej i przechowywano przez 24 godziny w pomieszczeniu laboratoryjnym w celu osuszenia powierzchni. Na osuszoną próbkę nakładano powłokę wodoszczelną /zgodnie z rys.4.6/ z masy izolacyjnej sporządzonej na bazie żywicy epidian 5 z utwardzaczem Z-1.

Powłokę wodoszczelną nakładano w dwóch warstwach. Pierwszą warstwę stanowiła powłoka gruntująca z masy żywicznej z rozcieńczalnikiem, po jej wyschnięciu nakładano powłokę właściwą z wypełniaczem mineralnym.

Tablica 4.4. Wyniki badań własności mieszanek i betonów przeznaczonych do badań wodoszczelności.

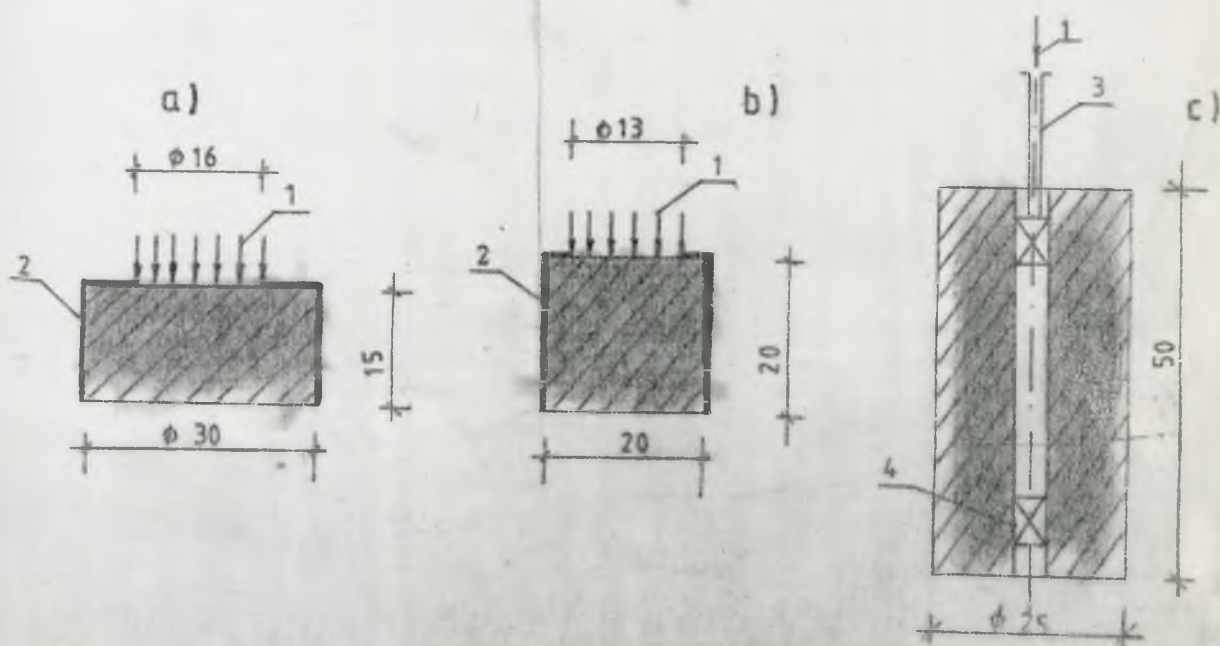
Nazwa serii betonu wg tabl. 4.2 4.3.	konsystencja Ve-Be [s]	Gęstość pozorna mieszanki [kg/dm ³]	Porowatość [%]	Średnia wytrzymałość na ściskanie kostek ϕ 15 po 90 dniach dojrzewania [MPa]
1	2	3	4	5
1	30	2,532	1,4	26,8
2	25	2,507	2,1	28,1
2a	23	2,505	2,8	29,00
2b	20	2,500	3,5	28,20
3	20	2,508	2,5	25,10
3a	20	2,504	2,7	27,30
3b	19	2,498	3,5	26,50
4a	15	2,513	2,1	27,20
4	12	2,500	2,7	26,50
5	20	2,563	0,3	24,50
6	17	2,485	1,8	24,00
7	20	2,506	2,0	19,30
8	15	2,490	2,0	24,60
A	28	2,448	1,4	25,20
A-0	24	2,440	2,0	29,10
B-1	20	2,410	2,6	24,20
A-1	30	2,440	1,3	20,00
A-2	28	2,435	2,0	21,00
A-3	26	2,429	3,0	23,00
A-4	23	2,414	3,1	23,00
R	20	2,420	2,2	22,10
R-1	18	2,402	2,6	21,00
P	25	2,425	2,0	22,64
P-1	22	2,414	2,1	24,59
P-2	20	2,414	2,3	25,20

4.2.4. Wielkość i kształt próbek.

Badania wodoszczelności betonu prowadzono na trzech typach próbek, których kształt i wymiary przedstawiono w tablicy 4.5. i na rys.4.6.

Tablica 4.5. Typy próbek stosowanych w badaniach wodoszczelności betonu.

Wymiary w cm		Sposób oznaczenia w tekście	oznaczenie na rys.4.6
bok lub średnica	wysokość		
30,0	15,0	∅ 30	a
20,0	20,0	∅ 20	b
25,2	50,4	∅ 25/2	c



Rys.4.6. Próbkki stosowane w badaniach wodoszczelności.

- 1- doprowadzenie wody do próbek,
- 2- powierzchnie pokryte powłoką wodoszczelną,
- 3- końcówka K-1 doprowadzająca wodę do próbki z otworem
- 4- końcówka K-2 zamykająca otwór w próbce.

4.2.5. Sposób tłoczenia wody do próbek.

W badaniach stosowano dwa sposoby tłoczenia wody do próbek. Sposoby te przedstawiono schematycznie na rys. 4.6.

W próbkach $\varnothing 30$ i $\varnothing 20$ wodę tłoczono przez jedną z powierzchni za pomocą głowic żeliwnych w sposób pokazany na rysunku 4.3.

W próbkach $\varnothing 25/2$ z otworem wodę tłoczono przez końcówki przedstawione na rys. 4.4. i 4.5, kierunek przepływu wody był prostopadły do kierunku układania betonu.

Przy badaniu próbek $\varnothing 30$ kierunek przepływu wody był zgodny z kierunkiem układania betonu, zaś w próbkach $\varnothing 20$ zastosowano dwa warianty:

- tłoczenie wody w kierunku równoległym do kierunku układania betonu,
- tłoczenie wody w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu.

W badaniach stosowano ciśnienie wody wzrastające co 8 godzin o 0,1 MPa, do maksymalnego 0,6 MPa.

4.2.6. Badanie wodoszczelności próbek.

Przed umieszczeniem w aparaturze do badań wodoszczelności próbki ważono z dokładnością do 50 g. Po umieszczeniu próbek w aparaturze tłoczono do nich wodę i w odstępach godzinnych rejestrowano ilość wchłoniętej wody przez każdą próbkę odczytując poziom wody na wodowskazach. Badania wodoszczelności dla każdej serii prowadzono do momentu pojawienia się przecieków na czterech spośród sześciu badanych próbkach, a jeżeli próbki nie wykazywały przecieków badania przerywano po 48h, czyli po 8h działania ciśnienia 0,6 MPa. Za markę wodoszczelności przyjmowano ciśnienie wody przy, którym nie stwierdzono oznak przesiąkania wody przynajmniej w czterech próbkach na sześć badanych. Dla odróżnienia marki wodoszczelności określonej na próbkach $\varnothing 30$ i 20 przyjęto oznaczenie marki odpowiednio W i W_K /np. $W=2$ dla $\varnothing 30$, $W_K=2$ dla $\varnothing 20$ /.

Po zakończeniu badań próbki powtórnie ważono i określano przyrost wagi spowodowany nasiąknięciem betonu. Ilości wtłoczonej wody określone z ważenia próbek porównywano z obliczonymi na podstawie wskazań wodowskazów.

Do określania wodochłonności przyjmowano wyniki uzyskane z pomiarów na wodowskazaach jako bardziej precyzyjne.

Próbki, które podczas badania nie przeciekały, po zważeniu rozluupywano w maszynie wytrzymałościowej w celu określenia na przelomach głębokości penetracji wody. Do badania wodoszczelności wykonano serię składającą się z 6-ciu sztuk próbek jednego typu. Wyniki badań obliczono jako średnie arytmetyczne dla całej serii, po wyeliminowaniu wyników wątpliwych metodą Chouveneta.

4.3. Sposób obliczania wodochłonności jednostkowej betonu

Aparatura zastosowana do badań umożliwiła obliczenie wodochłonności jednostkowej betonu. W swoich obliczeniach stosowałam dwa wzory do obliczania wodochłonności jednostkowej betonu oparte na wzorach podanych w p.2.2 wg [17,40,41,60]. Dla próbek oznaczonych w tabl.4.6 jako Ø 30 i 20 /a na rys. 4.6 jako a i b/ stosowałam następujący wzór określenia wodochłonności jednostkowej betonu:

$$w = \frac{Q}{F_0 \cdot t} \quad [m^3/s \cdot m^2] \quad [4 - 1]$$

gdzie: w - wodochłonność jednostkowa $[m^3/s \cdot m^2]$

Q - ilość wody wtłoczona do próbki w m^3 przy danym stałym ciśnieniu

F_0 - powierzchnia przez którą tłoczono wodę w m^2

t - czas tłoczenia wody w sekundach

Na podstawie powyższego wzoru wodochłonność jednostkową można zdefiniować jako ilość wody wchłanianą przez beton w jednostce czasu i na jednostkę powierzchni, przez którą tłoczona jest woda, przy danym ciśnieniu. Dla każdej wartości

ciśnienia określono wodochłonność jednostkową betonu.

Dla próbek walcowych z otworem przelotowym oznaczonym w tabl.4.6 jako $\emptyset$ 25/2 /rys.4.6 jako o/ wodochłonność jednostkową obliczałam według następującego wzoru:

$$w = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot l \cdot t} \quad [m^3/s.m^2] \quad [4 - 2]$$

gdzie:

w, Q, t - jak we wzorze 4-1

d - średnica otworu w metrach

l - długość czynna otworu w metrach

$\pi d l$ - powierzchnia boczna otworu, przez którą następuje wtlaczanie wody w beton.

Tak określone wartości wodochłonności jednostkowej betonu stanowią miernik "chłonności" betonu i pozwalają na przybliżone określenie marki wodoszczelności wg obowiązującej normy [67]. Obliczone na podstawie powyższych wzorów wartości wodochłonności jednostkowej betonów mogą być porównywane ze sobą tylko przy jednakowych warunkach badania tj. przy jednakowej temperaturze tłoczonej wody, tym samym wieku betonu, tych samych warunkach dojrzewania itp. Przy zmianie warunków badania, dla uzyskania wartości wodochłonności jednostkowych porównywalnych konieczne jest wprowadzenie współczynników korygujących. W swoich badaniach nie określałam współczynników korygujących, gdyż nie było to celem pracy.

4.4. Wpływ bezpośredniego kontaktu
sprężonego powietrza z wodą na
wyniki badań wodoszczelności
betonu.

Badania miały na celu sprawdzenie wpływu na wodoszczelność betonu bezpośredniego kontaktu sprężonego powietrza z wodą tłoczoną do próbek. W tym celu z serii liczącej 6 sztuk próbek trzy badano tłocząc wodę oddzieloną od sprężonego powietrza za pomocą gumowego balona, zaś pozostałe trzy próbki badano, tłocząc wodę kontaktującą się ze sprężonym powietrzem /usuwało balon i woda była tłoczona do próbek bezpośrednio ze zbiornika ciśnieniowego/. Do badań stosowano próbki walcowe $\varnothing 30$ h 15 cm. Badania przeprowadzono na 10-ciu seriach próbek wykonanych z mieszanek betonowych, których składy podano w tablicach 4.2, 4.3.

Srednie wyniki badań zestawiono w tablicy 4.6 i przedstawiono na rysunku 4.7 a, b, c, d, e, f, g, h, i, j. Jako kryterium oceny wpływu sposobu tłoczenia wody przyjęto ilość ^{wody} wchłoniętej przez beton ~~wody~~ i głębokość zawilgocenia próbek określoną na ich przekłomach.

Obserwując wyniki badań podane w tablicy 4.6. można zauważyć, że oddzielenie sprężonego powietrza od wody tłoczonej do próbek powoduje zwiększenie penetracji wody w betonie:

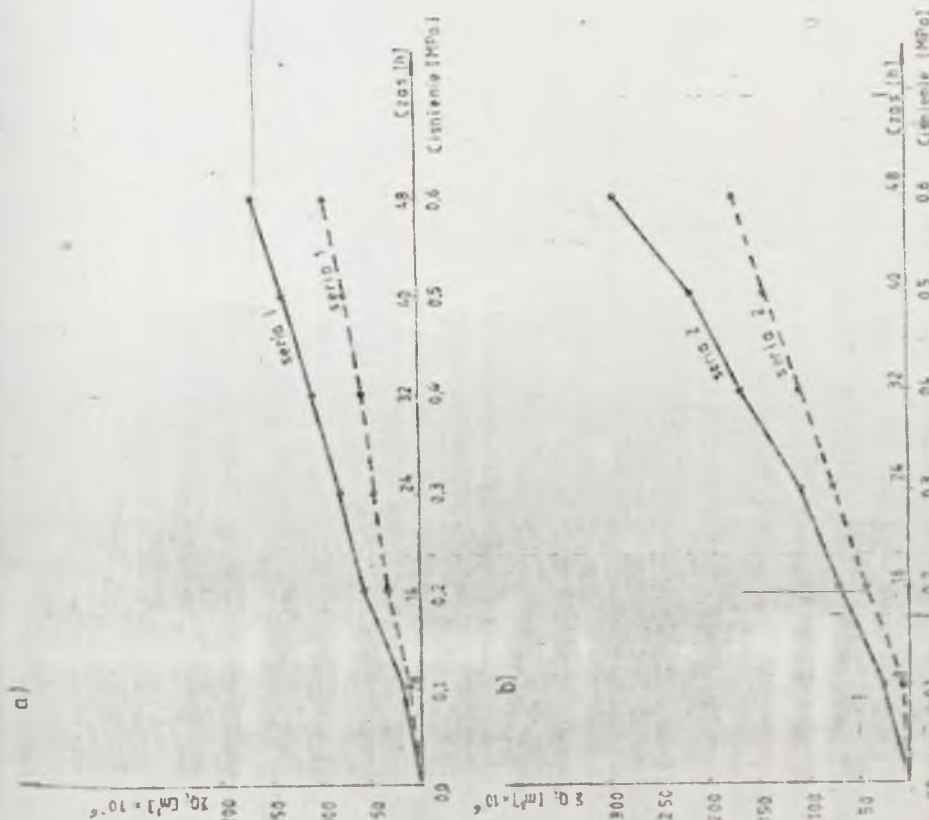
- następuje wzrost ilości wtłoczonej wody do betonu od 50 do 230%,
- następuje zwiększenie głębokości zawilgocenia betonu od 10 do 30%,

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki badań, potwierdzające dane literaturowe w tym zakresie /patrz p.2.2.2/ widać, że stosowana dotychczas normowa metoda badań wodoszczelności daje zawyżone wartości wodoszczelności betonu. W związku z powyższym badanie

wodoszczelności betonu należy przeprowadzać na aparaturze, która umożliwia oddzielenie sprężonego powietrza od wody tłocznej do próbek.

Tablica 4.6. Zestawienie wyników badań wodoszczelności betonów przy tłoczeniu wody oddzielonej od sprężonego powietrza /O/, kontaktującej się ze sprężonym powietrzem /K/.

Oznaczenie serii betonu wg tabl. 42, 43.	Sposób tłoczenia wody	Średnia ilość wtłoczonej wody do próbek $[m^3] \cdot 10^{-6}$	Średnia głębokość zawilgocenia próbek po badaniu [cm]	Wskaźnik zmiany wodoszczelności wskutek oddzielenia wody od sprężonego powietrza	
				wskaźnik zmiany ilości wody do próbek	wskaźnik zmiany głębokości zawilgocenia próbek
1	2	3	4	5	6
1	O	165	12	1,7	1,7
	K	95	7		
2	O	289	7	1,7	1,2
	K	171	6		
2a	O	209	6	1,8	1,5
	K	118	4		
P	O	202	8	1,5	1,1
	K	136	7		
P-1	O	211	9	2,0	1,3
	K	104	7		
P-2	O	301	8	1,7	1,3
	K	180	7		
R	O	420	6	2,0	1,5
	K	216	4		
R-1	O	255	7	1,5	1,8
	K	175	4		
A-4	O	289	8	2,3	1,6
	K	129	5		
B-1	O	432	5	1,9	1,3
	K	223	4		
Wartość średnia wskaźników				1,8	1,4

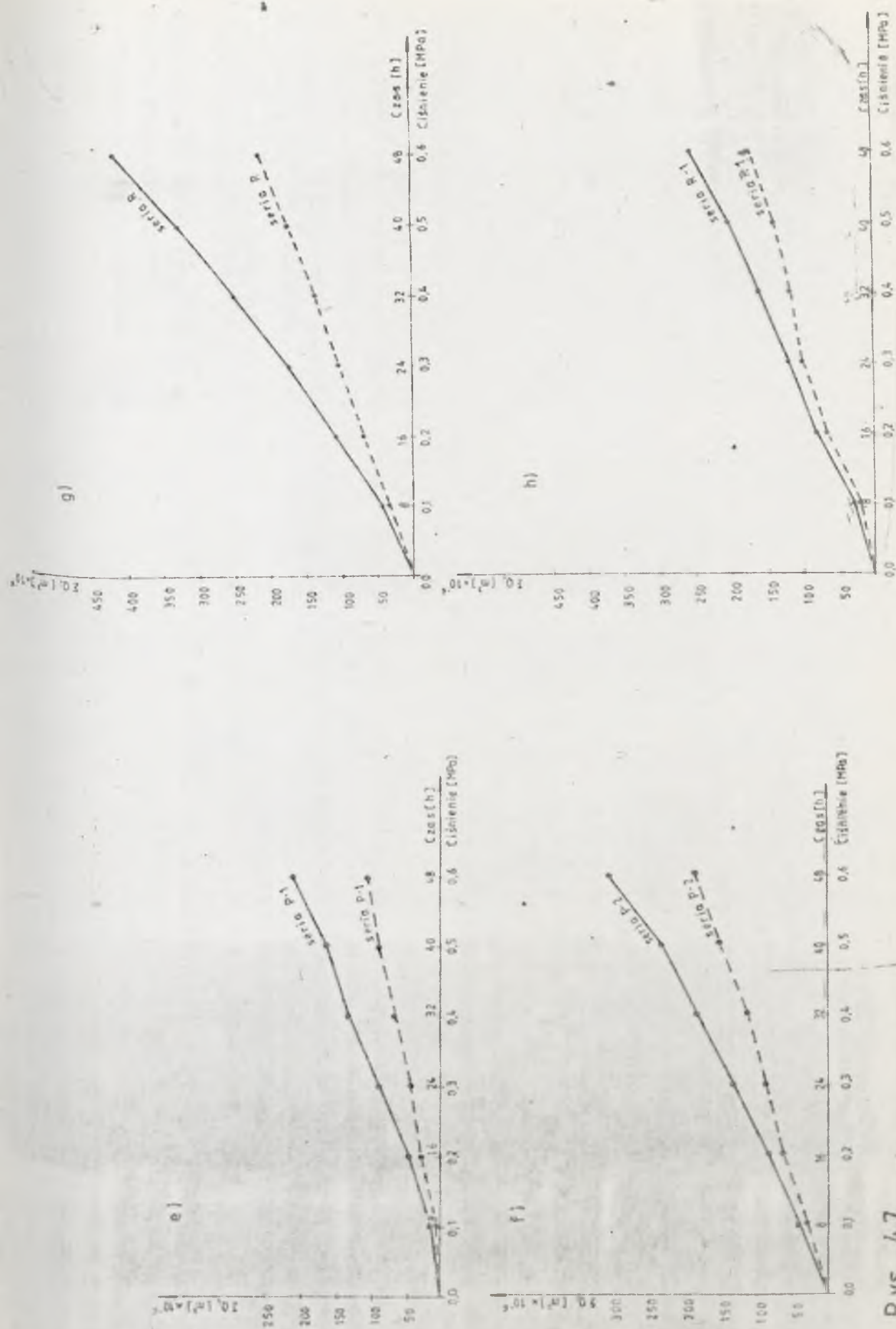


Rys. 4.7

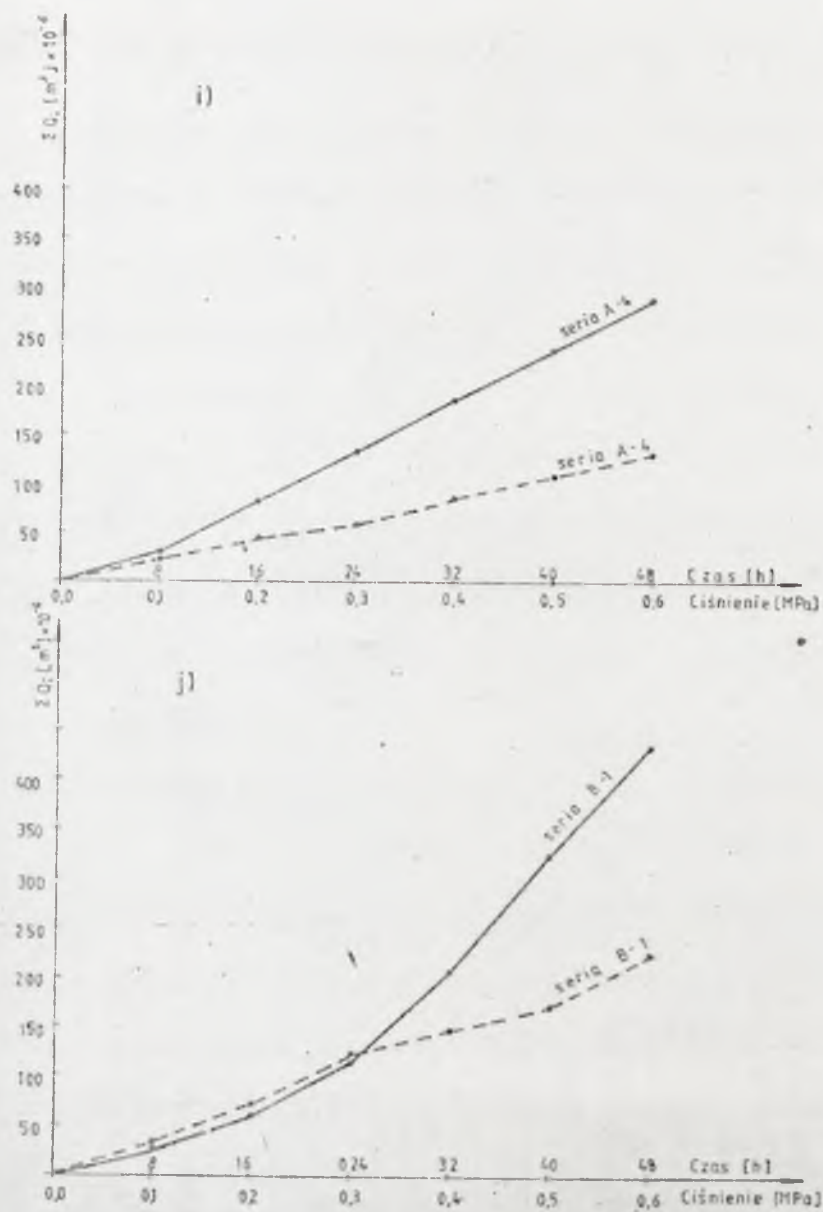
Wpływ kontaktu sprężonego powietrza z wodą
na ilość włożonej wody w czasie badania
wodoszczelności próbek $\phi 30$ h 15 cm

próba do której tłoczono wodę oddzielną od sprężonego powietrza
próba do której tłoczono wodę kontaktującą się ze sprężonym
powietrzem





Rys. 4.7



Rys. 4.7

4.5. Badanie wpływu domieszek i
dodatków na wodoszczelność
betonu.

4.5.1. Cel i zakres badań.

Badania miały na celu sprawdzenie w jakim stopniu stosowanie domieszek napowietrzająco-uplastyczniających i napowietrzających oraz dodatków z popiołów lotnych wpływa na wodoszczelność betonów. Badania prowadzono w dwóch etapach.

W pierwszym etapie przebadano betony o składzie podanym w tablicy 4.2. Do betonu porównawczego oznaczonego w tablicy 4.2. jako seria 1, bez zmiany jego składu, stosowano następujące domieszki w ilości procentowej w stosunku do ciężaru cementu:

- napowietrzająco-uplastyczniającą - Klutan N - w ilościach
0,1, 0,2, 0,3%,

- napowietrzające - Abiesod P-1 w ilościach 0,1, 0,2, 0,3%

Roksol B-1 w ilościach 0,05 i 0,1%

Oprócz wpływu powyższych domieszek sprawdzono również wpływ dodatku popiołu lotnego na wodoszczelność betonów. Składy mieszanek betonowych z dodatkami popiołów lotnych zaprojektowano na bazie mieszanki 1 /patrz tabl.4.2/ metodą doświadczalną, kierując się dobrą urabialnością i szczelnością betonu.

W drugim etapie badań sprawdzono wpływ domieszek Klutanu N i Abiesodu P-1 dozowanych w ilości 0,1% w stosunku do ciężaru cementu na wodoszczelność betonu o symbolu A, którego skład podano w tablicy 4.3. Następnie zaprojektowano metodą doświadczalną w oparciu o mieszankę "A" beton o zmniejszonej o 10% ilości cementu w stosunku do betonu A i oznaczono go symbolem A-1. Do betonu A-1 stosowano domieszkę napowietrzająco-uplastyzującą.

niającą Klutan N w ilości 0,1, 0,2, i 0,3% w stosunku do ciężaru cementu, domieszkę napowietrzającą Roksol B-1 w ilości 0,05 i 0,1% oraz domieszkę opóźniającą wiązanie polifosforan sodu w ilości 0,1, 0,2 i 0,3%, ciężaru cementu.

4.5.2. Analiza wyników pierwszego etapu badań wodoszczelności betonów z domieszkami i dodatkami.

Badania wodoszczelności dla wszystkich mieszanek, których składy podano w tablicy 4.2 wykonano na normowych próbkach walcowych o średnicy 30 cm i wysokości 15 cm oraz na próbkach kostkowych o boku 20 cm. Przy badaniu wodoszczelności na próbkach kostkowych $\varnothing$ 20 stosowano dwa kierunki tłoczenia wody, a mianowicie: kierunek zgodny z kierunkiem układania betonu, oraz prostopadły do kierunku układania betonu. Średnie wyniki badań zestawiono w tablicach 4.7, 4.8, 4.9 oraz przedstawiono graficznie na rysunkach 4.8-a,b,c,d; 4.9 i 4.10.

4.5.2.1, Wpływ Klutanu N na wodoszczelność betonu.

Wyniki badań uzyskane przy badaniu próbek walcowych $\varnothing$ 30 zestawiono w tablicy 4.7 oraz przedstawiono na rys. 4.8 a i 4.9.

Na podstawie przedstawionych wyników i wykresów widać, że beton z domieszką 0,1% Klutanu N /krzywa 2 na rys. 4.8-a/ charakteryzował się najmniejszą ilością wtłoczonej wody i nieznacznie większą ilością przy 0,2% Klutanu N /krzywa 3/. Natomiast ilość tej domieszki wynosząca 0,3% w zasadzie nie spowodowała zmiany ilości wody wtłoczonej do betonu w porównaniu do betonu bez Klutanu. Z danych zawartych w tablicy 4.7 można obliczyć, że spadek ilości wody wtłoczonej do próbek betonowych z domieszką Klutanu N wynosi: 90% przy 0,1%, 70% przy 0,2% i tylko 12% przy 0,3%.

Z diagramu na rys. 4.9 wynika, że domieszka Klutanu N w ilości 0,1% i 0,2% spowodowała wzrost marki wodoszczelności z W_k-4 do W_k-6 , a przy ilości 0,3% ^{marka} nie uległa zmianie. Podobny wpływ domieszki Klutanu N uzyskano przy badaniu próbek kostkowych $\phi 20$. Wyniki tych badań zestawiono w tablicy 4.8, 4.9 i przedstawiono na rysunku 4.10. Jak wskazują uzyskane wyniki badań marka wodoszczelności określona na próbkach kostkowych wykonanych z betonu porównawczego wyniosła W_k-4 przy tłoczeniu wody w kierunku zgodnym z kierunkiem układania betonu i W_k-3 przy kierunku prostopadłym do układania betonu. Natomiast przy badaniu próbek wykonanych z mieszanek betonowych zawierających 0,1 i 0,2% Klutanu N marka wodoszczelności dla obydwu kierunków tłoczenia wody wzrosła i wynosiła powyżej W_k-6 . Jednocześnie nastąpił około 100%-towy spadek wodochłonności jednostkowej w porównaniu do betonu bez domieszki. Przy badaniu próbek kostkowych wykonanych z betonu zawierającego 0,3% Klutanu N, do których tłoczono wodę zgodnie z kierunkiem układania betonu /tablica 4.8/ stwierdzono spadek wodochłonności jednostkowej średnio około 40% i wzrost marki wodoszczelności z W_k-4 /beton bez domieszki/ do W_k-5 . Przy kierunku tłoczenia wody prostopadłym do kierunku układania betonu zanotowano 30%-towy wzrost wodochłonności.

4.5.2.2. Wpływ Abiesodu P-1 na wodoszczelność betonu.

Wyniki badań wpływu Abiesodu P-1 na wodoszczelność betonu zestawiono w tablicach 4.7, 4.8, 4.9 i przedstawiono na wykresach rys. 4.8 b, 4.9 i 4.10. Na rysunku 4.8 b, wykonanym na podstawie tablicy 4.7 widać wyraźny wzrost ilości wody wtłoczonej do betonu przy badaniu próbek walcowych $\phi 30$. Wzrost ten wynosi średnio od 70% do 100% w stosunku do ilości wody wtłoczo-

nej do betonu bez dodatku. Jednocześnie stwierdzono spadek marki wodoszczelności z W-4 do W-2 przy ilości Abiesodu P-1 wynoszącej 0,1%, 0,2% i do W-3 przy ilości 0,3%.

Zbliżone wyniki uzyskano przy badaniu próbek kostkowych o boku 20 cm, do których tłoczono wodę w kierunku zgodnym z kierunkiem układania betonu /tablica 4.8/. Wyniki uzyskane przy badaniu próbek kostkowych przy ilości Abiesodu 0,1 i 0,2%, do których tłoczono wodę prostopadłe do kierunku układania betonu /tablica 4.8/ wskazują w porównaniu do betonu bez domieszki znaczny spadek wodoszczelności betonu z W_k-3 do W_k-1 . Natomiast betony zawierające 0,3% Abiesodu P-1 nie wykazały w porównaniu do betonu bez domieszki - spadku marki wodoszczelności, ale wzrosła średnio o około 30% wodochłonność jednostkowa /tablica 4.9/.

4.5.2.3. Wpływ Roksolu B-1 na wodoszczelność betonu.

Wyniki badań wpływu na wodoszczelność betonu domieszki napowietrzającej Roksol B-1 zamieszczono w tablicach 4.7, 4.8, 4.9 oraz przedstawiono na wykresach rys.4.8c, 4.9 i 4.10.

Z badań na próbkach walcowych $\varnothing 30$ widać, że domieszka Roksol B-1 w ilości 0,05% i 0,1% spowodowała spadek marki wodoszczelności z W-4 do W-2 oraz wzrost wodochłonności jednostkowej betonu około 100% w stosunku do betonu bez domieszki.

Podobne wyniki uzyskano przy badaniu próbek kostkowych /tabl.4.8, 4.8, i rys.4.10/. Większy spadek wodoszczelności stwierdzono przy tłoczeniu wody w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu, mniejszy przy przepływie równoległym. Powyższe zjawisko mogło być wywołane tym, że domieszka Roksolu B-1 powodowała zbytne uplastycznienie mieszanki /patrz tabl. 4.4/. Mogło to wywołać zjawisko sedymentacji w mieszance beto-

nowej i powstanie drożnych kanalików pomiędzy porami, a tym samym wpłynąć niekorzystnie na wodoszczelność betonu.

4.5.2.4. Wpływ dodatku popiołu lotnego na wodoszczelność betonu.

Jak już zaznaczono w p.4.5.1 składy czterech mieszanek betonowych z dodatkami popiołów lotnych z Elektrociepłowni Siekierki ustalono doświadczalnie na bazie mieszanki porównawczej oznaczonej symbolem 1 /patrz tabl.4.2/. Z tych mieszanek wykonano próbki walcowe $\varnothing$ 30 i kostkowe $\varnothing$ 20, na których po 90-ciu dniach dojrzewania przeprowadzono badania wodoszczelności. Wyniki uzyskane z tych badań zestawiono w tablicach 4.7, 4.8, 4.9 oraz przedstawiono graficznie na rys.4.8d, 4.9 i 4.10. Analizując wyniki badań można stwierdzić, że dodatek popiołu lotnego w ilości 12,25% w stosunku do ciężaru cementu wprowadzony do betonu porównawczego bez zmiany ilości cementu i wskaźnika wodno-cementowego /seria 5 skład wg.tabl.4.2/ nie wpłynął na zmianę jego wodoszczelności przy tłoczeniu wody w kierunku zgodnym z kierunkiem układania betonu. Natomiast stwierdzono obniżenie stopnia wodoszczelności z W_k-3 na W_k-1 przy badaniu betonu na próbkach kostkowych do których tłoczono wodę w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu. Zjawisko powyższe świadczy o występowaniu w betonie otwartych porów ułożonych prostopadle do kierunku układania betonu.

Betony, w których zastępowano część cementu popiołem /skład tabl.4.2 seria 6,7,8/ wykazywały znaczny spadek wodoszczelności. Największy spadek wodoszczelności stwierdzono przy badaniu betonu, w którym zastąpiono 20% ciężaru cementu popiołem lotnym /seria 7 wg.tabl.4.2/, co wyraźnie można zaobserwować

na rys. 4.8d, 4.9 i 4.10.

Nieco mniejszy spadek wodoszczelności odnotowano przy badaniu betonu, w którym zastąpiono 10% ciężaru cementu popiołem lotnym /seria 6 i 8 wg. tabl. 4.2/, co można zaobserwować na rysunkach 4.8d, 4.9 i 4.10.

Stwierdzono jednocześnie obniżenie wytrzymałości betonu na ściskanie w stosunku do wytrzymałości betonu nie zawierającego popiołu wynoszące około 12 % w przypadku serii 6 i około 40% w przypadku serii 7.

Przeprowadzone badania wykazały, że stosowanie dodatku popiołu lotnego do betonów wykonanych z cementu hutniczego powoduje spadek wodoszczelności, a w szczególności niekorzystne jest zastępowanie części cementu popiołem. Należałoby przeprowadzić dodatkowe badania nad możliwością zastosowania popiołów jako części piasku - szczególnie przy piaskach gruboziarnistych - i sprawdzić ich wpływ na wodoszczelność betonów również po okresach dojrzewania dłuższych niż 90 dni.

Tablica 4.7. Zestawienie średnich wyników badań wodoszczelności betonów z domieszkami i dodatkami - próbki walcowe $\varnothing 30$ i 15 cm.

Oznaczenie serii betonów wg tabl. 4.2.	Nazwa domieszki lub dodatku	Ilość do- mieszk- lub dod. w stosun- ku do cię- żaru cemo- ntu [%]	Ilość wody wtłoczonej w próbki [m ³] × 10 ⁻⁶							Marka wodo- szcze- lności wg. no- my [67]	Wodochłonność jednostkowa betonu obliczona wg [4-17] [m ³ /s.m] × 10 ⁻⁷				
			Ciśnienie [MPa]								0,1	0,2	0,3		
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-	-	95	129	161	205	-	-	W-4	1,64	2,23	2,73	3,54	3,68	-
2	-	0,1	52	64	86	110	144	191	W-6	0,9	1,11	1,49	1,90	2,49	3,30
2a	-	0,2	52	116	202	312	456	647	W-6	1,04	1,24	1,47	1,14	2,45	3,17
2b	-	0,3	75	147	158	189	-	-	W-4	1,30	2,54	2,73	3,26	-	-
3	-	0,1	179	244	-	-	-	-	W-2	3,09	4,22	-	-	-	-
3a	-	0,2	205	242	-	-	-	-	W-2	3,54	4,18	-	-	-	-
3b	-	0,3	150	244	206	-	-	-	W-3	2,59	4,22	5,29	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4a	1	0,05	198	241	-	-	-	-	W-2	3,42	4,71	-	-	-	-
			198	439											
4		0,1	193	215	-	-	-	-	W-2	3,33	4,62	-	-	-	-
			193	408											
5		12,25	86	147	169	169	-	-	W-2	1,49	2,54	2,92	2,92	-	-
			86	233	402	571									
6		21,71	147	221	272	-	-	-	W-3	2,54	3,82	4,82	-	-	-
			147	368	647										
7		16,10	193	295	-	-	-	-	W-2	3,33	5,10	-	-	-	-
			193	488											
8		7,26	151	258	264	-	-	-	W-3	2,61	4,46	4,90	-	-	-
			151	409	673										

* w kolumnach od 4-9 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

Tablica 4.8. Zestawienie średnich wyników badań wodoszczelności betonów z domieszkami - próbki kostkowe o boku 20 cm - kierunek tłoczenia wody zgodny z kierunkiem układania betonu.

znaczenie serii betonu wg. tab. 4.2.	Nazwa domieszki lub dodatku	Ilość do mieszk lub dodatku w [%] w stosunku do cięż. cem.	Ilość wody wtłoczonej w próbki $[m^3] \cdot 10^{-6}$						Marka wodoszczel. wg.	Wodochlonność jednostkowa betonu wg. $[l-1] [m^3/s.m^2] \times 10^{-7}$					
			ciśnienie [MPa]							ciśnienie [MPa]					
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	—	—	105 [*] 105	152 257	179 436	206 642	—	—	W _K -4	2,74	3,97	4,67	5,38	—	—
2		0,1	57 57	70 127	82 209	89 298	97 395	120 515	W _K -6	1,49	1,83	2,14	2,32	2,53	3,13
2a		0,2	60 60	87 147	91 238	108 346	116 462	122 584	W _K -6	1,57	2,27	2,38	2,82	3,03	3,19
2b		0,3	66 66	114 180	136 316	169 485	178 663	—	W _K -5	1,72	2,98	3,55	4,41	4,65	—
3		0,1	179 179	151 330	—	—	—	—	W _K -2	4,67	5,18	—	—	—	—
3a		0,2	177 177	186 363	—	—	—	—	W _K -2	4,62	4,86	—	—	—	—
3b		0,3	139 139	165 304	218 522	—	—	—	W _K -3	3,63	4,31	5,69	—	—	—

c.d. Tablica 4.8.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4a		0,05	<u>137</u> 137	<u>172</u> 316	<u>132</u> 503	-	-	-	$u_{1c}-3$	3,58	4,67	4,94	-	-	-
4		0,1	<u>172</u> 170	<u>209</u> 375	-	-	-	-	$u_{1c}-2$	4,44	6,11	-	-	-	7
5		12,25	<u>112</u> 113	<u>163</u> 231	<u>168</u> 449	-	-	-	$u_{1c}-3$	2,95	4,39	4,39	-	-	-
6		21,71	<u>167</u> 167	<u>252</u> 422	-	-	-	-	$u_{1c}-2$	4,36	6,66	-	-	-	-
7		16,10	<u>307</u> 307	-	-	-	-	-	$u_{1c}-1$	3,02	-	-	-	-	-
8		7,26	<u>163</u> 163	<u>209</u> 372	-	-	-	-	$u_{1c}-2$	4,26	5,46	-	-	-	-

*/ W kolumnach od 4-9 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

Tablica 4.9. Zestawienie średnich wyników badań wodoprzepuszczalności betonu z domieszkami i dodatkami - próbek kostkowo o boku 20 cm - kierunek tłoczenia wody prostopadły do kierunku ułożenia betonu.

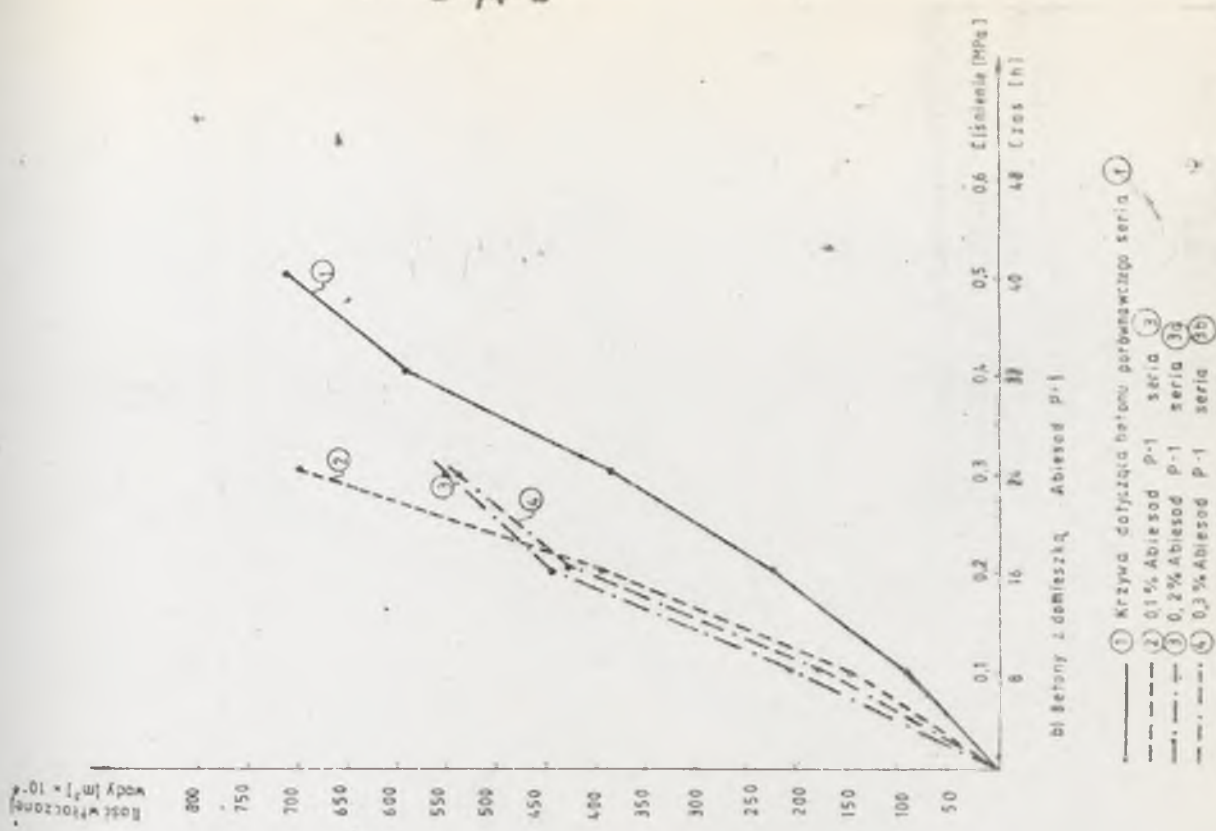
nazwa e s. tabl 2.	Nazwa domiesz- ki lub dodatku	Ilość domiesz- ki lub dodatku w [%] w stos. do ciężaru	Ilość wody wtłoczonej w próbki [m ³] x 10 ⁻⁶						Marka wodo- uszcz. wg. normy [67]	Wodochłonność jednostkowa betonu wg. [lt-1] [m ³ /s . m ²] x 10 ⁻⁷					
			ciężnienie [MPa]							ciężnienie [MPa]					
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-	-	113 [*] 113	161 274	175 449	-	-	-	M _K -3	2,95	4,20	4,57	-	-	-
2	0,1	0,1	53 53	72 132	80 212	91 303	92 395	118 513	M _K -6	1,38	2,06	2,09	2,38	2,40	3,08
2a	0,2	0,2	58 58	90 148	96 244	113 357	113 470	134 604	M _K -6	1,52	2,35	2,51	2,95	2,95	3,50
2b	0,3	0,3	140 140	178 318	227 545	-	-	-	M _K -3	3,65	4,65	5,93	-	-	-
3	0,1	0,1	282 282	-	-	-	-	-	M _K -1	7,36	-	-	-	-	-
3a	0,2	0,2	277 277	-	-	-	-	-	M _K -1	7,23	-	-	-	-	-
3b	0,3	0,3	142 142	190 332	235 567	-	-	-	M _K -3	3,71	4,96	6,14	-	-	-

Klutan N

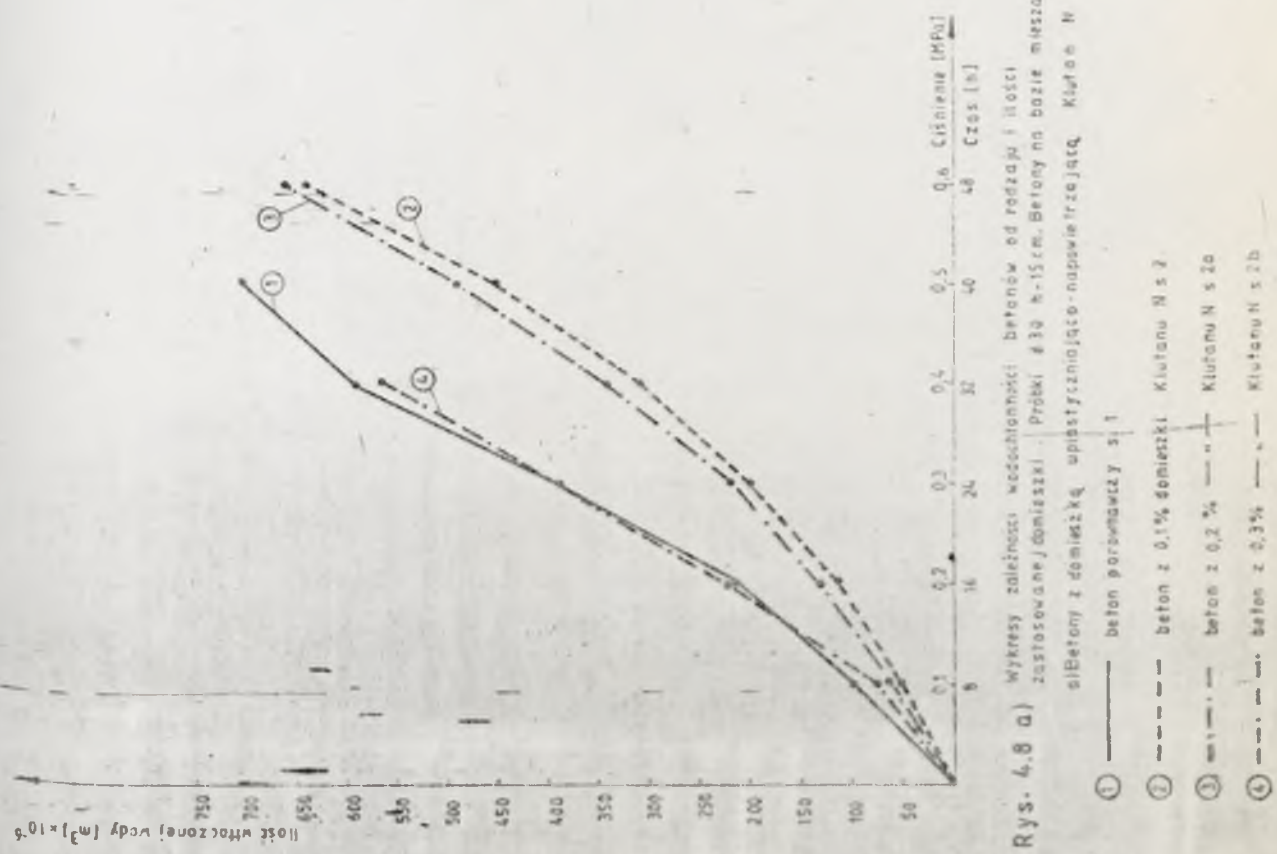
Ablesod P-1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
7a	1	0,05	<u>186</u> 186	<u>280</u> 466	-	-	-	-	W_K-2	4,86	7,31	-	-	-	-
4	Polisat	0,1	<u>271</u> 271	-	-	-	-	-	W_K-1	7,08	-	-	-	-	-
5		12,25	<u>232</u> 232	-	-	-	-	-	W_K-1	7,36	-	-	-	-	-
6	Lotnie	21,71	<u>300</u> 300	-	-	-	-	-	W_K-1	7,83	-	-	-	-	-
7		16,10	<u>318</u> 318	-	-	-	-	-	W_K-1	8,30	-	-	-	-	-
8	Popioły	7,26	<u>322</u> 329	-	-	-	-	-	W_K-1	8,59	-	-	-	-	-

*/w kolumnach: od 4÷9 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu
a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.



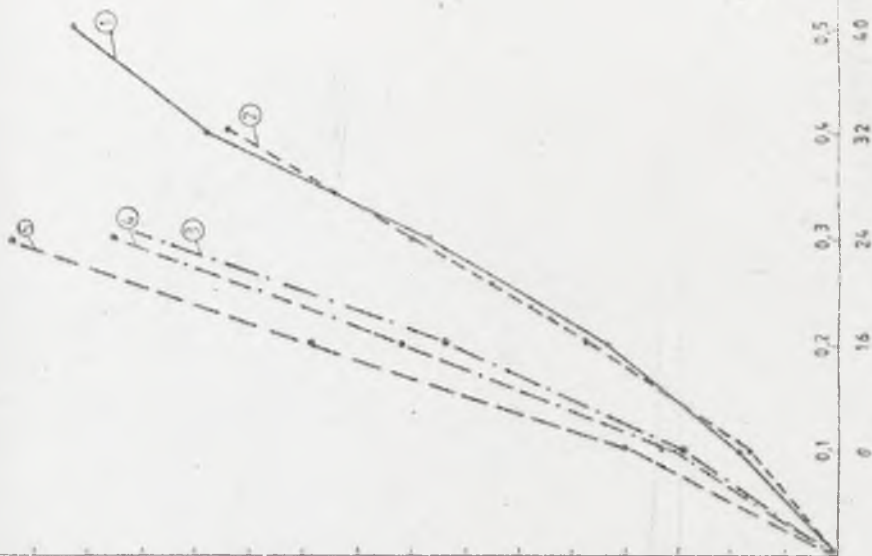
Rys. 4.8 b)



Rys. 4.8 a) Wykresy zależności wodochłonności betonów od rodzaju i ilości zastosowanej domieszki. Próbkę 30 h-15 cm. Beton na bazie mieszanki 1

sił. Beton z domieszką uplastyczniającą-napowietrzającą. Klasyfikacja

Ilość włożonej wody [ml] $\times 10^{-3}$

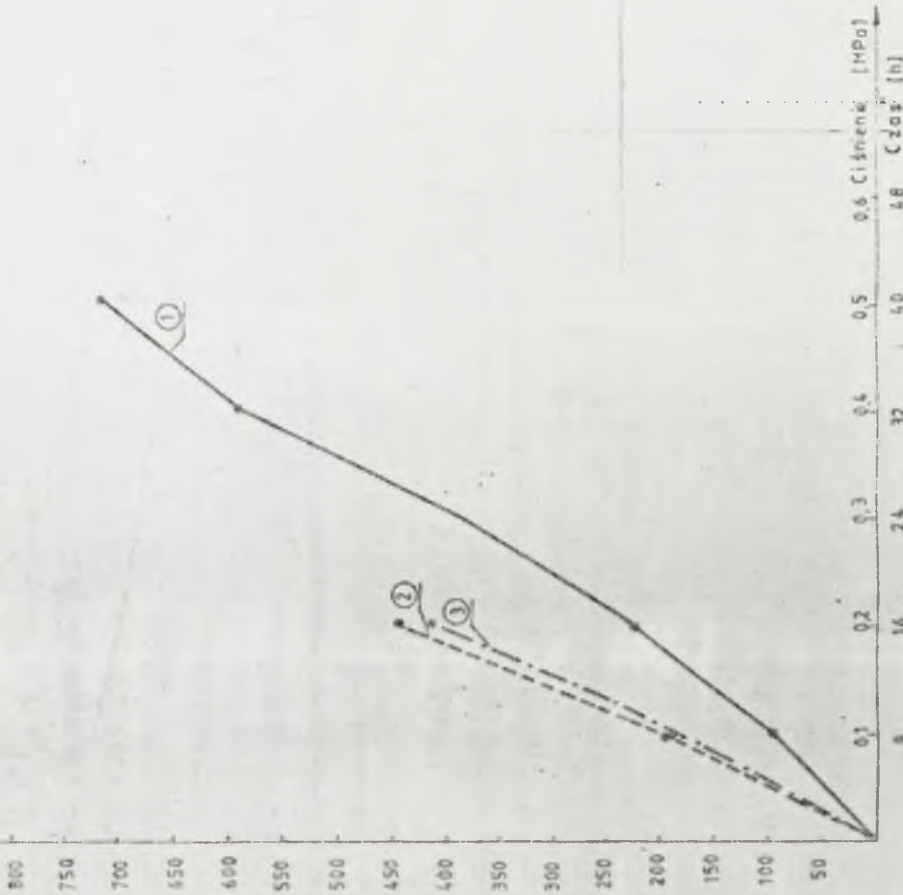


d1 Betony z dodatkiem popiołów dynamicznych

- ① beton bez dodatku w/c = 0.55 seria 1
- ② 12.25% popiołu; w/c = 0.55 seria 5
- ③ 21.71% popiołu; w/c = 0.62 seria 6
- ④ 7.26% popiołu; w/c = 0.62 seria 8
- ⑤ 16.10% popiołu; w/c = 0.69 seria 7

Rys. 4.8 d1

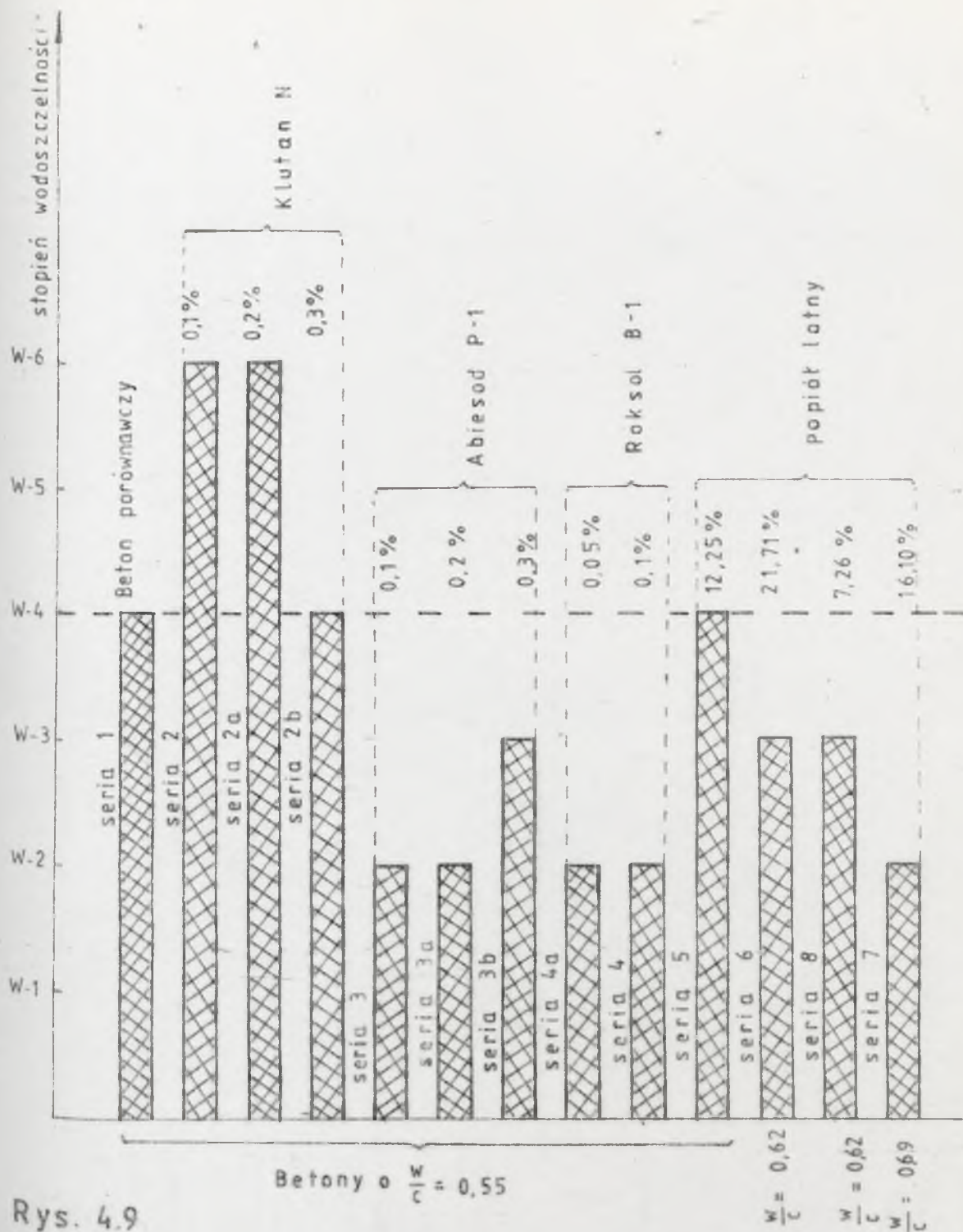
Ilość włożonej wody [ml] $\times 10^{-3}$



c1 Betony z dodatkiem Roksolu B-1

- ① beton porównawczy seria 1
- ② 0.05% Roksolu B-1 seria 4a
- ③ 0.1% Roksolu B-1 seria 4

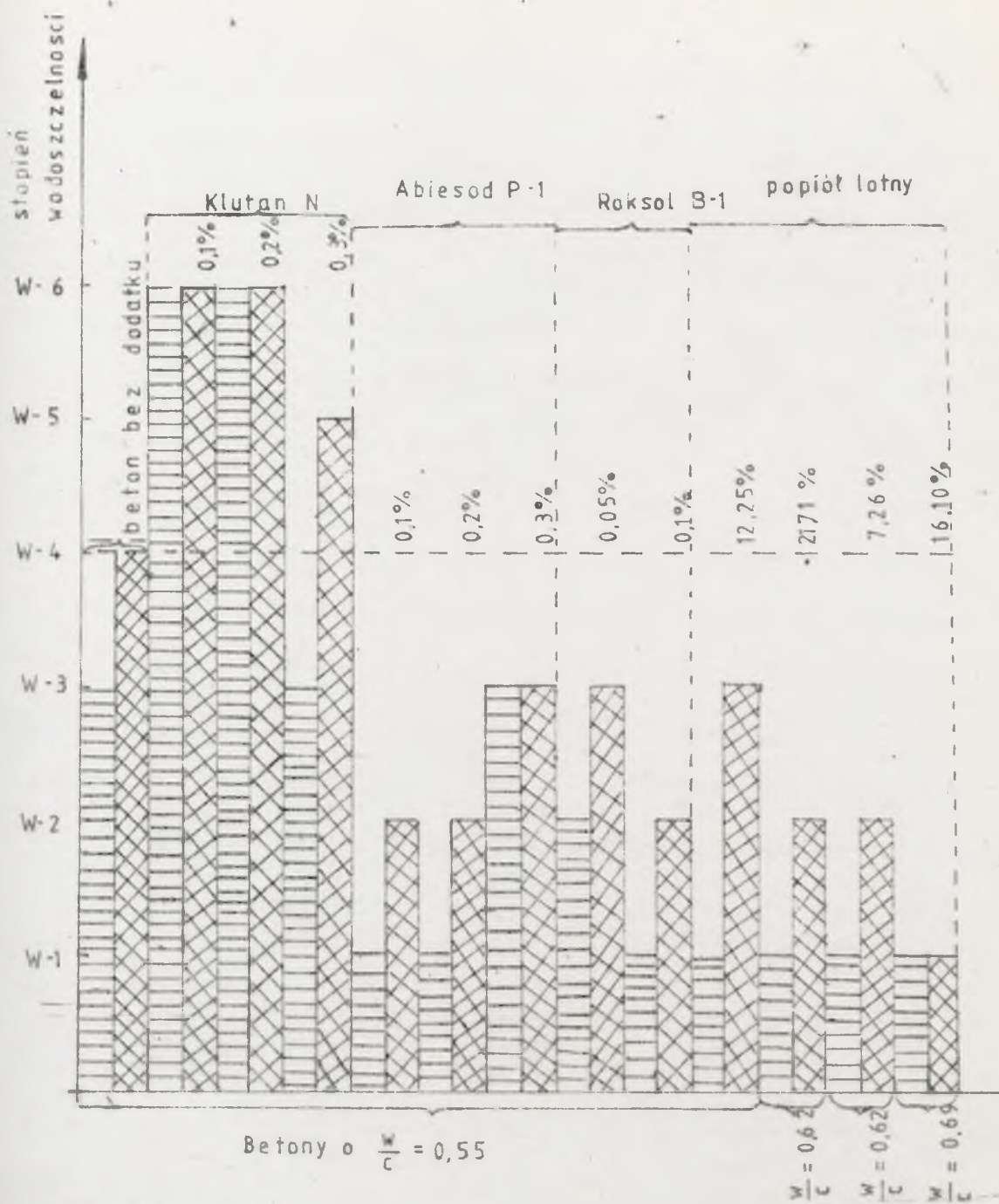
Rys. 4.8, c)



Rys. 4.9

Wykres zależności stopnia wodoszczelności betonu od zastosowanej domieszki - betony na bazie mieszanki 1

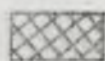
Próbki walcowe $\varnothing 30$ h 15 cm



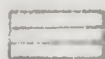
Rys. 4.10

Wykres zależności stopnia wodoszczelności betonu od zastosowanej domieszki - betony na bazie mieszanki 1

Próbki kostkowe $\varnothing 20 \times 20 \times 20$ cm



Kierunek przenikania wody zgodny z kierunkiem układania betonu



Kierunek przenikania wody prostopadły do kierunku układania betonu

4.5.3. Podsumowanie analizy wyników pierwszego etapu badań wodoszczelności betonów z domieszkami i dodatkami.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań wpływu na wodoszczelność betonu Klutamu N, Abiesodu P-1 i Roksolu B-1 /bez zmniejszania ilości cementu i wody w składzie mieszanki/ oraz popiołów lotnych z Elektrociepłowni Siekierki, można sformułować następujące stwierdzenia:

- Klutan N w ilości 0,1 i 0,2% powoduje wzrost wodoszczelności, natomiast w ilości 0,3% nie poprawia wodoszczelności betonu,
- Abiesod P-1 w ilości 0,1, 0,2 i 0,3% powoduje obniżenie wodoszczelności betonu, szczególnie przy przepływie wody w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu,
- Roksol B-1 w ilości 0,05 i 0,1% powoduje obniżenie wodoszczelności betonu, szczególnie przy tłoczeniu wody w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu,
- zastąpienie części piasku /7% w mieszance betonowej popiołem lotnym nie zmienia wodoszczelności betonu, natomiast zastąpienie części cementu /10% - 20% popiołem lotnym powoduje znaczne obniżenie wodoszczelności betonu wykonanego na bazie cementu hutniczego.

4.5.4. Analiza wyników drugiego etapu badań wodoszczelności betonów z domieszkami.

Wyniki badań wodoszczelności betonów z domieszkami uzyskane w drugim etapie badań zestawiono w tablicach 4.10, 4.10a, 4.11, 4.11a oraz przedstawiono graficznie na rys. 4.10a, 4.12a, 4.12b.

4.5.4.1. Wpływ Klutanu N i Abiesodu P-1 na wodoszczelność betonu.

4.5.4.1.1. Próbki z betonu serii "A" - bez zmiany ilości cementu.

Wyniki badań wodoszczelności betonu uzyskane przy badaniu próbek walcowych ϕ 30 zestawiono w tablicy 4.10. Jak widać z przedstawionych wyników domieszka Klutanu N w ilości 0,1% powoduje wzrost marki wodoszczelności powyżej w-6 i spadek wodochłonności jednostkowej betonu średnio o około 30% w porównaniu z betonem bez domieszki. Wyniki uzyskane przy badaniu próbek kostkowych /tablica 4.10/ wykazują, że wodochłonność jednostkowa betonu obniżyła się o około 50% w stosunku do betonu porównawczego, a marka wodoszczelności była wyższa od w_k-6 . Potwierdzony został więc korzystny wpływ tej domieszki na wodoszczelność betonu /patrz p.4.5.2.1/.

Badania wodoszczelności przeprowadzone na próbkach walcowych ϕ 30 wykonanych z betonu zawierającego 0,1% Abiesodu P-1 /tablica 4.10/ wykazały, że nastąpiło obniżenie marki wodoszczelności z w-5 do w-4 oraz podwyższenie wodochłonności jednostkowej betonu średnio o około 45%. Przy badaniu próbek kostkowych stwierdzono jeszcze wyraźniejszy niż przy próbkach walcowych ϕ 30 spadek wodoszczelności betonu z domieszką Abiesodu P-1. Marka wodoszczelności spadła z w_k-6 do w_k-4 , a wodochłonność jednostkowa wzrosła około 100%. Potwierdzony został więc niekorzystny wpływ tej domieszki na wodoszczelność betonu /patrz p. 4.5.2.2./.

4.5.4.1.2. Próbki z betonu ze zmniejszoną o 10% ilością cementu /seria "A-1"/.

W tablicy 4.10a i 4.10a zestawiono wyniki badań wpływu domieszki Klutanu N na wodoszczelność betonu serii "A-1" i przed-

stawiono je na rysunkach 4.11a, 4.12a, 4.12b. Jak widać z przedstawionych wyników badań próbek walcowych $\varnothing$ 30 /tablica 4.10a, rys.4.10a, 4.12a/ zastosowanie Klutanu N w ilości 0,1, 0,2 i 0,3%, do betonu serii "A-1" nie spowodowało zmiany marki wodoszczelności betonu. Nastąpił jednak wyraźny wzrost wodochłonności jednostkowej betonu, który wynosił od 40% dla betonu z domieszką w ilości 0,1% do 220% dla betonu z domieszką w ilości 0,3%.

Wyniki badań próbek kostkowych zestawiono w tablicy 4.10a i przedstawiono na rys.4.12b. Przy badaniu próbek kostkowych w miarę wzrostu ilości zastosowanej domieszki następował wzrost wodochłonności jednostkowej betonu od 60% do 100%. Zanotowano jednocześnie spadek marki wodoszczelności W_k-4 /beton porównawczy/ do W_k-3 /przy ilości 0,2 i 0,3% Klutanu N/.

Jak wynika z powyższego domieszka napowietrzająco-uplastyczniająca Klutan N wprowadzona do betonu serii A-1 o zmniejszonej ilości cementu nie poprawia wodoszczelności betonu. Powoduje znaczny wzrost wodochłonności jednostkowej betonu, który można próbować wytłumaczyć tym, że przy zmniejszonej ilości cementu w betonie nie wytwarza się dostateczna ilość zamkniętych porów uszczelniających beton.

4.5.4.2. Wpływ domieszki Roksol B-1 na wodoszczelność betonu.

Domieszkę napowietrzającą Roksol B-1 stosowano do betonu serii A-1 /tablica 4.3/ w ilości 0,05% i 0,1% ciężaru cementu. Wyniki badań próbek walcowych $\varnothing$ 30 zestawiono w tablicy 4.10a i przedstawiono na rysunkach 4.10b i 4.12a. Można zauważyć, że domieszka Roksolu B-1 podwyższyła markę wodoszczelności betonu z W-3 na W-5 przy 0,05% i z W-3 na W-4 przy 0,1% pomimo tego, że stwierdzono nieznaczny wzrost wodochłonności jednostkowej betonu /około 20%/.

Przy badaniu wodoszczelności betonu z Roksolem B-1 na próbkach kostkowych /tablica 4.11a, rys.4.12b/ zaobserwowano wzrost marki wodoszczelności betonu z W_k-4 do W_k-5 przy 0,05% domieszki, a przy ilości 0,1% marka w odniesieniu do betonu porównawczego nie uległa zmianie. Nastąpił wzrost wodochłonności jednostkowej betonu o około 50% przy ilości 0,05% i około 70% przy ilości 0,1%.

Reasumując można stwierdzić, że zastosowanie domieszki napowietrzającej Roksol B-1 do betonu o zmniejszonej ilości cementu wpływa korzystnie na poprawę jego wodoszczelności przy tłoczeniu wody zgodnym z kierunkiem betonowania.

Przy tłoczeniu wody prostopadle do kierunku betonowania przy ilości 0,05% domieszki - pomimo wyraźnego wzrostu wodochłonności jednostkowej /50%/ - nastąpił wzrost marki wodoszczelności, a przy ilości 0,1% wzrosła wodochłonność jednostkowa o 70% ale nie uległa zmianie marka wodoszczelności.

4.5.4.3. Wpływ polifosforanu sodu na wodoszczelność betonu.

Polifosforan sodu można stosować do betonów hydrotechnicznych przede wszystkim w celu przedłużenia czasu wiązania. Moje badania miały na celu sprawdzenie wpływu polifosforanu sodu na wodoszczelność betonu serii A-1 /tablica 4.3/.

Polifosforan sodu dodawany w ilości 0,1, 0,2 i 0,3% ciężaru cementu oprócz przedłużenia czasu wiązania /próbki wykonane z betonu zawierającego 0,3% tej domieszki można było wzformować dopiero po 48h/ powodował napowietrzenie i uplastycznienie mieszanki oraz wzrost wytrzymałości betonu po 90 dniach dojrzewania /tablica 4.4/.

Wyniki badań wodoszczelności zestawiono w tablicach 4.10a, 4.11a i przedstawiono na rysunkach 4.11a, 4.12a, 4.12b.

Tablica 4.10. Zestawienie średnich wyników badań wodoszczelności betonów z domieszkami - próbki walcowe ϕ 30.

Oznaczenie nie scierii betonu wg. tabl.	Nazwa domieszki	Ilość domieszki w stosunku do ciężaru cementu [%]	Ilość wody wtłoczonej w próbki [m ³] x 10 ⁻⁶										Marka szczelności wg. normy	Wodoszczelność jednostkowa betonu wg. [4] [m ³ /s · m ²] x 10 ⁻⁷				
			Ciśnienie [MPa]											Ciśnienie [MPa]				
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	[67]					0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
A	-	-	52*	110	131	153	134	-	W-5	0,9	1,9	2,26	2,64	2,72	-			
			52	162	293	446	580											
A-0	Klutan N	0,1	56	74	85	124	141	180	W-6	0,97	1,28	1,47	2,14	2,44	3,11			
			56	130	215	339	480	660										
B-1	Abies P-1	0,1	86	142	142	212	-	-	W-4	1,49	2,45	2,45	3,66	-	-			
			86	228	370	582												

* W kolumnach od 4 ÷ 9 nad kreską, podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską - sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

Tablica 4.14. Zestawienie średnich wyników badań wodoszczelności betonów z domieszkami próbek kostkowe o boku 20 cm - Kierunek tłoczenia wody prostopadły do kierunku układania betonu.

Znaczenie serii betonu wg abl. 4.3	Nazwa domieszki	Ilość domieszki w stosunku do ciężaru cementu [%]	Objętość wody wtłoczonej w próbki 3] x 10 ⁻⁶						Marka wodoszczelności wg normy [67]	Wodochłonność jednostkowa betonu wg [4-1] [m ³ /s.m ²] x 10 ⁻⁷					
			ciśnienie [MPa]							ciśnienie [MPa]					
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	-	-	56*	91	104	104	111	128	W _k -6	1,46	2,38	2,72	2,72	2,90	3,35
			56	147	251	355	466	594							
A-0	Miejsce	0,1	28	63	72	78	85	90	W _k -6	0,73	1,64	1,88	2,04	2,22	2,35
			28	91	163	241	326	416							
B-1	Abt.	0,1	115	168	189	211	-	-	W _k -4	3,00	4,39	4,94	5,51	-	-
			115	283	472	683									

* w kolumnie od 4-9 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbkę przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

Tablica 4.10a. Zestawienie średnich wyników badań wodoszczelności betonów z domieszkami -

próbki walcowe ϕ 30.

Oznaczenie serii betonu wg. tabl. 4.3	Nazwa dopie- szki	Ilość do- miesz- ki w stos. do cię- żaru cementu [%]	Ilość wody wtłoczonej w próbki [m ³] x 10 ⁻⁶						Marka wodo- szczel- ności wg. nor- my [67]	Wodoszczelność jednostkowa betonu wg (4-1) [m ³ /s · m ²] x 10 ⁻⁷					
			ciśnienie [MPa]							ciśnienie [MPa]					
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A-1	-	-	79*	140	118	-	-	-	W-3	1,37	2,42	2,14	-	-	-
A-2	-	0,1	102	189	194	-	-	-	W-3	1,88	3,27	3,35	-	-	-
A-3	Klifton N	0,2	164	252	205	-	-	-	W-3	2,83	4,37	5,27	-	-	-
A-4		0,3	175	245	230	-	-	-	W-3	3,02	4,23	5,20	-	-	-
A	RoksolB-1	0,05	91	141	134	212	-	-	W-4	1,57	2,44	2,32	3,66	-	-

KLITAN N

RoksolB-1

o, d. Tablicy 4.10a.

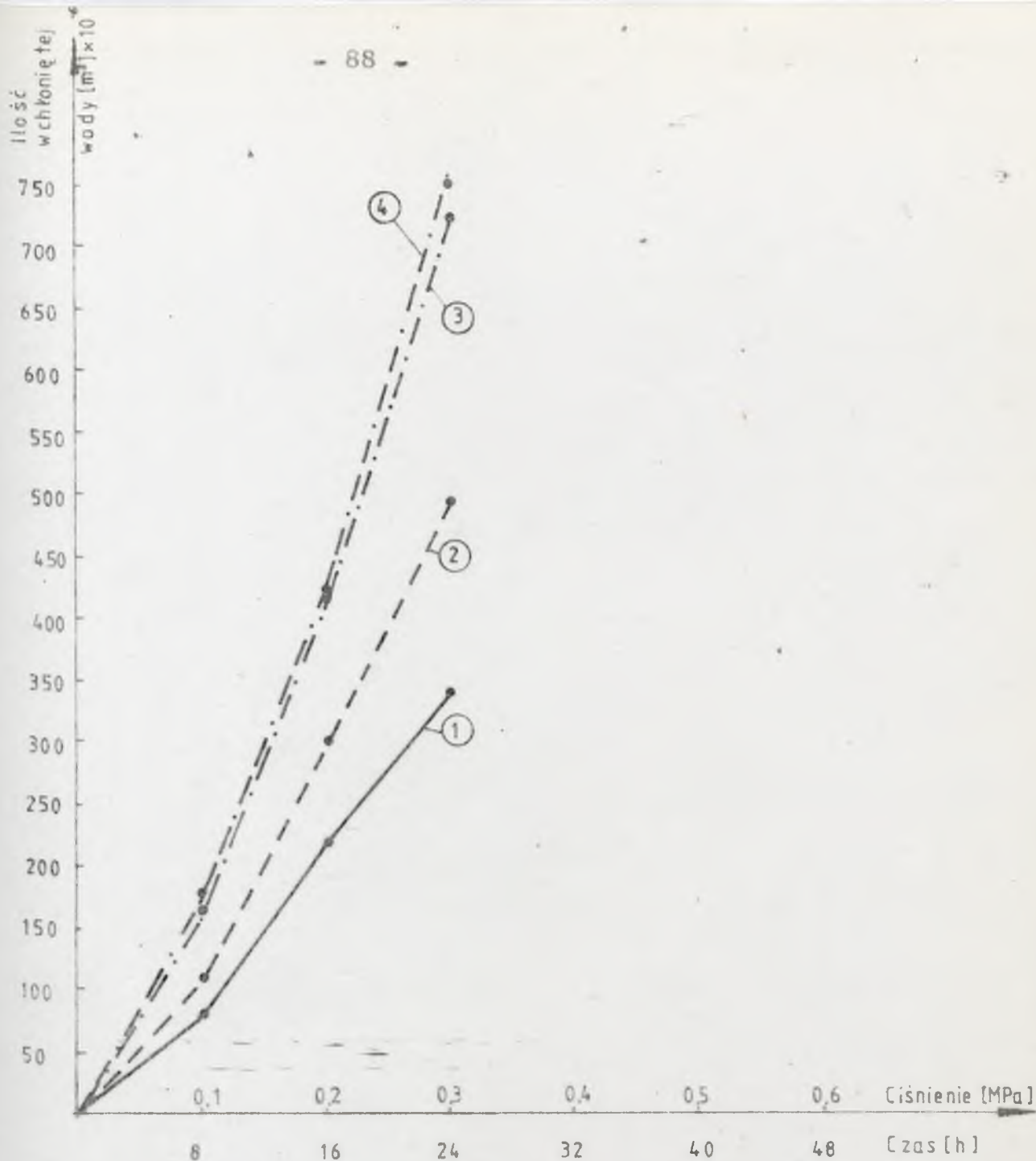
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
B-1	Koksol B-1	0,1	96	143	158	197	-	-	4-4	1,66	2,47	2,87	3,40	-	-
P		0,1	66	127	134	192	187	-	4-5	1,14	2,19	2,32	3,31	3,47	-
P-1	Polifosforan sodu	0,2	80	162	182	210	228	-	4-5	1,38	2,80	3,14	3,63	3,94	-
P-2		0,3	23	50	64	41	53	80	4-6	0,40	0,86	1,11	0,71	0,92	1,38

*W kolumnach od 4 ÷ 9 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

c.d. Tabely 4.14a.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
R-1	Roksol B-1	0,1	105 105	156 261	172 440	226 666	-	-	M_k-4	2,74	4,07	4,67	5,90	-	-
P		0,1	78 78	132 217	142 359	166 525	189 714	-	M_k-5	2,04	3,63	3,71	4,33	4,94	-
P-1	Polifosforan sodu	0,2	64 64	136 200	165 365	177 542	205 747	-	M_k-5	1,67	3,55	4,31	4,62	5,35	-
P-2		0,3	52 52	75 127	80 207	87 294	100 394	116 510	M_k-6	1,36	1,96	2,09	2,27	2,61	3,03

x/ W kolumnach od 1 - 9 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

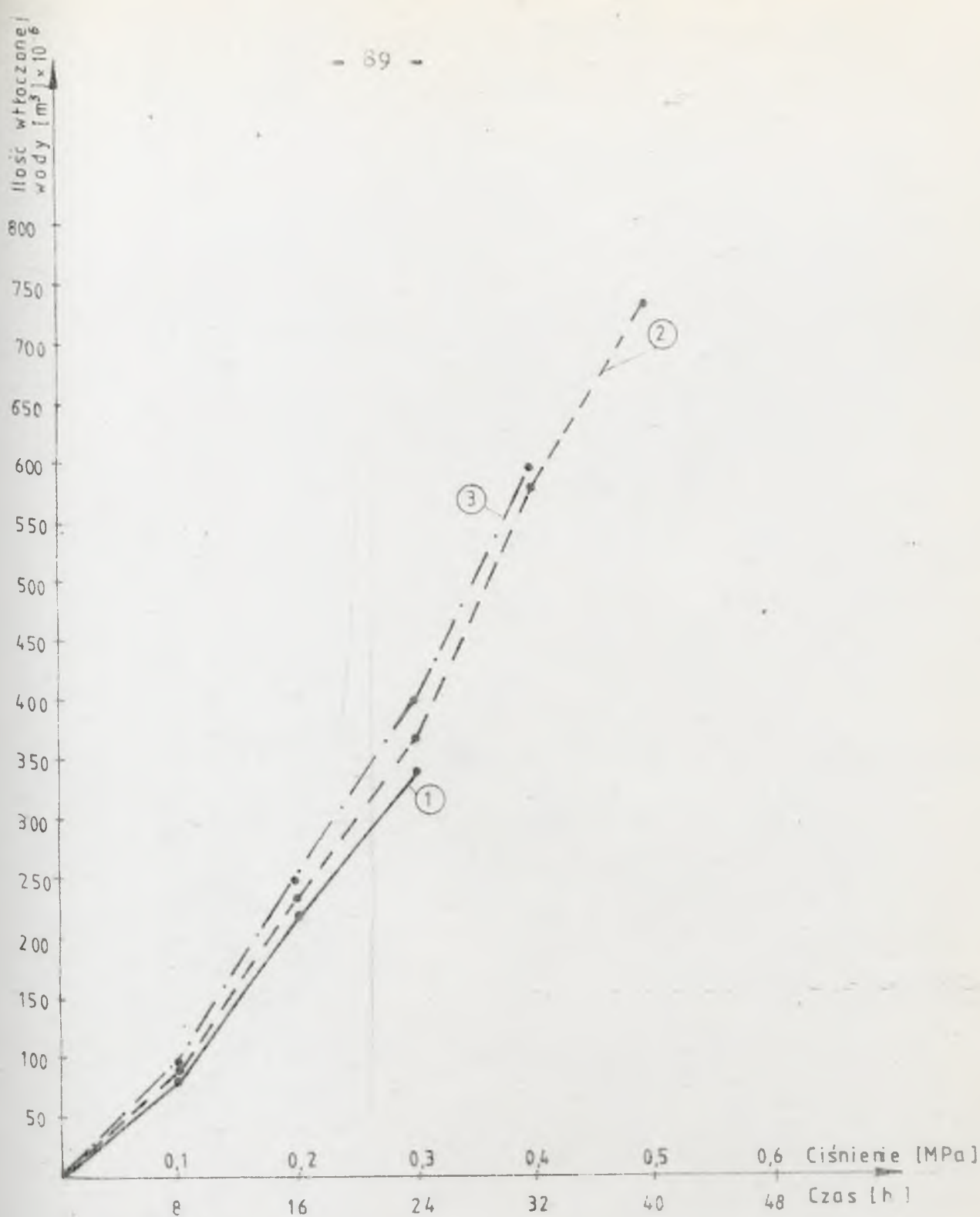


Rys. 4.11

Wykresy zależności wodochłonności betonu od rodzaju i ilości zastosowanej domieszki - betony na bazie mieszanki A-1

a) betony z domieszką uplastyczniającą - napowietrzającą Klutan N

- 1 ——— beton porównawczy seria A-1
- 2 - - - - - beton 0,1% domieszki Klutanu N
- 3 - . - . - - beton 0,2% ——— Klutanu N
- 4 - - - - - beton 0,3% ——— Klutanu N

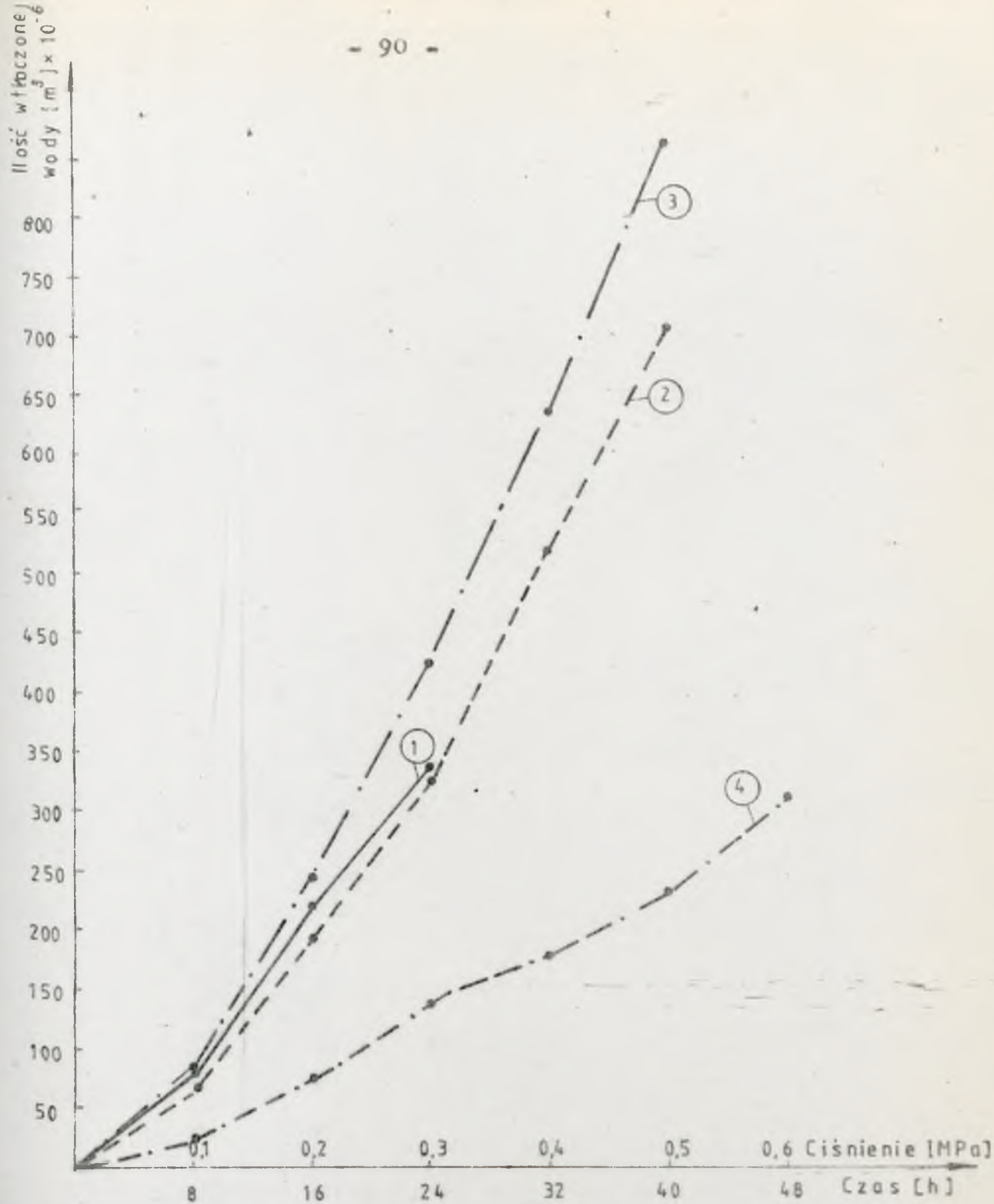


Rys. 4.11

b)

Betony z domieszką Roksolu B-1

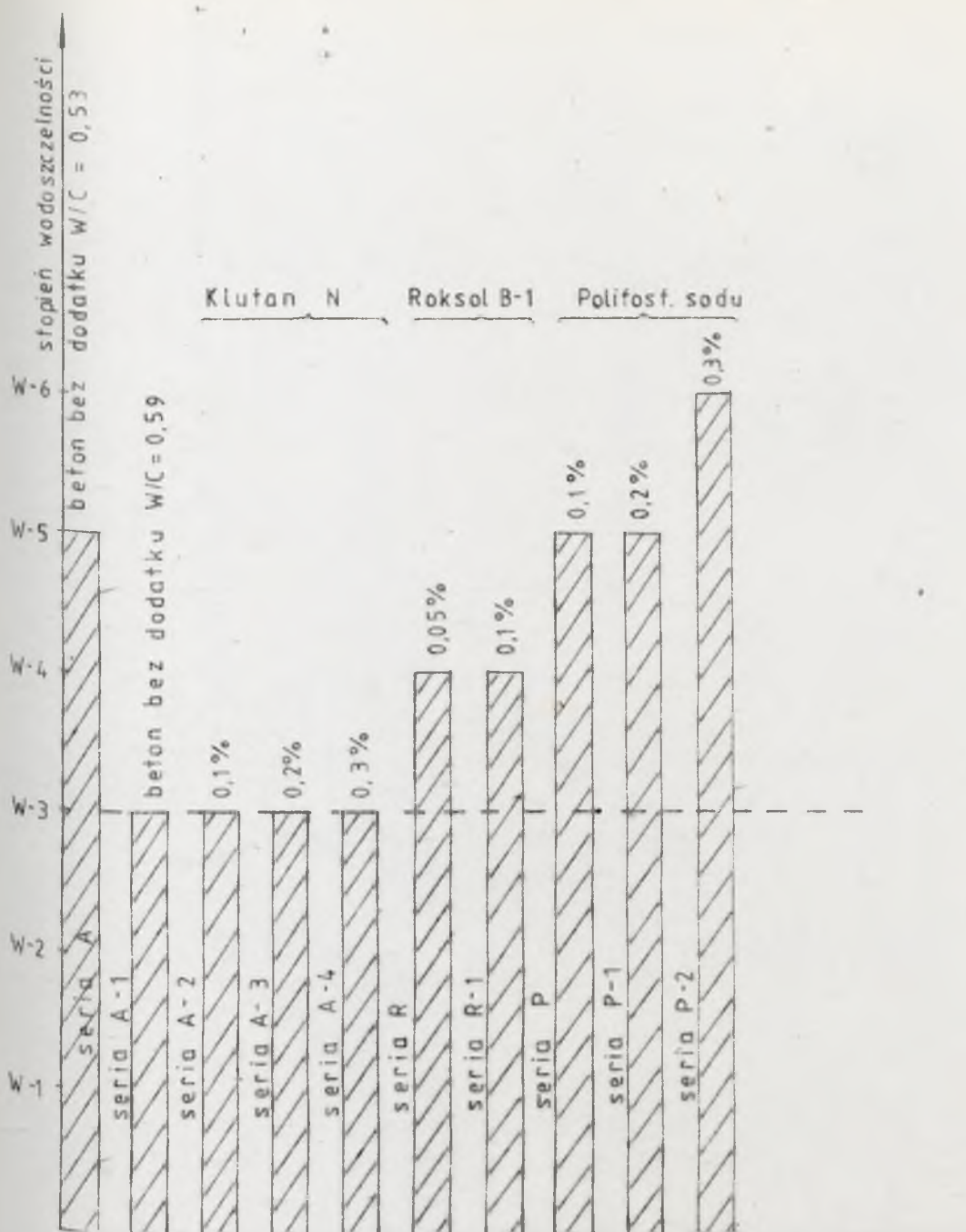
- ① ——— beton porównawczy seria A-1
- ② - - - - beton z 0,05% Roksolu B-1 seria R
- ③ - . - . - beton z 0,1% Roksolu B-1 seria R-1



Rys. 4.11
c)

Betony z domieszką polifosforanu sodu

- | | | | |
|---|-----------|---------------------------------|-----------|
| 1 | ———— | beton porównawczy seria A-1 | |
| 2 | ----- | beton z 0,1% polifosforanu sodu | seria P |
| 3 | - . - . - | beton z 0,2% polifosforanu sodu | seria P-1 |
| 4 | | beton z 0,3% polifosforanu sodu | seria P-2 |

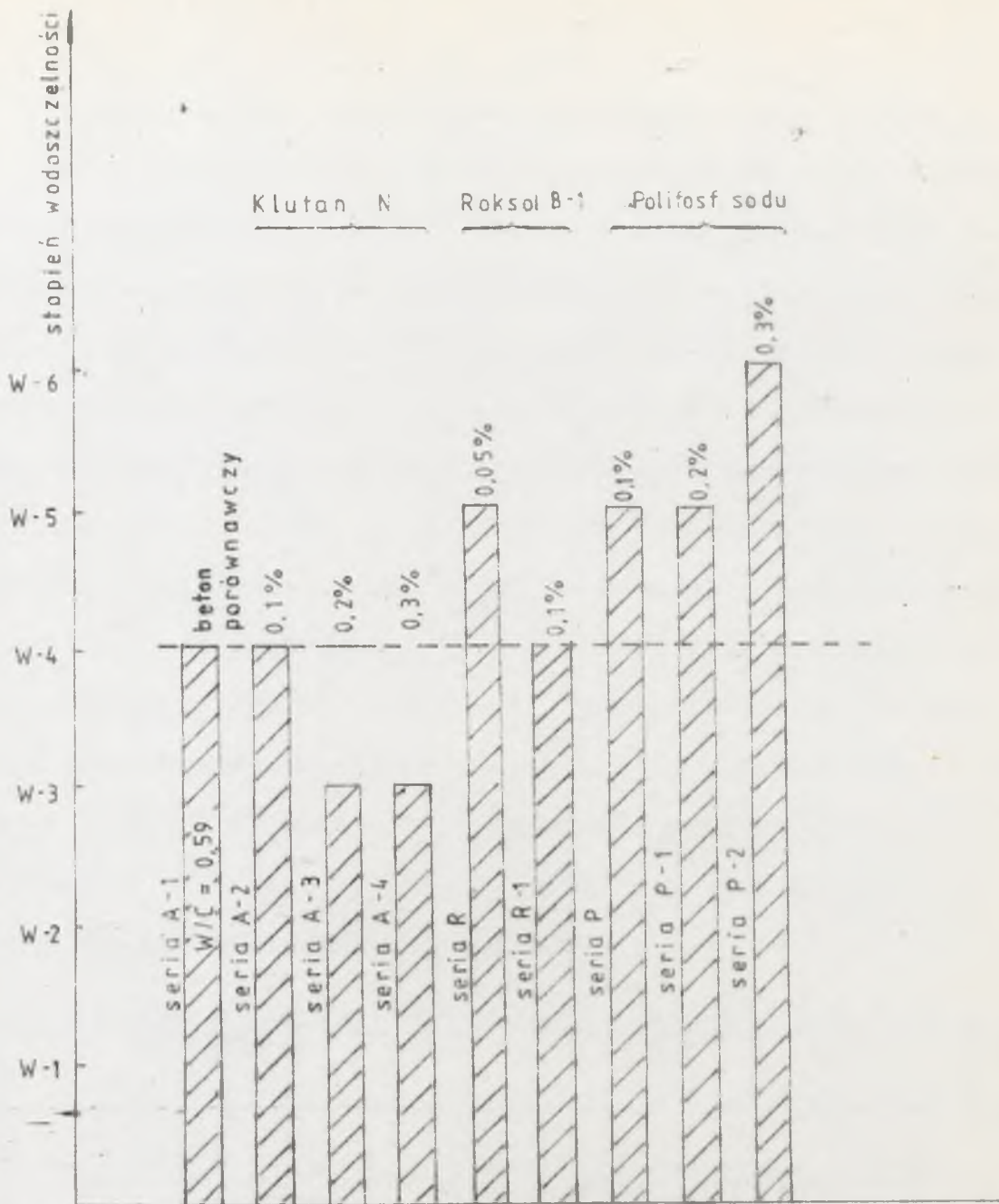


Rys. 4.12

Wykresy zależności stopnia wodoch szczelności
betonu od rodzaju i ilości zastosowanej domieszki

Betony na bazie mieszanki A-1

a) Próbki walcowe $\phi 30$ h 15 cm



Rys. 4.12

- b) Próbki kostkowe $\varnothing 20 \times 20 \times 20$ cm -
 tłoczenie wody w kierunku prostopadłym
 do układania betonu

Z wyników tych widać, że polifosforan sodu w ilości 0,1 i 0,2% pomimo, że nie wpływa korzystnie na wodochłonność betonu poprawia markę wodoszczelności z W-3 na W-5 przy badaniu próbek walcowych $\varnothing$ 30 /tablica 4.10a, rys.4.12.a/, natomiast przy badaniu próbek kostkowych /tablica 4.11a, rys.4.12b/ marka wodoszczelności wzrosła z W_k-4 na W_k-5 . Wyraźnie korzystny wpływ polifosforanu sodu na wodoszczelność betonu obserwuje się przy ilości 0,3%. Przy badaniu na próbkach walcowych nastąpił wzrost z W-3 do powyżej W-6 i 20%-towy spadek wodochłonności jednostkowej, a przy próbkach kostkowych z W_k-4 również powyżej W_k-6 i 20%-towy spadek wodochłonności. Znaczny wzrost marki i spadek wodochłonności jednostkowej betonu, pomimo wzrostu porowatości /tabl.4.4/, mógł powstać prawdopodobnie wskutek wytworzenia wewnątrz betonu zamkniętych porów otoczonych szczelnym materiałem nie przepuszczającym wody.

4.6. Badanie wpływu kierunku tłoczenia wody do próbek w stosunku do kierunku układania betonu.

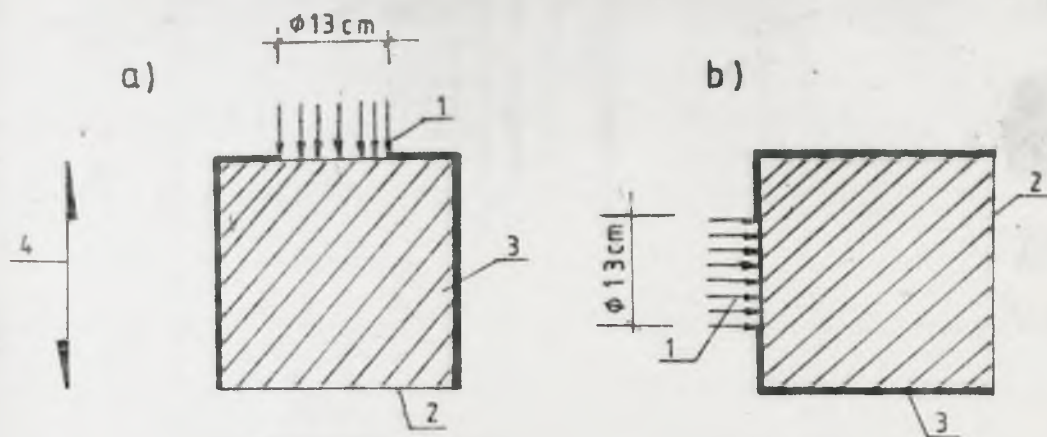
4.6.1. Opis badań i uzyskane wyniki.

Celem badań było ustalenie wpływu na wodoszczelność betonu kierunku tłoczenia wody w stosunku do kierunku układania betonu. Istnienie takiej zależności stwierdzono podczas badania próbek kostkowych przy określaniu wpływu dodatków na wodoszczelność betonu.

Badania przeprowadzono dla 13 serii próbek kostkowych o boku 20 cm wykonanych z betonów, których skład podano w tablicy

4.2. Dla każdej serii wykonano po 12 sztuk próbek, przy czym połowę próbek badano tłocząc wodę w kierunku równoległym do kierunku układania betonu /woda pod

ciśnieniem doprowadzona do powierzchni górnej próbek/, zaś drugą w kierunku prostopadłym /woda pod ciśnieniem doprowadzona do powierzchni bocznej próbek/. Schemat doprowadzenia wody do próbek przedstawiono na rys.4.13.



rys.4.13. Schemat doprowadzenia wody do próbek kostkowych przy badaniu wodoszczelności betonu.

a - woda pod ciśnieniem doprowadzona do górnej powierzchni próbki, b - woda pod ciśnieniem doprowadzona do bocznej powierzchni próbki.

- 1-powierzchnia przeznaczona do tłoczenia wody,
- 2-powierzchnia przeznaczona do obserwacji przecieków,
- 3-powierzchnie pokryte powłoką wodoszczelną,
- 4-kierunek układania betonu.

Wyniki badań zestawiono w tabelicy 4.12 i przedstawiono na rys.4.14. Dla poszczególnych serii betonów i kierunków tłoczenia wody wykonano obliczenia wodochłonności jednostkowej betonu oraz określono tzw."markę" wodoszczelności W_K . Wykonano również wykresy zależności wodochłonności jednostkowej od ciśnienia wody dla dwu kierunków przepływu wody, które przedstawiono na rysunku 4.14a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k,l,m. Z danych zawartych w tabelicy 4.12 i z wykresów /rys.4.14/ wiadac, że

wodochłonność jednostkowa betonu jest prawie we wszystkich przebadanych seriach wyższa przy tłoczeniu wody w kierunku prostopadłym do układania betonu. Z danych przedstawionych w tablicy 4.13 wynika, że średnia wartość stosunku $\frac{w_{\perp}}{w_{\parallel}}$ / $w_{\parallel}$ - kierunek tłoczenia wody równoległy do kierunku betonowania, $w_{\perp}$ - kierunek tłoczenia wody prostopadły do kierunku betonowania/ waha się w dość znacznych granicach i wynosi od 1 do 2,4, co świadczy o niejednorodności struktury betonu. Wartość stosunku $\frac{w_{\perp}}{w_{\parallel}} = 1$ świadczącego o dużej jednorodności betonu wykazały betony z domieszką 0,1 i 0,2% Klutanu N oraz betony z dodatkiem popiołów lotnych. Analizę powyższego zjawiska przeprowadzono już w p.4.5. Z wyników badań przedstawionych w tablicy 4.12 widać, że w przeważającej liczbie przypadków tłoczenia wody prostopadle do kierunku betonowania nastąpił spadek marki wodoszczelności betonu w porównaniu do tłoczenia wody równoległe do kierunku betonowania. Można więc stwierdzić, że słuszniej jest określenie marki wodoszczelności przy tłoczeniu wody prostopadle do kierunku układania betonu ponieważ taki sposób badania stwarza ostrzejsze kryterium oceny wodoszczelności betonu oraz odpowiada prawdopodobnemu przepływowi wody w budowli hydrotechnicznej. Zastosowanie tej metody w praktyce laboratoryjnej wymaga jednak zmiany wielkości i kształtu próbek stosowanych obecnie wg normy BN-62/6738-05.

Tablica 4.12. Wyniki badań wodoszczelności betonów przy różnych kierunkach tłoczenia wody do próbek kostkowych o boku 20 cm, a-kierunek tłoczenia równoległy do kierunku układania betonu, b-kierunek tłoczenia prostopadły do kierunku układania betonu.

Oznaczenie serii betonu wg tabl 4.2.	Kierunek tłoczenia wody	Marka wodoodporności [67]	Wodochłonność jednostkowa betonu [m ³ /s x m ²] x 10 ⁻⁷					
			ciśnienie [MPa]					
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	a	W _k -4	2,74	3,97	4,67	5,38	-	-
	b	W _k -3	2,95	4,20	4,57	-	-	-
2	a	W _k -6	1,49	1,83	2,14	2,32	2,53	3,13
	b	W _k -6	1,38	2,06	2,09	2,38	2,40	3,08
2a	a	W _k -6	1,57	2,27	2,38	2,82	3,03	3,19
	b	W _k -6	1,52	2,35	2,51	2,95	2,95	3,30
2b	a	W _k -5	1,72	2,98	3,55	4,41	4,65	-
	b	W _k -3	3,65	4,65	5,93	-	-	-
3	a	W _k -2	4,67	5,18	-	-	-	-
	b	W _k -1	7,36	-	-	-	-	-
3a	a	W _k -2	4,62	4,86	-	-	-	-
	b	W _k -1	7,23	-	-	-	-	-
3b	a	W _k -3	3,65	4,31	5,69	-	-	-
	b	W _k -3	3,71	4,96	6,14	-	-	-
4a	a	W _k -3	3,58	4,67	4,94	-	-	-
	b	W _k -2	4,86	7,31	-	-	-	-
4	a	W _k -2	4,44	6,11	-	-	-	-
	b	W _k -1	7,08	-	-	-	-	-

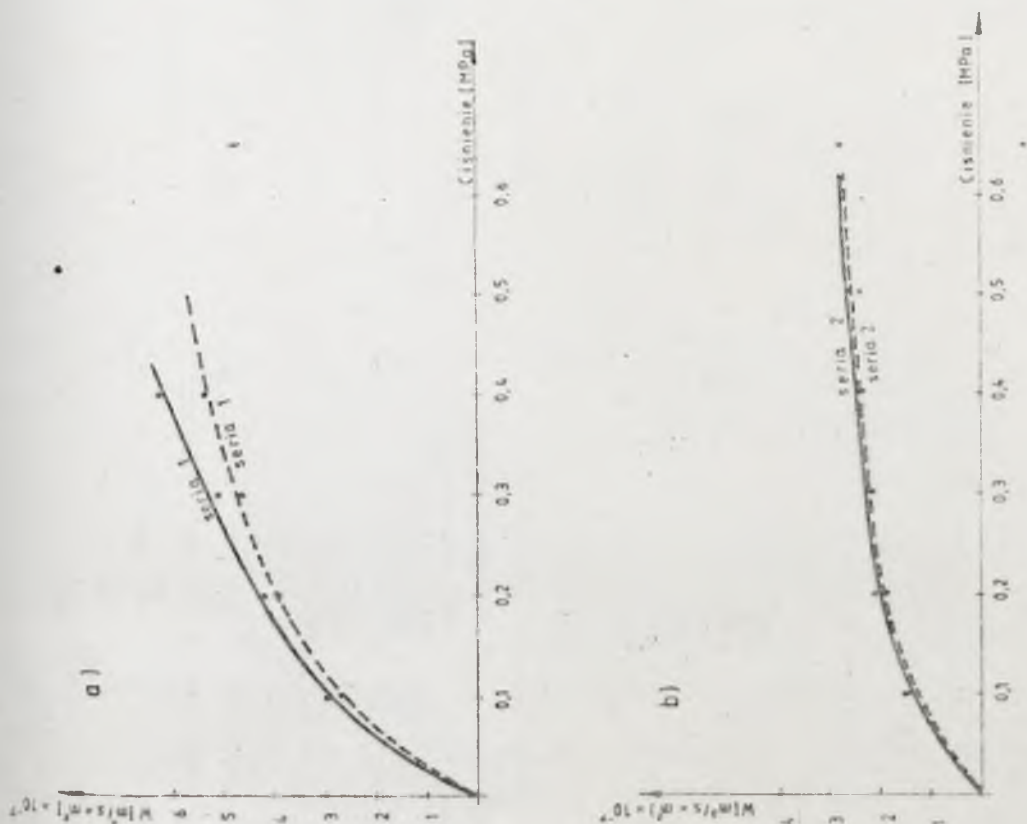
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	a	W_k-3	2,95	4,39	4,39	-	-	-
	b	W_k-1	7,36	-	-	-	-	-
6	a	W_k-2	4,36	6,66	-	-	-	-
	b	W_k-1	7,83	-	-	-	-	-
7	a	W_k-1	8,02	-	-	-	-	-
	b	W_k-1	8,30	-	-	-	-	-
8	a	W_k-2	4,26	5,46	-	-	-	-
	b	W_k-1	8,59	-	-	-	-	-

Tablica 4.13. Zmiana wodochłonności jednostkowej w zależności od kierunku tłoczenia wody do próbek.

W_{II} - wodochłonność jednostkowa określona przy kierunku równoległym do kierunku układania betonu,

W_I - wodochłonność jednostkowa określona przy kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu.

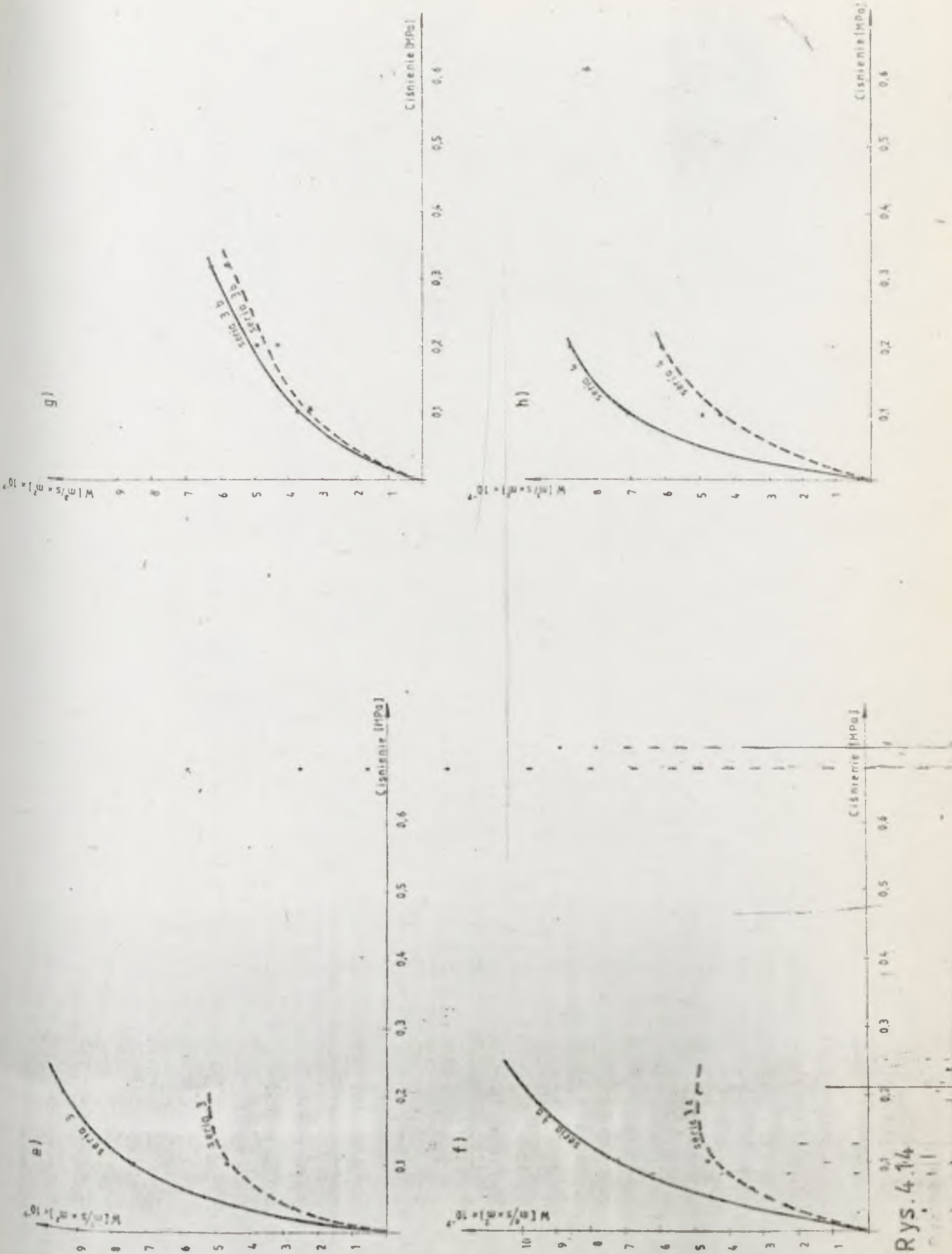
Oznaczenie serii betonu wg tabl.4.2.	Stosunek wodochłonności jednostkowych betonu						Średnia wartość stosunku $\frac{W_I}{W_{II}}$
	$\frac{W_I}{W_{II}}$						
	ciśnienie [MPa]						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,08	1,06	0,98	-	-	-	-
2	0,93	1,13	0,98	1,03	0,95	0,98	1,00
2a	0,97	1,04	1,06	1,05	0,97	1,10	1,03
2b	2,12	1,56	1,67	-	-	-	1,78
3	1,58	-	-	-	-	-	1,58
3a	1,57	-	-	-	-	-	1,57
3b	1,02	1,15	1,08	-	-	-	1,08
4a	1,36	1,57	-	-	-	-	1,47
4	1,60	-	-	-	-	-	1,60
5	2,50	-	-	-	-	-	2,50
6	1,8	-	-	-	-	-	1,8
7	1,04	-	-	-	-	-	1,04
8	2,02	-	-	-	-	-	2,02



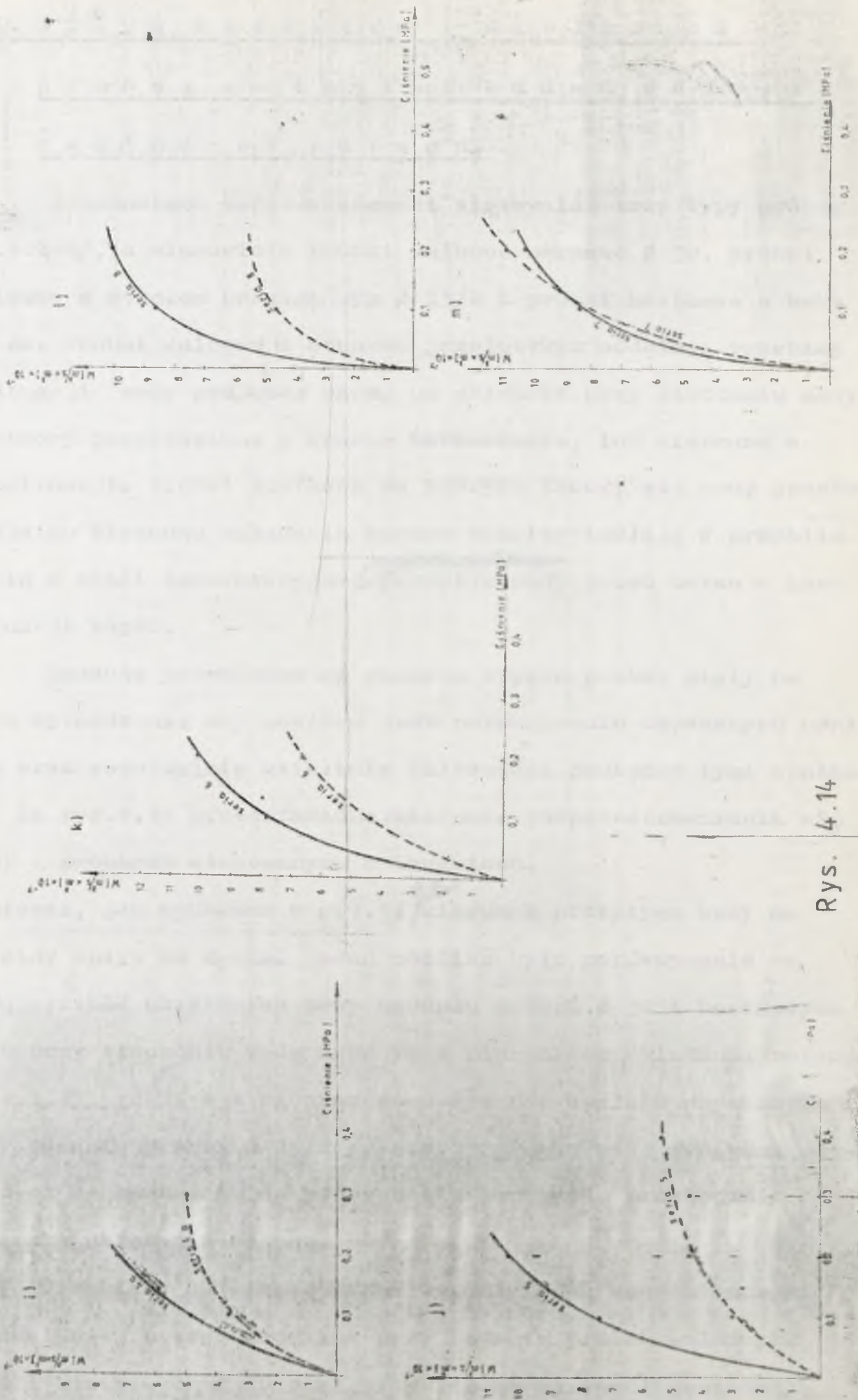
Rys. 4.14

Wpływ kierunku płaczenia wody na wodochłonność jednostkową betonu o różnym składzie

- kierunek płaczenia wody prostopadły do kierunku układania betonu
- - - kierunek zgodny z kierunkiem układania betonu



Rys. 4.14



Rys. 4.14

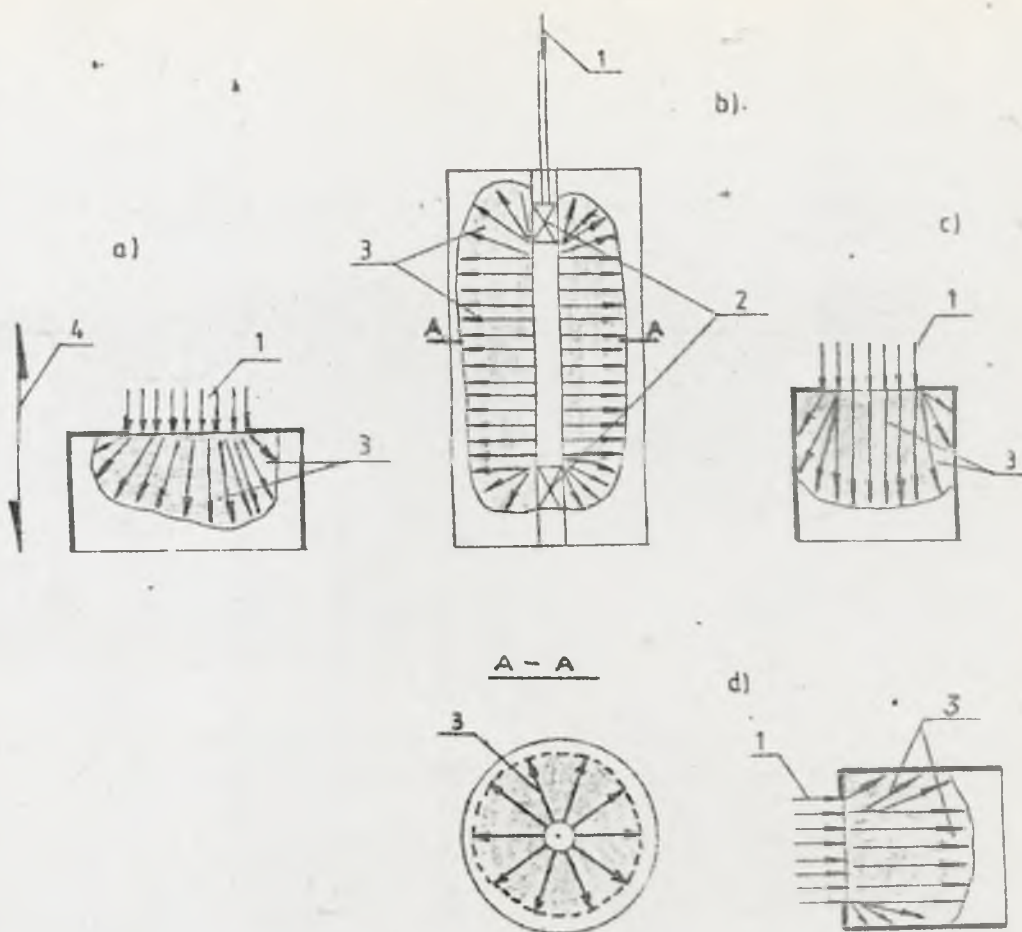
4.7. Wpływ kształtu i wielkości
próbek na wyniki badań wodowsz-
czelności betonu.

W badaniach wodowszczelności stosowałam trzy typy próbek /p.4.2.4/, a mianowicie próbki walcowe normowe $\varnothing 30$, próbki walcowe z otworem przelotowym $\varnothing 25/2$ i próbki kostkowe o boku 20 cm. Próbki walcowe z otworem przelotowym modelują przebieg filtracji wody podczas badań na obiekcie przy tłoczeniu wody w otwory pozostawione w czasie betonowania, lub wiercone w konstrukcji. Próbki kostkowe do których tłoczy się wodę prostopadle do kierunku układania betonu odzwierciedlają w przybliżeniu w skali laboratoryjnej ~~przepływ~~ przepływ wody przez beton w konstrukcji zapór.

Badania prowadzone na różnych typach próbek miały na celu sprawdzenie czy możliwe jest porównywanie uzyskanych wyników oraz ewentualnie ustalenie zależności pomiędzy tymi wynikami. Na rys.4.15 przedstawiono kierunku rozprzestrzeniania się wody w próbkach stosowanych w badaniach.

Ponieważ, jak wykazano w p.4.5^{.46}, kierunek przepływu wody ma istotny wpływ na wyniki badań możliwe było porównywanie ze sobą wyników uzyskanych przy badaniu próbek $\varnothing 30$ i kostkowych $\varnothing 20$ przy tłoczeniu wody zgodnym z kierunkiem układania betonu /rys.4.15 próbki a i c/ oraz porównywanie wyników uzyskanych przy badaniu próbek $\varnothing 25/2$ /rys.4.15 próbka c/ z wynikami uzyskanymi na kostkach, do których tłoczono wodę prostopadle do kierunku układania betonu.

W tablicy 4.14 zestawiono wyniki badań wodochłonności jednostkowej betonu uzyskane przy badaniu próbek walcowych $\varnothing 30$ i kostkowych $\varnothing 20$ oraz przybliżone wartości gęstości



Rys.4.15. Kierunki przemieszczania się wody w próbkach.

a/ $\varnothing$ 30, b/ $\varnothing$ 25/2, c/ $\varnothing$ 20, d/ $\varnothing$ 20

1- doprowadzenie wody, 2-końcówki jak na rys.4.5

3.-kierunki rozchodzenia się wody w betonie

4- kierunek układania betonu.

pozornych betonów określone przed badaniem wodoszczelności.

W tablicy tej zamieszczono również wartości wskaźników zmiany wodochłonności jednostkowej $\frac{wb}{wa}$ / i gęstości pozornej betonu $\frac{\rho_b}{\rho_a}$ / w zależności od rodzaju badanej próbki.

Analizując wyniki można stwierdzić, że we wszystkich przebadanych seriach próbek wykonanych z różnych mieszanek betonowych wyższą wodochłonność jednostkową wykazywały próbki kostkowe w porównaniu z walcowymi średnio o około 41%. Wskaźniki zmiany wodochłonności jednostkowej maleją wraz ze wzrostem

Tablica 4.14. Zestawienie średnich wyników badań wodochłonności jednostkowej betonów uzyskanych przy badaniu: a - próbek walcowych $\phi 30$ } kierunek tłoczenia wody równoległy do kierunku układania betonu.
b - próbek kostkowych $\phi 20$ }

Nazwa serii betonu wg. tabl. 4.2.	Rodzaj bada- nych próbek	Gęstość pozorna betonu w prób- kach [kg/dm ³]	Stosunek gęstości pozornych $\frac{\rho_b}{\rho_a}$	Wodochłonność jednostkowa betonu [m ³ /s · m ²] x 10 ⁻⁷												Wskaźnik zmiany wodochłonności jedno- stkowej betonu przy badaniu próbek walcowych i kostkowych $\frac{W_b}{W_a}$											
				Ciśnienie [MPa]												Ciśnienie [MPa]											
				0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16												
1	b	2,490	0,98	2,74	3,97	4,67	5,38	-	-	-	-	-	-	-	-	1,67	1,78	1,68	1,52	-	-	-	-				
	a	2,540		1,64	2,23	2,78	3,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	b	2,500	0,98	1,49	1,83	2,14	2,32	2,53	3,13	1,66	1,65	1,44	1,22	1,02	0,95												
	a	2,539		0,9	1,11	1,49	1,90	2,49	3,30																		
2a	b	2,510	1,00	1,57	2,27	2,38	2,82	3,03	3,19	1,51	1,83	1,62	1,32	1,24	1,01												
	a	2,509		1,04	1,24	1,47	2,14	2,45	3,17																		
2b	b	2,491	0,99	1,72	2,98	3,55	4,41	4,65	-	1,32	1,17	1,30	1,35	-	-												
	a	2,507		1,30	2,54	2,73	3,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-											
3	b	2,488	0,99	4,67	5,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,51	1,23	-	-	-	-	-	-				
	a	2,500		3,09	4,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3a	b	2,495		4,62	4,86	-	-	-	-						
	a	2,504	1,00	3,54	4,18	-	-	-	-	1,31	1,16	-	-	-	-
3b	b	2,504	1,00	3,63	4,31	5,69	-	-	-	1,40	1,02	1,08	-	-	-
	a	2,508		2,59	4,22	5,29	-	-	-						
4a	b	2,488	0,98	3,58	4,67	4,94	-	-	-	1,05 ^x	0,99 ^x	-	-	-	-
	a	2,536		3,42	4,71	-	-	-	-						
4	b	2,496	0,99	4,44	6,11	-	-	-	-	1,33	1,32	-	-	-	-
	a	2,528		3,33	4,62	-	-	-	-						
5	b	2,498	0,98	2,95	4,39	4,39	-	-	-	1,98	1,73	1,50	-	-	-
	a	2,547		1,49	2,54	2,92	2,92	-	-						
6	b	2,479	0,98	4,36	6,66	-	-	-	-	1,72	1,74	-	-	-	-
	a	2,520		2,54	3,82	4,82	-	-	-						
7	b	2,459	0,98	8,02	-	-	-	-	-	2,41 ^x	-	-	-	-	-
	a	2,507		3,33	5,10	-	-	-	-						
8	b	2,469	0,97	4,26	5,46	-	-	-	-	1,63	1,22	-	-	-	-
	a	2,534		2,61	4,46	4,90	-	-	-						
						wartość średnia wskaźnika									
						wartość średnia przy obliczeniu średniej									
						wartość średnia									

ciśnienia wody i już przy ciśnieniu 0,6 MPa osiągają wartości bliskie 1,0, a więc zacierą się różnica pomiędzy wodochłonnością jednostkową określaną na obu rodzajach próbek. Można przypuszczać, że na różnice w wartościach wodochłonności jednostkowej występujące przy badaniu obydwu typów próbek miał ^{wpływ} charakter przepływu wody wynikający z różnego stosunku wielkości pola powierzchni przez którą tłoczono wodę, do wielkości pola powierzchni przekroju próbki, który wynosił dla próbek walcowych 0,28, a dla kostkowych 0,33.

W celu stalenia dokładnych współczynników, umożliwiającymi porównywanie wyników badań wodoszczelności uzyskanych przy badaniu próbek walcowych $\varnothing$ 30 z wynikami uzyskanymi na próbkach kostkowych należałoby przeprowadzić większą ilość badań, a uzyskane wyniki opracować statystycznie.

W tablicy 4.15 zestawiono wyniki badań wodoszczelności betonów uzyskane przy badaniu próbek walcowych z otworem przelotowym $\varnothing$ 25/2 oraz kostkowych $\varnothing$ 20 /rys.4.15. b.d/. Dla obydwu typów próbek woda podczas badania tłoczona była w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu, inny natomiast był charakter przemieszczania się czoła zawilgocenia w betonie. W przypadku próbek z otworem woda przemieszczała się promieniście, a w przypadku kostkowych prawie prostoliniowo. Wartości wodochłonności jednostkowych dla próbek walcowych $\varnothing$ 25/2 obliczano według wzoru 4-2, zaś dla próbek kostkowych według wzoru 4-1. Średnie wyniki tych obliczeń zestawiono w tablicy 4.15, w której również obliczono wskaźniki zmian wodochłonności jednostkowej i gęstości pozornej betonu.

Z przedstawionych wyników widać, że wartości wodochłonności jednostkowych betonu obliczone dla obu rodzajów próbek tylko nieznacznie różnią się między sobą. Ponieważ przeprowadzone

Tablica 4.15. Wzrostanie średnich wyników badań wodochłonności jednostkowej betonów uzyskanych przy badaniu.

c - próbek walcowych $\phi 25/3$ } kierunek tłoczenia wody
d - próbek kostkowych 20 } - prostopadły do kierunku
układania betonu.

Nazwa serii, betonu wg. tabl. 4.2 4.3.	Rodzaj badanych próbek	Gęstość pozorna betonu w próbkach [kg/dm ³]	Stosunek gęstości pozornych $\frac{\rho_c}{\rho_d}$	Wodochłonność jednostkowa betonu w [m ³ /s.m ² x] 10 ⁻⁷	Ciśnienie [MPa]												Wskaźnik zmiany wodochłonności jednostkowej przy badaniu próbek walcowych i kostkowych $\frac{w_c}{w_d}$
					Ciśnienie [MPa]												
					0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	
1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	c	2,490	1,00		3,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	d	2,496			2,95	4,20	4,57	6,34	-	-	1,28	-	-	-	-	-	
	c	2,392	1,00		1,34	1,95	2,40	-	-	-	0,92	0,82	0,88	-	-	-	
	d	2,398			1,46	2,38	2,72	2,72	2,90	3,35	-	-	-	-	-	-	
	c	2,406			1,77	2,56	3,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4-1	d	2,415	0,99		1,49	2,69	2,87	2,45	3,32	-	1,19	0,95	1,12	-	-	-	

c.d. Tablica 4.15.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
-2	c	2,379	1,00	2,62	3,83	4,68	-	-	-	1,00	1,04	1,05	-	-	-
	d	2,396		2,61	3,69	4,47	5,37	5,77	-						
B-1	c	2,360	1,00	2,46	4,11	4,36	-	-	-	0,82	0,94	0,88	-	-	-
		2,367		3,00	4,39	4,94	6,02	-	-						
		średnia	1,00				wartość średnia wskaźnika								
										1,04	0,94	0,98			

badania były wykonane tylko dla pięciu serii różnych mieszanek betonowych można jedynie wnioskować, że celowym jest prowadzenie szerszych badań w tym kierunku - pozwalającym na bezpośrednie badanie wodoszczelności betonu w konstrukcji.

4.8. Powtórne badanie wodoszczelności betonu.

Powtórno badania wodoszczelności betonu nie były przewidziane w programie prac badawczych. Z uwagi jednakże na zaobserwowany wyraźny wzrost wodoszczelności betonu przy powtórnym badaniu próbek w czasie badań wstępnych dotyczących wpływu napowietrzenia wody na wodoszczelność betonu zdecydowano się na przeprowadzenie badań sprawdzających i zamieszczenie ich w pracy.

Po przeprowadzeniu pierwszego badania wodoszczelności betonu próbki walcowe $\varnothing 30$ odłączono od aparatury i pozostawiono w pomieszczeniu laboratoryjnym w warunkach powietrzno-suchych /temperatura powietrza $20 \pm 2^\circ\text{C}$ wilgotność względna powietrza

70%/ do momentu uzyskania przez nie tej samej masy, którą posiadały przed badaniem wodoszczelności. Można więc było założyć, że próbki posiadały w przybliżeniu tę samą wilgotność co przed pierwszym badaniem.

Okres przechowywania próbek wynosił około 4-ch dni. Następnie próbki ponownie umieszczono w aparaturze i wykonywano po raz drugi badania wodoszczelności. Uzyskane średnie wyniki badań oraz wskaźniki zmian wodoszczelności zestawiono w tablicach 4.16, 4.17 i przedstawiono na rys. 4.16 a, b, c, d, e. Jak widać przy powtórnym badaniu nastąpił znaczny wzrost marki wodoszczelności betonu we wszystkich przebadanych seriach próbek. Średni wskaźnik zmiany wodoszczelności jednostkowej betonu przy powtór-

Tablica 4.16. Zestawienie średnich wyników badań wodoszczelności betonów uzyskanych przy dwukrotnym badaniu wodoszczelności próbek walcowych $\phi 30$

I - pierwsze badanie wodoszczelności

II - drugie badanie wodoszczelności

Nazwa serii betonu wg. tabl. 4.2. 4.3.	Ma- riant bada- nia	Ilość wodo- szczel- ności betonu wg. 67	Wodoszczelność jednostkowa betonu [m ³ /s · m ²] × 10 ⁻⁷												Wskaźnik zmiany wodochłonności jedno- stkowej betonu przy powtórnym badaniu -wI -wII						Średni wskaźnik zmiany wodochłō- ności jednostki wej.
			Ciśnienie [MPa]												Ciśnienie [MPa]						
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16						
	I	W-4	1,64	2,23	2,78	3,34															
1	II	> W-6	0,21	0,71	0,82	0,46	0,55	0,50	7,81	3,14 ³	6,62	7,70	-	-	7,20						
2	I	> W-6	0,2	1,11	1,49	1,20	2,49	3,30													
	II	> W-6	0,30	0,75	0,67	1,01	0,88	1,50	2,37	1,48	1,99	1,88	2,03	2,54	2,16						
2a	I	> W-6	1,04	1,24	1,47	2,14	2,45	3,17													
	II	> W-6	0,25	0,59	0,55	0,75	0,61	0,90	4,16	2,25	2,67	2,85	4,02	3,52	3,25						
2	I	W-2	1,14	2,19	2,22	2,21	3,47														
	II	> W-6	0,21	0,42	0,46	0,63	0,84	0,90	5,43	5,21	4,83	5,25	4,13	-	4,97						

c.d. Tablicy 4.16.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P-1	I	W-5	1,38	2,80	3,14	3,63	2,94		5,52	5,09	4,30	5,11	6,91		5,39
	II	> W-6	0,25	0,55	0,73	0,71	0,57	0,84							
P-2	I	> W-6	0,40	0,86	1,11	0,71	0,92	1,38							
	II	> W-6	0,63	0,76	0,84	0,88	0,84	1,26	0,63	1,13	1,22	0,81	1,10	1,10	1,02
R	I	W-4	1,57	2,44	2,32	3,66	—	—							
	II	> W-6	0,73	1,13	1,15	1,34	1,34	1,55	2,15	2,16	2,02	2,73	—	—	2,23
R-1	I	W-4	1,66	2,47	2,87	3,40	—	—							
	II	> W-6	0,48	0,90	0,67	0,71	0,71	0,92	3,46	2,74	4,28	4,79	—	—	3,82
W-4	I	W-3	1,88	3,27	3,35	—	—	—							
	II	> W-6	0,38	0,92	0,92	0,92	0,84	0,92	4,95	3,55	3,64	—	—	—	4,05
B-1	I	W-5	1,49	2,45	2,45	3,27	3,44	—							
	II	> W-6	0,42	0,59	0,92	1,59	2,06	1,89	3,55	4,15	2,66	2,06	1,67	—	2,82

x/ wyniki nie brane pod uwagę przy obliczaniu średniej.

Tablica 4.17. Zestawienie średnich wyników uzyskanych przy dwukrotnym badaniu wodoszczelności próbek walcowych ϕ 30.

I - pierwsze badanie wodoszczelności

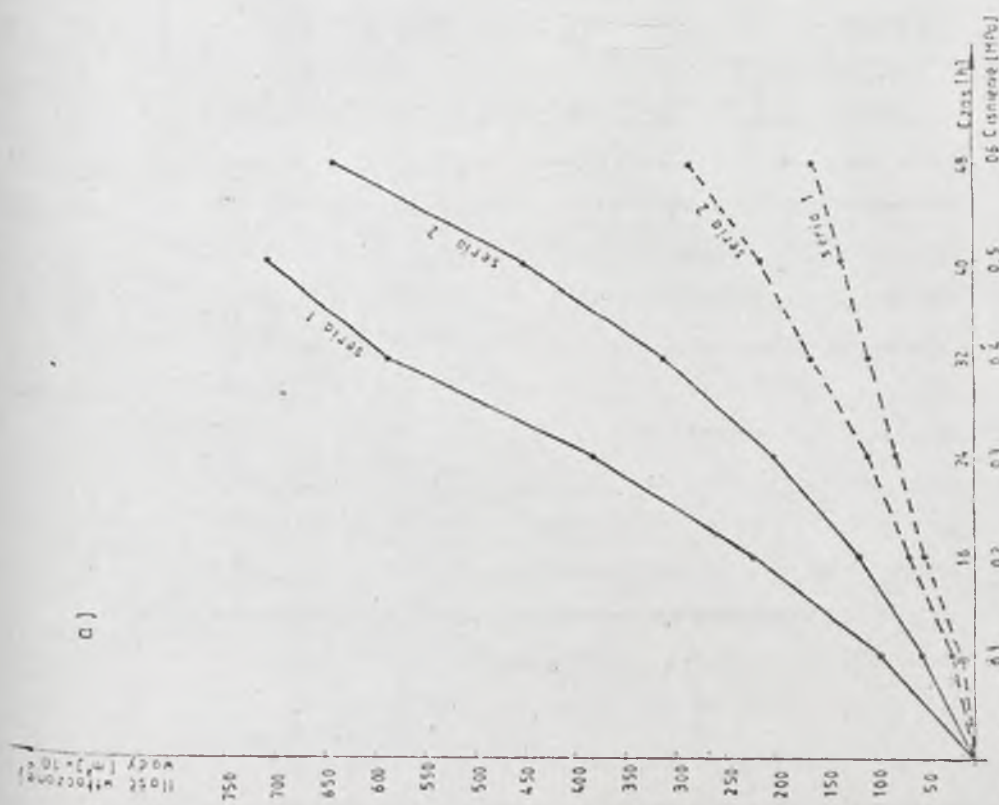
II-drugie badanie wodoszczelności.

Oznaczenie serii betonów wg tabl. 4.2 4.3	wariant badania	Ilość wtłoczonej wody [m ³] x 10 ⁻⁶					
		Ciśnienie [MPa]					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8
1	I	<u>95</u> ^x 95	<u>129</u> 224	<u>161</u> 365	<u>205</u> 590	-	-
	II	<u>12</u> 12	<u>41</u> 53	<u>24</u> 78	<u>27</u> 104	<u>32</u> 136	<u>29</u> 165
2	I	<u>52</u> 52	<u>64</u> 116	<u>86</u> 202	<u>110</u> 312	<u>144</u> 456	<u>191</u> 647
	II	<u>22</u> 22	<u>44</u> 66	<u>39</u> 104	<u>58</u> 163	<u>51</u> 214	<u>75</u> 239
2a	I	<u>60</u> 60	<u>72</u> 132	<u>85</u> 217	<u>124</u> 341	<u>142</u> 433	<u>183</u> 666
	II	<u>15</u> 15	<u>31</u> 46	<u>32</u> 78	<u>42</u> 121	<u>26</u> 157	<u>52</u> 209
P.	I	<u>66</u> 66	<u>127</u> 193	<u>134</u> 327	<u>192</u> 519	<u>187</u> 706	-
	II	<u>12</u> 12	<u>24</u> 36	<u>28</u> 64	<u>37</u> 101	<u>49</u> 150	<u>52</u> 202
P-1	I	<u>80</u> 80	<u>162</u> 242	<u>182</u> 424	<u>210</u> 634	<u>230</u> 864	<u>43</u> 211
	II	<u>15</u> 15	<u>31</u> 46	<u>43</u> 89	<u>41</u> 130	<u>32</u> 163	<u>48</u> 211

c.d. Tablicy 4.17.

1	2	3	4	5	6	7	8
P-2	I	<u>23</u> 23	<u>50</u> 73	<u>64</u> 137	<u>41</u> 178	<u>53</u> 231	<u>30</u> 311
	II	<u>36</u> 36	<u>44</u> 80	<u>49</u> 129	<u>51</u> 180	<u>48</u> 228	<u>73</u> 301
R	I	<u>91</u> 91	<u>141</u> 232	<u>134</u> 366	<u>212</u> 578	-	-
	II	<u>43</u> 43	<u>65</u> 108	<u>67</u> 175	<u>77</u> 252	<u>78</u> 330	<u>90</u> 420
R-1	I	<u>96</u> 96	<u>143</u> 239	<u>138</u> 397	<u>197</u> 594	-	-
	II	<u>28</u> 28	<u>52</u> 80	<u>39</u> 119	<u>41</u> 160	<u>41</u> 201	<u>54</u> 255
A-4	I	<u>109</u> 109	<u>189</u> 298	<u>194</u> 492	-	-	-
	II	<u>27</u> 27	<u>53</u> 80	<u>54</u> 134	<u>53</u> 187	<u>48</u> 235	<u>54</u> 289
B-1	I	<u>86</u> 86	<u>142</u> 228	<u>142</u> 370	<u>189</u> 559	<u>199</u> 758	-
	II	<u>24</u> 24	<u>34</u> 58	<u>54</u> 112	<u>95</u> 204	<u>119</u> 323	<u>109</u> 432

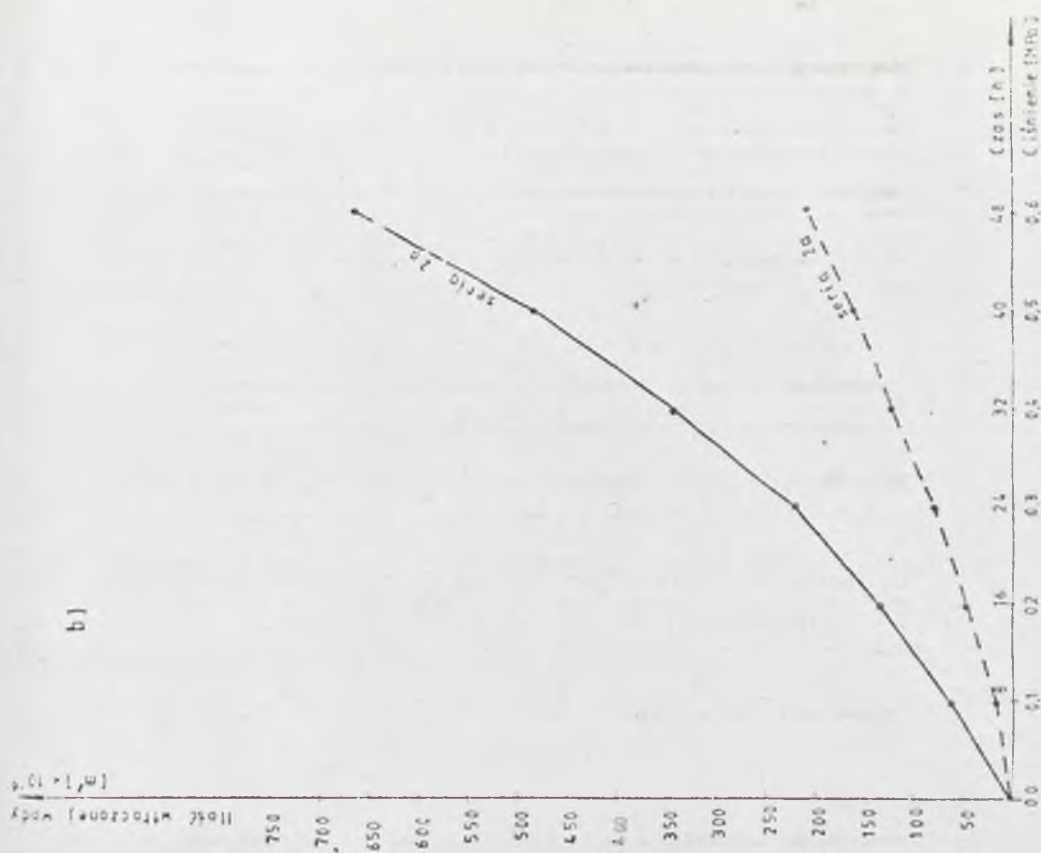
x/ W kolumnach od 3-8 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.

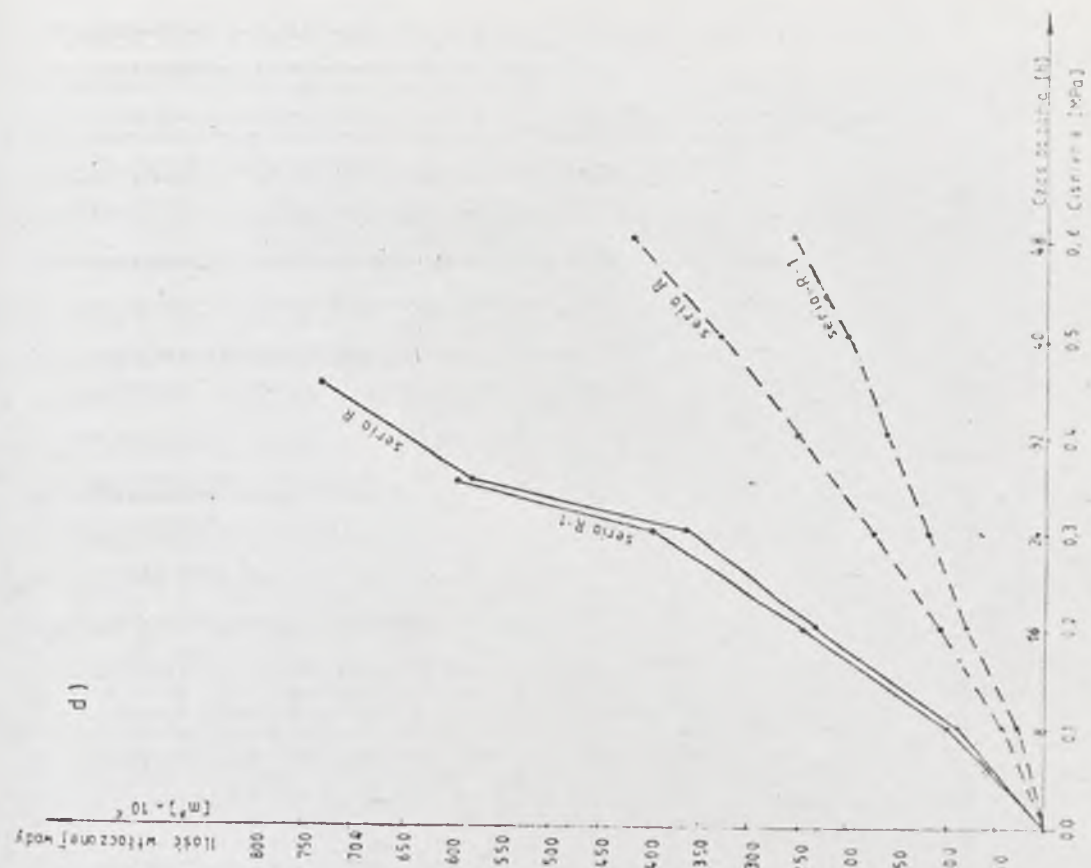
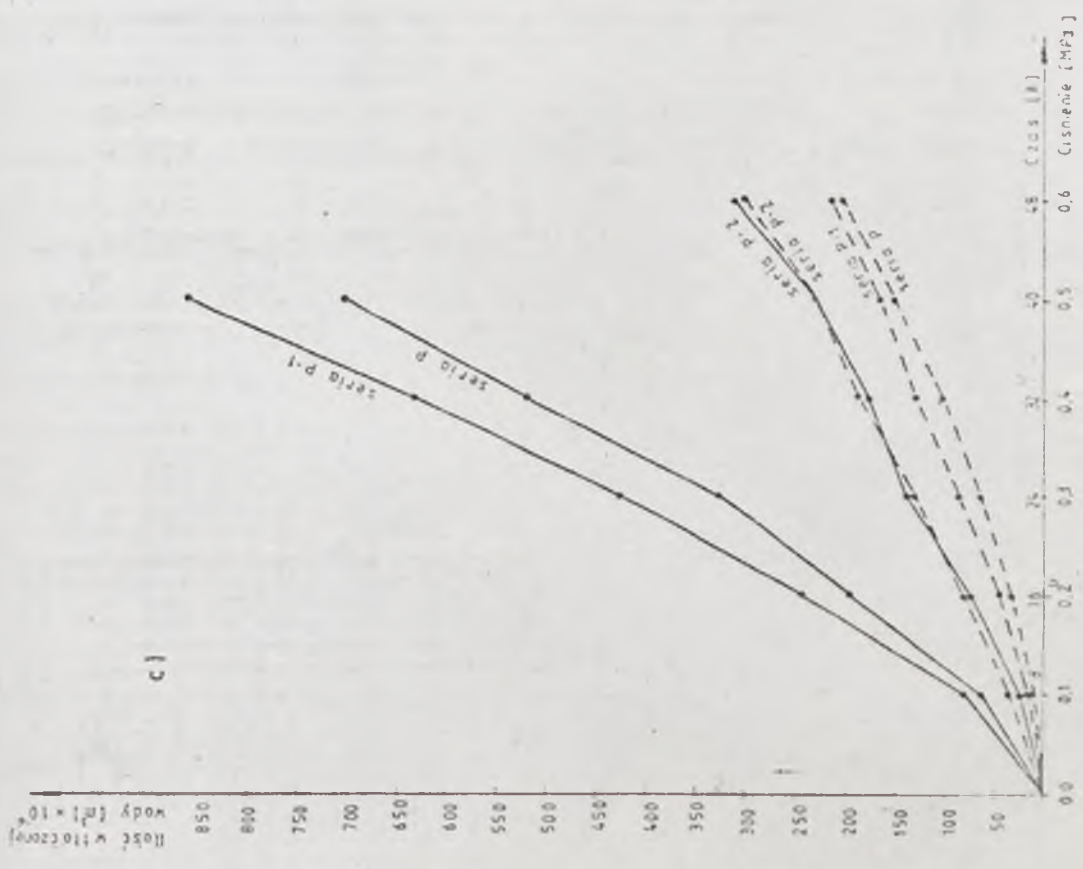


Rys. 4.16

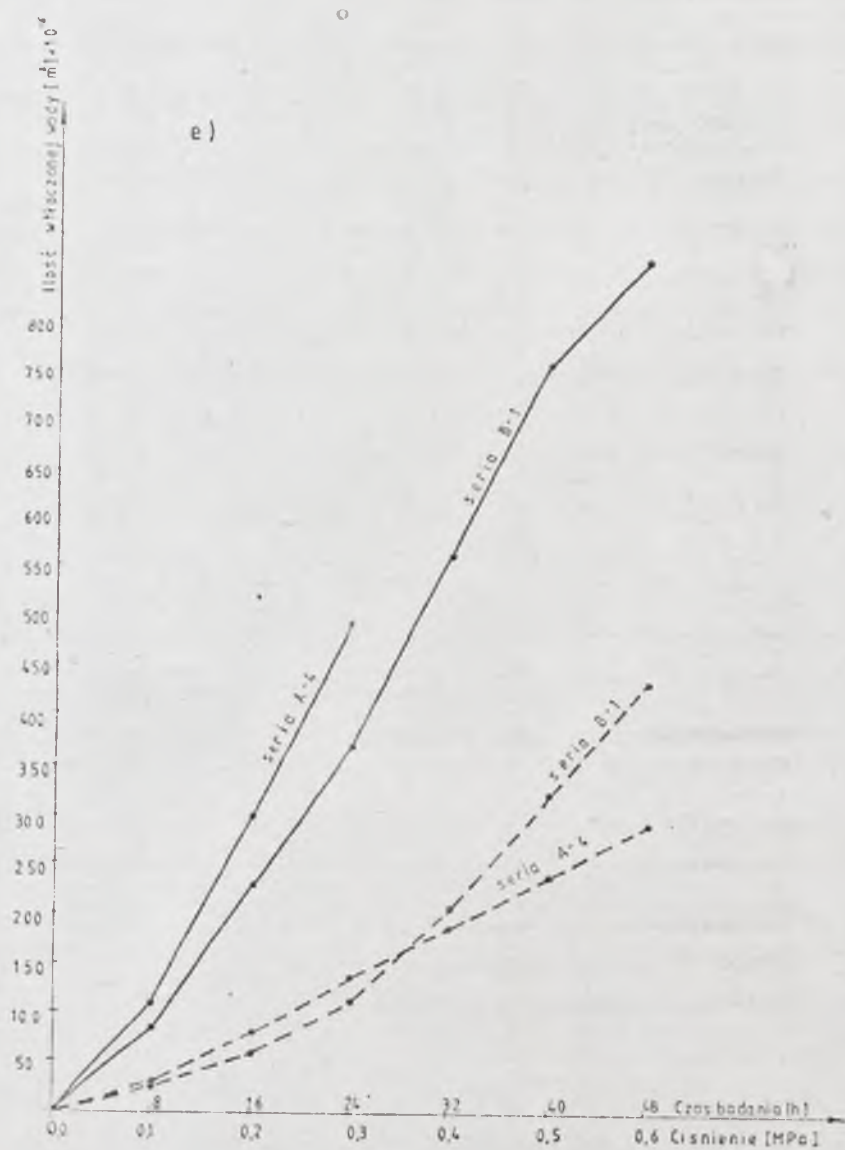
Wykresy ilości wchłoniętej wody w czasie nadszycia
wodosteczności próbek $\phi 30 \times 15 \text{ cm}$

— próbki badane pierwszy raz
- - - - - próbki badane drugi raz





Rys. 4.16



Rys. 4.16

nym badaniu próbek, wskazuje na to, że nastąpił znaczny spadek wodochłonności betonu od około 200 do 740%. Najmniejszy spadek wodochłonności, bo wynoszący zaledwie 2% zanotowano dla serii betonu, który przy pierwszym badaniu wykazywał dużą wodoszczelność W-6 i małą wodochłonność. Największy spadek wodochłonności wykazywały próbki wykonane z betonu nie zawierającego żadnych dodatków /ok. 740%/. Obserwując wykresy /rys. 4.16/ ilości wtłoczonej wody w czasie badania wodoszczelności próbek uzyskane po pierwszym i powtórным ich badaniu można stwierdzić, że przy drugim badaniu betonów wtłaczano kilkakrotnie mniejsze ilości wody.

Powtórne badania wodoszczelności przeprowadzono również na próbkach z otworem przelotowym $\varnothing 25/2$, które po pierwszym badaniu wodoszczelności były przechowywane w warunkach atmosferycznych. Okres przechowywania próbek wykonanych z mieszanek betonowych /tabl. 4.2/ wynosił dla serii 1 - 390 dni, a dla pozostałych serii 200 dni. Po tym okresie próbki przeniesiono do pomieszczenia laboratoryjnego, w którym przechowywano je aż do chwili uzyskania masy, którą posiadały przed pierwszym badaniem /około 7 dni/.

Wyniki badań uzyskane przy powtórным badaniu wodoszczelności tych próbek oraz wskaźniki zmian wodoszczelności zestawiono w tablicach 4.18, 4.19 i przedstawiono na rys. 4.17. Obliczone w tabl. 4.18 wskaźniki wykazują, że wodochłonność jednostkowa betonu spadła od 5 do 15 razy w stosunku do wodochłonności obliczonej na podstawie wyników uzyskanych po pierwszym badaniu. Jak wynika z przeprowadzonych badań nastąpił bardzo duży wzrost wodoszczelności betonu przy powtórным badaniu próbek, które do momentu badania wodoszczelności przechowywane były przez długi okres czasu w warunkach atmosferycznych.

Oznacze- nie se- rii be- tonu wg tabl. 4.2 4.3.	Wiek betonu dni	Warunki dojrzenia- nia do momentu badania	Ciśnie- nie przy którym nastąpił przeciek	Wodochłonność jednostkowa betonu w $[m^3/s.m^2] \times 10^{-7}$										Wskaźnik zmiany wodochłon- ności jednostkowej betonu przy powtórnych badaniach $\frac{W_1}{W_2}$	Średni wska- źnik zmiany wodochłon- ności jed- nostkowej	
				Ciśnienie [MPa]												
				0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4			0,5
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I	90	komora klimatyz.	0,2	3,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,10
II	470	warunki atmosf.	nie prze- ciekały	0,25	0,40	0,79	0,92	1,39	2,10	-	-	-	-	-	-	-
I	90	komora klimatyz.	0,4	1,34	1,95	2,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,90
II	290	warunki atmosf.	nie prze- ciekały	0,31	0,30	0,35	0,31	0,31	0,22	-	-	-	-	-	-	-
I	90	komora klimatyz.	0,3	1,77	2,56	3,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,00
II	290	warunki atmosf.	nie prze- ciekały	0,38	0,52	0,60	0,60	0,73	0,78	-	-	-	-	-	-	-

c.d. Tablica 4.13.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A-2	I	90	komora klimatyz.	0,2	2,62	3,83	4,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II	290	warunki atmosf.	nie prze- ciężki	0,33	0,46	0,56	0,62	0,62	0,77	7,9	8,3	8,4	-	-	-	8,20
B-1	I	90	komora klimatyz.	0,3	2,46	4,11	4,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	II	290	warunki atmosf.	nie prze- ciężki	0,25	0,25	0,28	0,30	0,37	0,52	9,8	16,4	15,6	-	-	-	13,90

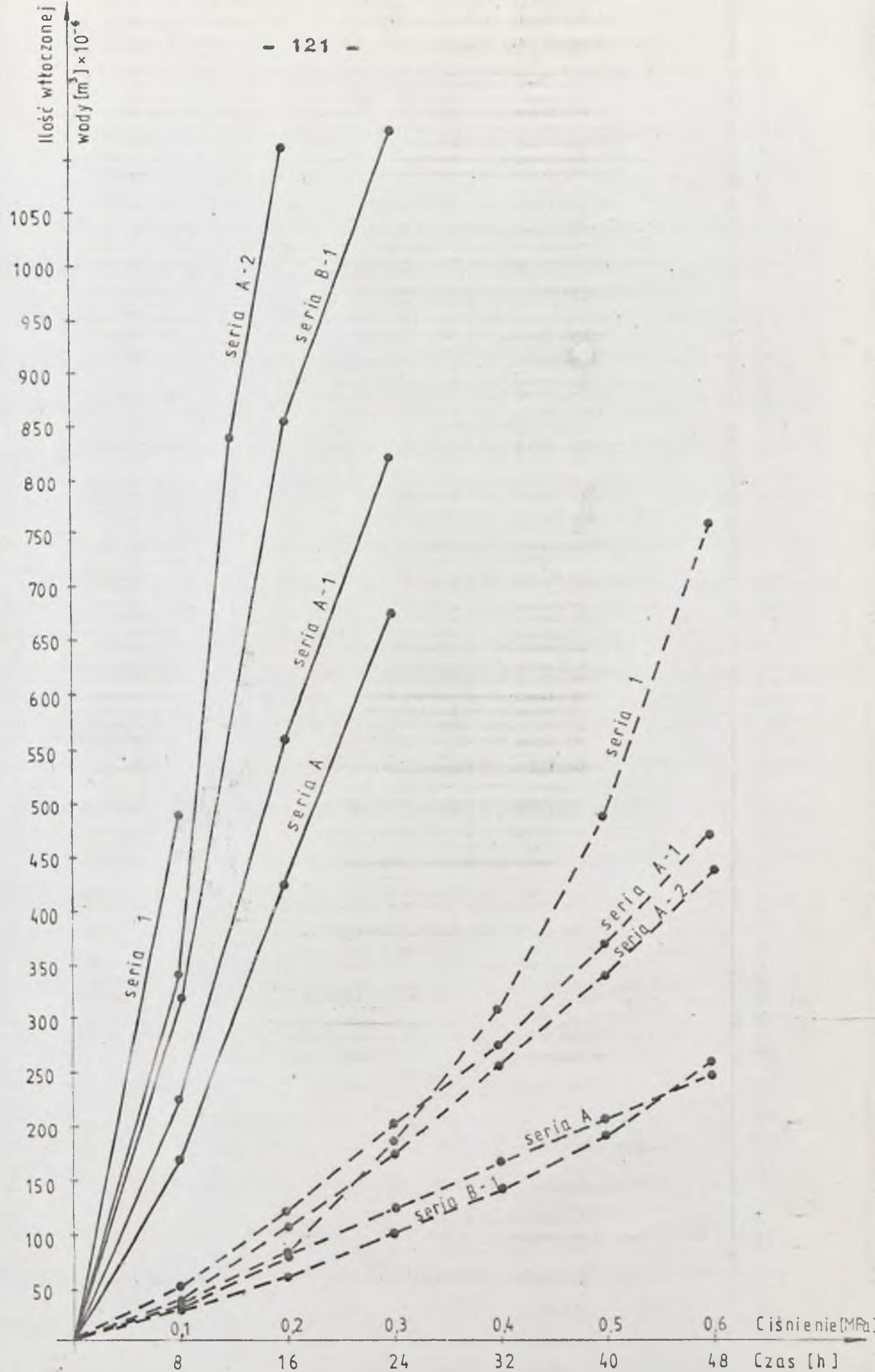
Tablica 4.19. Zestawienie średnich wyników uzyskanych przy dwukrotnym badaniu wodoszczelności próbek walco-
wych ϕ 25/2 z otworem.

I - pierwsze badanie

II- drugie badanie

Oznacze- nie se- rii be- tonu wg tabl. 4.2. 4.3.	Wariant badania	Ilość wtłoczonej wody $[m^3] \times 10^{-6}$					
		Ciśnienie [MPa]					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8
1	I	$\frac{490^x}{490}$	-	-	-	-	-
	II	$\frac{32}{32}$	$\frac{52}{84}$	$\frac{103}{187}$	$\frac{120}{307}$	$\frac{181}{488}$	$\frac{274}{762}$
A	I	$\frac{174}{174}$	$\frac{254}{428}$	$\frac{251}{679}$	-	-	-
	II	$\frac{41}{41}$	$\frac{39}{80}$	$\frac{46}{126}$	$\frac{40}{166}$	$\frac{41}{207}$	$\frac{42}{249}$
A-1	I	$\frac{231}{231}$	$\frac{334}{565}$	$\frac{274}{839}$	-	-	-
	II	$\frac{50}{50}$	$\frac{68}{118}$	$\frac{78}{196}$	$\frac{78}{274}$	$\frac{95}{369}$	$\frac{101}{470}$
A-2	I	$\frac{341}{341}$	$\frac{499}{840}$	$\frac{270}{1110}$	-	-	-
	II	$\frac{43}{43}$	$\frac{60}{103}$	$\frac{75}{176}$	$\frac{81}{257}$	$\frac{81}{338}$	$\frac{100}{458}$
B-1	I	$\frac{220}{220}$	$\frac{236}{856}$	$\frac{268}{1124}$	-	-	-
	II	$\frac{32}{32}$	$\frac{33}{65}$	$\frac{36}{101}$	$\frac{39}{140}$	$\frac{48}{188}$	$\frac{68}{256}$

=/ w kolumnach od 3-8 nad kreską podane są ilości wody wtłoczonej w próbki przy danym ciśnieniu, a pod kreską sumy ilości wody wtłoczonej w próbki w czasie badania.



Rys. 4.17 Wykresy ilości wtłoczonej wody w czasie badania wodoszczelności próbek ϕ 25/2

— próbki badane pierwszy raz
 - - - próbki badane drugi raz

Zaobserwowane zjawisko znacznego wzrostu wodoszczelności betonu można próbować wyjaśnić tym, że wtłoczona pod ciśnieniem w beton woda prawdopodobnie powoduje pełniejszą hydratację ziarn cementu oraz ich pęcznienie. Następstwem tego jest wypełnienie porów i stworzenie bardziej zwartej struktury betonu. W przypadku próbek przechowywanych przez 200 do 390 dni do momentu powtórnego ich badania wpływ na wzrost wodoszczelności miał dłuższy czas dojrzewania, a więc długotrwała i pełniejsza hydratacja spowodowana doprowadzeniem dużej ilości wilgoci podczas badania. Długi czas dojrzewania betonu przy dostępie wilgoci powoduje uszczelnienie betonu co potwierdzone zostało badaniami [54] omówionymi w p.2.8.3 /rys.2.5/.

Dokładne wyjaśnienie przyczyn tego zjawiska wymaga jednak przeprowadzenia dodatkowych szerokich prac badawczych i na podstawie uzyskanych wyników badań i rozważań teoretycznych wysnuć właściwych wniosków. Takie badania nie były celem mojej pracy, a uzyskane wyniki sygnalizują konieczność prowadzenia badań w tym kierunku.

4.9. U s t a l e n i e z a l e ż n o ś c i m i ę d z y w o d o c h ł o n n o ś c i ą j e d n o s t k o w ą b e t o n u, a c i ś n i e n i e m.

Do ustalenia zależności między ciśnieniem tłoczonej wody, a wodochłonnością jednostkową betonu wykorzystano wyniki badań przedstawione i omówione w poprzednich rozdziałach rozprawy. Zależność taka pozwalałaby wnioskować również o marce wodoszczelności betonu na podstawie wartości wodochłonności jednostkowej określanej nawet przy niskich ciśnieniach wody tłoczonej do próbek.

Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły podjęcie

próby ustalenia takiej zależności, ponieważ wszystkie badania prowadzono w takich samych warunkach tzn.:

- betony przeznaczone do badań zaprojektowano przy założeniu tej samej klasy wytrzymałości, a nieznaczące odchylenia wartości wytrzymałości na ściskanie w różnych seriach /tabl.4.24/ wynikały z modyfikacji tych mieszanek domieszkami i dodatkami,
- czas utrzymywania stałego ciśnienia był jednakowy podczas badania wszystkich serii betonów i wynosił 8 h, po którym podnoszono ciśnienie o 0,1 MPa,
- wszystkie próbki dojrzewały przez 90 dni w takich samych warunkach /komora klimatyzacyjna/,
- do wszystkich próbek tłoczono wodę oddzieloną od sprężonego powietrza o temperaturze $+18 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

W oparciu o przeprowadzone badania podjęłam próbę ustalenia takiej zależności.

Całość tych badań pozwala na stwierdzenie, że wodochłonność jednostkowa betonu przy wszystkich innych niezmiennych warunkach zależy od ciśnienia tłoczonej wody, składu mieszanki betonowej, kształtu i wymiarów próbek oraz pola przez które doprowadza się wodę. Wyniki badań zestawiono w tablicy 4.20, 4.21.

Zależności krzywoliniowe między ciśnieniem, a wodochłonnością jednostkową wyrażono krzywą trzeciego stopnia:

$$y = ax + bx^2 + cx^3 \quad [4 - 3]$$

W podanym równaniu zmienna y oznacza wodochłonność jednostkową betonu, a zmienna x wartość ciśnienia. Współczynniki a, b, c estymowano metodą najmniejszych kwadratów:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \text{minimum} \quad [4 - 4]$$

gdzie: ε_i^2 - kwadrat odchylenia i tego pomiaru,

n - liczba pomiarów.

Zależność stopnia wodoszczelności od wodochłonności betonu.
 Probki WALCOWE : D = 30 cm, H = 15 cm,

$$W = +15.65791 \times p - 29.28247 \times p^2 + 23.36777 \times p^3$$

Krzywa W - 5.

lp.	p [MPa]	$W \times 10^7$ [m ³ /(s×m ²)]	$W_o \times 10^7$ [m ³ /(s×m ²)]	R O Z N I C E:	
				W-W _o	o/o
1	0.10	1.34	1.30	0.04	3.259
2	0.20	2.18	2.15	0.03	1.503
3	0.30	2.54	2.69	-0.15	-6.019
4	0.40	3.21	3.07	0.14	4.252
5	0.50	3.39	3.43	-0.04	-1.160

Parametry statystyczne odchylen :

Rozstep = 0.289374.

Średnia arytmetyczna = 0.004149.

Odchylenie przeciętne = 0.080195.

Odchylenie standardowe = 0.107753.

Tablicowanie funkcji :

lp.	p [MPa]	$W_o \times 10^7$ [m ³ /(s×m ²)]
4	0.05	0.71
4	0.10	1.30
4	0.15	1.77
4	0.20	2.15
4	0.25	2.45
4	0.30	2.69
4	0.35	2.90
4	0.40	3.07
4	0.45	3.25
4	0.50	3.43

Zależność stopnia wodoszczelności od wodosłoniwości betonu.

Próbki WALCOWE : D = 30 cm. H = 15 cm.

$$W = +7.36465 \times p - 8.42857 \times p^2 + 9.35897 \times p^3$$

Krzywa W 6.

lp.	p [MPa]	$W \times 10^7$ [m ³ /(s × m ²)]	$W_o \times 10^7$ [m ³ /(s × m ²)]	R O Z W I C E:	
				W - W _o	o/o
1	0.10	0.97	0.66	0.31	31.800
2	0.20	1.18	1.21	-0.03	-2.598
3	0.30	1.48	1.70	-0.22	-15.102
4	0.40	2.02	2.20	-0.18	-8.726
5	0.50	3.17	2.75	0.42	13.405
6	0.60	3.24	3.41	-0.17	-5.125

Parametry statystyczne odchylen :

Rozstep = 0.648462.

Srednia arytmetyczna = 0.022821.

Odchylenie przecietne = 0.229255.

Odchylenie standardowe = 0.276457.

Tablicowanie funkcji :

lp.	p [MPa]	$W_o \times 10^7$ [m ³ /(s × m ²)]
4	0.05	0.35
4	0.10	0.66
4	0.15	0.95
4	0.20	1.21
4	0.25	1.46
4	0.30	1.70
4	0.35	1.95
4	0.40	2.20
4	0.45	2.46
4	0.50	2.75
4	0.55	3.06
4	0.60	3.41

Zależność stopnia wodogrzeczności od wodochłonności betonu.
Probki KOSTKOWE : 20 × 20 × 20 cm,

$$W = +24.57046 \times p - 49.35390 \times p^2 + 42.30716 \times p^3$$

Krzywa W - 5.

lp.	p [MPa]	$W \times 10^7$ [m ³ /(s × m ²)]	$W_0 \times 10^7$ [m ³ /(s × m ²)]	R O Z N I C E:	
				W - W ₀	o/o
1	0.10	1.91	2.01	-0.10	-5.016
2	0.20	3.46	3.28	0.18	5.249
3	0.30	3.90	4.07	-0.17	-4.400
4	0.40	4.72	4.64	0.08	1.711
5	0.50	5.22	5.24	-0.02	-0.290

Parametry statystyczne odchylen :

Rozstep = 0.353188.

Srednia arytmetyczna = 0.004033.

Odchylenie przecietne = 0.108180.

Odchylenie standardowe = 0.139888.

Tablicowanie funkcji :

lp.	p [MPa]	$W \times 10^7$ [m ³ /(s × m ²)]
4	0.05	1.11
4	0.10	2.01
4	0.15	2.72
4	0.20	3.28
4	0.25	3.72
4	0.30	4.07
4	0.35	4.37
4	0.40	4.64
4	0.45	4.92
4	0.50	5.24

Zależność stopnia wodoszczelności od wodochłonności betonu.
 Probki KOSTKOWE : 20 × 20 × 20 cm,

$$W = +18.63108 \times p - 48.14683 \times p^2 + 43.51852 \times p^3$$

Krzywa W - 6.

lp.	p [MPa]	$W_{\times 10^7}$ [m ³ /(s×m ²)]	$W_{o \times 10^7}$ [m ³ /(s×m ²)]	R O Z N I C E: W-W _o o/o	
1	0.10	1.43	1.43	0.00	0.339
2	0.20	2.19	2.15	0.04	1.895
3	0.30	2.35	2.43	-0.08	-3.452
4	0.40	2.58	2.53	0.05	1.778
5	0.50	2.72	2.72	0.00	0.050
6	0.60	3.24	3.25	-0.01	-0.179

Parametry statystyczne odchylen :

Rozstep = 0.126984,
 Średnia arytmetyczna = 0.001111,
 Odchylenie przeciętne = 0.029709,
 Odchylenie standardowe = 0.045733,

Tablicowanie funkcji :

lp.	p [MPa]	$W_{\times 10^7}$ [m ³ /(s×m ²)]
4	0.05	0.82
4	0.10	1.43
4	0.15	1.86
4	0.20	2.15
4	0.25	2.33
4	0.30	2.43
4	0.35	2.49
4	0.40	2.53
4	0.45	2.60
4	0.50	2.72
4	0.55	2.92
4	0.60	3.25

Z powyższego wynikają następujące warunki:

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i^2}{\partial a} = 0$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i^2}{\partial b} = 0$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i^2}{\partial c} = 0$$

Warunki te prowadzą do układu równań, po rozwiązaniu których otrzymuje się wartości współczynników a, b, c. Wyniki tych obliczeń zamieszczono na str. 124 ÷ 127

Na podstawie otrzymanych wyników określono dla marki W-5 i W-6 równania krzywych /nie określano równań dla marki W-1, W-2 W-3 i W-4 z uwagi na zbyt małą ilość wyników badań/. Dla próbek walcowych $\varnothing$ 30 równania mają następującą postać:

a/ krzywa W-5

$$w = 15,66 \cdot p - 29,23p^2 + 23,37 \cdot p^3 \quad [4-5]$$

b/ Krzywa W-6

$$w = 7,36 \cdot p - 8,43 \cdot p^2 + 9,36 \cdot p^3 \quad [4-6]$$

Dla próbek kostkowych $\varnothing$ 20 równania mają następującą postać:

a/ krzywa W-5

$$w = 24,57 \cdot p - 49,35 \cdot p^2 + 42,31 \cdot p^3 \quad [4-7]$$

b/ krzywa W-6

$$w = 18,63 \cdot p - 48,15 \cdot p^2 + 43,52 \cdot p^3 \quad [4-8]$$

gdzie:

w - wodochłonność jednostkowa betonu wyrażona w $[m^3/s.m^2] \times 10^6$

p - ciśnienie tłoczonej wody /MPa/

Parametry statystyczne odchyleń dla poszczególnych krzywych podane są na stronie 124 ÷ 127.

Krzywe W-1, W-2, W-3 i W-4 /rys. 4.18, 4.19/ wykreślono w oparciu o wyniki zamieszczone w tablicach 4.20, 4.21, — zaś krzywe W-5 i W-6 wykreślone są na podstawie podanych powyżej równań [4-5], [4-6], [4-7], [4-8]. W oparciu o przedstawione wykresy możliwe jest określenie w pewnym przybliżeniu marki wodoszczelności betonu na podstawie wodochłonności jednostkowej betonu np.: przy ciśnieniu 0,1 - 0,2 MPa. Podane zależności dotyczą wyników badań prowadzonych w laboratorium przy stałych warunkach i na ograniczonej ilości próbek oraz mieszanek betonowych. Należy prowadzić dalsze badania w tym kierunku uwzględniając wpływ warunków badania /temperatura, wiek betonu wilgotność itp./ i na podstawie uzyskanych wyników wyznaczyć zależności pomiędzy wodochłonnością jednostkową betonu określoną w laboratorium, a wodochłonnością określoną "in situ".

c.d. Tablicy 4.20.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1													
1		1,64	2,23	2,73	3,54								
2b		1,30	2,54	2,73	3,26								
5	W-4	1,49	2,54	2,92	2,92	-	-	1,53	2,44	2,83	3,36	-	-
R		1,57	2,44	2,32 ^x	3,66								
R-1		1,66	2,47	2,37	3,40								
A		0,9 ^x	1,9	2,26	2,64	2,72							
B-1		1,49	2,45	2,45	3,27	3,44	-						
P	W-5	1,14	2,19	2,32	3,31	3,47		1,34	2,18	2,54	3,21	3,39	-
P-1		1,38	2,80 ^x	3,14	3,63	3,94							
2		0,9	1,11	1,49	1,90	2,49	3,30	0,97	1,18	1,48	2,02	2,45	3,24
2a	W-6	1,04	1,24	1,47	2,14	2,41	3,17						
A-0		0,97	1,28	1,47	2,14	2,44	3,11						

x/ wyniki nie brane pod uwagę przy obliczaniu średnich wartości wodociśności.

Tablica 4.21. Zestawienie średnich wyników badań zależności marki wodoszczelności betonu od wodoszczelności jednostkowej uzyskanych przy badaniu próbek kostkowych o boku 20 cm.

Oznaczenie serii betonu wg tabl. 4.2, 4.3.	Marka wodoszczelności	Wodoszczelność jednostkowa betonu $[m^3/s \times m^2] \times 10^{-7}$						Średnia wartość wodoszczelności jednostkowej betonu dla serii wykazujących tę samą markę wodoszczelności. $[m^3/s \times m^2] \times 10^{-7}$					
		Ciśnienie [MPa]						Ciśnienie [MPa]					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3 I	W _K -1	7,36											
3a I		7,23											
4 I		7,00											
5 I		7,26											
6 I		7,83						7,73					
7 II		8,02											
7 I		8,30											
8 I		8,39											
3 II	W _K -2	4,67	5,10										
3a II		4,62	4,86										
4 II		4,44	6,11										
4a I		4,66	7,31					4,54	6,14				

c.d. Tablica 4.21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	13	14
6 II	W _K -2	4,36	6,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8 II		4,26	5,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 I	W _K -3	2,95	4,20	4,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2b I		3,71	4,96	6,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3b II		3,63	4,31	5,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3b I		3,71	4,96	6,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4a II		3,58	4,67	4,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 II		2,95	4,39	4,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-3 I		3,55	4,67	5,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-4 I		2,82	3,92	4,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 II	W _K -4	2,74	3,97	4,67	5,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-1 I		1,49 ^x	2,69 ^x	2,87 ^x	2,45 ^x	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B-1 I		3,00	4,39	4,94	5,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-2 I		2,61	3,68	4,47	5,37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R-1 I		2,74	4,07	4,67	5,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2b II	W _K -5	1,72	2,98	3,55	4,41	4,65	-	-	-	-	-	-	-	-
R I		2,19	3,66	4,02	5,51	5,95	-	-	-	-	-	-	-	-
P-1 I		1,67	3,55	4,31	4,62	5,35	-	-	-	-	-	-	-	-
P-2 I		2,04	3,63	3,71	4,33	4,94	-	-	-	-	-	-	-	-

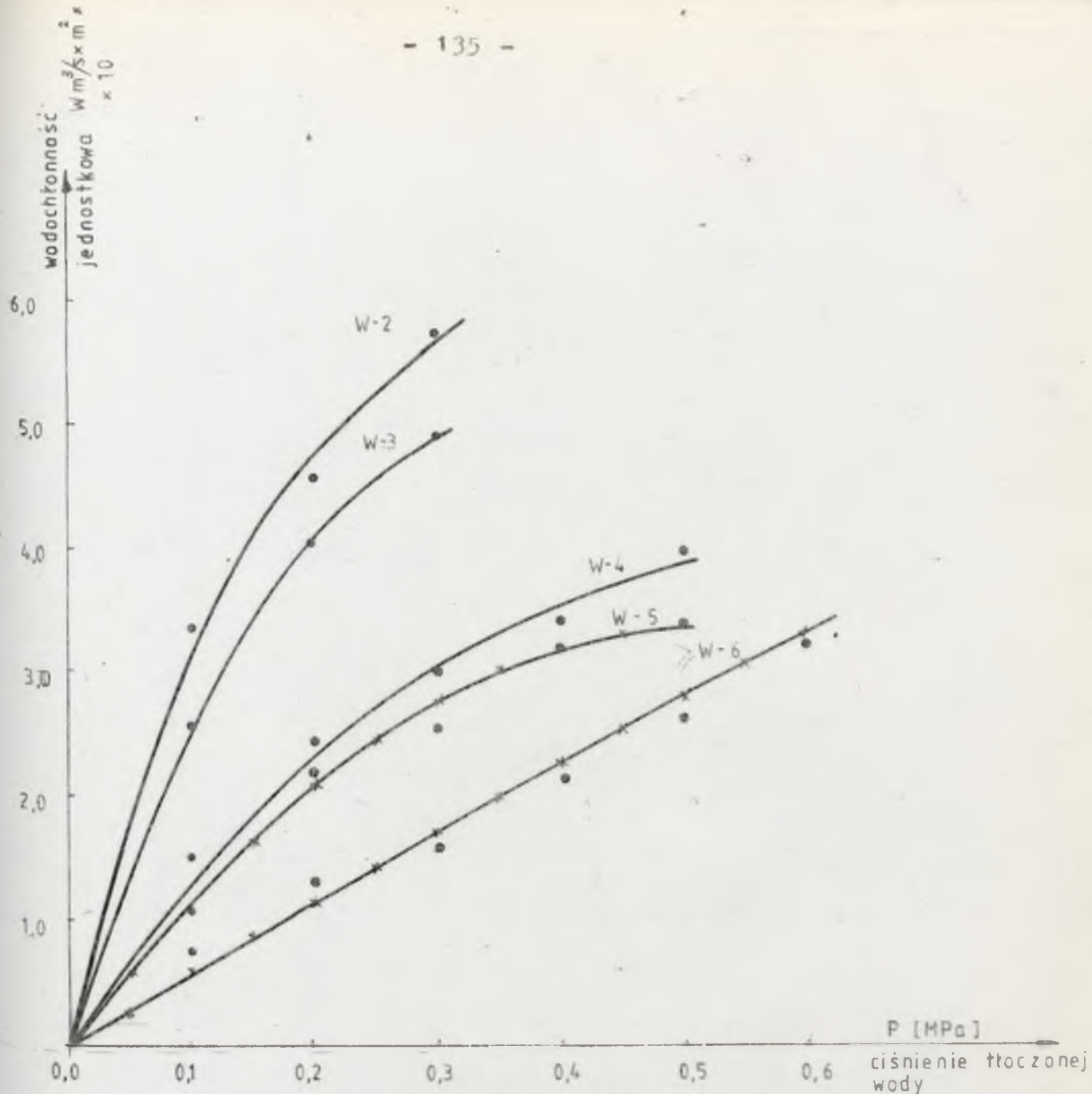
c.d. Tablicy 4.21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A-0 I		1,44	2,43	2,79	2,87	2,92	3,21						
2 II		1,49	1,82	2,14	2,32	2,52	3,13						
2 I		1,38	2,06	2,09	2,38	2,40	3,08						
2a I	$\geq w_k - 6$	1,57	2,27	2,38	2,82	3,03	3,19	1,46	2,18	2,39	2,62	2,77	3,21
2a II		1,52	2,35	2,51	2,95	2,95	3,50						
A I		1,46	2,36	2,72	2,72	2,90	3,35						
P I		1,36	1,96	2,09	2,27	2,61	3,03						

x/ Wyniki, których nie brano pod uwagę przy obliczaniu średnich wartości wodochłonności jednostkowych.

I - kierunek tłoczenia wody prostopadły do kierunku układania betonu.

II - kierunek tłoczenia wody równoległy do kierunku układania betonu.

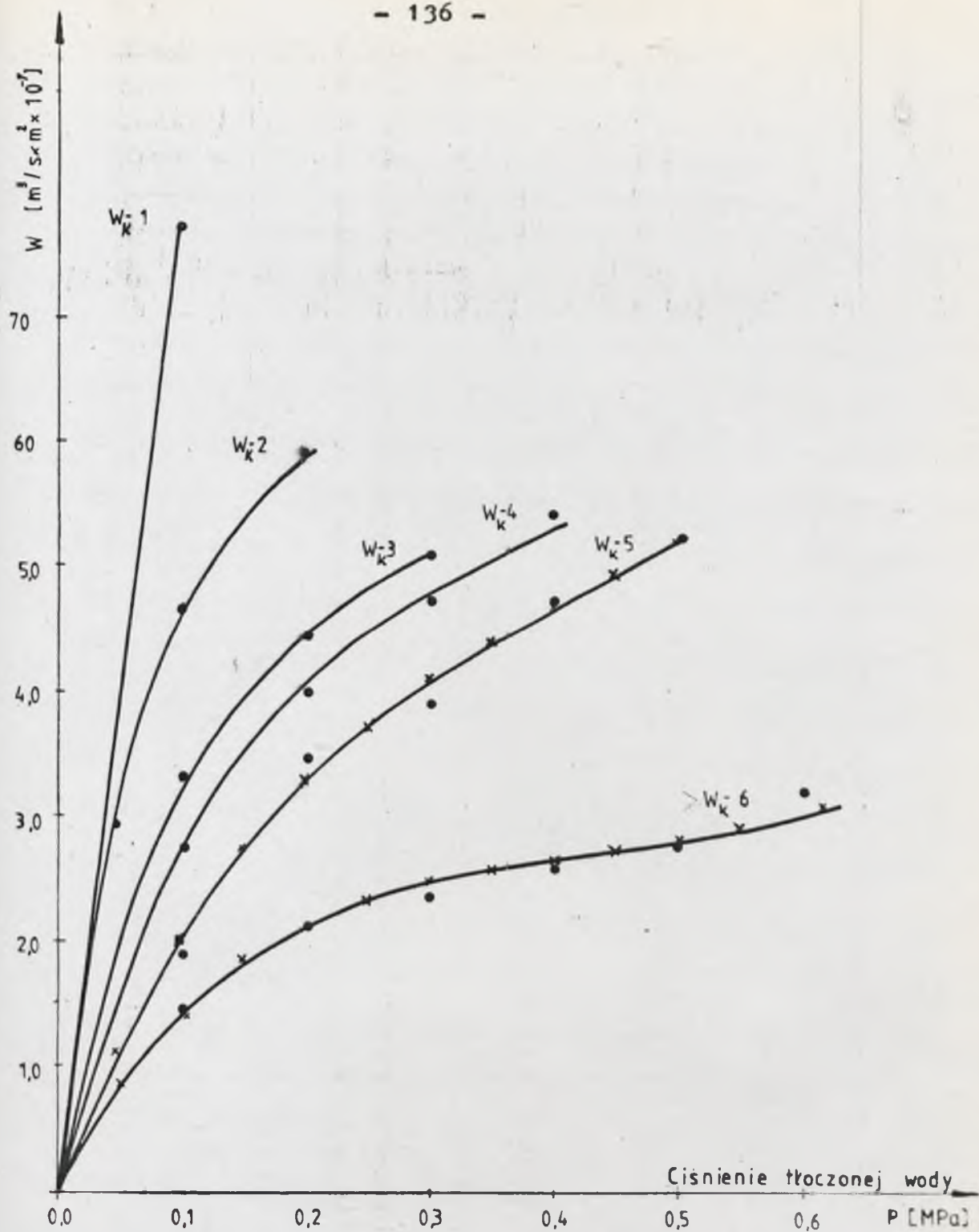


Rys. 4.18

Wykres zależności wodochłonności jednostkowej betonu od ciśnienia tłocznej wody dla próbek ϕ -30 h-15 o różnym stopniu wodoszczelności.

x - punkty wynikające z równania krzywej

• - punkty wynikające z pomiarów



Rys. 4.19

Wykres zależności wodochłonności jednostkowej betonu od ciśnienia tłoczonej wody dla próbek $\varnothing 20 \times 20 \times 20$ cm o różnym stopniu wodoszczelności.

x - punkty wynikające z równania krzywej

• - punkty wynikające z pomiarów

5. WNIOSKI

=====

W oparciu o przeprowadzone badania oraz analizę uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski: - - - -

1. Badania wodoszczelności betonu należy prowadzić za pomocą aparatury umożliwiającej oddzielenie sprężonego powietrza od tłoczzonej wody, gdyż bezpośredni kontakt wody tłoczzonej do betonu ze sprężonym powietrzem wpływa znacznie na zmniejszenie wodochłonności jednostkowej betonu. Takie wymagania spełnia aparatura do badań wodoszczelności opracowana w Zakładzie Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej.
2. Stwierdzono, że ilość wchłanianej wody zależy od kierunku przepływu wody w stosunku do kierunku układania betonu. Większa ilość wchłanianej wody występuje wtedy, gdy woda przepływa w kierunku prostopadłym do kierunku układania betonu. Prawidłowości tej nie stwierdzono w próbkach z domieszką uplastyczniającą-napowietrzającą - Klutan N - powodującą zwykle podwyższenie jednorodności struktury betonu.
3. Stwierdzono zależność pomiędzy wodochłonnością jednostkową badanych betonów, a ciśnieniem oraz marką wodoszczelności.
4. Analizy różnych kryteriów wodoszczelności oraz przeprowadzone badania wykazują, że:
 - ocena wodoszczelności betonu na podstawie wodochłonności jednostkowej nasuwa najmniej zastrzeżeń merytorycznych i umożliwia przy zastosowaniu właściwej aparatury ograniczenie błędów systematycznych badań kontrolnych,
 - aparatura opracowana w Zakładzie Budownictwa Wodnego umożliwia precyzyjny pomiar wszystkich wielkości niezbędnych do obliczania wodochłonności jednostkowej betonu

oraz badanie na próbkach różnej wielkości i kształtach.

5. Badania przeprowadzone na różnych kształtach próbek wykazały, że najbardziej przydatnymi do badań wodoszczelności są:

- próbki sześciennie umożliwiające określenie wodochłonności betonu przy różnych kierunkach tłoczenia wody,
- próbki walcowe $\varnothing 25/2$ z otworem, które stwarzają możliwość porównywania wyników badań laboratoryjnych z wynikami "in situ", a sposób doprowadzenia wody do tych próbek może być zaadaptowany do badań wodochłonności w konstrukcji.

6. Wpływ dodatków i domieszek na wodoszczelność betonu zależy nie tylko od ich rodzaju i ilości, ale również od składu mieszanki betonowej, ilości cementu, wody i rodzaju kruszywa. Dla każdej więc mieszanki betonowej należy sprawdzić wpływ domieszek lub dodatków na wodoszczelność betonu.

7. W toku prowadzenia badań stwierdzono kilka nierozpoznanych dotąd zjawisk i procesów /jak np.: zróżnicowanie wodochłonności w zależności od orientacji próbki, zmniejszenie wodochłonności przy powtórnych wtłaczaniu wody/. Celowe jest prowadzenie dalszych badań, które między innymi powinny obejmować następujące zagadnienia:

- ciśnienie wody w porach betonu, ich wartości, zasięg i zależność od ciśnienia zewnętrznego,
- zmiana struktury betonu na skutek działania ciśnienia wtłaczanej wody /ewentualnie przy wielokrotnym ciśnieniu/,
- różnice struktury betonu w płaszczyznach prostopadłych i równoległych do kierunku układania betonu.

WYKAZ LITERATURY

1. Badowska H., Danilecki W., Mączynski M. - Ochrona budowli przed korozją - Arkady. Warszawa. 1974.
2. Bastian S. - Wodoszczelność betonów z popiołów lotnych - Przegląd Budownictwa 6/1971.
3. Betony wodoszczelne zwykłe i drobnoziarniste - Praca naukowo-badawcza nr. KB/42/68 ITB.
4. Biełowa L.M. - Wiesiełow A.M. i inni - Automaticzeskaja ustanowka dla isspytanija gidrotiechnicziesko-wo bietona na wodopronicajemost - Gidr.Str. 10/1970.
5. Borin D.P. - Pribor dla isspytanija obrazcow bietona na wodopronicajemost - Bieton i Żelezobieton 3/1962.
6. Budownictwo betonowe 7.XVII - Budowle wodne śródlądowe - Arkady Warszawa 1969 r.
7. Budownictwo betonowe - 7.VIII - Badania materiałów, elementów konstrukcji. Arkady. Warszawa. 1970.
8. Budownictwo betonowe t.I cz.1 - Technologia betonu. Arkady Warszawa. 1972.
9. Budownictwo betonowe 7.I. cz.2 - Technologia betonu. Arkady Warszawa 1972.
10. Cechowski J.V. - Poniżenijsie pronicajemosti bietona - Energiia. Moskwa. 1968.
11. Chodakiewicz W. - Badanie wytrzymałości i wodoszczelności betonu "in situ" w fundamencie wykonanym metodą zawiesziny" - Gospodarka Wodna 11/12/ 1973.
12. Doroszenko J.M. Zatrudnaja I.D. - Wlijanije kompleksnych dobawok na dolgowiecznost gidrotiechnicziesko

-wo betona - Gidr.Str.9/1978.

13. Elbakidze M.G. Bondarenko W.B. - O określaniu wodoprzepuszczalności betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych. Gidr.Str.5/1967.
14. Elbakidze M.G. Basbiere W.M. - Szybki sposób badania wodoszczelności betonu - Gidr.Str.12/1957.
15. Fiedorow W.A. - Wlijanije tieplowej obrobotki na dieformativnyje izmienienija betonow - XX nauczno-techn. konferencja MISI.1961.
16. Gościński M. - Projektowanie szczelnego betonu metodą najmniejszej ilości zawartości zaczynu cementowego - praca doktorska P.W.Warszawa 1965 r.
17. Gierych A. Nowak S. - Instrukcja kontroli wodoszczelności betonów budowli wodnych za pomocą urządzenia do badań wodochłonności - ZBiD przy ZBWJ. Warszawa 1970.
18. Gierych A. - Przewidywanie mrozoodporności betonu na podstawie zmodyfikowanej rezerwy próżni i wytrzymałości na rozciąganie - praca doktorska P.W.
19. Gierych A. - Wytyczne projektowania i wykonywania betonów wodoszczelnych i mrozoodpornych - ZBiD przy ZBWJ - Warszawa 1970.
20. Gajowniczek S. i inni - Teoria wodo-i gazoszczelności betonu, przegląd i ocena metod określania szczelności betonu. SiTM. Warszawa 1978.
21. Gaca W. - Przyczynki do zagadnienia wodoszczelności pełnych betonów z krajowych kruszyw lekkich - Cement. Wapno. Gips. 12/1963.
22. Gidrotechničeskij beton na litojnoj piemle - Jerewan.1959

23. Godlewski B. - Aktualne problemy betonów hydrotechnicznych w świetle obrad VIII Kongresu Wielkich Zapor w Edynburgu - Gosp.Wodna 3/1963.
24. Graf O. - Die Eigenschaften des Betons Springer Verlag - Berlin 1960.
25. Jarząbek S. - Polskie normalne cementy portlandzkie i beton. P.B. 1958/504.
26. Jarocki W. - Badanie wodoszczelności betonów hydrotechnicznych. Biul.Inf.Nauk.Tech. ITB-10/1962.
27. Jarocki W. - Wybrane zagadnienia technologii betonu hydrotechnicznego. ITB 1966.
28. Jarocki W. Młodecki J. - Badania środków uszczelniających, uplastyczniających i napowietrzających jako dodatku do betonu hydrotechnicznego. Praca ITB Arkady 1965.
29. Kempa Cz. i inni - Wpływ dodatku Klutanu N na własności betonów. P.W. ISiW. I.Z.WiBW. 1972.
30. Kovacic J. - Mahlfeinheit u Korrosion des Zementz Z-1943/504.
31. Kempa Cz. Lorenc S. - Dobór stosów okruszowych do betonów z kruszywa naturalnego otoczkowego o średnicy ziarn do 120 mm. Gosp.Wodna 10/1969.
32. Kempa Cz. Lorenc S. - Dobór stosów okruszowych do betonów hydrotechnicznych z kruszywa naturalnego o średnicy ziarn do 80 mm. Gosp.Wodna 7/1970.
33. Kempa Cz. Lorenc S. - Wpływ przedozowania dodatków Klutanit i Hydrobet na fizyko-mechaniczne własności betonu z cementu portlandzkiego. Gosp.Wodna 10-11/1971.
34. Karta charakterystyki domieszki napowietrzającej Roksol B-1
Opracowanie Zakładu Badań i Doświadczeń Warszawy

-skiego Przeds. Robót Drogowych.

35. Kopyciński B. Fuksa M. Muszyński W. - Technologia betonu
PWN Łódź. Kraków. 1956.
36. Kozubljew T.M. - K woprosu ob izmienienii GOST po opriediela
-niju wodopromicajemosti gidrotechnicznych
bieronow. Gidr.Str. 1/1960.
37. Kopyciński B. Florek A. Jamróży Z. - Beton zwykły. Arkady
1978.
38. Kirkasow W.P. - Issliedowanije filtracii w postrojennykh
wodopodpornykh bieronnykh sooruzenijach.
Moska. 1956.
39. Michajlew W.D. Broolskij W.P. - Kllijaniye otricatielnykh
tempieratur na procznost i wodopromicajemost
bietona. Bieton i Żelezobieton 6/1967.
- 39a. Muszyński W. - Technologia betonu. Kraków 1973.
40. Nowak S. Gierych A. - Wytyczne badania wodoszczelności
budowli wodnych za pomocą urządzenia do bada-
nia wodochłonności. ZBiD przy ZBWJ. 1968.
41. Nowak S. - Weryfikacja wytycznych badania wodoszczelności
betonu masywnych budowli wodnych za pomocą
urządzenia do badania wodochłonności. ZBiD
przy ZBWJ. 1970.
- 42, Nowak S. - Badanie wybranych własności asfaltobetonu
hydrotechnicznego - wodoszczelność. Gosp.
Wodna 8/1973.
43. Neville A.M. - Właściwości betonu. Arkady Warszawa. 1977.
44. Penkala B. - Wpływ ilości zawartych w cementach alkaliów na
zachowanie się betonów z kruszyw zwirowych -
cement wapno gips. 6/1973. Arkady.
45. Poradnik Laboranta Budowlanego - praca zbiorowa wyd. III.
Arkady. Warszawa 1975.

46. Paprocki A. - Beton w budownictwie komunikacyjnym. WKŁ.
Warszawa. 1975.
47. Pietraszeń R.N. - Protiwodawlenije wody na podoszwie gidrotechnicznych sooruzenij w pieredielnych rosczetnyh sostojanijach. Gidr. Str. 7/1981.
48. Unowocześnienie metod kontroli jakości betonu - Beton hydrotechniczny /projekt normy/ - praca naukowa. PW. Warszawa 1980.
49. Projekt normy - Beton zwykły - PN- /B-0625.
50. Ratinow W.B. Rosenberg T.J. - Dodatki do betonu. Arkady
Warszawa 1977.
51. Rossman J. Gierych A. - Komentarz do zaleceń Międzynarodowej Komisji Wielkich Zapór w sprawie kruszywa. Gosp.Wodna 5/1966.
52. Sokołow I.B. Logunowa W.A. - Filtracja i protiwodawlenije wody w bietonie gidrotechnicznych sooruzenij. M.Energia 1977.
53. Stork J. - Technologia betonu z osobitnym zretelem na wodnostovby. Slov.Akad.Vied.Bratislava.1954.
54. Stolnikow W.W. - Issledowanije po gidrotechniceskomu bietonu. Gosudarstw.Energiet.Izdat. Moskwa 1962.
55. Stolnikow W.W. Rjebindier P.A. Lawrinowicz I.W. - Siedinen-tacjonnyje procesy w bietonnoj smiesi, ich wlijanije na obrazowanije struktury bietona i na jego wodopronicajemost. Doklady Akademii Nauk ZSRR t.81 Nr.3/1951.
56. Schulce W. - Skład i własności betonu do budowy zapór wodnych, Cement Wapno Gips. 7-8/1964.
57. Szlęzak F. - Konstrukcje żelbetowe - PWN Warszawa.Łódź.1954.

58. Tarnaruchij D.M. Szubiart D.N. - Wlijanie powierzchnostno -
aktywnych dobawok na osnovnyje swojstwa roztwo-
row i bieronow. Gidr.Str.7/1971.
59. Wierbieckij D.P. - Isspytanija bieronu na wodopronicajemost.
Gidr.Str.8/1953.
60. Wicczysty A. - Hydrogeologia inżynierska. Wyd.II.PWN
Warszawa 1982.
61. Wierbieckij D.P. - Wodopronicajemost bieronow suchowo chronio-
nija Gidr.Str.13/1953.
62. Zinger A.M. Walenskij A.N. Leszczynskij M.J. - Pribor
opredielenija wodopronicajemosti bieronu.
Gidr.Str. 8/1962.

N O R M Y

63. PN-75/B-06250 - Beton zwykly.
64. PN-75/C-04630 - Woda do celow budowlanych. Wymagania i bada-
nia.
65. BN-62/6738-03 - Beton hydrotechniczny. Skladniki Betonu.
Wymagania techniczne.
66. BN-62/6738-04 - Beton hydrotechniczny. Badania masy betonowej.
67. BN-62/6738-05 - Beton hydrotechniczny. Badanie Betonu.
68. BN-62/6738-06 - Beton hydrotechniczny. Badanie skladnikow
betonu.
69. BN-62/6738-07 - Beton hydrotechniczny. Wymagania techniczne.
70. GOST.4800-59 - Beton hydrotechniczny. Metody badania Betonu.
71. GOST 19246-74
72. DIN 1048 - RFN
73. TGL -0-1048- NRD
74. CSN-732025/56-CSRS- Wodostavebne betony, skusanie wodostave-
bneho Betonu.

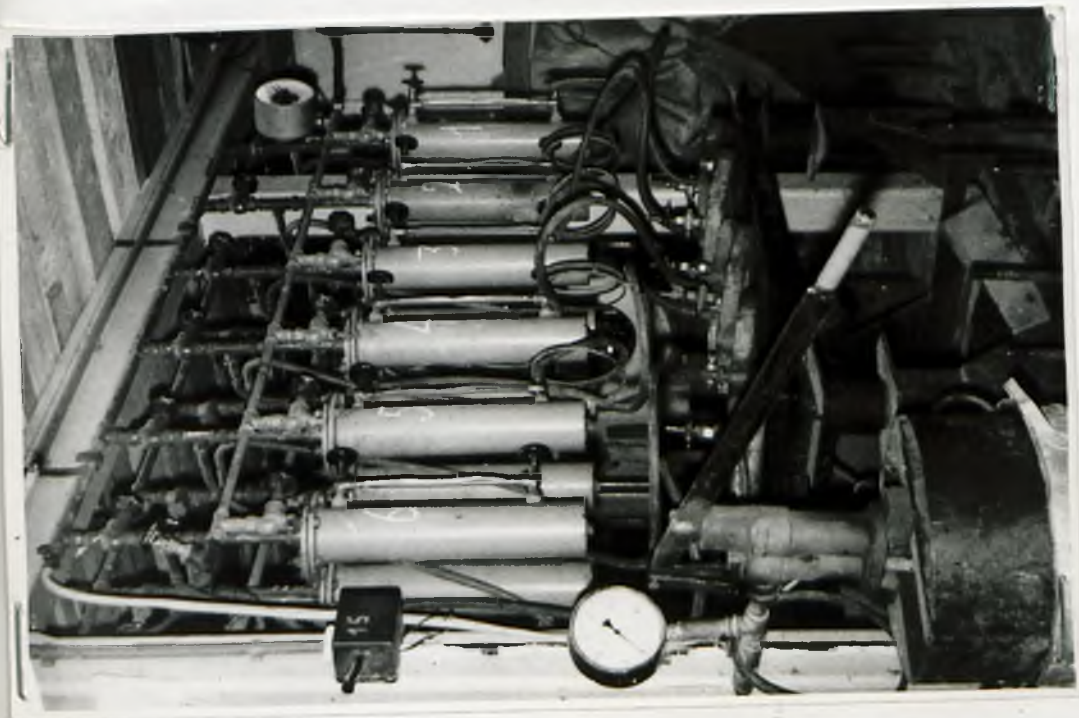
75. ONORM-B-3302 - Austria

76. USCAD-CJO-54 - USA

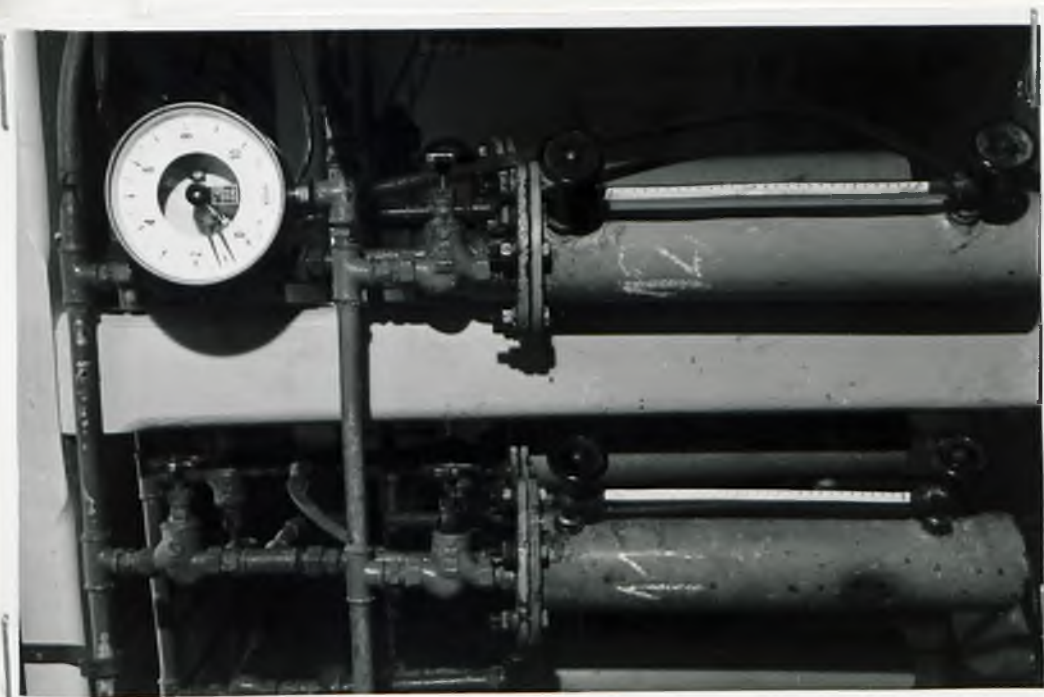
77. MSZ-4715-61 - Węgry

78. SNIP II - 56 - 77 - Betonnyje i železobetonnyje konstrukciji
gidrotechničeskich sooruzenij.

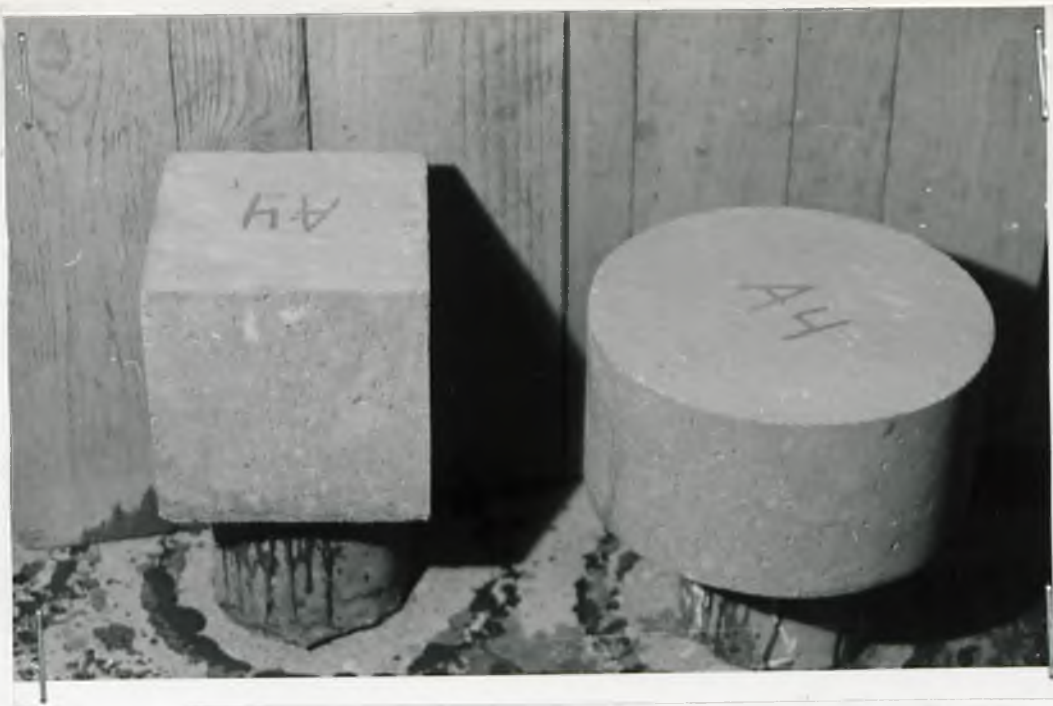
DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA
PRZEPROWADZONYCH BADAN



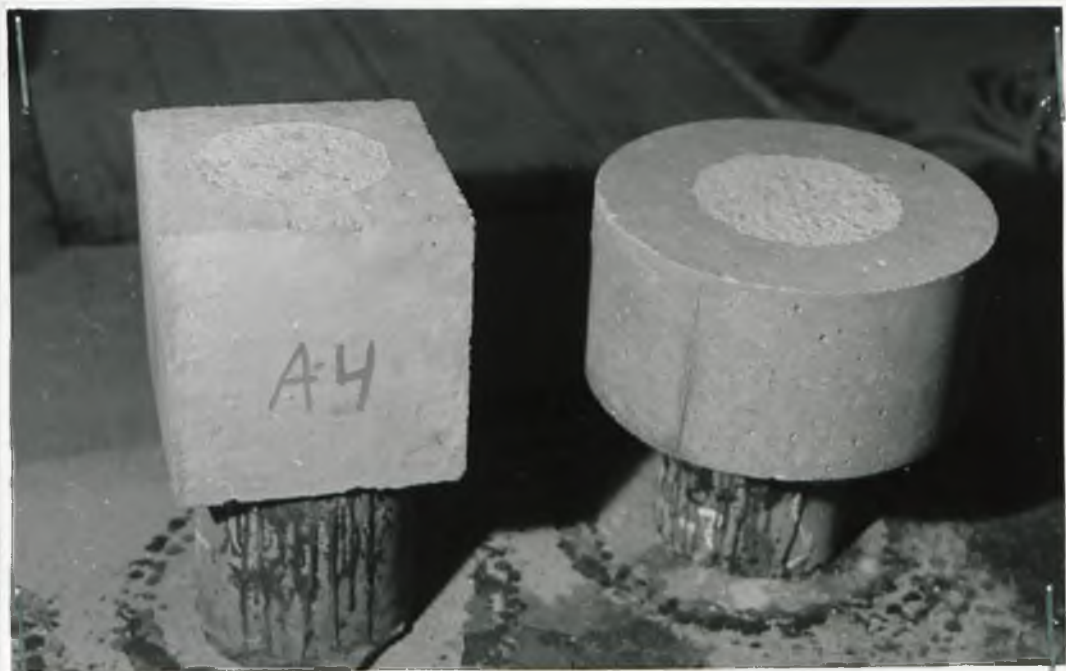
Fot. 1. Widok ogólny aparatury do badania wodoszczelności.



Fot. 2. Zbiornik ciśnieniowy z wodowskazem do kontroli ilości wtłoczonej w beton wody oraz manometr kontaktowy sterujący automatem do utrzymywania ciśnienia.



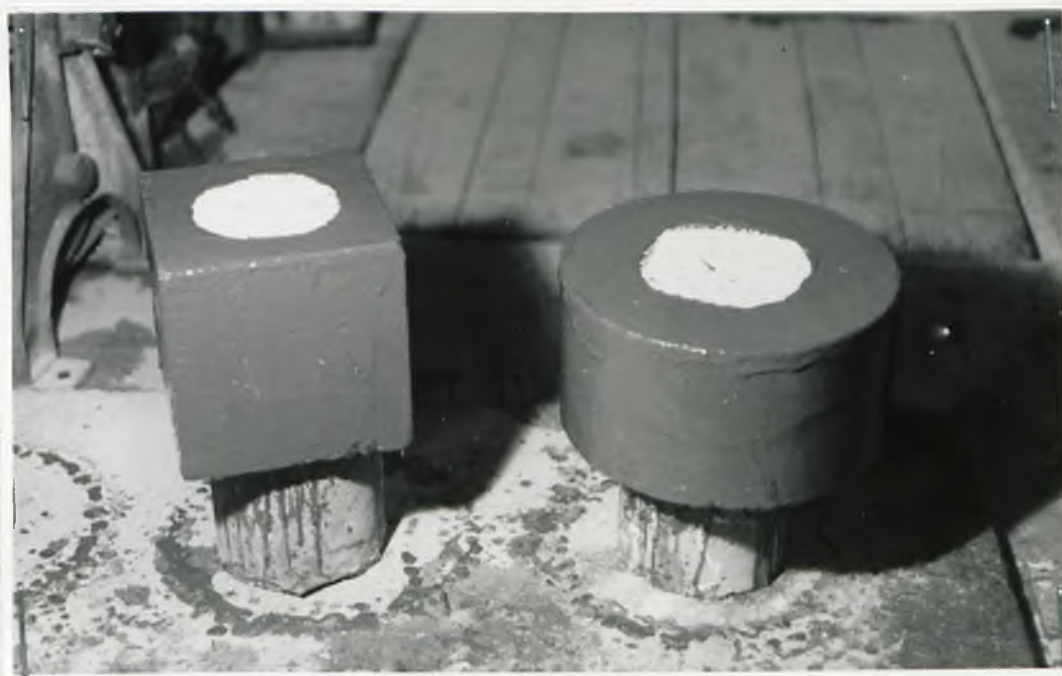
Fot.3. Próbki betonowe przeznaczone do badań wodoszczelności.



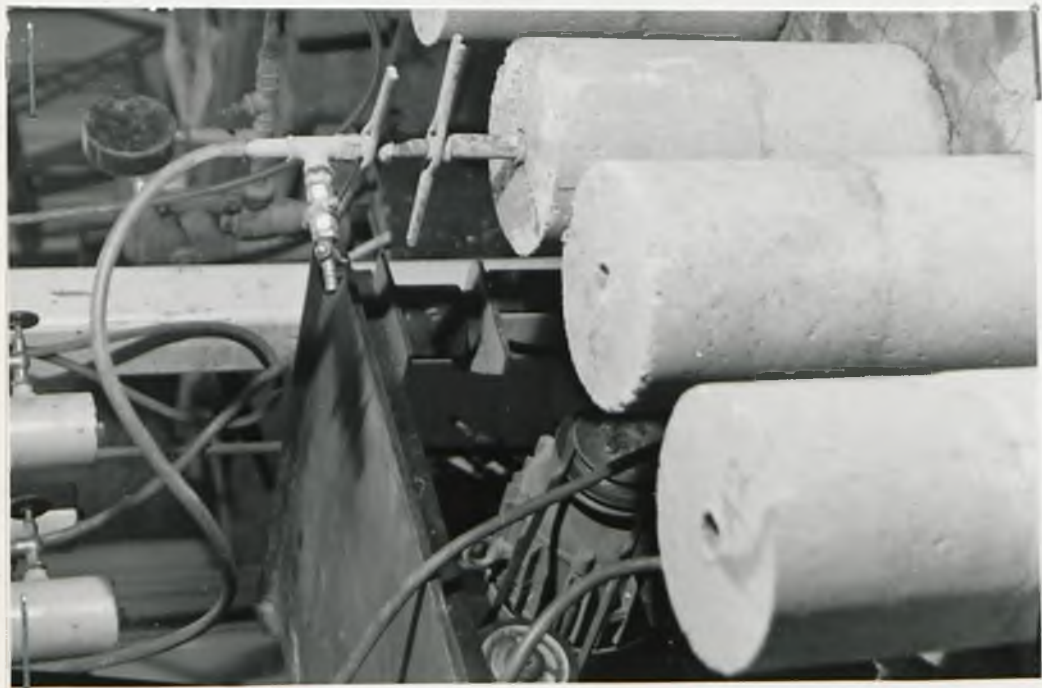
Fot.4. Próbki betonowe z przygotowaną powierzchnią do tłoczenia wody.



Fot.5. Próbki betonowe z zaimpregnowaną powierzchnią.



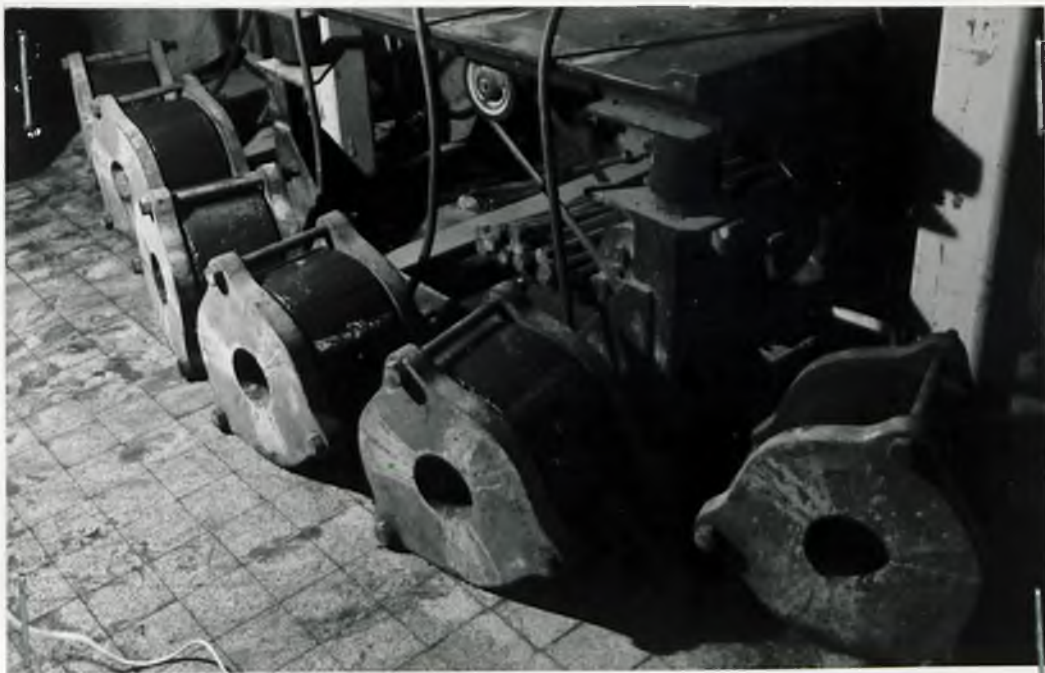
Fot.6. Próbki betonowe z nałożoną powłoką wodoszczelną.



Fot. 7. Próbki waloowe z otworem
w trakcie montowania końcówek do
tłoczenia wody.



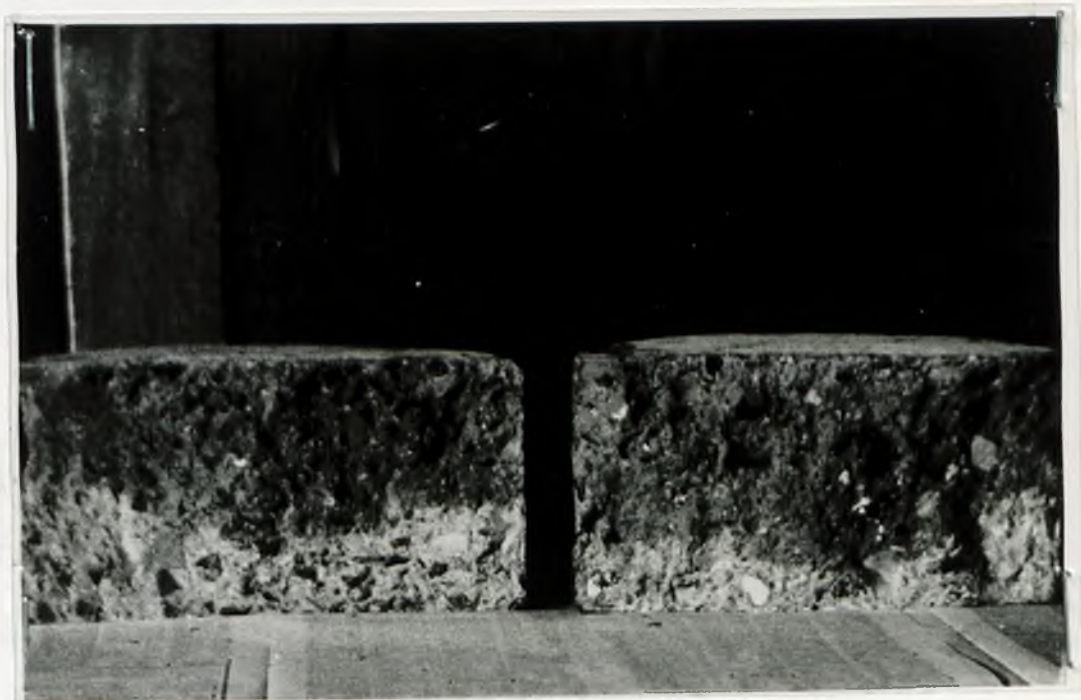
Fot. 8. Badanie wodoszczelności
próbek walcowych z otworem.



Fot.9. Badanie wodoszczelności próbek walcowych normowych.



Fot.10. Badanie wodoszczelności próbek kostkowych.



Fot.11. Przełom próbek walcowych po badaniu wodoszczelności. Widoczne zawilgocenie.



Fot.12. Przełom próbek kostkowych po badaniu wodoszczelności.





R
398.1