

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Agnieszka Dąbska

**Badania osadów z dekarbonizacji wody
w aspekcie ich przydatności
do uszczelniania składowisk odpadów**

WARSZAWA

2007

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska

Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Agnieszka Dąbska

Badania osadów z dekarbonizacji wody w aspekcie ich przydatności do uszczelniania składowisk odpadów

Promotor:

prof. dr hab. inż.

Stanisław Pisarczyk

Warszawa, 2007

WYDZIAŁ INŻYNIERSTWA

Wydział Inżynierii

Instytut Inżynierii i Techniki



WYDZIAŁ INŻYNIERSTWA



Instytut Inżynierii i Techniki

Wydział Inżynierii

Instytut Inżynierii i Techniki

Instytut Inżynierii

Wydział Inżynierii

Instytut Inżynierii i Techniki

Instytut Inżynierii

36070(231-01)

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	6
1. WSTĘP	9
2. PODSTAWOWE INFORMACJE NA TEMAT OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY.....	12
2.1. Proces technologiczny powstawania osadów	12
2.2. Ilość osadów z dekarbonizacji wody w Polsce.....	14
2.3. Możliwości wykorzystania osadów z dekarbonizacji wody.....	16
2.3.1. Konstrukcje inżynierskie	16
2.3.2. Inne możliwości.....	18
2.4. Wpływ osadów z dekarbonizacji wody na środowisko	20
2.5. Osady z dekarbonizacji wody z Elektrociepłowni Rzeszów	21
3. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY	23
4. BUDOWA WARSTW USZCZELNIAJĄCYCH SKŁADOWISK ODPADÓW	27
4.1. Składowisko odpadów.....	27
4.2. Uwarunkowania prawne	28
4.3. Uszczelnienia na składowiskach odpadów.....	29
4.3.1. Uszczelnienie podstawy i skarp składowiska	29
4.3.2. Uszczelnienie powierzchni składowiska po zakończeniu eksploatacji	31
4.3.3. Uszczelnienie pionowe	32
4.4. Przesłony mineralne	33
4.4.1. Rozwój prac nad przesłonami mineralnymi	33
4.4.2. Wymagania dla gruntów	37
4.4.3. Dobór gruntów.....	38
4.4.4. Badania gruntów	41
5. WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY	44
5.1. Przegląd literatury.....	44
5.2. Badania własne.....	48

5.2.1. Analiza chemiczna.....	48
5.2.2. Analiza termiczna.....	49
5.2.3. Rentgenowska analiza dyfrakcyjna	51
5.2.4. Badanie w skaningowym mikroskopie elektronowym.....	55
5.2.5. Uogólnienie wyników badań składu chemicznego i struktury osadów z dekarbonizacji wody.....	57
6. FIZYCZNE WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY.....	59
6.1. Przegląd literatury.....	59
6.1.1. Sucha pozostałość i uwodnienie oraz gęstość objętościowa i wilgotność.....	59
6.1.2. Skład granulometryczny	63
6.1.3. Gęstość właściwa.....	66
6.1.4. Granice konsystencji.....	66
6.1.5. Zagęszczalność.....	68
6.2. Badania własne.....	69
6.2.1. Analiza makroskopowa	69
6.2.2. Gęstość objętościowa i wilgotność.....	70
6.2.3. Skład granulometryczny	71
6.2.4. Powierzchnia właściwa	74
6.2.5. Gęstość właściwa.....	75
6.2.6. Granice konsystencji.....	75
6.2.7. Cechy wynikające z podstawowych właściwości geotechnicznych	78
6.2.8. Zagęszczalność.....	79
7. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZAGĘSZCZONYCH OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY.....	84
7.1. Przegląd literatury.....	84
7.1.1. Wytrzymałość na ścinanie	84
7.1.2. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie	84
7.1.3. Ścisłość i pęcznienie.....	85

7.2. Badania własne.....	87
7.2.1. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania.....	87
7.2.2. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania ...	93
7.2.3. Porównanie wyników badań wytrzymałości na ścinanie	97
7.2.4. Wytrzymałość na ściskanie.....	99
7.2.5. Wytrzymałość na rozciąganie.....	106
7.2.6. Analiza wyników badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie – wskaźnik kruchości.....	115
7.2.7. Ściśliwość.....	116
7.2.8. Pęcznienie.....	119
8. PRZEPUSZCZALNOŚĆ HYDRAULICZNA OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY.....	123
8.1. Wprowadzenie.....	123
8.2. Przegląd literatury.....	124
8.3. Metodyka badań własnych	124
8.4. Filtracja krótkotrwała	129
8.4.1. Zależność przepuszczalności hydraulicznej od wskaźnika zagęszczenia oraz wilgotności formowania próbek	129
8.4.2. Wpływ sposobu formowania próbek na przepuszczalność hydrauliczną.....	138
8.4.3. Podsumowanie wyników badań filtracji krótkotrwałej	142
8.5. Filtracja długotrwała.....	143
8.5.1. Długotrwałe badania przepuszczalności hydraulicznej przy wykorzystaniu cieczy probierczych.....	143
8.5.2. Charakterystyka cieczy probierczych oraz filtratów.....	146
8.5.3. Wpływ wykorzystanych cieczy probierczych na uziarnienie osadów	151
8.5.4. Analiza wyników badań filtracji długotrwałej	153
9. UOGÓLNIENIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI	161
10. LITERATURA	168

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- c_s - spójność oznaczona metodą bezpośredniego ścinania, kPa,
- c_T - spójność oznaczona metodą UU w aparacie trójosiowego ściskania, wg teorii Treski, kPa,
- c_u - spójność oznaczona metodą UU w aparacie trójosiowego ściskania, kPa,
- d_{10} - średnica zastępcza ziaren, których wraz z mniejszymi jest w gruncie 10 % wag.,
- d_{60} - średnica zastępcza ziaren, których wraz z mniejszymi jest w gruncie 60 % wag.,
- ε - odkształcenie względne, %,
- e - wskaźnik porowatości, -,
- ϕ_s - kąt tarcia wewnętrznego oznaczony metodą bezpośredniego ścinania, °,
- ϕ_T - kąt tarcia wewnętrznego oznaczony metodą UU w aparacie trójosiowego ściskania, wg teorii Treski, °,
- ϕ_u - kąt tarcia wewnętrznego oznaczony metodą UU w aparacie trójosiowego ściskania, °,
- i - gradient hydrauliczny, -,
- i_0 - początkowy gradient hydrauliczny, -,
- I_L - stopień plastyczności, -,
- I_p - wskaźnik plastyczności, %,
- I_s - wskaźnik zagęszczenia, -,
- k - przepuszczalność hydrauliczna, m/s,
- k_{10} - przepuszczalność hydrauliczna przy temperaturze +10 °C, m/s,
- k_k - końcowa przepuszczalność hydrauliczna, m/s,
- k_p - początkowa przepuszczalność hydrauliczna, m/s,
- K - przepuszczalność właściwa, m²,
- M_0 - edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej, kPa,
- M - edometryczny moduł ściśliwości wtórnej, kPa,
- \overline{M} - edometryczny moduł odprężenia, kPa,
- n - porowatość, -,

v - prędkość filtracji, m/s,
 V_p - wskaźnik pęcznienia, %,
 p - punkty naprężenia, $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, kPa,
 q - punkty naprężenia, $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, kPa,
 σ_1, σ_3 - naprężenia główne, kPa,
 q_n - nacisk jednostkowy, kPa,
 ρ - gęstość objętościowa, g/cm³,
 ρ_s - gęstość właściwa, g/cm³,
 ρ_d - gęstość objętościowa szkieletu, g/cm³,
 ρ_{ds} - maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, g/cm³,
 R_{c1}, R_{c2} - wytrzymałość na ściskanie oznaczona na próbkach cylindrycznych, kPa,
 R_{cg} - wytrzymałość na ściskanie oznaczona na próbkach sześciennych, kPa,
 R_g - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, kPa,
 R_r - wytrzymałość na rozciąganie oznaczona metodą bezpośrednią, kPa,
 R_{rt} - wytrzymałość na rozciąganie oznaczona tzw. metodą brazylijską, kPa,
 R_{ru} - wytrzymałość na rozciąganie oznaczona z badań trójosiowego ściskania, kPa,
 σ - naprężenie normalne, kPa,
 S_m - sucha pozostałość, %
 S_r - stopień wilgotności, -,
 S_i - powierzchnia właściwa, m²/g,
 τ_f - wytrzymałość na ścinanie, kPa,
 U - wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia, -,
 U_w - uwodnienie, %,
 w - wilgotność, %,
 w_z - wilgotność założona, %,
 w_f - wilgotność formowania, %,
 w_k - wilgotność końcowa, %,



w_L - granica płynności, %

w_p - granica plastyczności, %

w_s - granica skurczalności, %

w_{opt} - wilgotność optymalna, %

1. WSTĘP

Występujące w przyrodzie wody bardzo często charakteryzują się wysoką twardością węglanową. Uzdatnianie takich wód, głównie do celów przemysłowych, gdzie wysoka twardość nie jest wskazana, prowadzi do powstawania osadów z dekarbonizacji wody. Na świecie największe ilości osadów powstają w Stanach Zjednoczonych, gdzie uzdatnia się nie tylko wodę do celów przemysłowych, ale również wodę pitną. Pierwsza stacja uzdatniania wody powstała w Oberlin, w stanie Ohio w Stanach Zjednoczonych w 1903 roku, gdzie wraz z rozpoczęciem praktykowania procesu zmiękczenia wody, pojawił się problem utylizacji osadów z dekarbonizacji wody [Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M, 1988]. Początkowo powszechnie stosowanym i akceptowanym sposobem postępowania z osadami było ich hydrauliczne usuwanie do rzek, jezior i zbiorników retencyjnych. Sozański M. [1999] podaje, że do 1971 roku, więcej niż 92 % produkowanych w Stanach Zjednoczonych osadów, odprowadzano do wód powierzchniowych. Wraz z zaostrzaniem się przepisów dotyczących ochrony środowiska naturalnego, w latach 60-tych i 70-tych XX wieku rozpoczęto poszukiwania nowych metod unieszkodliwiania osadów, coraz częściej składowanych w lagunach. Najbardziej typowym sposobem zagospodarowania stało się ich rolnicze wykorzystanie jako nawóz. Badania nad rozpoznaniem geotechnicznych właściwości osadów z dekarbonizacji wody przeprowadzili Glysson E.A. [1972] oraz Raghu D. i Hsieh H.-N. [1985 i 1987], którzy zwrócili uwagę na fakt, iż mimo podejmowanych starań, problem zagospodarowania osadów został zaniedbany i dopiero wymagania dotyczące ochrony środowiska oraz aspekty ekonomiczne zmusiły ich wytwórców do efektywnego poszukiwania nowych metod zagospodarowania. Autorzy zaproponowali wykorzystanie nagromadzonych w lagunach osadów do niwelacji terenu, ich utylizację z udziałem innych odpadów oraz podjęli badania nad możliwością wbudowania osadów z dekarbonizacji wody w konstrukcje warstw uszczelniających składowisk odpadów. O tym, że problem nadal nie został rozwiązany, świadczą wciąż na nowo podejmowane badania nad możliwością

zagospodarowania osadów, np. w produkcji cementu jako dodatek do wapieni lub ich zamiennik czy w procesie mokrego odsiarczania spalin w elektrociepłowniach i elektrowniach opalanych węglem.

Pierwsze informacje dotyczące osadów z dekarbonizacji wody w Polsce pojawiły się w publikacji Chojnackiego A. [1966]. Zwrócił on uwagę na problemy wynikające z usuwania powstających osadów: ograniczenia ich zrzutu do rzek i jezior oraz trudności przy ich odwadnianiu na poletkach, związane z wysoką zawartością wody w osadach. Problem zagospodarowania osadów porusza w swojej pracy Sozański M. [1999] i podaje, że osady, odwadniane grawitacyjnie lub coraz częściej mechanicznie, są składowane na terenach wytwarzających je zakładów lub gromadzone na składowiskach odpadów komunalnych. W Polsce prace nad prawnym uregulowaniem problemów dotyczących powstawania, procesów odzysku i unieszkodliwiania oraz ewidencji osadów rozpoczęto dopiero na początku XXI wieku, co powoduje, że dane dotyczące ilości produkowanych osadów z dekarbonizacji wody oraz sposobów ich zagospodarowania dostępne są w kraju dopiero od kilku lat. W 2001 roku ukazała się *Ustawa prawo ochrony środowiska* [129] regulująca problemy dotyczące ochrony środowiska i *Ustawa o odpadach* [130] określająca zasady gospodarki odpadami. Osady z dekarbonizacji wody jako odpady również podlegają postanowieniom ustawy [130], która zobowiązuje posiadacza odpadów w pierwszej kolejności do poddania ich odzyskowi, a dopiero później unieszkodliwieniu. Zgodnie z rozporządzeniem [131] osady z dekarbonizacji wody należy zaliczyć do grupy 19: Odpady z instalacji i urządzeń służących zagospodarowaniu odpadów z oczyszczalni ścieków oraz z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych, podgrupy 09: Odpady z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych, rodzaju 03: Osady z dekarbonizacji wody. Obowiązujące przepisy prawne dopuszczają składowanie osadów z dekarbonizacji wody w sposób nieselektywny [135], ale przed umieszczeniem ich na składowisku nakładają obowiązek poddania ich procedurze dopuszczania do składowania na składowisku danego typu [143]. Opłaty za składowanie osadów z dekarbonizacji wody na składowiskach ustala się na podstawie aktualnie obowiązujących rozporządzeń dotyczących określania jednostkowych stawek opłat za umieszczanie

odpadów na składowisku [132], [136], [141]. Obecnie koszt składowania osadów z dekarbonizacji wody wynosi 3,2 zł/tonę [144]. Zbieranie lub transport osadów z dekarbonizacji wody wymaga zezwolenia i prowadzenia ich ewidencji [138]. Według obowiązujących aktów prawnych [146] osady z dekarbonizacji wody mogą być przekazywane osobom prywatnym do wykorzystania na ich własne potrzeby jako materiał budowlany.

Ilości powstających osadów, liczne ograniczenia prawne dotyczące ich powstawania, odzysku i unieszkodliwiania oraz wciąż postępująca degradacja środowiska naturalnego zmuszają wytwórców osadów do poszukiwania nowych, bezpiecznych dla ludzi i środowiska oraz uzasadnionych ekonomicznie metod ich utylizacji.

2. PODSTAWOWE INFORMACJE NA TEMAT OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

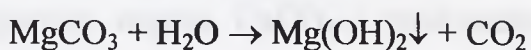
2.1. Proces technologiczny powstawania osadów

Osady z dekarbonizacji wody są produktem ubocznym procesu uzdatniania wody do celów przemysłowych, polegającego na obniżaniu twardości węglanowej wody.

Wody naturalne występujące w przyrodzie bardzo często zawierają dużą ilość różnego rodzaju zanieczyszczeń i domieszek, co sprawia, że nie nadają się do bezpośredniego wykorzystania w różnych gałęziach gospodarki. W takich przypadkach zachodzi konieczność uzdatnienia wody, mającego na celu odpowiednie jej przygotowanie, w zależności od jakości wody wymaganej w danym procesie technologicznym, w taki sposób, aby uzdatniona woda spełniała określone warunki dotyczące składu fizyczno-chemicznego oraz bakteriologicznego. Dopuszczalne wartości normowanych wskaźników jakości wody określają odpowiednie normy oraz użytkownicy lub producenci urządzeń. Jednym z wymagań jakościowych stawianych wodzie wykorzystywanej do celów energetycznych jest jej niska twardość węglanowa, określona odrębnymi przepisami dla obiegów: kotłowego (woda dla kotłów parowych i wodnych), chłodzącego (woda do chłodzenia turbin parowych) i ciepłowniczego (woda w sieciach ciepłowniczych) [Kowal A. L., Świdarska-Bróż M., 1996], [Sierakowski E., Mrozek J., 1979], [Stańda J., 1995].

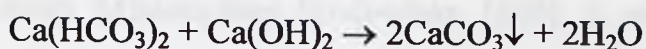
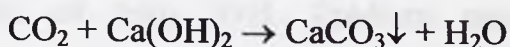
Twardość węglanowa wody wywołana jest obecnością rozpuszczonych w niej węglanów, wodorowęglanów i wodorotlenków wapnia i magnezu: CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MgCO_3 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [Macioszczyk A., Dobrzyński D., 2002]. Zbyt wysoka twardość węglanowa wody oraz jej nadmierne zasolenie w stosunku do poziomów dopuszczalnych dla danego procesu, powodują wytrącanie się osadów chemicznych w elementach danego układu i powstawanie tzw. kamienia kotłowego oraz korozję metali i betonów, z których zbudowane są urządzenia, co w konsekwencji prowadzi do zakłóceń i awarii [Kowal A. L., Świdarska-Bróż M., 1996], [Sierakowski E., Mrozek J., 1979], [Stańda J., 1995]. Wytrącanie się osadów

następuje w warunkach podgrzewania i odparowania wody na skutek zachodzących zmian fizyczno-chemicznych (rozkład termiczny kwaśnych węglanów), jak i systematycznego wzrostu stężenia soli ponad granicę ich rozpuszczalności (przekroczenie iloczynów rozpuszczalności) zgodnie z poniższymi reakcjami [Kowal A. L., Świdorska-Bróz M., 1996]:



Węglan wapnia wytrąca się w postaci kryształów kalcytu (rzadziej aragonitu) lub jako bezpostaciowy osad zwiększający mętność wody lub tworzący obrosty na ściankach urządzeń [Kowal A. L., Świdorska-Bróz M., 1996].

Jedną z podstawowych metod chemicznego uzdatniania wody, mających na celu obniżenie twardości węglanowej, jest dekarbonizacja wody (zmiękczenie). Proces dekarbonizacji polega na usuwaniu twardości węglanowej w wyniku przeprowadzenia rozpuszczonych w wodzie soli wapnia i magnezu w wytrącające się związki nierozpuszczalne, przed wprowadzeniem wody do obiegu. Najczęściej stosowaną i najtańszą metodą usuwania twardości węglanowej jest dekarbonizacja wody za pomocą wapna, tj. działaniem $\text{Ca}(\text{OH})_2$. W wyniku zachodzących reakcji wiązany jest wolny dwutlenek węgla CO_2 , a następnie z wody wytrąca się obojętny węglan wapnia [Kowal A. L., Świdorska-Bróz M., 1996], [Stańda J., 1995]:



W przypadku nadmiernej ilości $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i obecności w wodzie kationów magnezu i żelaza, przy $\text{pH} > 10,5$ mogą zachodzić reakcje, w wyniku których strąca się wodorotlenek magnezu $\text{Mg}(\text{OH})_2$ i wodorotlenek żelaza $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Węglan wapnia CaCO_3 wytrąca się w postaci kalcytu, czasami z domieszką niestabilnych form tj. aragonitu lub waterytu. Wodorotlenek magnezu $\text{Mg}(\text{OH})_2$ strąca się wyłącznie jako osad żelowaty. Dodatkowo, w procesie dekarbonizacji usuwane są zawiesiny mechaniczne, związki żelaza i manganu i wolny dwutlenek węgla, a wytrącający się osad absorbuje również olej, substancje rozpuszczone i niekiedy

organiczne [Ayoub G.M., Merhebi F., 2002], [Chomicz D., 1995], [Kowal A. L., Świdorska-Bróz M., 1996], [Sierakowski E., Mrozek J., 1979].

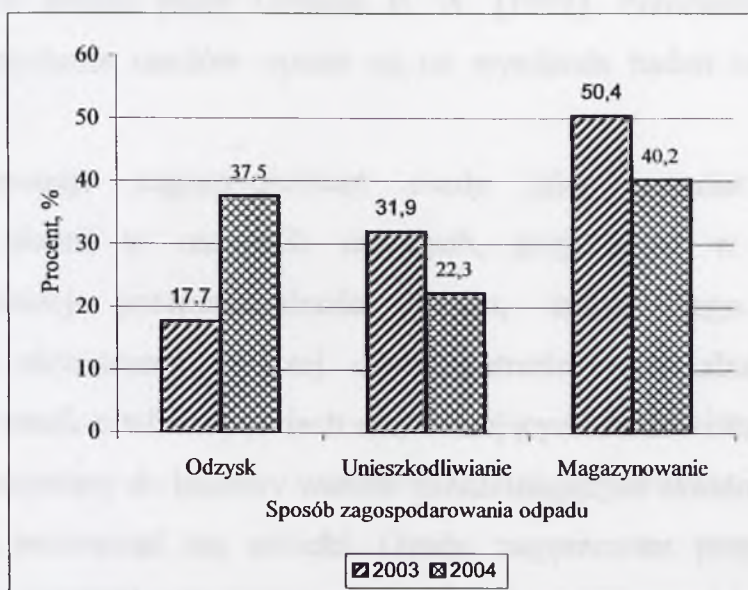
W praktyce często spotyka się przeprowadzanie procesu dekarbonizacji wody jednocześnie z procesem koagulacji, którego celem jest usunięcie z wody cząstek trudno opadających oraz koloidalnych, decydujących o mętności wody oraz intensywności jej barwy. W takim przypadku zastosowanie wapna zapewnia wysoki stopień usuwania metali ciężkich i radionuklidów, współwytrącających się z węglanem wapnia CaCO_3 i wodorotlenkiem magnezu Mg(OH)_2 oraz mętności i związków organicznych, w tym również barwnych kwasów humusowych. Wytrącające się cząsteczki CaCO_3 spełniają rolę sorbentów i czynników współstrącających usuwane zanieczyszczenia, tworząc z nimi aglomeraty [Kowal A. L., Świdorska-Bróz M., 1996].

2.2. Ilość osadów z dekarbonizacji wody w Polsce

Zasady prowadzenia ewidencji ilości wytwarzanych odpadów oraz sposobów ich gospodarowania reguluje rozporządzenie [134]. Ponieważ rozporządzenie to weszło w życie z dniem 1 stycznia 2003 roku, wiarygodne dane dotyczące ewidencji wytworzonych w Polsce odpadów i sposobów ich zagospodarowania można uzyskać od roku 2003. Źródłem prezentowanych poniżej danych jest serwis internetowy Ministerstwa Środowiska [149]. Z udostępnionych przez Ministerstwo Środowiska danych wynika, że w 2003 roku w Polsce wytworzono 95 500 ton odpadów z dekarbonizacji wody, a w 2004 roku 102 800 ton. Zestawienie sposobów zagospodarowania odpadów oraz ich ilości w Polsce w latach 2003 i 2004 przedstawiono w Tabeli 2.2.1. Na podstawie przedstawionych danych sporządzono wykres (Rys.2.2.1.) obrazujący stan gospodarki osadami z dekarbonizacji wody w Polsce w latach 2003-2004.

Tabela 2.2.1. Ilość wytworzonych odpadów z dekarbonizacji wody oraz sposoby ich zagospodarowania w Polsce w latach 2003-2004

Sposób gospodarowania odpadami		Ilość odpadów		Ilość odpadów	
		Rok 2003	Rok 2004	Rok 2003	Rok 2004
		tona		%	
1	2	3	4	5	
Poddane odzyskowi		16 900	38 600	17,7	37,5
Unieszkodliwione	Termicznie i kompostowane	-	-	31,9	22,3
	Składowane na składowiskach własnych lub innych	27 400	18 400		
	Inny sposób	3 100	4 500		
Magazynowane czasowo		48 100	41 300	50,4	40,2
Suma:		95 500	102 800	100	100



Rys.2.2.1. Gospodarka osadami z dekarbonizacji wody w Polsce w 2003 i 2004 roku

Z ogólnej ilości rocznie wytwarzanych osadów z dekarbonizacji wody odzyskowi poddano 17,7 % w 2003 roku i 37,5 % w roku 2004, unieszkodliwiono (głównie przez gromadzenie na składowiskach) około 31,9 % w roku 2003 i 22,3 % w 2004 roku, a czasowemu magazynowaniu poddano około 50,4 % w 2003 roku i 40,2 % w roku 2004. Według danych Ministerstwa Środowiska zakłady wytwarzające odpady z dekarbonizacji wody posiadają 445 500 ton osadów nagromadzonych na składowiskach własnych.

Z niepełnych danych za rok 2002 wynika, że w 7 na 16 województw wytworzono 74 700 ton osadów z dekarbonizacji wody, w tym odzyskowi poddano

około 18 700 ton (25,0 %), a unieszkodliwieniu około 17 900 ton (24,0 %) [Harasim A., 2005].

2.3. Możliwości wykorzystania osadów z dekarbonizacji wody

2.3.1. Konstrukcje inżynierskie

Możliwości zastosowania osadów z dekarbonizacji wody w geotechnice szeroko omawia w swojej pracy Glysson E. A. [1972]. Przedstawione w pracy propozycje wykorzystania osadów oparte są na wynikach badań ich właściwości geotechnicznych.

Autor proponuje zagospodarować osady jako materiał do budowy uszczelniających rdzeni w nasypach ziemnych, przy czym w celu pełnego wykorzystania niskiej przepuszczalności osadu, zaleca jego zagęszczanie przy wilgotności nieznacznie wyższej od wilgotności optymalnej. Praktycznie nieprzepuszczalny osad, o właściwościach neutralizujących środowisko kwaśne może również być wykorzystany do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów, przez które będą przesączać się odcieki. Osady, zagęszczone przy odpowiedniej wilgotności, będą stanowić warstwę praktycznie nieprzepuszczalną, i dodatkowo posiadającą zdolność wiązania żelaza i neutralizowania kwaśnych odcieków, które mogą wejść z nimi w kontakt. Możliwość wykorzystania osadów z dekarbonizacji wody jako materiał do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów rozpatrują Raghu D. i Hsieh H.-N. [1985] i na podstawie badań własnych potwierdzają niską przepuszczalność hydrauliczną osadów. Odpady z dekarbonizacji wody jako materiał na uszczelnienie czaszy kwater składowisk odpadów paleniskowych proponują wykorzystać Dąbrowski H. i Naumczyk J. [2003].

Ze względu na niską gęstość objętościową ($1,3 \text{ g/cm}^3$ przy w_{opt}) osady mogą być również zagospodarowane jako lekki materiał zasypowy, ponieważ odpowiednio zagęszczone przy wilgotności optymalnej charakteryzują się wysoką wytrzymałością na ścinanie i nieznacznymi osiadaniem. Dodatkową zaletą osadów użytych np. jako

materiał zasypowy przy rurach betonowych w gruntach o obniżonym odczynie pH, będzie ochrona tych rur przed agresywnym oddziaływaniem gruntu, a w przypadku kontaktu kwaśnych odcieków ze składowisk odpadów komunalnych z konstrukcją betonową, zasypka z osadów wapniowych wokół tej konstrukcji będzie chronić beton przed korozją [Glysson E.A., 1972]. Zagospodarowania odpadów jako materiał nasypowy rozważają Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J. [2004 i 2005], ale w celu uzyskania wyższej wytrzymałości materiału na ściskanie i ścinanie zalecają wykonywanie mieszanek osadów z dekarbonizacji wody z popiołami lotnymi lub z cementem. Dodatkowo zwracają uwagę, że wytrzymałość na ściskanie i ścinanie takich mieszanek będzie tym wyższa, im dłuży będzie ich czas dojrzewania. Na możliwość wykorzystania osadów do makroniwelacji terenu wskazują Raghu D. i Hsieh H.-N. [1985].

Osady mogą również stanowić dobry materiał na czasowe warstwy przykrycia dziennego na składowiskach odpadów komunalnych lub być wykorzystane jako „dodatek” do gruntów przeznaczonych na materiał do końcowej warstwy przykrywającej składowisko odpadów. Według Glyssona E.A. [1972], w przypadku takiego zastosowania osadów, wpłyną one na wzrost pH środowiska, tym samym poprawiając warunki do wzrostu roślin. Ponieważ osady nie zawierają rozkładających się materiałów, nie wydzielają żadnych zapachów, nie posiadają składników mogących przyciągać insekty lub inne szkodniki w jakikolwiek sposób, są ognioodporne i wystarczająco nieprzepuszczalne, mogą służyć jako materiał na przykrycia tak długo, jak ich wilgotność będzie na tyle niska, aby pozwolić na ich bezpieczne rozproszczenie i zagęszczenie na odpadach przy wykorzystaniu dostępnego sprzętu mechanicznego. Glyson E.A. [1972] uważa, że ze względu na zawartość drobnych cząsteczek osady z dekarbonizacji wody mogą łatwo ulegać erozji i dlatego nie zaleca ich stosowania jako materiał na końcowe przykrycie składowiska.

Badania nad możliwością wykorzystania laguny osadów z dekarbonizacji wody do budowy nasypu drogowego przez wymieszanie osadów z innym materiałem nasypowym podejmuje Fahoum K. [1998].



Bardziej szczegółowe informacje dotyczące zastosowania osadów z dekarbonizacji wody w geotechnice oraz dodatkowe wskazówki i zalecenia zostały omówione w pracach Glyssona E.A. [1972] oraz Baker'a R., Leeuwen'a J. H. i White'a D. J. [2004 i 2005].

2.3.2. Inne możliwości

Powszechnie zalecanym sposobem zagospodarowania osadu z dekarbonizacji wody jest jego wykorzystanie do celów rolniczych jako nawóz, odpowiedni do gleb kwaśnych lub takich, gdzie na skutek stosowania nawozów azotowych znacznie obniżył się odczyn pH [Baker R., Leeuwen J. H., White D. J., 2004 i 2005], [Che M.D., Lagon T.J., Traina S.J., Bigham J.M., 1988], [Glysson E.A., 1972], [Krajewski P., 2001], [Raghu D. i Hsieh H.-N., 1985], [Sozański M., 1999].

Glysson E.A. [1972] uważa, że osady z dekarbonizacji wody mogą mieć lepsze właściwości do neutralizacji kwaśnych gruntów niż popioły lotne, ponieważ nie zawierają prawie wcale metali toksycznych dla roślin i zaleca aplikowanie osadów w ilości około 19,77 ton suchej masy/ha tj. około 75 razy mniej niż w przypadku popiołów lotnych. Według Krajewskiego P. [2001] osady z dekarbonizacji wody są łatwo przyswajane przez glebę, dodatkowo zwiększają jej porowatość oraz posiadają większe zdolności neutralizujące niż dostępne w handlu nawozy wapniowe. Dlatego też zaleca on mieszanie nawozów azotowych z osadami wapniowymi w stosunku wagowym 45,5kg : 1,4÷1,8kg tj. 32,5 (25,3) : 1. W Stanach Zjednoczonych wysuszony osad wapniowy rozdrabnia się i przesiewa przez sito o wymiarze oczek 0,063 mm, a następnie rozprowadza na polach jako nawóz w postaci uwodnionej zawiesiny o stężeniu 20÷40 %. Osady po zmiękczeniu wody można również wykorzystać do rekultywacji hałd kopalnianych, ponieważ skutecznie zobojętniają kwaśne związki mogące ulec wypłukaniu z hałd. W tym przypadku zaleca się stosowanie osadów w ilości 2,2 kg suchej masy/ m² / rok.

Innym sposobem zagospodarowania osadów z dekarbonizacji wody, wykorzystującym ich zdolność do usuwania żelaza z roztworu, może być

zastosowanie w procesie oczyszczania odcieków [Glysson E.A., 1972]. Możliwość wykorzystania osadów do neutralizacji odcieków potwierdzają [Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J., 2004 i 2005].

Badania nad sposobami zagospodarowania osadów z dekarbonizacji wody prowadzone w latach 2004-2005 na Uniwersytecie w Iowa wykazały, że osady mogą być wykorzystane w produkcji cementu w połączeniu z wapieniem lub zamiast niego oraz stanowić alternatywę dla wapienia używanego do redukcji tlenków SO_2 i SO_3 w kominach elektrociepłowni i elektrowni opalanych węglem [Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J., 2004 i 2005]. Harris C.A. [2002] uważa, że odpady można z powodzeniem wykorzystywać w procesie produkcji cementu, co pozwoli oszczędzać zasoby naturalne oraz przyczyni się w znacznym stopniu do ograniczenia wymaganej pojemności składowisk odpadów. Możliwość zastosowania osadów w procesie mokrego odsiarczania spalin omówiono szczegółowo w pracy [Shannon L.D., Yu C.H., Wieklinski R.E., Jarvis J.B., DeKraaker D.P., 1997].

W Holandii, w 1989 roku, rozpoczęto produkcję granulatu z osadów z dekarbonizacji wody, który znalazł zastosowanie [Krajewski P., 2001], [Sozański M., 1999]:

- jako dodatek do materiałów budowlanych,
- jako dodatek do karmy kurczaków,
- do neutralizacji kąpieli trawiennych w galwanotechnice,
- w instalacjach odsiarczania spalin w elektrowniach,
- do odkwaszania wód gruntowych,
- do zaprawy murarskiej,
- w budownictwie autostrad jako dodatek do mas asfaltowych.

Granulat mógłby być również stosowany [Krajewski P., 2001], [Sozański M., 1999]:

- w produkcji stali,
- w produkcji nawozów,
- w stabilizowaniu osadów ściekowych,
- w defosfatyzacji ścieków
- do rekalcytacji węglanu wapnia [Singer P.C., 1974].

W 1999 roku produkcja granulatu z osadów z dekarbonizacji wody w Holandii wynosiła 20 000 ton.

2.4. Wpływ osadów z dekarbonizacji wody na środowisko

Osady z dekarbonizacji wody można uznać za bezpieczne dla środowiska w przypadku spełnienia warunków określonych w rozporządzeniu [140], dotyczących m. in. właściwości i stężeń substancji, które powodują, że odpady są uważane za niebezpieczne. W celu oceny negatywnego wpływu osadów na środowisko można posłużyć się kryterium oraz procedurą dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach danego typu [143]. Odpady należy uznać za nieszkodliwe dla środowiska w przypadku dopuszczenia do ich składowania na składowiskach odpadów obojętnych i innych niż niebezpieczne i obojętne, i przyjąć, że odpady są szkodliwe w przypadku zakwalifikowania ich do składowania na składowiskach odpadów niebezpiecznych. Zgodnie z rozporządzeniem, dla odpadów należy sporządzić ich charakterystykę podstawową obejmującą m. in. opis koloru, postaci fizycznej i zapachu osadu, informacje o składzie fizyczno-chemicznym oraz podatności na wymywanie, wskazania zmian mogących wystąpić w składzie odpadów i zmian cech charakterystycznych odpadów (czyli wpływ czasu składowania i różnych czynników środowiskowych na podstawowe właściwości odpadów). Kryterium decydującym o możliwości składowania odpadu na składowisku odpadów niebezpiecznych są dopuszczalne graniczne wartości wymywania oraz parametry dodatkowe. Dopuszczalne graniczne wartości wymywania dotyczą takich substancji jak: arsen, bar, kadm, chrom całkowity, miedź, rtęć, molibden, nikiel, ołów, antymon, selen, cynk, chlorki, fluorki, siarczany, rozpuszczony węgiel organiczny oraz stałe związki rozpuszczalne. Parametry dodatkowe to: strata przy prażeniu, ogólny węgiel organiczny i zdolność do neutralizacji kwasów. Osady należy poddawać okresowej kontroli, tj. testom zgodności, co najmniej raz do roku.

Sozański M. [1999] podaje, że na zawartość substancji niebezpiecznych w osadach z dekarbonizacji wody ma wpływ jakość i skład zarówno uzdatnianej

wody, jak i reagentów stosowanych w procesie uzdatniania. Według niego na właściwości toksyczne osadów pośrednio wpływa również technologia uzdatniania wody. W procesie dekarbonizacji wody metodą chemicznego strącania skutecznie usuwane są metale ciężkie i promieniotwórczy rad. Metoda ta jest również polecana przez USEPA (Amerykańską Agencję Ochrony Środowiska) jako efektywna technologia usuwania As, Ba, Cd, Cr, Hg i Se, a powstające osady powinny być poddane ocenie toksyczności. Za Peters R.W. i Etzel J.E. [1983] Sozański M. [1999] podaje, że wysokie odczyny wynikające z dużych dawek wapna zapobiegają ługowaniu metali ciężkich z osadów i praktycznie eliminują związaną z nimi toksyczność osadu. Natomiast, jeżeli w procesie zmiękczenia usuwa się z wody izotopy Ra^{226} i Ra^{228} , to według USEPA, powstające osady należy uznać za niebezpieczne, jeśli koncentracja Ra przekroczy 2000 pCi/g suchej masy [Sozański M., 1999, za Ramon G.L. i inni, 1990].

Osady powstające w procesach uzdatniania wody, w tym osady z dekarbonizacji wody, nie są generalnie uznawane za niebezpieczne, ale w przypadku ich składowania na składowiskach odpadów komunalnych należy uwzględnić możliwość uruchomienia zawartych w nich toksyn pod wpływem szczególnych warunków atmosferycznych [Sozański M., 1999].

2.5. Osady z dekarbonizacji wody z Elektrociepłowni Rzeszów

Osady z dekarbonizacji wody, będące przedmiotem badań w ramach niniejszej pracy, pochodzą z Elektrociepłowni Rzeszów S.A. Powstają one w procesie uzdatniania wody powierzchniowej do celów chłodniczych pobieranej z rzeki Wisłok. Do procesu dekarbonizacji używany jest roztwór wapna w postaci mleka wapiennego o stężeniu około 2 %. Równoległe z procesem dekarbonizacji przeprowadzana jest koagulacja. Jako koagulant stosowany jest siarczan żelazawy $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Powstające osady kieruje się na ciśnieniową prasę filtracyjną KFP, gdzie w postaci odwodnionych brykietów, usuwane są do pojemnika poniżej. W EC Rzeszów powstały następujące ilości osadów, odsączonych na prasie:

- w roku 2004 – 152 tony,
- w roku 2005 – 103,5 tony,
- w roku 2006 – 232 tony.

Powstające osady są efektem ubocznym, odpadem, dla którego obecnie poszukuje się możliwości bezpiecznego dla środowiska zagospodarowania.

Badania wykonane w ramach niniejszej pracy przeprowadzono na osadach pobranych bezpośrednio spod prasy filtracyjnej w latach 2004-2006, oznaczając porcje osadów pobrane w różnych terminach jako partie I-IV. Po dostarczeniu do Laboratorium Geotechnicznego Zakładu Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej materiał przechowywany był w plastikowych workach i stanowił przedmiot badań właściwości geotechnicznych. W przypadku analizy chemicznej oraz oznaczenia składu granulometrycznego metodą laserową, zakres materiału badawczego rozszerzono o 2 dodatkowe partie osadów pobrane z warstw wbudowanych w czasie mokrego składowiska popiołów lotnych. W celu odróżnienia partii osadów pobranych ze składowiska przyjęto dodatkowe oznaczenia przy numerze próbek:

- M – pobrana z warstwy odpadów o miąższości 0,1÷0,15 m, zalegających na odpadach paleniskowych i pod około 0,2 m warstwą gliny, poniżej poziomu wody gruntowej, czas zalegania odpadów w warstwie: około 1 roku,
- S – pobrana z warstwy 0,1÷0,15 m odpadów zalegających na odpadach paleniskowych i pod około 0,7 m warstwą gliny, powyżej zwierciadła wody gruntowej, czas zalegania odpadów w warstwie: około 1 roku.

3. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Osady z dekarbonizacji wody są produktem ubocznym działalności człowieka, odpadem podlegającym regulacjom prawnym dotyczącym ochrony środowiska naturalnego i gospodarki odpadami. Osady wymagają zgodnego z przepisami unieszkodliwienia i odzysku przy jednoczesnym ograniczeniu do minimum ich negatywnego wpływu na środowisko. Najczęściej praktykowaną metodą unieszkodliwiania, nie tylko osadów z dekarbonizacji wody, ale większości wytwarzanych odpadów, jest ich składowanie w specjalnie do tego celu przeznaczonych konstrukcjach inżynierskich – składowiskach odpadów. Podstawowym elementem konstrukcyjnym składowisk jest warstwa uszczelnienia mineralnego wykonywana z odpowiednio dobranych i właściwie wbudowanych, praktycznie nieprzepuszczalnych gruntów spoistych. Wykonanie takich przesłon wiąże się z poszukiwaniem coraz to nowych źródeł odpowiednich gruntów mineralnych i ich eksploatacją. Na całym świecie poszukuje się alternatywnych materiałów, które skutecznie mogłyby zastąpić klasyczne warstwy uszczelnienia mineralnego. W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania nad możliwością wbudowania w konstrukcję składowiska takich materiałów jak:

- popioły lotne [Ewertowska-Madej Z., Staszewski R., Szymanski K., 1991], [Ewertowska-Madej Z., 1993], [Kumar S., Stewart J., 2003], [Zabielska-Adamska K., 2006],
- mieszanki popiołowo-bentonitowe [Kumar S., Burrus N., 2005],
- mieszanki piaskowo-bentonitowe [Tay Y.Y., Stewart D.I., Cousens T.W., 2000],
- zagęszczane łupki [Mohamedzein Y., E.-A., Al-Rawas A., A., Al-Aghbari M., Y., Qatan A., Al. Rawas A.-H., 2005],
- iłołupki [Sheu Ch., Lin T.-T., Chang J.-E., Cheng Ch.-H., 1998],
- mieszanki gruntu z pociętymi oponami samochodowymi [Al-Tabbaa A., Aravinthan T., 1998],
- mieszanki gruntowo-wapienne [Tsai T.-D., Vesilind P.A., 1998],

- mieszanki cementowo-popiołowo-żużlowe [Genjian E., Claisse P.A., Tyrer M., Atkinson A., 2004],
- mieszanki cementowo-bentonitowo-wodne i bentonitowo-wodne, z dodatkami [Kledyński Z., Machowska A., 2005].

Jednym z materiałów mogących zamienić w konstrukcji składowiska mineralną warstwę gruntową mogą być osady z dekarbonizacji wody. Podstawowym warunkiem takiego wykorzystania jest przede wszystkim rozpoznanie właściwości osadów i określenie ich parametrów geotechnicznych. Znajomość podstawowych cech osadów pozwoli ocenić ich przydatność do budowy warstw uszczelniających i określić właściwe warunki ich wbudowania w konstrukcje ziemne. O ile możliwość zagospodarowania osadów poprzez wbudowanie w konstrukcje inżynierskie rozpatrywano w Stanach Zjednoczonych już w latach 70-tych, o tyle w Polsce problem wykorzystania osadów został zaniedbany. Osady z dekarbonizacji wody nie są materiałem rozpoznany, a w literaturze krajowej brak jest publikacji na temat ich właściwości i badań nad możliwością ich wykorzystania. W celu oceny przydatności osadów z dekarbonizacji wody do budowy warstw uszczelniających należy określić ich przepuszczalność hydrauliczną, decydującą o skutecznej ochronie wód gruntowych przed zanieczyszczeniem oraz wytrzymałość i odkształcalność, gwarantujące utrzymanie ciągłości warstwy i eliminujące możliwości powstawania spękań i szczelin. Dodatkowo warstwa uszczelnienia powinna być trwała w czasie i na tyle stabilna chemicznie, aby zachodzące w niej zmiany chemiczne, w wyniku kontaktu z odciekami ze składowiska, nie zwiększały jej przepuszczalności hydraulicznej, a ewentualne nierównomierne osiadania od obciążenia nadkładem odpadów nie spowodowały jej zniszczenia. Prawidłowo wykonana warstwa powinna gwarantować skuteczną ochronę wód podziemnych na etapie budowy i eksploatacji oraz po zamknięciu składowiska. W tym celu niezbędne jest określenie warunków jego wbudowania oraz znajomość podstawowych właściwości geotechnicznych, pozwalających na przewidywanie zachowania materiału w warunkach mogących wystąpić na składowisku. Wbudowanie w konstrukcje składowiska osadów z dekarbonizacji wody przyczyni się do bardziej racjonalnego gospodarowania

zasobami naturalnymi oraz w znacznym stopniu ograniczy wymaganą pojemność składowisk odpadów.

TEZA:

Osady z dekarbonizacji wody mogą być wykorzystane do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów w określonych warunkach wbudowania i utrzymania.

Celem pracy jest określenie parametrów geotechnicznych osadów z dekarbonizacji wody powstających w elektrociepłowni, w aspekcie możliwości ich wykorzystania do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów, ze szczególnym uwzględnieniem przepuszczalności hydraulicznej, będącej istotnym czynnikiem decydującym o właściwościach uszczelniających materiału.

Szczegółowe cele obejmują:

- określenie podstawowego składu chemicznego osadów,
- oznaczenie właściwości fizycznych i mechanicznych osadów, ze szczególnym uwzględnieniem przepuszczalności hydraulicznej i jej zmienności w zależności od wilgotności formowania i zagęszczenia oraz właściwości filtrującej cieczy w czasie,
- opracowanie metodyki badań, ze wskazaniem właściwych metod oznaczania poszczególnych parametrów i sposobów formowania próbek z uwzględnieniem praktycznego wykonania pomiarów laboratoryjnych i określania parametrów geotechnicznych bezpiecznych dla budowy i eksploatacji konstrukcji,
- porównanie osadów do gruntów spoistych według kryterium właściwości geotechnicznych,
- podsumowanie wyników badań oraz ich analizę w aspekcie przydatności badanych osadów do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów z opracowaniem ogólnych wytycznych wbudowania osadów w konstrukcje.

Pierwsza część rozprawy obejmuje przegląd stanu wiedzy o osadach z dekarbonizacji wody: proces powstawania, aspekty prawne odzysku i unieszkodliwiania oraz możliwości ich wykorzystywania i stan prac badawczych dotyczący tego zagadnienia. W rozdziale 4 przedstawiono wymagania stawiane warstwom uszczelniającym składowisk odpadów oraz wytyczne doboru materiału do ich budowy i sposoby określania warunków ich wbudowania w konstrukcję. Rozdział 5 zawiera wyniki badań składu chemicznego osadów. Zasadniczą część pracy (rozdziały 6-8) stanowią badania geotechniczne własne właściwości fizycznych, mechanicznych i filtracyjnych osadów z dekarbonizacji wody, uzupełnione o informacje wynikające z przeglądu literatury. Uzyskane wyniki badań uogólniono, podsumowując wnioskami przedstawionymi w rozdziale 9.

Drugą część pracy stanowią załączniki (I-III) obejmujące tabele z wynikami pomiarów oraz wykresy przedstawiające graficzną ich interpretację. Załącznik IV przedstawia wyniki analizy statystycznej oraz niepewności pomiarowe wykonanych oznaczeń wraz z zależnościami wykorzystanymi do obliczeń. Ogólne wytyczne do laboratoryjnych badań właściwości geotechnicznych osadów oraz warunki ich wbudowania w warstwę uszczelnienia opracowano w formie załącznika (V).

Praca zawiera streszczenie w języku polskim, angielskim i rosyjskim.

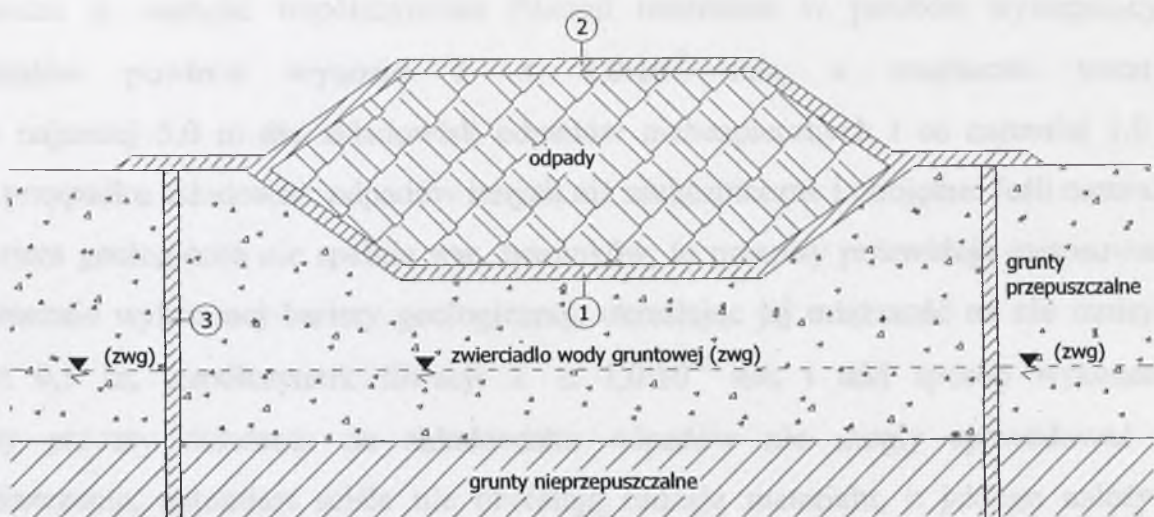
4. BUDOWA WARSTW USZCZELNIAJĄCYCH SKŁADOWISK ODPADÓW

4.1. Składowisko odpadów

Składowisko odpadów jest to prawnie zlokalizowany i urządzony obiekt inżynierski przeznaczony do składowania odpadów o znanych właściwościach, gwarantujący ich bezpieczne gromadzenie przy minimalizacji zagrożeń dla ochrony środowiska naturalnego [Łuniewski S., 2000], [Rosik-Dulewska Cz., 2002]. Aby odpady były odizolowane od środowiska i bezpiecznie przechowywane, każde składowisko odpadów powinno mieć szczelną przesłonę gwarantującą ochronę wód gruntowych przed skażeniem zanieczyszczeniami z powstających w niecce składowiska odcieków. W przypadku, kiedy naturalnie występujące w podłożu grunty nie stanowią dostatecznie szczelnej bariery geologicznej, dodatkowo należy wykonać mineralną przesłonę izolacyjną. Ze względu na miejsce wbudowania w konstrukcje składowisk odpadów sztucznie wykonanych przesłon izolacyjnych, można ogólnie je podzielić na [Majer E., Wysokiński L., 2005]:

- uszczelniające podstawę i skarpy,
- uszczelniające powierzchnię,
- pionowe.

Schemat występowania mineralnych przesłon izolacyjnych w konstrukcjach składowisk odpadów przedstawiono na Rys.4.1.1.



Rys.4.1.1. Schemat lokalizacji poszczególnych typów mineralnych przesłon izolacyjnych w składowisku odpadów wg Majer E. i Wysokińskiego L. [2005]

- 1 – uszczelnienie podstawy i skarp
- 2 – uszczelnienie powierzchni
- 3 – uszczelnienie pionowe

4.2. Uwarunkowania prawne

W rozumieniu *Ustawy o odpadach* [130] przez składowisko odpadów należy rozumieć obiekt budowlany przeznaczony do składowania odpadów. Ustawa wyróżnia 3 typy składowisk:

- składowiska odpadów niebezpiecznych,
- składowiska odpadów obojętnych,
- składowiska odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne.

Dodatkowe wymagania dotyczące bezpiecznego dla ludzi i środowiska składowania odpadów, a w szczególności składowania zapobiegającego zanieczyszczeniu wód powierzchniowych i podziemnych, gleby i ziemi oraz powietrza, określa *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów* [137]. Rozporządzenie to nakłada obowiązek takiej lokalizacji składowisk odpadów, aby posiadały one naturalną barierę geologiczną, uszczelniającą podłoże i ściany

boczne tj. wartość współczynnika filtracji naturalnie w podłożu występujących gruntów powinna wynosić $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s, a miąższość warstwy co najmniej 5,0 m dla składowisk odpadów niebezpiecznych i co najmniej 1,0 m w przypadku składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Jeśli naturalna bariera geologiczna nie spełnia ww. warunków, to przepisy przewidują zastosowanie sztucznie wykonanej bariery geologicznej, określając jej miąższość na nie mniejszą niż 0,5 m, współczynnik filtracji $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s i taki sposób wykonania, aby procesy osiadania na składowisku odpadów nie mogły spowodować jej zniszczenia, natomiast ściśle nie określają rodzaju materiału, z jakiego należy ją wykonać. Zgodnie z rozporządzeniem, jako dodatkowe zabezpieczenie należy zaprojektować izolację syntetyczną. W szczególnych przypadkach określonych rozporządzeniem [145] dopuszcza wykonanie sztucznej bariery geologicznej o miąższości 0,5 m i wartości współczynnika filtracji $k \leq 1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s, tj. wówczas, kiedy wypełniane są tereny niekorzystnie przekształcone odpadami takimi jak: żużle, popioły paleniskowe, pyły z kotłów, popioły lotne z węgla i mieszanki popiołowo-żużlowe z mokrego odprowadzania odpadów, ale w każdym z przypadków takie, które nie pochodzą z palenisk fluidalnych.

Wykonanie uszczelnienia przewiduje się również na etapie zamknięcia składowiska, w celu jego zabezpieczenia przed infiltracją wód opadowych. W tym przypadku mineralna warstwa uszczelniająca powinna mieć miąższość co najmniej 0,5 m i charakteryzować się współczynnikiem filtracji $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s.

4.3. Uszczelnienia na składowiskach odpadów

4.3.1. Uszczelnienie podstawy i skarp składowiska

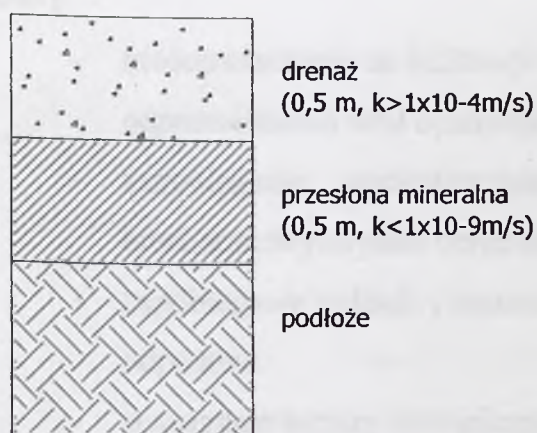
Najczęściej uszczelnieniom składowisk odpadów stawiane są następujące wymagania [Rosik-Dulewska Cz., 2002], [Wysokiński L., 1995], [Majer E., Wysokiński L., 2005]:

- szczelność i stabilność w czasie uniemożliwiająca przedostanie się odcieków powstających w niecce składowiska do wód podziemnych i powierzchniowych,
- zdolność adsorpcji szkodliwych związków chemicznych (np. metali ciężkich),
- tworzenie pod składowiskiem wyrównanego i statecznego podłoża, o dobrej nośności i odpowiednich właściwościach odkształceniowych.

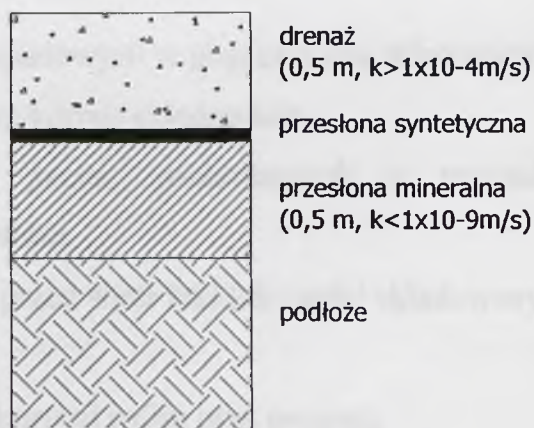
Proponowane do zastosowania w Polsce profile uszczelnień podstawy i skarp składowisk odpadów można podzielić na:

- pojedyncze (Rys.4.3.1),
- pojedyncze – złożone (Rys. 4.3.2),
- podwójne (Rys.4.3.3),
- podwójne – złożone (Rys.4.3.4).

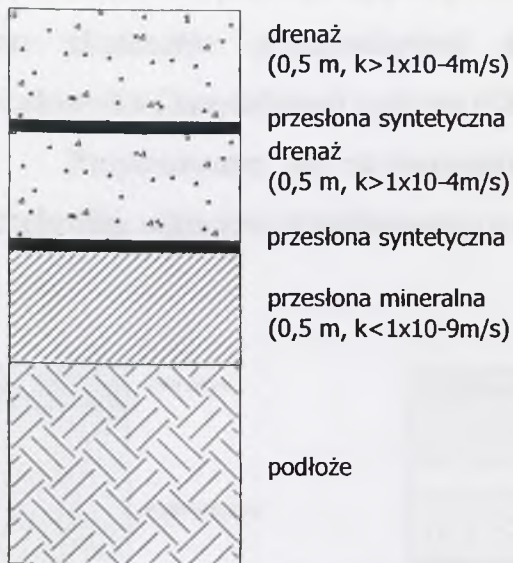
Dobór konstrukcji systemu uszczelniania składowiska w podstawie powinien być uzależniony m. in. od warunków geologicznych występujących w podłożu, rodzaju i ładunku zanieczyszczeń możliwych do przedostania się do środowiska, powierzchni i typu składowiska [Garbulewski K., 2000], [Majer E., Wysokiński L., 2005].



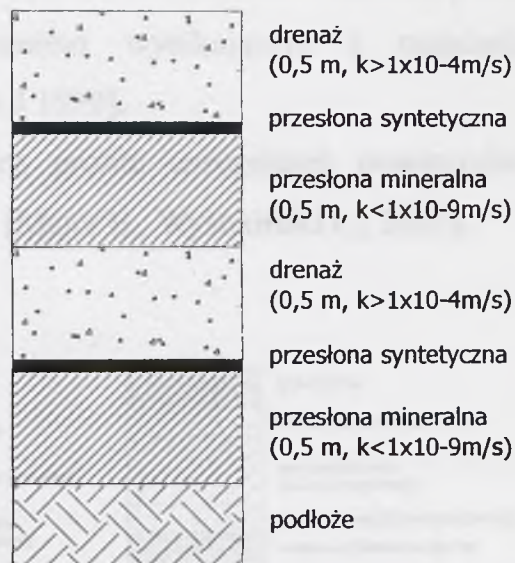
Rys.4.3.1. Profil uszczelnienia pojedynczego
[Majer E., Wysokiński L., 2005]



Rys.4.3.2. Profil uszczelnienia pojedynczego – złożonego [Majer E., Wysokiński L., 2005]



Rys.4.3.3. Profil uszczelnienia podwójnego
[Majer E., Wysokiński L., 2005]



Rys.4.3.4. Profil uszczelnienia podwójnego –
złożonego [Majer E., Wysokiński L., 2005]

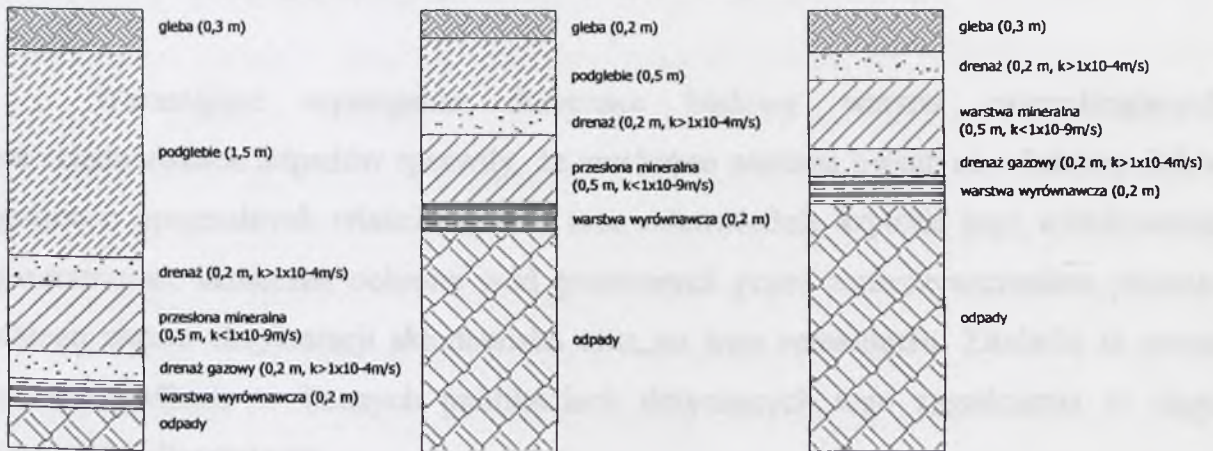
4.3.2. Uszczelnienie powierzchni składowiska po zakończeniu eksploatacji

Warstwa pokrycia końcowego powinna być tak skonstruowana i wykonana, aby spełniała następujące zadania [Oleszkiewicz J., 1999], [Majer E., Wysokiński L., 2005]:

- niedopuszczenie do infiltracji wód opadowych w głąb korpusu składowiska,
- odprowadzenie wód opadowych poza korpus składowiska,
- zapobieganie wydostawaniu się gazów pochodzących z procesów biochemicznych poza obręb składowiska,
- zapobieganie pyleniu i roznoszeniu przez wiatr lekkich części składowanych odpadów,
- stworzenie bariery biologicznej dla korzeni roślin oraz gryzoni,
- zapobieganie erozji powierzchni składowiska oraz wymywaniu składowanych odpadów,
- poprawa estetyki oraz możliwość ostatecznego wykorzystania terenu po składowisku.

Warstwa przykrywająca powinna być odporna na warunki atmosferyczne oraz skutecznie przeciwstawiać się naprężeniom wynikającym z osiadania składowiska i konsolidacji podłoża [Oleszkiewicz J 1999].

Proponowane do zastosowania w Polsce profile uszczelnień powierzchni składowisk odpadów przedstawiono na Rys.4.3.5 [Majer E., Wysokiński L., 2005].



Rys.4.3.5. Profile uszczelnień powierzchni składowisk odpadów [Majer E., Wysokiński L., 2005]

4.3.3. Uszczelnienie pionowe

Funkcje uszczelnień pionowych wykonywanych wokół składowisk odpadów określono następująco [Majer E., Wysokiński L., 2005]:

- zabezpieczenie wód gruntowych przed poziomą migracją zanieczyszczonych wód ze składowiska,
- utworzenie wokół składowiska zamkniętego i szczelnego „zbiornika”,
- utrzymanie niższego poziomu wód gruntowych w „zbiorniku” niż na zewnątrz,
- zgromadzenie zanieczyszczonych wód w „zbiorniku”.

Spośród wielu rodzajów uszczelnień pionowych do najistotniejszych należy zaliczyć: ścianki szczelne, ścianki szczelinowe i ścianki wykonywane metodami iniekcijnymi [Jacenków S., 1993], [Majer E., Wysokiński L., 2005] oraz przesłony

przeciwfiltracyjne z zawiesin twardniejących [Kledyński Z., 2000], [Kledyński Z., Machowska A., 2005], [Rafalski L., 1995].

4.4. Przesłony mineralne

4.4.1. Rozwój prac nad przesłonami mineralnymi

Wzrastające wymagania dotyczące budowy warstw uszczelniających na składowiskach odpadów sprawiły, że zwrócono większą uwagę na właściwy dobór gruntu o optymalnych właściwościach oraz odpowiednie kryteria jego wbudowania, gwarantujące skuteczną ochronę wód gruntowych przed zanieczyszczeniem podczas całego okresu eksploatacji składowiska oraz po jego zamknięciu. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w licznych publikacjach dotyczących tego zagadnienia w ciągu ostatnich kilkunastu lat.

Podjęte przez Daniel'a D. E. i Benson'a C. H. [1990] badania wykazały, że stosowane dotychczas kryterium formowania warstw uszczelniających w określonym, na podstawie badań, przedziale wilgotności $\Delta w = w_{opt} \div (w_{opt} + 4\%)$, zapewniającym uzyskanie gęstości objętościowej szkieletu gruntowego powyżej określonej wartości minimalnej $\rho_d \geq 95\% \cdot \rho_{ds}$ dla normalnej metody zagęszczania w cylindrze aparatu Proctora i $\rho_d \geq 90\% \cdot \rho_{ds}$ dla metody zmodyfikowanej, nie jest wystarczające do osiągnięcia wymaganego minimalnego współczynnika filtracji. Według autorów, przy projektowaniu warstw uszczelniających należy również uwzględnić inne parametry gruntu, takie jak wytrzymałość na ścinanie, pęcznienie i skurczalność, odporność chemiczną i zdolność do odkształceń w wyniku osiadań bez utraty ciągłości warstwy. Autorzy zalecają określenie wymaganej strefy zagęszczania, w zależności od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu, przez zagęszczenie gruntu w cylindrze aparatu Proctora 3 metodami: zmodyfikowaną, normalną i zredukowaną, a następnie oznaczenie przepuszczalności hydraulicznej tak wykonanych próbek i przyjęcie, jako wstępnie zalecanej strefy, takich zakresów

wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu, dla których spełnione będzie kryterium wymaganej przepuszczalności hydraulicznej. Strefa ta powinna być zmodyfikowana przez uwzględnienie dodatkowych, uściślonych przez Daniel'a D.E., Wu Y.-K. [1993], kryteriów dotyczących skurczalności i wytrzymałości na ścinanie. Za minimalną wytrzymałość na ścinanie, wymaganą dla warstw uszczelniających, przyjęli oni wartość $\tau_f = 200$ kPa, a za dopuszczalne zmiany objętości, zachodzące w wyniku wysychania gruntu, takie, które nie przekraczały 4 % tj. nie powodowały powstawania spękań i szczelin. Autorzy zwrócili uwagę na niekorzystny wpływ zbrylonego gruntu i wielkości występujących bryłek w zagęszczanym materiale na kształt jego krzywej zagęszczalności i przepuszczalność hydrauliczną [Benson C. H., Daniel D. E., 1990]. Shelley T.L. i Daniel D.E. [1993] przeprowadzili badania wpływu frakcji żwirowej na przepuszczalność hydrauliczną gruntów spoistych, z których wynika, że obecność frakcji żwirowej w warstwie uszczelnienia nie wpływa niekorzystnie na jej szczelność pod warunkiem, że masowa zawartość frakcji żwirowej nie przekracza 50% i utworzony, w wyniku wymieszania frakcji grunt, stanowi jednorodny materiał. W roku 1994 Benson C.H., Zhai H. i Wang X. opracowali dla gruntów spoistych, zagęszczanych powyżej wilgotności optymalnej, nomogramy, pozwalające na dobór gruntów o przepuszczalności hydraulicznej $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s na podstawie znajomości ich wskaźnika plastyczności i granicy płynności, zawartości poszczególnych frakcji, aktywności koloidalnej oraz początkowego stopnia nasycenia porów wodą. Na podstawie wykonanych badań sformułowali następujące kryteria doboru gruntu na uszczelnienia:

- granica płynności $w_L \geq 20\%$,
- wskaźnik plastyczności $I_p \geq 7\%$,
- suma zawartości frakcji iłowej i pyłowej powyżej 30 %, w tym co najmniej 15 % powinna stanowić frakcja iłowa,
- wskaźnik aktywności koloidalnej co najmniej 0,3.

Na podstawie badań Benson C.H i Daniel D.E. [1994] określili optymalną miąższość warstw uszczelnienia na 0,6÷0,9 m. Na bazie własnych doświadczeń oraz analiz gruntów zastosowanych do budowy warstw uszczelniających na składowiskach

odpadów w Stanach Zjednoczonych Garbulewski K., Wienclaw E. i Wolski W. [1995] sklasyfikowali grunty pod względem przydatności do budowy uszczelnień, na podstawie ich składu granulomaterycznego na: odpowiednie, trudne do wbudowania, wymagające uzdatnienia i nieodpowiednie. Według autorów grunty odpowiednie to grunty o następującej zawartości poszczególnych frakcji: iłowej $f_i \approx 20 \div 45 \%$, pyłowej $f_{\pi} \approx 17 \div 40 \%$, piaskowej $f_p \approx 15 \div 27 \%$ i żwirowej $f_z \leq 36 \%$.

Inną koncepcję doboru gruntów do budowy warstw uszczelniających zaproponował Brandl H. [1992 i 1993]. Uważa on, że uszczelnienia należy wykonywać z kilku warstw, z których każda powinna charakteryzować się inną zdolnością wymiany jonowej w stosunku do odcieków, tj. powinna być wykonana z innego rodzaju łu. W celu uzyskania optymalnego efektu zaleca wbudowanie w warstwie dolnej silnie aktywowanego bentonitu sodowego, następnie bentonitu wapniowego i illitu lub kaolinitu. Natomiast przy wykonywaniu warstw, podobnie jak inni autorzy, zaleca zagęszczanie w przedziale wilgotności: $w_{opt} \div (w_{opt} + \Delta w)$; $\Delta w = (1 \div 3)\%$.

Większość omówionych w przytoczonej literaturze wniosków z przeprowadzonych badań znalazło swoje odzwierciedlenie w wymaganiach i zaleceniach dotyczących budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów w różnych krajach.

Ponieważ wykonana na składowisku odpadów warstwa uszczelnienia może być narażona na działanie warunków atmosferycznych powodujących jej wysuszenie lub przemarzanie, w literaturze co raz częściej spotyka się badania wpływu cyklicznych zmian temperatury na parametry gruntów [Pisarczyk S., 1998], a w szczególności na ich właściwości filtracyjne.

W celu ograniczenia możliwości powstawania spękań w wyniku wysychania gruntu zaleca się stosowanie gruntów, dla których zmniejszenie objętości (odkształcenia skurczowe) w wyniku wysychania nie przekracza 11 %. Dla gruntów o wyższej wartości parametru, w wyniku wysychania mogą powstać szczeliny, wpływające na wzrost przepuszczalności hydraulicznej nawet o 2 rzędy wielkości [Omidi G.H., Thomas J.C., Brown K.W., 1989]. Na powstawanie spękań w warstwie gruntu w wyniku wysychania ma wpływ zawartość frakcji drobnych (głównie iłowej)

oraz plastyczność gruntu: duża zawartość frakcji drobnych i wysoka plastyczność wpływają niekorzystnie na warstwę uszczelniania pod względem zachowania szczelności, w wyniku wystąpienia wysokich temperatur [Yesieller N., Miller C.J., Inci G., Yaldo K., 2000]. Do czynników zwiększających prawdopodobieństwo wystąpienia spękań Albrecht B.A. i Benson C.H., [2001] dodają wilgotność oraz energię zagęszczania i zalecają wykonywanie warstw uszczelnień z gruntów przy wilgotności zbliżonej do wilgotności optymalnej i przy wykorzystaniu możliwie wysokiej energii zagęszczania. Według tych autorów już jednokrotne wysuszenie gruntu może znacznie obniżyć jego właściwości uszczelniające, a zamknięcie powstałych szczelin nastąpić może dopiero po przyłożeniu nacisku co najmniej 60 kPa.

Niekorzystny wpływ na właściwości uszczelniające gruntów mają również ujemne temperatury występujące w okresie zimowym, które w przypadku niewłaściwego zabezpieczenia warstwy uszczelnienia niecki składowiska lub powierzchniowej warstwy pokrycia końcowego mogą spowodować utratę wymaganej szczelności w wyniku wzrostu przepuszczalności hydraulicznej nawet o 2 rzędy wielkości [Benson C.H., Abichou T.H., Olson M.A., Bossher P.J., 1995], [Benson C.H., Chamberlain E.J., Erickson A.E., Wang X., 1995], [Benson C.H., Othman M.A., 1993], [Benson C.H., Othman M.A. 1993a]. Według Kim W.-H. i Daniel'a D.E. [1992] na wielkość zmian przepuszczalności hydraulicznej wpływa przede wszystkim wilgotność zagęszczania. Największy wzrost przepuszczalności hydraulicznej zaobserwowali oni dla próbek zagęszczanych przy wilgotnościach $w > w_{opt}$, przy jednoczesnym wystąpieniu zmian objętościowych (zmniejszeniem objętości) do 4 %. Wpływ niskich temperatur na zmiany przepuszczalności hydraulicznej zanika wraz ze wzrostem nacisku na badany grunt.

O ważności zagadnień dotyczących właściwego doboru gruntu na warstwy uszczelniające, optymalnych kryteriów jego wbudowania oraz bezpiecznej konstrukcji składowisk odpadów świadczą liczne publikacje w tym zakresie, zarówno w kraju [Garbulewski K., Wienclaw E., 1994], [Garbulewski K., Wienclaw E., Wolski W., 1994], [Garbulewski K. 2000], [Łuniewski S., 2000], [Majer E., 2003 i 2005], [Majer E., Wysokiński L., 2005], [Pisarczyk S., 1997 i 2000], [Wysokiński L., 1995, 1997,

2003 i 2006], [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003], [Zabielska-Adamska K., 2006], [Zadroga B., 2001 i 2003], jak i za granicą [Allen A., 2001], [Benson C.H., Daniel D.E., Boutwell G.P., 1999], [Benson C.H., Gunter J.A., Boutwell G.P., Trautwein S.J., Berzanskis P.H., 1997], [Bozbey I., Guler E., 2005], [Daniel D.E., 1989], [Elsbury B.R., Daniel D.E., Sraders G.A., Anderson D.C., 1989], [Elsbury B.R., Sraders G.A., 1989], [Katsumi T., Benson C.H., Foose G.J., Kamon M., 2001], [Trast J.M., Benson C.D., 1995], [Vogt J., 1992], [Wang X., Benson C.H., 1995].

4.4.2. Wymagania dla gruntów

Obowiązujące w Polsce wymagania dotyczące mineralnych warstw uszczelniających są zgodne z wymaganiami Unii Europejskiej. Porównanie wymagań dla gruntów stosowanych do budowy warstw uszczelniających według wybranych przepisów przedstawiono w Tabeli 4.4.1 i 4.4.2.

Tabela 4.4.1. Zestawienie wymagań dla gruntów stosowanych na mineralne przesłony uszczelniające według różnych zaleceń – składowiska odpadów niebezpiecznych [Wysokiński L., Majer E., 2005]

Parametr	Jednostka	Wymagania			
		UE ¹	TA-Abfall ²	US EPA ^{4,5}	Polska [137]
1	2	3	4	5	6
Współczynnik filtracji	m/s	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 5,0 \cdot 10^{-10}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$
Wskaźnik plastyczności	%	-	-	$10 < I_p < 30$	-
Zawartość węgla wapnia	%	-	≤ 15	-	-
Zawartość części organicznych	%	-	≤ 5	-	-
Minimalna grubość warstwy	m	0,5	1,5	0,9	0,5
Zawartość minerałów ilastych	%	-	≥ 10	-	-
Zawartość frakcji iłowej	%	-	≥ 20	-	-
Suma frakcji pyłowej i iłowej	%	-	-	≥ 30	-

Tabela 4.4.2. Zestawienie wymagań dla gruntów stosowanych na mineralne przesłony uszczelniające według różnych zaleceń – składowiska odpadów obojętnych i innych niż niebezpieczne i obojętne [Wysokiński L., Majer E., 2005]

Parametr	Jednostka	Wymagania				
		UE ¹	TA-Siedlungsabfall ³		US EPA ^{4,6}	Polska [137]
			I klasa	II klasa		
1	2	3	4	5	6	7
Współczynnik filtracji	m/s	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 5,0 \cdot 10^{-10}$	$\leq 5,0 \cdot 10^{-10}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$
Wskaźnik plastyczności	%	-	-	-	$10 < I_p < 30$	-
Zawartość węgla wapnia	%	-	≤ 15	≤ 15	-	-
Zawartość części organicznych	%	-	≤ 5	≤ 5	-	-
Minimalna grubość warstwy	m	0,5	0,5	0,75	0,6	0,5
Zawartość minerałów ilastych	%	-	≥ 10	≥ 10	-	-
Zawartość frakcji iłowej	%	-	≥ 20	≥ 20	-	-
Suma frakcji pyłowej i iłowej	%	-	-	-	≥ 30	-

¹ UE – Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. Dyrektywa Rady 1999/31/EC z dnia 26 kwietnia 1999 o składowiskach odpadów. Tłumaczenie OBREM 1999.

² TA Abfall. Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Gemeinsames Ministerblatt 1991, Nr 8.

³ TA Siedlungsabfall. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und Sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger Verlags, Kilonia 1993.

⁴ Electronic Code of Federal Regulations (e-CRF), 2005, www.gpoaccess.gov.

⁵ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Constructuin, and Closure – 1989. Seminar Publication, EPA/625/4-89/022.

⁶ U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Solid Waste Disposal Facility Criteria - 1993. EPA530-R-93-017, www.epa.gov.

4.4.3. Dobór gruntów

Najnowsza Instrukcja ITB nr 411/2005 [Majer E., Wysokiński L., 2005], następująco określa właściwości, jakimi powinny charakteryzować się przesłony mineralne w składowiskach odpadów:

- zawartość frakcji uziarnienia umożliwiająca uzyskanie, po odpowiednim zagęszczeniu warstwy uszczelniającej, wymaganego współczynnika wodoprzepuszczalności,
- zdolność do absorbowania zanieczyszczeń znajdujących się w odciekach, które przedostają się przez lokalne uszkodzenia geomembrany,
- odkształcalność zapewniająca przenoszenie różnicy osiadań w podłożu niestabilizowanym (np. szkody górnicze),

- wystarczająca wytrzymałość przy występowaniu w podłożu naprężeń normalnych od odpadów lub do przeniesienia składowej stycznej naprężenia w warstwie uszczelniającej na skarpie,
- długotrwałość i stabilność chemiczna, zapewniające niezmienną wodoprzepuszczalność w okresie co najmniej 100 lat eksploatacji składowiska. odpowiednia wilgotność,

a grunty, z których wykonywane są warstwy uszczelniające, w momencie wbudowywania powinny mieć konsystencję i stan, zapewniające właściwą urabialność i zagęszczalność układanej warstwy.

W celu uzyskania wykładziny mineralnej o właściwościach zapewniających bezpieczne dla ludzi i środowiska składowanie odpadów, zaleca się jej wykonanie z gruntów spełniających odpowiednie wymagania. Zalecenia dotyczące gruntów wykorzystywanych do budowy warstw uszczelniających według Instrukcji ITB nr 411/2005 [Majer E., Wysokiński L., 2005] oraz innych autorów przedstawiono w Tabeli 4.4.3.

Szczegółową analizę różnych kryteriów przydatności gruntów do budowy warstw uszczelniających spotykanych w literaturze przeprowadza Majer E. [2005], a do oceny przydatności proponuje stosowanie tzw. wskaźnika przydatności, który w sposób ilościowy ma określać, czy grunt nadaje się do budowy przesłony uszczelniającej.

Tabela 4.4.3. Zestawienie wymagań dla gruntów i wykonywanych z nich mineralnych przesłon uszczelniających według różnych autorów [za Majer E., 2005]

Kryteria przydatności	Jednostka	Wymagania							
		ITB- Wyso- kiński L., Majer E. [2005]	Daniel D.E., Koerner R.M. [1995] ¹	Daniel D.E. [1998] ²	Benson C.H. i inni [1992], [1998] ³	Rowe R.H. i inni [1995] ⁴	Bagchi A. [1990] ⁵	Arch J. [1998] ⁶	NRA ⁷
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Współczynnik filtracji	m/s	rzędu 10^{-9}	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-9}$
Wskaźnik plastyczności	%	>20	$\geq 7-10$	$\geq 12-15$	≥ 10	>7	≥ 15 (10-15)	10-30	$\geq 6-12$ ≤ 65
Granica płynności	%	>30	-	-	17-70	-	≥ 30 (25-30)	< 90	≤ 90
Zawartość węgla wapnia	%	≤ 10	-	-	-	-	-	-	-
Zawartość części organicznych	%	≤ 2	-	-	-	-	-	-	-
Zawartość frakcji iłowej	%	≥ 20 (30) ⁸	$\geq 10-20$	$\geq 20-25$	$\geq 10-20$	15-20	≥ 25 (18-25)	>10	>10
Suma frakcji pyłowej i iłowej	%	≥ 60	$\geq 30-50$	≥ 50	≥ 50	-	≥ 50 (40-50)	>30	-
Zawartość frakcji żwirowej	%	brak	$\leq 30-50$	-	-	-	-	<10	
Zawartość minerałów ilastych	% wag.	-	-	-	-	15-20	-	-	-
Aktywność wg Skemptona	-	-	-	-	-	$\geq 0,3$	-	-	-
Pojemność wymiany kationowej	Meq/100g	-	-	-	-	≥ 10	-	-	-
Maksymalny wymiar ziarna	mm	-	25-50	-	-	-	-	50	-
Minimalna grubość warstwy	m	0,5	0,6-0,9 1,2-3,0	-	-	0,6+g ⁹ 0,9-1,0 3-4 (15) ¹⁰	-	-	-

¹ Daniel D.E., Koerner R.M. (1995) Waste Containment Facilities. Guidance for Construction, Quality Assurance and Quality Control of Liner and Cover Systems. Published by ASCE Press, New York.

² Daniel D.E. (1998) Landfills for solid and liquid wastes. Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, A.A.Balkema, Rotterdam.

³ Benson C.H., Zhai H., Rashad S.M. (1992) Assessment of construction quality control measurements and sampling frequencies for compacted soil liners. Environmental Geotechnics, Raport No. 92-6, University of Wisconsin, Department of Civil and Environmental Engineering, Madison; Benson C.H., Blotz L.R., Boutwell G.P. (1998), za Daniel D.E. 1998.

⁴ Rowe R.K., Quigley R.M., Booker J.R. (1995) Clayey barrier systems for waste disposal facilities. E & FN SPON, London.

⁵ Bagchi A. (1990) Design, construction and monitoring of sanitary landfill. John Wiley & Sons, New York.

⁶ Arch J. (1998) Clay barriers in landfills in environmental Interactions of clays. Clays and environment. Edited by Parker A., Rea J.E., Springer, Berlin.

⁷ National Rivers authority za Jones E.J., Murray E.J., Rix D.W. & Humphrey R.D. (1995) Selection of clay for use as landfill liners. Proceedings of the Symposium on Geotechnics Related to the European Environment. Waste Disposal by Landfill – GREEN'93, A.A. Balkema, Rotterdam.

⁸ składowiska odpadów niebezpiecznych

⁹ geomembrana

¹⁰ dla składowisk odpadów przemysłowych i toksycznych

4.4.4. Badania gruntów

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń, badania należy podzielić na [Majer E., 2005]:

- badania przydatności gruntów do budowy warstwy uszczelniającej obejmujące: badania gruntów w złożu, w laboratorium i na polniku doświadczalnym,
- badania formowanych przesłon na etapie budowy tj. bieżąca kontrola jakości, mająca na celu zapewnienie wymaganej jakości, obejmująca: badania gruntów przed zagęszczeniem, badania bieżące każdego uformowanego fragmentu przesłony, badania poszczególnych warstw po ich wykonaniu oraz badania odbiorcze po wykonaniu całej przesłony.

Ze względu na zakres niniejszej pracy obejmujący tylko badania laboratoryjne, w dalszej części rozdziału nie omówiono badań dotyczących bieżącej kontroli gruntów wbudowywanych w przesłonę oraz jakości wykonanych z nich uszczelnień.

Według zaleceń ITB [Majer E., Wysokiński L., 2005], [Wysokiński L., 1995], [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003], w celu dokonania oceny przydatności wybranego materiału do uszczelniania składowisk odpadów należy w laboratorium określić jego właściwości fizyczne, mechaniczne i hydrauliczne. Metody i częstotliwość wymaganych badań przedstawiono w Tabeli 4.4.4.

Badania gruntów do budowy warstw uszczelniających omówiono szczegółowo w pracy Garbulewskiego K. [2000]. Za najważniejsze kryterium przydatności gruntu uważa się kryterium przepuszczalności hydraulicznej, której oznaczenie wymagane jest co najmniej 2 metodami, polową i laboratoryjną. Zalecenia te wynikają z faktu, że przepuszczalność hydrauliczna otrzymana z badań polowych może być nawet o 2 rzędy wielkości wyższa od określonej z badań laboratoryjnych [Benson C.H., Daniel D.E., Boutwell G.P., 1999].

Tabela 4.4.4. Zalecana metodyka i częstotliwość badań kontrolnych w laboratorium

[Wysokiński L., Majer E., 2005]

L.p.	Parametr	Metoda badania	Częstotliwość badań na 1 rodzaj gruntu	UWAGI
1	2	3	4	5
1	Uziarnienie	PN-B/88-04481	5 próbek	dopuszcza się najnowsze metody oznaczania uziarnienia np. metody laserowe [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003]
2	Skład mineralny	wg [1]	3 próbki	zaleca się metodę DTA, rentgenowską lub inną oraz badania składu chemicznego [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003]
3	Wilgotność naturalna	PN-B/88-04481	5 próbek	
4	Granice konsystencji	PN-B/88-04481	5 próbek	
5	Zawartość części organicznych	PN-B/88-04481	3 próbki	
6	Zawartość węgla wapnia	metoda Scheiblera	5 próbek	
7	Pojemność sorpcyjna	PN-B/88-04481 i wg [2]	3 próbki	
8	Gęstość właściwa	PN-B/88-04481	3 próbki	
9	Zagęszczalność	PN-B/88-04481	3 próbki	wyznaczenie wilgotności optymalnej w_{opt} i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu ρ_{ds} metodą I oraz przedziału wilgotności formowania (w_f): $w_{opt} < w_f \leq 1,15 w_{opt}$
10	Współczynnik filtracji	wg Wysokiński L., Łukasik S., Majer E. [2003]	3 próbki	przy spadku hydraulicznym $i \geq 30$ lub wysokości słupa wody $h = 3,0$ m, przy spadku założonym w projekcie, badanie należy prowadzić do chwili ustalenia przepływu wody, należy ustalić zależność współczynnika filtracji od wskaźnika zagęszczenia, zaleca się wykonanie badań z wykorzystaniem cieczy probierczych lub odcieków pobranych ze składowiska [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003], co najmniej 2 metodami [Wysokiński L., 1995]
11	Ciśnienie pęcznienia i/lub wskaźnik pęcznienia	PN-B/88-04481 lub [3]	3 próbki	zaleca się ustalenie reakcji gruntu na zmiany wilgotności [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003], dopuszcza się metodę graficzną wykorzystując nomogram Casagrande'a
12	Kąt tarcia wewnętrznego i spójność	PN-B/88-04481	1 seria po 3 próbki	metoda trójosiowego ściskania UU lub CU, lub metoda bezpośredniego ścinania
13	Moduł ściśliwości	PN-B/88-04481 lub [4]	3 próbki	

[1] Kościółko H., Wyrwicki R. (1996): Metodyka badań kopalni ilastych. PIG, Warszawa,

[2] Piskowski A. (1984): Właściwości sorpcyjne i powierzchnia właściwa polskich gruntów. Archiwum Hydrotechniki, Tom XXXI, Zeszyt 3,

[3] Grabowska-Olszewska B. (1998): Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. PWN, Warszawa 1998,

[4] Instrukcja ITB nr 288/89. Wytyczne oznaczania modułów ściśliwości i współczynników konsolidacji gruntów metodą konsolidometryczną. ITB, Warszawa 1989

Po wykonaniu wymaganych badań należy określić graniczne wartości parametrów gruntu, jakimi powinien się on charakteryzować na etapie wbudowywania w przesłonę, aby wykonana z niego warstwa skutecznie zabezpieczała podłoże gruntowe poniżej składowiska odpadów przed zanieczyszczeniem, zarówno na etapie eksploatacji składowiska, jak i po jego zamknięciu.

[The following text is extremely faint and illegible, appearing to be a list of references or a detailed technical description. It contains various chemical symbols and numbers, such as CaCO₃, Mg, and CaO, but cannot be accurately transcribed.]

5. WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

5.1. Przegląd literatury

Szczegółowe dane dotyczące składu chemicznego osadów z dekarbonizacji wody spotykane w literaturze przedstawiono w Tabeli 5.1.1. Wynika z nich, że niezależnie od kraju w jakim powstają osady (USA, Kanada, Hiszpania, Polska), ich głównym składnikiem jest węglan wapnia (CaCO_3). Obok węglanu wapnia w skład osadów mogą wchodzić związki magnezu (Mg), żelaza (Fe), glinu (Al), manganu (Mn) oraz krzemionka (SiO_2), a w ilościach śladowych związki innych pierwiastków i zanieczyszczenia organiczne. Według Chojnackiego [1966] na skład chemiczny osadów wpływa rodzaj używanych reagentów i uzdatnianej wody. Suthaker S., Smith D.W. i Stanley S.J. [1993] oraz Sozański M. [1999] twierdzą, że skład osadów zależy nie tylko od rodzaju wody i reagentów, ale również od wielu innych czynników technologicznych warunkujących przebieg całego procesu uzdatniania wody, m. in. od ilości stosowanych reagentów i miejsca ich dozowania, czy od rodzaj stosowanych urządzeń. Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T. i Yih Ch.-T. [1987] zauważają, że wpływ na skład osadów może mieć nawet metoda ich odwadniania. Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. [1988] zaznaczają, że większą zawartością węglanu wapnia charakteryzują się osady powstające w procesie uzdatniania wody podziemnej (98 % CaCO_3) niż osady powstałe w wyniku dekarbonizacji wody powierzchniowej (88 % CaCO_3). Fakt ten tłumaczą większą ilością zanieczyszczeń występujących w wodach powierzchniowych w stosunku do wód podziemnych, co bezpośrednio przekłada się na zawartość węglanu wapnia CaCO_3 w osadach. Ich badania potwierdzają wpływ rodzaju stosowanych reagentów na skład chemiczny osadów i wykazują zwiększone zawartości: potasu (K) w osadach, gdzie dozowany był (KMnO_4), sodu (Na) przy stosowaniu Na_2CO_3 i glinu (Al.) w przypadku dawkowania $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Natomiast obecność krzemu (Si) przypisują zanieczyszczeniom, jakie dostały się do osadu podczas składowania

Tabela 5.1.1. Skład chemiczny osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L. p.	Źródło	Skład chemiczny											pH	Liczba próbek	Pochodzenie badanych odpadów	
		Udział związków			Udział pierwiastków											
		CaCO ₃	Inne	% wagowe	Ca	Mg	Al	Si	% wagowe							
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
1	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004]	główny składnik	Mg(OH) ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA (Iowa)
2	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	88,1	MgO (2,3%), SiO ₂ , Al ₂ O ₃ i zw. żelaza (4,4%), inne (5,2%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA (Iowa)
3	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005] ¹	87,2	MgO (7,0%), SiO ₂ , Al ₂ O ₃ i zw. żelaza (2,6%), inne (3,2%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA (Nevada)
4	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005] ¹	93,0	MgO (2,8%), SiO ₂ , Al ₂ O ₃ i zw. żelaza (1,5%), inne (2,7%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA (Foryda)
5	Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. [1988]	74,3÷99,7	Mn ₂ O ₇ , Fe ₂ O ₃ i inne	30,82÷51,71	1,08÷3,63	0,05÷1,58	0,44÷1,12	Fe (0,12÷0,71), K (0,3÷759)ppm, Na (206÷289)ppm	-	-	-	-	-	-	11	9 stacji uzdatniania wody z USA (Ohio), wiek osadów: 0,1-20 lat, rodzaj uzdatnianej wody: podziemna i powierzchniowa
6	Chojnacki A. [1966]	główny składnik	Fe(OH) ₃ , Mg(OH) ₂ , Al(OH) ₃ , SiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Dąbrowski H., Naumczyk J. [2003]	84,4	MgO (6,0%), Fe ₂ O ₃ (7,4%), SiO ₂ (2,2%), CaSO ₄ (ilości śladowe)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Polska (Rzeszów)
8	Glysson E.A. [1972]	81,0÷94,6	Mg(OH) ₂	32,3÷37,8	2,0÷4,8	-	ilości śladowe	S	-	-	-	-	-	9	10,1	USA
9	Glysson E.A. [1972] ²	87,2÷93,0	MgO, SiO ₂ , związki żelaza, Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA
10	Glysson E.A. [1972] ³	główny składnik	Fe(OH) ₃ , Mg(OH) ₂ , Al(OH) ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA

Tabela 5.1.1. Skład chemiczny osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury (c.d.)

L. p.	Źródło	Skład chemiczny											pH	Liczba próbek	Pochodzenie badanych odpadów		
		Udział związków			Udział pierwiastków												
		CaCO ₃	Inne	% wagowe	Ca	Mg	Al	Si	Inne								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
11	Mata-Alvarez J., Vitores-Lozano L. [1986]	główny składnik	Mg(OH) ₂ , Ca ₅ (OH)(PO ₄) ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Hiszpania (Barcelona)	
12	Raghu D., Hsieh H.-N., [1985]	główny składnik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA (New Jersey)	
13	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987]	główny składnik	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	USA (New Jersey)	
14	Rudnicka J. [2006]	81,8÷88,0	zw. magnezu, zw. żelaza	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	Polska (Rzeszów)	
15	Russel G.A. [1975]	94,9	-	33,1	3,05÷3,32	0,038 ±0,050	-	-	-	-	-	-	-	-	2	USA (Illinois)	
16	Sozański M. [1999]	75,0÷90,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Kanada (Edmonton, Alberta), rodzaj uzdatnianej wody: powierzchniowa
17	Suthaker S., Smith D.W., Stanley S.J. [1993]	główny składnik	Mg(OH) ₂ i inne zanieczyszczenia	31,2	0,68	0,096	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	

1 ppm = mg/kg, 1% = 10 000 ppm

¹ O'Conner J.T., Novak J.T. (1978) Management of Water Treatment Plant Residues. AWWA Water Treatment Waste Disposal Seminar Proc., AWWA, Annual Conference.

² Black A.P., Shuey B.S., Fleming P.J. (1971) Recovery of Calcium and Magnesium Values from Lime-Soda Softening Sludge. J.AWWA Vol.63, No.10, p.616.

³ Russell G.D., Russell G.S. (1954) The Disposal of Sludge from a Lime-Soda Softening Pt as Industrial Waste. Proc. Ninth Industrial Waste Conference. Purdue Univ., Series No.87, May, p. 201.

w lagunach. Zwracają oni również uwagę na fakt, iż rodzaj stosowanych reagentów może mieć wpływ nie tylko na skład chemiczny osadów, ale również na ich kolor: związki manganu (Mn) mogą nadawać im kolor szary, a związki żelaza (Fe) – żółty.

Natomiast według ich obserwacji skład chemiczny osadów nie zależy od wieku badanego materiału oraz czasu jego składowania w lagunach. Z badania wymywalności przeprowadzonego dla odpadów z dekarbonizacji wody wynika, iż zawartość metali ciężkich i związków organicznych, tj. substancji, które są szkodliwe dla zdrowia i mogą stanowić zagrożenie zanieczyszczenia środowiska, jest bardzo mała [Raghu D. i Hsieh H.-N., 1985], [Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T., 1987].

Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J. [2004] określają strukturę osadu jako krystaliczną. Sozański M. [1999] podaje, że jest ona drobnokrystaliczna i przyczynia się do bardzo dobrej podatności osadów na odwadnianie, przy czym zauważa, że podatność ta wzrasta w procesie zagęszczania wraz ze wzrostem zawartości CaCO_3 w składzie osadu. Z badań przeprowadzonych przez Glyssona [1972] wynika, że główny składnik osadów z dekarbonizacji wody: węglan wapnia (CaCO_3), występuje w postaci kryształków kalcytu. Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. [1988] obok kalcytu, podstawowego minerału występującego w składzie osadów, wymieniają kwarc oraz niewielkie ilości skalenia i minerałów ilastych. Ponadto przypuszczają, że w siatce krystalicznej kalcytu, w miejscu wapnia (Ca) może występować magnez (Mg), którego ilość w osadzie określają na około 2 %. Suthaker S., Smith D.W., Stanley S.J. [1993] podają, że obecny w składzie osadu wodorotlenek magnezu ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) występuje w postaci żelu.

Ze względu na dominującą zawartość CaCO_3 Glysson E.A. [1972] porównuje osad do bardzo rozdrobnionej skały wapiennej, podobnie jak Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J. [2004], którzy dodatkowo zaznaczają, że mimo podobieństwa do wapienia, osad jest od niego bardziej miękki.

Odczyn osadu Glysson E.A. [1972] oznacza jako zasadowy, $\text{pH} = 10,1$. Według Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. [1988] odczyn osadu waha się w granicach $\text{pH} = 9,6 \div 11,0$. Podwyższona wartość pH osadu w stosunku do odczynu czystego kalcytu ($\text{pH} = 8,4$) może być spowodowana obecnością w masie osadu

pozostałości związków dozowanych podczas procesu zmiękczenia wody, które nie przereagowały, tj. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lub/i Na_2CO_3 .

Glysson E.A. [1972] wykazuje w swojej pracy, że w wyniku kontaktu osadów z roztworami o różnym pH następuje wzrost alkaliczności i twardości całkowitej roztworów oraz stosunkowo szybkie ustalanie się warunków równowagi – po kilku godzinach kontaktu lub po przejściu kilku litrów roztworu przez warstwę osadu. Dla roztworów o początkowym $\text{pH} = 5,0 \div 7,0$ wzrasta ono do $\text{pH} = 8,0 \div 10,0$. Autor zauważa, że osady z dekarbonizacji wody obniżają stężenie żelaza w przepływających przez nie roztworach.

Wielkość kryształów osadu wynosi $2 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-6}$ m ($0,002 \div 0,005$ mm) i w ponad 90 % są to kryształy kalcytu. Analiza zdjęć struktury osadów wykonanych w skaningowym mikroskopie elektronowym, wskazuje, że kryształy dążą raczej do kształtów sferycznych niż płaskich, co pomaga wyjaśnić fakt, iż osady zachowują się bardziej jak pył niż il, (cząsteczki pyłu mają tendencję do kształtów sferycznych, podczas gdy cząsteczki łu do kształtów płaskich) [Glysson E.A., 1972].

5.2. Badania własne

5.2.1. Analiza chemiczna

Analizie chemicznej poddano 3 próbki osadów z dekarbonizacji wody.

Badania wykonano w Pracowni Gruntoznawczej Zakładu Geografii Fizycznej Uniwersytetu Wrocławskiego w październiku 2005 roku. Wyniki badań, obejmujące: odczyn pH, udział głównych związków chemicznych oraz zawartość pierwiastków w badanych odpadach, przedstawiono w Tabeli 5.2.1.

Tabela 5.2.1. Skład chemiczny osadów z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów

Parametr	Jednostka	Próbka 1(M)	Próbka 2(S)	Próbka 3	Średnia	Metoda badania
1	2	3	4	5	6	7
Zawartość CaCO ₃	% wag.	85,61	87,25	83,30	85,39	met. calcitbomby
Strata prażenia		2,10	2,30	2,60	2,33	PN-88/B-04481
Zawartość SiO ₂		4,21	3,96	3,69	3,95	mineralizacja próby
pH	-	8,61	8,66	8,35	8,54	met. gleboznawcza
Ca	% wag.	32,17	32,26	31,27	31,9	metoda absorpcji atomowej AAS
Fe		2,00	1,90	2,54	2,15	
Mg		0,84	0,96	0,61	0,80	
Al		0,11	0,12	0,16	0,13	
Mn	ppm	313,12	284,56	478,00	358,56	
K		238,00	208,00	188,00	211,33	
Ti		222,43	205,08	219,94	215,82	
Na		92,51	77,72	113,88	94,70	

1 ppm = 1 mg/1 kg, 1% = 10 000 ppm

5.2.2. Analiza termiczna

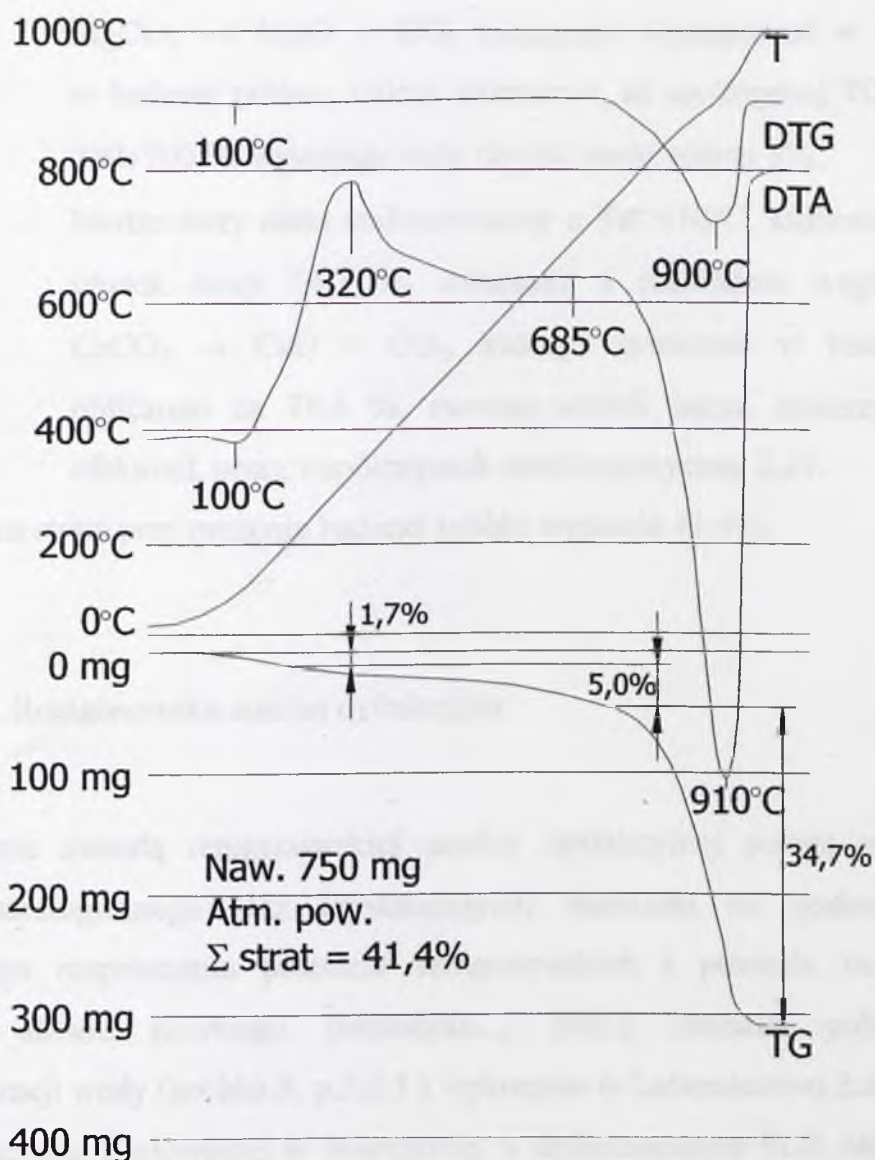
Metoda analizy termicznej (DTG, DTA i TG) polega na rejestrowaniu efektów energetycznych występujących w badanej próbce podczas ogrzewania, określonych w stosunku do substancji termicznie obojętnej, przy jednoczesnym oznaczaniu ubytku masy próbki. Metodą tą można oznaczyć zawartości wybranych składników badanego materiału w procentach masy. Pomiar prowadzi się w zakresie temperatur 20÷1000°C [Metodyka..., 1983].

Badania próbki odpadu z dekarbonizacji wody (próbka 3, p.5.2.1.) wykonano w Laboratorium Zakładu Betonu Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, na derywatografie MOM 102, produkcji węgierskiej, przy następujących warunkach pomiaru [Krzywobłocka-Laurów R., 2005]:

- atmosfera: powietrze,
- czułość DTG: 1/10,
- czułość DTA: 1/5,
- czułość TG: 500 mg,
- szybkość zmian temperatury: 10°C/min.,
- rodzaj tygli: platynowe,

- próbka wzorcowa: Al_2O_3 ,
- zakres temperatur: $20 \div 1000^\circ\text{C}$,
- masa analizowanej próbki: 750 mg.

Wyniki analizy termicznej przedstawiono na termogramie w formie: krzywej TG i powstałej po jej zróżniczkowaniu krzywej DTG (rejestracja ubytków masy) oraz krzywej DTA (rejestracja efektów termicznych). Na termogramie pokazano również wykres zmiany temperatury (krzywa T). Termogram osadów z dekarbonizacji wody przedstawiono na Rys. 5.2.1.



Rys. 5.2.1. Termogram – osady z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów

Na termogramie próbki stwierdzono następujące efekty termiczne [Krzywobłocka-Laurów R., 2005]:

- mały efekt endotermiczny o temperaturze maksimum T_m równej 100°C , któremu towarzyszy ubytek masy – 1,7 %, związany najprawdopodobniej z utratą pozostałości wilgoci w próbce,
- bardzo duży efekt egzotermiczny o T_m 320°C , którego pochodzenia nie zidentyfikowano,
- bardzo mały efekt endotermiczny o T_m 685°C , który można ewentualnie przypisać rozkładowi węglanu magnezu $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$ mogącego występować w małej ilości w badanej próbce, należy zaznaczyć, że na krzywej TG w zakresie $200\div 700^\circ\text{C}$ występuje stały ubytek masy, równy 5%,
- bardzo duży efekt endotermiczny o T_m 910°C , któremu towarzyszy ubytek masy 34,7 %, związany z rozkładem węglanu wapnia $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, którego zawartość w badanej próbce obliczono na 78,8 %, mnożąc ubytek masy, towarzyszący temu efektowi, przez współczynnik stechiometryczny 2,27.

Łączna strata przy prażeniu badanej próbki wyniosła 41,4%.

5.2.3. Rentgenowska analiza dyfrakcyjna

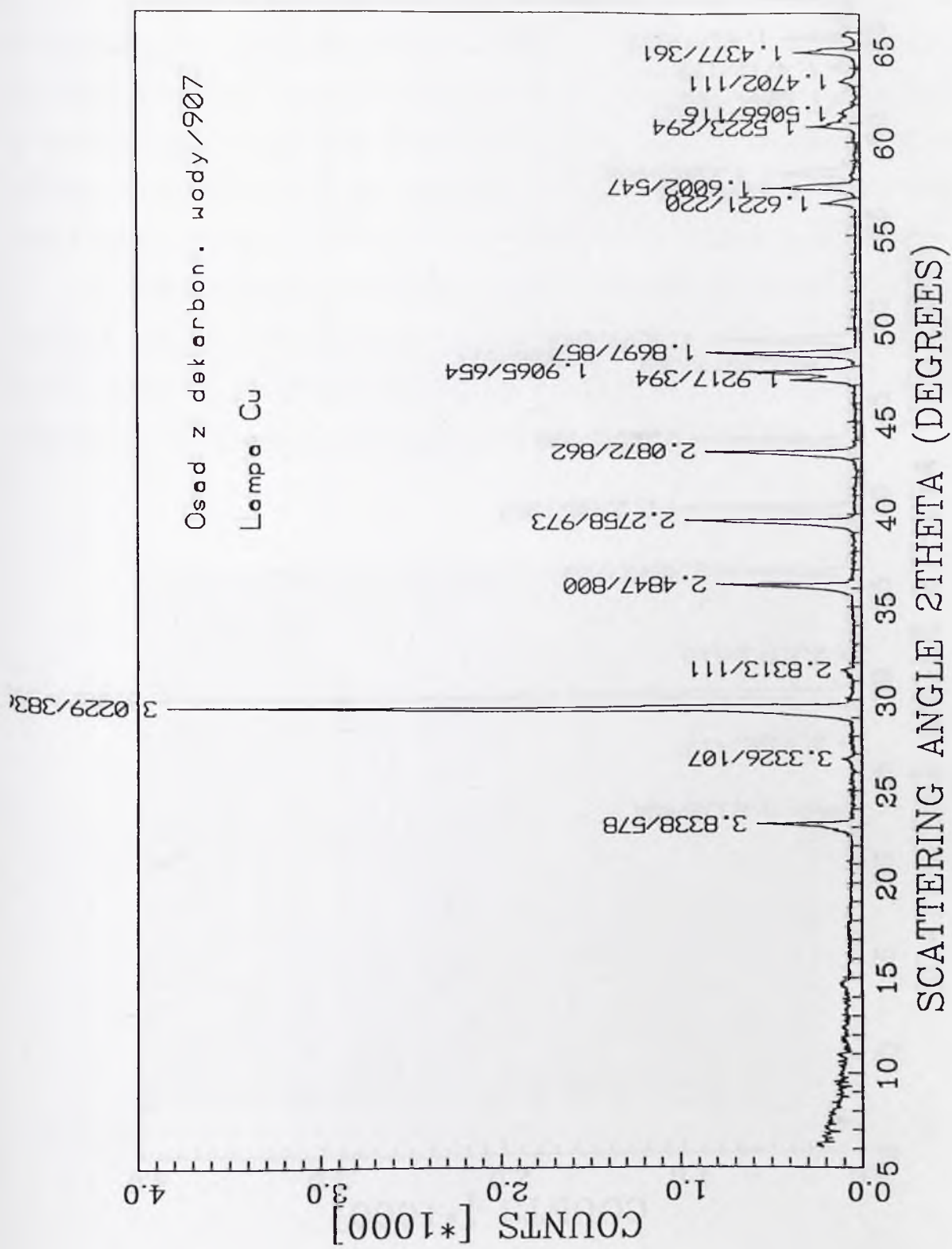
Badanie metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej polega na określeniu składu mineralogicznego (faz krystalicznych) materiału na podstawie obrazu dyfrakcyjnego rozproszenia promieni rentgenowskich i pozwala na jakościowe oznaczenie składu fazowego [Metodyka..., 1983]. Badania próbki osadów z dekarbonizacji wody (próbka 3, p.5.2.1.) wykonano w Laboratorium Zakładu Betonu Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, w dyfraktometrze TUR-M62, produkcji niemieckiej, przy następujących warunkach pomiaru [Krzywobłocka-Laurów R., 2005]:

- rodzaj promieniowania i filtru: $\text{CuK}\alpha$ /monochromator,
- napięcie i natężenie prądu lampy rtg: 40kV/ 20 mA,
- rodzaj licznika: BDS-7,
- krok: 0.05 s,
- stała czasowa: 5 s.

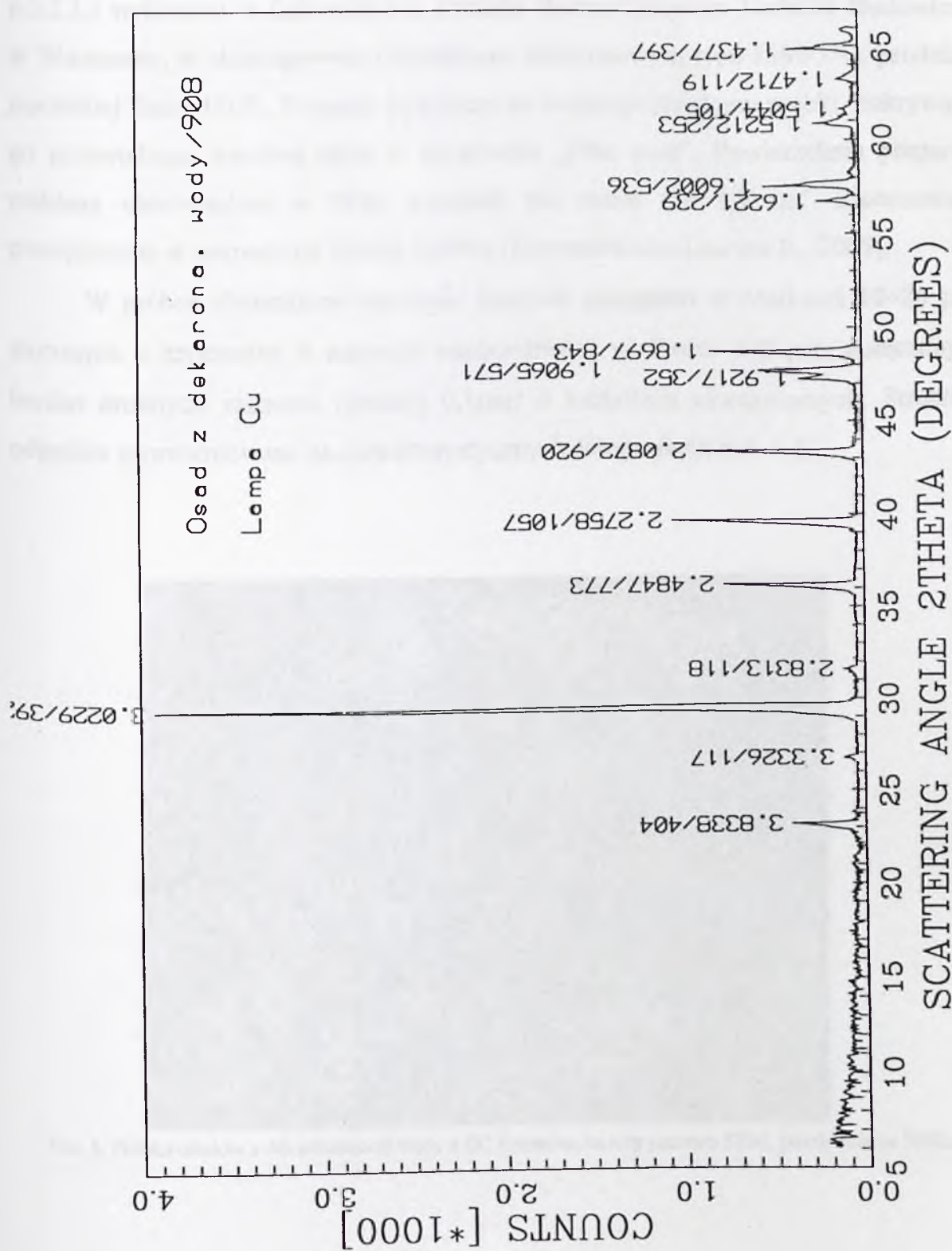
Z próbki wykonano dwa dyfraktogramy. Na ich podstawie oznaczono składnik dominujący ilościowo. Na dyfraktogramach badanej próbki stwierdzono obecność większości refleksów diagnostycznych węglanu wapnia w postaci kalcytu o stosunkowo dużej intensywności oraz małą domieszkę kwarcu w postaci refleksu o $d = 3,34 \text{ \AA}$. Zestawienie charakterystyk rentgenograficznych składników krystalicznych badanej próbki, uzyskanych jako średnia dwóch pomiarów, przedstawiono w Tabeli 5.2.2, a 2 dyfraktogramy na Rys.5.2.2 i 5.2.3.

Tabela 5.2.2. Rentgenowska analiza dyfrakcyjna

Cecha badana			Wyniki badań					
Wybrane składniki próbki, nr wzorca wg JCPDS (odległości międzypłaszczyznowe –d, Å i intensywność względna - I/I ₁ , %)			Odległości międzypłaszczyznowe – d, Å, i intensywności Bezwzględne - I _b , jednostki umowne					
			Pomiar 1		Pomiar 2		Średnia	
	d, Å	I/I ₁	d, Å	I _b , jednostki umowne	d, Å	I _b , jednostki umowne	d, Å	I _b , jednostki umowne
Kalcyt (5-0586)	3,86	12	3,83	404	3,83	578	3,83	491
	3,035	100	3,02	3921	3,02	3836	3,02	3879
	2,285	18	2,28	1057	2,28	973	2,28	1015
Kwarc (5-0490)	3,343	100	3,33	117	3,33	107	3,33	112



Rys. 5.2.2. Dyfraktogram – osady z dekarbonizacji wody (907).

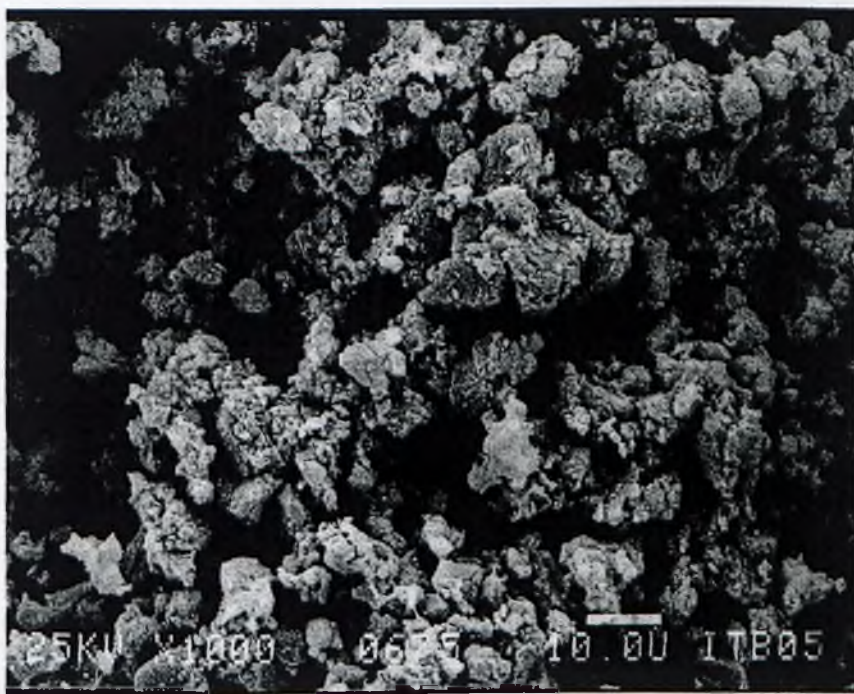


Rys. 5.2.3. Dyfraktoqram – osady z dekarbonizacji wody (908).

5.2.4. Badanie w skaningowym mikroskopie elektronowym

Analizę mikroskopową próbki osadów z dekarbonizacji wody (próbka 3, p.5.2.1.) wykonano w Laboratorium Zakładu Betonu Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie, w skaningowym mikroskopie elektronowym typu JSM-35C, produkcji japońskiej firmy JEOL. Preparat wykonano ze świeżego przełomu próbki, pokrywając go przewodzącą warstwą złota w urządzeniu „Fine coat”. Powierzchnia preparatu poddana obserwacjom w SEM wynosiła nie mniej niż 1,5 cm². Zastosowano powiększenia w zakresie od 20x do 10000x [Krzywobłocka-Laurów R., 2005].

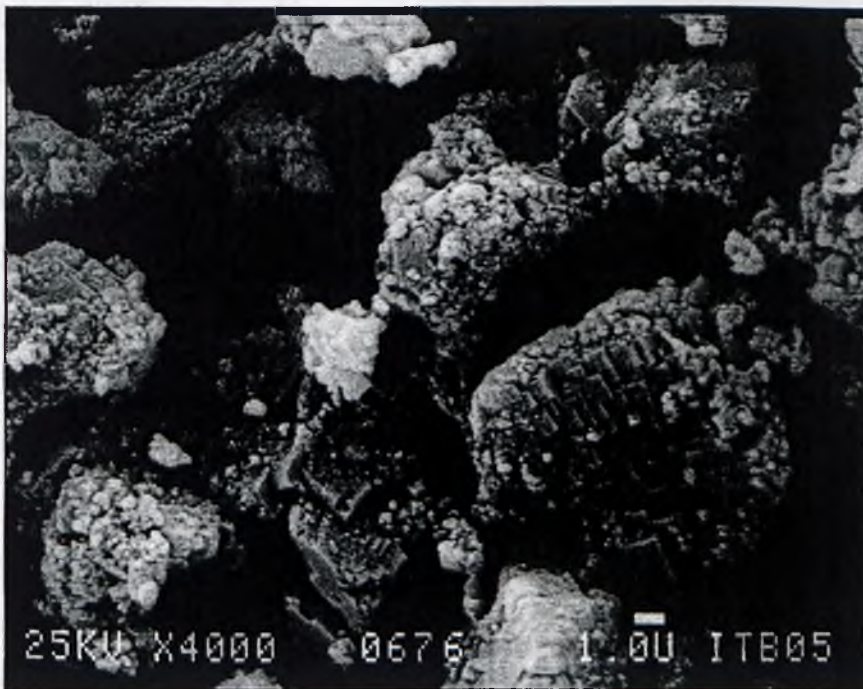
W próbce stwierdzono obecność licznych agregatów o wielkości 10÷20 μm, złożonych z kryształów o zarysach romboedrów i wielkości 1÷2 μm, połączonych bardzo drobnymi ziarnami (poniżej 0,1μm) o kształtach nieregularnych. Strukturę odpadów zaprezentowano na charakterystycznych fotografiach Fot. 1-3.



Fot. 1. Próbkę osadów z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów, świeży przełom SEM, powiększenie 1000x



Fot. 2. Próbkę osadów z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów, świeży przełam SEM, powiększenie 4000x



Fot. 3. Próbkę osadów z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów, świeży przełam SEM, powiększenie 10000x

5.2.5. Uogólnienie wyników badań składu chemicznego i struktury osadów z dekarbonizacji wody

Na podstawie badania metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej, jako składnik dominujący ilościowo w składzie osadu, określono węglan wapnia (CaCO_3), występujący w postaci kalcytu, z niewielką domieszką kwarcu. Z oznaczenia wykonanego metodą analizy termicznej wynika, że zawartość węglanu wapnia wynosi 78,8 %. Badanie to potwierdza również obecność kwarcu w składzie osadu i nie wyklucza niewielkiej zawartości (do 5,0%) węglanu magnezu (MgCO_3). Najdokładniejsze wyniki pomiaru daje analiza chemiczna określająca zawartość węglanu wapnia na poziomie $83,3 \div 87,25\%$. Oznaczona zawartość węglanu wapnia nie odbiega od wartości przedstawionych dla osadów z EC Rzeszów przez Dąbrowskiego H. i Naumczyka J. [2003] oraz Rudnicką J. [2006] i ogólnych zawartości CaCO_3 dla osadów powstających na świecie, przedstawionych w Tabeli 5.1.1. Procentowy udział węglanu wapnia w składzie osadów z EC Rzeszów jest charakterystyczny dla odpadów powstających w procesie uzdatniania wody powierzchniowej (średnio 88%) [Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M., 1988]. Oznaczana zawartość krzemionki (SiO_2) waha się w granicach $3,69 \div 4,21\%$ i jest nieznacznie wyższa od wartości podanych przez Dąbrowskiego H. i Naumczyka J. [2003] (2,2%), co może być spowodowane zanieczyszczeniem osadu w okresie sezonowania w czaszy mokrego składowiska odpadów paleniskowych (próbka 1 (M) i 2 (S)) lub podczas transportu do Laboratorium Geotechnicznego Zakładu Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej (próbka 3).

Pod względem udziału zawartości oznaczonych pierwiastków w składzie osadów w największych ilościach występuje wapń (Ca) ($31,27 \div 32,26\%$), a w stosunkowo niewielkich stężeniach żelazo (Fe), magnez (Mg) i glin (Al). Ilości śladowe wykazują: mangan (Mn), potas (K), tytan (Ti) i sód (Na). Oznaczone stężenia pierwiastków nie odbiegają od danych literaturowych (Tabela 5.1.1), za wyjątkiem niższego stężenia sodu (Na) $77,72 \div 113,88$ ppm i podwyższonej zawartości żelaza (Fe) $1,9 \div 2,54\%$. Wyższą zawartość związków żelaza w osadach z EC Rzeszów, w stosunku do osadów pochodzących z innych stacji uzdatniania wody, potwierdzają

Dąbrowski H. i Naumczyk J. [2003], określając zawartość Fe_2O_3 na poziomie 7,4 %. Obecność takiej ilości żelaza w składzie osadów należy tłumaczyć wpływem koagulantu $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, dodawanego w procesie koagulacji przeprowadzanej równoległe z dekarbonizacją wody mlekiem wapiennym w EC Rzeszów. Występujące w składzie osadu związki nadają mu kolor pomarańczowy.

Analizując wyniki badań składu chemicznego zestawione w Tabeli 5.2.1 dla 3 próbek osadu przechowywanych w różnych warunkach, nie widać znaczących różnic w procentowym udziale poszczególnych pierwiastków w składzie osadu, co potwierdza stabilność jego składu chemicznego niezależnie od warunków przechowywania. Do podobnych wniosków doszli Che M.D., Logan T.J., Traina S.J. i Bigham J.M. [1988] badając osady z dekarbonizacji wody wytwarzane w USA, składowane przez różny okres czasu i w różnych warunkach.

Z wykonanych pomiarów pH osadów wynika, iż odczyn $\text{pH} = 8,35 \div 8,66$ i jest niższy od wartości przedstawianych w literaturze (Tabela 5.1.1). Taka rozbieżność oznaczeń może wynikać z różnych metod badawczych zastosowanych do pomiaru pH. Według Che M.D., Logan T.J., Traina S.J. i Bigham J.M. [1988] oznaczone wartości pH są zbliżone do odczynu roztworu kalcytu.

Badania metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej potwierdzają krystaliczną budowę osadu, określając kalcyt jako formę występowania węglanu wapnia. Z analizy w skaningowym mikroskopie elektronowym wynika, że kalcyt tworzy zbite agregaty o wielkości około $10 \div 20 \mu\text{m}$, złożone z drobniejszych kryształów o wielkości $1 \div 2 \mu\text{m}$, które są połączone jeszcze drobniejszymi cząstkami o wielkości poniżej $0,1 \mu\text{m}$. Otrzymane wyniki składu mineralnego oraz wielkości kryształów są zbliżone do danych literaturowych.

6. FIZYCZNE WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

6.1. Przegląd literatury

6.1.1. Sucha pozostałość i uwodnienie oraz gęstość objętościowa i wilgotność

Najczęściej spotykanymi w literaturze parametrami charakteryzującymi stan fizyczny osadów z dekarbonizacji wody (zawartość części stałych, wody i gazu w osadzie) jest sucha pozostałość S_m oraz uwodnienie U_w , czyli parametry powszechnie stosowane w praktyce laboratoryjnej badania osadów powstających w procesach uzdatniania wody [Sozański M., 1999]. W nielicznych publikacjach można znaleźć charakterystyczne wartości wilgotności w oraz gęstości objętościowej osadów ρ . Zestawienie podstawowych parametrów (S_m , U_w , w i ρ) określających stan osadów z dekarbonizacji wody przedstawiono w Tabeli 6.1.1. Z analizy zgromadzonych danych wynika, że nie można jednoznacznie określić parametrów charakteryzujących stan osadów, a wartości oznaczonych wielkości: suchej pozostałości, uwodnienia, wilgotności i gęstości objętościowej zależą od przyjętej procedury postępowania z osadami na stacjach uzdatniania wody, a przede wszystkim od sposobu ich zagęszczania i odwadniania. Osady, bezpośrednio po powstaniu, charakteryzuje sucha pozostałość $S_m = 2\div 4\%$ i uwodnienie $U_w = 98\div 96\%$, natomiast odwodnione w prasie filtracyjnej i składowane w lagunach $S_m \geq 50\%$ i $U_w \leq 50\%$. Można przyjąć, że wilgotność osadów gromadzonych w lagunach wynosi średnio $w = 80\div 120\%$, a gęstość objętościowa $\rho = 1,0\div 1,52\text{ g/cm}^3$. Suthaker S., Smith D.W. i Stanley S.J. [1993] na podstawie wykonanych pomiarów wyprowadzają dla osadów z dekarbonizacji wody zależność gęstości objętościowej ρ od zawartości cząsteczek stałych S_m (suchej pozostałości) w zakresie $S_m = 10\div 40\%$,

$$\rho = 921 + 7,64 S_m + 0,06 S_m^2 \quad (6.1.1)$$

gdzie: ρ - gęstość objętościowa, kg/m^3 , S_m - sucha pozostałość, %.

Tabela 6.1.1. Właściwości fizyczne osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Sucha pozostatość S_m		Uwodnienie U_w	Wilgotność W	Gęstość objętościowa ρ		Forma badanych osadów	Liczba próbek	Pochodzenie badanych osadów
		%	3			%	4			
1	Ayoub G.M., Merhebi F. [2002]	11÷15	-	-	84,8±88,5	-	-	osady składające się z CaCO ₃ i Mg(OH) ₂	-	-
2	Ayoub G.M., Merhebi F. [2002] ¹	2÷15 (średnio 10)	-	-	-	-	-	-	-	-
3	Ayoub G.M., Merhebi F. [2002] ²	8÷10	-	-	87,3÷90,6	-	-	-	-	-
4	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004]	50	-	-	-	-	-	odwodnione w prasie filtracyjnej	-	USA (Iowa)
5	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	3 50	-	-	-	-	-	bepośrednio po powstaniu odwodnione w prasie filtracyjnej	-	USA (Iowa)
6	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	15÷30	-	-	230÷600	-	-	zagęszczone grawitacyjnie	-	-
		55÷65	-	-	54÷82	-	-	odwirowane	-	-
		10÷15	-	-	57÷90	-	-	odwodnione w taśmowej prasie filtracyjnej	-	-
		45÷65	-	-	54±122	-	-	odwodnione w filtrze próżniowym	-	-
		55÷70	-	-	43÷82	-	-	odwodnione w filtrze ciśnieniowym	-	-
		50 50÷60	-	-	100 67÷100	-	-	odwodnione w złożu piaskowym składowane w lagunach	-	-
7	Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. [1988]	-	-	-	48,8 1,16	-	-	osady mokre wysuszone do stanu powietrznosuchoego	11 11	9 stacji uzdatniania wody z USA (Ohio), wiek osadów: 0,1-20 lat, woda: podziemna i powierzchniowa
8	Dąbrowski H., Naumczyk J. [2003]	57	-	-	75	1,5	-	odwodnione w prasie filtracyjnej	-	woda powierzchniowa, Polska (Rzeszów)
9	Glysson E.A. [1972]	-	-	44,5÷54,5	80÷120	1,522	-	składowane w lagunach	-	USA
10	Glysson E.A. [1972] ³	2÷15	-	-	-	-	-	zbiorniki sedymentacyjne	-	USA

Tabela 6.1.1. Właściwości fizyczne osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury (c.d.)

L.p.	Źródło	Sucha pozostatość S_m		Uwodnienie U_w		Wilgotność w		Gęstość objętościowa ρ		Forma badanych osadów	Liczba próbek	Pochodzenie badanych osadów
		%	3	%	4	%	5	g/cm ³	6			
1	2										8	
11	Glysson E.A. [1972] ⁴	4		50		-		-		U_w - w lagunach	-	5 stacji uzdatniania wody z USA (Ohio)
12	Glysson E.A. [1972] ⁵	-		50		-		-		składowane w lagunach		
13	Hazelswerts D.E. [1974]	30		-		-		-		odwodnione, o konsystencji pasty	-	USA (Michigan)
14	Raghu D., Hsieh H.-N. [1985]	2÷4		-		-		-		bepośrednio po powstaniu	-	USA
		32		-		-		-		odwodnione w prasie filtracyjnej	-	(New Jersey)
15	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987]	3		-		-		-		bepośrednio po powstaniu	3	USA
		30		-		226		-		odwodnione w prasie filtracyjnej	3	(New Jersey)
16	Rudnicka J. [2006]	65,0÷66,0		34,0÷35,0		-		-		odwodnione w prasie i gromadzone w lagunach	3	Polska (Rzeszów)
17	Russel G.A. [1975]	-		-		48,3÷51,3		-		składowane w lagunach od 8 do 40 miesięcy	6	woda podziemna, USA (Illinois)
		20÷50		-		-		0,95÷1,20		-	-	-
18	Sozański M. [1999]	≤ 25		≥ 75		-		-		zagęszczone	-	-
		≤ 60		≥ 40		-		-		odwodnione mechanicznie	-	-
19	Suthaker S., Smith D.W., Stanley S.J. [1993]	10÷40		-		-		1,0÷1,32		gromadzone w lagunach po zagęszczaniu grawitacyjnym	31	Kanada (Edmonton, Alberta), woda: powierzchniowa

¹ Davis M.L., Cornwell D.A. (1998): Introduction to Environmental Engineering. 3rd WCB-McGraw-Hill, New York.

² McGhee T.J. (1991): Water Supply and Sewerage@, 6th, McGraw-Hill, New York.

³ Black A.P., Shuey B.S., Fleming P.J. (1971) Recovery of Calcium and Magnesium Values from Lime-Soda Softening Sludge. J.AWWA Vol.63, No.10, p.616,

⁴ Burgess & Niple, Ltd. (1969) Waste Sludge and Filter Wash-Water Disposal from Water Softening Plants. Ohio Dept. of Health, Columbus, Ohio, 41 pp.

⁵ Howson L.R. (1961) Lagoon Disposal of Lime Sludge. J. AWWA, 53:1169.

Uwagi [Sozański M., 1999]: $S_m = \frac{M_{cs}}{M_{os}} 100\%$, $U_w = \frac{M_w}{M_{os}} 100\%$, $w = \frac{M_w}{M_{cs}} 100\%$, $U_w + S_m = 100\%$ (6.2.2 – 6.2.5)

gdzie: S_m - sucha pozostatość, %,

U_w - uwodnienie, %,

M_w - masa wody w osadzie, %,

M_{cs} - masa części stałych osadu, %,

w - wilgotność, %,

M_{os} - masa osadu uwodnionego, %.

Przy tym Suthaker S., Smith D.W. i Stanley S.J. [1993] zauważają, iż osady z dekarbonizacji wody, ze względu na dużą zawartość CaCO_3 , charakteryzują się większą zawartością części stałych w porównaniu z innymi osadami powstającymi w procesach uzdatniania wody. Do analogicznych wniosków dochodzą również Ayoub G.M. i Merhebi F. [2002], którzy wysokiej zawartości drobnych cząsteczek węglanu wapnia w osadzie dodatkowo przypisują (podobnie jak Sozański M. [1999]) wyraźną podatność na zagęszczanie i odwadnianie.

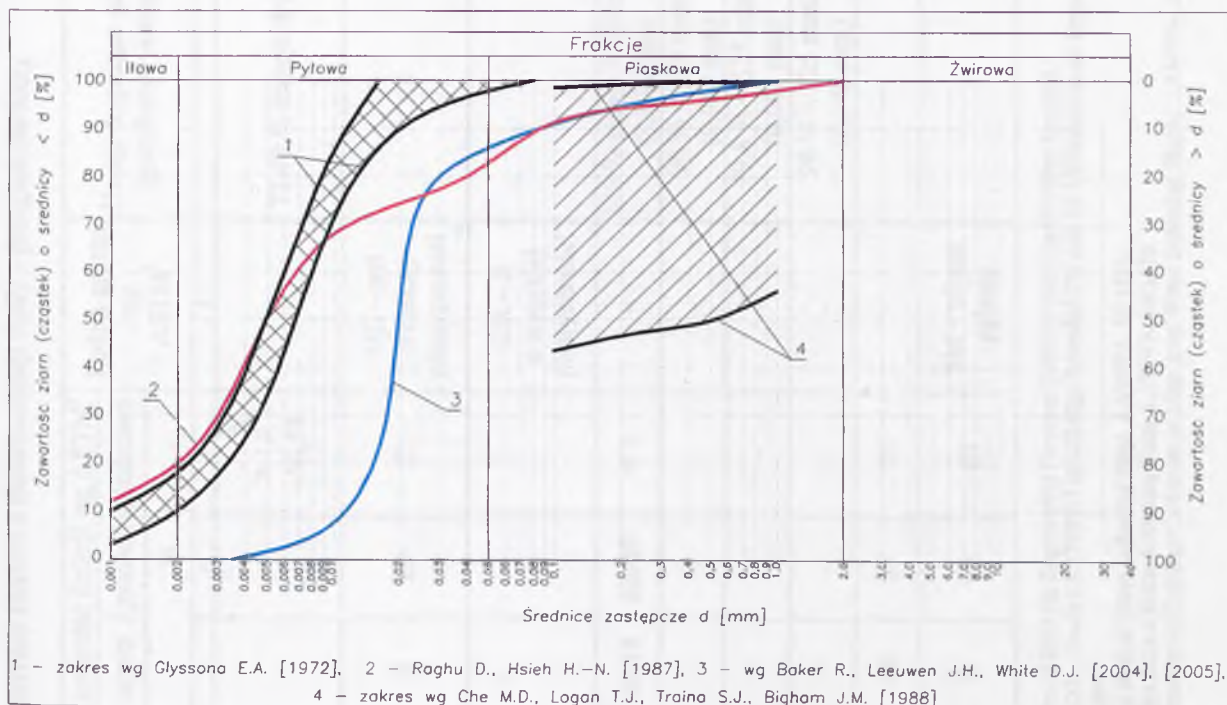
Wilgotność osadów z dekarbonizacji wody wysuszonych do stanu powietrznosuchego wynosi $w = 1,16\%$ [Che M.D., Logan T.J., Traina S.J. i Bigham J.M., [1988]. Badania przeprowadzone przez Baker'a R., Leeuwen'a J. H. i White'a D. J. [2004 i 2005] wykazały, że w większości woda występująca w osadzie jest wodą wolną, a zawartość wody związanej nie przekracza $2,0\%$. Na problemy w określeniu wilgotności odpadów metodą suszenia w suszarce, stosowaną powszechnie w geotechnice, napotkali Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T. i Yih Ch.-T. [1987]. Autorzy, sprzeczne i niejednoznaczne wyniki pomiarów wilgotności tą metodą, przypisują reakcjom termicznym, które zachodząc w próbce, prowadzą do utraty substancji lotnych znajdujących się w osadach. Autorzy modyfikują metodę pomiaru wilgotności stosowaną w geotechnice, proponując, przed ostatecznym wysuszeniem próbki w temperaturze $105\div 110\text{ }^\circ\text{C}$, wstępne wysuszenie osadu na powietrzu lub w suszarce w temperaturze $35\text{ }^\circ\text{C}$.

Na podatność wysychania osadu na powietrzu zwraca uwagę Glysson E.A. [1972] (za Howson L.R. (1961) Lagoon Disposal of Lime Sludge. J. AWWA, 53:1169) oraz Hazelswarts D.E. [1974], z którego obserwacji wynika, iż warstwa osadu o miąższości około 25 cm potrzebuje około 3-4 dni na wyschnięcie w warunkach atmosferycznych do stanu, w którym pojawiają się wyraźne pęknięcia powstające w wyniku skurczu.

6.1.2. Skład granulometryczny

Kolejnym parametrem opisującym osady z dekarbonizacji wody jest ich skład granulometryczny. Charakterystykę osadów pod względem uziarnienia podano w Tabeli 6.1.2. Krzywe uziarnienia osadów, prezentowane w nielicznych publikacjach, przedstawiono na Rys.6.1.1. Dodatkowo, na ich podstawie, sporządzono klasyfikację osadów wg normy polskiej [151]. Wyniki analizy przedstawiono w Tabeli 6.1.3. Określone zawartości frakcji zredukowanych naniesiono na trójkąt Fereta przedstawiony na Rys.6.1.2.

Osady z dekarbonizacji wody składają się z frakcji ilowej, pyłowej i piaskowej, przy czym Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J. [2004 i 2005] uważają, że obecne w składzie osadu ziarna piasku dostają się do osadu najprawdopodobniej podczas procesu wydobywania go z laguny.



Rys.6.1.1. Krzywe uziarnienia osadów z dekarbonizacji wody

Tabela 6.1.2. Skład granulometryczny osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Zawartość frakcji wg ASTM ¹			Rodzaj gruntu wg ASTM ¹	Uwagi dotyczące składu granulometrycznego	Analiza	Liczba pomiarów	Pochodzenie badanych osadów
		pyłowej		piaskowej					
		3	4						
1	Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. [1988]	-	-	> 1,5 ±56,55	-	71-99 % frakcje drobne	11	9 stacji uzdatniania wody z USA (Ohio), wiek osadów: 0, 1-20 lat, rodzaj uzdatnianej wody: podziemna i powierzchniowa	
2	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004], [2005]	0	80	20	ML – pył o niskiej plastyczności	areometryczna i sitowa	1	USA (Iowa)	
3	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005] ²	-	-	-	CH – il o wysokiej plastyczności	-	-	USA (Iowa)	
4	Glysson E.A. [1972]	10+18	82÷89	< 1	-	100 % ziaren < 200 mesh (0,074 mm)	4	USA	
5	Glysson E.A. [1972] ³	-	-	-	-	96 % < 325 mesh (0,045 mm)	-	USA	
6	Glysson E.A. [1972] ⁴	-	-	-	-	99,8 % < 325 mesh (0,045 mm)	-	USA	
7	Glysson E.A. [1972] ⁵	-	-	-	-	96 % < 325 mesh (0,045 mm)	-	USA	
8	Raghu D., Hsieh H.-N. [1985]	36	54	10	-	-	1	USA (New Jersey)	
9	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987]	0	40	60	SM – piasek pylasty	-	-	USA (New Jersey)	

¹ ASTM D 2487 Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

² Maher M.H., Butziger J.M., Disalvo D.L., Oweis I.S. (1993) Lime Sludge Amended Fly Ash for Utilization as an Engineering Material. Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Publication No.36, Proceedings from ASCE National Conference, April.

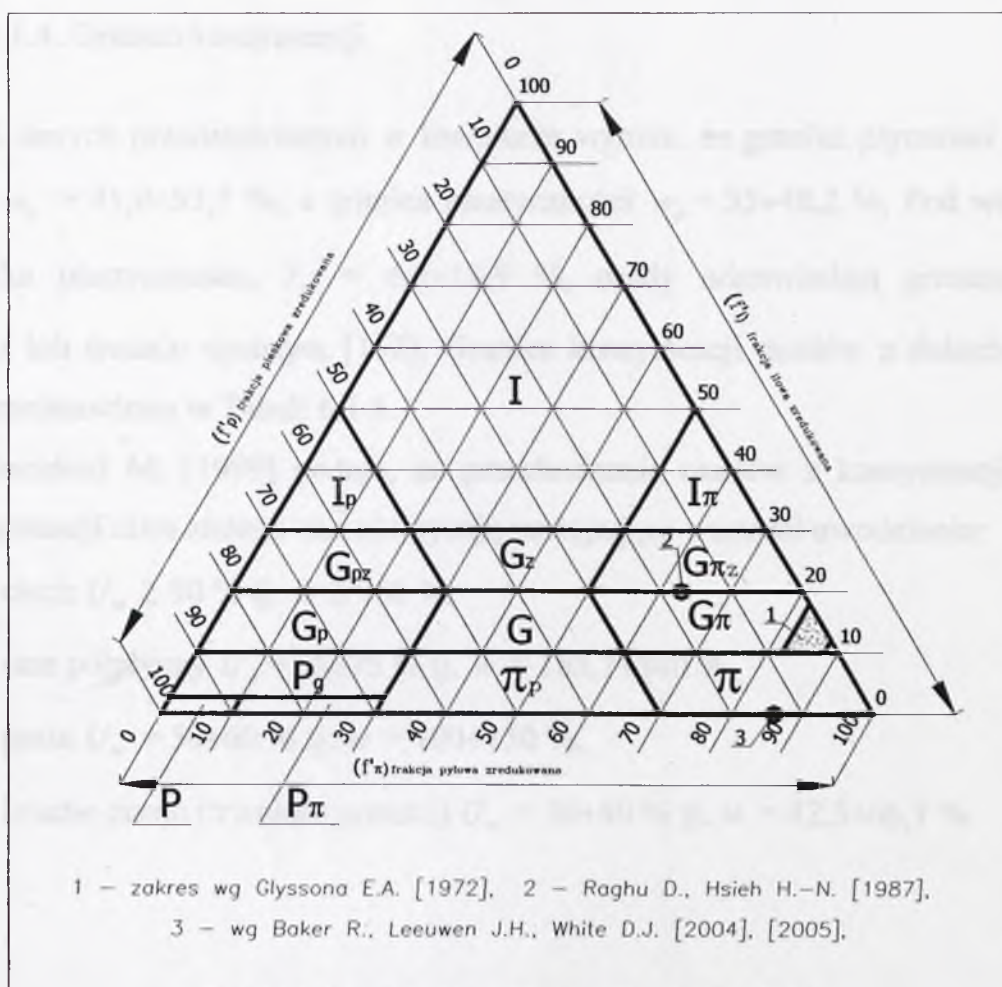
³ Gordon C.W. (1914) Calcining Sludge from a Water Softening Plant. J.AWWA, 36:1176.

⁴ Pedersen H.V. (1944) Calcining Sludge from a Water Softening Plant. J.AWWA, 36:1170.

⁵ Sheen R.T., Lammers H.R. (1944) Recovery of Calcium Carbonate or Lime from Water Softening Sludge. J.AWWA, 36:1145, Nov. 1944.

Tabela 6.1.3. Skład granulometryczny osadów z dekarbonizacji wody na podstawie literatury, według normy [151]

Źródło	Zawartość frakcji zredukowanej			Rodzaj gruntu wg trójkąta Fereta	Średnica miarodajna d_{60}	Średnica miarodajna d_{10}	Wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia U	Klasyfikacja ze względu na wskaźnik różnoziarnistości
	iłowej (f_i)	pyłowej (f_π)	piaskowej (f_p)					
-	%	%	%	-	mm	mm	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Glysson E.A. [1972]	10,0 ÷ 18,0	82,0 ÷ 88,0	do 2,0	glina pylasta	0,006 ÷ 0,008	do 0,002	3 ÷ ∞	równoziaernisty – bardzo różnoziarnisty
Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004], [2005]	-	86,0	14,0	pył	0,21	0,12	1,75	równoziaernisty
Raghu D., Hsieh H.-N. [1987]	20,0	63,0	17,0	glina pylasta/ glina pylasta zwięzła	0,0067	-	∞	bardzo różnoziarnisty



Rys.6.1.2. Klasyfikacja osadów wg trójkąta Fereta [151]

6.1.3. Gęstość właściwa

Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J. [2005] przyjmują gęstość właściwą osadów z dekarbonizacji wody $\rho_s = 2,62 \text{ g/cm}^3$ i sygnalizują, że jej wartość może zależeć od rodzaju uzdatnianej wody, m. in. od stężeń jonów cynku, glinu, wapnia oraz jonów siarczanowych i reagentów dodawanych w procesie uzdatniania wody. Inni autorzy np. Glysson E.A. [1972] i Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987] podają niejednoznaczne wartości gęstości właściwej.

6.1.4. Granice konsystencji

Z danych przedstawionych w literaturze wynika, że granica płynności osadów wynosi $w_L = 41,0 \div 57,7 \%$, a granica plastyczności $w_p = 35 \div 48,2 \%$. Pod względem wskaźnika plastyczności, $I_p = 4,0 \div 18,9 \%$, osady odpowiadają gruntom mało spoistym lub średnio spoistym [152]. Granice konsystencji osadów z dekarbonizacji wody przedstawiono w Tabeli 6.1.4.

Sozański M. [1999] podaje, że przechodzenie osadów z konsystencji cieczy do konsystencji ciała stałego charakteryzują następujące wartości uwodnienia:

- ciecz $U_w \geq 90 \%$ tj. $w \geq 900 \%$,
- stan półpłynny $U_w = 65 \div 75 \%$ tj. $w = 185,7 \div 300 \%$,
- pasta $U_w = 50 \div 60 \%$ tj. $w = 100 \div 150 \%$,
- kruche ciasto (trwałość postaci) $U_w = 30 \div 40 \%$ tj. $w = 42,8 \div 66,7 \%$.

Tabela 6.1.4. Granice konsystencji – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Rodzaj badanej próbki	Granica płynności w_L		Granica plastyczności w_p	Wskaźnik plastyczności I_p	Klasyfikacja ASTM ¹	Pochodzenie badanych osadów	Uwagi
			w_L	%					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004]	suszona na powietrzu	42,0	37,0	5,0	ML – pyły o niskiej plastyczności	USA (Iowa)		
2	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	suszona na powietrzu	41,0	37,0	4,0		USA (Iowa)		
3		suszona w suszarce	41,8	35,0	6,8	$w_L < 0,75 w_n$			
4	Glysson E.A. [1972]	suszona na powietrzu	57,7	38,8	18,9	MH – pyły o wysokiej plastyczności	USA	w_n – wilgotność naturalna	
5		naturalna	57,5	48,2	9,3				
6	Raghu D., Hsieh H.-N. [1985]	-	*	*	*	mało plastyczny*	USA (New Jersey)	* wykonanie wateczkowania nie było możliwe, liczba uderzeń w aparacie Casagrande ¹ a zawsze była mniejsza od 15, ** ocena na podstawie urabialności	
7	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987]	-	*	*	*	mało plastyczny – nieplastyczny**	USA (New Jersey)		

¹ ASTM D 2487 Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

6.1.5. Zagęszczalność

Zagęszczalność gruntów charakteryzują parametry: maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} i wilgotność optymalna w_{opt} określone na podstawie normowych badań ubijania obowiązujących w danym kraju. Zestawienie parametrów charakteryzujących zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody na podstawie literatury przedstawiono w Tabeli 6.1.5.

Tabela 6.1.5. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Maksymalna gęstość szkieletu	Wilgotność optymalna	Liczba pomiarów	Metoda badania według ASTM D1553 ¹	Pochodzenie badanych osadów	UWAGI
		ρ_{ds} g/cm ³	w_{opt} %				
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004]	1,11	37	1	-	USA (Iowa)	-
2	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	1,10	35	-	-	USA (Iowa)	przy wilgotności powyżej 45 % nie jest możliwe dalsze wykonywanie badania
3	Glysson E.A. [1972]	1,3	32	-	metoda standardowa	USA	po wysuszeniu do stanu powietrznosuchego
4	Raghu D., Hsieh H.-N. [1985]	0,98	37	-	metoda B	USA (New Jersey)	-
5	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987]	0,82	68	3	metoda B	USA (New Jersey)	-

¹ ASTM D 1553 Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)

Baker R., Leeuwen J. H. i White D. J. [2004 i 2005] zwracają uwagę na płaską krzywą zagęszczalności uzyskaną dla osadów z dekarbonizacji wody podczas badania w aparacie Proctora, w przeciwieństwie do krzywych zagęszczalności gruntów charakteryzujących się wyraźnym maksimum, które pozwala jednoznacznie określić maksymalną gęstość objętościową szkieletu ρ_{ds} i wilgotność optymalną w_{opt} badanego gruntu. Uzyskany dla osadów płaski kształt krzywej zagęszczalności tłumaczy niską gęstością objętościową szkieletu materiału, zbliżoną do gęstości wody. Płaska krzywa zagęszczalności może wskazywać, że materiał jest trudny do zagęszczania.

Glysson E.A. [1972] uważa, że w warunkach polowych, wyznaczone laboratoryjnie wartości w_{opt} i ρ_{ds} nie będą możliwe do osiągnięcia, ale pomimo to osady będą nadal wykazywały korzystne właściwości jako materiał na zasypki i na nasypy.

Według Raghu D. i Hsieh'a H.-N. [1985] oraz Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987] nie będzie problemów z zagęszczeniem osadów w warunkach polowych. Natomiast Sozański M. [1999] uważa, że przed przystąpieniem do zagęszczania osady należy wcześniej odwodnić, aby podczas procesu zagęszczania przeszły z konsystencji cieczy do konsystencji ciała stałego.

6.2. Badania własne

6.2.1. Analiza makroskopowa

Badanie właściwości osadu metodą makroskopową wykonano na próbce o wilgotności około 50 % zgodnie z normą [152].

Osady po wysuszeniu do stanu powietrznosuchego tworzyły zwarte grudki, co pozwoliło sklasyfikować je jako materiał spoisty. Barwa wilgotnego osadu, ciemnopomarańczowa, podczas wysychania traciła na intensywności, aż do jasnopomarańczowej w stanie powietrznosuchym. Powierzchnie wykonywanych wałeczków były bez połysku, a wałeczki pękały poprzecznie. Przy próbie rozcierania osadów w wodzie nie wyczuwało się ziaren piasku. Po wykonaniu około 10 kolejnych wałeczkowań tej samej kulki, wałeczek wykonany z osadów nie wykazywał spękań. Dłoń i papier przyłożone do osadów stawały się wilgotne, ale pomimo wysokiego uwodnienia materiału, przy ścisaniu go w dłoni, nie odsączała się woda. Po zwilżeniu powierzchni osadów kilkoma kroplami 20 % wodnego roztworu kwasu solnego (HCl) zachodziła burzliwa reakcja, intensywnie i długo (ponad 20 s).

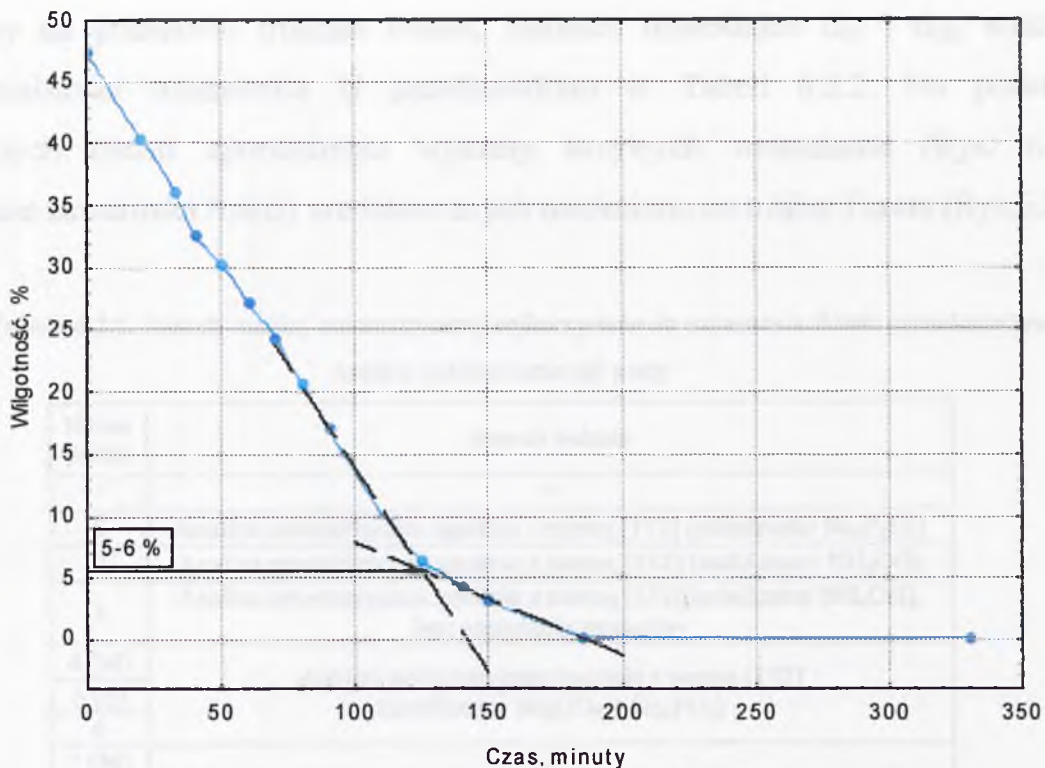
Na podstawie oceny spoistości i zawartości frakcji piaskowej badany materiał wykazywał podobieństwo do gliny pylastej, a jego stan, oznaczony jak dla gruntów średnio spoistych, określono jako miękkoplastyczny. Przy rozcieraniu odpadów

bez wody pomiędzy palcami, na palcach pozostawała mączka, co wskazywało na podobieństwo do pyłów [Pisarczyk S., Rymsza B., 1993]. Na etapie analizy makroskopowej określono zawartość CaCO_3 powyżej 5,0 %.

6.2.2. Gęstość objętościowa i wilgotność

Gęstość objętościową ρ i wilgotność w oznaczono dla osadów z dekarbonizacji przechowywanych w plastikowych workach w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW. Pomiar wilgotności w wykonano przez suszenie w suszarce do stałej masy w temperaturze $+105 \div 110$ °C, a gęstości objętościowej ρ w pierścieniach o objętości $V_1 = 10 \text{ cm}^3$ i $V_2 = 50 \text{ cm}^3$. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli Z.I.1. Wilgotność osadów wynosiła $w = 46,1 \div 55,1$ %, a gęstość objętościowa $\rho = 1,61 \div 1,78 \text{ g/cm}^3$. Dodatkowo w osadach oznaczono zawartość wody związanej, kontrolując wysychanie próbki do stałej masy w temperaturze $+105$ °C [Wiłun Z., 2003]. Wyniki pomiaru przedstawiono w Tabeli Z.I.2, a zależność wilgotności próbki od czasu wysychania przedstawiono na wykresie Rys.6.2.1. Za zawartość wody związanej przyjęto moment zmniejszania się prędkości wysychania próbki i określono jej zawartość na $5 \div 6$ %. Za zawartość wody związanej można również przyjąć wilgotność osadów wysuszonych do stanu powietrznosuchego, dla badanych osadów z dekarbonizacji wody wilgotność ta nie przekroczyła 2,0 %.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można wnioskować, iż wilgotność osadów po odwodnieniu w ciśnieniowej prasie filtracyjnej KFP wynosi $w \geq 55,0$ %. Przy tej wilgotności gęstość objętościowa osadów z dekarbonizacji wody jest niższa od wartości gęstości objętościowych mineralnych gruntów naturalnych i zbliżona do wartości parametru dla gruntów organicznych, natomiast wartość ich wilgotności jest zbliżona do maksymalnych wartości wilgotności mineralnych gruntów naturalnych [152].



Rys. 6.2.1. Zależność wilgotności próbki od czasu wysychania w temperaturze +105°C – zawartość wody związanej

6.2.3. Skład granulometryczny

W celu określenia uziarnienia osadów wykonano 2 rodzaje oznaczeń: analizę areometryczną zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie [152], z analizą sitową jako badaniem uzupełniającym, w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW oraz analizę w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” z wykorzystaniem i bez użycia ultradźwięków do dyspersji agregatów cząstek, w Pracowni Gruntoznawczej Zakładu Geografii Fizycznej Uniwersytetu Wrocławskiego. Pomiary wykonano dla 3 rodzajów próbek (p.2.6).

Zestawienie zastosowanych metod badawczych przedstawiono w Tabeli 6.2.1. Procentową zawartość frakcji w poszczególnych przedziałach pomiarowych zestawiono w Tabeli Z.I.3 dla analiz areometrycznych wykonanych zgodnie z normą i w Tabeli Z.I.4 dla pomiarów wykonanych w aparacie laserowym. Oznaczone na podstawie badań zawartości frakcji zredukowanych (f'_i , f'_π , f'_p), rodzaj gruntu

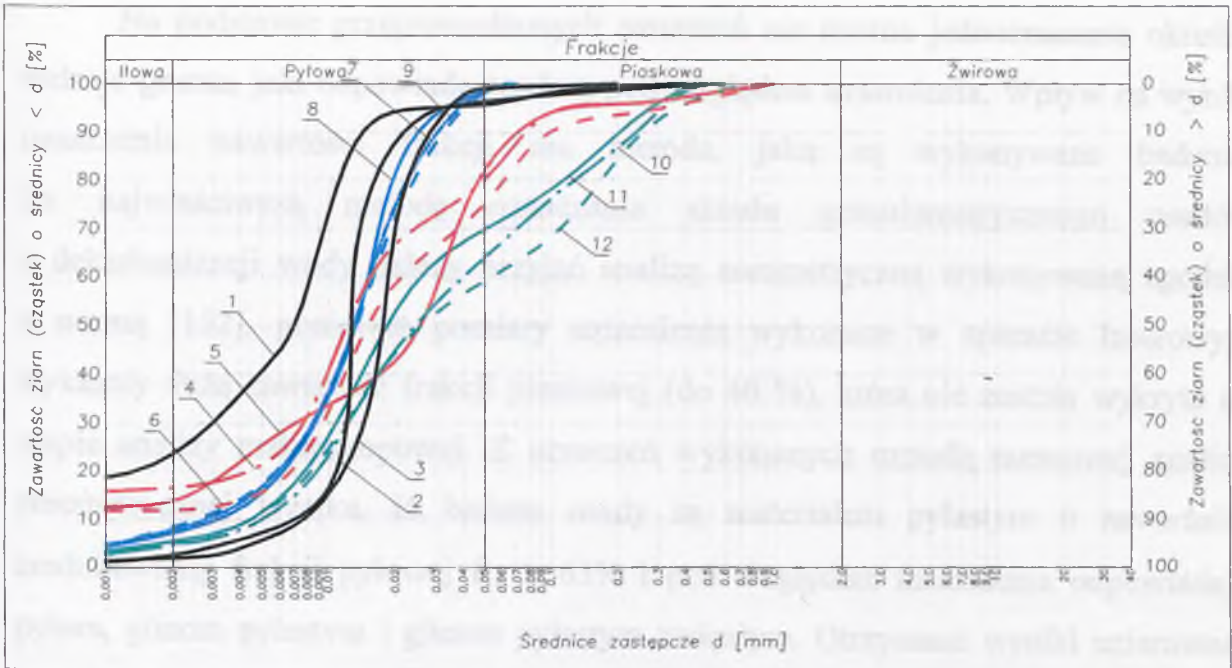
określony na podstawie trójkąta Fereta, średnice miarodajne d_{60} i d_{10} , wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia U przedstawiono w Tabeli 6.2.2. Na podstawie wykonanych badań sporządzono wykresy krzywych uziarnienia (Rys. 6.2.2). Otrzymane zawartości frakcji zredukowanych naniesiono na trójkąt Fereta (Rys.6.2.3).

Tabela 6.2.1. Metody analizy areometrycznej wykorzystane do oznaczenia składu granulometrycznego osadów z dekarbonizacji wody

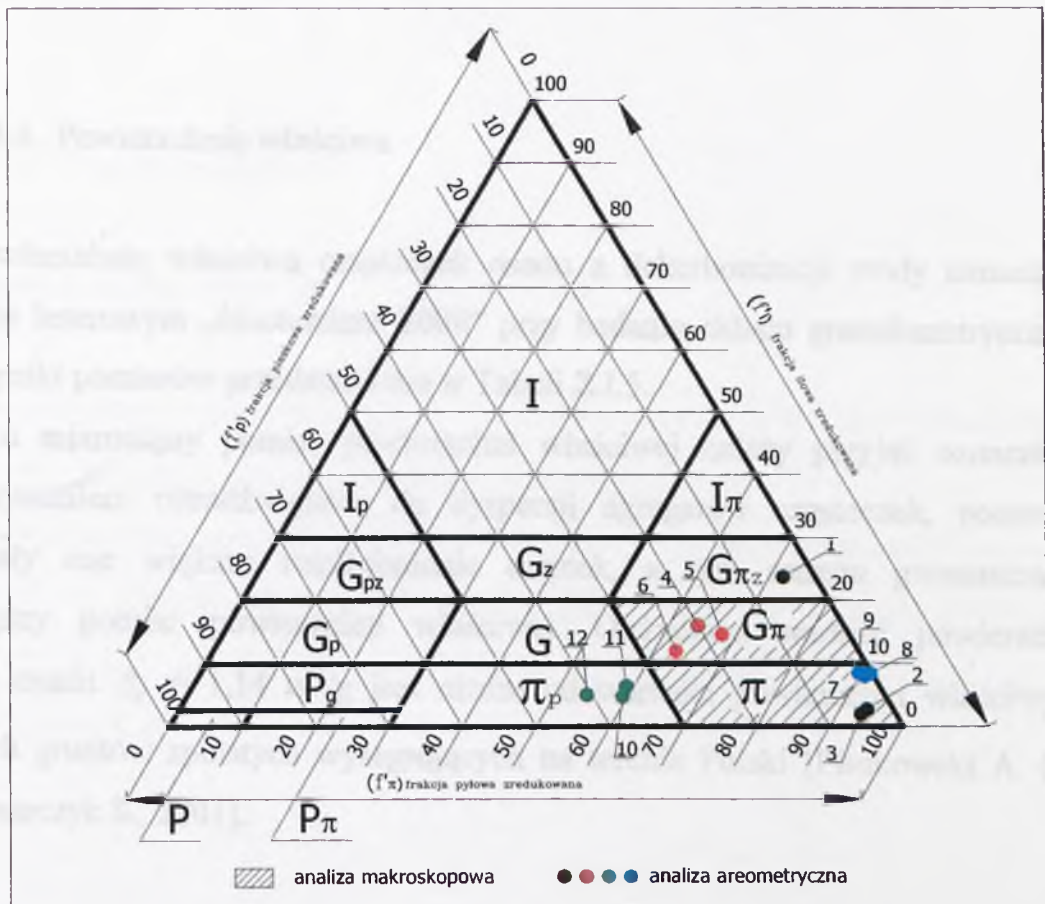
Numer próbki	Metoda badania
1	2
1	Analiza areometryczna zgodnie z normą [152] (stabilizator $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)
2	Analiza areometryczna zgodnie z normą [152] (stabilizator NH_4OH)
3	Analiza areometryczna zgodnie z normą [152] (stabilizator NH_4OH), bez gotowania zawiesiny
4 (M)	Analiza areometryczna zgodnie z normą [152] (stabilizator $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_3\text{PO}_4$)
5 (S)	
6	
7 (M)	Analiza areometryczna w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząstek
8 (S)	
9	
10 (M)	Analiza areometryczna w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” bez użycia ultradźwięków
11 (S)	
12	

Tabela 6.2.2. Wyniki oznaczeń analiz areometrycznych osadów z dekarbonizacji wody

Nr próbki	Zawartość frakcji zredukowanej			Rodzaj gruntu wg trójkąta Fereta	Średnica miarodajna d_{60}	Średnica miarodajna d_{10}	Wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia U	Klasyfikacja ze względu na wskaźnik różnoziarnistości
	iłowej (f_i)	pyłowej (f_π)	piaskowej (f_p)					
-	%	%	%	-	mm	mm	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	23,7	72,0	4,3	glina pylasta zwięzła	0,0083	-	∞	bardzo różnoziarnisty
2	2,7	93,7	3,6	pył	0,014	0,0069	2,03	równozziarnisty
3	2,0	93,0	1,0		0,019	0,0077	2,47	
4 (M)	16,0	64,0	20,0	glina pylasta	0,016	-	∞	bardzo różnoziarnisty
5 (S)	14,0	68,0	18,0		0,032	-	∞	
6	12,0	63,0	22,0		0,021	-	∞	
7 (M)	8,0	90,8	1,2	pył	0,016	0,0028	5,71	różnoziarnisty
8 (S)	7,3	91,3	1,4		0,016	0,0031	5,16	
9	8,5	89,7	1,8		0,0165	0,0026	6,35	
10 (M)	4,7	59,3	36,0	pył piaszczysty	0,04	0,005	8,00	
11 (S)	5,5	59,0	35,5		0,026	0,0045	5,78	
12	5,0	54,3	40,7		0,054	0,0045	12,00	



Rys.6.2.2. Krzywe uziarnienia osadów z dekarbonizacji wody (oznaczenia jak w Tabeli 6.2.1 i 6.2.2)



Rys.6.2.3. Klasyfikacja osadów wg trójkąta Fereta (oznaczenia jak w Tabeli 6.2.1 i 6.2.2) [151]

Na podstawie przeprowadzonych oznaczeń nie można jednoznacznie określić rodzaju gruntu, jaki odpowiada osadom pod względem uziarnienia. Wpływ na wyniki oznaczenia zawartości frakcji ma metoda, jaką są wykonywane badania. Za najwłaściwszą metodę oznaczania składu granulometrycznego osadów z dekarbonizacji wody należy przyjąć analizę areometryczną wykonywaną zgodnie z normą [152], ponieważ pomiary uziarnienia wykonane w aparacie laserowym wykazały dużą zawartość frakcji piaskowej (do 40 %), która nie została wykryta na etapie analizy makroskopowej. Z oznaczeń wykonanych metodą normowej analizy areometrycznej wynika, iż badane osady są materiałem pylastym o zawartości zredukowanej frakcji pyłowej $f_{\pi} > 63\%$ i pod względem uziarnienia odpowiadają pyłom, glinom pylastym i glinom pylastym zwięzłym. Otrzymane wyniki uziarnienia osadów z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów nie odbiegają od składu granulometrycznego przedstawianego w literaturze (Rys.6.1.1 i Tabela 6.1.3).

6.2.4. Powierzchnia właściwa

Powierzchnię właściwą cząsteczek osadu z dekarbonizacji wody oznaczono w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” przy badaniu składu granulometrycznego osadu. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli Z.I.5.

Jako miarodajny pomiar powierzchni właściwej należy przyjąć oznaczenie z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek, ponieważ powodowały one większe rozdrobnienie cząstek, a tym samym gwarantowały dokładniejszy pomiar powierzchni właściwej. Otrzymana wartość powierzchni właściwej osadu $S_v = 1,14 \text{ m}^2/\text{g}$ jest niższa od wartości powierzchni właściwych naturalnych gruntów spoistych występujących na terenie Polski [Piaskowski A. M., 1984], [Pisarczyk S., 2001].

6.2.5. Gęstość właściwa

Badanie gęstości właściwej ρ_s osadów z dekarbonizacji wody wykonano w piknometrze zgodnie z normą [152], w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW (pomiarów 1-5) oraz w Pracowni Gruntoznawczej Zakładu Geografii Fizycznej Uniwersytetu Wrocławskiego (pomiarów 6-8). Opis próbek, na których określano gęstość właściwą wraz z otrzymanymi wynikami oznaczeń przedstawiono w Tabeli Z.I.6. Średnia wartość gęstości właściwej badanych osadów z dekarbonizacji wody wynosi $\rho_s \approx 2,72 \text{ g/cm}^3$.

Gęstość właściwa $\rho_s \approx 2,72 \text{ g/cm}^3$ odpowiada wartości gęstości właściwej gruntów spoistych zawierających dużo węglanu wapnia [Pisarczyk S., Rymśza B., 1993] oraz gęstości właściwej kalcytu [Lambe T. W., Whitman R. V., 1977], [Mizerski W., 1997].

6.2.6. Granice konsystencji

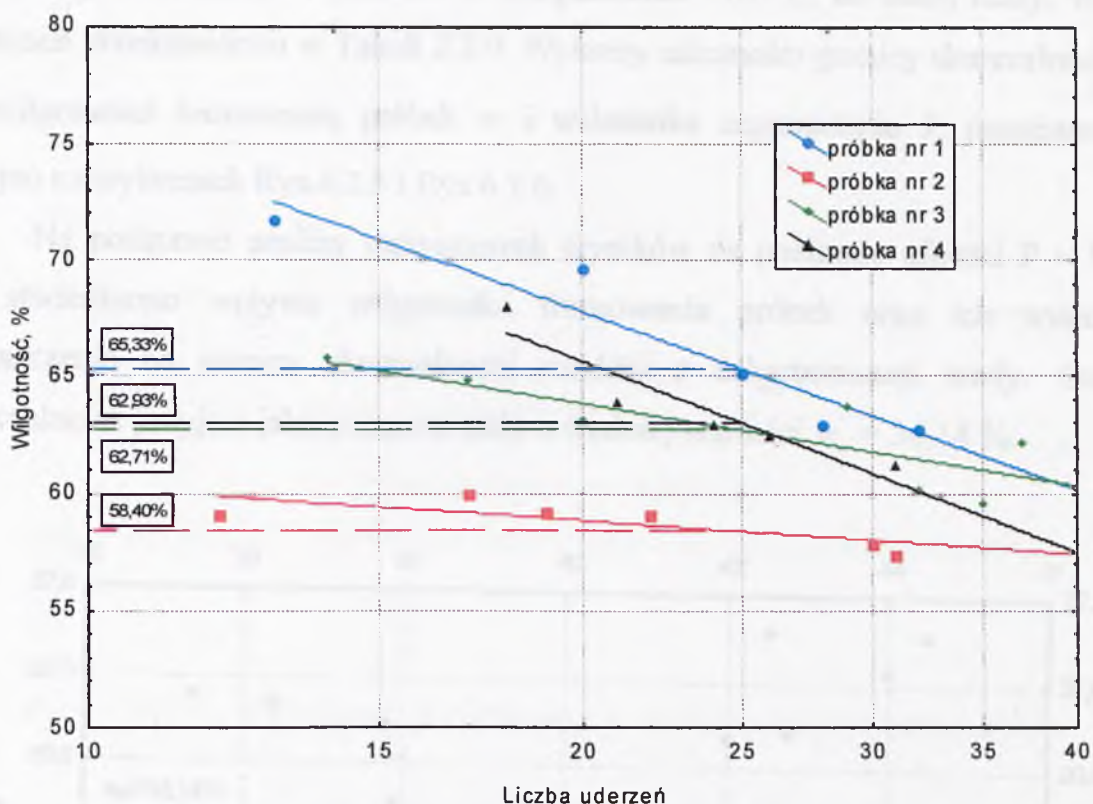
Granica plastyczności

Badanie granicy plastyczności w_p wykonano metodą waleczkowania zgodnie z normą [152]. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli Z.I.7.

Średnia wartość granicy plastyczności osadów z dekarbonizacji wody wyniosła $w_p = 37,27 \%$. Otrzymana wartość granicy plastyczności jest charakterystyczna dla iłów [Pisarczyk S., 2001 i 2004] i nie odbiega od danych przedstawianych w literaturze (p.6.1.4).

Granica płynności

Oznaczenie granicy płynności w_L wykonano metodą Casagrande'a zgodnie z normą [152]. Wyniki oznaczeń zestawiono w Tabeli Z.I.8. i przedstawiono na Rys.6.2.4.



Rys.6.2.4. Oznaczenie granicy płynności w_L

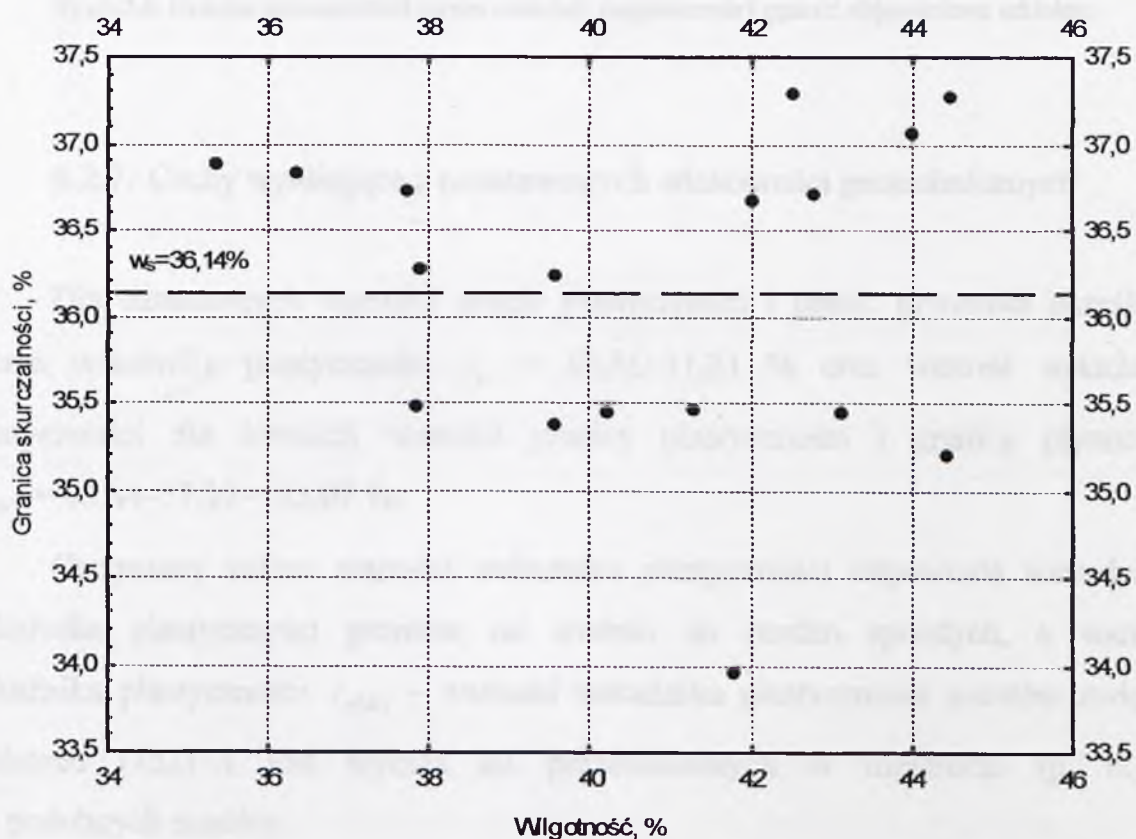
Wartość średnia granicy płynności osadów z dekarbonizacji wody wynosi $w_L = 62,34$ %. Otrzymane wartości granicy płynności odpowiadają granicy płynności ilów [Pisarczyk S., 2001 i 2004] i są nieznacznie wyższe od danych literaturowych (Tabela 6.1.4).

Granica skurczalności próbek zagęszczanych

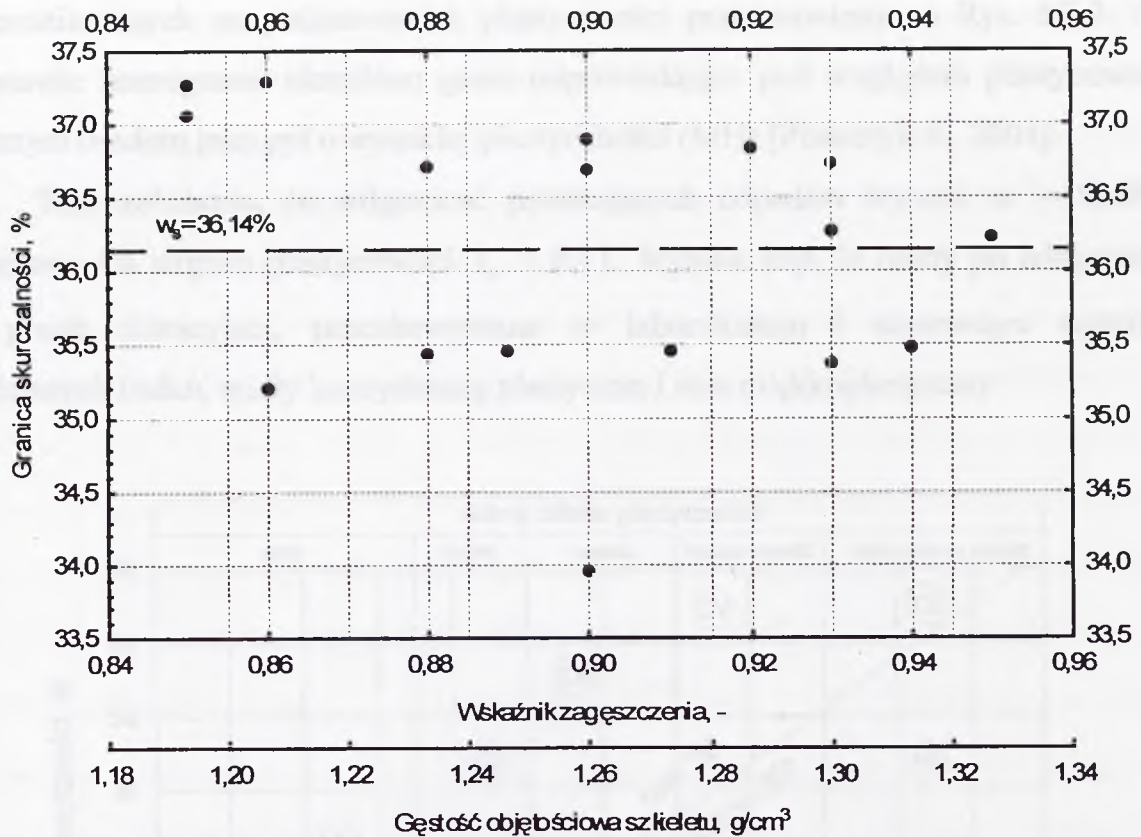
Oznaczenie granicy skurczalności w_s powinno być wykonywane na próbkach o nienaruszonej strukturze. Ponieważ osady z dekarbonizacji wody są materiałem

sztucznie wytworzonym (gruntem antropogenicznym), który będzie wbudowywany w konstrukcję przy określonej wilgotności i zagęszczany do wymaganego wskaźnika zagęszczenia I_s , oznaczenie ich granicy skurczalności wykonano na próbkach sztucznie formowanych, zgodnie z normą [152]. Zagęszczone próbki osadów o znanej objętości i masie poddano powolnemu suszeniu, początkowo w temperaturze pokojowej, a następnie w suszarce w temperaturze $+105^{\circ}\text{C}$, do stałej masy. Wyniki oznaczeń przedstawiono w Tabeli Z.I.9. Wykresy zależności granicy skurczalności w_s od wilgotności formowania próbek w i wskaźnika zagęszczenia I_s przedstawiono kolejno na wykresach Rys.6.2.5 i Rys.6.2.6.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników na poziomie ufności $P = 95\%$ nie stwierdzono wpływu wilgotności formowania próbek oraz ich wskaźnika zagęszczenia na granicę skurczalności osadów z dekarbonizacji wody. Granicę skurczalności przyjęto jako parametr stały o średniej wartości $w_s = 36,14\%$.



Rys.6.2.5. Granica skurczalności versus wilgotność formowania próbek



Rys.6.2.6. Granica skurczalności versus wskaźnik zagęszczenia i gęstość objętościowa szkieletu

6.2.7. Cechy wynikające z podstawowych właściwości geotechnicznych

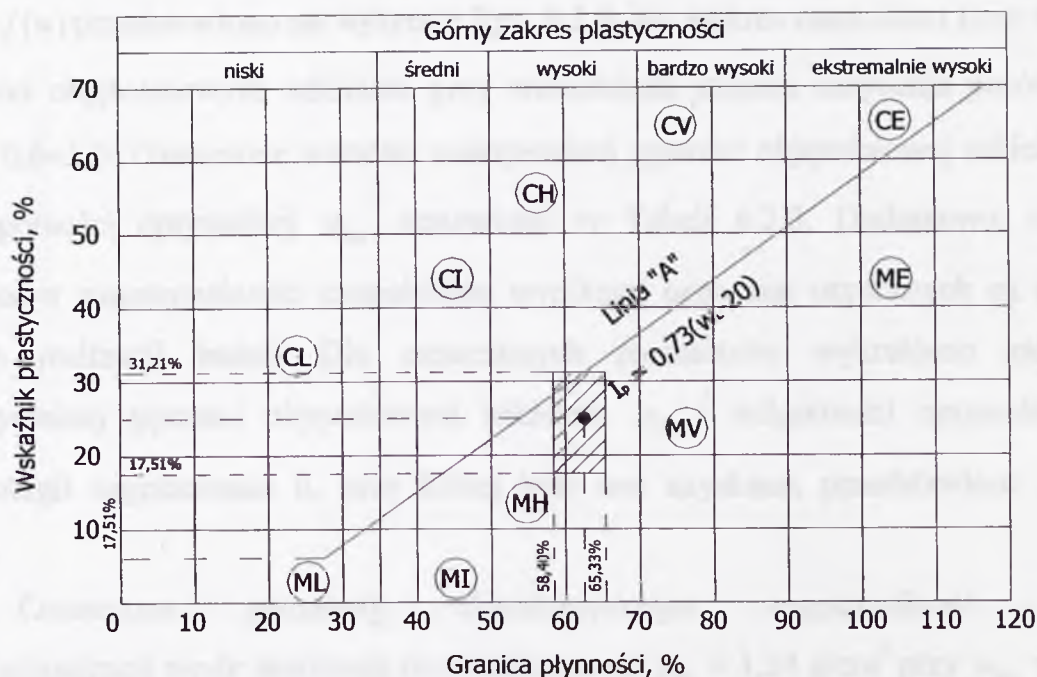
Dla oznaczonych wartości granic plastyczności i granic płynności określono zakres wskaźnika plastyczności $I_p = 17,51 \div 31,21$ % oraz wartość wskaźnika plastyczności dla średnich wartości granicy plastyczności i granicy płynności: $I_{p(sr)} = 62,34 - 37,27 = 25,07$ %.

Otrzymany zakres wartości wskaźnika plastyczności odpowiada wartościom wskaźnika plastyczności gruntów od średnio do bardzo spoistych, a wartość wskaźnika plastyczności $I_{p(sr)}$ - wartości wskaźnika plastyczności gruntów zwięzłych spoistych [152] i jest wyższa od prezentowanych w literaturze (p. 6.1.4) dla podobnych osadów.

Zakresy wartości granicy płynności w_L i wskaźnika plastyczności I_p oraz $I_{p(sr)}$ osadów z dekarbonizacji wody naniesiono na nomogram klasyfikacyjny gruntów

drobnoziarnistych na podstawie ich plastyczności przedstawiony na Rys. 6.2.7. Na podstawie nomogramu określono grunt odpowiadający pod względem plastyczności badanym osadom jako pył o wysokiej plastyczności (MH) [Pisarczyk S., 2004].

Przy założeniu, że wilgotność powstających odpadów wynosi $w > 55,0\%$, określono ich stopień plastyczności $I_L > 0,71$. Wynika stąd, iż osady po odsączeniu na prasie filtracyjnej, przechowywane w laboratorium i stanowiące materiał do dalszych badań, miały konsystencję plastyczną i stan miękkoplastyczny.



Rys.6.2.7. Nomogram klasyfikacyjny gruntów drobnoziarnistych na podstawie ich plastyczności wg ASTM-2487 [Pisarczyk S., 2004]:

CL/CI/CH/CV/CE - ły o niskiej/ średniej/ wysokiej/ bardzo wysokiej/ ekstremalnie wysokiej plastyczności,
ML/MI/MH/MV/ME - pyły o niskiej/ średniej/ wysokiej/ bardzo wysokiej/ ekstremalnie wysokiej plastyczności

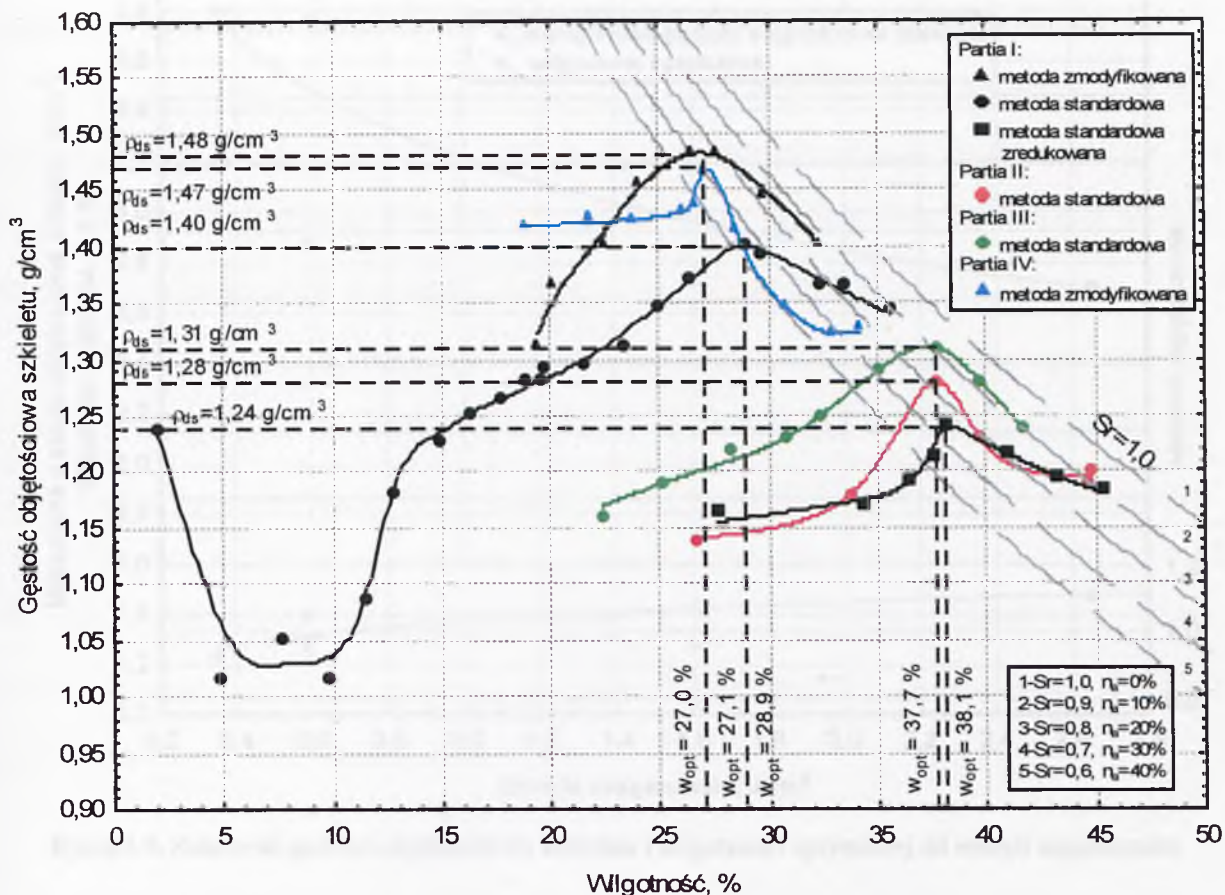
6.2.8. Zagęszczalność

Badanie zagęszczalności osadów z dekarbonizacji wody wykonano w mechanicznym aparacie Proctora typu MP 2a nr 148, metodą standardową, metodą standardową zredukowaną i metodą zmodyfikowaną, zgodnie z normą [152]. Osady wysuszone do stanu powietrznosuchego (metoda standardowa) lub wysuszone

na powietrzu do wilgotności 20÷30 % (metoda standardowa zredukowana i zmodyfikowana) ubijano mechanicznie w małym cylindrze (1,0 dm³) aparatu Proctora, zwiększając ich wilgotność o około 2,0 % przed kolejnym umieszczeniem w cylindrze. Badania wykonano na 3 niezależnych próbkach. Charakterystykę metod zagęszczania przedstawiono w Tabeli Z.I.10.

Wyniki badań zagęszczalności osadów z dekarbonizacji wody zestawiono w tabelach: Tabela Z.I.11 – metoda standardowa, Tabela Z.I.12 - metoda standardowa zredukowana i Tabela Z.I.13 - metoda zmodyfikowana. Otrzymane zależności $\rho_{ds} = f(w)$ przedstawiono na wykresie Rys. 6.2.8. Na wykres naniesiono linie wartości gęstości objętościowych szkieletu przy wartościach stopnia nasycenia porów wodą $S_r = 0,6\div 1,0$. Oznaczone wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu ρ_{ds} i wilgotności optymalnej w_{opt} zestawiono w Tabeli 6.2.3. Dodatkowo, rezultaty pomiarów zagęszczalności uzupełniono wynikami oznaczeń uzyskanych na dalszym etapie realizacji badań. Dla oznaczonych parametrów wykreślono zależności maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu ρ_{ds} i wilgotności optymalnej w_{opt} od energii zagęszczania E , przy której były one uzyskane, przedstawione na Rys. 6.2.9.

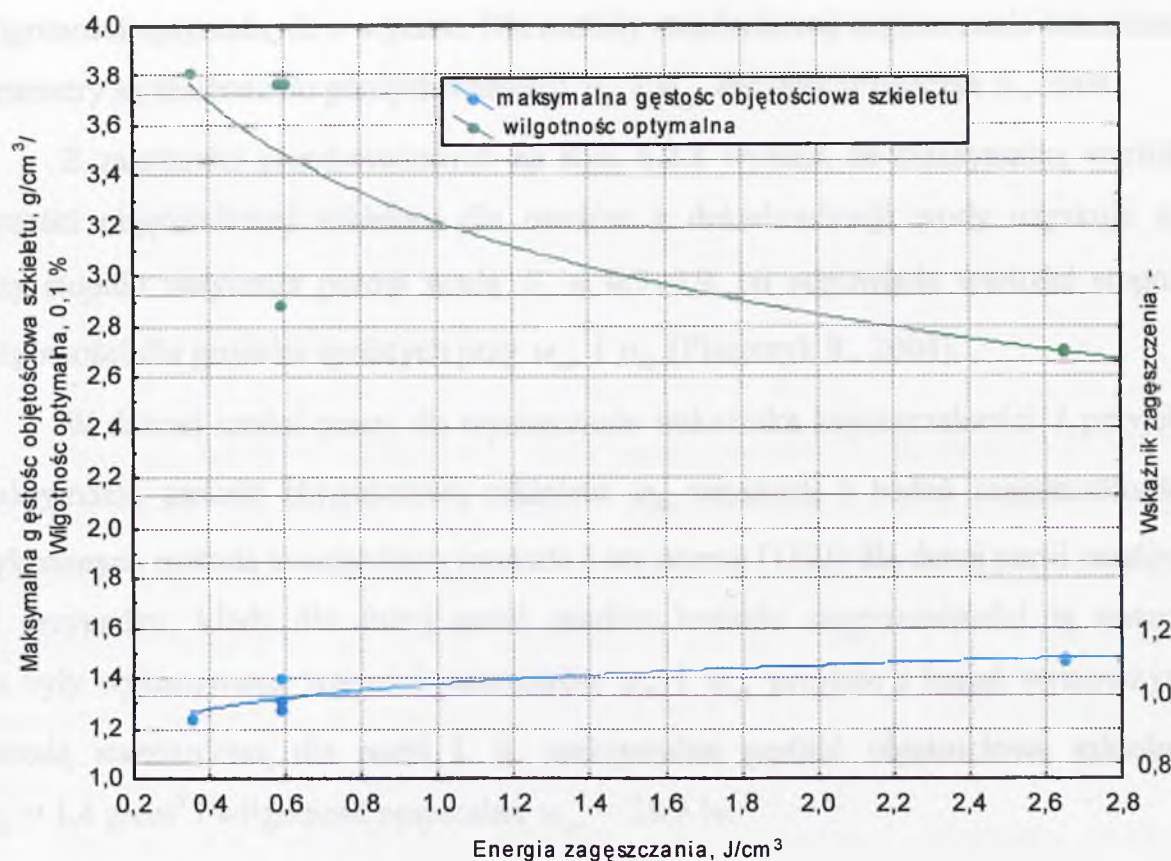
Oznaczone parametry charakteryzujące zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody zawierają się w zakresie od $\rho_{ds} = 1,24 \text{ g/cm}^3$ przy $w_{opt} = 38,1\%$ dla energii zagęszczania $E = 0,35 \text{ J/cm}^3$ do $\rho_{ds} = 1,48 \text{ g/cm}^3$ przy $w_{opt} = 27,0 \%$ dla $E = 2,65 \text{ J/cm}^3$. Z wykonanych badań wynika, że parametry te nie są stałe dla osadów, i przy tej samej energii zagęszczania można uzyskać różne wartości wilgotności optymalnych i maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu, w zależności od partii badanego materiału. Może to świadczyć o niejednorodności osadów i dużej zmienności oznaczanych parametrów. Nie wyklucza się rozdrobnienia materiału przy wielokrotnym zagęszczaniu tej samej próbki. Natomiast kształt krzywej zagęszczalności osadów w pełnym zakresie wilgotności, z wyraźną minimalną wartością gęstości objętościowej przy pewnej wilgotności, wykazuje podobieństwo do zależności jak dla gruntów niespoistych [Pisarczyk S., 2001 i 2004]. W przypadku



Rys. 6.2.8. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody

Tabela 6.2.3. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody - maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds} i wilgotność optymalna w_{opt}

L.p.	Metoda	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu	Wilgotność optymalna	Energia zagęszczania, E	UWAGI	Przyjęte oznaczenie partii osadów
		ρ_{ds} g/cm ³	w_{opt} %	J/cm ³		
1	2	3	4	5	6	7
1	standardowa (metoda I wg [152])	1,40	28,9	0,59	pomiary podstawowe	I
2	standardowa zredukowana	1,24	38,1	0,35		
3	zmodyfikowana (metoda III wg [152])	1,48	27,0	2,65		
4	standardowa (metoda I wg [152])	1,28	37,7	0,59	p.7.2 (wytrzymałość na ścinanie)	II
5		1,31	37,7		p.7.2 (wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie)	III
6	zmodyfikowana (metoda III wg [152])	1,47	27,1	2,65	p.8.4.2 (przepuszczalność hydrauliczna)	IV



Rys.6.2.9. Zależność gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej od energii zagęszczania

badania zagęszczalności dla jednej partii osadów (partia I) na wartość uzyskanych parametrów ma wpływ użyta do zagęszczania energia; ze wzrostem energii zagęszczania maleje wartość w_{opt} (dla metody zmodyfikowanej spadek w_{opt} wynosi 6,6 % w stosunku do w_{opt} z metody standardowej), a rośnie wartość ρ_{ds} (dla metody zmodyfikowanej wzrost ρ_{ds} wynosi 5,7 % w stosunku do ρ_{ds} z metody standardowej), przy czym na poziomie ufności $P = 95 \%$ istotna statystycznie jest tylko korelacja między energią zagęszczania i maksymalną gęstością ($R = 0,88$). Należy zwrócić uwagę, że wzrost ten odpowiada aż 4,5-krotnemu wzrostowi energii zagęszczania. Pod względem zależności wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu od energii zagęszczania osady wykazują podobieństwo do gruntów naturalnych [Blotz L.R., Benson C.H., Boutwell G.P., 1998]. Otrzymane wartości maksymalnych gęstości objętościowych szkieletu są niższe w porównaniu do wartości dla gruntów naturalnych przy danej energii zagęszczania, a wartości

wilgotności optymalnych – wyższe. Dla metody standardowej zagęszczania oznaczone parametry są zbliżone do górnych wartości ρ_{ds} i w_{opt} dla ilów [Pisarczyk S., 2004].

Z zależności przedstawionych na Rys. 6.2.8 wynika, że maksymalną wartość gęstości objętościowej szkieletu dla osadów z dekarbonizacji wody uzyskuje się przy stopniu nasycenia porów wodą $S_r \approx 0,7 \div 0,9$, co odpowiada wartości stopnia wilgotności dla gruntów spoistych przy w_{opt} i ρ_{ds} [Pisarczyk S., 2004].

W dalszej części pracy, do wyznaczania wskaźnika zagęszczalności I_s , przyjęto maksymalną gęstość objętościową szkieletu ρ_{ds} uzyskaną z badań zagęszczalności wykonanych metodą standardową (metoda I wg normy [152]) dla danej partii osadów. W przypadku, kiedy dla danej partii osadów badania zagęszczalności tą metodą nie były wykonywane, wartości parametrów ρ_{ds} i w_{opt} przyjęto z badań wykonanych metodą standardową dla partii I, tj. maksymalną gęstość objętościową szkieletu $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ i wilgotność optymalną $w_{opt} = 28,9 \%$.

7. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZAGĘSZCZONYCH OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

7.1. Przegląd literatury

7.1.1. Wytrzymałość na ścinanie

Dane na temat wytrzymałości na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody spotykane są w nielicznych publikacjach. Przedstawiane w literaturze wartości parametrów kąta tarcia wewnętrznego ϕ i spójności c zależą od metody, jaką były wykonywane badania i wahają się w granicach od $\phi_u = 24,3^\circ$ i $c_u = 164,5$ kPa dla pomiarów w aparacie trójosiowego ściskania do $\phi_s = 64^\circ$ i $c_s = 5$ kPa dla oznaczeń w aparacie skrzynkowym. Dane zestawiono w Tabeli 7.1.1.

Glysson E.A. [1972] na podstawie typu przełomu zniszczenia próbek w badaniach przeprowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania wnioskuje, że osady są dużo mniej plastyczne niż normalnie skonsolidowany il.

Z badań wykonanych przez Baker'a R., Leeuwen'a J. H. i White'a D. J. [2004 i 2005] wynika, że dodatek popiołu lotnego lub cementu portlandzkiego wpływa na polepszenie parametrów wytrzymałościowych osadów (głównie na kąt tarcia wewnętrznego).

7.1.2. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie

Wstępne pomiary wytrzymałości na ściskanie osadów z dekarbonizacji przeprowadzone zostały przez Baker'a R., Leeuwen'a J. H. i White'a D. J. [2004 i 2005]. Badania wykonano na próbkach o średnicy $D = 5,0$ cm i wysokości $H = 5,0$ cm, formowanych przez zagęszczanie 5-krotnym uderzeniem ubijaka o masie 2,27 kg na każdą ze stron próbki. Wilgotność materiału wynosiła 37-40 %. Pomiar

wytrzymałości na ściskanie wykonano po 3 okresach przechowywania próbek i uzyskano następujące wyniki:

- po 1 dniu – 99,8 kPa,
- po 28 dniach – 109,8 kPa,
- po 56 dniach – 117,2 kPa.

Autorzy wnioskują, że czas dojrzewania próbek nie wpływa znacząco na wzrost wytrzymałości na ściskanie osadów z dekarbonizacji wody, a poprawę wytrzymałości na ściskanie można uzyskać przez dodanie do masy osadów cementu lub popiołu lotnego.

7.1.3. Ścisłość i pęcznienie

Z danych literaturowych wynika, iż osady charakteryzują się:

- wskaźnikiem ścisłości $C_c = 0,224 \div 0,399$,
- współczynnikiem konsolidacji $c_v = 1,1 \cdot 10^{-2} \div 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$,
- współczynnikiem ścisłości $a_v = 1,21 \cdot 10^{-4} \div 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ 1/MPa}$,
- współczynnikiem ścisłości objętościowej $m_v = 1,04 \cdot 10^{-4} \div 5,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/MPa}$.

Parametry określające ścisłość osadów z dekarbonizacji wody szczegółowo przedstawiono w Tabeli 7.1.2.

Glysson E.A. [1972] uważa, że osady z dekarbonizacji wody cechują się wysoką ścisłością, która wynika z małego rozmiaru ich cząsteczek, wysokiego początkowego wskaźnika porowatości, wysokiej początkowej wilgotności i dużych zmian wskaźnika porowatości po przyłożeniu obciążenia. Zwraca uwagę, że w takim przypadku, należy spodziewać się znacznych osiadań, jeśli osady zostaną wykorzystane jako materiał zasypowy, jakkolwiek osiadania te pojawią się w stosunkowo krótkim czasie od momentu wbudowania w konstrukcję i przyłożenia obciążenia. Autor twierdzi, że przy właściwym zagęszczeniu osadów przy odpowiedniej wilgotności, osiadania będą niewielkie.

Tabela 7.1.1. Wytrzymałość na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Wilgotność w		Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ		Spójność c		Metoda badania	Liczba pomiarów	Pochodzenie badanych odpadów	UWAGI
		%	w_{opt}	ϕ	ϕ	c	c				
1	2										
1	Glysson E.A. [1972]	21 < w_{opt}	28,6	28,6	159,5			aparatus trójosiowego ściskania – metoda CD ¹	3	USA	zagęszczane mechanicznie (aparatus Proctora), $I_s = 0,9$
2	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004]	31 $\approx w_{opt}$	24,3	24,3	164,5			aparatus bezpośredniego ścinania	3	USA (Iowa)	zagęszczane, wilgotność końcowa $w_k = 60\%$
3	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	37+40 > w_{opt}	64	64	36,8			aparatus bezpośredniego ścinania	3	USA (Iowa)	
4	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005]	37+40 > w_{opt}	39	39	5+13				3	USA (Iowa)	

¹ CD – ścinanie powolne z odpływem (consolidated drained)

Tabela 7.1.2. Ścisłość osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Wskaźnik porowatości e	Nacisk q_n	Wskaźnik ścisłości C_c	Współczynnik konsolidacji c_v	Współczynnik ścisłości α_v	Współczynnik ścisłości objętościowej m_v	Przepuszczalność hydrauliczna k		Liczba próbek	Pochodzenie badanych odpadów	UWAGI
								cm^2/s	$1/MPa$			
1	2											
1	Glysson E.A. [1972]	2,32÷1,54	10÷100	0,280	3·10 ⁻³	-	-		10 ⁻⁷ ÷10 ⁻⁹	1	USA	51 pomiarów e i k
		2,77÷0,92		0,224					1			
2	Raghu D., Hsieh H.-N. [1985]	1,141÷12,59	0÷23,94	0,399	1,1·10 ⁻²	2,36·10 ⁻⁴	1,04·10 ⁻⁴		5,18·10 ⁻⁹	1	USA (New Jersey)	$I_s = 0,9$
		1,01÷1,141	23,94÷47,88			2,8·10 ⁻⁴	1,24·10 ⁻⁴		2,31·10 ⁻⁹			
		0,889÷1,01	47,88÷95,76			1,21 ⁻⁴	5,8·10 ⁻⁵		1,7·10 ⁻¹⁰			
	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yih Ch.-T. [1987]	1,44÷1,27	0÷309,5	-	1,8·10 ⁻³	-	-		7,8·10 ⁻¹⁰	3	USA (New Jersey)	$I_s = 0,9$, 5 pomiarów, nawadniane 7 dni
		1,44÷1,74		-	-	-	-		1,7·10 ⁻⁹ ÷1,2·10 ⁻¹⁰			
3		-	0 ÷ 309,5	-	3,5·10 ⁻³	-	-		1,9·10 ⁻⁹	-		próbki namaczone w odciekach ze składowiska odpadów komunalnych przez 7, 14 i 28 dni

W literaturze brak jest danych dotyczących pęcznienia osadów z dekarbonizacji wody.

7.2. Badania własne

7.2.1. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania

Badania wytrzymałości na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody w aparacie bezpośredniego ścinania typu AB 2a nr 143 wykonano zgodnie z normą [152] w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW. Badania przeprowadzono dla 2 partii odpadów, w 3 seriach badawczych: partia I (seria B-P) i partia II (seria B-U i seria B-S). W celu ustalenia wpływu sposobu formowania próbek oraz wilgotności na parametry wytrzymałościowe osadów, próbki do badań dla każdej z serii formowano przy różnych wilgotnościach, przez zagęszczanie: mechaniczne w cylindrze aparatu Proctora (seria B-P) oraz ręcznym ubijakiem (seria B-U) i statyczne przez ściskanie w ręcznej prasie (seria B-S), bezpośrednio w skrzynce aparatu, wykonując badania dla serii B-U i B-S bezpośrednio jedno po drugim. Charakterystykę badań wytrzymałości na ścinanie wykonanych w aparacie bezpośredniego ścinania oraz sposobu formowania próbek przedstawiono w Tabeli Z.II.1. Próbki ścinano przy naprężeniach normalnych $\sigma = 25, 50, 100, 200$ i 400 kPa, przy prędkości ścinania $0,01$ mm/min., bez przeprowadzenia wstępnej konsolidacji i zalewania ich wodą. W celu określenia odkształcenia jednostkowego ε , przy którym następowało ścięcie materiału, podczas badania notowano wartość przesunięcia skrzynek aparatu względem siebie (ΔL) w chwili osiągnięcia wytrzymałości na ścinanie, w zakresie przemieszczeń $\Delta L = 0,0 \div 9,0$ mm. Po ścięciu próbek określano ich wilgotność pobierając materiał z płaszczyzny ścięcia i wyznaczano wilgotność średnią dla danego oznaczenia jako wartość średnią z 5 pomiarów.

Wyniki oznaczenia parametrów wytrzymałościowych w aparacie bezpośredniego ścinania przedstawiono w Tabeli Z.II.2 dla próbek formowanych mechanicznie przez zagęszczanie w cylindrze aparatu Proctora (partia I, seria B-P),

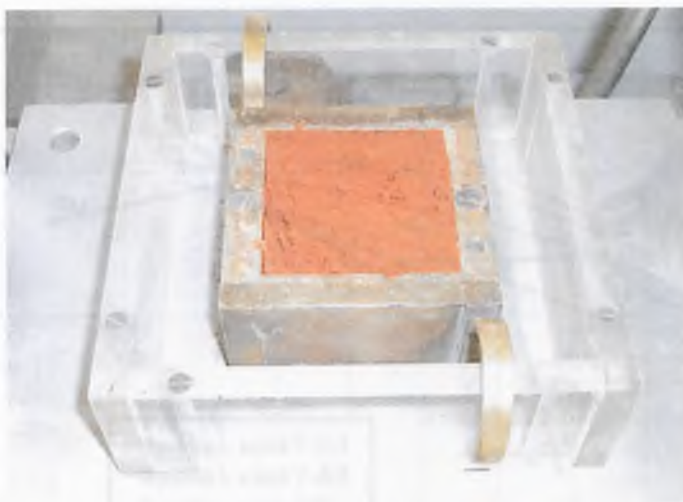
w Tabeli Z.II.3 dla próbek formowanych mechanicznie, przez ubijanie w skrzynce aparatu (partia II, seria B-U) i w Tabeli Z.II.4 dla próbek formowanych statycznie, przez ściskanie w prasie ręcznej, w skrzynce aparatu (partia II, seria B-S). Otrzymane wyniki oznaczeń zinterpretowano graficznie przedstawiając kolejno na wykresach: Rys. Z.II.1 (partia I, seria B-P), Rys. Z.II.2 (partia II, seria B-U) i Rys. Z.II.3 (partia II, seria B-S), wyznaczając parametry wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego ϕ_s i spójność c_s . Oznaczone parametry zestawiono w Tabeli Z.II.5.

Dla poszczególnych serii uzyskano następujące wartości parametrów wytrzymałościowych:

- partia I, seria B-P: $\phi_s=18,86\div 36,12^\circ$ i $c_s=36,81\div 72,02$ kPa w zakresie wilgotności $w=w_{opt}+2,5\%\div w_{opt}+7,0\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s=0,93\div 0,96$,
- partia II, seria B-U: $\phi_s=32,09\div 40,25^\circ$ i $c_s=51,87\div 75,50$ kPa w zakresie wilgotności $w=w_{opt}-12,5\%\div w_{opt}+6,5\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s=0,92\div 1,00$,
- partia II, seria B-S: $\phi_s=33,38\div 42,59^\circ$ i $c_s=48,11\div 68,81$ kPa w zakresie wilgotności $w=w_{opt}-13,0\%\div w_{opt}+5,2\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s=0,92\div 1,01$.

Płaszczyzna ścięcia osadów przy niższych wilgotnościach i niższych naciskach normalnych była chropowata i nierówna, wraz ze wzrostem wilgotności i naprężeń normalnych stawała się co raz bardziej gładka, aż do widocznej wyraźnej płaszczyzny poślizgu przy wilgotnościach $w \geq w_{opt}$. Próbkę osadów (partia II) przy wilgotności $w \approx 42\div 43\%$ po ścięciu przedstawiono na Fot.4.

Dla wykonanych oznaczeń określono zależności kąta tarcia wewnętrznego ϕ_s i spójności c_s od wilgotności w i gęstości objętościowej szkieletu ρ_d , dla każdej z serii, i przedstawiono na zbiorczych wykresach z wynikami pomiarów wykonanych w aparacie trójosiowego ściskania (p.7.2.2), na Rys. 7.2.1 dla ϕ_s i na Rys. 7.2.2 dla c_s . Zależność wytrzymałości na ścinanie od odkształceń względnych, przy których wystąpiło ścięcie próbki, przedstawiono na Rys. Z.II.4.

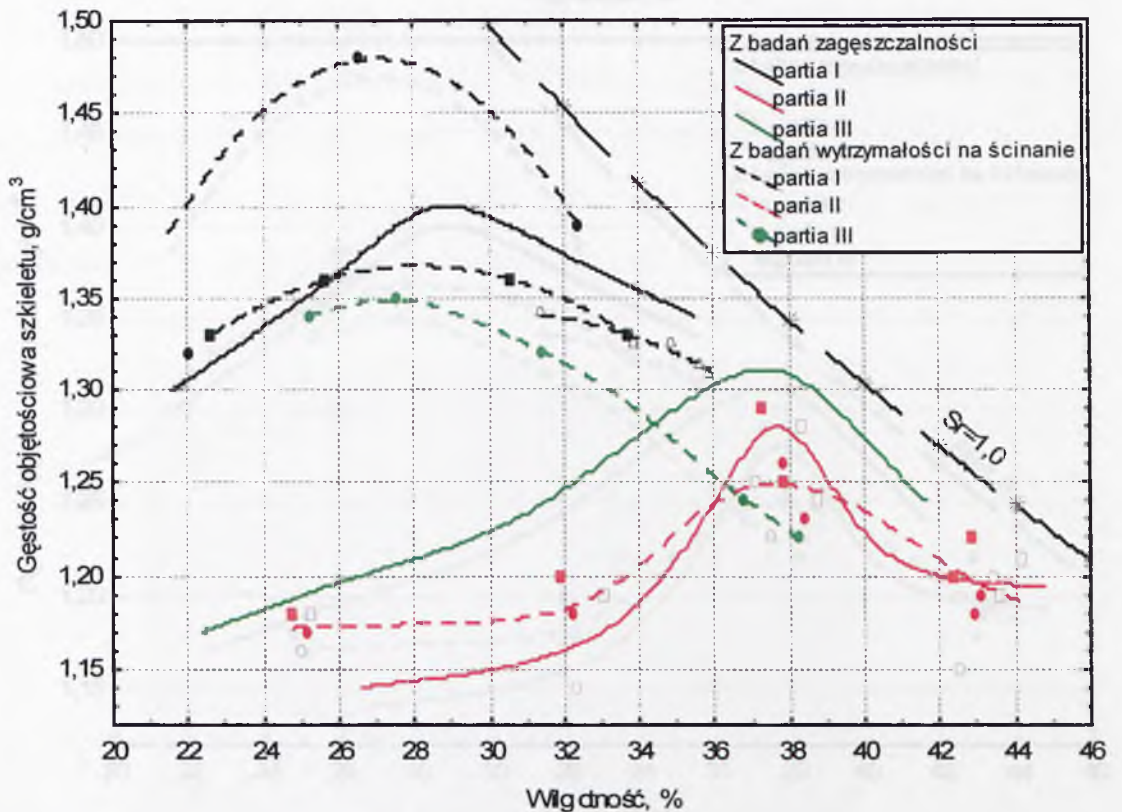
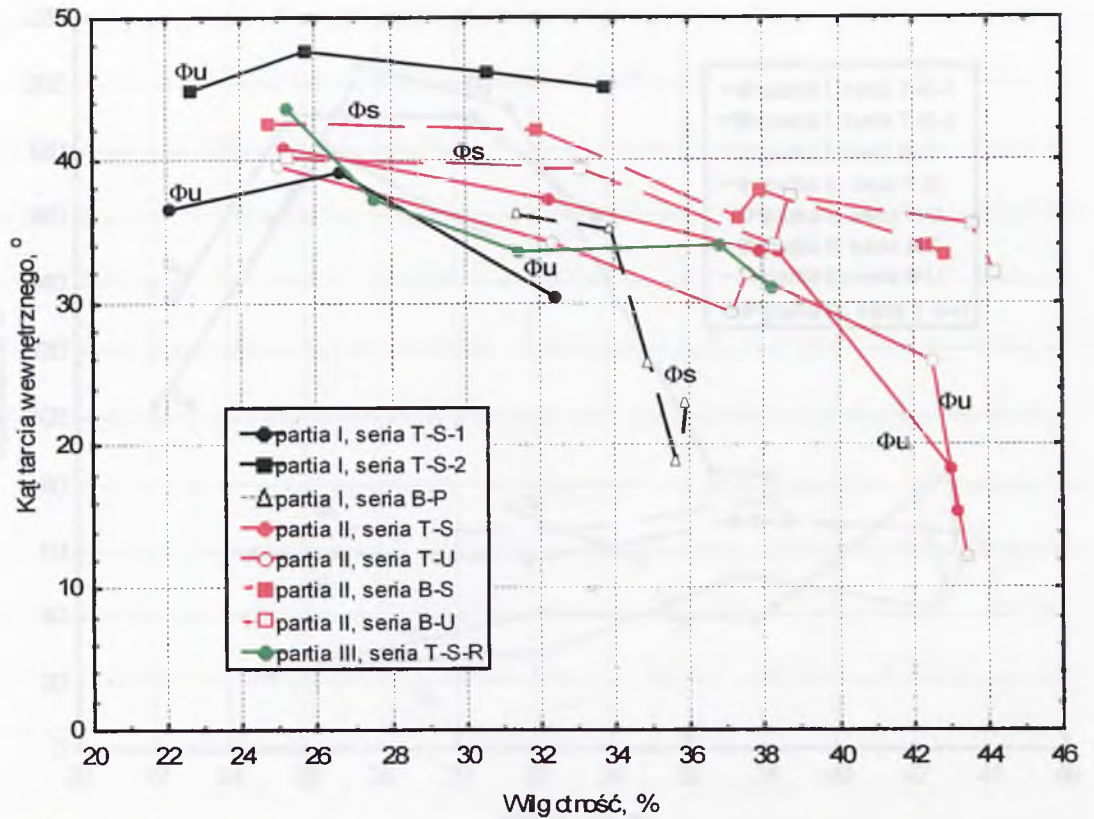


Fot. 4. Próbkę osadów po ścięciu w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, wilgotność $w = 42 \div 43 \%$

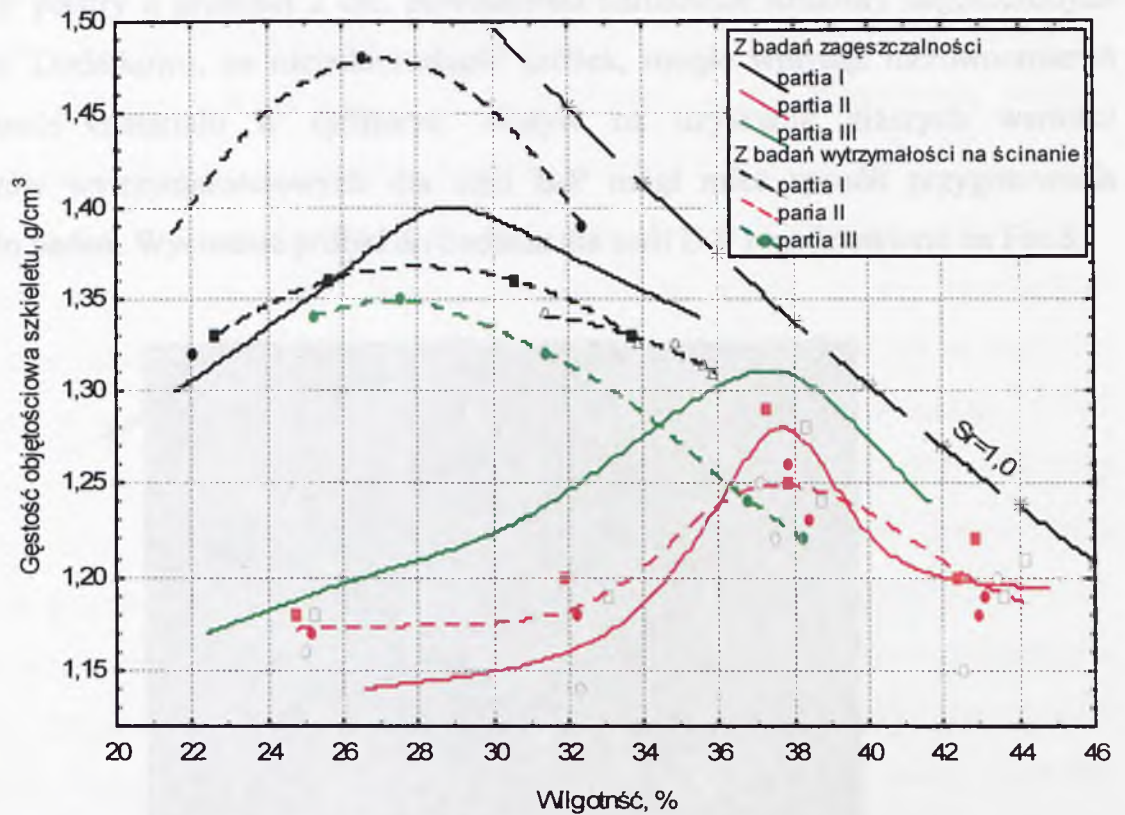
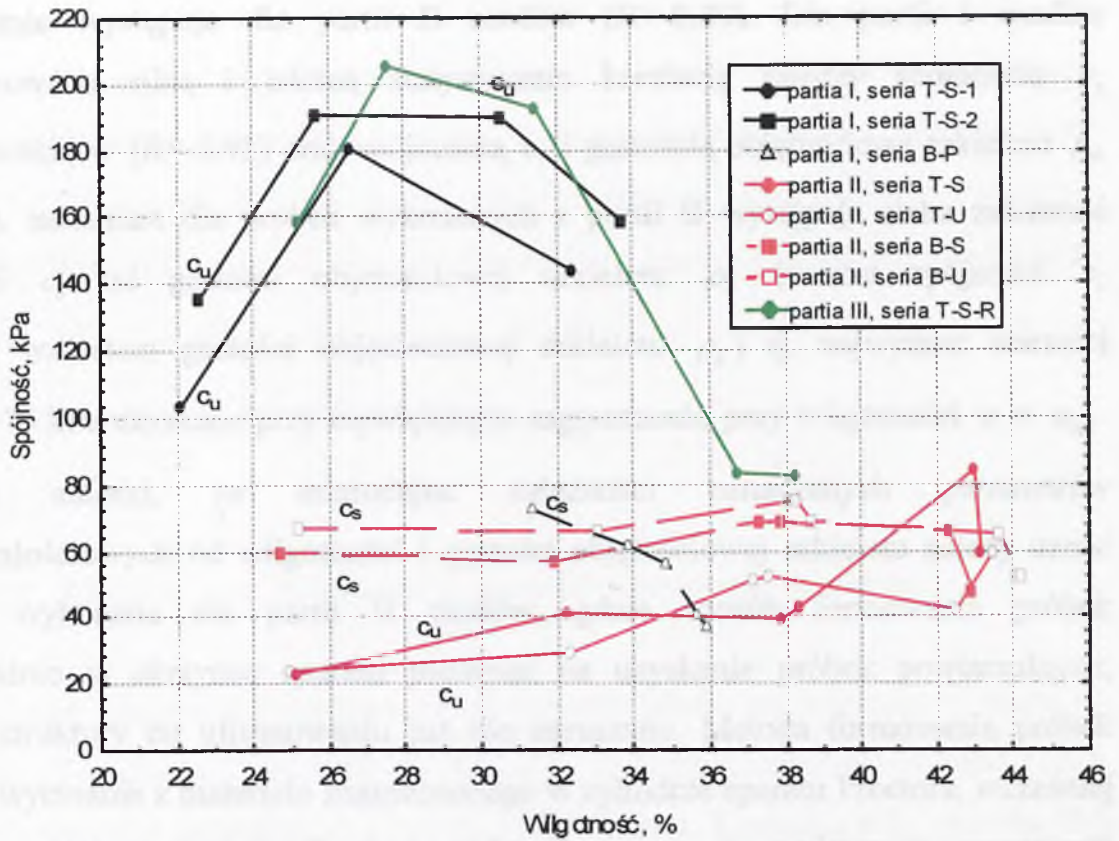
Dla wykonanych pomiarów przeprowadzono szczegółową analizę otrzymanych wyników i ich niepewności pomiarowych oraz analizę uzyskanych zależności i ich różnic dla poszczególnych serii badawczych, pod względem istotności statystycznej na poziomie ufności $P = 95 \%$.

Z przeprowadzonych badań wytrzymałości na ścinanie dla 2 różnych partii materiału wynika, że wytrzymałość na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody maleje wraz ze wzrostem wilgotności. Maksymalne wartości wytrzymałości na ścinanie $\tau_f \approx 400$ kPa uzyskano przy wilgotnościach $w \approx 25 \div 33 \%$ i naprężeniach normalnych $\sigma = 400$ kPa. Szczegółowa analiza wyników wykazała, że różnice w wartościach parametrów wytrzymałościowych uzyskanych dla partii II osadów dla próbek formowanych bezpośrednio w skrzynce aparatu przez ściskanie i ubijanie, nie są istotne statystycznie. Metoda formowania próbek bezpośrednio w skrzynce aparatu bezpośredniego ścinania nie wpływa na wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ_s i spójności c_s , charakteryzujące daną partię osadu.

Na podstawie uzyskanych zależności można stwierdzić, że na kąt tarcia wewnętrznego ϕ_s wpływa głównie wilgotność w . Oznaczone wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ_s maleją wraz ze wzrostem wilgotności. Silna zależność, istotna

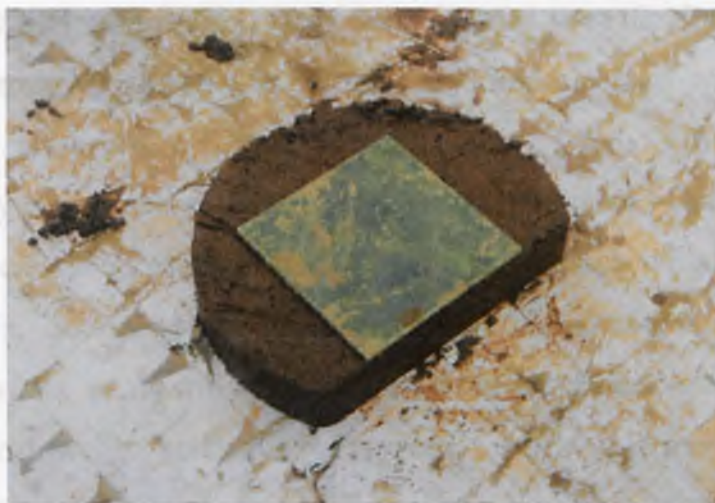


Rys. 7.2.1. Zależność kąta tarcia wewnętrznego oznaczonego w aparacie bezpośredniego ścinania i aparacie trójosiowego ściskania od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)



Rys. 7.2.2. Zależność spójności oznaczonej w aparacie bezpośredniego ścinania i aparacie trójosiowego ściskania od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)

statystycznie występuje dla partii II osadów ($R=-0,89$). Dla partii I osadów zaobserwowano silną i istotną statystycznie korelację między spójnością c_s i wilgotnością w ($R=-0,93$) oraz spójnością c_s i gęstością objętościową szkieletu ρ_d ($R=0,91$), natomiast dla próbek wykonanych z partii II występuje słaba zależność spójności c_s od gęstości objętościowej szkieletu ρ_d (wzrost spójności c_s wraz ze wzrostem gęstości objętościowej szkieletu ρ_d) tj. najwyższe wartości $c_s \approx 68 \div 75$ kPa uzyskano przy największym zagęszczeniu przy wilgotności $w \approx w_{opt}$. Zdaniem autorki, za miarodajne zależności oznaczanych parametrów wytrzymałościowych od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu należy uznać badania wykonane dla partii II osadów, gdzie sposób formowania próbek bezpośrednio w skrzynce aparatu pozwalał na uzyskanie próbek powtarzalnych, których struktury po uformowaniu już nie naruszano. Metoda formowania próbek poprzez wycinanie z materiału zagęszczonego w cylindrze aparatu Proctora, wcześniej ciętego w plastry o grubości 2 cm, powodowała naruszenie struktury zagęszczonych odpadów. Dodatkowo, na niejednorodność próbek, mogło wpłynąć nierównomierne zagęszczenie materiału w cylindrze. Wpływ na uzyskanie niższych wartości parametrów wytrzymałościowych dla serii B-P mógł mieć sposób przygotowania próbek do badań. Wycinanie próbki do badania dla serii B-P przedstawiono na Fot.5.



Fot. 5. Wycinanie próbek do badań w aparacie bezpośredniego ścinania – partia I, seria B-P

Zależność wytrzymałości na ścinanie od odkształceń względnych, przy których wystąpiło ścięcie próbki wskazuje, że osady z dekarbonizacji wody osiągają wytrzymałość na ścinanie (maksymalny opór ścinania) przy odkształceniach względnych $\varepsilon = 1,67 \div 15,0\%$, przy czym mniejsze odkształcenia występują przy niższej wartości wytrzymałości na ścinanie τ_f (przy mniejszych naprężeniach normalnych σ), a większe odkształcenia głównie przy wyższych wartościach τ_f (przy większych naprężeniach normalnych σ).

7.2.2. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania

Badanie właściwości mechanicznych (wytrzymałości na ścinanie) w aparacie trójosiowego ściskania typu AT 2 nr 147 wykonano zgodnie normą [152] w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW, metodą UU – szybkiego ścinania, bez konsolidacji i bez odpływu. Na podstawie badań określono parametry wytrzymałościowe według kryterium Treski (ϕ_T, c_T), a następnie, według teorii Coulomba–Mohra, wyznaczono wartości pozorne (ϕ_u, c_u) [Pisarczyk S., Rymsza B. 1993]. W celu uformowania próbek do badań, do porcji osadów wysuszonych do stanu powietrznosuchego dodano odpowiednie ilości wody, wymagane do uzyskania założonej wilgotności. Następnie materiał pozostawiono na co najmniej 24 godziny w szczelnym zamknięciu, w celu wyrównania jego wilgotności. Próbki formowano przez ściskanie w prasie ręcznej (serie: T-S-1, T-S-2, T-S i T-S-R) i ubijanie ręcznym ubijakiem (seria T-U) w specjalnej formie pozwalającej na uzyskanie próbek powtarzalnych, dodatkowo przy różnych wilgotnościach dla obu metod formowania, co pozwoliło jednocześnie na określenie wpływu wilgotności i metody formowania na wartości parametrów wytrzymałościowych oznaczanych w aparacie trójosiowego ściskania. Przyrząd, o dwudzielnej tulei, pozwalał na formowanie próbek o średnicy $D = 3,72$ cm i wysokości co najmniej $H = 7,96$ cm. Oznaczenia wykonano dla 3 partii odpadów, w 4 seriach: partia I (seria T-S-1 i T-S-2), partia II (seria T-S i T-U) i partia III (seria T-S-R), przygotowanej do badań

wytrzymałości na rozciąganie. Charakterystykę badań wytrzymałości na ścinanie wykonanych w aparacie trójosiowego ściskania przedstawiono w Tabeli Z.II.6.

Próbki po uformowaniu umieszczono w foliowych woreczkach i przechowywano w szczelnym pojemniku zabezpieczającym przed wysychaniem.

Badania wykonano dla:

- partii I, serii T-S-1 po 6 dobach przechowywania,
- partii I, serii T-S-2 po 1 dobie przechowywania,
- partii II, serii T-S i T-U po około 2 godzinach od momentu uformowania próbek,
- partii III, serii T-S-R po 4 dobach przechowywania.

Przed wykonaniem badania zmierzono średnicę i wysokość każdej próbki oraz oznaczono ich masy. W każdej z serii badań, w komorze aparatu trójosiowego ściskania ścinano po 4 próbki, przy następujących wartościach ciśnienia bocznego: $\sigma_3 = 25, 50, 100$ i 200 kPa, przy prędkości ścinania 10 mm/min. Po wykonaniu badania oznaczono wilgotność materiału (wartość średnia z 4 pomiarów), pobierając próbki do jej oznaczenia z powierzchni ścięcia.

Wyniki oznaczenia parametrów wytrzymałościowych w aparacie trójosiowego ściskania przedstawiono w Tabeli Z.II.7 dla próbek formowanych statycznie, przez ściskanie w formie (partia I, seria T-S-1), w Tabeli Z.II.8 dla próbek formowanych statycznie, przez ściskanie w formie (partia I, seria T-S-2), w Tabeli Z.II.9 dla próbek formowanych statycznie, przez ściskanie w formie (partia II, seria T-S), w Tabeli Z.II.10 dla próbek formowanych mechanicznie, przez ubijanie w formie (partia II, seria T-U) i Tabeli Z.II.11 dla próbek formowanych statycznie, przez ściskanie w formie (seria T-S-R).

Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono interpretację graficzną stanu naprężenia przy ścinaniu według kryterium Treski (Rys. Z.II.5-9) oraz według teorii Coulomba-Mohra (Rys.Z.II.10-34), wyznaczono parametry wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego ϕ_T i spójność c_T wg kryterium Treski, a następnie na ich podstawie parametry wytrzymałościowe wg kryterium Coulomba-Mohra ϕ_u i c_u . Wyniki oznaczeń przedstawiono w Tabeli Z.II.12.

Dla poszczególnych serii uzyskano następujące wartości parametrów wytrzymałościowych:

- partia I, seria T-S-1: $\phi_u = 30,41 \div 39,05^\circ$ i $c_u = 103,29 \div 143,98$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 6,8\% \div w_{opt} + 3,5\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,94 \div 1,06$,
- partia I, seria T-S-2: $\phi_u = 44,78 \div 47,57^\circ$ i $c_u = 135,25 \div 190,67$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 6,3\% \div w_{opt} + 4,8\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,88 \div 0,96$,
- partia II, seria T-S: $\phi_u = 15,31 \div 40,72^\circ$ i $c_u = 22,92 \div 84,20$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,6\% \div w_{opt} + 5,5\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,91 \div 0,98$,
- partia II, seria T-U: $\phi_u = 12,19 \div 39,57^\circ$ i $c_u = 24,31 \div 60,04$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,7\% \div w_{opt} + 5,8\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,89 \div 0,98$,
- partia III, seria T-S-R: $\phi_u = 31,07 \div 43,62^\circ$ i $c_u = 82,38 \div 205,42$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,5\% \div w_{opt} + 0,6\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93 \div 1,03$.

Podczas ścinania próbki odkształcały się beczułkowato, często bez wyraźnej płaszczyzny ścięcia. Przesunięcie części próbki względem siebie, po widocznej płaszczyźnie ścięcia, występowało dopiero przy większych wilgotnościach i wyższych naciskach bocznych (200 kPa). Próbki po ścięciu w aparacie trójosiowego ściskania przy różnych naprężeniach bocznych σ_3 przedstawiono na Fot. 6 i Fot. 7.

Zależność kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u i spójności c_u od wilgotności w i gęstości objętościowej szkieletu ρ_d , dla każdej z serii, przedstawiono na zbiorczych wykresach: Rys. 7.2.1 dla ϕ_u i na Rys. 7.2.2 dla c_u .

Dla wykonanych pomiarów przeprowadzono szczegółową analizę otrzymanych wyników i ich niepewności pomiarowych, analizę uzyskanych zależności kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u i spójności c_u od wilgotności w i gęstości objętościowej szkieletu



Fot. 6. Próbkę osadów po ścięciu w aparacie trójosiowego ściskania: partia II, $w=42,98\%$, $\sigma_3=50$ kPa



Fot. 7. Próbkę osadów po ścięciu w aparacie trójosiowego ściskania: partia I, $w=33,73\%$, $\sigma_3=200$ kPa

ρ_d oraz ich różnic dla poszczególnych serii badawczych, pod względem istotności statystycznej na poziomie ufności $P = 95\%$.

Z przeprowadzonych oznaczeń wytrzymałości na ścinanie τ_f w aparacie trójosiowego ściskania wynika, że wartość maksymalnej wytrzymałości na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody zależy od partii badanego materiału. Najwyższą wytrzymałość na ścinanie $\tau_f \approx 1000 \div 1100$ kPa uzyskano dla partii I osadów przy $\sigma \approx 1300$ kPa w zakresie wilgotności $w \approx 26 \div 28\%$. Dla partii II osadów, dla której próbki formowane były 2 metodami: seria T-U i T-S nie stwierdzono wpływu metody formowania próbek na kąt tarcia wewnętrznego ϕ_u i spójność c_u oznaczane w aparacie trójosiowego ściskania.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników stwierdzono ogólną zależność kąta tarcia wewnętrznego ϕ_u od wilgotności w dla osadów z dekarbonizacji wody: silne, istotne statystycznie korelacje zaobserwowano dla partii II ($R=-0,86$) i partii III ($R=-0,88$). Dla II partii osadów przy około 2-krotnym wzroście wilgotności

z $w \approx 25\%$ do $w \approx 43\%$ uzyskano zmniejszenie wartości kąta tarcia wewnętrznego z $\phi_u \approx 40\div 41^\circ$ do $\phi_u \approx 12\div 26^\circ$, tj. średnio o około 50%. Natomiast dla spójności c_u występuje słaba zależność od gęstości objętościowej szkieletu ρ_d i brak jest zależności od wilgotności w . Dla spójności c_u uzyskano bardzo duże zróżnicowanie wartości, nawet 10-krotne, od $c_u \approx 20$ kPa ($w \approx 25\%$, $\rho_d \approx 1,16\div 1,17$ g/cm³) dla partii II do $c_u \approx 205$ kPa ($w \approx 27,5\%$, $\rho_d \approx 1,35$ g/cm³) dla partii III.

7.2.3. Porównanie wyników badań wytrzymałości na ścinanie

Dla badań wytrzymałości na ścinanie wykonanych dla partii II osadów 2 metodami: w aparacie bezpośredniego ścinania i aparacie trójosiowego ściskania wykonano analizę porównawczą oznaczonych parametrów ϕ i c . Na jej podstawie stwierdzono, że różnice wartości poszczególnych parametrów badanych przy danych wilgotnościach i gęstościach objętościowych są istotne statystycznie przy założonym poziomie ufności $P = 95\%$. Wartości oznaczanych parametrów wytrzymałościowych osadów z dekarbonizacji wody zależą od metody wykonywania badania. Dla partii II osadów z badań przeprowadzonych w aparacie trójosiowego ściskania uzyskano niższe wartości spójności o około 60% ($w \approx 25\%$, $\rho_d \approx 1,16\div 1,17$ g/cm³) i kąta tarcia wewnętrznego do około 65% ($w \approx 43\%$, $\rho_d \approx 1,15\div 1,22$ g/cm³), w stosunku do wyników oznaczeń wykonanych w aparacie bezpośredniego ścinania.

Z przeprowadzonych badań wynika, że oznaczane wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności osadów z dekarbonizacji wody zależą od metody, jaką są wykonywane badania oraz od partii badanych osadów. Osady z dekarbonizacji wody, pod względem parametrów wytrzymałościowych są materiałem niejednorodnym. Analizując wszystkie wykonane oznaczenia wytrzymałości na ścinanie osadów należy stwierdzić, że większy rozrzut wartości spójności uzyskano z badań w aparacie trójosiowego ściskania $c_u = 22,92\div 205,42$ kPa niż w aparacie bezpośredniego ścinania $c_s = 36,81\div 72,20$ kPa. W przypadku kąta tarcia wewnętrznego zakresy otrzymanych

wartości z badań wykonanych w obu aparatach są porównywalne $\phi_u \approx \phi_s \approx 12 \div 47^\circ$. Niezależnie od metody, jaką są wykonywane badania, dla osadów z dekarbonizacji wody występuje silna korelacja ujemna pomiędzy kątem tarcia wewnętrznego i wilgotnością oraz słaba dodatnia korelacja między spójnością i gęstością objętościową szkieletu.

Porównując uzyskane z badań zależności korelacyjne do zależności parametrów wytrzymałościowych ϕ_u i c_u od wilgotności, charakterystycznych dla gruntów spoistych, nie można jednoznacznie stwierdzić, że maksymalną wartość spójności osadów uzyskuje się przy maksymalnym zagęszczeniu (przy ρ_{ds}). Charakter zależności kąta tarcia wewnętrznego osadów od wilgotności odpowiada zależności dla gruntów spoistych: kąt tarcia wewnętrznego maleje wraz ze wzrostem wilgotności, niezależnie od faktu, iż przy wilgotnościach $w \leq w_{opt}$ wzrasta gęstość objętościowa szkieletu [Cokca E., Erol O., Armangil F., 2004], [Pisarczyk S., 2004], [Wiłun Z., 2003].

Uzyskane wartości spójności z badań w aparacie bezpośredniego ścinania osiągają wartości nieznacznie wyższe od spójności gruntów mineralnych bardzo spoistych w stanie twardoplastycznym, w przypadku badań w aparacie trójosiowego ściskania uzyskano wartości spójności kilkukrotnie większe od spójności charakterystycznych dla gruntów bardzo spoistych. Otrzymane wartości kąta tarcia wewnętrznego, niezależnie od metody badania, mogą być wyższe od wartości dla gruntów mało spoistych w stanie twardoplastycznym, a w przypadku badań w aparacie trójosiowego ściskania, nawet nieznacznie większe od ϕ zagęszczonych żwirów i pospółek [Wiłun Z., 2003].

Oznaczone wartości kąta tarcia wewnętrznego są zbieżne z danymi przedstawianymi dla osadów z dekarbonizacji w literaturze (Tabela 7.1.1).

Do oznaczeń wytrzymałości na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody zaleca się wykonywanie badań w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach formowanych statycznie lub dynamicznie, bezpośrednio w skrzynce aparatu bezpośredniego ścinania. Taki sposób formowania próbek umożliwi wykonanie oznaczeń na próbkach powtarzalnych, których struktura po uformowaniu nie jest

już naruszana. Metoda badania kąta tarcia wewnętrznego i spójności w aparacie bezpośredniego ścinania pozwala na szybkie wykonanie oznaczeń i uzyskanie niższych wartości badanych parametrów, a więc korzystniejszych dla bezpieczeństwa konstrukcji.

W celu opracowania nomogramu do wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego i spójności do celów projektowych przeprowadzono analizę zmienności tych parametrów w zależności od zmian wilgotności i gęstości objętościowej, przyjmując liniowy charakter zależności. Ze względu na większą jednorodność wyników oznaczeń uzyskanych z badań w aparacie bezpośredniego ścinania, do analizy przyjęto wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności oznaczone z badań w aparacie skrzynekowym dla partii II osadów (seria B-U i B-S). Zależność $c_s = f(w, \rho_d)$ przedstawiono na Rys. Z.II.35, a zależność $\phi_s = f(w, \rho_d)$ na Rys. Z.II.36.

7.2.4. Wytrzymałość na ściskanie

Badania wytrzymałości na ściskanie osadów z dekarbonizacji wody R_c wykonano w warunkach swobodnego bocznego rozszerzania się próbek, przy założeniu jednorodnego stanu naprężenia [Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M., 1977]. Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe określono dla partii III osadów, przy różnych wilgotnościach: dla próbek walcowych formowanych przez ściskanie w 2 rodzajach form cylindrycznych - seria C-S-1 (R_{c1}) i seria C-S-2 (R_{c2}) oraz na połówkach beleczek pozostałych po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (p.2.7.5) - seria C-S-G (R_{cg}). Przed uformowaniem próbek materiał rozdrobniono, wysuszono do stanu powietrznosuchego, podzielono na porcje, a następnie do każdej z nich dodano odpowiednie ilości wody, wymagane do uzyskania założonej wilgotności. Tak przygotowane porcje osadów pozostawiono na co najmniej 24 godziny w szczelnym zamknięciu, w celu wyrównania ich wilgotności przed przystąpieniem do formowania próbek. Charakterystykę

wykonanych badań wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe przedstawiono w Tabeli Z.II.13.

Próbki po uformowaniu (seria C-S-1 i C-S-2) lub po wykonaniu badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (C-S-G), umieszczono w foliowych woreczkach i przechowywano w szczelnym pojemniku, zabezpieczając je przed wysychaniem. Badania wykonano dla:

- serii C-S-1 po 1-2 dób przechowywania,
- serii C-S-2 po 4 dobach przechowywania,
- serii C-S-G po kilku godzinach od momentu uformowania.

Przed wykonaniem badania na próbkach cylindrycznych, dla każdej z próbek zmierzono średnicę i wysokość oraz określono jej masę. Dla serii C-S-1, przy każdej z wilgotności ściśnięto po 4 próbki, natomiast dla serii C-S-2 – po 2 próbki. Wszystkie próbki ściskano w specjalnie do tego celu przygotowanym aparacie trójosiowego ściskania, ręcznie zadając obciążenie. Po wykonaniu badania oznaczono wilgotność osadów, pobierając materiał, który wykruszył się podczas ściskania ze środkowej części próbki, przyjmując wilgotność oznaczenia jako wartość średnią z 4 (C-S-1) i 2 (C-S-2) pomiarów. Dodatkowo podczas badania rejestrowano zmianę wysokości próbki (ΔL) w czasie przyrostu naprężenia, aż do momentu osiągnięcia przez materiał wytrzymałości na ściskanie, w celu określenia odkształcenia jednostkowego ε odpowiadającego zniszczeniu próbki oraz określeniu charakteru zniszczenia materiału na podstawie zależności „naprężenie-odkształcenie”.

Dla próbek z serii C-S-G badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano na połówkach beleczek pozostałych po przeprowadzeniu badania wytrzymałości na zginanie (p.7.2.5). Oznaczenia wykonano zgodnie z normą PN-88/B-04300, przy użyciu wkładki do prasy hydraulicznej, składającej się z 2 prostokątnych płytek zapewniających ich pionowy ruch. Po umieszczeniu połówek beleczek pomiędzy płytkami ściskającymi, obciążano je stopniowo siłą, aż do momentu zniszczenia. Przy każdej z wilgotności, badanie wykonano na 6 próbkach. Wilgotność osadów oznaczono pobierając materiał z powierzchni zniszczenia i określając wilgotność oznaczenia jako wartość średnią z 6 pomiarów. Sposób formowania próbek omówiono w p. 7.2.5. Zniszczenie próbek osadów: cylindrycznej i sześcienniej, po oznaczeniu

wytrzymałości na ściskanie przy różnych wilgotnościach przedstawiono na Fot. 8 i Fot. 9.

Wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe próbek walcowych przedstawiono w Tabeli Z.II.14 dla serii C-S-1, Tabeli Z.II.15 dla serii C-S-2 i Tabeli 7.2.16 dla serii C-S-G. Ze względu na zróżnicowane wymiary próbek cylindrycznych, a tym samym i różne smukłości, otrzymane wyniki pomiarów sprowadzono do wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przy smukłości 1,0 [Glazer Z., Malinowski J., 1991]:

$$R_c = \frac{9R_d}{7 + 2\frac{D}{H}} \quad (7.2.1)$$

gdzie: R_c - wytrzymałość na ściskanie przy smukłości $\frac{H}{D}=1,0$, -,

R_d - wytrzymałość na ściskanie przy smukłości $\frac{H}{D} \neq 1,0$, -,

H - wysokość próbki, cm,

D - średnica próbki, cm.

Średnie wartości wytrzymałości osadów na jednoosiowe ściskanie dla każdej z serii przedstawiono w Tabeli Z.II.17.

Dla poszczególnych serii uzyskano następujące wartości parametrów wytrzymałości na ściskanie:

- seria C-S-1: $R_{c1}=550,2\div 1169,9$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,5\% \div w_{opt} + 0,8\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,99 \div 1,06$, przy smukłości 1,0: $R_{c1} = 548,9 \div 1157,1$ kPa,
- seria C-S-2: $R_{c2} = 289,7 \div 735,7$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,3\% \div w_{opt} + 1,1\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95 \div 1,02$, przy smukłości 1,0: $R_{c2} = 339,1 \div 837,2$ kPa,
- seria C-S-G: $R_{cg} = 145,6 \div 612,5$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 9,7\% \div w_{opt} + 3,0\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93 \div 1,03$.



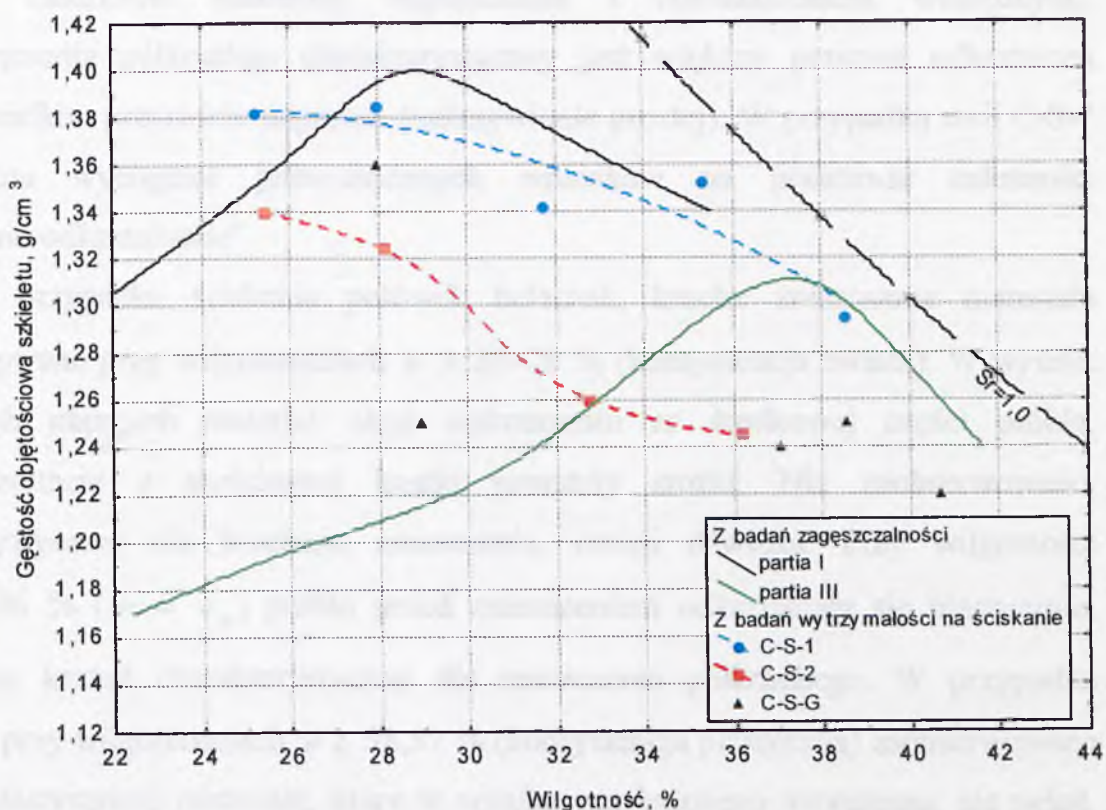
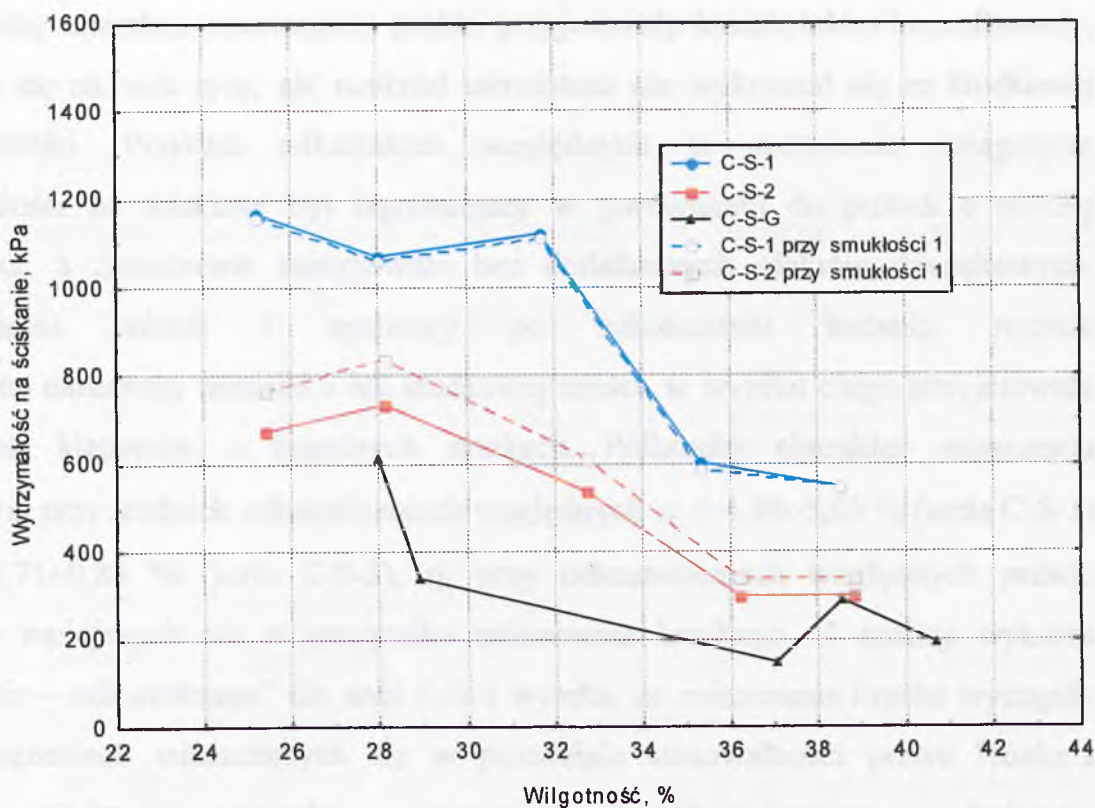
Fot. 8. Zniszczenie próbki osadów z dekarbonizacji wody po oznaczeniu wytrzymałości na ściskanie: partia III, seria C-S-1, $w = 25,21\%$



Fot. 9. Odształcenie próbki osadów z dekarbonizacji wody przy oznaczeniu wytrzymałości na ściskanie: partia III, seria C-S-G, $w = 37,06\%$

Dla wykonanych oznaczeń określono zależności wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie R_c od wilgotności w i gęstości objętościowej szkieletu ρ_d , dla każdej z serii, i przedstawiono na Rys. 7.2.3. Zależności „naprężenie–odkształcenie” przedstawiono na Rys.Z.II.37 dla serii C-S-1 i na Rys. Z.II.38 dla serii C-S-2.

Podczas jednoosiowego ściskania próbek z 3 pierwszych oznaczeń tj. o wilgotnościach $w \approx 25 \div 32\%$ (konsystencja zwarta) uzyskano zniszczenia przy średnich odkształceniach względnych $\varepsilon = 7,51 \div 8,81\%$ (seria C-S-1) i $\varepsilon = 1,29 \div 1,89\%$ (seria C-S-2), charakterystyczne dla materiałów kruchych. Wzdłuż tworzącej walca pojawiły się pęknięcia, a ze środkowej części próbki materiał ulegał wykruszeniu, w efekcie czego powstawały strome stożki. Zniszczeniu próbki w momencie osiągnięcia wytrzymałości na ściskanie towarzyszył gwałtowny przyrost odkształcenia z jednoczesną emisją dźwięku. Przy wilgotnościach $w \approx 35 \div 39\%$ (zbliżonych do granicy plastyczności w_p) odkształcenie próbek wskazywało



Rys. 7.2.3. Zależność wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)

na półkruchy charakter zniszczenia, próbki przyjmowały kształt lekko beczułkowaty, pojawiały się na nich rysy, ale materiał samoistnie nie wykruszał się ze środkowej części próbki. Przyrost odkształceń względnych w momencie osiągnięcia wytrzymałości na ściskanie był łagodniejszy w porównaniu do próbek o niższej wilgotności, a zniszczenie następowało bez dodatkowych efektów dźwiękowych. Po wyjęciu próbek z aparatury po zakończeniu badania, ręcznie wykruszono naruszony materiał z ich środkowej części, w wyniku czego przyjmowały one kształt klepsydry, o łagodnych stożkach. Półkruchy charakter zniszczenia występował przy średnich odkształceniach względnych $\varepsilon = 4,49 \div 5,65$ % (seria C-S-1) i $\varepsilon = 0,71 \div 0,88$ % (seria C-S-2), tj. przy odkształceniach względnych prawie o połowę mniejszych niż w przypadku zniszczenia kruchego. Z analizy wykresu „naprężenie – odkształcenie” dla serii C-S-1 wynika, że zniszczenie kruche wystąpiło przy naprężeniach mieszczących się w przedziale stosowalności prawa Hooke’a (liniowej zależności pomiędzy naprężeniem i odkształceniem względnym). Dla zniszczenia półkruchego charakterystyczny jest większy przyrost odkształceń przy niewielkim przyroście naprężeń (zakrzywienie prostej). W przypadku serii C-S-2 nie można wyciągnąć jednoznacznych wniosków na podstawie zależności „naprężenie-odkształcenie”.

W przypadku ściskania połówek beleczek, kruche zniszczenie materiału zaobserwowano przy wilgotnościach $w \approx 28 \div 29$ % (konsystencja zwarta). W wyniku powstałych naprężeń materiał uległ wykruszeniu ze środkowej części próbki, a w rezultacie z sześcienniej kostki powstały stożki. Nie zaobserwowano, charakterystycznej dla kruchego zniszczenia, emisji dźwięku. Przy wilgotności $w = 37,06$ % ($w \approx w_p$) próbki przed zniszczeniem odkształcały się plastycznie, przyjmując kształt charakterystyczny dla zniszczenia półkruchego. W przypadku ściskania przy wilgotnościach $w \geq 38,57$ % (konsystencja plastyczna) zaobserwowano wysoką plastyczność materiału, który w wyniku przyłożonego naprężenia, nie pękał, a dawał się formować - próbki rozplaszczaly się.

Z analizy wykonanych oznaczeń wynika, że na poziomie ufności $P = 95$ % różnice wartości parametrów otrzymane dla poszczególnych serii badawczych są istotne statystycznie i wartości wytrzymałości na ściskanie wpływ ma metoda

badania. Najwyższe wartości uzyskano dla próbek cylindrycznych o smukłości zbliżonej do 1,0, nawet do $R_{ct} \approx 1200$ kPa (przy $w \approx 25$ % i $\rho_d \approx 1,38$ g/cm³), a najniższe dla kostek sześciennych $R_{cg} \approx 200$ kPa (przy $w \approx 41$ % i $\rho_d \approx 1,22$ g/cm³). Po sprowadzeniu otrzymanych wyników do wartości wytrzymałości na ściskanie przy smukłości $\frac{H}{D}=1,0$, wytrzymałość na ściskanie oznaczana na próbkach cylindrycznych o smukłości $\frac{H}{D}=2,19$ (seria C-S-2) jest niższa od wytrzymałości na ściskanie oznaczanej na próbkach cylindrycznych o smukłości $\frac{H}{D}=0,94$ (seria C-S-1) do około 40 %, a na próbkach sześciennych (seria C-S-G) o około 60 %.

Na podstawie szczegółowej analizy otrzymanych wyników stwierdzono występowanie dodatnich korelacji między wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie i gęstością objętościową szkieletu oraz ujemnych, między badaną wytrzymałością i wilgotnością, dla wszystkich serii pomiarowych, przy czym zależności wytrzymałości na ściskanie, istotne statystycznie przy poziomie ufności $P = 95$ %, wystąpiły: dla wilgotności dla serii C-S-1 ($R = -0,91$) oraz dla gęstości objętościowej szkieletu dla serii C-S-2 ($R=0,96$) i serii C-S-G ($R = 0,93$). Ogólnie można przyjąć, że wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie osadów z dekarbonizacji wody wzrasta wraz ze spadkiem wilgotności i wzrostem gęstości objętościowej szkieletu. Największy spadek wytrzymałości, nawet do 50 % dla serii C-S-1, odpowiada wilgotności zbliżonej do granicy plastyczności w_p od strony konsystencji zwartej i zmianie charakteru zniszczenia próbek z kruchego na półkruchy.

Zaobserwowany wpływ wilgotności i zagęszczenia na wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie odpowiada zależnościom charakterystycznym dla gruntów spoistych [Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M., 1977], [Jia H., Liu F., Zhang H., Zhang C., Araya K., Kudoh M., Kawabe H., 1998]. Oznaczona wytrzymałość na ściskanie osadów z dekarbonizacji wody jest zbliżona do wytrzymałości na ściskanie iłłów zagęszczanych, o tym samym wskaźniku porowatości [Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M., 1977]. Oznaczona wytrzymałość na ściskanie jest

wyższa od danych przedstawianych w literaturze, dla próbek o zbliżonych wymiarach, wykonanych z osadów o tej samej wilgotności (p.7.1.2).

Do celów projektowania zaleca się wykonywanie badań wytrzymałości na ściskanie na próbkach sześciennych (połówkach beleczek uzyskanych z badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu), dla których oznaczone wartości parametru są niższe w porównaniu do wartości uzyskiwanych z badań wykonywanych na próbkach cylindrycznych, a więc bardziej bezpieczne dla projektowania konstrukcji. Ze względu na małą zmienność gęstości objętościowej szkieletu dla próbek w badanej serii C-S-G nie wykonywano analizy zmienności wytrzymałości na ściskanie w zależności od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu. Dla badanych osadów, do celów projektowania zaleca się przyjęcie wytrzymałości na ściskanie $R_{\text{og}} \approx 200$ kPa.

7.2.5. Wytrzymałość na rozciąganie

Badania wytrzymałości na rozciąganie osadów z dekarbonizacji wody wykonano 4 metodami, przez:

- jednoosiowe rozciąganie bezpośrednie R_r ,
- pośrednio, tzw. metodą brazylijską, przy rozłupywaniu R_{rt} ,
- pośrednio, przy ścinaniu w aparacie trójosiowego ściskania R_{rn} ,
- pośrednio, przy zginaniu R_g .

W każdym z przypadków badania wykonano dla partii III osadów dla próbek formowanych przez ściskanie, przy różnych wilgotnościach. Oznaczenie jednoosiowego rozciągania, rozciągania przy rozłupywaniu oraz przez ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania przeprowadzono na próbkach walcowych, natomiast badanie rozciągania przez zginanie – na beleczkach sześciennych. Materiał do formowania próbek przygotowano analogicznie jak w p. 7.2.4. Charakterystykę wykonanych badań wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono w Tabeli Z.II.18.

Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie bezpośrednie

Badanie wytrzymałości na jednoosiowe rozciąganie bezpośrednie R_t (seria R-S) wykonano na cylindrycznych próbkach, formowanych i rozciąganych w specjalnie do tego celu zaprojektowanych końcówkach, dostosowanych do bezpośredniego zamontowania w aparacie trójosiowego ściskania [Glazer Z., 1977], [Glazer Z., Malinowski J., 1991], [Grabowska-Olszewska B., Siergiejew J.M., 1977]. Konstrukcja kształtek umożliwiała wykonanie próbek o wymuszonej powierzchni zerwania w ich centralnej części, o średnicy $D = 3,6$ cm. Po wewnętrznej stronie końcówek, od połowy głębokości do podstawy, wykonano karby umożliwiające lepsze przyleganie materiału do ścianek. Sztucznie wykonana chropowatość wewnętrznej powierzchni kształtek oraz zeszlifowanie ścianek przy powierzchni rozerwania powodowały zmienność średnicy próbek na ich wysokości od $3,3 \div 3,6$ cm. Przyjęto średnią średnicę próbek $D = 3,5$ cm. Końcówki umożliwiały formowanie próbek o minimalnej wysokości $H = 3,61$ cm. Po uformowaniu każdej z próbek, zmierzono jej wysokość oraz określono jej masę. Bezpośrednio po uformowaniu, próbki rozrywano. Ze względu na rozerwanie próbek przy niewielkich siłach, rejestracja odkształceń w czasie przeprowadzania pomiarów nie była możliwa. Próbkę, przygotowaną do badania wytrzymałości na bezpośrednie rozciąganie, zamontowaną w aparacie trójosiowego ściskania, przedstawiono na Fot.10.

Wyniki pomiarów wytrzymałości na jednoosiowe rozciąganie bezpośrednie przedstawiono w Tabeli Z.II.19.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu R_{rt} (seria R-S-T) wykonano tzw. metodą brazylijską, przez ściskanie próbek w kształcie walca po tworzącej [Glazer Z., 1977], [Glazer Z., Malinowski J., 1991], [Grabowska-Olszewska B., Siergiejew J.M., 1977]. Próbki formowano przez ściskanie w prasie ręcznej, w formie jak dla próbek do badania wytrzymałości na ściskanie dla serii

ręcznej, w formie jak dla próbek do badania wytrzymałości na ściskanie dla serii C-S-1. Po uformowaniu próbki umieszczono w foliowych woreczkach i przechowywano w szczelnym pojemniku w celu zabezpieczenia przed wysychaniem. Badania wykonano po 2-3 dobach przechowywania próbek. Przed przystąpieniem do badań, dla każdej z próbek oznaczono średnicę i wysokość oraz określono jej masę. Przy każdej z wilgotności badanie wykonano na co najmniej 3 próbkach, które ściskano w specjalnie do tego celu przygotowanym aparacie trójosiowego ściskania, ręcznie zadając obciążenie. Z powierzchni zniszczenia próbek pobierano materiał do oznaczenia wilgotności, określając następnie wartość średnią parametru dla każdej z serii. W celu określenia odkształcenia jednostkowego ε odpowiadającego zniszczeniu próbki oraz określenia charakteru zniszczenia materiału na podstawie zależności „naprężenie-odkształcenie”, podczas wykonywania badania rejestrowano zmianę średnicy próbki (ΔD) w czasie przyrostu naprężenia. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbki osadów z dekarbonizacji wody przedstawiono na Fot.11.



Fot. 10. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą bezpośrednią: partia III, seria R-S



Fot. 11. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu: partia III, seria R-S-T, $w = 35,52\%$

Wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu przedstawiono w Tabeli Z.II.20, a zmianę odkształceń względnych w zależności od zmian naprężenia podczas rozciągania przy rozłupywaniu na Rys. Z.II.39.

Wytrzymałość na rozciąganie przy ścinaniu w aparacie trójosiowego ściskania

Wytrzymałość na rozciąganie przy ściskaniu R_{σ} (seria R-S-U) oznaczono na podstawie ekstrapolacji obwiedni Coulomba-Mohra, z badań wytrzymałości na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania dla serii T-S-R [Fürstenberg A., 1973], [Grabowska-Olszewska B., Siergiejew J.M., 1977]. Przygotowanie materiału, formowanie próbek, oznaczanie poszczególnych parametrów oraz sposób wykonania badania przeprowadzono jak opisano w p. 7.2.2. Badania wykonano po 4 dobach przechowywania próbek, dla 4 próbek przy każdej z 5 wilgotności. Podczas badania rejestrowano zmianę wysokości próbki (ΔH) odpowiadającą momentowi ścięcia, w celu określenia odkształcenia jednostkowego ε , przy którym następowało zniszczenie.

Wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie przy trójosiowym ściskaniu przedstawiono w Tabeli Z.II.21, a interpretację graficzną stanu naprężenia na Rys. Z.II.30-34.

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu R_g (seria R-S-G) wykonano zgodnie z normą [153], w aparacie Michaelisa.

Wcześniej przygotowany materiał umieszczono w rozbieralnej formie stosowanej do formowania zaprawy w beleczi do badań wytrzymałości na ściskanie, a następnie zagęszczano w prasie hydraulicznej przez nakładkę, specjalnie przystosowaną, umożliwiającą formowanie beleczek z osadów. Sposób formowania próbek pozwolił na uzyskanie jednorazowo 3 powtarzalnych próbek sześciennych o wymiarach 4 x 4 x 16 cm. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określono

praktycznie bezpośrednio po uformowaniu próbek, wcześniej oznaczając masę każdej z nich. Przy każdej z wilgotności badanie wykonano na 3 beleczkach, które obciążano w środkowej części, z kierunkiem działania siły zgodnym z kierunkiem formowania próbek. Siła zginająca powstawała poprzez wkładanie ciężarków o znanej masie do plastikowego kubeczka zawieszono na ramieniu dźwigni. Siłę zwiększano po ustabilizowaniu się odkształceń i dokonaniu pomiaru ugięcia beleczki (s) przy użyciu czujnika mechanicznego. Z powierzchni zniszczenia próbek pobierano materiał do oznaczenia wilgotności, określając wartość wilgotności dla każdej z serii jako wartość średnią. Beleczkę uformowaną z osadów, z wyraźną linią ugięcia, podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, przedstawiono na Fot. 12.

Wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przedstawiono w Tabeli Z.II.22. Ugięcie belki w zależności od wzrastającego naprężenia przedstawiono na Rys. Z.II.40, a wielkość maksymalnego ugięcia (przy zniszczeniu) w zależności od wilgotności na Rys.Z.II.41.

Analiza wyników badań

Średnie wartości wytrzymałości osadów na rozciąganie dla każdej z serii przedstawiono w Tabeli Z.II.23.



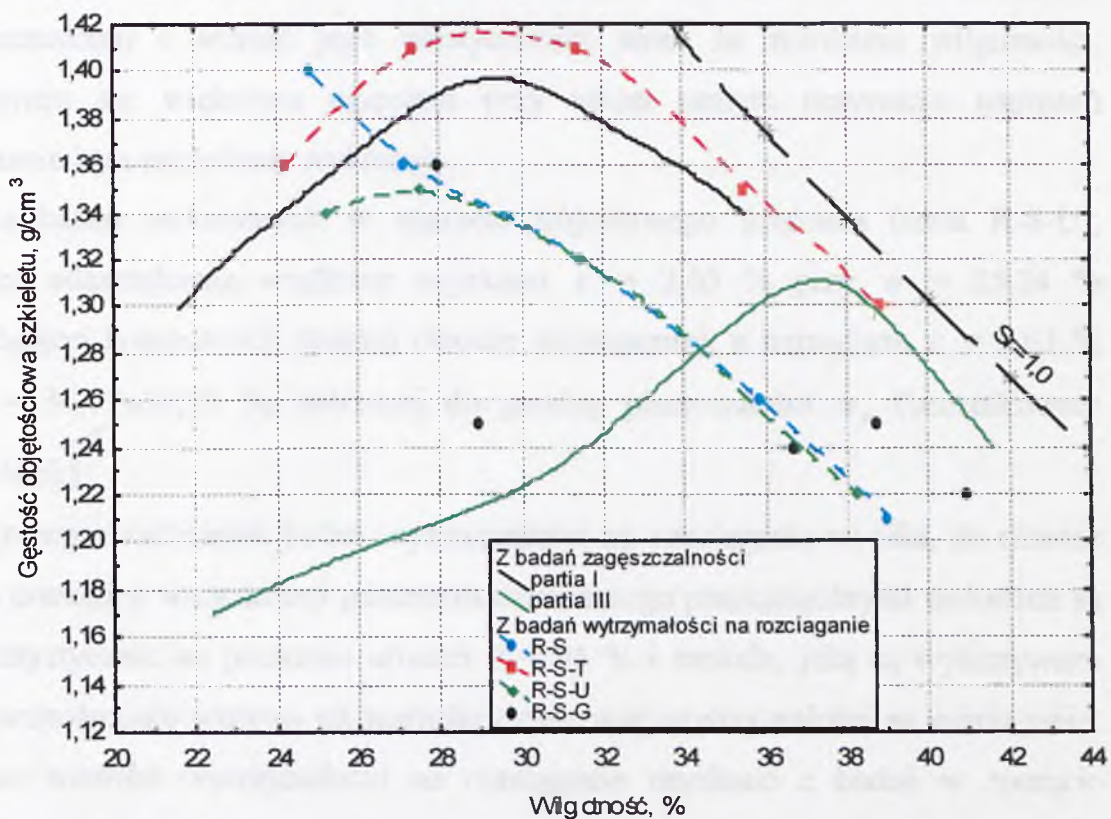
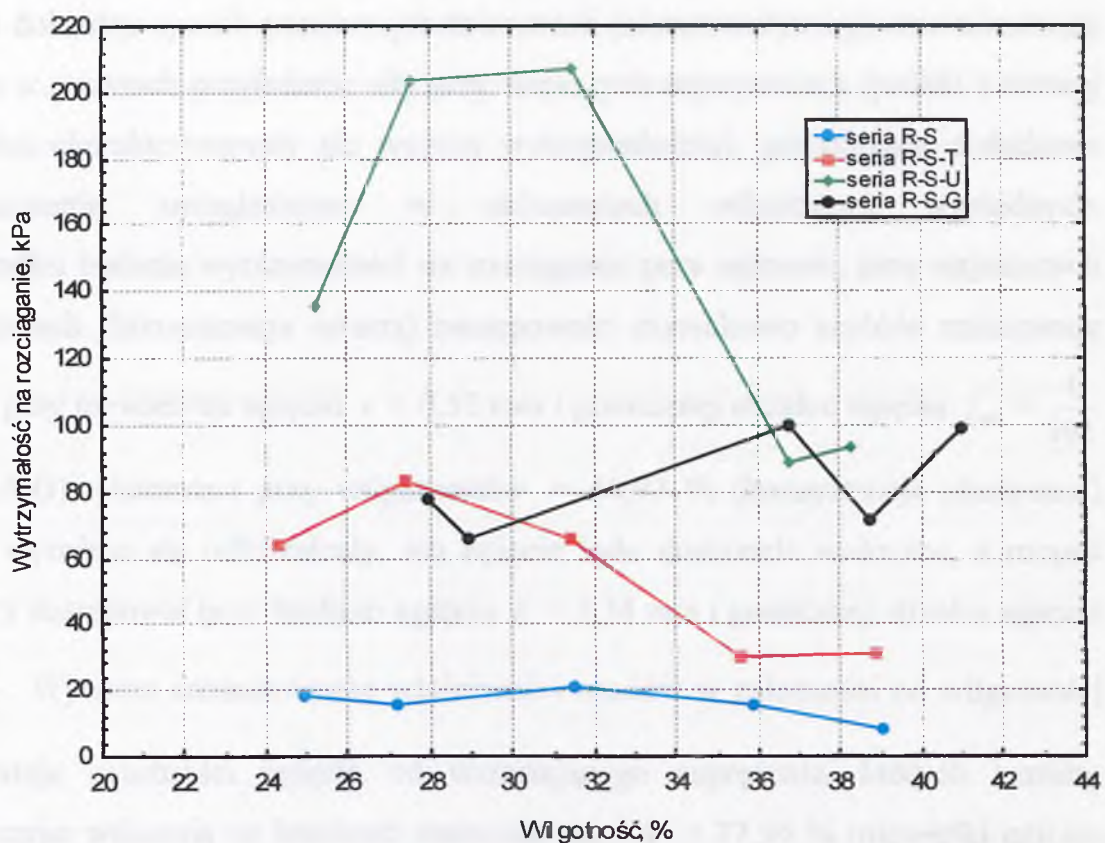
Fot. 12. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu: partia III, seria R-S-G, $w=36,73\%$

Dla poszczególnych serii uzyskano następujące wartości parametrów wytrzymałości na rozciąganie:

- seria R-S: $R_r = 8,6 \div 21,2$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,8\% \div w_{opt} + 1,3\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,92 \div 1,07$,
- seria R-S-T: $R_{rt} = 30,4 \div 83,5$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 13,4\% \div w_{opt} + 1,1\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,99 \div 1,08$,
- seria R-S-U: $R_{ru} = 88,6 \div 206,9$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 12,5\% \div w_{opt} + 0,6\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93 \div 1,03$,
- seria R-S-G: $R_g = 66,0 \div 99,9$ kPa w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 9,8\% \div w_{opt} + 3,3\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,93 \div 1,03$.

Zależności wytrzymałości na rozciąganie, oznaczonych 4 metodami, od wilgotności w i gęstości objętościowej szkieletu ρ_d przedstawiono na Rys. 7.2.4.

Na podstawie wykonanych badań osady można określić jako materiał kruchy przy $w \approx 24 \div 28\%$ (konsystencja zwarta), który wraz ze wzrostem wilgotności przechodzi w materiał plastyczny przy $w \approx 41,0\%$ (konsystencja plastyczna). Przy badaniu wytrzymałości na rozciąganie tzw. metodą brazylijską (seria R-S-T), kruche zniszczenie materiału przejawiało się przede wszystkim w gwałtownym pękaniu próbek przy badaniu, z wyraźną emisją dźwięku. Zniszczenie występowało przy odkształceniu względnym $\varepsilon = 1,09\%$. Dla tej metody najmniejsze odkształcenia względne zaobserwowano przy najwyższej wilgotności (38,84%) $\varepsilon = 0,31\%$. Ze sporządzonego wykresu „naprężenie-odkształcenie” dla serii R-S-T nie można jednoznacznie określić rodzaju materiału pod względem kruchości. Zmiany odkształceń jednostkowych w odniesieniu do zmian wilgotności nie odpowiadają właściwościom materiału wynikającym z obserwacji poczynionych podczas badania. Przy mniejszych wilgotnościach (materiał kruchy) powinny występować mniejsze odkształcenia względne niż przy wyższych wilgotnościach (materiał plastyczny), a nie większe [Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M., 1977], jak wskazuje na to zależność przedstawiona na Rys. Z.II.39. Przyczyną takich rozbieżności



Rys. 7.2.4. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)

jest mało dokładny sposób pomiaru przemieszczeń (nieautomatyczny) oraz niszczenie materiału w punktach przyłożenia siły przy większych naprężeniach (próbki o niższej wilgotności charakteryzowały się wyższą wytrzymałością), powodujące dodatkowe przemieszczenia, uwzględnione w obliczeniach odkształceń względnych. W przypadku badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, przy najniższych wilgotnościach (konsystencja zwarta) następowało stosunkowo szybkie zniszczenie beleczek przy niewielkim ugięciu $s = 0,52$ mm i granicznej strzałce ugięcia $f_{gr} = \frac{1}{192}$ (seria R-S-G). Natomiast przy wilgotności $w = 40,97$ % (konsystencja plastyczna) beleczki wyraźnie się odkształcały, ich ugięcie było doskonale widoczne, a rozpad na połowy następował przy średnim ugięciu $s = 3,34$ mm i granicznej strzałce ugięcia $f_{gr} = \frac{1}{30}$. Wyraźne zróżnicowanie właściwości osadów w zależności od wilgotności przedstawiają zależności ugięcia od wzrastającego naprężenia, których kształty jednoznacznie wskazują na kruchość materiału przy $w = 27,94$ % (niewielki ugięcie przy zniszczeniu) i wzrost jego plastyczności wraz ze wzrostem wilgotności, który wyraża się większym ugięciem przy takim samym przyroście naprężeń (zmniejszenie kąta nachylenia wykresu).

Dla badań wykonanych w aparacie trójosiowego ściskania (seria R-S-U), największe odkształcenia względne uzyskano $\varepsilon = 2,63$ % przy $w = 25,24$ % odpowiadającej konsystencji zwartej (kruche zniszczenie), a najwyższe $\varepsilon = 6,63$ % przy $w = 36,77 \div 38,25$ %, zbliżonej do granicy plastyczności w_p (beczułkowaty kształt próbek).

Z przeprowadzonych badań wytrzymałości na rozciąganie wynika, że różnice uzyskane pomiędzy wartościami parametru oznaczanego poszczególnymi metodami są istotne statystycznie na poziomie ufności $P = 95$ % i metoda, jaką są wykonywane badania bezpośrednio wpływa na wartości oznaczanej wytrzymałości na rozciąganie. Najwyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie uzyskano z badań w aparacie trójosiowego ściskania (do $R_m \approx 207$ kPa przy $w = 31,44$ % i $\rho_d = 1,35$ g/cm³), a niższe z badań bezpośredniego jednoosiowego rozciągania (do $R_t \approx 8,6$ kPa przy $w = 39,02$ % i $\rho_d = 1,21$ g/cm³), od kilku do kilkunastu razy mniejsze od wartości

określonych na podstawie ekstrapolacji obwiedni Coulomba-Mohra. Zależność ta jest zbliżona do zaobserwowanej dla gruntów spoistych przez Fürstenberg A. [1973].

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników uzyskanych z badań z serii R-S, R-S-T i R-S-U stwierdzono ujemną korelację między wytrzymałością na rozciąganie i wilgotnością oraz dodatnią między wytrzymałością i gęstością objętościową szkieletu, przy czym tylko dla serii R-S-T korelacje te są istotne statystycznie na poziomie ufności $P = 95 \%$, a współczynniki korelacji wynoszą odpowiednio $R = -0,77 (w)$ i $R = 0,75 (\rho_d)$. Powyższe korelacje $R_r = f(w)$ i $R_r = f(\rho_d)$ odpowiadają zależnościom wytrzymałości na rozciąganie bezpośrednie gruntów spoistych: piasku gliniastego i gliny piaszczystej ($\emptyset = 5,0$ cm) [Kokowski J., 1994], gliny piaszczystej ($\emptyset = 3,6$ cm) [Ibarra S.Y., McKyes E., Broughton R.S., 2005] i glin [Fürstenberg A., 1973] oraz oznaczonej metodą brazylijską dla gliny i gliny piaszczystej ($\emptyset = 5,62$ cm) [Błażejczak D., Horn R., Pytka J., 1995], iłu i gliny zwięzłej ($\emptyset = 2,9$ cm) [Jia H., Liu F., Zhang H., Zhang C., Araya K., Kudoh M., Kawabe H., 1998]. Natomiast dla badań z serii R-S-G uzyskano dodatnią zależność wytrzymałości na rozciąganie od wilgotności i ujemną od gęstości objętościowej szkieletu. Ze względu na małą zmienność gęstości objętościowej szkieletu, korelacji uzyskanych dla serii R-S-G nie należy przyjmować za miarodajne.

Oznaczone wartości wytrzymałości na rozciąganie osadów z dekarbonizacji wody korespondują z wartościami wytrzymałości na rozciąganie glin, glin piaszczystych i piasków gliniastych [Fürstenberg A., 1973], [Kokowski J., 1994], [Ibarra S.Y., McKyes E., Broughton R.S., 2005]. Grunty te, podobnie jak osady z dekarbonizacji wody, charakteryzują się niską zawartością frakcji ilowej (do 20 %), której obecność w składzie gruntu wpływa znacząco na wytrzymałość na rozciąganie: zwiększenie zawartości frakcji ilowej powoduje wzrost wytrzymałości na rozciąganie [Barzegar A.R., Oades J.M., Rengasamy P., Murray R.S., 1995], [Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M., 1977].

Do oznaczania wytrzymałości na rozciąganie osadów z dekarbonizacji wody do celów projektowania warstw uszczelniających zaleca się wykonywanie badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu na beleczkach, ze względu na najbliższe podobieństwo modelu badania do rzeczywistych warunków pracy osadów

wbudowanych w warstwę. Dla serii R-S-G nie wykonywano analizy zmienności wytrzymałości na rozciąganie w zależności od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu, ze względu na małą zmienność gęstości objętościowej szkieletu dla próbek w tej serii. Dla badanych osadów, do celów projektowania zaleca się przyjęcie wytrzymałości na rozciąganie $R_g \approx 70$ kPa.

7.2.6. Analiza wyników badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie - współczynnik kruchości

Na podstawie przeprowadzonych badań podjęto próbę ustalenia zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i wytrzymałością na rozciąganie osadów z dekarbonizacji wody, dla oznaczeń wykonanych na próbkach sześciennych (seria C-S-G i seria R-S-G) oraz próbkach cylindrycznych (seria C-S-1 i seria R-S-T).

W tym celu wyznaczono wskaźnik kruchości $\frac{R_r}{R_c}$ dla średnich wartości wytrzymałości

przy danej wilgotności, który pozwolił na ocenę materiału pod względem optymalnego wykorzystania jego wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie podczas pracy w konstrukcji [Flaga K., 1974]. Zestawienie oznaczonych wskaźników kruchości przedstawiono w Tabeli Z.II.24. Na podstawie przeprowadzonej analizy zależności korelacyjnych na poziomie istotności $P = 95$ % stwierdzono brak zależności wskaźnika kruchości od wilgotności i gęstości objętościowej dla obu rodzajów

badanych próbek i wyznaczono zależność wskaźnika kruchości $\frac{R_r}{R_c}$ od wytrzymałości

na ściskanie R_c przedstawioną na Rys. Z.II.42. Z uwagi na fakt, iż próbki z serii C-S-G i R-S-G charakteryzowały się praktycznie tym samym zagęszczeniem, badania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie wykonane zostały na tych samych beleczkach, a sposób wykonywania oznaczeń był najbardziej zbliżony do warunków pracy warstwy uszczelnienia w podstawie składowiska, zależność dla próbek sześciennych przyjęto jako miarodajną. Wynika z niej, że optymalne wykorzystanie wytrzymałości osadów z dekarbonizacji wody występuje przy wskaźniku kruchości

$\frac{R_r}{R_c} = f(R_c) = \max$, tj. $\frac{R_r}{R_c} = 0,686$, który odpowiada minimalnej wartości wytrzymałości

na ściskanie R_c osiągniętej przy $w = 37,06\%$ i $f_{gr} = \frac{1}{32}$.

Ze względu na optymalne wykorzystanie wytrzymałości osadów z dekarbonizacji podczas pracy w konstrukcji zaleca się ich wbudowanie w warstwę przy $w \approx 37\%$.

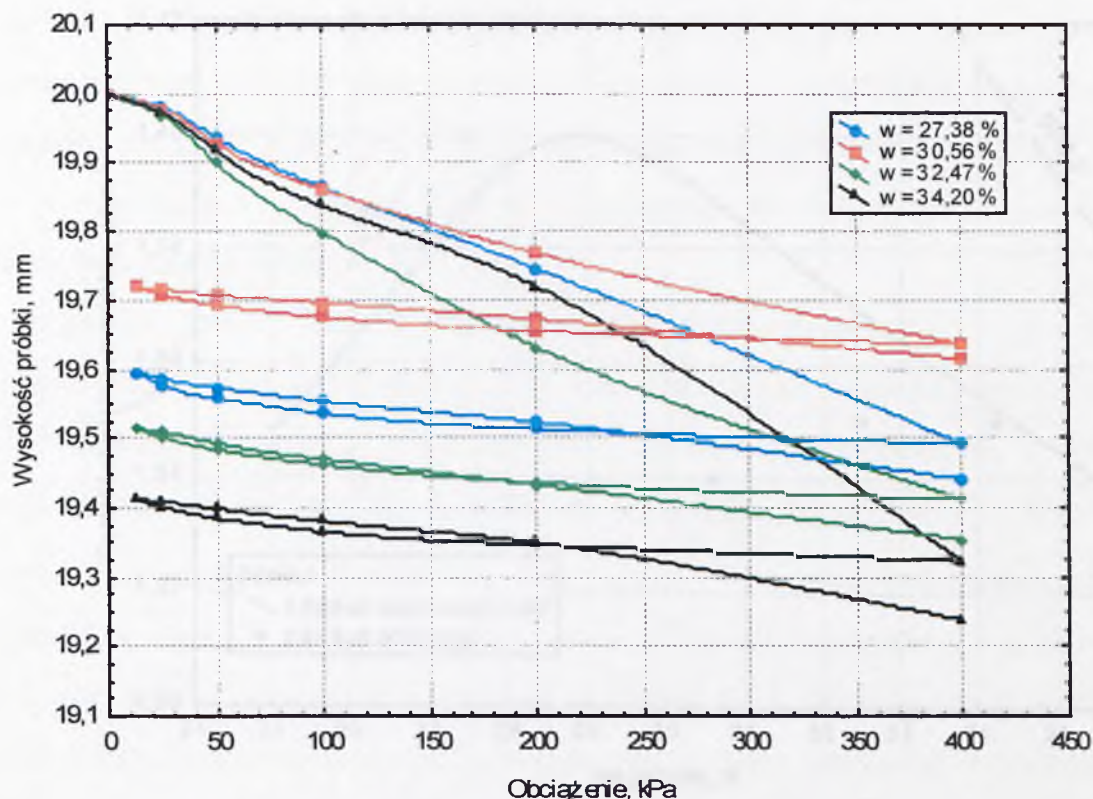
7.2.7. Ścisłość

Badanie edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej M_0 , odprężenia \bar{M} i ścisłości wtórnej M wykonano zgodnie z normą [152], w edometrach typu IBW M I, w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW. Moduły określano po ustabilizowaniu się osiadań przy następujących stopniach zmiany naprężenia: $\Delta\sigma = 12,5; 25; 50; 100$ i 200 kPa. Oznaczenia wykonano dla 4 próbek o średnicy $D = 50$ mm i wysokości $H = 20$ mm, o różnych wilgotnościach i wskaźnikach zagęszczenia, formowanych bezpośrednio w pierścieniach edometrycznych przez ściskanie w prasie ręcznej. Parametry badanych próbek przed rozpoczęciem badania i po jego zakończeniu przedstawiono w Tabeli Z.II.25. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono wykresy konsolidacji dla każdej z próbek przedstawione kolejno na Rys. Z.II.43-46 oraz wykresy ścisłości i odprężenia przedstawione na Rys.7.2.5. Dodatkowo na podstawie oznaczeń wyznaczono współczynnik ścisłości objętościowej m_v . Oznaczone parametry przedstawiono kolejno: w Tabeli Z.II.26 edometryczny moduł ścisłości pierwotnej i współczynnik ścisłości objętościowej, w Tabeli Z.II.27 edometryczny moduł odprężenia i w Tabeli Z.II.28 edometryczny moduł ścisłości wtórnej. Dla osadów z dekarbonizacji wody uzyskano następujące wartości parametrów ścisłości w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 1,5\% \div w_{opt} + 5,3\%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,96 \div 1,00$:

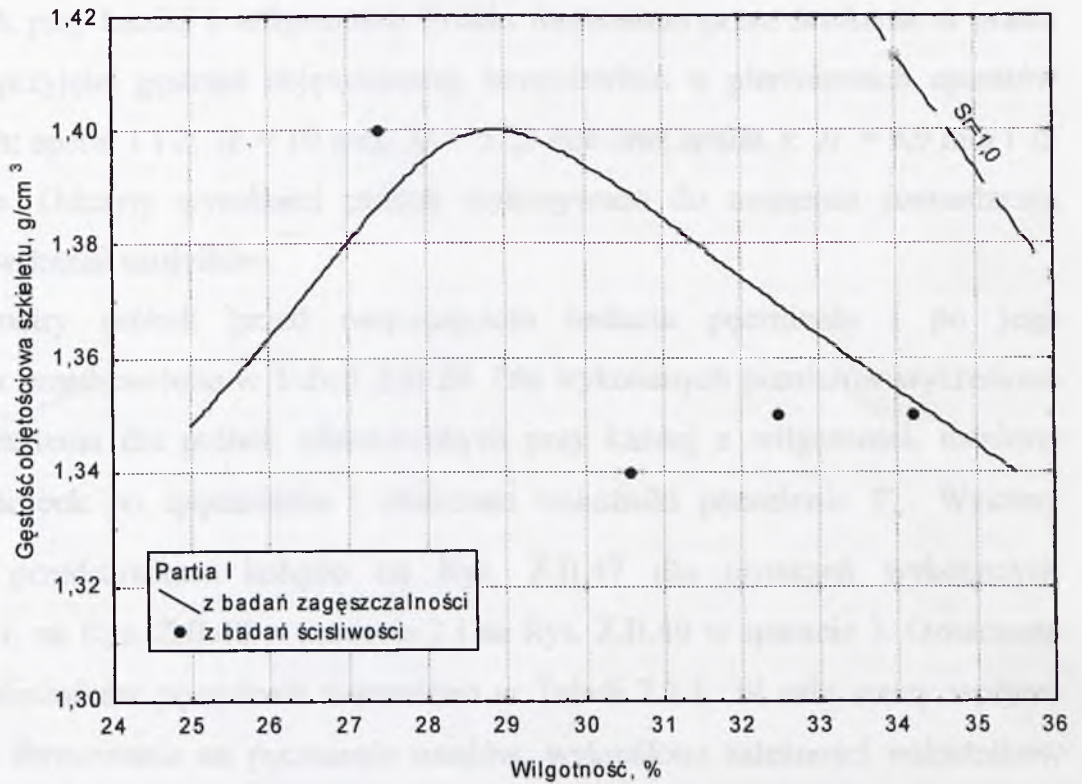
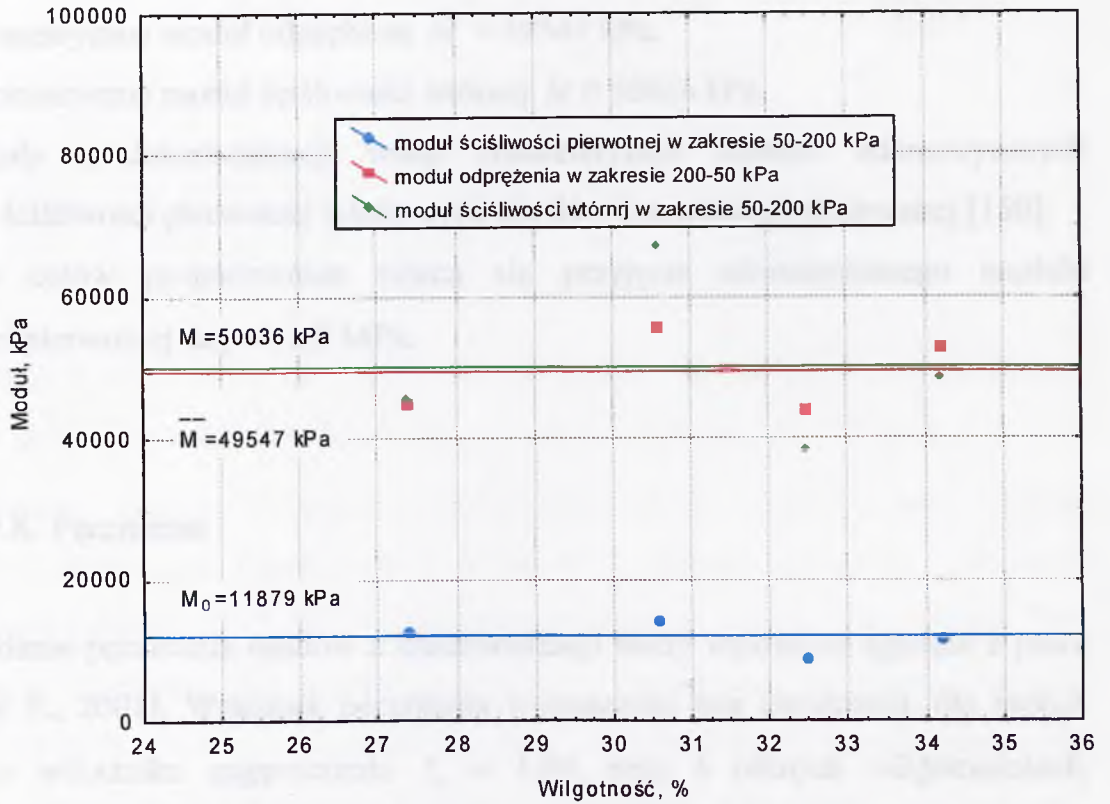
- edometryczny moduł ścisłości pierwotnej $M_0 = 7451 \div 29952$ kPa,
- edometryczny moduł odprężenia $\bar{M} = 13595 \div 206695$ kPa,
- edometryczny moduł ścisłości wtórnej $M = 27215 \div 82117$ kPa,
- współczynnik ścisłości objętościowej $m_v = 3,34 \cdot 10^{-5} \div 1,34 \cdot 10^{-4}$ 1/kPa.

Do analizy zależności modułów od wilgotności i zagęszczenia wyznaczono ich wartości dla zakresu obciążeń $\sigma = 50 \div 200$ kPa, odrzucając brzegowe punkty pomiarowe i przedstawiono na Rys. 7.2.6.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników nie stwierdzono wpływu wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu na edometryczne moduły ścisłości pierwotnej i wtórnej oraz moduł odprężenia, na poziomie ufności $P = 95$ %. W badanym zakresie wilgotności, dla $\Delta\sigma = 200 - 50 = 150$ kPa przyjęto edometryczne moduły ścisłości jako parametry stałe, określone na podstawie 4 pomiarów jako wartości średnie:



Rys. 7.2.5. Wykres ścisłości i odprężenia



Rys. 7.2.6. Edometryczne moduły versus wilgotność i gęstość objętościowa szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)

- edometryczny moduł ścisłości pierwotnej $M_0 = 11879$ kPa,
- edometryczny moduł odprężenia $\bar{M} = 49547$ kPa,
- edometryczny moduł ścisłości wtórnej $M = 50036$ kPa.

Osady z dekarbonizacji wody charakteryzuje wartość edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej właściwych dla ilów konsystencji plastycznej [150].

Do celów projektowania zaleca się przyjęcie edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej $M_0 \approx 11,9$ MPa.

7.2.8. Pęcznienie

Badanie pęcznienia osadów z dekarbonizacji wody wykonano zgodnie z pracą [Pisarczyk S., 2001]. Wskaźnik pęcznienia wyznaczono bez obciążenia, dla próbek osadów o wskaźniku zagęszczenia $I_s \approx 1,00$, przy 4 różnych wilgotnościach, dla 3 próbek przy każdej z wilgotności. Próbki formowano przez ściskanie w prasie ręcznej do przyjętej gęstości objętościowej, bezpośrednio w pierścieniach aparatów o wymiarach: aparat 1 i 2: $H = 10$ mm, $D = 57,2$ mm oraz aparat 3: $H = 9,9$ mm i $D = 57,8$ mm. Odczyty wysokości próbek wykonywano do momentu stwierdzenia stabilizacji wskazań czujników.

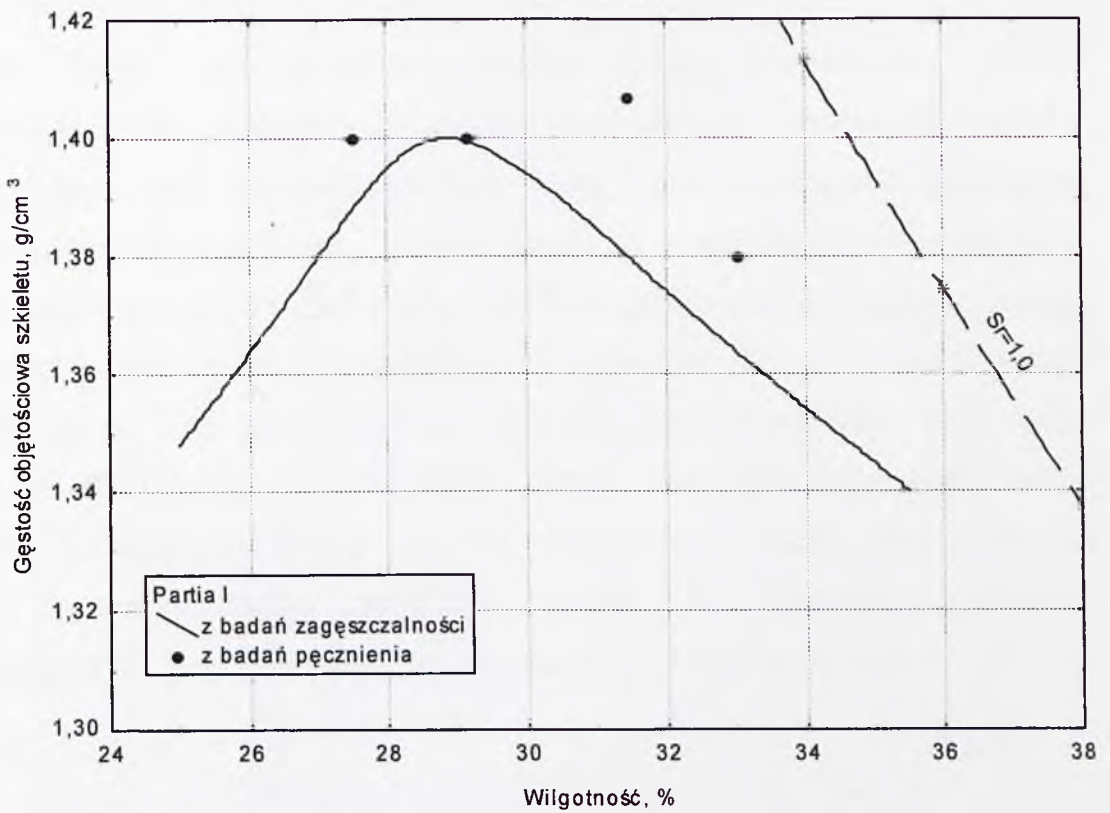
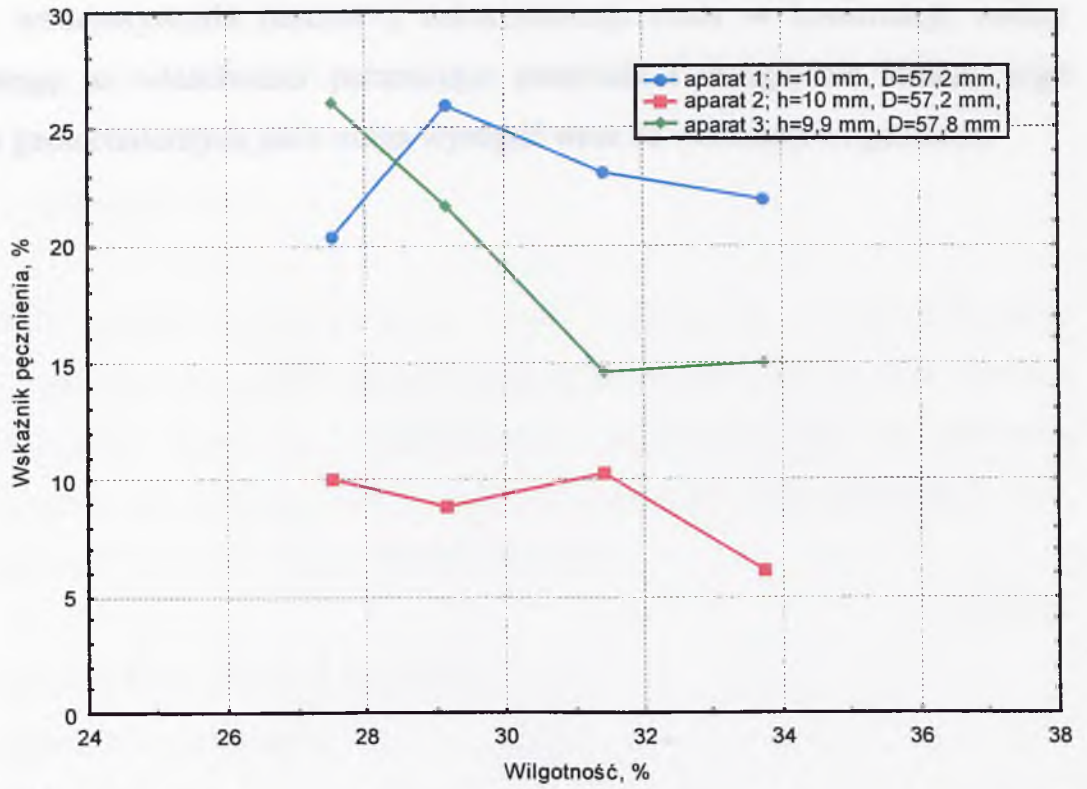
Parametry próbek przed rozpoczęciem badania pęcznienia i po jego zakończeniu przedstawiono w Tabeli Z.II.29. Dla wykonanych pomiarów wykreślono krzywe pęcznienia dla próbek uformowanych przy każdej z wilgotności, ustalono wysokość próbek po spęcznieniu i obliczono wskaźniki pęcznienia V_p . Wykresy pęcznienia przedstawiono kolejno na Rys. Z.II.47 dla oznaczeń wykonanych w aparacie 1, na Rys. Z.II.48 w aparacie 2 i na Rys. Z.II.49 w aparacie 3. Oznaczone wartości wskaźników pęcznienia zestawiono w Tabeli 7.2.1. W celu oceny wpływu wilgotności formowania na pęcznienie osadów, wykreślono zależności wskaźników pęcznienia od wilgotności, przedstawiony na Rys. 7.2.7. Zależność wielkości zmian wilgotności podczas pęcznienia od wilgotności formowania próbek przedstawiono na Rys. Z.II.50.

Tabela 7.2.1. Wskaźnik pęcznienia - zestawienie

L.p.	Wilgotność w	Wskaźnik pęcznienia V_p		
		Aparat 1	Aparat 2	Aparat 3
-	%	%		
1	2	3	4	5
1	27,49	20,36	10,06	26,10
2	29,15	25,90	8,90	21,62
3	31,44	23,11	10,34	14,65
4	33,74	21,90	6,10	15,05

Osady z dekarbonizacji wody charakteryzują się wskaźnikiem pęcznienia $V_p = 6,1 \div 26,10$ % w zakresie wilgotności $w = w_{opt} - 1,4$ % \div $w_{opt} + 4,1$ % przy $I_s \approx 1,00$. Na podstawie analizy istotności statystycznej różnic oznaczonych wartości wskaźników pęcznienia, uzyskanych z badań w 3 różnych aparatach, wykonanej na poziomie ufności $P = 95$ % stwierdzono wpływ aparatu, w którym były wykonywane badania na wyniki pomiarów. Oznaczone najniższe wartości wskaźników pęcznienia są od 1,4 do 3,6 raza niższe od najwyższych uzyskanych przy tych samych wilgotnościach. Między wskaźnikiem pęcznienia i wilgotnością formowania występuje ujemna korelacja, nieistotna statystycznie na poziomie ufności $P = 95$ %. Na podstawie tej zależności można przyjąć, że osady wykazują tym mniejsze pęcznienie, im większa jest ich wilgotność początkowa, analogicznie do gruntów spoistych [Pisarczyk S., 2004], [Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M., 1977]. W badanym zakresie wilgotności przyrost jej wartości w stosunku do wartości wilgotności początkowej wyniósł $\Delta w \approx 17 \div 28$ %, i był tym większy, im niższa była wilgotność formowania próbek. Średnia wilgotność końcowa osadów po spęcznieniu wyniosła $w_{końc} \approx 52,0$ %. Wynika stąd, że wilgotność, przy której formowano próbki, nie wpływa na wilgotność końcową osadów. Otrzymane na podstawie badań wartości wskaźnika pęcznienia pozwalają kwalifikować osady jako materiał o niskim do wysokiego stopnia ekspansywności wg klasyfikacji gruntów ekspansywnych wg Niedzielskiego [Pisarczyk S., 2004].

Na podstawie nomogramu Casagrande'a zmodyfikowanego przez Grabowską-Olszewską B. [1996] osady można określić jako materiał charakteryzujący się wysokim pęcznieniem.



Rys. 7.2.7. Zależność wskaźnika pęcznienia od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)

Przy wbudowywaniu osadów z dekarbonizacji wody w konstrukcje należy zwrócić uwagę na właściwości pęczniące materiału i uwzględnić zmiany jego parametrów geotechnicznych jakie mogą wystąpić wraz ze wzrostem wilgotności.

8.1. Wpływ wilgotności

Wzrost wilgotności osadów z dekarbonizacji wody prowadzi do zwiększenia ich objętości. Zmiana ta jest spowodowana powstaniem dodatkowych przestrzeni wodnych w osadzie. Długość L – współczynnika proporcjonalności do zmiany objętości osadów można wyznaczyć z zależności: $V = V_0(1 + \mu \Delta w)$, gdzie V – objętość osadu przy wilgotności w , V_0 – objętość osadu przy wilgotności w_0 , μ – współczynnik pęcznienia osadu.

$$\mu = \frac{V - V_0}{V_0 \Delta w} \quad (8.1.1)$$

gdzie: V – objętość osadu przy wilgotności w , V_0 – objętość osadu przy wilgotności w_0 ,

μ – współczynnik pęcznienia osadu,

Δw – zmiana wilgotności osadu.

Wzrost wilgotności osadów z dekarbonizacji wody prowadzi do zwiększenia ich objętości. Zmiana ta jest spowodowana powstaniem dodatkowych przestrzeni wodnych w osadzie. Długość L – współczynnika proporcjonalności do zmiany objętości osadów można wyznaczyć z zależności: $V = V_0(1 + \mu \Delta w)$, gdzie V – objętość osadu przy wilgotności w , V_0 – objętość osadu przy wilgotności w_0 , μ – współczynnik pęcznienia osadu. Zmiana objętości osadów z dekarbonizacji wody prowadzi do zwiększenia ich objętości. Zmiana ta jest spowodowana powstaniem dodatkowych przestrzeni wodnych w osadzie. Długość L – współczynnika proporcjonalności do zmiany objętości osadów można wyznaczyć z zależności: $V = V_0(1 + \mu \Delta w)$, gdzie V – objętość osadu przy wilgotności w , V_0 – objętość osadu przy wilgotności w_0 , μ – współczynnik pęcznienia osadu.

$$\mu = \frac{V - V_0}{V_0 \Delta w} \quad (8.1.2)$$

gdzie: V – objętość osadu przy wilgotności w ,

V_0 – objętość osadu przy wilgotności w_0 ,

Δw – zmiana wilgotności osadu,

μ – współczynnik pęcznienia osadu.

8. PRZEPUSZCZALNOŚĆ HYDRAULICZNA OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

8.1. Wprowadzenie

Zdolność gruntu do przewodzenia wody nazywa się przepuszczalnością lub filtracją. Jednym z parametrów charakteryzujących przepływ cieczy przez ośrodek gruntowy jest stała Darcy k - współczynnik proporcjonalności w równaniu opisującym liniową zależność prędkości filtracji v od gradientu hydraulicznego i przy laminarnym przepływie cieczy przez ośrodek gruntowy:

$$v = k \cdot i \quad (8.1.1)$$

gdzie: v - prędkość filtracji (stała Darcy), m/s,

i - gradient hydrauliczny, -,

k - stała Darcy, m/s.

Stała Darcy k , określana również jako współczynnik filtracji lub przepuszczalność hydrauliczna, zależy zarówno od właściwości ośrodka porowatego, przez który następuje przepływ cieczy, tj. od porowatości i uziarnienia, jak i od właściwości samej cieczy, zmieniających się w zależności od temperatury, tj. od gęstości i lepkości. Tak więc przy określaniu przepuszczalności hydraulicznej danego materiału wynik pomiaru należałoby uzupełnić o informacje dotyczące rodzaju cieczy, dla jakiej były przeprowadzane badania oraz temperaturę, przy której wykonywano oznaczenia. W przypadku, kiedy zachodzi konieczność oceny właściwości filtracyjnych samego ośrodka gruntowego, należy posługiwać się wielkością przepuszczalności właściwej gruntu K . Zależność pomiędzy przepuszczalnością właściwą K , a przepuszczalnością hydrauliczną k jest

następująca:
$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \quad (8.1.2)$$

gdzie: k - przepuszczalność hydrauliczna, m/s,

K - przepuszczalność właściwa, m²,

γ - jednostkowy ciężar cieczy, N/m³,

μ - lepkość dynamiczna cieczy, Ns/m².

W pracy, na drodze badań laboratoryjnych, oznaczano stałą Darcy k , określając ją mianem przepuszczalności hydraulicznej, niezależnie od rodzaju filtrującej cieczy.

8.2. Przegląd literatury

Przepuszczalność hydrauliczna osadów z dekarbonizacji wody kształtuje się w granicach $10^{-7} \div 10^{-10}$ m/s, w zależności od metody oznaczania i parametrów badanych próbek. Szczegółowe wyniki pomiarów przepuszczalności hydraulicznej przedstawiono w Tabeli 8.2.1. Ze względu na niską przepuszczalność hydrauliczną osadów z dekarbonizacji wody była ona oznaczana przy zmiennym spadku hydraulicznym lub metodą konsolidacyjną. Podjęta przez Raghu D. i Hsieh'a H.-N. [1985] próba oznaczenia współczynnika przepuszczalności hydraulicznej osadów w aparacie o stałym spadku zakończyła się niepowodzeniem.

Glysson E.A. [1972] zaobserwował wyraźny wzrost przepuszczalności osadów wraz ze wzrostem wskaźnika porowatości e i dla $e = 1,0 \div 3,0$ wprowadził zależność: $k = f(e) = 7,65 \cdot 10^{-8} e^{3,7}$ ($R = 0,81$). Ocenia on osady z dekarbonizacji wody jako materiał o niskiej do bardzo niskiej przepuszczalności, o wysokiej ściśliwości, z wysokim wskaźnikiem porowatości. Raghu D. i Hsieh H.-N. [1985] określają osady jako nieprzepuszczalne.

8.3. Metodyka badań własnych

Badanie przepuszczalności hydraulicznej zagęszczonych odpadów z dekarbonizacji wody wykonano metodą laboratoryjną zgodnie z zaleceniami Instrukcji ITB nr 339/2003 [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003] w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego PW. Oznaczenia wykonano w 2 rodzajach aparatów o sztywnych ściankach bez możliwości odkształcania się w kierunku poziomym: w aparacie o średnicy $D = 100$ mm

Tabela 8.2.1. Przepuszczalność hydrauliczna osadów z dekarbonizacji wody – przegląd literatury

L.p.	Źródło	Współczynnik filtracji k		Wskaźnik zagęszczenia I_s	Metoda badania	Liczba próbek	Pochodzenie badanych odpadów	UWAGI	
		k	m/s						
1	2	3		4	5	6	7	8	
1	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2004],[2005]	$1,66 \cdot 10^{-7}$		0,9	-	3	USA (Iowa)	Gradient hydrauliczny $i = 2,5 \div 5,1$, wilgotność początkowa $w = 42,0 \%$, $S_r = 1,0$, uwzględniona poprawka na temperaturę $0,953$ ($T = 22^\circ\text{C}$)	
		$1,86 \cdot 10^{-7}$		0,9		3			$w_k = 67,0 \%$
		$1,61 \cdot 10^{-7}$		0,92		3			$w_k = 65,0 \%$
2	Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. [2005] ¹	$(1,0 \div 4,0) \cdot 10^{-9}$		-	konsolidacja	-	USA (Iowa)	-	
		$(2,1 \div 6,0) \cdot 10^{-8}$		-	zmienny spadek	6	USA	40 pomiarów dla 6 próbek, woda destylowana, $A = 19,635 \text{ cm}^2$, $a = 0,85 \text{ cm}^2$, $L = 10,59 \text{ cm}$	
3	Glysson E.A. [1972]	$10^{-7} + 10^{-9}$		-	konsolidacja	2	-	-	
		$(1,53 + 1,83) \cdot 10^{-9}$		0,9	zmienny spadek	6	USA (New Jersey)	próbki moczone 24 dni przed rozpoczęciem badania, $A = 30,1 \text{ cm}^2$, $a = 0,08 \text{ cm}^2$, $L = 6,0 \text{ cm}$	
4	Raghu D., Hsieh H.-N. [1985]	$(0,17 \div 5,18) \cdot 10^{-9}$		0,9	konsolidacja	1	-	3 pomiary	
		$10^{-9} \div 10^{-10}$		0,9	konsolidacja	3	USA (New Jersey)	próbki namaczone w odciekach ze składowiska odpadów komunalnych przez 7, 14 i 28 dni	
5	Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T., Yin Ch.-T. [1987]	$10^{-9} \div 10^{-10}$		0,9	konsolidacja	-	USA (New Jersey)	próbki namaczone w odciekach ze składowiska odpadów komunalnych przez 7, 14 i 28 dni	

¹ Maher M.H., Butziger J.M., Disalvo D.L., Oweis I.S. (1993) Lime Sludge Amended Fly Ash for Utilization as an Engineering Material. Fly Ash for Soil Improvement, Geotechnical Publication No.36, Proceedings from ASCE National Conference, April,

do badania filtracji gruntów spoistych (badania właściwe) oraz w specjalnie przystosowanym do badania filtracji, cylindrze aparatu Proctora o $D = 112,8$ mm (badanie wpływu sposobu zagęszczania próbek na właściwości filtracyjne). Po wewnętrznej stronie aparatu o $D = 100$ mm wytoczono karby na wysokość 2,0 cm od dna aparatu, w celu możliwie maksymalnego wyeliminowania niekontrolowanych przecieków. Badania przepuszczalności hydraulicznej wykonano przy zmiennym gradiencie hydraulicznym oznaczając, w określonych odstępach czasu $t_1 - t_2 = \Delta t = 15$ minut, zmiany poziomu wody naporowej (h_1, h_2) w biurecie o polu przekroju poprzecznego $a = 2,83 \cdot 10^{-5}$ m², na próbkę o powierzchni przekroju poprzecznego $A = 78,54 \cdot 10^{-4}$ m² i wysokości $L = 0,06$ m (badania właściwe) lub $A = 1 \cdot 10^{-2}$ m² i $L = 0,1$ m (cylinder aparatu Proctora). Przy oznaczaniu przepuszczalności hydraulicznej dla odcieków ze składowiska odpadów komunalnych, po tygodniu trwania badania, ze względu na zanikający przepływ przez próbkę, zmiany poziomu odcieków rejestrowano co godzinę. Przepuszczalność hydrauliczną k dla cieczy przy danej temperaturze T wyznaczono na podstawie zależności [Pisarczyk S., 2004]:

$$k_T = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (8.3.1)$$

gdzie: k_T – przepuszczalność hydrauliczna, przy danej temperaturze T , m/s,

a – powierzchnia przekroju poprzecznego rurki z cieczą dopływającą, m²,

L – wysokość próbki (droga przepływu), m,

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, m²,

Δt – czas między pomiarami naporów h_1 i h_2 , $t = t_2 - t_1$, s,

h_1, h_2 – wartości naporów hydrodynamicznych w chwilach t_1 i t_2 , m.

Badania wykonano przy grawitacyjnym przepływie cieczy przez próbkę od góry do dołu, przy wzrastającym gradiencie hydraulicznym ($i = 8 \div 40$) i malejącym ($i = 30 \div 40$). Przy wzrastających gradientach hydraulicznych $i \leq 30$ wykonano po 6 pomiarów, a przy gradientach $i \geq 30$ od 2 do 3 pomiarów przy spadkach rosnących i malejących. Ponieważ badania prowadzone były przy temperaturach cieczy filtrujących w zakresie $T = +17,8 \div 22,2$ °C dla filtracji krótkotrwałej

i $T = +14,5 \div 22,3$ °C dla filtracji długotrwałej, w obliczeniach wartości przepuszczalności hydraulicznej uwzględniono wpływ temperatury medium filtracyjnego, sprowadzając uzyskane wartości k_T do wartości przepuszczalności przy temperaturze $+10^\circ\text{C}$, zgodnie z zależnością dla przepływu wody [Pisarczyk S., 2004]:

$$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T} \quad (8.3.2)$$

gdzie: k_{10} – przepuszczalność hydrauliczna przy temperaturze $+10^\circ\text{C}$, m/s,

k_T – przepuszczalność hydrauliczna przy temperaturze T , m/s,

T – temperatura przepływającej cieczy, °C.

Ze względu na stosowanie przy badaniu filtracji długotrwałej roztworów NaOH i HCl o bardzo małych stężeniach, wykonanych na bazie wody destylowanej, o gęstościach zbliżonych do gęstości wody: $\rho = 1,0024$ g/cm³ dla 0,2 % roztworu NaOH przy $T = +20$ °C i $\rho = 1,0022$ g/cm³ dla 0,43 % roztworu HCl przy $T = +15$ °C [Supniewski J., 1958], przepuszczalność hydrauliczną przy temperaturze $+10$ °C wyznaczono z zależności (8.3.2), jak dla wody. Założono poprawność korelacji również w przypadku przepływu odcieków.

Dodatkowo określono prędkości przepływu cieczy przez próbki w zależności od gradientu hydraulicznego.

Próbki do badania przepuszczalności hydraulicznej formowano bezpośrednio w aparatach do badania filtracji przez ściskanie w prasie hydraulicznej do momentu uzyskania próbki o założonej wysokości i zagęszczeniu określonym dla danej wilgotności formowania lub, w przypadku sprawdzania wpływu metody zagęszczania próbek na przepuszczalność hydrauliczną, również przez zagęszczanie w cylindrze aparatu Proctora metodą III według normy [152]. Jednocześnie rejestrowano wielkości sił potrzebnych do uzyskania wymaganego wskaźnika zagęszczenia I_s . Próbki formowano z materiału wcześniej wysuszonego do stanu powietrznosuchego, którego wilgotność zwiększano do założonej wilgotności formowania przez dodanie odpowiedniej ilości wody wodociągowej, a następnie w

celu wyrównania wilgotności osadów, przechowywano w szczelnym pojemniku przez kilka dni. Próbki po uformowaniu pozostawiano na okres 3÷4 dni pod ciśnieniem ok. 120 cm słupa wody (lub odpowiedniej cieczy probierczej), aby uzyskać możliwy maksymalny stopień nasycenia porów cieczą. Przed rozpoczęciem pomiarów aparaty odpowietrzano. Po zakończeniu badań oznaczano wilgotność końcową próbek. Aparat do badania filtracji krótkotrwałej (badania właściwe) i długotrwałej o średnicy $D=100$ mm przedstawiono na Fot. 13, cylinder aparatu Proctora, przystosowany do badań filtracji, na Fot. 14.



Fot. 13. Aparat do badania filtracji,
o średnicy $D=100$ mm



Fot. 14. Cylinder aparatu Proctora
przystosowany do badania filtracji,
o średnicy $D=112,8$ mm

Przy badaniu filtracji krótkotrwałej wykonano 42 serie pomiarowe (F-S) w aparatach do badania filtracji o średnicy $D = 100$ mm, dla próbek formowanych przez ściskanie, i po 10 serii dla próbek formowanych przez ubijanie (F-U-P) i ściskanie (F-S-P) w cylindrze aparatu Proctora.

W celu oceny wielkości zmian właściwości filtracyjnych materiału w czasie, dla badań filtracji długotrwałej, oznaczonej w aparatach o $D = 100$ mm, pomiary prowadzono przez okres do 3,5 miesiąca, zachowując procedurę badania jak dla filtracji krótkotrwałej. W okresach pomiędzy badaniami próbki pozostawały

pod stałym działaniem gradientu hydraulicznego w zakresie $i = 35\div 40$. W tym celu na końcu elastycznych przewodów zamontowano pojemniki z cieczami, których ubytek uzupełniano w miarę upływu czasu. Oznaczenia przepuszczalności hydraulicznej wykonywano w początkowym okresie co kilka dni, pod koniec okresu badawczego co 2 tygodnie. W przypadku filtracji długotrwałej odcieków, ze względu na uciążliwość wykonywania badania, pomiary wykonywano w terminach: 3 dni, 1 tydzień, 2 tygodnie oraz około 1, 2, 3 i 3,5 miesiąc do 108 dni filtracji, licząc od daty pierwszego oznaczenia.

8.4. Filtracja krótkotrwała

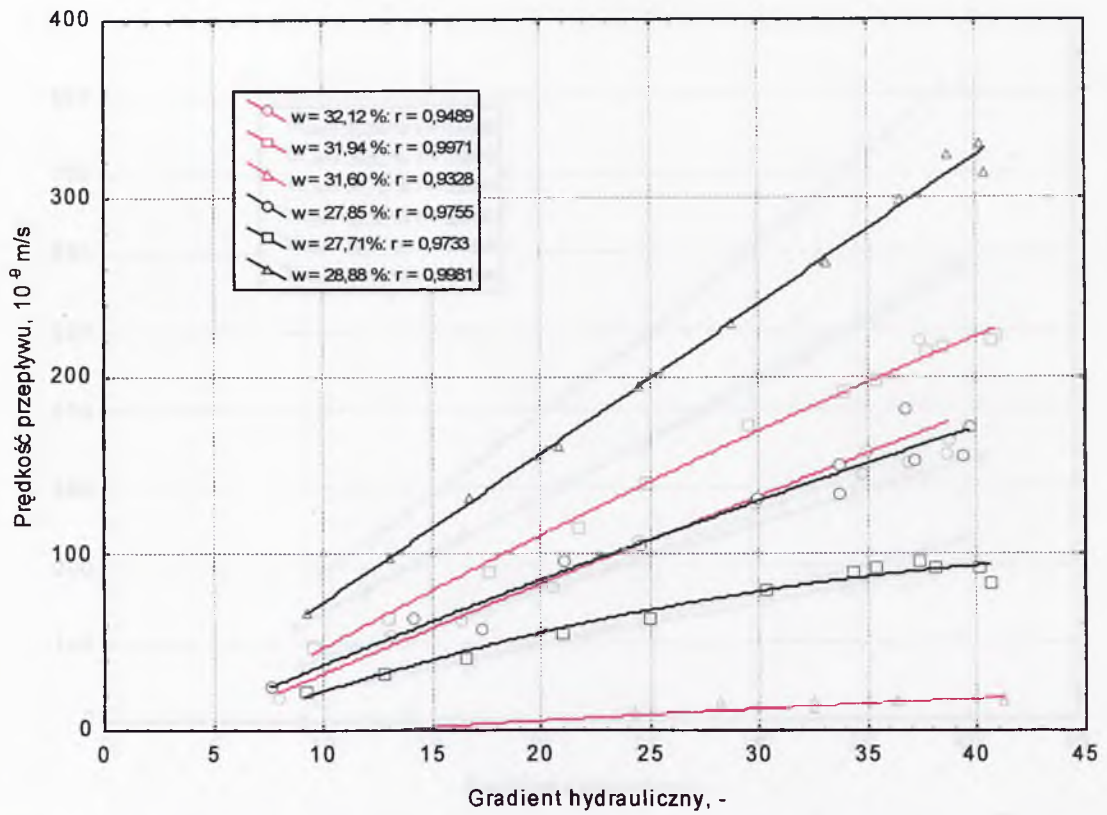
8.4.1. Zależność przepuszczalności hydraulicznej od wskaźnika zagęszczenia oraz wilgotności formowania próbek

Ze względu na podobieństwo osadów z dekarbonizacji wody do gruntów spoistych, założono, że najniższa przepuszczalność hydrauliczna będzie uzyskana przy odpowiednim zagęszczeniu przy wilgotności $w \geq w_{opt}$. Jako wiodącą krzywą zagęszczalności przyjęto oznaczenie metodą normalną w cylindrze aparatu Proctora (Tabela 6.2.8), o $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ ($I_s = 1,00$) i $w_{opt} = 28,9 \%$. Na tej podstawie dobrano przedział wilgotności, w zakresie których wykonano badania. Przepuszczalność hydrauliczną osadów z dekarbonizacji wody oznaczono przy wskaźnikach zagęszczenia $I_s = 0,95, 0,97, 1,00, 1,03$ i $1,05$ i założonych wilgotnościach formowania $w = 28, 30, 32, 34$ i 36% według planu przedstawionego w Tabeli Z.III.1. Graficznie, rozkład punktów pomiarowych, przedstawiono na Rys. Z.III.1. Teoretycznie uzyskanie próbek o parametrach leżących powyżej linii pełnego nasycenia porów wodą ($S_r = 1,0$) nie było możliwe. W praktyce, wilgotność formowania próbek odpowiadających tym punktom pomiarowym, była średnio o $\Delta w \approx 0,22 \%$ niższa od wilgotności założonej. Próbki uformowano, ale wiązało się to z ich mniejszym zagęszczeniem, obniżeniem wilgotności w wyniku wyciskania

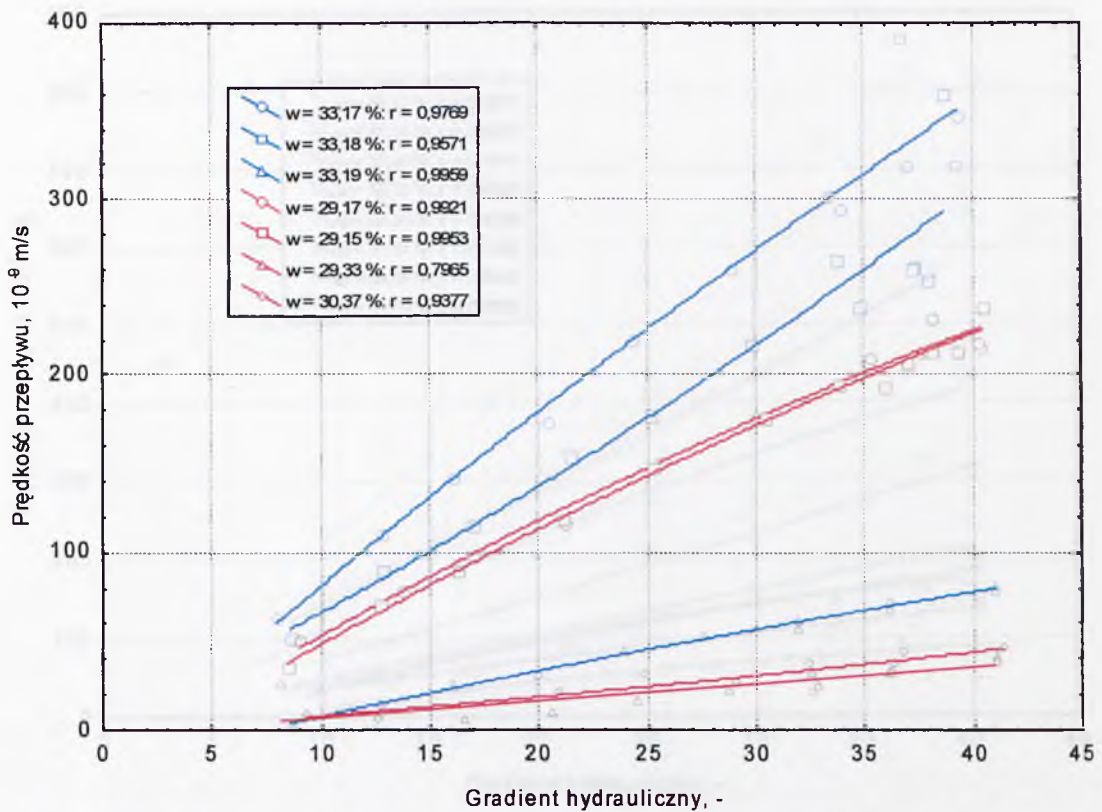
wody z porów wraz z upłynnioną masą osadu z aparatu podczas formowania pod prasą, czyli ze zmianą fizycznych właściwości materiału. Uwzględniając niedokładności pomiarów i zmiany parametrów próbek przy zagęszczaniu można przyjąć, że założone punkty pomiarowe zostały przesunięte na linię pełnego nasycenia porów wodą. Przy teoretycznej analizie wyników punkty te uwzględniono, przyjmując do aproksymacji wartości parametrów założonych.

Jako medium filtracyjne użyto wody z wodociągu warszawskiego, której odczyn wahał się w granicach $\text{pH} = 7,68 \div 8,41$. Łącznie wykonano 42 serie pomiarowe. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli Z.III.2. Ze względu na wymagania dotyczące laboratoryjnych badań przepuszczalności hydraulicznej materiałów do budowy uszczelnień składowisk odpadów, wyróżniono średnie wartości przepuszczalności hydraulicznej w zakresach gradientu $i \leq 30$ oraz $i \geq 30$, rosnącym i malejącym. Dla wykonanych oznaczeń wykreślono zależności prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego, umożliwiające oszacowanie wielkości spadku początkowego i_0 , przedstawione na: Rys. 8.4.1. dla $I_s = 1,05$, Rys. 8.4.2. dla $I_s = 1,03$, Rys. 8.4.3. dla $I_s = 1,00$ i $w = 28\%$ oraz 36% , Rys. 8.4.4. dla $I_s = 1,00$ i $w = 32\%$, Rys. 8.4.5. dla $I_s = 0,97$ i Rys. 8.4.6. dla $I_s = 0,95$. Przy analizie wyników uwzględniono pomiary przepuszczalności hydraulicznej oznaczonej przy gradientach hydraulicznych $i \geq 30$ ($k_{10,ir}$).

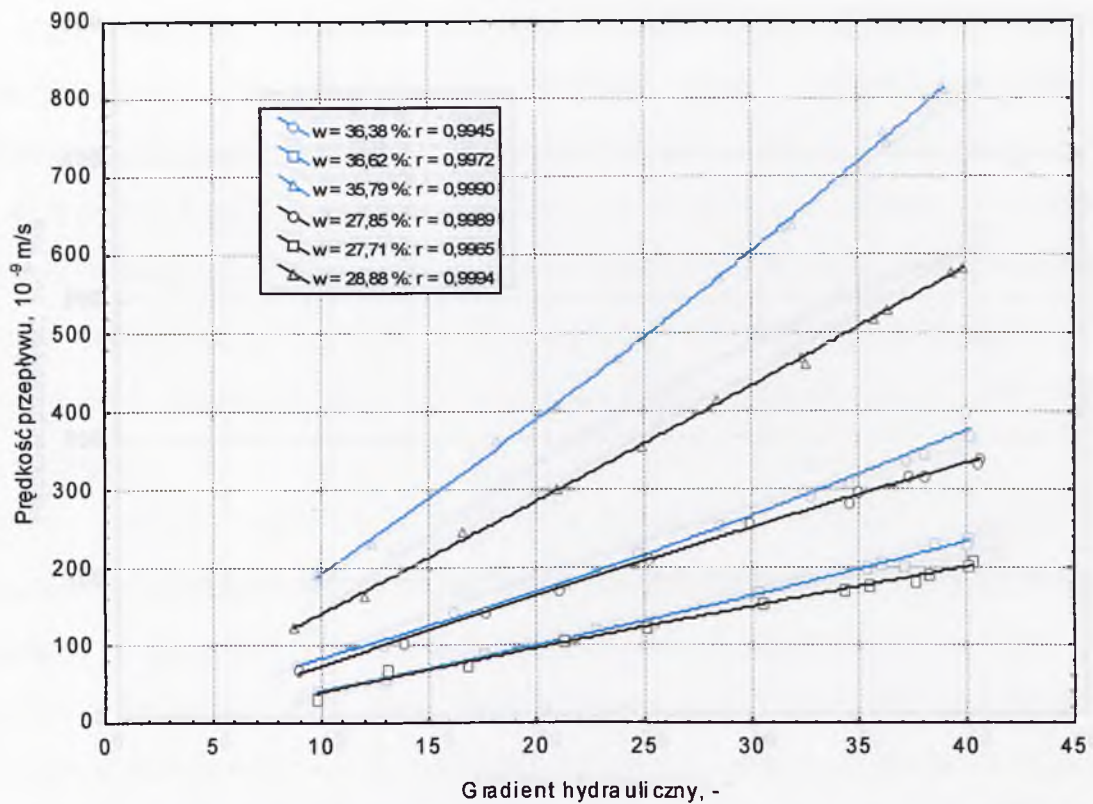
Na podstawie wykonanych oznaczeń stwierdzono paraboliczną zależność przepuszczalności hydraulicznej osadów od ich zagęszczenia i wilgotności formowania próbek $k_{10} = f(w, I_s)$. W celu dokładnego określenia wpływu tych parametrów na właściwości filtracyjne osadów skorzystano z planu eksperymentu rotacyjno-quasi-uniformalnego - PS/DS.-P: $\lambda(\bar{\lambda})$ [Polański Z., 1984] i wyznaczono wielomian aproksymujący $k_{10} = f(w, I_s)$ przy $i \geq 30$ dla 2 wartości wejściowych: $x_1 = w$ i $x_2 = I_s$, przyjmując zakres $x_1 = w [28\%; 36\%]$ i $x_2 = I_s [0,95; 1,05]$. Program badań przedstawiono w Tabeli Z.III.3.



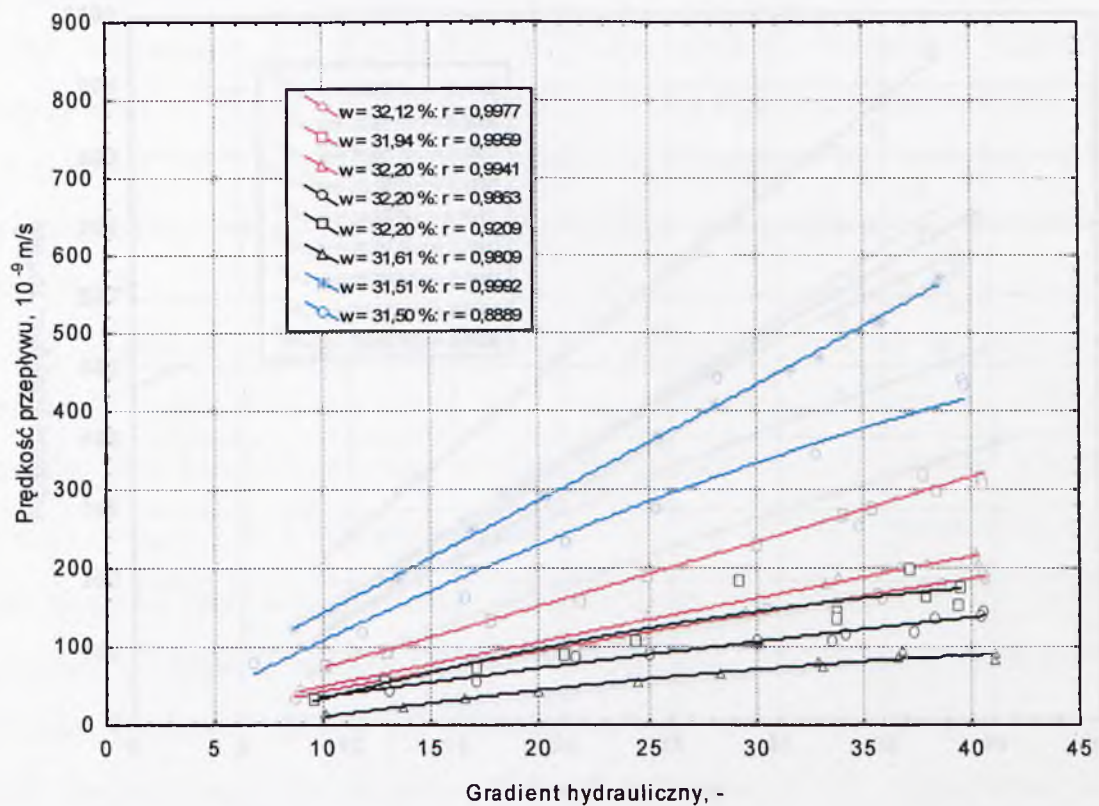
Rys. 8.4.1. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy $I_s = 1,05$



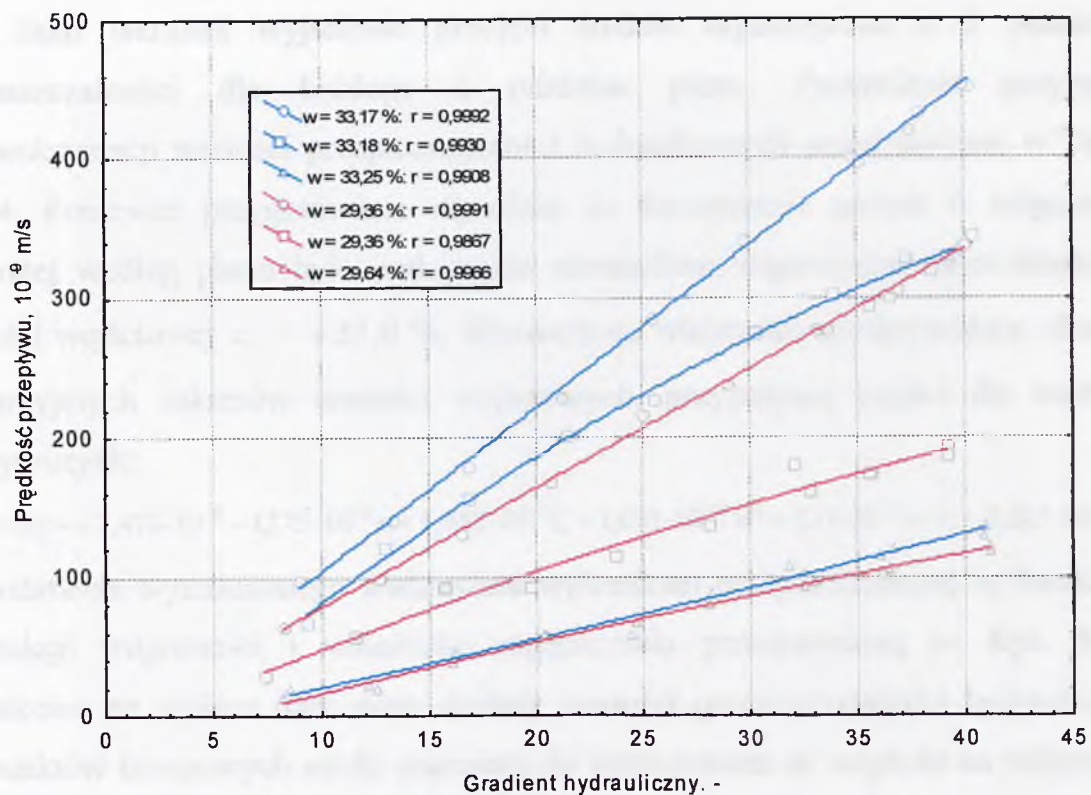
Rys. 8.4.2. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy $I_s = 1,03$



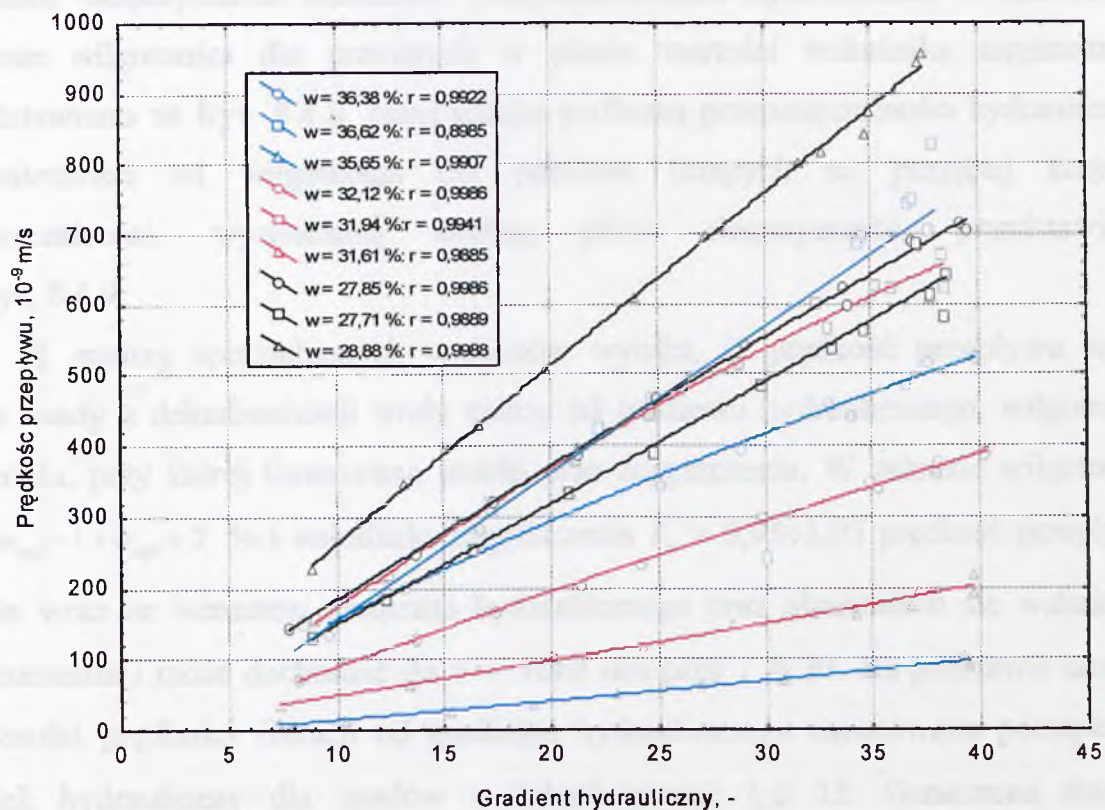
Rys. 8.4.3. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy $I_s = 1,00$ i $w = 28$ i 36 %



Rys. 8.4.4. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy $I_s = 1,00$ i $w = 32$ %



Rys. 8.4.5. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy $I_s = 0,97$



Rys. 8.4.6. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy $I_s = 0,95$

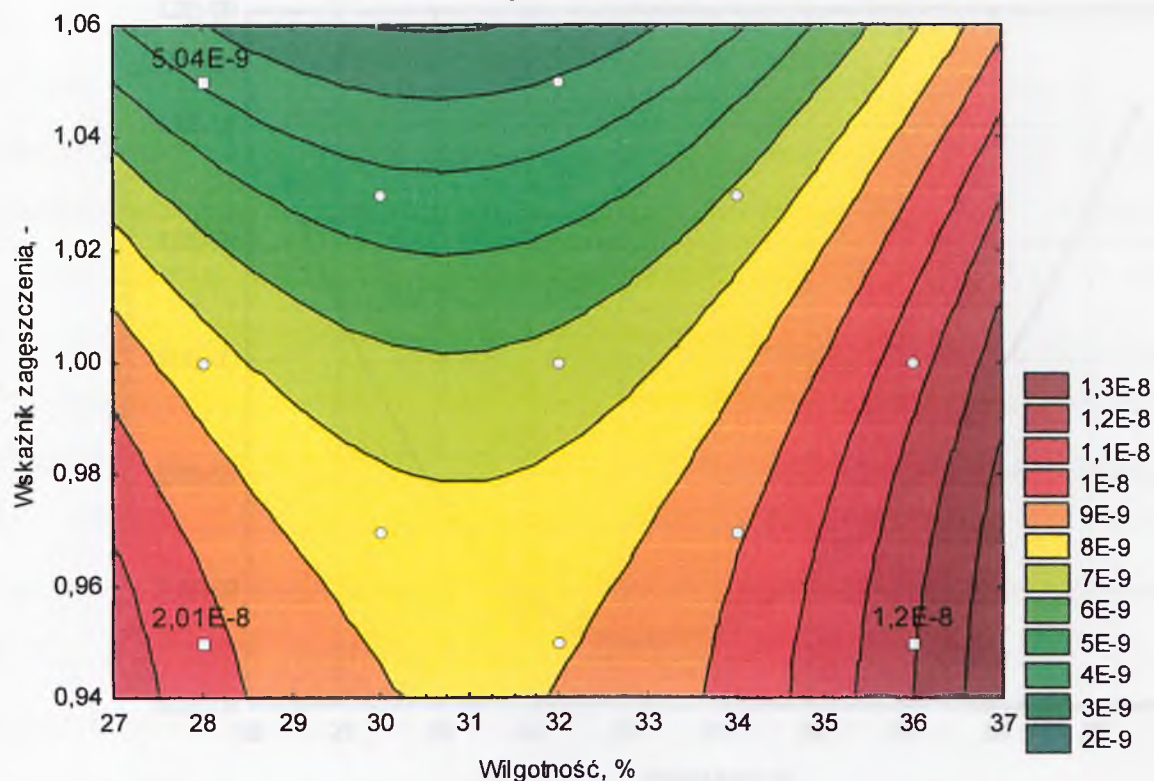
Jako wartości wyjściowe przyjęto średnie arytmetyczne z 3 pomiarów przepuszczalności dla każdego z punktów planu. Zestawienie przyjętych do aproksymacji wartości przepuszczalności hydraulicznych przedstawiono w Tabeli Z.III.4. Ponieważ przygotowanie materiału do formowania próbek o wilgotności założonej według planu było praktycznie niemożliwe, dopuszczono niedokładności wartości wejściowej $x_1 = w \pm 1,0 \%$. Wyznaczono wielomian aproksymujący, słuszny dla przyjętych zakresów wartości wejściowych, przyjmujący postać dla wartości rzeczywistych:

$$k_{10}(i \geq 30) = -7,478 \cdot 10^{-8} - 1,175 \cdot 10^{-8} w + 5,742 \cdot 10^{-7} I_s + 1,693 \cdot 10^{-10} w^2 + 1,31 \cdot 10^{-9} w \cdot I_s - 3,323 \cdot 10^{-7} I_s^2$$

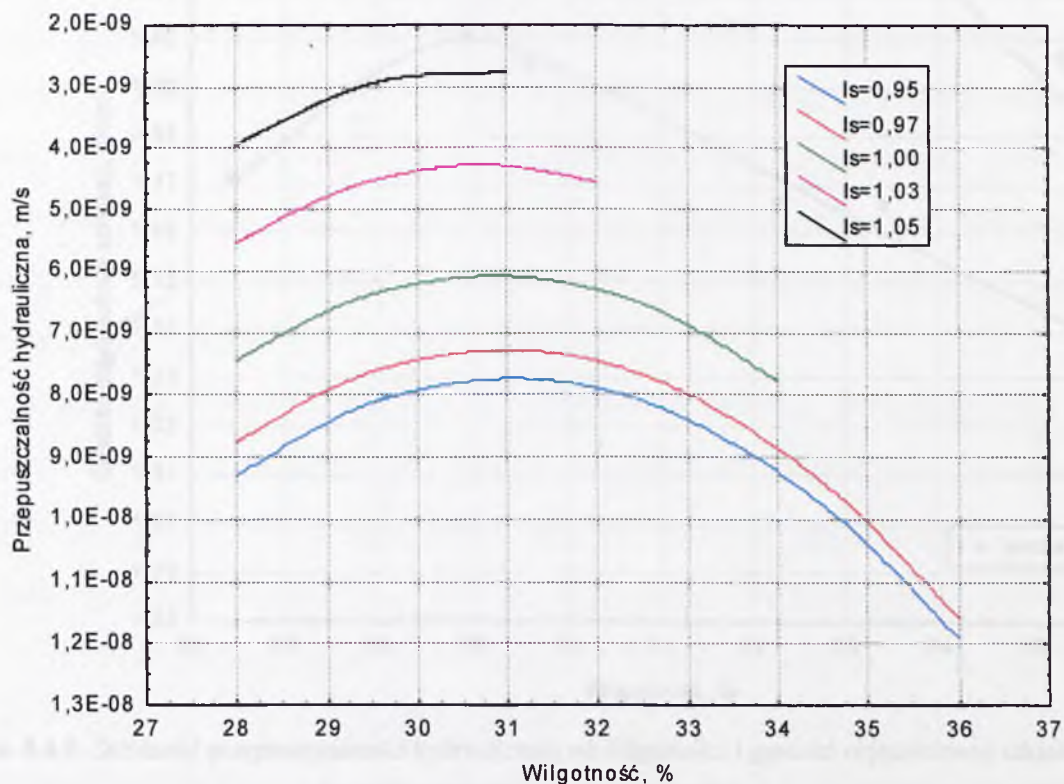
Na podstawie wyznaczonego wielomianu wykreślono przepuszczalność hydrauliczną w funkcji wilgotności i wskaźnika zagęszczenia przedstawioną na Rys. 8.4.7. Dodatkowo na wykres naniesiono średnie wartości przepuszczalności hydraulicznej dla punktów brzegowych strefy zalecanej do zagęszczania ze względu na wilgotność formowania i zagęszczalność, dla których wykonano pomiary, ale nie uwzględniono w planie eksperymentu. Zależność przepuszczalności hydraulicznej w założonym zakresie wilgotności dla przyjętych w planie wartości wskaźnika zagęszczenia przedstawiono na Rys. 8.4.8. Interpretację graficzną przepuszczalności hydraulicznej w zależności od wilgotności dla punktów leżących na przyjętej krzywej zagęszczalności, wyznaczoną według planu eksperymentu, przedstawiono na Rys. 8.4.9.

Z analizy sporządzonych wykresów wynika, iż prędkość przepływu wody przez osady z dekarbonizacji wody zależy od gradientu hydraulicznego, wilgotności materiału, przy której formowano próbki oraz zagęszczenia. W zakresie wilgotności $w \approx w_{opt} - 1 \div w_{opt} + 7 \%$ i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,95 \div 1,05$ prędkość przepływu rośnie wraz ze wzrostem gradientu hydraulicznego oraz obniżaniem się wskaźnika zagęszczenia i może dochodzić do $v = 1000 \text{ m/s}$ przy $i \geq 30$. Na podstawie analizy zależności prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego oszacowano początkowy spadek hydrauliczny dla osadów z dekarbonizacji $i_0 \leq 13$. Oznaczona średnia

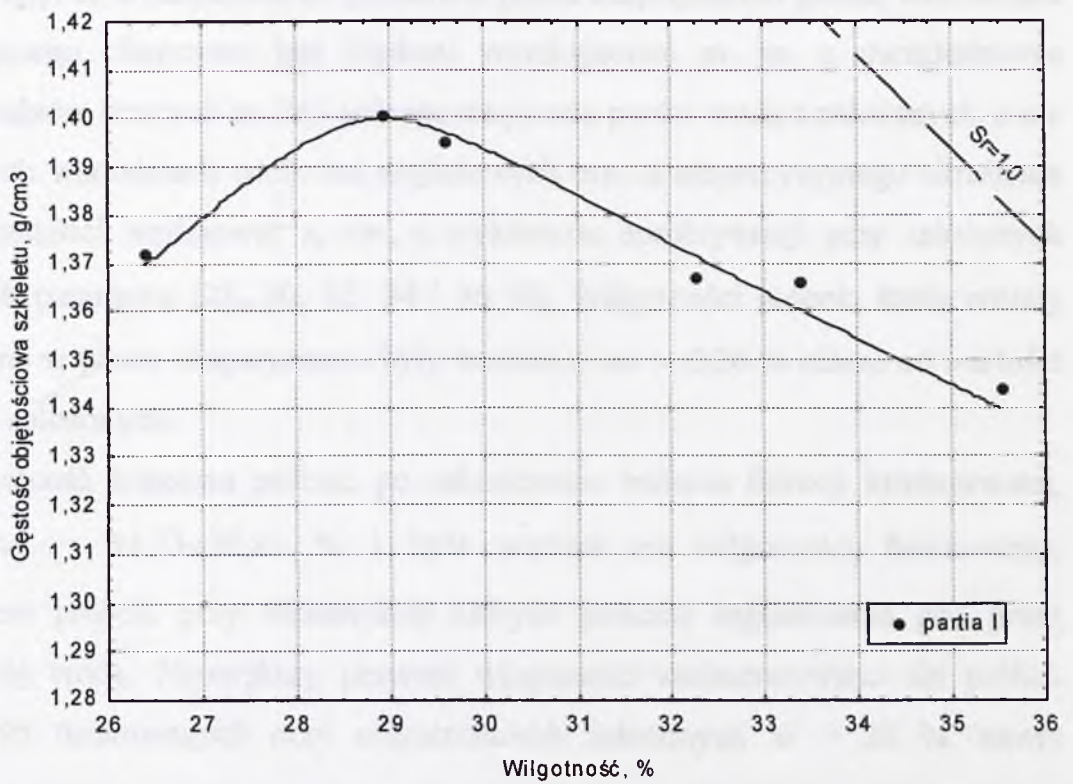
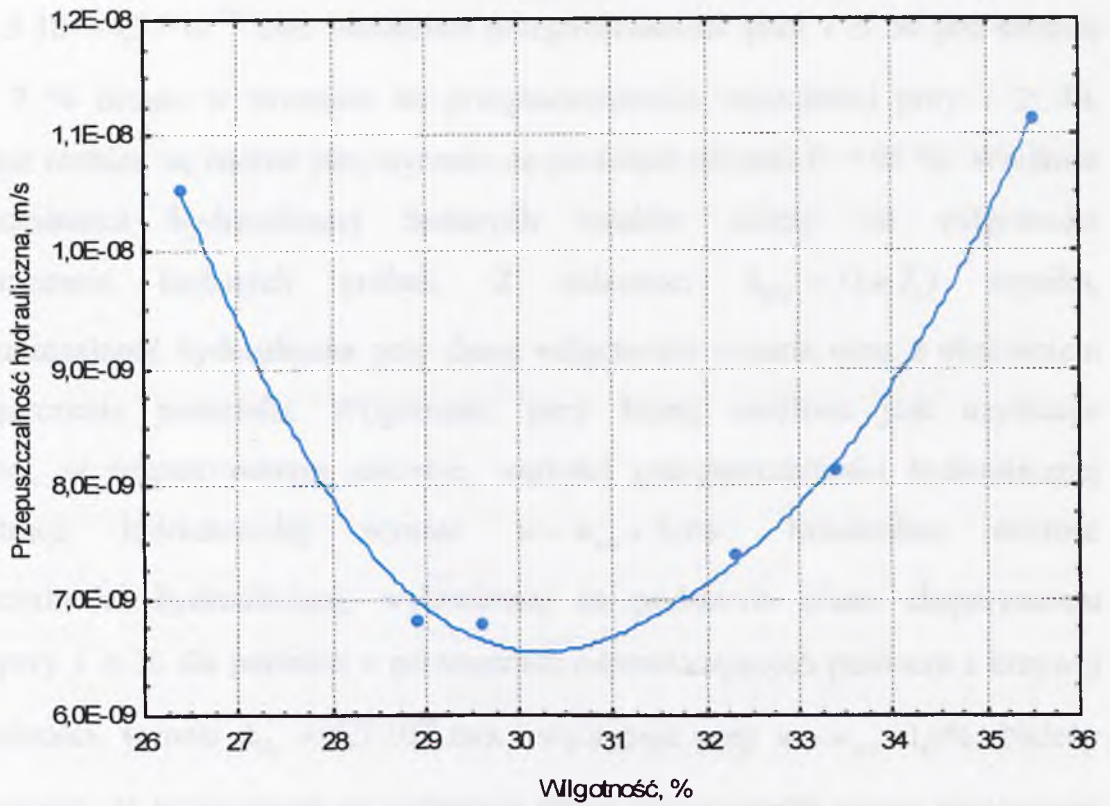
$$k_{10}(i>30) = -7,478E-8 - 1,175E-8*w + 5,742E-7*Is + 1,693E-10*w*w + 1,31E-9*w*Is - 3,323E-7*Is*$$



Rys. 8.4.7. Zależność przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności i wskaźnika zagęszczenia wyznaczona na podstawie planu eksperymentu



Rys. 8.4.8. Zależność przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności przy różnych wskaźnikach zagęszczenia, wyznaczona na podstawie planu eksperymentu



Rys. 8.4.9. Zależność przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu (metoda standardowa zagęszczalności)

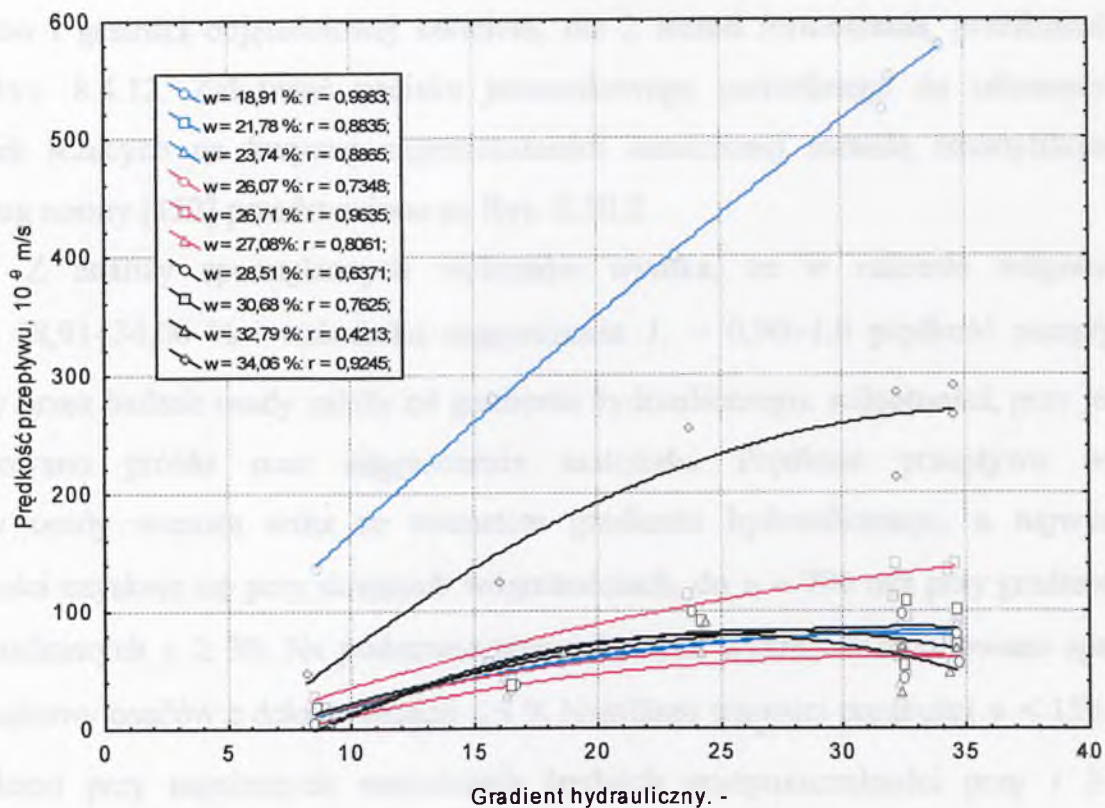
przepuszczalność hydrauliczna osadów przy gradientach $i \geq 30$ waha się w granicach $k_{10,śr} = 2,5 \cdot 10^{-8} \div 4,37 \cdot 10^{-10}$ m/s. Natomiast przepuszczalność przy $i \leq 30$ jest średnio o około 7 % niższa w stosunku do przepuszczalności oznaczonej przy $i \geq 30$, a uzyskane różnice są istotne statystycznie na poziomie ufności $P = 95$ %. Wielkość przepuszczalności hydraulicznej badanych osadów zależy od wilgotności i zagęszczenia badanych próbek. Z zależności $k_{10,śr} = f(w, I_s)$ wynika, że przepuszczalność hydrauliczna przy danej wilgotności wzrasta wraz z obniżeniem się zagęszczenia materiału. Wilgotność, przy której możliwe jest uzyskanie minimalnej, w rozpatrywanym zakresie, wartości przepuszczalności hydraulicznej dla filtracji krótkotrwałej wynosi $w \approx w_{opt} + 2,0\%$. Minimalna wartość przepuszczalności hydraulicznej, wykreślonej na podstawie planu eksperymentu dla $k_{10,śr}$ przy $i \geq 30$ dla punktów o parametrach odpowiadających punktom z krzywej zagęszczalności, wynosi $k_{10} \approx 6,5 \cdot 10^{-9}$ m/s i występuje przy $w \approx w_{opt} + 1,0\%$. Należy zwrócić uwagę, że wyznaczona na podstawie planu eksperymentu postać wielomianu aproksymującego obarczona jest błędami wynikającymi m. in. z uwzględnienia w planie punktów leżących na linii pełnego nasycenia porów wodą o założonych, a nie rzeczywistych wartościach wielkości wejściowych oraz z nieprecyzyjnego określenia wartości wielkości wejściowej $x_1 = w$, a wykonaniu aproksymacji przy założonych wielkościach parametru (28, 30, 32, 34 i 36 %). Wilgotności próbek, które zostały uwzględnione w planie eksperymentu były średnio o $\Delta w \approx 0,26$ % niższe od wartości wilgotności założonych.

Wilgotność końcowa próbek, po zakończeniu badania filtracji krótkotrwałej, wynosiła $w_k = 31,23 \div 38,83$ % i była wyższa od wilgotności formowania, za wyjątkiem próbek, przy formowaniu których podczas zagęszczania pod prasą odsączała się woda. Największy przyrost wilgotności zaobserwowano dla próbek o $I_s = 0,95$ formowanych przy wilgotnościach założonych $w = 28$ %, nawet do $\Delta w = 9,61$ %. Na podstawie analizy wyników stwierdzono ujemne, istotne statystycznie korelacje na poziomie ufności $P = 95$ % między przyrostem wilgotności i wilgotnością formowania ($R = -0,72$) oraz wskaźnikiem zagęszczenia ($R = -0,39$).

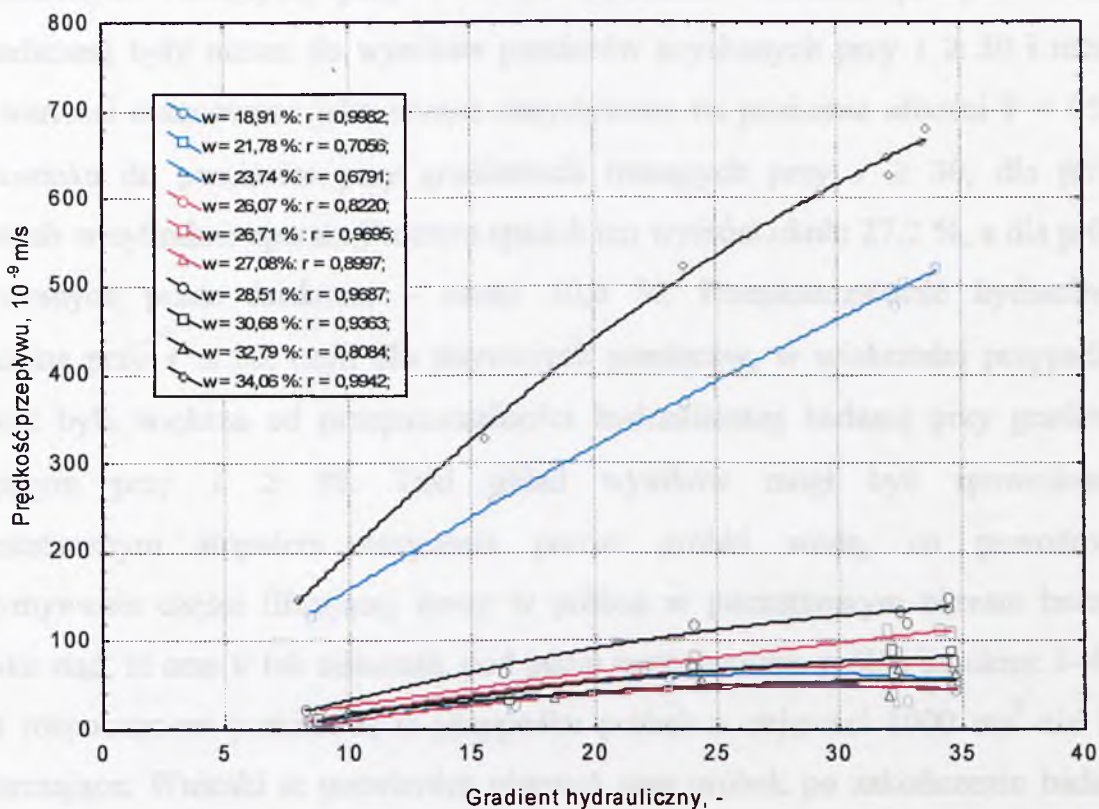
Nacisk jednostkowy potrzebny do uformowania próbek w badanym zakresie wilgotności i wskaźnika zagęszczenia wynosił $q_n = 1210 \div 15661$ kPa. Na poziomie ufności $P = 95\%$ określono istotne statystycznie zależności nacisku jednostkowego potrzebnego do uformowania próbek przy danych parametrach: dodatnią od wskaźnika zagęszczenia ($R = 0,78$) i ujemną od wilgotności formowania ($R = -0,48$).

8.4.2. Wpływ sposobu formowania próbek na przepuszczalność hydrauliczną

W celu oceny wpływu metody formowania próbek na właściwości filtracyjne osadów wykonano dodatkowe serie badań dla próbek formowanych w cylindrze aparatu Proctora. Z jednej partii przygotowanego materiału formowano w pierwszej kolejności próbkę przez mechaniczne ubijanie metodą zmodyfikowaną (metoda III wg normy [152]) w 5 warstwach, po 25 uderzeń na warstwę, z energią zagęszczenia $2,65 \text{ J/cm}^3$ (seria F-U-P). Po zważeniu, zagęszczoną w cylindrze próbkę ustawiano na stanowisku badawczym. Znając gęstość objętościową zagęszczonego materiału, formowano próbkę o analogicznych parametrach, przez ściskanie pod prasą hydrauliczną (seria F-S-P), a następnie zabezpieczano w foliowym worku przed zmianami wilgotności i umieszczano w szczelnym pojemniku na okres przeprowadzania badania na pierwszej próbce tj. 3 dni. Przy przygotowaniu materiału do badań oraz samym badaniu zachowana została procedura opisana w p.8.3. Przepuszczalność hydrauliczną przy gradientach hydraulicznych $i \leq 30$ przyjęto jako średnią arytmetyczną 3 pomiarów, a przy $i \geq 30$ - 2 pomiarów przy gradiencie rosnącym i 2 przy malejącym. Wyniki oznaczeń przedstawiono w sposób analogiczny jak w p.8.4.1, dla próbek formowanych przez zagęszczanie mechaniczne w cylindrze aparatu Proctora w Tabeli Z.III.5 i dla próbek zagęszczanych statycznie w maszynie wytrzymałościowej w Tabeli Z.III.6. Na podstawie wykonanych pomiarów sporządzono wykresy zależności prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego dla serii F-U-P (Rys.8.4.10) i serii F-S-P (Rys. 8.4.11). Interpretację graficzną zmienności przepuszczalności hydraulicznej w zależności od wilgotności początkowej



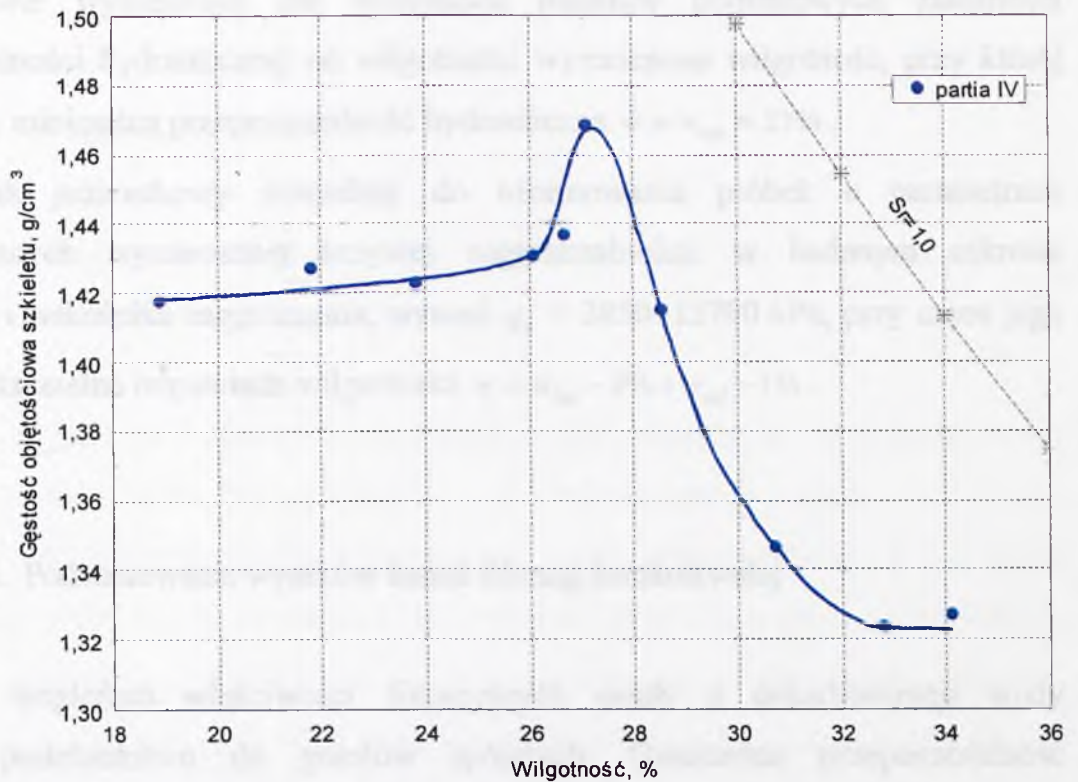
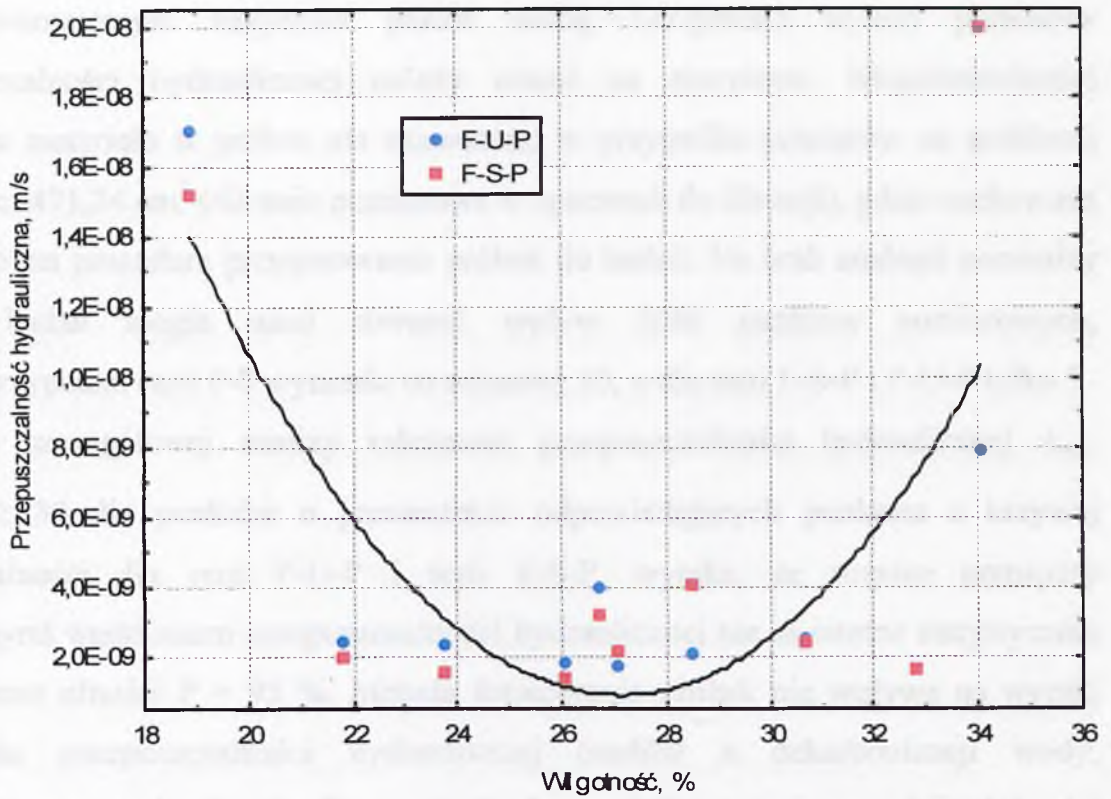
Rys. 8.4.10. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego dla serii F-U-P



Rys. 8.4.11. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego dla serii F-S-P

osadów i gęstości objętościowej szkieletu, dla 2 metod formowania, przedstawiono na Rys. 8.4.12. Zależność nacisku jednostkowego potrzebnego do uformowania próbek leżących na krzywej zagęszczalności oznaczonej metodą zmodyfikowaną według normy [152] przedstawiono na Rys. Z.III.2.

Z analizy sporządzonych wykresów wynika, że w zakresie wilgotności $w \approx 18,91 \div 34,06$ % i wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,90 \div 1,0$ prędkość przepływu wody przez badane osady zależy od gradientu hydraulicznego, wilgotności, przy jakiej formowano próbki oraz zagęszczenia materiału. Prędkość przepływu wody przez osady wzrasta wraz ze wzrostem gradientu hydraulicznego, a najwyższe wartości uzyskuje się przy skrajnych wilgotnościach, do $v \approx 700$ m/s przy gradientach hydraulicznych $i \geq 30$. Na podstawie sporządzonych wykresów oszacowano spadek początkowy osadów z dekarbonizacji $i_0 \leq 9$. Najniższe wartości prędkości $v < 150$ m/s uzyskano przy najniższych wartościach średnich przepuszczalności przy $i \geq 30$ $k_{10,śr} \approx 1 \cdot 10^{-9} \div 4 \cdot 10^{-9}$ m/s w zakresie wilgotności $w = 21,78 \div 32,79$ %. Przy gradientach hydraulicznych rosnących, przy $i < 30$ oznaczone wartości przepuszczalności hydraulicznej były niższe do wyników pomiarów uzyskanych przy $i \geq 30$ i różnice tych wartości oszacowano jako istotne statystycznie na poziomie ufności $P = 95$ %. W stosunku do pomiarów przy gradientach rosnących przy $i \geq 30$, dla próbek ubijanych w cylindrze aparatu Proctora spadek ten wyniósł około 27,2 %, a dla próbek formowanych przez ściskanie – około 20,6 %. Przepuszczalność hydrauliczna oznaczana przy $i \leq 30$, czyli dla pierwszych pomiarów, w większości przypadków również była większa od przepuszczalności hydraulicznej badanej przy gradientie malejącym przy $i \geq 30$. Taki układ wyników mógł być spowodowany niedostatecznym stopniem nasycenia porów próbki wodą, co powodowało zatrzymywanie części filtrującej wody w próbce w początkowym okresie badania. Wynika stąd, iż czas i/ lub ciśnienie, pod jakim pozostawiano próbki na okres 3–4 dni przed rozpoczęciem pomiarów, w przypadku próbek o objętości 1000 cm^3 nie było wystarczające. Wnioski te potwierdza również stan próbek po zakończeniu badania, na których widoczne były wyraźnie jaśniejsze i ciemniejsze plamy świadczące



Rys. 8.4.12. Zależność przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu dla serii F-U-P i F-S-P (metoda zmodyfikowana zagęszczalności)

o nierównomiernym nasyceniu porów wodą. Otrzymane wyniki pomiarów przepuszczalności hydraulicznej należy uznać za zawyżone. Niejednorodności w kolorze materiału w próbce nie zauważono w przypadku pomiarów na próbkach o objętości $471,24 \text{ cm}^3$ (42 serie pomiarowe w aparatach do filtracji), gdzie zachowana była podobna procedura przygotowania próbek do badań. Na brak analogii pomiędzy seriami badań mogła mieć również wpływ ilość punktów pomiarowych, która w przypadku serii F-S wynosiła co najmniej 10, a dla serii F-S-P i F-U-P tylko 7.

Ze szczegółowej analizy zależności przepuszczalności hydraulicznej $k_{10,śr}$ przy $i \geq 30$ dla punktów o parametrach odpowiadających punktom z krzywej zagęszczalności dla serii F-U-P i serii F-S-P, wynika, że różnice pomiędzy oznaczonymi wartościami przepuszczalności hydraulicznej nie są istotne statystycznie na poziomie ufności $P = 95 \%$. Metoda formowania próbek nie wpływa na wyniki oznaczenia przepuszczalności hydraulicznej osadów z dekarbonizacji wody. Na podstawie wykreślonej dla wszystkich punktów pomiarowych zależności przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności wyznaczono wilgotność, przy której uzyskuje się minimalną przepuszczalność hydrauliczną $w \approx w_{opt} \approx 27\%$.

Nacisk jednostkowy potrzebny do uformowania próbek o parametrach odpowiadających wyznaczonej krzywej zagęszczalności, w badanym zakresie wilgotności i wskaźnika zagęszczenia, wynosi $q_n = 3850 \div 12700 \text{ kPa}$, przy czym jego wartość maksymalna odpowiada wilgotności $w \approx w_{opt} - 3\% \div w_{opt} - 1\%$.

8.4.3. Podsumowanie wyników badań filtracji krótkotrwałej

Pod względem właściwości filtracyjnych osady z dekarbonizacji wody wykazują podobieństwo do gruntów spoistych. Oznaczona przepuszczalność hydrauliczna $k_{10} \approx 10^{-8} \div 10^{-10} \text{ m/s}$ jest charakterystyczna dla glin i można ją określić jako bardzo niską [Pisarczyk S., 2001]. Przepływ przez osady występuje, podobnie jak w gruntach spoistych, dopiero po przekroczeniu spadku początkowego i_0 [Roza, S.A., 1950], który określony na podstawie zależności prędkości filtracji od gradientu

hydraulicznego przy założeniu, że wykres jest linią prostą, wynosi $i_0 \leq 13$. Wpływ na właściwości filtracyjne osadów ma wskaźnik zagęszczenia oraz wilgotność formowania, a minimalną wartość przepuszczalności hydraulicznej uzyskuje się przy zagęszczaniu osadów po prawej stronie krzywej zagęszczalności przy wilgotności około $w = w_{opt} + 2\%$.

Badania laboratoryjne przepuszczalności hydraulicznej osadów z dekarbonizacji wody zaleca się wykonywać na próbkach, których objętość nie przekracza 500 cm^3 , formowanych statycznie lub dynamicznie, bezpośrednio w komorze aparatu.

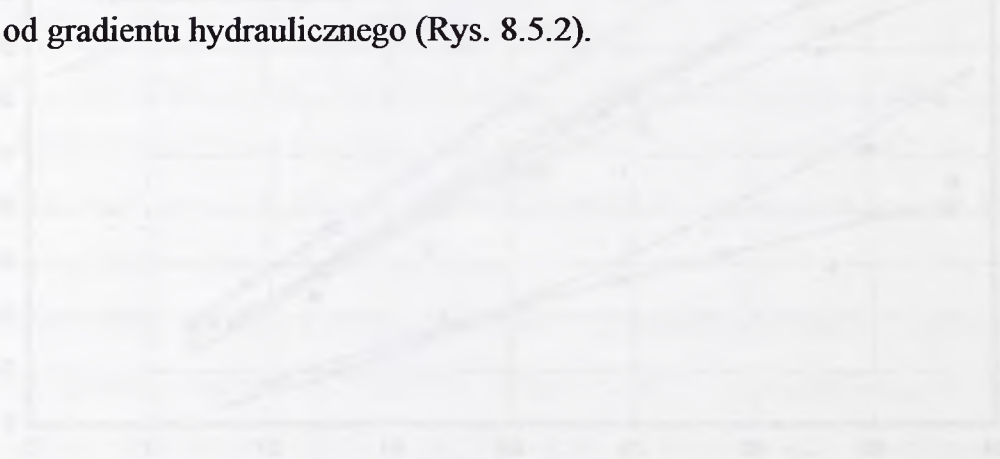
Dla badanych osadów z dekarbonizacji wody należy przyjąć wilgotność gwarantującą uzyskanie najniższej przepuszczalności hydraulicznej $w \approx w_{opt} + 2,0\%$, a przy danym zagęszczeniu i wilgotności formowania wartość przepuszczalności hydraulicznej przyjmować na podstawie opracowanej zależności (Rys. 8.4.7).

8.5. Filtracja długotrwała

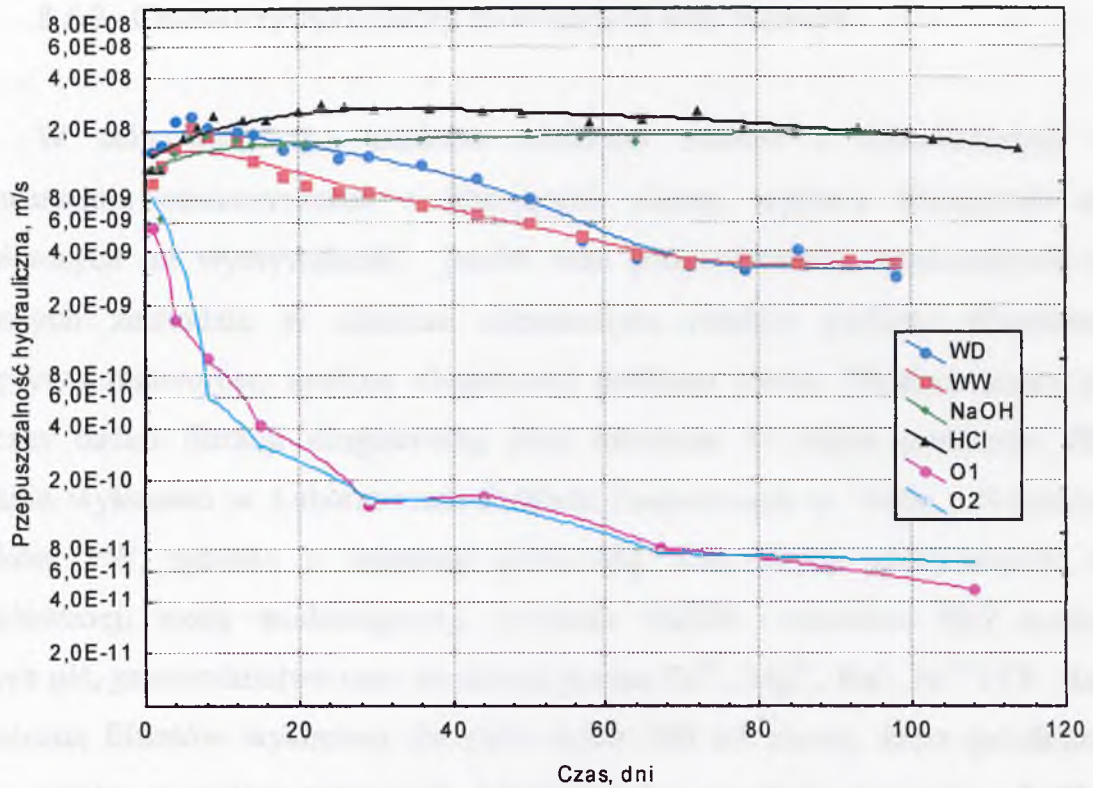
8.5.1. Długotrwałe badania przepuszczalności hydraulicznej przy wykorzystaniu cieczy probierczych

Przeprowadzone badania filtracji długotrwałej polegały na oznaczeniu zmian przepuszczalności hydraulicznej osadów z dekarbonizacji wody w czasie, przy przepływie różnych cieczy probierczych: wody wodociągowej (WW), wody destylowanej (WD), 0,2 % roztworu zasady sodowej (NaOH) o $\text{pH} \geq 11,0$ i 0,43 % roztworu kwasu solnego (HCl) o $\text{pH} \leq 3,0$ oraz odcieków ze składowiska odpadów komunalnych w Otwocku (O1 i O2). Ciecze probiercze dobrano zgodnie z zaleceniami Instrukcji ITB nr 339/2003 [Wysokiński L., Łukasik S., Majer E., 2003] zawierającej szczegółowe wytyczne dotyczące badań przepuszczalności hydraulicznej gruntów do budowy przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów. Do badania wybrano próbki o parametrach odpowiadających centrum planu eksperymentu (p. 8.4.1)

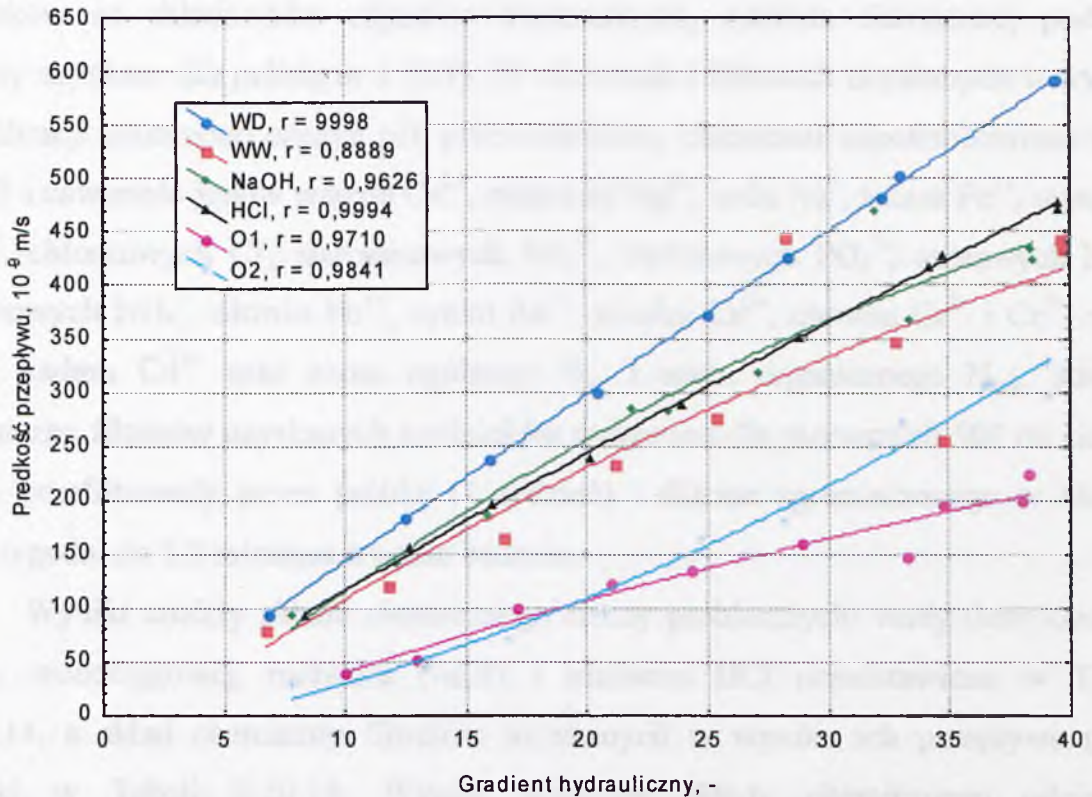
o wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1,00$ i założonej wilgotności $w = 32 \%$. Przed rozpoczęciem pomiarów, w celu uzyskania maksymalnie wysokiego nasycenia porów materiału cieczą, próbki pozostawiono pod ciśnieniem ok. 120 cm słupa danej cieczy probierczej przez okres 3-4 dni, a w przypadku próbki O2 przez okres 18 dni. Każdorazowo, przed przystąpieniem do pomiarów, aparaty odpowietrzano. Powietrze pod pokrywą aparatu, pojawiało się praktycznie tylko w początkowym okresie filtracji roztworem HCl. Ze względu na możliwość zachodzenia reakcji chemicznej aparat odpowietrzano 2 razy w tygodniu. Podczas 2 pierwszych tygodni filtracji, w rurce doprowadzającej roztwór dwukrotnie pojawiły się pęcherzyki powietrza. Po upływie około 1,5 miesiąca, kiedy nie zauważano uchodzenia powietrza podczas odpowietrzania aparatu, próbkę odpowietrzano już tylko przed każdym badaniem. Charakterystykę badanych próbek przedstawiono w Tabeli Z.III.7. Podczas formowania próbek oraz oznaczeń przepuszczalności hydraulicznej zachowano procedurę opisaną w p.4.3. Uzyskane wartości przepuszczalności hydraulicznej w czasie zestawiono: w Tabeli Z.III.8 dla serii WD, w Tabeli Z.III.9 dla serii WW, w Tabeli Z.III.10 dla serii NaOH, w Tabeli Z.III.11 dla serii HCl, w Tabeli Z.III.12 dla serii O1 i w Tabeli Z.III.13 dla serii O2. Zmianę przepuszczalności hydraulicznej osadów w zależności od medium filtracyjnego i czasu jego działania na próbkę przedstawiono na Rys. 8.5.1. W celu oceny spadku początkowego przy przepływie cieczy probierczych, dla pierwszych pomiarów wykreślono zależności prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego (Rys. 8.5.2).



Rys. 8.5.2. Zależności prędkości przepływu od gradientu hydraulicznego dla różnych medium filtracyjnych (wartości przybliżone)



Rys. 8.5.1. Zmiana przepuszczalności hydraulicznej przy $i \geq 30$ w czasie dla cieczy probierczych



Rys. 8.5.2. Zależność prędkości filtracji od gradientu hydraulicznego przy przepływie różnych cieczy probierczych

8.5.2. Charakterystyka cieczy probierczych oraz filtratów

W celu wstępnego ustalenia zdolności osadów z dekarbonizacji wody do usuwania zanieczyszczeń z filtrujących cieczy, wpływu filtrujących cieczy probierczych na wymywalność jonów oraz prognozowania ewentualnych zmian mogących zachodzić w składzie chemicznym osadów podczas długotrwałego przepływu roztworów, analizie chemicznej poddano cieczy filtrujące przez próbki podczas badań filtracji długotrwałej oraz uzyskane w czasie pomiarów filtraty. Badania wykonano w Laboratorium Zakładu Zaopatrzenia w Wodę i Oczyszczania Ścieków PW zgodnie z normami [154-166]. Dla cieczy probierczych: wody destylowanej, wody wodociągowej, roztworu NaOH i roztworu HCl oznaczono odczyn pH, przewodnictwo oraz zawartość jonów Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{3+} i Cl^- . Analizę chemiczną filtratów wykonano dla pierwszych 500 ml cieczy, które przefiltrowały przez próbkę, a następnie po 1, 2, 4 tygodniach i po około 3 miesiącach filtracji. W przypadku badania zmian przepuszczalności hydraulicznej przy przepływie odcieków ze składowiska odpadów komunalnych, analizie chemicznej poddano filtraty uzyskane dla próbki nr 1 (O1). W odciekach i filtratach uzyskanych w wyniku ich filtracji oznaczono odczyn pH, przewodnictwo, chemiczne zapotrzebowanie tlenu ChZT i zawartość jonów wapnia Ca^{2+} , magnezu Mg^{2+} , sodu Na^+ , żelaza Fe^{3+} , manganu Mn^{2+} , chlorkowych Cl^- , siarczanowych SO_4^{2-} , fosforowych PO_4^{3-} , azotowych NO_3^- , amonowych NH_4^+ , ołowiu Pb^{2+} , cynku Zn^{2+} , miedzi Cu^{2+} , chromu Cr^{2+} i Cr^{7+} , niklu Ni^{2+} , kadmu Cd^{2+} oraz azotu ogólnego N_{og} i azotu organicznego N_{org} . Analizę chemiczną filtratów uzyskanych z odcieków wykonano dla pierwszych 500 ml cieczy, które przefiltrowały przez próbkę (1 tydzień) i filtratu zgromadzonego w okresie od 2 tygodni do 3,5 miesiąca trwania badania.

Wyniki analizy składu chemicznego cieczy probierczych: wody destylowanej, wody wodociągowej, roztworu NaOH i roztworu HCl przedstawiono w Tabeli Z.III.14, a skład chemiczny filtratów uzyskanych w wyniku ich przepływu przez próbki w Tabeli Z.III.15. Wyniki oznaczeń składu chemicznego odcieków i uzyskanych z nich filtratów przedstawiono w Tabeli Z.III.16. Na podstawie wyników badań składu chemicznego odcieków wykorzystanych do oznaczenia

przepuszczalności hydraulicznej można zauważyć, że charakteryzuje je wysoki ładunek zanieczyszczeń, których określone wartości znacznie przewyższają najwyższe dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń dla ścieków wprowadzanych do wód lub ziemi według rozporządzenia [147] oraz graniczne wartości zanieczyszczeń jakości wód powierzchniowych i podziemnych ujęte w rozporządzeniu [139]. Interpretację graficzną zmian składu chemicznego uzyskiwanych filtratów w porównaniu do parametrów filtrujących cieczy przedstawiono: na Rys. Z.III.3 dla odczynu pH, na Rys.Z.III.4 dla przewodnictwa i kolejno na Rys. Z.III.5-9 dla stężenia jonów Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fe^{3+} i Cl^- .

Podczas 3,5 miesięcznego okresu badawczego prowadzono obserwacje filtrujących cieczy probierczych oraz uzyskiwanych podczas badania filtratów.

Roztwory NaOH i HCl, bezbarwne i bezwonne, przypominały wodę i wizualnie odróżnienie ich było praktycznie niemożliwe. Odcieki wyraźnie różniły się od pozostałych cieczy probierczych, stanowiły roztwór o ciemnobrązowym kolorze, z drobnymi zawiesinami i wydzierały bardzo nieprzyjemny zapach. Po 1,5-2 miesiącach filtracji w rurkach doprowadzających do próbek wodę wodociągową, wodę destylowaną, roztwór NaOH i HCl zauważono zmiany w strukturze cieczy, pojawiła się kłaczkowata zawiesina, która przy ostatnim pomiarze przepuszczalności (po około 3 miesiącach filtracji), praktycznie uniemożliwiała obniżanie gradientu hydraulicznego. Po około 1-1,5 miesiąca filtracji roztworem NaOH na powierzchni naczynia, w którym gromadzono filtrat, zaczął być widoczny białawy nalot, a po upływie około 2 miesięcy odpływ pokrył się białą, krystaliczną substancją, która rozpuszczała się w wodzie. W przypadku filtracji odcieków ze składowiska odpadów komunalnych, w okresach pomiędzy poszczególnymi badaniami na ściankach pojemników, zapewniających utrzymanie stałego gradientu $i > 30$, zaobserwowano ciemną zawiesinę, a w rurkach doprowadzających odcieki do próbek widać było rozsegregowanie się odcieków: ciemniejszą ciecz z zawiesiną poniżej jaśniejszych odcieków. Aparat do badania filtracji roztworem zasady sodowej, z białym, krystalicznym osadem na odpływie przedstawiono na Fot. 15.



Fot. 15. Biały, krystaliczny osad powstały na odpływie aparatu, po około 80 dniach filtracji długotrwałej roztworem zasady sodowej

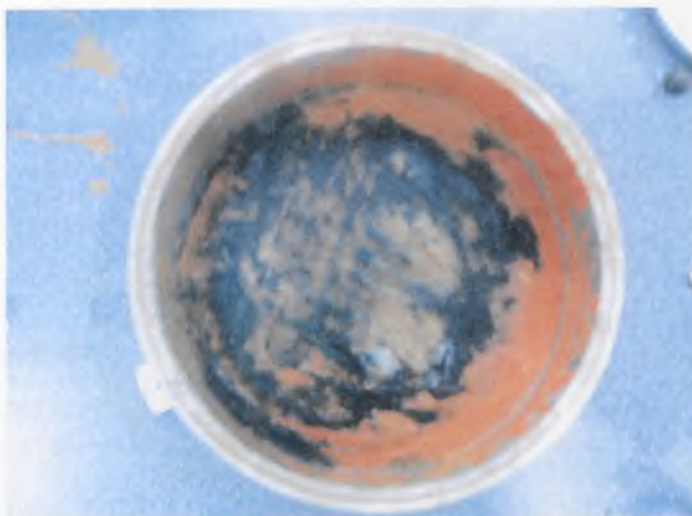
Pierwsze filtraty uzyskiwane z badań wodą wodociagową, wodą destylowaną, roztworem NaOH i HCl kolorem praktycznie nie różniły się od filtrujących cieczy. Z upływem czasu przybierały barwę jasnożółtą do ciemnożółtej. Natomiast już w pierwszych dniach trwania badania odciekami komunalnymi, uzyskiwane filtraty charakteryzowały się jasnożółtym kolorem, który przybierał na intensywności wraz z upływem czasu trwania badania, aż do uzyskania, po upływie około miesiąca, barwy ciemnobrązowej, nieznacznie jaśniejszej od barwy wykorzystywanych w badaniu odcieków. W czasie trwania badania ilość uzyskiwanych filtratów malała i po upływie około 2 miesięcy przepływ był praktycznie niezauważalny. Po zakończeniu badań filtracji długotrwałej i zdjęciu górnych części aparatów filtracyjnych zaobserwowano na próbkach:

- WD – brak nieprzyjemnego zapachu, górna powierzchnia bez większych zanieczyszczeń i zmian, jedna niewielka czarna plamka w środkowej części, po usunięciu 2-cm warstwy odpadów brak jakichkolwiek zmian wynikających z długotrwałej filtracji (Fot.16),
- WW – nieprzyjemny zapach, zawiesina na powierzchni górnej pokrywy filtracyjnej, na powierzchni próbki czarny nalot dający się usunąć przez zdrapanie, do głębokości około 0,5 cm zmiany w kolorze osadów na brązowo-zielony, pojawiające się lokalnie, nawet do połowy wysokości próbki (Fot. 17),

- NaOH – brak nieprzyjemnego zapachu, idealny stan powierzchni próbki, jak przed rozpoczęciem badania, górna powierzchnia nieznacznie mniej twarda w porównaniu z powierzchniami próbek po filtracji WD i WW (Fot. 18),
- HCl – brak nieprzyjemnego zapachu, na powierzchni górnej pokrywy filtracyjnej biała zawiesina zajmująca powierzchnię o średnicy około 2,0 cm, górna powierzchnia próbki ciemniejsza w porównaniu do stanu sprzed filtracji i rozluźniona do głębokości około 0,5 cm, poniżej materiał twardy, o jaśniejszym odcieniu, w środkowej części kolor zbliżony odcieniem do brązu (Fot. 19),
- odcieki: O1 i O2 - bardzo nieprzyjemny zapach, zbliżony do zapachu odcieków ze składowiska odpadów komunalnych, na powierzchni górnych pokryw filtracyjnych czarny osad będący pozostałością po filtrujących odciekach, problemy ze zdjęciem górnych pokryw filtracyjnych, w wyniku czego górne warstwy próbek zostały częściowo naruszone i usunięte na dolnej powierzchni pokryw, górne powierzchnie próbek o kolorze ciemnozielono-czarnym, po usunięciu 2-cm warstwy materiału brak zauważalnych zmian w strukturze osadów w próbce O1 i lokalna ciemniejsza, czarna plama w próbce O2 (Fot. 20).



Fot. 16. Powierzchnia próbki osadów po filtracji długotrwałej wodą destylowaną



Fot. 17. Powierzchnia próbki osadów po filtracji długotrwałej wodą wodociągową, po wstępnym usunięciu osadu przez zdrapanie



Fot. 18. Powierzchnia próbki osadów po filtracji długotrwałej 0,2 % roztworem NaOH (pH > 11)



Fot. 19. Powierzchnia próbki osadów po filtracji długotrwałej 0,43 % roztworem HCl (pH < 3)



Fot.20. Górna powierzchnia próbki nr 2 (O2) po 3,5 miesiąca filtracji długotrwałej odciekami ze składowiska odpadów komunalnych

8.5.3. Wpływ wykorzystanych cieczy probierczych na uziarnienie osadów

Dla pomiarów przepuszczalności hydraulicznej próbek WD, WW, NaOH, HCl i O1 podjęto próbę oceny wpływu wykorzystanych cieczy probierczych na uziarnienie osadów z dekarbonizacji wody. Materiał do oznaczenia składu granulometrycznego pobrano ze środkowych części próbek, tj. z głębokości 2÷4 cm. Pomiarów wykonano metodą analizy areometrycznej zgodnie z normą [152] z dodatkiem Na_2CO_3 i Na_3PO_4 jako stabilizatora oraz na aparacie laserowym z i bez wykorzystania ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek, analogicznie jak w p.6.2.3.

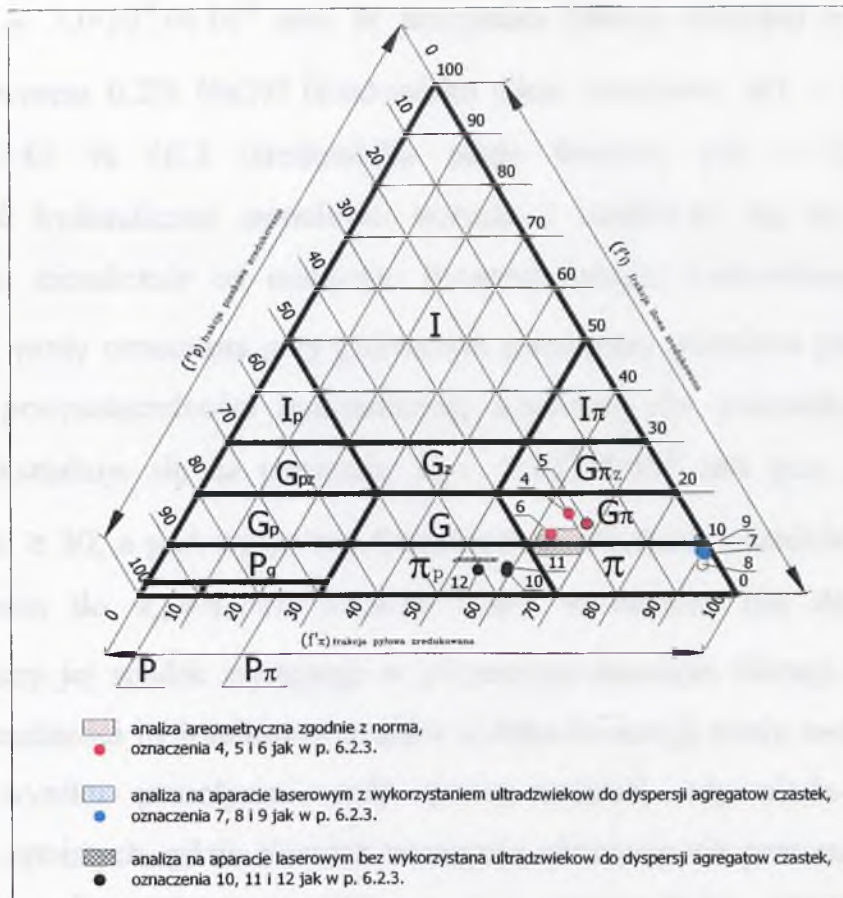
Procentową zawartość frakcji w poszczególnych przedziałach miarowych dla osadów po filtracji długotrwałej, w zestawieniu z oznaczeniami wykonanymi dla „czystych osadów” (p. 6.2.5), przedstawiono w Tabeli Z.III.17 dla analizy areometrycznej wykonanej zgodnie z normą, w Tabeli Z.III.18 dla analizy wykonanej w aparacie laserowym z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek i w Tabeli Z.III.19 dla analizy wykonanej w aparacie laserowym bez użycia ultradźwięków. Określone zawartości frakcji zredukowanych (f'_i , f'_π , f'_p), rodzaj gruntu ustalony na podstawie trójkąta Fereta, średnice miarodajne d_{60} i d_{10} oraz wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia U przedstawiono w Tabeli 8.5.1.

Tabela 8.5.1. Wyniki oznaczeń analiz areometrycznych osadów z dekarbonizacji wody po filtracji długotrwałej

Nr oznaczenia	Rodzaj analizy	Próbka	Zawartość frakcji zredukowanej			Rodzaj gruntu wg trójkąta Fereta	Średnica miarodajna		Wskaźnik różnoziarnistości uziarnienia U	Klasyfikacja ze względu na wskaźnik różnoziarnistości
			iłowej (f _i)	pyłowej (f _π)	piaskowej (f _p)		d ₆₀	d ₁₀		
-	-	-	%	%	%	-	mm	mm	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Analiza areometryczna	WD	10,0	70,0	20,0	Pył/ głina pylasta	0,028	0,001	28,0	bardzo różnoziarnisty
2		WW	13,0	61,0	26,0	Głina pylasta	0,035	0,0012	29,2	
3		NaOH	8,0	62,0	30,0	Pył/ pył piaszczysty	0,038	0,0028	13,6	różnoziarnisty
4		HCl	8,0	61,0	31,0	Pył piaszczysty	0,038	0,0029	13,1	
5		O1	9,0	65,0	26,0	Pył	0,033	0,0025	13,2	
6		Analiza laserowa z ultradźwiękami	WD	11,0	88,6	0,4	Głina pylasta	0,013	0,0018	7,2
7	WW		11,3	87,4	1,3	0,013		0,0018	7,2	
8	NaOH		10,5	88,7	0,8	0,014		0,0017	8,2	
9	HCl		11,5	88,0	0,5	0,013		0,0019	7,8	
10	O1		11,6	87,9	0,5	0,013		0,0017	7,7	
11	Analiza laserowa bez ultradźwięków	WD	6,7	56,5	36,8	Pył piaszczysty	0,032	0,0032	10,0	różnoziarnisty
12		WW	6,6	53,8	39,6		0,045	0,0032	14,1	
13		NaOH	7,2	52,7	40,1		0,05	0,003	16,7	bardzo różnoziarnisty
14		HCl	7,0	49,3	43,7		0,081	0,003	27,0	
15		O1	6,9	53,7	39,4		0,045	0,003	15,0	różnoziarnisty

Na podstawie wykonanych badań sporządzono wykresy krzywych uziarnienia dla każdej z metod pomiaru (Rys. Z.III.10-13). Otrzymane zawartości frakcji zredukowanych naniesiono na trójkąt Fereta przedstawiony na Rys. 8.5.3. Rysunki uzupełniono wynikami oznaczeń wykonanymi w sposób analogiczny na osadach przed wykorzystaniem ich do badań (p. 6.2.3).

Dodatkowo, po zakończeniu badania filtracji długotrwałej, wykonano badanie gęstości właściwej ρ_s osadów zgodnie z normą [152] oraz powierzchni właściwej cząsteczek na aparacie laserowym „Mastersizer 2000” przy badaniu składu granulometrycznego. Wyniki pomiarów porównano z analogicznie wykonanymi badaniami w p. 6.2.4 i p. 6.2.5. Wyniki pomiarów gęstości właściwej przedstawiono w Tabeli Z.III.20, a powierzchni właściwej w Tabeli Z.III.21.



Rys.8.5.3. Klasyfikacja osadów wg trójkąta Fereta [151]

8.5.4. Analiza wyników badań filtracji długotrwałej

Pierwsze pomiary przepuszczalności hydraulicznej wskazują, że przy przepływie wody wodociągowej, wody destylowanej, roztworu NaOH i roztworu HCl przy gradiencie hydraulicznym $i \geq 30$ jest ona zbliżona i kształtuje się na poziomie $k_{10} = 1,0 \cdot 10^{-8} \div 1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s. W pierwszym tygodniu filtracji dla wody wodociągowej, wody destylowanej i roztworu HCl następuje niewielki wzrost przepuszczalności, natomiast dla 0,2% NaOH gwałtowny spadek do $k_{10} \approx 6,0 \cdot 10^{-9}$ m/s, a następnie wzrost. Pod wpływem długotrwałego działania wody destylowanej (środowisko lekko zasadowe, $\text{pH} = 7,80 \div 8,38$) i wody wodociągowej (środowisko obojętne, $\text{pH} = 7,49 \div 7,70$) można zauważyć stopniowy spadek przepuszczalności hydraulicznej, która w obu przypadkach, po około 70 dniach filtracji, stabilizuje się

na poziomie $k_{10} \approx 3,0 \cdot 10^{-9} \div 4 \cdot 10^{-9}$ m/s. W przypadku filtracji cieczami o skrajnych odczynach: roztworem 0,2% NaOH (środowisko silnie zasadowe, pH = 11,7÷11,8) i roztworem 0,43 % HCl (środowisko silnie kwaśne, pH = 2,38÷2,63), przepuszczalność hydrauliczna stopniowo wzrasta i stabilizuje się na poziomie $k_{10} \approx 2 \cdot 10^{-8}$ m/s, niezależnie od roztworu. Przepuszczalność hydrauliczna osadów z dekarbonizacji wody oznaczana przy pierwszym przepływie odcieków przez próbki jest niższa od przepuszczalności hydraulicznej uzyskanej dla pozostałych cieczy probierczych i kształtuje się na poziomie $k_{10} \approx 5 \cdot 10^{-9} \div 8 \cdot 10^{-9}$ m/s przy gradiencie hydraulicznym $i \geq 30$, a pod wpływem długotrwałego działania odcieków znacznie i stale się obniża do $k_{10} \approx 4,7 \cdot 10^{-11} \div 6,8 \cdot 10^{-11}$ m/s w okresie 108 dni filtracji. Najintensywniejszy jej spadek występuje w pierwszym miesiącu filtracji. Charakter zmian przepuszczalności hydraulicznej osadów z dekarbonizacji wody zachodzących w czasie w wyniku przepływu wody przez materiał odpowiada zmianom jak dla gruntów spoistych, gdzie również występuje obniżenie się przepuszczalności w czasie [Mioduszewski W., 1968], [Thomas J.C., Brown K.W., 1992]. Z badań przedstawionych przez Majer E. [2005] wynika, że przepuszczalność hydrauliczna uformowanej przesłony na składowisku odpadów będzie się zmniejszać w czasie, a stabilizacja przepuszczalności nastąpi po około 2 latach sezonowania, w przypadku ilów na poziomie rzędu $10^{-9} \div 10^{-10}$ m/s. Początkowa wartość przepuszczalności hydraulicznej dla osadów przy wykorzystaniu odcieków ze składowiska jest zbliżona do wartości uzyskanych dla ilów przy filtracji odcieków, dla których przepuszczalność zmienia się w czasie i waha się w granicach $6,0 \cdot 10^{-9} \div 1,0 \cdot 10^{-10}$ m/s [Sai J.O. i Anderson D.C., 1991]. Redukcję przepuszczalności hydraulicznej w czasie dla odcieków filtrujących przez grunty spoiste zauważyli również Daniel D.E., Liljestrand H.M., Broderick G.P., Bowders J.J. [1988]. W swoich badaniach wykazali, że w okresie 3 miesięcy dla odcieków pochodzących z 3 różnych składowisk odpadów dla 3 różnych gruntów spoistych początkowa przepuszczalność hydrauliczna waha się na poziomie $1,0 \cdot 10^{-8} \div 5,0 \cdot 10^{-10}$ m/s i obniża się w czasie, w skrajnym przypadku do $3 \cdot 10^{-10}$ m/s, a stosunek przepuszczalności hydraulicznej końcowej k_t

do początkowej k_p , wynosi średnio $\frac{k_k}{k_p} = 0,6 \div 0,9$. W przypadku badań wykonanych

dla odcieków w ramach niniejszej pracy współczynnik ten wynosi $\frac{k_k}{k_p} = 0,01$,

co wskazuje na większą redukcję przepuszczalności w czasie, w porównaniu do badań omawianych w literaturze. Przyczyną rozbieżności wskaźników mogą być zarówno różnice w składach odcieków wykorzystanych do oznaczeń, jak i odmienne właściwości badanych osadów. Z badań Roque A.J., Didier G., [2006] wynika, że w przypadku przepływu odcieków o $\text{pH} = 7,0$ przez próbkę, najniższą przepuszczalność gruntów spoistych (w tym przypadku około 10^{-9} m/s), uzyskuje się przy $w = w_{opt} + 2\%$, co wskazuje na podobny charakter zależności przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności dla przepływu wody i odcieków.

Z przeprowadzonej analizy chemicznej filtrujących cieczy probierczych: wody wodociągowej, wody destylowanej, roztworu NaOH i roztworu HCl oraz uzyskanych filtratów wynika, że w pierwszym okresie filtracji z masy odpadów wymywane są jony zawarte w wodzie wodociągowej, dodawanej do osadów w celu zwiększenia wilgotności materiału przy formowaniu próbek. Zawartość poszczególnych jonów Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ i Fe^{3+} w pierwszych ilościach filtratów jest zbliżona, niezależnie od wykorzystywanej w badaniu cieczy probierczej. W ciągu tygodnia filtracji następuje gwałtowny spadek zawartości tych jonów, a następnie ich stężenie w filtratach ustala się na różnych poziomach w zależności od filtrującego roztworu. Zawartość jonu Fe^{3+} w filtratach podczas badania omawianymi cieczami probierczymi jest najniższa w pierwszych 500 ml filtratu (biały kolor), a następnie wzrasta i waha się przez cały okres badawczy. Po około 3 miesiącach badania nie przekracza stężenia $0,1 \text{ mg/dm}^3$. Wzrost stężenia jonów Fe^{3+} nadaje filtratom kolor od jasno- do ciemnożółtego. Pomiarzy przewodnictwa wskazują, że równowaga chemiczna układu osady z dekarbonizacji wody – ciecz probiercza ustala się po około tygodniu filtracji dla WW, WD i roztworu HCl i po upływie około 2 miesięcy w przypadku filtracji roztworem NaOH. Analizując zmiany w składzie chemicznym filtratów w przypadku wody wodociągowej i wody destylowanej, założono, że ostatnie pomiary

stężeń jonów mogą być nieznacznie zawyżone, ze względu na możliwość odparowania wody podczas kilkunastodniowego okresu gromadzenia filtratów.

W przypadku filtracji wodą destylowaną odczyn filtratów waha się na poziomie $\text{pH} \approx 8,0$ i jest zbliżony do odczynu filtrującego medium, po osiągnięciu równowagi chemicznej, ilości wymywanych jonów stabilizują się: Ca^{2+} (ok. $1,8 \text{ mg/dm}^3$), których źródłem są osady oraz Na^+ ($10,5 \text{ mg/dm}^3$) i Cl^- ($21,3 \text{ mg/dm}^3$), w ilościach odpowiadającym stężeniom zawartym w filtrującej wodzie wodociągowej. Źródłem jonów Mg^{2+} w filtracie są osady z dekarbonizacji wody. Stężenie wymywanych jonów Mg^{2+} stale maleje. Warunkom równowagi chemicznej przy filtracji długotrwałej wodą destylowaną odpowiada stały spadek przepuszczalności hydraulicznej do poziomu $k_{10} \approx 3,0 \cdot 10^{-9} \div 4,0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, co wskazuje, że zachodzące zmiany przepuszczalności są spowodowane działaniem innych czynników niż zmiany chemiczne mogące zachodzić w próbce. Podobną zależność zauważono przy filtracji długotrwałej wodą wodociągową, z tą różnicą, że warunki równowagi chemicznej wystąpiły przy innych poziomach stężeń wymywanych jonów. Uzyskany filtrat, o podobnym odczynie $\text{pH} \approx 8,0$, nieznacznie podwyższonym w porównaniu do odczynu filtrującej wody wodociągowej, charakteryzuje stała ilość wymywanych jonów Ca^{2+} (ok. $2,5 \text{ mg/dm}^3$) około 25 razy mniejsza niż w wodzie dopływającej, Mg^{2+} (ok. 55 mg/dm^3) około 2,5 razy większa niż w wodzie wodociągowej, Na^+ o stężeniu ok. 10 mg/dm^3 wyższym niż na dopływie oraz Cl^- (ok. 250 mg/dm^3), nieznacznie podwyższonym w porównaniu do filtrującej cieczy. Wynika stąd, iż w próbce mogą zachodzić reakcje wymiany lub sorpcja, w wyniku których zatrzymywane są jony Ca^{2+} , a wymywane jony Mg^{2+} , Na^+ i Cl^- , przy jednoczesnym zatrzymywaniu na powierzchni próbki substancji organicznej, zaobserwowanej po zakończeniu badania.

Odmienny charakter ma zależność przepuszczalności hydraulicznej w czasie dla filtracji 0,2% NaOH, która już po około tygodniu ustabilizowała się na poziomie $k_{10} \approx 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, przy warunkach równowagi chemicznej osiągniętej dopiero po około 2 miesiącach trwania badania. W okresie tym nastąpił wzrost odczynu filtratu z $\text{pH} = 8,42$ (pierwsze 500 ml) do $\text{pH} = 11,8$ czyli do odczynu filtrującego roztworu. Zmianie odczynu odpowiada przyrost stężenia jonów Na^+ w filtracie do poziomu ich stężenia w filtrującym roztworze, co znajduje swoje odzwierciedlenie

w pojawiających się na odpływie białych kryształkach Na_2CO_3 . W początkowym okresie filtracji stężenie jonów Na^+ było o około 1000 mg/dm^3 niższe w filtracie w porównaniu z roztworem filtrującym. Ponadto w czasie badania stale maleje ilość wymywanych jonów Mg^{2+} , których źródłem są osady (brak w filtrującym roztworze). Stężenie jonów Mg^{2+} w filtracie po upływie 2 miesięcy jest niewykrywalne. Dodatkowo filtry charakteryzuje brak wymywanych jonów Ca^{2+} (brak ich również w filtrującej cieczy) oraz stałe stężenie jonów Cl^- (ok. $21,3 \text{ mg/dm}^3$), których ilość jest zbliżona do zawartości w filtrującym roztworze. Analiza chemiczna wskazuje na możliwość zachodzenia w próbce przemian chemicznych, w wyniku których zatrzymywane są jony Na^+ . W tym przypadku może zachodzić, podobnie jak w gruntach spoistych, wymiana jonów Ca^{2+} na Na^+ [Evangelou V.P., Marsi M., 2003], [Piaskowski A., 1956], [Grabowska-Olszewska B., Siergiejew J.M., 1977], [Garbulewski K., Wienclaw E., Wolski W., 1994] przy jednoczesnym wytracaniu się Na_2CO_3 i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [Piaskowski A., 1956].

W przypadku filtracji roztworem HCl równowaga chemiczna osiągnięta została po około tygodniu trwania badania przy $\text{pH} \approx 7,6$, znacznie wyższym od kwaśnego odczynu filtrującego roztworu o $\text{pH} < 3$. Skład chemiczny uzyskiwanych filtratów wskazuje na stały wzrost ilości wymywanych jonów Ca^{2+} (stężenie po 3 miesiącach 225 mg/dm^3), spadek stężenia jonów Mg^{2+} w filtracie pochodzących z osadów, nieznaczny wzrost ilości jonów Na^+ w stosunku do filtrującego roztworu (o około 24 mg/dm^3) i stałe stężenie jonów Cl^- . W próbce zachodzą zmiany chemiczne, w wyniku których do roztworu uwalniany jest jon Ca^{2+} . Pojawiające się w początkowym okresie badania pęcherzyki powietrza na dopływie oraz skład chemiczny osadów i filtrującego roztworu wskazują na możliwość zachodzenia reakcji:
$$\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} = \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2\uparrow$$
 Uzyskanym warunkom równowagi chemicznej odpowiada przepuszczalność hydrauliczna na poziomie $k_{10} \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$.

Analiza chemiczna pierwszych 500 ml filtratu uzyskanego w okresie 1 tygodnia filtracji długotrwałej odciekami ze składowiska odpadów komunalnych wykazała, że stężenie takich jonów jak Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ i Cl^- , których ilość przy filtracji pozostałych cieczy probierczych niezależnie od ich rodzaju była zbliżona, w przypadku odcieków jest nawet kilkukrotnie wyższa. Wskazuje to na inne

właściwości odcieków w porównaniu do wcześniej analizowanych cieczy probierczych oraz odmienny charakter zachodzącego procesu filtracji. Stężenia ww. jonów oraz jonów K^+ i Zn^{2+} w filtracie, czyli jonów znajdujących się w składzie osadów oraz dodawanej na etapie formowania próbek wodzie wodociągowej, są ponadto wyższe od stężenia w samych odciekach, co świadczy o bardzo intensywnym ich wymywaniu z masy odpadów w początkowym okresie filtracji. Pozostałe wskaźniki zanieczyszczeń ($ChZT$, Fe^{3+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{2+} , Cr^{7+} , Ni^{2+} i Cd^{2+}) są niższe niż dla odcieków, co dowodzi zdolności badanego odpadu do oczyszczania odcieków w procesie filtracji, a obniżona przewodność filtratu potwierdza znaczne zmniejszenie się ogólnej zawartości jonów w filtracie w wyniku przejścia odcieków przez masę odpadów z dekarbonizacji wody. Nie jest natomiast możliwe ustalenie zdolności osadów do oczyszczania odcieków w czasie. Ze względu na stale zmniejszający się przepływ odcieków przez próbkę, filtrat do analizy zbierany był przez okres 3 miesięcy (od czerwca do września 2006 roku), przy czym średnia temperatura dobową w lipcu wynosiła $23^\circ C$ i była znacznie wyższa od średnich temperatur dobowych w miesiącach sąsiednich (czerwiec: $18^\circ C$, sierpień: $17^\circ C$), co spowodowało niekontrolowany wzrost stężeń poszczególnych jonów w wyniku intensywnego parowania [148]. O nieadekwatności wyników wykonanych pomiarów może świadczyć podwyższona wartość chemicznego zapotrzebowania tlenu $ChZT$ oraz stężeń jonów: Cl^- i K^+ czy azotu organicznego, w porównaniu z filtrującymi odciekami. Przyczyną podwyższonej wartości tych wskaźników nie mogą być, ze względu na skład chemiczny, badane osady z dekarbonizacji wody. Odczyn filtratu, zasadowy, podobnie jak odcieków, wynosi $pH \approx 9,0$. Stan próbki po zakończeniu badania wskazuje, że główną przyczyną zmniejszenia przepuszczalności hydraulicznej było gromadzenie się na powierzchni próbki substancji organicznej, któremu mogły towarzyszyć procesy adsorpcji i wymiany jonowej.

Z analizy składu chemicznego cieczy probierczych i uzyskiwanych filtratów w zestawieniu ze zmianami przepuszczalności hydraulicznej w czasie wynika, że proces filtracji jest zjawiskiem złożonym i na przepuszczalność hydrauliczną osadów może mieć wpływ wiele czynników. Podczas przepływu cieczy przez osady mogą zachodzić złożone procesy adsorpcji, czyli gromadzenia na powierzchni

cząstek osadów (adsorbentach) substancji rozpuszczonych w cieczy filtrującej (adsorbatów), powodujące zmniejszenie całkowitej ilości substancji stałej rozpuszczonej w cieczy, wymiany jonowej czyli reakcji wymiany jonów w wyniku której, w uzyskiwanym filtracie zmienia się rodzaj jonów, a ich ilość pozostaje bez zmian oraz kolmatacji czyli uszczelniania porowatej struktury, której przyczyną jest obecność w przepływającej cieczy substancji organicznej i żyjących w niej mikroorganizmów [Majer E., 2005]. Na obecnym etapie badań nie jest jednak możliwe dokładne ustalenie intensywności zachodzących procesów w każdym z przypadków użytej do badań cieczy probierczej i określenia ich wpływu na zdolności filtracyjne osadów. Badania należałoby powtórzyć dla większej ilości próbek, przy kontroli składu chemicznego cieczy i filtratów prowadzonej przy wykorzystaniu aparatury rejestrującej w sposób ciągły oznaczane parametry fizyczno-chemiczne, co pozwoliłoby na wyciągnięcie głębszych i jednoznacznych wniosków.

Po przeprowadzeniu analizy porównawczej zawartości poszczególnych frakcji osadów z dekarbonizacji wody przed i po filtracji długotrwałej, oznaczonych 3 metodami, stwierdzono, że brak jest znaczących różnic w składzie granulometrycznym badanych próbek i nie można jednoznacznie określić, jaki wpływ na uziarnienie badanego materiału miał 3÷3,5-miesięczny okres filtracji. Nie odnotowano również wpływu długotrwałej filtracji na gęstość właściwą osadów.

Wyniki badań powierzchni właściwej wykonane przy oznaczeniu składu granulometrycznego w aparacie laserowym wskazują na zmiany powierzchni właściwej cząstek osadów w okresie filtracji długotrwałej. W przypadku badania wykonanego z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząstek, przyrost powierzchni właściwej w stosunku do oznaczonej przed badaniem filtracji wynosi około 27,5 %. Przyczyną zmian powierzchni właściwej mogły być procesy adsorpcji i/ lub wymiany jonowej.

Ze względu na zmiany przepuszczalności hydraulicznej osadów z dekarbonizacji wody zachodzące w czasie filtracji wynika, że przy odpowiednich warunkach wbudowania tj. wilgotności formowania i zagęszczeniu, osady mogą być stosowane jako materiał do budowy uszczelnień składowisk nie tylko odpadów energetycznych pochodzących z palenisk konwencjonalnych ($k \leq 1,0 \cdot 10^{-7}$ m/s),

ale również odpadów o charakterze obojętnym lub lekko zasadowym (np. składowisk odpadów komunalnych). Przy wbudowaniu osadów w konstrukcję składowiska można dopuścić zagęszczanie gwarantujące uzyskanie przepuszczalności hydraulicznej nawet o 1 rząd wielkości wyższej niż wymagana, ponieważ już w okresie budowy, przy przepływie wód opadowych oraz na etapie eksploatacji, przy filtracji powstających na składowisku odcieków, w okresie kilku miesięcy nastąpi redukcja przepuszczalności hydraulicznej poniżej minimalnej wymaganej wartości $k \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dodatkowo, spodziewane jest zwiększenie szczelności warstwy w wyniku, wzrastającego w czasie eksploatacji składowiska, obciążenia nadkładem.

Z analizy wykonanych pomiarów składu chemicznego filtrujących cieczy i filtratów wynika, że w przypadku przepływu odcieków o odczynie pH zbliżonym do obojętnego przez warstwę osadów z dekarbonizacji wody, zachodzące zmiany chemiczne nie będą miały niekorzystnego wpływu na przepuszczalność hydrauliczną osadów oraz trwałość i stabilność chemiczną warstwy. Należy zauważyć, że przy gradientach hydraulicznych $i \leq i_0$ przepływ przez warstwę może nie wystąpić, a zagrożenie związane z ewentualnym wymyciem węglanów zostanie wyeliminowane wraz z obniżeniem przepuszczalności hydraulicznej w czasie i ograniczeniem ilości przepływających odcieków. Warstwa uszczelnienia wykonana z osadów z dekarbonizacji wody będzie również miała zdolność do redukcji ładunku niektórych zanieczyszczeń zawartych w odciekach ze składowisk odpadów komunalnych.

9. UOGÓLNIENIE WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

Osady z dekarbonizacji stanowią materiał sztucznie wytworzony w wyniku działalności człowieka, charakteryzujący się wysoką, w porównaniu do gruntów naturalnych, wilgotnością. Dla tego rodzaju materiałów brak jest szczegółowych wytycznych do oznaczenia ich cech geotechnicznych. W Polsce osady z dekarbonizacji wody nie są jeszcze rozpoznane i brak jest danych dotyczących ich właściwości, co skutecznie uniemożliwia wykorzystanie osadów. W ramach niniejszej pracy osady potraktowano jako grunt antropogeniczny i do oceny ich właściwości geotechnicznych zaadoptowano metody badań powszechnie stosowane w geotechnice do oznaczania cech gruntów naturalnych, z uwzględnieniem parametrów decydujących o ich przydatności do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów.

Na podstawie wykonanych badań oraz analizy uzyskanych wyników sformułowano wnioski ogólne i szczegółowe, dotyczące właściwości osadów z dekarbonizacji wody pochodzących z EC Rzeszów.

WNIOSKI OGÓLNE

1. Podstawowym składnikiem osadów z dekarbonizacji wody jest węglan wapnia CaCO_3 (do 87,25 %), występujący w postaci kalcytu. W małych ilościach w skład osadu wchodzi związek żelaza, magnezu i glinu oraz pierwiastków występujących w ilościach śladowych m. in. manganu, potasu i sodu. W warunkach składowania skład chemiczny osadów nie zmienia się w czasie. Osady cechuje odczyn zasadowy ($\text{pH} \geq 8,35$).
2. Wstępna ocena makroskopowa wykazała podobieństwo osadów do gruntów średnio i mało spoistych: gliny pylastej i pyłu. W porównaniu do gruntów naturalnych osady po odsączeniu na prasie filtracyjnej cechuje wysoka wilgotność ($w \geq 55\%$) oraz stosunkowo niska gęstość objętościowa

($\rho \leq 1,66 \text{ g/cm}^3$). Pod względem uziarnienia osady odpowiadają glinom pylastym zwięzłym, glinom pylastym oraz pyłom. Właściwości plastyczne osadów z dekarbonizacji wody wskazują na ich podobieństwo do iłów

3. Zagęszczane osady z dekarbonizacji wody cechują się wysoką wytrzymałością na ścinanie, a wartości parametrów kąta tarcia wewnętrznego i spójności mogą przekraczać wartości charakteryzujące grunty spoiste. Wyniki oznaczeń wytrzymałości na ścinanie osadów z dekarbonizacji wody zależą od metody badania, sposobu formowania próbek, ich zagęszczenia i wilgotności. Wyższe wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskuje się z badań w aparacie trójosiowego ściskania niż w aparacie bezpośredniego ścinania. Kąt tarcia wewnętrznego zależy głównie od wilgotności i maleje wraz z jej wzrostem. Na spójność wpływ ma gęstość objętościowa szkieletu, której wzrost powoduje zwiększenie spójności. Sposób formowania próbek do badań nie wpływa znacząco na wyniki spójności i kąta tarcia wewnętrznego, pod warunkiem, że struktura próbek po uformowaniu nie jest naruszona.
4. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie zagęszczanych osadów z dekarbonizacji wody zależy od wilgotności materiału oraz od jego zagęszczenia, a na wyniki oznaczeń ma wpływ metoda wykonywania badania. Wzrost zagęszczenia powoduje zwiększenie wytrzymałości na ściskanie, a wzrost wilgotności jej zmniejszenie. Dla próbek cylindrycznych zauważalny jest spadek wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem smukłości próbek. W przypadku oznaczeń wytrzymałości na rozciąganie najniższe wartości uzyskuje się z badań bezpośredniego rozciągania, a najwyższe z ekstrapolacji obwiedni Coulomba-Mohra z badań w aparacie trójosiowego ściskania.
5. Według klasyfikacji, jak dla gruntów ekspansywnych, osady z dekarbonizacji wody należy zaliczyć do materiałów o niskim do wysokiego stopnia ekspansywności. Zdolność osadów do pęcznienia maleje wraz ze wzrostem wilgotności.

6. Przepuszczalność hydrauliczna osadów zależy od wilgotności formowania i zagęszczenia, a zależność $k_{10,dr} = f(w, I_s)$ ma charakter paraboliczny, umożliwiając określenie wilgotności, przy której przepuszczalność hydrauliczna osadów przy danym zagęszczeniu osiąga wartości najniższe. Wilgotność, przy której uzyskuje się najniższą przepuszczalność $k_{10,dr} = \min.$, wg planu eksperymentu, jest wyższa od wilgotności optymalnej i wynosi $w \approx w_{opt} + 2,0\%$. Nie stwierdzono istotnego wpływu sposobu formowania próbek bezpośrednio w cylindrze aparatu na wyniki oznaczeń przepuszczalności hydraulicznej.
7. Przepuszczalność hydrauliczna osadów przy gradiencie hydraulicznym $i \geq 30$ zmienia się w czasie, a kierunek zachodzących zmian uzależniony jest od rodzaju filtrującej cieczy. Niewielki wzrost przepuszczalności w czasie występuje przy filtracji cieczami o odczynie silnie kwaśnym i silnie zasadowym, a obniżenie w przypadku filtracji cieczami obojętnymi lub lekko zasadowymi. Wyniki oznaczeń przepuszczalności hydraulicznej dla cieczy probierczych zdecydowanie odbiegają od wyników uzyskanych z badań dla rzeczywistych odcieków, których przepływ powoduje największe obniżenie przepuszczalności hydraulicznej osadów.
8. Osady posiadają zdolność redukcji ładunku zanieczyszczeń niektórych zanieczyszczeń zawartych w odciekach w procesie filtracji. Główną przyczyną obniżenia się przepuszczalności hydraulicznej osadów z dekarbonizacji wody przy przepływie odcieków ze składowiska odpadów komunalnych jest gromadzenie się na powierzchni próbek substancji organicznej.
9. Brak jednoznacznego, istotnego wpływu filtrującej cieczy na skład granulometryczny osadów po 3-miesięcznym okresie filtracji.
10. Osady z dekarbonizacji wody są materiałem niejednorodnym i cechuje je duży rozrzut wartości parametrów geotechnicznych. Przed wbudowaniem osadów

w konstrukcje inżynierskie należy dla każdej partii materiału oznaczyć wymagane parametry geotechniczne w badaniach laboratoryjnych i polowych.

11. Jednoznaczna klasyfikacja osadów z dekarbonizacji wody wg kryterium geotechnicznego jako gruntu, uwzględniająca analizę porównawczą właściwości geotechnicznych nie jest możliwa. Osady z dekarbonizacji wody jako materiał budowlany wymagają indywidualnego podejścia do możliwości ich wbudowania w konstrukcję.
12. Wyniki laboratoryjnych badań parametrów geotechnicznych osadów z dekarbonizacji wody potwierdzają możliwość ich wykorzystania do budowy bezpiecznych dla środowiska warstw składowisk odpadów o obojętnym lub lekko zasadowym odczynie odcieków, przy określonych warunkach wbudowania.

WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE

Dla osadów z dekarbonizacji wody powstających w EC Rzeszów określono podstawowe właściwości geotechniczne, właściwości mechaniczne i filtracyjne, przedstawione poniżej w formie wniosków szczegółowych.

1. Podstawowe właściwości geotechniczne:
 - gęstość właściwa $\rho_s = (2,72 \pm 0,05) \text{ g/cm}^3$,
 - granica plastyczności: $w_p = (37,27 \pm 1,88) \%$,
 - granica płynności: $w_L = (62,34 \pm 4,59) \%$,
 - granica skurczalności $w_s = (36,14 \pm 0,47) \%$,
 - wskaźnik plastyczności $I_p = 17,51 \div 31,21 \%$,

- maksymalna gęstość objętościowa szkieletu $\rho_{ds} = 1,28 \div 1,40 \text{ g/cm}^3$ i wilgotność optymalna $w_{opt} = 28,9 \div 37,7 \%$ przy standardowej metodzie zagęszczania ($E = 0,59 \text{ J/cm}^3$).

2. Właściwości mechaniczne:

- spójność oznaczona z badań w aparacie trójosiowego ściskania $c_u \approx 23 \div 205 \text{ kPa}$ (przy $w \approx 25 \div 44 \%$ i $\rho_d \approx 1,18 \div 1,34 \text{ g/cm}^3$) i z badań w aparacie bezpośredniego ścinania $c_s \approx 37 \div 72 \text{ kPa}$ (przy $w \approx 22 \div 44 \%$ i $\rho_d \approx 1,14 \div 1,48 \text{ g/cm}^3$),
- kąta tarcia wewnętrznego oznaczony z badań w aparacie bezpośredniego ścinania z badań w aparacie trójosiowego ściskania i bezpośredniego ścinania $\phi_u \approx \phi_s \approx 12 \div 47^\circ$,
- wytrzymałość na ściskanie $R_c \approx 146 \div 1170 \text{ kPa}$ (przy $w \approx 25 \div 41 \%$ i $\rho_d \approx 1,22 \div 1,38 \text{ g/cm}^3$),
- wytrzymałość na rozciąganie $R_r \approx 9 \div 207 \text{ kPa}$ (przy $w \approx 24 \div 41 \%$ i $\rho_d \approx 1,21 \div 1,41 \text{ g/cm}^3$),
- wilgotność, przy której wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie będą optymalnie wykorzystane, określona na podstawie analizy wskaźnika kruchości $\frac{R_r}{R_c}$, $w \approx 37\%$,
- edometryczny moduł: ścisłości pierwotnej $M_0 \approx 11,9 \text{ MPa}$, odprężenia $\bar{M} = 49,6 \text{ MPa}$ i ścisłości wtórnej $M = 50,0 \text{ MPa}$ (przy $w \approx 27 \div 34 \%$ i $\rho_d \approx 1,34 \div 1,40 \text{ g/cm}^3$),
- wskaźnik pęcznienia $V_p = 6,1 \div 26,1 \%$ (przy $w \approx 28 \div 33 \%$ i $\rho_d \approx 1,38 \div 1,42 \text{ g/cm}^3$).

3. Właściwości filtracyjne:

- przepuszczalność hydrauliczna $k_{10} = 10^{-8} \div 10^{-10}$ m/s przy gradientach hydraulicznych $i \geq 30$,
- początkowy gradient hydrauliczny $i_0 \leq 13$,
- w przypadku filtracji roztworów silnie zasadowych i silnie kwaśnych stabilizacja przepuszczalności hydraulicznej po około 2 tygodniach filtracji na poziomie wyższym w porównaniu do pierwszych pomiarów, tj. $2 \cdot 10^{-8}$ m/s,
- w przypadku filtracji cieczy obojętnych lub lekko zasadowych stabilizacja przepuszczalności hydraulicznej po około 2 miesiącach filtracji na poziomie niższym w porównaniu do pierwszych pomiarów, tj. $3,5 \cdot 10^{-9}$ m/s,
- stałe obniżanie się przepuszczalności hydraulicznej w przypadku filtracji odcieków ze składowiska odpadów komunalnych, nawet o 2 rzędy wielkości, w okresie 3 miesięcy i osiągnięcie wartości przepuszczalności hydraulicznej wymaganej dla materiałów stosowanych do budowy warstw uszczelniających na składowiskach odpadów, tj. $k_{10} \leq 1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s po tygodniu filtracji.

Autorka w przyszłości widzi potrzebę prowadzenia dalszych badań nad możliwością wbudowania osadów z dekarbonizacji wody w warstwy uszczelniające składowisk odpadów. Aby bezpiecznie dla ludzi i środowiska wykorzystać osady należy szerzej rozpoznać ich właściwości fizyko-chemiczne, mechaniczne i filtracyjne, co wymaga dopracowania odpowiedniej metodyki badań i weryfikacji wyników laboratoryjnych badań geotechnicznych pomiarami w terenie.

Do najważniejszych zagadnień, wymagających dalszych badań, należy zaliczyć:

- ustalenie wpływu wielokrotnego zagęszczania tej samej próbki osadów na uzyskiwane wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu i wilgotności optymalnej oraz badania nad zagęszczalnością osadów na poletku doświadczalnym,

- określenie ciśnienia pęcznienia i wpływu nacisku powierzchniowego na wielkość pęcznienia osadów, dla wody i odcieków,
- weryfikację badań przepuszczalności hydraulicznej przez wykonanie oznaczeń innymi metodami laboratoryjnymi i metodami polowymi oraz dalsze prace nad określeniem dopuszczalnej maksymalnej objętości próbek do badań filtracji,
- określenie wpływu nacisku powierzchniowego oraz wysychania i przemarzania na właściwości uszczelniające osadów,
- dalsze badania nad ustaleniem trwałości i stabilności chemicznej osadów w czasie długotrwałej filtracji odcieków oraz określenie wpływu odcieków na strukturę osadów i ich właściwości mechaniczne,
- sprawdzenie wielkości tarcia na styku układów: osady-geowłóknina, osady-warstwa syntetyczna, osady-grunt, niezbędnych do oceny stateczności systemu uszczelnienia na skarpie.

11. LITERATURA

1. Albrecht B.A., Benson C.H. (2001): Effect of desiccation on compacted natural clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127 (1), p.67-75,
2. Allen A. (2001): Containment landfills: the myth of sustainability. *Engineering Geology*, Vol.60, p.3-19,
3. Al-Tabbaa A., Aravinthan T, (1998): Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials. *Waste Management*, Vol.18, p.9-16,
4. Ayoub G.M., Merhebi F. (2002): Characteristics and quantities of sludge produced by coagulating wastewater with seawater bittern, lime and caustic. *Advances in Environmental Research*, Vol.6 (3), p.277-284,
5. Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. (2004): Reuse of lime sludge from water softening and coal combustion byproducts. Final Report for TR-459, Iowa State University, Department Civil and Environmental Engineering, December, 2004,
6. Baker R., Leeuwen J. H., White D. J. (2005): Application for reuse of lime sludge from water softening. Final Report for TR-535, Iowa State University, Department Civil and Environmental Engineering, July, 2005,
7. Barzegar A.R., Oades J.M., Rengasamy P., Murray R.S. (1995): Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma*, Vol.65, p.93-108,
8. Benson C.H., Abichou T., Olson M., Bosscher P. (1995): Winter effects on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121 (1), p.67-79,
9. Benson C.H., Chamberlain E.J., Erickson C. E., Wang X. (1995): Assessing frost damage in compacted clay liners. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18 (3), p.324-333,
10. Benson C.H., Daniel E.D. (1990): Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Environmental Engineering*, Vol.116 (8), p.1231-1248,

11. Benson C.H., Daniel D.E. (1994): Minimum thickness of compacted soil liners: II analysis and case histories. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120 (1), p.153-172,
12. Benson C.H., Daniel D.E., Boutwell G.P. (1999): Field performance of compacted clay liner. *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125 (5), p.390-403,
13. Benson C.H., Gunter J.A., Boutwell G.P., Trautwein S.J., Berzanskis P.H. (1997): Comparison of four methods to assess hydraulic conductivity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123 (10), p.929-937,
14. Benson C., Othman M. (1993): Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in-situ. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119 (2), p.276-294,
15. Benson C., Othman M. (1993): Effects of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clays. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30 (2), p.236-246,
16. Benson C.H., Zhai H., Wong, X. (1994): Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120 (2), p.366-387,
17. Blotz L.R, Benson C.H., Boutwell G.P. (1998): Estimating optimum water contented maximum dry unit weight for compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124 (9), p.907-912,
18. Błażejczak D., Horn R., Pytka J. (1995): Soil tensile strength as affected by time, water content and bulk density. *International Agrophysics*, Vol.9, p.179-188,
19. Bozbey I., Guler E. (2006): Laboratory and field testing for utilization of an excavated soil as landfill liner material. *Waste Management*, Vol.26, p.1277-286,
20. Brandl H. (1992): Mineral liners for hazardous waste containment. *Geotechnique*, Vol.42 (1), p.57-65,
21. Brandl H. (1993): Mineralne warstwy uszczelniające w składowiskach odpadów niebezpiecznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, str.122-128,

22. Che M.D., Logan T.J., Traina S.J., Bigham J.M. (1988): Properties of water treatment lime sludges and their effectiveness as agricultural limestone substitutes. *Journal Water Pollution Control Federation*, Vol.60 (5), p.674-680,
23. Chojnacki A. (1966): Postępowanie z osadami na stacjach uzdatniania wody i możliwości ich wykorzystania. *Gospodarka Wodna*, Nr 9, str.339-341,
24. Chomicz D. (1995): Woda w ciepłownictwie i ogrzewnictwie. Ciepłownictwo. Poradnik. Fundacja Rozwoju Ciepłownictwa „Unia Ciepłownictwa”, Warszawa,
25. Cokca E., Erol O., Armangil F. (2004): Effects of compaction moisture content on the shear strength of an unsaturated clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.22 (2), p.285-297,
26. Daniel D. E. (1989): In situ hydraulic conductivity tests for compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.115 (9), p.1205-1226,
27. Daniel D. E., Benson C. (1990): Water content - density criteria for compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116 (12), p.1811-1830,
28. Daniel D. E., Liljestrand H. M., Broderick G. P., Bowders J. J. (1988): Interaction of earthen liner materials with industrial waste leachate. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, Vol.5 (2), p.93-108,
29. Daniel D.E., Wu Y. (1993): Compacted clay liners and covers for arid sites. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119 (2), p.223-237,
30. Dąbrowski H., Naumczyk J. (2003): Opinia dotycząca możliwości wykorzystania osadów powstających w procesie dekarbonizacji do uszczelnienia czaszy kwater miejsca gromadzenia odpadów paleniskowych w EC Rzeszów. Warszawa, styczeń 2003 r.,
31. Elsbury B. R., Daniel D.E., Sraders G.A., Anderson D.C. (1990): Lesson learned from compacted clay liner. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.116 (11), p.1641-1660,
32. Elsbury, B. R., Sraders G.A. (1989): Building a better landfill liner. *Civil Engineering*, Vol.59 (4), p.57-59,
33. Ewertowska-Madej Z. (1993): Wykorzystanie popiołów lotnych do budowy warstw ochronnych pod składowiskami odpadów, *Gospodarka Wodna*, Nr 10, str. 230-232,

34. Ewertowska-Madej Z., Staszewski R., Szymański K. (1991): Popiół jako warstwa ochronna wysypisk. *Gospodarka wodna*, Nr 9, str. 206-208,
35. Evangelou V.P., Marsi M. (2003): Influence of ionic strength on sodium-calcium exchange of two temperate climate soils. *Plant and Soil*, Vol.250, p.307-313,
36. Fahoum K. (1998): Utilization of lagoon-stored lime in embankment construction. *Geotechnical Special Publication No. 79 „Recycled Materials in Geotechnical Applications“*, *Proceedings of Sessions of Geo-congress 98*, Boston, Massachusetts, American Society of Civil Engineering, p.115-121,
37. Flaga K. (1974): Wpływ rodzaju kruszywa na kruchość betonów wysokich marek. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 2, str. 83-87,
38. Florkiewicz A. (2000): Geotechniczne charakterystyki osadów powstających w procesie uzdatniania wody. *Geotechnika w Budownictwie i Inżynierii Środowiska poświęcona 47-leciu pracy naukowej i 70-leciu urodzin Profesora Eugeniusza Dembickiego*, Gdańsk, 15 czerwca 2000 r.,
39. Fürstenberg A. (1973): Badanie wytrzymałości gruntów spoistych na rozciąganie w jednoosiowym stanie naprężeń. *Melioracje rolne II, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Warszawie*, Dział Wydawnictw, Warszawa 1973, str.63-69,
40. Garbulewski K. (2000): Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2000,
41. Garbulewski K., Wienclaw E. (1994): Warstwa glin zwałowych jako naturalne uszczelnienie składowiska odpadów komunalnych w Łukowie. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 3, str.132-139,
42. Garbulewski K., Wienclaw E. (1995): Ocena gruntów do budowy obwałowań stawów oczyszczalni typu „Lemna” w Chmielniku Rzeszowskim. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 1, str.5-10,
43. Garbulewski K., Wienclaw E., Wolski W. (1994): Gliny zwałowe jako materiał do budowy wykładziny gruntowej składowiska odpadów w Łukowie. *Konferencja Geotechniczne Aspekty Składowania Odpadów*, Gdańsk, 9-10 czerwca 1994 r., str.139-146,

44. Genjian E., Claisse P.A., Tyrer M., Atkinson A. (2004): Selection of Cementitious Mixes as a Barrier for Landfill Leachate Containment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.16 (5), p.477-486,
45. Geoteko (1994): Geotechnika składowiska odpadów. Projektowanie i roboty zabezpieczające. Zalecenia techniczne. Warszawa, 1994,
46. Glazer Z. (1977): Mechanika gruntów. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1977,
47. Glazer Z., Malinowski J. (1991): Geologia i geotechnika dla inżynierów budownictwa. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1991,
48. Glysson E.A. (1972): Landfill disposal of sludge derived from the lime/soda-ash softening of water. The University of Michigan, Industry Program Of The College Of Engineering, 1972,
49. Grabowska-Olszewska B. (1990): Metody badań gruntów spoistych. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1990,
50. Grabowska-Olszewska B. (1996): Zmodyfikowany nomogram Casagrande'a i jego zastosowanie do oceny plastyczności i pęcznienia gruntów spoistych. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 2, str.122-124,
51. Grabowska-Olszewska B., Sergiejew J.M. (1977): Gruntoznawstwo. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1977,
52. Harasim A. (2005): Możliwości wykorzystania osadów z dekarbonizacji wody. *XI Konferencja Naukowo-Techniczna „Gospodarka Odpadami Komunalnymi”*, Koszalin-Sztokholm-Tallin, 12-16 czerwca 2005 r., str.135-147,
53. Harris C. A. (2002): Sludge and wastewater may be used to produce cement. *Civil Engineering*, Vol.72 (1), p.31,
54. Hazelworts, D.E. (1974): Lime sludge: some problems, some solutions. *Water & Sewage Works*, Vol.121 (7), p.72-73,
55. Ibarra S.Y., Mc Kyes E., Broughton R.S. (2005): Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, Vol. 81, p.15-23,
56. Jacenków S. (1993): Możliwości uszczelniania wysypisk odpadów. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 2,

57. Jia H., Liu F., Zhang H., Zhang C., Araya K., Kudoh M., Kawabe H. (1998): Improvement of Planosol Solum: Part 7, Mechanical Properties of Soils. *Journal of Agricultural Engineering Res.*, Vol.70, p.177-183,
58. Jaromińska M., Dembicki E. (1999): Określanie współczynnika filtracji gruntów słabo przepuszczalnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 5, str.227-235,
59. Katsumi T., Benson C.H., Foose G.J., Kamon M. (2001): Performance-based design of landfill liners. *Engineering Geology*, Vol.60, p.139-148,
60. Kim W.-H., Daniel D. (1992): Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.118 (7), p.1083-1097,
61. Kledyński Z. (2000): Odporność korozyjna zawieszin twardniejących w obiektach ochrony środowiska. Politechnika Warszawska, Prace naukowe, Inżynieria Środowiska, Zeszyt 33, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2000,
62. Kledyński Z., Machowska A. (2005): Stan i perspektywy wykorzystania materiałów mineralnych w konstrukcji przesłon przeciwnfiltracyjnych. *Materiały Budowlane*, Nr 2, str. 71-74,
63. Klein A., Sarsby R.W. (2000): Problems in defining the geotechnical behaviour of wastewater sludges. "Geotechnics of High Water Content Materials", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA,
64. Kokowski J. (1994): Badania wytrzymałości na rozrywanie gruntu gliniastego stanowiącego uszczelnienie składowiska odpadów, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 4, str.196-199,
65. Kowal, A.L., Świdorska-Bróż, M. 1996. Oczyszczanie wody. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław,1996,
66. Krajewski P. (2001): Metody unieszkodliwiania osadów i popłuczyn. *Przegląd Komunalny*, Nr 11 (22), str.112-114,
67. Krzysztofiak M., Luszczewicz A., (1979): Statystyka. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, 1979,

68. Krzywobłocka-Laurów R. (2005): Badania metodami: rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej, analizy termicznej i w skaningowej mikroskopii elektronowej dostarczonej próbki odpadu z EC Rzeszów. Raport z badań nr NB-574/B/2005. Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie. Warszawa, listopad 2005 r.,
69. Kumar S., Burrus N. (2005): Free Swell Characteristics of PCC bottom ash-bentonite mixtures with curing for use as fill or liner material. *Soil and Sediment Contamination*, Vol.12 (3), p.401-415,
70. Kumar S., Stewart J. (2003): Utilization of Illinois PCC dry bottom ash for compacted landfill barriers. *Soil and Sediment Contamination*, Vol.14, p.505-514,
71. Lambe T. W., Whitman R. V. (1977): *Mechanika gruntów*. Tom I, II, Arkady, Warszawa, 1977,
72. Latus H. (1982): Wpływ poduszania gruntu spoistego na zmianę jego konsystencji. *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 1-4, str.14-16,
73. Łuniewski S. (2000): *Bezpieczne składowanie odpadów*. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok, 2000,
74. Macioszczyk A., Dobrzyński D. (2002): *Hydrogeochemia. Strefy aktywnej wymiany wód podziemnych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002,
75. Majer E. (2003): Przesłony mineralne uszczelniające składowiska odpadów. *Materiały Budowlane*, Nr 9, str.42-45
76. Majer E. (2005): Ocena właściwości przesłonowych iltów do budowy składowisk odpadów. Rozprawa doktorska, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2005,
77. Majer E., Wysokiński L. (2005): Badania gruntów i kontrola jakości wykonanych z nich przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów. Instrukcja ITB nr 411/2005, Warszawa, 2005,
78. Mata-Alvarez J., Vitores-Lozano L. (1986): Anaerobic digestion of the organic fraction of lime sludge. *Solar energy*, Vol.37 (6), p. 431-435,
79. *Metodyka kompleksowych badań laboratoryjnych betonów lekkich* pod redakcją A. Jarmontowicz (1983): *Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej*, Rok XXXVIII, Warszawa,

80. Mioduszewski W. (1968): Własności filtracyjne gruntów spoistych pochodzenia fliszowego, *Gospodarka Wodna*, Nr 4, str.121-125,
81. Mizerski W. (1997): Tablice chemiczne. Wydawnictwo Adamantan, Warszawa, 1997,
82. Mohamedzein Y., E.-A., Al.-Rawas A., Al.-Aghbari M., Y., Qatan A., Rawas A.-H. (2005): Assessment of crushed shales for use as compacted landfill material. *Engineering Geology*, Vol.80, p.271-281,
83. Oleszkiewicz J. (1999): Eksploatacja składowiska odpadów. Poradnik decydenta, Kraków, 1999,
84. Omidi G.H., Thomas J.C., Brown K.W. (1996): Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol.89, p.91-103,
85. Peters R.W., Etzel J.E. (1983): Disposal of wastes from selected inorganic contaminant removal systems. *Proceedings AWWA Seminar on Control of Inorganic Contaminants*, Las Vegas, Nevada,
86. Piaskowski A. (1956): Badania nad tiksotropią zawiesin ilowych i ich zastosowaniem w budownictwie. Prace Instytutu Techniki Budowlanej, Seria Materiały Budowlane i ich Zastosowanie, Nr 3,
87. Piaskowski A. M. (1984): Właściwości sorpcyjne i powierzchnia właściwa polskich gruntów. Badania nad sorpcją błękitu metylenowego. *Archiwum Hydrotechniki*, Tom XXXI, Zeszyt 3,
88. Pisarczyk S. (1997): Problemy geotechniczne budowy uszczelnień nowoczesnych składowisk odpadów komunalnych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska, Zeszyt 22,
89. Pisarczyk S. (1998): Wpływ temperatury na właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska, Zeszyt 25,
90. Pisarczyk S. (2000): Badania geotechniczne gruntów spoistych stosowanych do budowy uszczelnień mineralnych składowisk odpadów komunalnych. *Gospodarka Wodna*, Nr 9, str.341-345,

91. Pisarczyk S. (2001): Gruntoznawstwo inżynierskie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001,
92. Pisarczyk S. (2004): Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badań. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004,
93. Pisarczyk S., Rymsha B. (1993): Badania laboratoryjne i polowe gruntów. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1993,
94. Polański Z. (1984): Planowanie doświadczeń w technice. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1984,
95. Rafalski L. (1995): Właściwości i zastosowanie zawieszin twardniejących. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 1995,
96. Raghu D., Hsieh H.-N. (1985): A feasibility study of the use of lime sludge as a landfill liner. *Proceedings of the 17th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference*, Bethlehem, PA, 1985,
97. Raghu D., Hsieh H.-N., Neilan T. And Yih C.T. (1987): Water treatment plant sludge as landfill liner. *Geotechnical Practice for Waste Disposal 87*, Geotechnical Special Publication No.13, p.744-757,
98. Roque A.J., Didier G. (2006): Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions. *Engineering Geology*, Vol.85, p.147-157,
99. Rosik–Dulewska Cz. (2002): Podstawy gospodarki odpadami. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002,
100. Roza S.A. (1950): Osiadanie budowli hydrotechnicznych na iłach o małej wilgotności. *Gidrotechniczskoje Stroitelstwo*, Nr 9,
101. Rudnicka J. (2006): Możliwość wykorzystania osadów powstających w procesie dekarbonizacji wody. Praca dyplomowa inżynierska. Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006,
102. Russel G.A. (1975): From lagooning to farmland application: the next step in lime sludge disposal. *American Water Works Association*, Vol.67 (10), p.585-588,

103. Sai J.O., Anderson D.C. (1991): Long-term effect of an aqueous landfill leachate on the permeability of compacted clay liners. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, Vol.8 (4), p.303-312,
104. Shannon L.D., Yu C.H., Wiekliński R.E., Jarvis J.B., DeKraaker D.P. (1997): Beneficial reuse of lime softening residuals for flue gas desulfurization. American Water Works Association, Denver, CO, xvii,
105. Shelley T.L., Daniel D.E. (1993): Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119 (1), p.54-68,
106. Sheu Ch., Lin T.-T., Chang J.-E., Cheng Ch.-H. (1998): The feasibility of mudstone material as natural landfill liner. *Journal of Hazardous Materials*, Vol.58, p.237-247,
107. Sierakowski E., Mrożek J. (1979): Kontrola wody i pary w energetyce. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979,
108. Sozański M. (1999): Technologia usuwania i unieszkodliwiania osadów z uzdatniania wody. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1999,
109. Sozański M. (2001): Technologia odwadniania osadów i popłuczyn. *Przegląd Komunalny*, Nr 11 (22), str.112,
110. Sozański M., Leszczyńska M. (2001): Skład fizykochemiczny osadów z uzdatniania wody ze szczególnym uwzględnieniem składników toksycznych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, Tom 4, Nr 2, str.197-206,
111. Stańda J. (1995): Woda dla kotłów parowych i obiegów chłodzących siłowni ciepłych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995,
112. Supniewski J. (1958): Preparatyka nieorganiczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1958,
113. Suthaker S., Smith D.W., Stanley S.J. (1993): Characteristics, quantity and thickening of sludge from a partial lime softening plant. *Environmental Technology*, Vol.14 (11), p.1001-1014,
114. Tay Y.Y., Stewart D.I., Cousens T.W. (2000): Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liner. *Engineering Geology*, Vol.60, p.263-274,

115. Thomas J.C., Brown K.W. (1992): Depth variations in hydraulic conductivity within a single lift of compacted clay. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol.65, p.371-380,
116. Trast J. M.; Benson C. H. (1995): Estimating field hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121 (10), p.736-740
117. Tsai T., Vesilind P.A. (1998): A new landfill liner to reduce ground water contamination from heavy metals. *Journal of Environmental Engineering*, Vol.124 (11), p.1061-1065,
118. Wang X., Benson C.D. (1995): Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121 (10), p.713-722,
119. Wiłun Z. (2003): *Zarys geotechniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2003,
120. Wysokiński L. (1995): *Projektowanie przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów komunalnych*. Instrukcja ITB nr 337/1995, Warszawa, 1995,
121. Wysokiński L. (1997): Aktualne problemy budowy, modernizacji i rekultywacji składowisk odpadów komunalnych. *Budowa Bezpiecznych Składowisk Odpadów*, Wymagania techniczne w budowie składowisk, Wisła, 6-28 lutego 1997 r.,
122. Wysokiński L. (2003): Problemy budowy i modernizacji składowisk odpadów. *Materiały budowlane*, Nr 9, str.30-31,
123. Wysokiński L., Łukasik S., Majer E. (2003): *Badania gruntów do budowy przesłon izolacyjnych składowisk odpadów*. Instrukcja ITB nr 339/2003, Warszawa, 2003,
124. Vogt J. (1992): Koncepcja uszczelnienia pośredniego składowisk odpadów komunalnych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 5, str.214-218,
125. Yesiller N., Miller C.J, Inci G, Yaldo K. (2000): Desiccation and cracking behavior of tree compacted landfill liner soils. *Engineering Geology*, Vol.57, p.105-121,
126. Zabielska-Adamska. A. (2006): *Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających*. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2006,

127. Zadroga B. (2001): Wpływ zanieczyszczeń na fizyczne i mechaniczne właściwości gruntów. *Inżynieria Morska i geotechnika*, Nr 6, str.369-376,
128. Zadroga B. (2003): Geoinżynieria środowiska. Problemy i wyzwania. *Inżynieria Morska i geotechnika*, Nr 3/4 , str.204-219,

USTAWY I ROZPORZĄDZENIA

129. Ustawa prawo ochrony środowiska z dnia 27 kwietnia 2001 (Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 627), tekst jednolity,
130. Ustawa o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 roku (Dz. U. 2001 Nr 62 poz. 628), tekst jednolity,
131. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. 2001 Nr 112 poz. 1206),
132. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 października 2001 roku w sprawie opłat za korzystanie ze środowiska (Dz. U. 2001 Nr 130 poz. 1453),
133. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2001 roku w sprawie rodzajów odpadów lub ich ilości, dla których nie ma obowiązku prowadzenia ewidencji odpadów, oraz kategorii małych i średnich przedsiębiorstw, które mogą prowadzić uproszczoną ewidencję odpadów (Dz. U. 2001 Nr 152 poz. 1735),
134. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 grudnia 2001 roku w sprawie zasad sporządzania raportu wojewódzkiego (Dz. U. 2001 Nr 152 poz. 1739),
135. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 października 2002 roku w sprawie rodzajów odpadów, które mogą być składowane w sposób nieselektywny (Dz. U. 2002 Nr 191 poz. 1595),
136. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 marca 2003 roku w sprawie opłat za korzystanie ze środowiska (Dz. U. 2003 Nr 55 poz. 477),
137. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 roku w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz. U. 2003 Nr 61 poz. 549)

138. Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 23 grudnia 2003 roku w sprawie rodzajów odpadów, których zbieranie i transport nie wymagają zezwolenia na prowadzenie działalności (Dz. U. 2004 Nr 16 poz. 154),
139. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 lutego 2004 roku w sprawie klasyfikacji dla prezentowania stanu wód powierzchniowych i podziemnych, sposobu prowadzenia monitoringu oraz sposobu interpretacji wyników i prezentacji stanu tych wód, (Dz. U. Nr 32, Poz. 284),
140. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 maja 2004 roku w sprawie warunków, w których uznaje się, że odpady nie są niebezpieczne (Dz. U. 2004 Nr 128 poz. 1347),
141. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 14 grudnia 2004 roku w sprawie opłat za korzystanie ze środowiska (Dz. U. 2004 Nr 279 poz. 2758),
142. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 czerwca 2005 roku w sprawie podziemnych składowisk odpadów (Dz. U. 2005 Nr 110 poz. 934 i 935),
143. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 7 września 2005 roku w sprawie kryteriów i procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz. U. 2005 Nr 186 Poz. 1553),
144. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 20 grudnia 2005 roku w sprawie opłat za korzystanie ze środowiska (Dz. U. 2005 Nr 260 poz. 2176),
145. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 marca 2006 roku w sprawie odzysku lub unieszkodliwiania odpadów poza instalacjami i urządzeniami (Dz. U. 2006 Nr 49 poz. 356),
146. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 kwietnia 2006 roku w sprawie listy rodzajów odpadów, które posiadacz odpadów może przekazywać osobom fizycznym lub jednostkom organizacyjnym, nie będącym przedsiębiorcami, oraz dopuszczalnych metod ich odzysku (Dz. U. 2006 Nr 75 poz. 527),
147. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 roku w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz. U. Nr 137, Poz. 984)

STRONY INTERNETOWE

148. www.imgw.pl/wl/internet/zz/pogoda/tempsred.html (24.11.2006 r.),
149. www.mos.gov.pl/1materialy_informacyjne/raporty_opracowania/statystyka_GUS_2005/os6/T1.TXT (18.07.2005 r.)

NORMY BUDOWLANE

150. PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowe.
151. PN-86/B-02480. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
152. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
153. PN-88/B-04300 Cement. Metody badań. Oznaczanie cech fizycznych.

NORMY CHEMICZNE

154. PN-79/C-04566.10 Woda i ścieki. Badania zawartości siarki i jej związków. Oznaczanie siarczanów metodą turbidymetryczną.
155. PN-81/C-04578.00 Woda i ścieki. Badania zapotrzebowania tlenu i zawartości węgla organicznego. Postanowienia ogólne i zakres normy.
156. PN-82/C-04576 Woda i ścieki. Badania zawartości związków azotu. Oznaczanie azotu azotanowego metodą kolorymetryczną z salicylanem sodowym.
157. PN-90/C -04540.01 Oznaczanie pH wód i ścieków o przewodności elektrolitycznej właściwej $10 \mu\text{S}/\text{cm}^3$ i powyżej metodą elektrometryczną.
158. PN-92/C-04590.02 Woda i ścieki. Badania zawartości manganu. Oznaczanie manganu metodą nadmanganianową.
159. PN-EN 1189: 2000. Jakość wody. Oznaczanie fosforu. Metoda spektrofotometryczna z molibdenianem amonu.
160. PN-EN 25663:2001 Jakość wody. Oznaczanie azotu Kjeldahla. Metoda po mineralizacji z selenem.

161. PN-EN 27888:1999 Oznaczanie przewodności elektrycznej właściwej.
162. PN-ISO 5664:2002 Jakość wody. Oznaczanie azotu amonowego. Metoda destylacyjna z miareczkowaniem.
163. PN-ISO 6332:2001 Jakość wody. Oznaczanie żelaza. Metoda spektrometryczna z 1,10-fenantroliną.
164. PN-ISO 8288:2002 Jakość wody. Oznaczanie kobaltu, niklu, miedzi, cynku, kadmu i ołowiu. Metody atomowej spektrometrii absorpcyjnej z atomizacją w płomieniu.
165. PN-ISO 9297:1994 Jakość wody. Oznaczanie chlorków. Metoda miareczkowania azotanem srebra w obecności chromianu jako wskaźnika (Metoda Mohra).
166. PN-ISO 9964-1:1994 Jakość wody. Oznaczanie sodu i potasu. Oznaczanie sodu metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej.

BADANIA OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY W ASPEKCIE ICH PRZYDATNOŚCI DO USZCZELNIANIA SKŁADOWISK ODPADÓW

Streszczenie

Celem pracy jest określenie parametrów geotechnicznych osadów z dekarbonizacji wody, ze szczególnym uwzględnieniem przepuszczalności hydraulicznej, w aspekcie możliwości ich wykorzystania do budowy warstw uszczelniających składowisk odpadów i wykazanie, że osady z dekarbonizacji wody w określonych warunkach wbudowania i utrzymania spełniają wymagania stawiane warstwom uszczelniającym na składowiskach odpadów.

Pierwsza część rozprawy obejmuje przegląd stanu wiedzy o osadach z dekarbonizacji wody: proces powstawania, aspekty prawne odzysku i unieszkodliwiania, możliwości wykorzystywania i stan prac badawczych dotyczący tego zagadnienia. Następnie przedstawiono wymagania stawiane warstwom uszczelniającym składowisk odpadów, wytyczne doboru i badania materiału do ich budowy oraz sposoby określania warunków ich wbudowania w konstrukcję.

Zasadniczą część pracy stanowią badania własne geotechnicznych właściwości fizycznych i mechanicznych osadów z dekarbonizacji wody pochodzących z Elektrociepłowni Rzeszów, uzupełnione o wyniki badań podstawowego składu chemicznego osadów oraz o informacje wynikające z przeglądu literatury. W ramach prac laboratoryjnych określono skład granulometryczny osadów, powierzchnię właściwą cząstek oraz gęstość właściwą, granice konsystencji i zagęszczalność osadów. Przeprowadzono badania wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania oraz określono wpływ metody badania i sposobu formowania próbek na uzyskiwane wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności. Wykonano oznaczenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie, różnymi metodami i na ich podstawie ustalono wpływ metody wykorzystywanej do badań na wartości oznaczanych parametrów. Zbadano właściwości pęczniące materiału oraz jego ściśliwość. Szczególny nacisk położono na badania przepuszczalności hydraulicznej osadów, określając jej zmienność

w zależności od wilgotności i zagęszczenia oraz właściwości filtrującej cieczy w czasie. Pod względem właściwości fizycznych, mechanicznych i filtracyjnych osady z dekarbonizacji wody porównano do gruntów spoistych według kryterium geotechnicznego.

Uzyskane wyniki badań uogólniono i podsumowano wnioskami.

Do pracy dołączono tabele ze szczegółowymi wynikami pomiarów oraz wykresy przedstawiające graficzną ich interpretację.

W ostatnim załączniku przedstawiono ogólne wytyczne do badań laboratoryjnych osadów oraz do ich wbudowania w warstwę uszczelnienia.

THE LIME SOFTENING SLUDGE INVESTIGATION IN ASPECT OF USING IT IN LINERS OF LANDFILL SITES

Summary

The aim of this study is to determine the geotechnical properties of the lime softening sludge taking into consideration the hydraulic permeability in the aspect of using it for constructing the sealing layer of landfill sites and proving that the lime softening sludge in some determined conditions of building in and maintaining, meets the requirements for the landfill liners of the waste disposal sites.

The first part of the dissertation includes a survey of the state of the lime softening sludge: the process of production, the legislative aspects of recycling and neutralizing, the possibilities of reusing and the state of research works concerning that issue. Followed by presenting the requirements for landfill liners of waste disposal sites, the guidelines for selection and the tests of materials for their constructions and the manners of determining the conditions of building them in landfill liner systems. The fundamental part of the thesis presents a self-performed geotechnical research of physical and mechanical properties of the lime softening sludge, which is produced in Rzeszów Heat and Power Plant in Poland, completed with the research of the basic chemical characteristics of the investigated sludge and information from the survey of literature. Within the confines of the laboratory research, the particle size analysis of the sludge, the specific density of solids of the particles and the specific surface area, the limits of consistency and the compactibility of the sludge have been determined. The tests of the shear strength of the sludge have been carried out in a direct shear apparatus and in a triaxial compression apparatus. On the basis of the results, the influence of the way in which samples were formed and the method of investigation on the obtained values of internal friction angle and cohesion were presented. There has been a performed research of uniaxial compressing strength and tensile strength in different ways and dependence of the values of these parameters on the way of carrying out the tests

has been analyzed. The swelling characteristic and the compressibility of the sludge have also been investigated. The special emphasis has been placed on the research of the hydraulic permeability and its variability has also been studied depending on moisture content, compaction and the properties of the liquid flowing through the sludge in time. Regarding the physical and mechanical properties and the hydraulic permeability of the lime softening sludge, it was compared according to the geotechnical criteria with the cohesive soils.

The obtained results of carried out tests have been generalized and summed up by the conclusions.

The tables with the detailed results of the measurements and the charts with their graphic interpretation are enclosed to the dissertation.

The last annex includes the general guidelines for laboratory research of geotechnical properties of the lime softening sludge and the conditions of building it in landfill liner system.

ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКОВ, ОБРАЗОВАННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ВОДЫ В АСПЕКТЕ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ УПЛОТНИТЕЛЕЙ В МЕСТАХ СКЛАДИРОВАНИЯ ОТБРОСОВ

Резюме

Цель данного исследования состоит в определении геотехнических свойств осадков образованных в процессе декарбонизации воды со специальным учетом их гидравлической проницаемости в перспективе их использования для строительства уплотнительных слоев в местах складирования отходов и доказательстве того, что в некоторых определенных условиях встроения и сохранения, осадки, полученные в результате декарбонизации воды, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к уплотнительным слоям мест складирования отходов.

Первая часть диссертации включает обзор имеющейся информации об осадках полученных в результате декарбонизации воды: процессе производства, законодательных аспектах переработки и обезвреживания, возможностях использования и уровне научно-исследовательских работ касающихся этой проблемы. В работе представлены технические требования для уплотнительных слоев мест складирования отходов, основные критерии для выбора грунтов и их использования для строительства, а также методы определения условий их встроения в конструкции. Фундаментальная часть тезиса раскрывает собственные геотехнические исследования физических и механических свойств осадков образованных в процессе декарбонизации воды, которые были произведены на Теплоэлектростанции Rzeszów в Польше, дополненные результатами исследований основного химического состава осадков и информацией, полученной из литературных источников. В результате проведенных лабораторных исследований был определен гранулометрический состав осадка, характерная форма и плотность твердых частиц, пределы консистенции и пористость осадка. Тесты на определение механических свойств осадка были выполнены в приборе одноплоскостного сдвига и в приборе

для трехосного сжатия. На основании проведенных опытов выявлена зависимость между способом формирования осадков, методами исследования и полученными значениями угла внутреннего трения и удельного сцепления. Произведены исследования сопротивления одноосному сжатию и сопротивлению растяжению различными способами на основании которых установлено влияние метода исследования на полученные значения определенных параметров. Так же проведены испытания осадков на пучинистость и сжимаемость. Специальный упор был сделан на исследование гидравлической проницаемости (фильтрации) и изучение ее изменчивости в зависимости от влажности и уплотнения, а также от свойств жидкости, фильтрующейся через осадки во времени. По физическим, механическим и фильтрационным свойствам осадки, образовавшиеся в процессе декарбонизации воды схожи по геотехническому критерию со связными грунтами.

Полученные результаты всех выполненных тестов обобщены с подведением итогов.

К диссертации приложены таблицы с детальными результатами исследований и диаграммы представляющие их графическую интерпретацию.

Последнее приложение включает основные критерии для лабораторных исследований геотехнических свойств осадков образованных в процессе декарбонизации воды и условия их встроения в системе уплотнения.

Tablica 2.1.1. Właściwości fizyczne osadów z dekarbonizacji wody z zakwaszeniem i zalkalicowaniem

Lp.	Wł. wilgotnościowa	Ciężar właściwy	Ciężar właściwy		Ciężar właściwy		Ciężar właściwy	Ciężar właściwy
			ρ_s	ρ_{s0}	ρ_{s1}	ρ_{s2}		
1	89,1							
2	87,3							
3	88,8							
4	87,8							
5	87,1							
6	87,1							
7	87,1							
8	87,1							
9	87,1							
10	87,1							
11	87,1							
Średnia	87,1							

ZAŁĄCZNIK I

FIZYCZNE WŁAŚCIWOŚCI GEOTECHNICZNE

OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

Lp.	ρ_s	ρ_{s0}	ρ_{s1}	ρ_{s2}
1	17,75	17,75	17,75	17,75
2	18,28	18,28	18,28	18,28
3	18,81	18,81	18,81	18,81
4	18,34	18,34	18,34	18,34
5	18,87	18,87	18,87	18,87
6	18,40	18,40	18,40	18,40
7	18,93	18,93	18,93	18,93
8	18,46	18,46	18,46	18,46
9	18,99	18,99	18,99	18,99
10	18,52	18,52	18,52	18,52
11	19,05	19,05	19,05	19,05
12	18,58	18,58	18,58	18,58
13	19,11	19,11	19,11	19,11
14	18,64	18,64	18,64	18,64
15	19,17	19,17	19,17	19,17
16	18,70	18,70	18,70	18,70
17	19,23	19,23	19,23	19,23
Średnia	18,87	18,87	18,87	18,87

Tabela Z.I.1. Wilgotność w , gęstość objętościowa ρ i gęstość objętościowa szkieletu ρ_d osadów z dekarbonizacji wody oraz ich porowatość n i wskaźnik porowatości e

L.p.	Wilgotność w	Rodzaj materiału	Objętość pierścienia V_1/V_2	Masa osadu w pierścieniu m_m	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Porowatość n	Wskaźnik porowatości e	UWAGI
	%		cm ³	g	g/cm ³	g/cm ³	-	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	49,1	rozdrobniony	-	-	-	-	-	-	
2	47,3	próbka pobrana z brykietu uformowanego w prasie filtracyjnej	-	-	-	-	-	-	
3	46,8		50	82,02	1,64	1,12	0,59	1,43	
4	47,6		50	80,28	1,61	1,09	0,60	1,50	
5	55,1		10	17,36	1,74	1,12	0,59	1,43	
6	55,1		10	16,57	1,66	1,07	0,61	1,55	
7	50,5		10	16,92	1,69	1,12	0,59	1,42	
8	46,6		10	17,85	1,79	1,22	0,55	1,23	
9	46,1		10	17,44	1,74	1,19	0,56	1,28	
10	48,5		10	17,81	1,78	1,20	0,56	1,27	
11	47,4		10	17,19	1,72	1,17	0,57	1,33	miar ilości wody związanej
Srednia:	49,1			Średnia:	1,71	1,14	0,58	1,38	

Tabela Z.I.2. Pomiar ilości wody związanej w osadach z dekarbonizacji wody

L.p.	Masa próbki m_m	Wilgotność w	Czas
	g	%	min.
1	2	3	4
1	17,19	47,43	0
2	16,38	40,48	20
3	15,86	36,02	33
4	15,48	32,76	40
5	15,19	30,27	50
6	14,83	27,19	60
7	14,51	24,44	70
8	14,07	20,67	80
9	13,65	17,07	90
10	12,41	6,43	125
11	12,17	4,37	140
12	12,03	3,17	150
13	11,68	0,17	185
14	11,68	0,17	330
15	11,67	0,09	1260
16	11,67	0,09	1385
17	11,66	0,00	2730

Tabela Z.I.3. Zawartość frakcji – analiza areometryczna wykonana zgodnie z normą PN-88/B-04481

Frakcja	Zawartość frakcji					
	Próbka nr 1	Próbka nr 2	Próbka nr 3	Próbka nr 4 (M)	Próbka nr 5 (S)	Próbka nr 6
mm	%	%	%	%	%	%
1	2	3	4	5	6	7
> 1,0	-	-	-	-	-	-
1,0-0,5	-	-	-	2,0	2,0	3,0
0,5-0,25	0,5	1,0	-	2,0	2,0	3,0
0,25-0,1	1,3	1,3	0,4	2,0	2,0	4,0
0,1-0,05	2,5	1,2	0,6	14,0	12,0	15,0
0,05-0,02	1,4	8,1	27,8	13,0	39,0	16,0
0,02-0,006	49,4	78,9	64,0	43,0	15,0	41,0
0,006-0,002	21,2	6,9	5,2	8,0	14,0	6,0
<0,002	23,7	2,6	2,0	16,0	14,0	12,0
Suma	100	100	100	100	100	100

Tabela Z.I.4. Zawartość frakcji – analiza areometryczna wykonana w aparacie laserowym

Frakcja	Zawartość frakcji					
	Pomiar z użyciem ultradźwięków			Pomiar bez użycia ultradźwięków		
	Próbka nr 7 (M)	Próbka nr 8 (S)	Próbka nr 9	Próbka nr 10 (M)	Próbka nr 11 (S)	Próbka nr 12
mm	%	%	%	%	%	%
1	2	3	4	5	6	7
> 1,0	-	-	-	-	-	-
1,0-0,5	-	-	-	0,1	0,1	0,1
0,5-0,25	-	-	-	7,4	7,0	11,0
0,25-0,125	-	-	-	13,4	12,3	17,4
0,125-0,063	-	-	0,2	11,1	8,2	9,6
0,063-0,031	9,6	6,4	11,1	12,5	9,2	8,6
0,031-0,016	32,0	32,4	32,3	18,9	19,8	16,3
0,016-0,008	31,1	34,0	29,2	19,4	22,5	18,3
0,008-0,004	14,2	14,8	13,2	9,6	11,6	9,9
0,004-0,002	5,4	5,1	5,7	3,0	3,8	3,9
0,002-0,001	3,0	2,8	3,5	1,7	2,0	2,1
<0,001	4,7	4,5	4,8	3,0	3,5	2,8
Suma	100	100	100	100	100	100

Tabela Z.I.5. Oznaczenie powierzchni właściwej

Nr pomiaru	Nr próbki	Sposób pomiaru	Powierzchnia właściwa S_f	Wartość średnia
-	-	-	m ² /g	m ² /g
1	2	3	4	5
1	7 (M)	Analiza areometryczna w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząstek	1,15	1,14
2	8 (S)		1,12	
3	9		1,15	
4	10 (M)	Analiza areometryczna w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” bez użycia ultradźwięków	0,721	0,722
5	11 (S)		0,721	
6	12		0,723	

Tabela Z.I.6. Oznaczenie gęstości właściwej osadów z dekarbonizacji wody

L.p.	Gęstość właściwa	Rodzaj próbki
	ρ_s g/cm ³	
1	2	3
1	2,697	pobrana bezpośrednio spod prasy filtracyjnej, przechowywana w plastikowym worku w Laboratorium Geotechnicznym Zakładu Budownictwa Wodnego Politechniki Warszawskiej
2	2,708	
3	2,805	
4	2,759	
5	2,765	
6 (M)	2,674	pobrana z warstwy odpadów o miąższości 0,1-0,15 m, zalegających na odpadach paleniskowych i pod około 0,2 m warstwą gliny, poniżej poziomu wody gruntowej, czas zalegania odpadów w warstwie: około 1 roku
7 (S)	2,676	pobrana z warstwy 0,1-0,15 m odpadów zalegających na odpadach paleniskowych i pod około 0,7 m warstwą gliny, powyżej zwierciadła wody gruntowej, czas zalegania odpadów w warstwie: około 1 roku
8	2,656	jak próbki nr 1-5
Średnia:	2,72 ± 0,05	

Tabela Z.I.7. Oznaczenie granicy plastyczności osadów z dekarbonizacji wody

Nr oznaczenia	Granica plastyczności w_p
-	%
1	2
1	34,55
2	40,89
3	40,50
4	34,12
5	34,80
6	37,93
7	37,90
8	37,66
9	37,12
	37,27

Tabela Z.I.8. Oznaczenie granicy płynności osadów z dekarbonizacji wody

Nr	Próbka nr 1		Próbka nr 2		Próbka nr 3		Próbka nr 4	
	Liczba uderzeń	Wilgotność w	Liczba uderzeń	Wilgotność w	Liczba uderzeń	Wilgotność w	Liczba uderzeń	Wilgotność w
-	-	%	-	-	%	%	-	%
1	2	3	4	6	7	5	6	7
1	13	71,77	12	59,13	14	65,79	18	68,01
2	20	69,64	17	59,96	17	64,81	21	63,92
3	25	65,17	19	59,20	20	63,13	24	62,97
4	28	62,99	22	59,10	29	63,69	26	62,46
5	32	62,79	30	57,87	32	60,12	31	61,18
6	-	-	31	57,43	35	59,57	-	-
7	-	-	-	-	37	62,20	-	-

Tabela Z.I.9. Wyniki pomiarów granicy skurczalności w_s osadów z dekarbonizacji wody

Seria	Nr	Próbki uformowane z osadów wilgotnych										Próbki wysuszone do stałej masy					UWAGI
		m_m	D	H	V	ρ	w	ρ_d	I_s	m_s	D	H	V	ρ_d	w_s		
		g	cm	cm	cm ³	g/cm ³	%	g/cm ³	-	g	cm	cm	cm ³	g/cm ³		%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	1	45,84	3,69	2,43	25,99	1,76	36,35	1,29	0,92	33,62	3,63	2,39	24,74	1,36	36,83		
	2	43,20	3,71	2,35	25,35	1,70	37,01	1,24	0,89	31,53	3,65	2,34	24,44	1,29	40,76		
	3	45,07	3,71	2,45	26,49	1,70	35,35	1,26	0,90	33,30	3,66	2,33	24,53	1,36	36,89		miar odrzucono
2	4	48,92	3,71	2,53	27,35	1,79	37,73	1,30	0,93	35,52	3,64	2,51	26,10	1,36	36,72		
	5	46,87	3,70	2,44	26,18	1,79	37,89	1,30	0,93	33,99	3,61	2,42	24,83	1,37	36,28		
	6	49,47	3,70	2,53	27,20	1,82	37,84	1,32	0,94	35,89	3,63	2,50	25,93	1,38	35,48		
3	7	48,68	3,70	2,49	26,77	1,82	39,56	1,30	0,93	34,88	3,61	2,46	25,16	1,39	35,38		
	8	48,20	3,66	2,48	26,04	1,85	39,55	1,33	0,95	34,54	3,61	2,47	25,21	1,37	36,23		
	9	53,41	3,78	2,72	30,52	1,75	40,22	1,25	0,89	38,09	3,59	2,72	27,51	1,38	35,45		
4	10	48,24	3,68	2,53	26,91	1,79	41,30	1,27	0,91	34,14	3,57	2,46	24,66	1,38	35,46		
	11	58,26	3,67	3,07	32,42	1,80	42,03	1,27	0,90	41,02	3,59	2,98	30,13	1,36	36,68		
	12	48,86	3,68	2,56	27,23	1,79	41,79	1,27	0,90	34,46	3,53	2,49	24,37	1,41	33,96		
5	13	50,37	3,70	2,66	28,55	1,76	42,77	1,24	0,88	35,28	3,60	2,54	25,92	1,36	36,71		
	14	45,38	3,70	2,45	26,34	1,72	42,53	1,21	0,86	31,84	3,58	2,34	23,58	1,35	37,29		
	15	55,93	3,68	2,98	31,70	1,76	43,12	1,23	0,88	39,08	3,56	2,84	28,22	1,38	35,44		
6	16	46,20	3,68	2,51	26,70	1,73	44,42	1,20	0,86	31,99	3,49	2,40	23,02	1,39	35,20		
	17	48,73	3,65	2,72	28,38	1,72	44,00	1,19	0,85	33,84	3,51	2,59	24,98	1,35	37,06		
	18	53,54	3,68	2,93	31,11	1,72	44,47	1,19	0,85	37,06	3,53	2,81	27,44	1,35	37,28		
														Srednia	36,14		

m_m – masa próbki wilgotnej po uformowaniu, g.

m_s – masa próbki po wysuszeniu, g.

D – średnica próbki, cm.

H – wysokość próbki, cm.

w – wilgotność, %.

ρ – gęstość objętościowa, g/cm³.

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu, g/cm³.

I_s – wskaźnik zagęszczenia, -.

w_s – granica skurczalności, %.

Tabela Z.I.10. Metody zagęszczania osadów z dekarbonizacji wody - charakterystyka

L.p.	Metoda	Liczba warstw	Liczba uderzeń ubijaka na warstwę	Masa ubijaka	Wysokość spadania ubijaka	Energia zagęszczania
				kg	cm	J/cm ³
1	2	3	4	5	6	7
1	Standardowa (metoda I wg normy PN-88/B-04481)	3	25	2,5	32	0,59
2	standardowa zredukowana	3	15	2,5	32	0,35
3	Zmodyfikowana (metoda III wg normy PN-88/B-04481)	5	25	4,5	48	2,65

Tabela Z.1.11. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody – metoda standardowa

Nr	Rodzaj materiału	Wilgotność w %	Wilgotność po zagęszczeniu $w_{(p)}$ %	UWAGI	Gęstość objętościowa ρ g/cm ³	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d g/cm ³	Gęstość objętościowa szkieletu dla wilgotności $w_{(p)}$ $\rho_{d(p)}$ g/cm ³	Porowatość n	Wskaźnik porowatości e	UWAGI
-	-	%	%		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	-	-	
1	2	3	4	5						11
1	Odpady	1,4	1,9	mieszanie ręczne	1,26	1,25	1,24	0,55	1,21	po wyschnięciu do stanu powietrznego suchego
2		1,9		P		1,24				
3	Odpady	5,5	4,9	mieszanie ręczne	1,07	1,01	1,02	0,63	1,71	
4	+120g H ₂ O	4,9		P		1,02				
5	Odpady	7,9	7,6	mieszanie ręczne	1,13	1,05	1,05	0,62	1,62	
6	+240g H ₂ O	7,6		P		1,05				
7	Odpady	9,7	9,7	mieszanie ręczne	1,12	1,02	1,02	0,63	1,70	
8	+300g H ₂ O	9,7		P		1,02				
9	Odpady	11,4	11,3	mieszanie ręczne	1,07	0,96	0,96	0,65	1,86	
10	+360g H ₂ O	11,3		P		0,96				
11	Odpady	11,8	11,4	mieszanie ręczne	1,21	1,08	1,09	0,61	1,53	przy zagęszczaniu materiał rozsypane się z cylindra, ale już nie pyli; przy odwracaniu wysypuje się z cylindra
12	+420g H ₂ O	11,4		P		1,09				
13	Odpady	13,0	12,7	mieszanie ręczne	1,33	1,18	1,18	0,57	1,33	materiał nadal sypki i miękki, góra wciąga się kruszy
14	+480g H ₂ O	12,7		P		1,18				
15	Odpady	15,2	14,9	mieszanie ręczne	1,41	1,23	1,23	0,55	1,24	zagęszczanie bez osłonki, nie pyli, wypada z cylindra przy zagęszczaniu, ale się nie rozsypane
16	+540g H ₂ O	14,9		P		1,23				
17	Odpady	16,5	16,3	mieszanie ręczne	1,46	1,25	1,25	0,54	1,20	
18	+600g H ₂ O	16,3		P		1,25				
19	Odpady	18,5	17,8	mieszanie ręczne	1,49	1,26	1,27	0,54	1,18	
20	+660g H ₂ O	17,8		P		1,27				
21	Odpady	19,5	19,6	mieszanie ręczne	1,53	1,28	1,28	0,53	1,15	
22	+720g H ₂ O	19,6		P		1,28				
23	Odpady	18,4	18,8	mieszanie ręczne	1,52	1,29	1,28	0,53	1,14	
24	+720g H ₂ O	18,8		P		1,28				

Tabela Z.I.11. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody – metoda standardowa (c.d.)

Nr	Rodzaj materiału	Wilgotność w		Wilgotność po zagęszczeniu $w_{(p)}$		UWAGI		Gęstość objętościowa szkieletu ρ g/cm ³	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d g/cm ³	Gęstość objętościowa szkieletu dla wilgotności $w_{(p)}$ ρ_d g/cm ³	Porowatość n	Wskaźnik porowatości e	UWAGI	
		%	3	%	4	5	6							7
1	-													
25	Odpady +780g H ₂ O	20,0		19,7		mieszanie ręczne	1,55	1,29	1,29	1,29	0,53	1,13		
26	Odpady +840g H ₂ O	21,6		21,6		mieszanie ręczne	1,58	1,30	1,30	1,30	0,53	1,12		
27	Odpady +900g H ₂ O	23,2		23,4		mieszanie ręczne	1,62	1,31	1,31	1,31	0,52	1,09		
28	Odpady +960g H ₂ O	25,4		25,0		mieszanie ręczne	1,68	1,34	1,34	1,35	0,51	1,04		
29	Odpady +1020g H ₂ O	26,5		26,4		mieszanie ręczne	1,73	1,37	1,37	1,37	0,50	1,01		
30	Odpady +1080g H ₂ O	28,6		28,9		mieszanie ręczne	1,81	1,40	1,40	1,40	0,49	0,96		
31	Odpady +1140g H ₂ O	30,5		29,6		mieszanie ręczne	1,81	1,39	1,39	1,39	0,49	0,98		nie ma głuchego odbicia przy ubijaniu, materiał staje się plastyczny
32	Odpady +1200g H ₂ O	32,5		32,3		mieszanie ręczne	1,81	1,36	1,37	1,37	0,50	1,01		Pojawia się wilgoć przy podstawie przy zagęszczaniu
33	Odpady +1260g H ₂ O	34,3		33,4		mieszanie ręczne	1,82	1,36	1,37	1,36	0,50	1,02		zaczyna się zbrylać po dolaniu wody, pojawia się wilgoć przy podstawie przy zagęszczaniu, bardzo plastyczne
34	Odpady +1320g H ₂ O	36,1		35,5		mieszanie ręczne	1,82	1,34	1,34	1,34	0,51	1,05		zbryla się, brak jest wilgoci i wody przy podstawie przy zagęszczaniu
35	Odpady +1380g H ₂ O	39,8		39,6		mieszanie ręczne	-	-	-	-	-	-		nie daje się zagęszczać
36	Odpady +1380g H ₂ O	39,6				P								

P – pomiar dla osadów zagęszczonych w cylindrze aparatu Proctora. $w_{(p)}$ – do dalszych obliczeń przyjęto wilgotność oznaczoną z dla osadów zagęszczonych w cylindrze aparatu Proctora

Tabela Z.I.12. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody – metoda standardowa zredukowana

Nr	Rodzaj materiału	Wilgotność w %	Wilgotność po zagęszczeniu $w_{(p)}$ %	UWAGI	Gęstość objętościowa ρ g/cm ³	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d g/cm ³	Gęstość objętościowa szkieletu dla wilgotności $w_{(p)}$ ρ_d g/cm ³	Porowatość n	Wskaznik porowatości e	UWAGI
-	-	%	%		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	-	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Odpady	30,2	27,6	mieszanie ręczne	1,49	1,14	1,16	0,58	1,38	
2	+650g H ₂ O	27,6		P		1,16				
3	Odpady	34,8	34,3	mieszanie ręczne	1,57	1,17	1,17	0,58	1,35	
4	+850g H ₂ O	34,3		P		1,17				
5	Odpady	36,3	36,3	mieszanie ręczne	1,63	1,19	1,19	0,57	1,31	
6	+910g H ₂ O	36,3		P		1,19				
7	Odpady	38,1	37,5	mieszanie ręczne	1,67	1,21	1,21	0,56	1,27	
8	+970g H ₂ O	37,5		P		1,21				
9	Odpady	39,6	38,1	mieszanie ręczne	1,71	1,23	1,24	0,55	1,23	zaczynają się tworzyć małe grudki
10	+1030g H ₂ O	38,1		P		1,23				
11	Odpady	41,4	40,9	mieszanie ręczne	1,71	1,21	1,22	0,56	1,26	grudki
12	+1090g H ₂ O	40,9		P		1,22				
13	Odpady	44,0	43,2	mieszanie ręczne	1,71	1,19	1,20	0,57	1,31	pojawia się wilgoć u podstawy
14	+1150g H ₂ O	43,2		P		1,19				
15	Odpady	46,9	45,3	mieszanie ręczne	1,72	1,17	1,18	0,57	1,33	odeszło z gumą
16	+1210g H ₂ O	45,3		P		1,17				

P – pomiar dla osadów zagęszczonych w cylindrze aparatu Proctora,

$w_{(p)}$ – do dalszych obliczeń przyjęto wilgotność oznaczoną z dla osadów zagęszczonych w cylindrze aparatu Proctora

Tabela Z.I.13. Zagęszczalność osadów z dekarbonizacji wody – metoda zmodyfikowana

Nr	Rodzaj materiału	Wilgotność		Wilgotność po zagęszczeniu $w_{(P)}$	UWAGI	Gęstość objętościowa		Gęstość objętościowa szkieletu dla wilgotności $w_{(P)}$	Porowatość n	Wskaźnik porowatości e	UWAGI
		w	%			ρ	ρ_d				
				%		g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3			
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	Odpady +420g H ₂ O	18,1	19,4	mieszanie ręczne	1,57	1,33	1,31	0,52	1,09		
2	Odpady +480g H ₂ O	20,1	20,1	mieszanie ręczne	1,64	1,37	1,37	0,50	1,01		
3	Odpady +540g H ₂ O	22,2	22,5	mieszanie ręczne	1,72	1,40	1,40	0,49	0,96		
4	Odpady +600g H ₂ O	25,0	24,1	mieszanie ręczne	1,81	1,44	1,46	0,47	0,90		
5	Odpady +660g H ₂ O	26,4	26,4	mieszanie ręczne	1,87	1,48	1,48	0,46	0,86		
6	Odpady +720g H ₂ O	27,5	27,6	mieszanie ręczne	1,89	1,49	1,48	0,46	0,85		
7	Odpady +780g H ₂ O	29,5	29,8	mieszanie ręczne	1,87	1,45	1,44	0,47	0,90		zaczynają tworzyć się grudki
8	Odpady +840g H ₂ O	32,9	32,3	mieszanie ręczne	1,85	1,39	1,40	0,49	0,97		zaczyna się mazać, spód odkleił się na gumie
9	Odpady +900g H ₂ O	34,0	34,7	mieszanie ręczne	-	-	-	-	-		nie daje się zagęszczać
10	Odpady +900g H ₂ O	34,7	34,7	P	-	-	-	-	-		

P – pomiar dla osadów zagęszczonych w cylindrze aparatu Proctora.

$w_{(P)}$ – do dalszych obliczeń przyjęto wilgotność oznaczoną z dla osadów zagęszczonych w cylindrze aparatu Proctora

Tabela 2.1.1.1. Właściwości mechaniczne zagęszczonych osadów z dekarbonizacji wody

Przebieg procesu	Prędkość osiadania (%)	Prędkość osiadania (mm/h)	Wzrost osadu (g/g)	Prędkość osiadania (mm/h)	Prędkość osiadania (mm/h)	Prędkość osiadania (mm/h)	Prędkość osiadania (mm/h)
1	100	100	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100	100	100
4	100	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100	100
6	100	100	100	100	100	100	100
7	100	100	100	100	100	100	100
8	100	100	100	100	100	100	100
9	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100
11	100	100	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100	100	100
13	100	100	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100	100	100
15	100	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	100	100	100
17	100	100	100	100	100	100	100
18	100	100	100	100	100	100	100
19	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100
21	100	100	100	100	100	100	100
22	100	100	100	100	100	100	100
23	100	100	100	100	100	100	100
24	100	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	100	100	100
26	100	100	100	100	100	100	100
27	100	100	100	100	100	100	100
28	100	100	100	100	100	100	100
29	100	100	100	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100	100
31	100	100	100	100	100	100	100
32	100	100	100	100	100	100	100
33	100	100	100	100	100	100	100
34	100	100	100	100	100	100	100
35	100	100	100	100	100	100	100
36	100	100	100	100	100	100	100
37	100	100	100	100	100	100	100
38	100	100	100	100	100	100	100
39	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	100	100	100
41	100	100	100	100	100	100	100
42	100	100	100	100	100	100	100
43	100	100	100	100	100	100	100
44	100	100	100	100	100	100	100
45	100	100	100	100	100	100	100
46	100	100	100	100	100	100	100
47	100	100	100	100	100	100	100
48	100	100	100	100	100	100	100
49	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100
51	100	100	100	100	100	100	100
52	100	100	100	100	100	100	100
53	100	100	100	100	100	100	100
54	100	100	100	100	100	100	100
55	100	100	100	100	100	100	100
56	100	100	100	100	100	100	100
57	100	100	100	100	100	100	100
58	100	100	100	100	100	100	100
59	100	100	100	100	100	100	100
60	100	100	100	100	100	100	100
61	100	100	100	100	100	100	100
62	100	100	100	100	100	100	100
63	100	100	100	100	100	100	100
64	100	100	100	100	100	100	100
65	100	100	100	100	100	100	100
66	100	100	100	100	100	100	100
67	100	100	100	100	100	100	100
68	100	100	100	100	100	100	100
69	100	100	100	100	100	100	100
70	100	100	100	100	100	100	100
71	100	100	100	100	100	100	100
72	100	100	100	100	100	100	100
73	100	100	100	100	100	100	100
74	100	100	100	100	100	100	100
75	100	100	100	100	100	100	100
76	100	100	100	100	100	100	100
77	100	100	100	100	100	100	100
78	100	100	100	100	100	100	100
79	100	100	100	100	100	100	100
80	100	100	100	100	100	100	100
81	100	100	100	100	100	100	100
82	100	100	100	100	100	100	100
83	100	100	100	100	100	100	100
84	100	100	100	100	100	100	100
85	100	100	100	100	100	100	100
86	100	100	100	100	100	100	100
87	100	100	100	100	100	100	100
88	100	100	100	100	100	100	100
89	100	100	100	100	100	100	100
90	100	100	100	100	100	100	100
91	100	100	100	100	100	100	100
92	100	100	100	100	100	100	100
93	100	100	100	100	100	100	100
94	100	100	100	100	100	100	100
95	100	100	100	100	100	100	100
96	100	100	100	100	100	100	100
97	100	100	100	100	100	100	100
98	100	100	100	100	100	100	100
99	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100

ZAŁĄCZNIK II

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZAGĘSZCZONYCH OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

Przebieg procesu osiadania osadów z dekarbonizacji wody

Tabela Z.II.1. Badania wytrzymałości na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – charakterystyka badań

Seria	Oznaczenie serii	Partia materiału	Wilgotność optymalna W_{opt}	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds}	Wymiary próbki	Prędkość ścinania	Sposób formowania próbek	Liczba oznaczeń w serii	Zakres wilgotności	UWAGI
-	-	-	%	g/cm^3	cm x cm x cm	mm/min.	-	-	%	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	B-P	I	28,9	1,40	6,0 x 6,0 x 2,0		materiał zagęszczany mechanicznie w cylindrze aparatu Proctora metodą standardową (metoda I wg normy PN-88/B-04481), podzielony na 5 plastrów o grubości 2,0 cm każdy, próbki wycięto ze środkowych części plastrów i ścięto bezpośrednio po przygotowaniu	5	31,40÷35,89	przy wilgotności $W \leq 30\%$, kruszenie się materiału uniemożliwiało wycięcie próbek do badań
2	B-U					0,01	określona masa materiału o znanej wilgotności zagęszczana przez ubijanie ręcznym ubijakiem, w 3 warstwach, w skrzynce aparatu o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa), próbki ścięto bezpośrednio po przygotowaniu	6	25,23÷44,18	
3	B-S	II	37,7	1,28	6,0 x 6,0 x 3,8		określona masa materiału o znanej wilgotności zagęszczana statycznie, przez ściskanie w ręcznej prasie, w skrzynce aparatu o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa), próbki ścięto bezpośrednio po przygotowaniu	6	24,75÷42,88	

Oznaczenia:

B – badanie wykonane w aparacie bezpośredniego ścinania

P – próbki zagęszczane mechanicznie w cylindrze aparatu Proctora

U – próbki zagęszczane dynamicznie w 3 warstwach przez ubijanie ręcznym ubijakiem

S – próbki zagęszczane statycznie przez ściskanie w ręcznej prasie

Tabela Z.II.2. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia I, seria B-P (próbki zagęszczane mechanicznie w cylindrze aparatu Proctora)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Gęstość objętościowa ρ	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie normalne σ	Odczyt O		Wytrzymałość na ścinanie τ_f	Spójność c_s	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_s	Przesunięcie w momencie ścięcia ΔL	Odształcenie jednostkowe ε	UWAGI
		g/cm ³	%	g/cm ³		kPa	mm	N	kPa	kPa	°	mm	%	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1					25	0,46	240,84	66,90			5,00	8,33	
2	1					50	0,62	324,61	90,17			8,00	13,33	
3	1	1,77	33,89	1,32	0,95	100	0,98	513,09	142,52	61,14	34,99	7,00	11,67	
4	1					200	1,50	785,34	218,15			6,00	10,00	
5	1					400	2,29	1198,95	333,04			5,00	8,33	
6	1					25	0,37	193,72	53,81			7,00	11,67	
7	1					50	0,50	261,78	72,72			7,00	11,67	
8	2	1,79	34,88	1,33	0,95	100	0,78	408,38	113,44	56,17	25,56	6,00	10,00	
9	2					200	1,22	638,74	177,43			6,00	10,00	
10	2					400	1,61	842,93	234,15			9,00	15,00	
11	2					25	0,33	172,77	47,99			9,00	15,00	
12	2					50	0,355	185,86	51,63			7,00	11,67	
13	3	1,78	35,89	1,31	0,93	100	0,63	329,84	91,62	36,81	22,79	7,00	11,67	
14	3					200	0,765	400,52	111,26			9,00	15,00	
15	3					400	1,425	746,07	207,24			9,00	15,00	
16	3					25	0,58	303,66	84,35			7,00	11,67	
17	3					50	0,625	327,23	90,90			9,00	15,00	uszkodzona
18	4	1,76	31,40	1,34	0,96	100	1,095	573,30	159,25	72,02	36,12	9,00	15,00	
19	4					200	1,64	858,64	238,51			9,00	15,00	
20	4					400	2,425	1269,63	352,68			9,00	15,00	
21	4					25	0,36	188,48	52,36			9,00	15,00	
22	4					50	0,42	219,90	61,08			9,00	15,00	
23	5	1,78	35,67	1,31	0,94	100	0,45	235,60	65,45	40,42	18,86	9,00	15,00	
24	5					200	0,755	395,29	109,80			9,00	15,00	
25	5					400	1,225	641,36	178,16			9,00	15,00	

Tabela Z.II.3. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, seria B-U (próbki zagęszczane dynamicznie przez ubijanie w 3 warstwach w skrzynce aparatu)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Gęstość objętościowa ρ	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napięcie normalne σ	Odczyt O		Wytrzymałość na ścinanie τ_f	Spójność c_s	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_s	Przesunięcie w momencie ścięcia ΔL	Odkształcenie jednostkowe ε	UWAGI	
							mm	N							
-	-	g/cm ³	%	g/cm ³	-	kPa	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2		4	5	6		25	0,540	282,72	78,53		2,00			
2						50	0,690	361,26	100,35			2,00		3,33	
3	1	1,71	43,61	1,19	0,93	100	0,920	481,68	133,80	65,02	35,46	2,00		3,33	
4						200	1,510	790,58	219,60			6,00		10,00	
5						400	2,370	1240,84	344,68			5,00		8,33	
6						25	0,465	243,46	67,63			4,00		6,67	
7						50	0,565	295,81	82,17			5,00		8,33	
8	2	1,74	44,18	1,21	0,94	100	0,795	416,23	115,62	51,87	32,09	5,00		8,33	
9						200	1,220	638,74	177,43			1,00		1,67	
10						400	2,080	1089,00	302,50			1,00		1,67	
11						25	0,610	319,37	88,71			1,00		1,67	
12						50	0,670	350,79	97,44			1,00		1,67	
13	3	1,58	33,09	1,19	0,93	100	1,040	544,50	151,25	66,12	39,33	1,00		1,67	
14						200	1,650	863,87	239,97			7,00		11,67	
15						400	2,680	1403,14	389,76			7,50		12,50	
16						25	0,560	293,19	81,44			1,00		1,67	
17						50	0,770	403,14	111,98			1,00		1,67	
18	4	1,47	25,23	1,18	0,92	100	1,055	552,36	153,43	66,75	40,25	2,00		3,33	
19						200	1,650	863,87	239,97			7,50		12,50	
20						400	2,770	1450,26	402,85			4,50		7,50	
21						25	0,580	303,66	84,35			1,00		1,67	
22						50	0,700	366,49	101,80			2,00		3,33	
23	5	1,73	38,72	1,24	0,97	100	1,005	526,18	146,16	68,84	37,39	3,00		5,00	
24						200	1,625	850,79	236,33			6,00		10,00	
25						400	2,530	1324,61	367,95			4,50		7,50	

Tabela Z.II.3. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, seria B-U (próbki zagęszczane dynamicznie przez ubijanie w 3 warstwach w skrzynce aparatu), (c.d.)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Gęstość objętościowa ρ g/cm ³	Wilgotność w %	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d g/cm ³	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Naprężenie normalne σ kPa	Odczyt O		Wytrzymałość na ścinanie τ_f kPa	Spójność c_s kPa	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_s °	Przesunięcie w momencie ścięcia ΔL mm	Odkształcenie jednostkowe ε	UWAGI
							mm	N						
-	-													
1	2		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
26						25	0,540	282,72	78,53			3,00	5,00	
27						50	0,720	376,96	104,71			3,00	5,00	
28	6	1,77	38,32	1,28	1,00	100	1,080	565,44	157,07	75,50	34,07	4,00	6,67	
29						200	1,540	806,28	223,97			6,00	10,00	
30						400	2,320	1214,66	337,41			4,00	6,67	

Tabela Z.II.4. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, seria B-S (próbki zagęszczane statycznie przez ściskanie w skrzynce aparatu)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Gęstość objętościowa ρ g/cm ³	Wilgotność w %	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d g/cm ³	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Naprężenie normalne σ kPa	Odczyt O		Wytrzymałość na ścinanie τ_f kPa	Spójność c_s kPa	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_s °	Przesunięcie w momencie ścięcia ΔL mm	Odkształcenie jednostkowe ε	UWAGI
							mm	N						
-	-													
1	2		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1						25	0,495	259,16	71,99			2,00	3,33	
2						50	0,680	356,02	98,89			5,00	8,33	
3	1	1,71	42,38	1,20	0,94	100	0,940	492,15	136,71	66,42	34,06	3,00	5,00	
4						200	1,520	795,81	221,06			3,50	5,83	
5						400	2,250	1178,01	327,23			3,00	5,00	
6						25	0,375	196,34	54,54			3,00	5,00	
7						50	0,570	298,43	82,90			4,00	6,67	
8	2	1,74	42,88	1,22	0,95	100	0,840	439,79	122,16	48,11	33,38	6,00	10,00	
9						200	1,260	659,69	183,25			5,00	8,33	
10						400	2,120	1109,95	308,32			7,00	11,67	

Tabela Z.II.4. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, seria B-S (próbki zagęszczane statycznie przez ściskanie w skrzynce aparatu), (c.d.)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Gęstość objętościowa ρ	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie normalne σ	Odczyt O		Wytrzymałość na ścinanie τ_f	Spójność c_s	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_s	Przesunięcie w momencie ścięcia ΔL	Odkształcenie jednostkowe ε	UWAGI
							mm	N						
-	-	g/cm^3	%	g/cm^3	-	kPa	mm	N	kPa	kPa	°	mm	-	-
1	2		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
11						25	0,560	293,19	81,44			1,00	1,67	
12						50	0,690	361,26	100,35			1,00	1,67	
13	3	1,58	31,94	1,20	0,94	100	1,020	534,03	148,34	57,20	42,09	2,00	3,33	
14						200	1,630	853,40	237,06			7,00	11,67	
15						400	2,880	1507,85	418,85			7,50	12,50	
16						25	0,550	287,96	79,99			1,00	1,67	
17						50	0,720	376,96	104,71			1,00	1,67	
18	4	1,47	24,75	1,18	0,92	100	1,010	528,80	146,89	59,84	42,59	3,00	5,00	
19						200	1,775	929,32	258,14			8,50	14,17	
20						400	2,900	1518,32	421,76			7,50	12,50	
21						25	0,595	311,52	86,53			2,00	3,33	
22						50	0,690	361,26	100,35			1,50	2,50	
23	5	1,73	37,86	1,25	0,98	100	1,015	531,41	147,61	68,69	37,90	2,00	3,33	
24						200	1,640	858,64	238,51			7,00	11,67	
25						400	2,570	1345,55	373,76			7,00	11,67	
26						25	0,460	240,84	66,90			1,50	2,50	
27						50	0,740	387,43	107,62			3,00	5,00	
28	6	1,77	37,31	1,29	1,01	100	1,015	531,41	147,61	68,81	35,91	3,50	5,83	
29						200	1,630	853,40	237,06			6,00	10,00	
30						400	2,380	1246,07	346,13			7,00	11,67	

Tabela Z.II.5. Kąt tarcia wewnętrznego i spójność - aparat bezpośredniego ścinania – zestawienie

L.p.	Partia	Seria	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_s	Spójność c_s
-	-	-	%	g/cm ³	-	°	kPa
1	2	3	5	6	7	8	9
1			33,89	1,32	0,95	34,99	61,14
2			34,88	1,33	0,95	25,56	56,17
3	I	B-P	35,89	1,31	0,93	22,79	36,81
4			31,40	1,34	0,96	36,12	72,02
5			35,67	1,31	0,94	18,86	40,42
6			43,61	1,19	0,93	35,46	65,02
7			44,18	1,21	0,95	32,09	51,87
8			33,09	1,19	0,94	39,33	66,42
9		B-U	25,23	1,18	0,92	40,25	66,75
10			38,72	1,24	0,98	37,39	68,84
11	II		38,32	1,28	1,00	34,07	75,50
12			42,38	1,20	0,94	34,06	66,42
13			42,88	1,22	0,95	33,38	48,11
14		B-S	31,94	1,20	0,94	42,09	57,20
15			24,75	1,18	0,92	42,59	59,84
16			37,86	1,25	0,98	37,90	68,69
17			37,31	1,29	1,01	35,91	68,81

Tabela Z.II.6. Badania wytrzymałości na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – charakterystyka badań

Seria	Oznaczenie serii	Partia materiału	Wilgotność optymalna W_{opt}	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{sk}	Prędkość ścinania	Sposób formowania próbek	Liczba oznaczeń w serii	Zakres wilgotności	UWAGI	
										%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	T-S-1	I	28,9	1,40	10,0	określoną masę materiału o znanej wilgotności zagęszczano statycznie, przez ściskanie w ręcznej prasie, w specjalnie do tego celu wykonanej formie o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa)	3	22,08÷32,43		
2	T-S-2						5	22,64÷33,73		
3	T-S-R*	III	37,7	1,31			5	25,24÷38,25		
4	T-S						6	25,15÷43,16		
5	T-U	II	37,7	1,28			określoną masę materiału o znanej wilgotności zagęszczano przez ubijanie ręcznym ubijakiem, w specjalnie do tego celu wykonanej formie o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa)	6	24,98÷43,46	

Oznaczenia:

T – badanie wykonane w aparacie trójosiowego ściskania

U – próbki zagęszczane dynamicznie przez ubijanie ręcznym ubijakiem

S – próbki zagęszczane statycznie przez ściskanie w ręcznej prasie

* - badanie wykonanie dla partii osadów, dla której wykonywane były oznaczania wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie (p. 7.2.4 i 7.2.5)

Tabela Z.II.7. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia I, seria T-S-I (próbki zagęszczane statycznie)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	-
1			141,37	8,07	3,72	1,61	1,32	0,94	25	1,040	505,84	265,42	240,42	
2	1	22,08	143,15	8,08	3,72	1,63	1,34	0,95	50	1,305	653,37	351,68	301,68	
3			141,16	8,10	3,72	1,60	1,31	0,94	100	1,420	756,54	428,27	328,27	
4			140,75	8,11	3,72	1,60	1,31	0,93	200	2,190	1212,55	706,27	506,27	
5			172,71	8,23	3,77	1,88	1,48	1,06	25	2,020	934,34	479,67	454,67	
6	2	26,62	165,10	7,93	3,75	1,89	1,49	1,06	50	1,850	891,72	470,86	420,86	
7			164,97	7,94	3,74	1,89	1,49	1,07	100	2,450	1220,68	660,34	560,34	
8			159,81	7,76	3,75	1,86	1,47	1,05	200	3,120	1619,55	909,77	709,77	
9			160,94	7,93	3,76	1,88	1,48	1,06						
10	3	32,43	160,28	7,96	3,74	1,83	1,38	0,99	25	1,260	595,23	310,12	285,12	
11			156,55	7,72	3,73	1,86	1,40	1,00	50	1,200	598,90	324,45	274,45	
12			166,65	8,17	3,75	1,85	1,39	1,00	100	1,750	904,78	502,39	402,39	
					Średnia:	1,88	1,48	1,06	200	1,885	1057,64	628,82	428,82	

p, q - punkty napężenia

Tabela Z.II.8. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia I, seria T-S-2 (próbki zagęszczane statycznie)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			136,90	8,10	3,73	1,55	1,26	0,90	25	1,930	912,56	468,78	443,78	
2	1	22,64	133,29	8,10	3,75	1,49	1,21	0,87	50	1,620	787,07	418,54	368,54	
3			134,59	8,12	3,74	1,51	1,23	0,88	100	2,660	1316,73	708,37	608,37	
4			134,99	8,08	3,73	1,53	1,25	0,89	200	3,360	1745,18	972,59	772,59	
5					Średnia:	1,52	1,24	0,88						
6	2	25,70	147,95	8,13	3,73	1,67	1,32	0,95	25	2,340	1101,11	563,05	538,05	
7			148,26	8,13	3,73	1,67	1,33	0,95	50	2,800	1337,65	693,82	643,82	
8			147,88	8,12	3,74	1,66	1,32	0,94	100	3,500	1700,97	900,48	800,48	
9			149,42	8,09	3,74	1,68	1,34	0,96	200	4,540	2276,68	1238,34	1038,34	
10	3	27,74			Średnia:	1,67	1,33	0,95						
11			153,47	8,13	3,73	1,73	1,35	0,97	25	3,100	1450,61	737,81	712,81	
12			152,97	8,10	3,73	1,73	1,35	0,97	50	3,700	1751,54	900,77	850,77	
13			151,76	8,12	3,73	1,71	1,34	0,96	100	3,550	1732,56	916,28	816,28	
14	4	30,59			Średnia:	1,72	1,35	0,96						
15			152,66	8,13	3,73	1,72	1,35	0,96	200	4,650	2338,42	1269,21	1069,21	
16					Średnia:	1,72	1,35	0,96						
17			154,62	8,12	3,73	1,74	1,33	0,95	25	2,220	1045,92	535,46	510,46	
18			154,65	8,13	3,73	1,74	1,33	0,95	50	2,650	1268,67	659,33	609,33	
19	5	33,73			Średnia:	1,75	1,34	0,96						
20			155,52	8,13	3,73	1,75	1,34	0,96	100	3,330	1631,38	865,69	765,69	
			154,89	8,10	3,73	1,75	1,34	0,96	200	4,200	2131,47	1165,74	965,74	
17					Średnia:	1,75	1,34	0,96						
18			155,79	8,14	3,73	1,75	1,31	0,94	25	1,730	820,58	422,79	397,79	
19			157,35	8,13	3,73	1,77	1,32	0,95	50	2,620	1254,87	652,44	602,44	
20			154,62	8,12	3,73	1,74	1,30	0,93	100	2,580	1286,48	693,24	593,24	
			157,18	8,13	3,73	1,77	1,32	0,95	200	3,660	1883,14	1041,57	841,57	
					Średnia:	1,76	1,32	0,94						

P, q - punkty napężenia

Tabela Z.II.9. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia II, seria T-S (próbki zagęszczane)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	3	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	-
1			128,80	8,09	3,71	1,47	1,18	0,92	25	0,480	248,43	136,71	111,71	
2	1	25,15	127,35	8,10	3,72	1,45	1,16	0,90	50	0,590	323,15	186,58	136,58	wykazano materiał u podstawy próbki
3			127,60	8,09	3,72	1,45	1,16	0,91	100	0,970	549,28	324,74	224,54	
4			128,40	8,13	3,71	1,47	1,17	0,92	200	1,850	1062,29	631,14	431,14	
5			Średnia: 135,25	8,06	3,72	1,54	1,17	0,91						
6	2	32,24	136,80	8,07	3,72	1,56	1,18	0,92	25	0,470	242,30	133,65	108,65	
7			137,05	8,07	3,70	1,58	1,19	0,93	50	0,760	401,39	225,69	175,69	
8			135,25	8,07	3,71	1,55	1,18	0,92	100	1,020	576,27	338,23	238,03	
9			Średnia: 149,85	8,08	3,70	1,73	1,25	0,98	200	1,660	973,73	586,86	386,86	
10	3	37,88	148,60	8,06	3,71	1,71	1,24	0,97	25	0,510	264,00	144,50	119,50	
11			150,35	8,07	3,70	1,74	1,26	0,98	50	0,620	338,98	194,49	144,49	woda dostała się do górnej części próbki
12			148,30	7,90	3,69	1,75	1,27	0,99	100	0,690	423,12	261,66	161,46	
13			Średnia: 147,40	8,09	3,72	1,73	1,26	0,98	200	1,400	856,97	528,48	328,48	
14	4	38,40	147,30	8,10	3,70	1,69	1,22	0,95	25	0,480	247,53	136,26	111,26	
15			147,30	8,04	3,70	1,71	1,23	0,96	50	0,610	335,09	192,55	142,55	
16			148,00	8,02	3,71	1,71	1,24	0,96	100	0,890	516,72	308,46	208,26	przeskok na czujniku
17			Średnia: 146,35	8,09	3,69	1,70	1,23	0,96	200	1,410	856,32	528,16	328,16	
18	5	42,98	147,40	8,08	3,71	1,69	1,18	0,92	25	0,490	255,09	140,05	115,05	
19			144,45	8,08	3,69	1,67	1,17	0,91	50	0,680	366,10	208,05	158,05	
20			-	8,09	3,67	-	1,18	0,92	100	0,690	424,65	262,43	162,23	
			Średnia: 1,68				1,18	0,92	200	0,860	609,09	404,54	204,54	

p, q - punkty napężenia

Tabela Z.II.9. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia II, seria T-S (próbki zagęszczane statycznie), (c.d.)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	kPa	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
21			145,70	8,08	3,66	1,72	1,20	0,94	25	0,280	159,10	92,05	67,05	
22	6	43,16	147,40	7,96	3,73	1,70	1,19	0,93	50	0,490	275,94	162,97	112,97	
23			148,60	7,96	3,73	1,71	1,20	0,93	100	0,570	363,03	231,62	131,42	
24			145,95	8,06	3,72	1,67	1,17	0,91	200	0,580	468,52	334,26	134,26	
					Średnia:	1,70	1,19	0,93						

Tabela Z.II.10. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia II, seria T-U (próbki zagęszczane dynamicznie)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	kPa	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			127,70	8,15	3,73	1,44	1,15	0,90	25	0,360	191,00	108,00	83,00	wykazany materiał podstawy próbki
2	1	24,98	129,55	8,05	3,73	1,47	1,18	0,92	50	0,720	381,55	215,78	165,78	
3			127,80	8,11	3,75	1,43	1,14	0,89	100	0,940	527,88	314,04	213,84	
4			129,15	8,09	3,71	1,48	1,18	0,92	200	2,800	1503,33	851,66	651,66	pomiar odrzucono
					Średnia:	1,45	1,16	0,91						
5			133,00	7,99	3,71	1,54	1,16	0,91	25	0,360	192,12	108,56	83,56	
6			134,95	8,33	3,73	1,48	1,12	0,88	50	0,530	293,73	171,87	121,87	
7	2	32,38	135,25	8,24	3,73	1,50	1,13	0,89	100	0,820	477,30	288,75	188,55	
8			136,10	8,24	3,72	1,52	1,15	0,90	200	1,340	820,38	510,19	310,19	
					Średnia:	1,51	1,14	0,89						

p, q - punkty napężenia

Tabela Z.II.10. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia II, seria T-U (próbki zagęszczane dynamicznie), (c.d.)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	
1	2	3	149,20	8,03	3,72	1,71	1,25	0,97	25	0,440	228,16	126,58	101,58	
9			149,85	8,08	3,72	1,71	1,25	0,97	50	0,560	309,61	179,81	129,81	
10	3	37,11	150,55	8,04	3,71	1,73	1,26	0,99	100	0,910	523,21	311,71	211,51	
11			151,35	8,08	3,71	1,73	1,26	0,99	200	1,130	724,57	462,28	262,28	
12					Średnia:	1,72	1,25	0,98						
13			146,80	8,06	3,72	1,68	1,22	0,95	25	0,480	247,23	136,11	111,11	
14	4	37,56	147,30	8,14	3,72	1,66	1,21	0,94	50	0,690	368,59	209,30	159,30	
15			146,70	8,06	3,72	1,68	1,22	0,95	100	0,940	535,98	318,09	217,89	
16			146,95	8,12	3,72	1,67	1,21	0,95	200	1,360	829,64	514,82	314,82	
17					Średnia:	1,67	1,22	0,95						
18	5	42,51	145,75	8,06	3,75	1,64	1,15	0,90	25	0,390	202,68	113,84	88,84	
19			146,05	8,24	3,74	1,61	1,13	0,88	50	0,460	260,13	155,07	105,07	
20			144,60	8,03	3,73	1,65	1,16	0,90	100	0,630	389,92	245,06	144,86	
21			145,10	8,06	3,73	1,65	1,16	0,90	200	0,970	646,08	423,04	223,04	
22	6	43,46	147,15	7,92	3,72	1,64	1,15	0,90						
23			148,40	7,99	3,71	1,72	1,19	0,93	25	0,340	182,41	103,71	78,71	
24			147,50	7,96	3,75	1,68	1,20	0,93	50	0,400	235,69	142,84	92,84	
			147,90	7,87	3,70	1,75	1,17	0,92	100	0,430	296,37	198,28	98,08	
					Średnia:	1,71	1,22	0,95	200	0,550	456,70	328,35	128,35	
					Średnia:	1,71	1,20	0,93						

p, q - punkty naprężenia

Tabela Z.II.11. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ściskania – partia III, seria T-S-R (próbki zagęszczane dynamicznie)

Nr próbki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Napężenie σ_3	Odczyt O	Napężenie σ_1	$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	UWAGI
-	%	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	kPa	mm	kPa	kPa	kPa	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			149,07	8,13	3,73	1,68	1,34	1,02	25	1,750	828,17	426,58	401,58	
2	1	25,24	148,51	8,11	3,73	1,67	1,34	1,02	50	2,070	1001,30	525,65	475,65	
3			149,46	8,11	3,75	1,66	1,33	1,01	100	3,060	1489,47	794,73	694,73	
4			148,73	8,15	3,72	1,68	1,34	1,02	200	3,220	1688,77	944,38	744,38	
5					Średnia:	1,67	1,34	1,02						
6	2	27,53	152,79	8,14	3,72	1,72	1,35	1,03	25	1,920	910,93	467,96	442,96	
7			152,82	8,13	3,73	1,72	1,35	1,03	50	2,070	1002,58	526,29	476,29	
8			153,70	8,15	3,73	1,72	1,35	1,03	100	2,870	1419,16	759,68	659,68	
9			152,95	8,17	3,73	1,71	1,34	1,03	200	2,850	1509,77	854,88	654,88	
10	3	31,44	153,04	8,06	3,73	1,74	1,35	1,03						
11			153,76	8,07	3,73	1,74	1,32	1,01	25	1,640	779,19	402,10	377,10	
12			153,29	8,09	3,73	1,73	1,33	1,01	50	1,880	913,99	481,99	431,99	
13			154,17	8,13	3,73	1,74	1,32	1,01	100	2,110	1070,54	585,37	485,17	
14	4	36,77			Średnia:	1,74	1,32	1,01	200	2,610	1400,27	800,14	600,14	
15			149,32	8,10	3,72	1,74	1,32	1,01						
16			147,19	8,11	3,72	1,70	1,24	0,95	25	0,830	409,01	217,00	192,00	
17			149,43	8,09	3,72	1,67	1,22	0,93	50	0,890	461,49	255,75	205,75	
18	5	38,25	149,22	8,09	3,72	1,70	1,24	0,95	100	1,280	693,20	396,70	296,50	
19					Średnia:	1,70	1,24	0,95	200	1,740	1006,11	603,06	403,06	
20			148,12	8,13	3,72	1,69	1,24	0,94						
			147,32	8,10	3,72	1,68	1,22	0,93	25	0,700	349,52	187,26	162,26	
			148,02	8,20	3,71	1,68	1,21	0,93	50	0,910	471,87	260,94	210,94	
			147,58	8,09	3,71	1,68	1,21	0,93	100	1,090	608,25	354,23	254,03	
					Średnia:	1,69	1,22	0,93	200	1,530	912,17	556,09	356,09	
					Średnia:	1,68	1,22	0,93						

p, q - punkty napężenia

Tabela Z.II.12. Kąt tarcia wewnętrzznego i spójność - aparat trójosiowego ściskania – zestawienie

L.p.	Partia	Seria	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_T	Spójność C_T	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ_u	Spójność C_u
-	-	-	%	g/cm ³	-	°	kPa	°	kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	I	T-S-1	22,08	1,32	0,94	30,83	82,88	36,64	103,29
2			26,62	1,48	1,06	32,21	140,30	39,05	180,66
3		32,43	1,39	0,99	26,85	124,17	30,41	143,98	
4		22,64	1,24	0,88	35,16	96,00	44,78	135,25	
5	II	T-S-2	25,70	1,33	0,95	36,43	128,65	47,57	190,67
6			30,59	1,34	0,96	35,78	131,60	46,11	189,83
7		33,73	1,32	0,94	35,26	112,16	44,99	158,59	
8		25,15	1,17	0,91	33,12	17,37	40,72	22,92	
9	III	T-S	32,24	1,18	0,92	31,20	32,81	37,27	41,24
10			37,88	1,26	0,98	28,88	32,78	33,48	39,30
11			38,40	1,23	0,96	28,97	36,25	33,62	43,53
12			42,98	1,18	0,92	17,51	79,90	18,39	84,20
13		43,16	1,19	0,93	14,79	57,25	15,31	59,36	
14		24,98	1,16	0,91	32,50	18,74	39,57	24,31	
15		32,38	1,14	0,89	29,35	24,32	34,22	29,41	
16		37,11	1,25	0,98	26,02	44,44	29,22	50,92	
17	T-U	37,56	1,22	0,94	27,98	44,29	32,09	52,28	
18		42,51	1,15	0,90	23,57	38,28	25,87	42,54	
19		43,46	1,20	0,93	11,92	58,69	12,19	60,04	
20		25,24	1,34	1,02	34,60	114,84	43,62	158,63	
21	T-S-R	27,53	1,35	1,03	31,20	163,46	37,27	205,42	
22		31,44	1,32	1,01	28,89	160,55	33,49	192,51	
23		36,77	1,24	0,94	29,15	68,99	33,90	83,12	
24		38,25	1,22	0,93	27,30	70,56	31,07	82,38	

Tabela Z.II.13. Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie – charakterystyka badań

Seria	Oznaczenie serii	Partia materiału	Średnia wysokość próbek H_{sr}	Średnia średnica próbek D_{sr}	Smukłość $\frac{H_{sr}}{D_{sr}}$	Wilgotność optymalna w_{opt}	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds}	Sposób formowania próbek	Liczba oznaczeń w serii	Zakres wilgotności	UWAGI
-	-	-	cm	cm	-	%	g/cm^3	-	-	%	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	C-S-1 (R_{cl})		4,72	5,03	0,94			określona masę materiału o znanej wilgotności zagęszczano statycznie, przez ściskanie w ręcznej prasie, w formie cylindrycznej o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa)	5	25,21÷38,48	
2	C-S-2 (R_{c2})	III	8,15	3,73	2,19	1,31	37,7		5	25,43÷38,82	
3	C-S-G (R_{cg})		połówki beleczek o wymiarach 4 x 4 x 16 cm, uzyskane z badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu					jak w poz. 1 i 2, tylko ściskanie w maszynie wytrzymałościowej	5	27,98÷40,70	

Oznaczenia:

C – badanie wytrzymałości na ściskanie

S – próbki zagęszczane statycznie przez ściskanie w ręcznej prasie

G – próbki po wykonaniu badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Tabela Z.II.14. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – seria C-S-1

L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Masa próbki m_m	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości, e	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Odczyt O	Wytrzymałość na ściskanie R_{cl}	Przesunięcie w momencie zniszczenia ΔL	Odształcenie jednostkowe ε	UWAGI
		%	cm	cm	g	g/cm ³	g/cm ³	-	-	mm	kPa	mm	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			4,970	5,034	166,74	1,69	1,35	1,02	1,03	3,16	797,9	2,35	4,73	
2			4,740	5,049	166,42	1,75	1,40	0,94	1,07	5,25	1317,8	4,48	9,45	rysa
3	1	25,21	4,733	5,028	166,75	1,77	1,42	0,92	1,08	5,15	1303,6	4,5	9,51	
4			4,825	5,039	163,89	1,70	1,36	1,0	1,04	5,00	1260,0	3,9	8,08	
5							Średnia:	0,97	1,05	-	1169,9	-	7,94	
6			4,785	5,030	170,17	1,79	1,40	0,95	1,07	4,23	1069,7	2,95	6,17	
7			4,858	5,029	171,85	1,78	1,39	0,95	1,06	4,50	1138,5	4	8,23	
8	2	27,98	4,855	5,030	167,98	1,74	1,36	1,00	1,04	3,65	923,0	3,22	6,63	jasna bryłka w środku
9			4,780	5,030	169,18	1,78	1,39	0,95	1,06	4,60	1163,3	4,31	9,02	
10							Średnia:	0,96	1,06	-	1073,6	-	7,51	
11			5,140	5,060	173,17	1,68	1,27	1,14	0,97	4,13	1032,1	3,7	7,20	
12	3	31,69	5,055	5,086	173,22	1,69	1,28	1,12	0,98	4,68	1157,5	4,4	8,70	
13			4,685	5,045	172,6	1,84	1,40	0,94	1,07	4,62	1161,4	4,75	10,14	
14			4,685	4,990	171,13	1,87	1,42	0,92	1,08	4,40	1130,6	4,31	9,20	
15	4	35,29					Średnia:	1,03	1,02	-	1120,4	-	8,81	
16			4,535	5,031	165,14	1,83	1,35	1,01	1,03	2,35	594,0	2,5	5,51	w porównaniu z serią 3, łagodniejsze szorstki, materiał nie wykrusza się, rysy, łagodne zmiany na czujnikach, zniszczenie bez łuku, obraz klepsydry
17			4,545	5,028	165,11	1,83	1,35	1,01	1,03	2,30	582,2	1,9	4,18	
18			4,505	5,054	165,28	1,83	1,35	1,01	1,03	2,53	633,8	2,83	6,28	
19	5	38,48	4,540	5,013	164,9	1,84	1,36	1,00	1,04	2,35	598,4	3	6,61	
20							Średnia:	1,01	1,03	-	602,1	-	5,65	
			4,575	5,023	160,88	1,77	1,28	1,12	0,98	2,00	507,3	1,95	4,26	
			4,545	5,005	161,05	1,80	1,30	1,09	0,99	2,18	556,8	2,1	4,62	
			4,500	5,020	160,43	1,80	1,30	1,09	0,99	2,31	586,5	2,07	4,60	
			4,500	5,025	160,7	1,80	1,30	1,09	0,99	2,36	598,0	3,34	7,42	
		Średnia:	4,72	5,03			Średnia:	1,10	0,99	-	550,2	-	4,49	

Tabela Z.II.15. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – seria C-S-2

L.p. oznaczenia	Nr	Wilgotność w	Wysokość próbki H	Średnica próbki D	Masa próbki m_m	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości, zagęszczenia e	Wskaźnik I_s	Odczyt O	Wytrzymałość na ściskanie R_{c2}	Przesunięcie w momencie zniszczenia ΔL	Odkształcenie jednostkowe ε	UWAGI
	-	%	cm	cm	g	g/cm^3	-	-	mm	kPa	mm	%	
	1	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	
1	1	25,43	8,090	3,721	149,72	1,70	1,00	1,04	1,25	577,6	0,97	1,20	
2	1		8,115	3,743	148,33	1,66	1,05	1,01	1,7	776,6	2,09	2,58	
							Średnia:	1,02	-	677,1		1,89	
3	2	28,12	8,170	3,733	152,17	1,70	1,05	1,01	1,75	803,7	1,01	1,24	
4	2		8,250	3,728	152,60	1,70	1,06	1,01	1,45	667,7	1,36	1,65	
							Średnia:	1,01	-	735,7		1,44	
5	3	32,73	8,188	3,731	153,47	1,71	1,11	0,99	1,4	643,4	1,39	1,70	stożki
6	3		8,205	3,746	152,51	1,69	1,14	0,97	0,95	433,1	0,73	0,89	
							Średnia:	0,98	-	538,2		1,29	
7	4	36,18	8,110	3,715	149,91	1,71	1,17	0,96	0,7	324,5	0,6	0,74	
8	4		8,115	3,725	149,71	1,69	1,19	0,95	0,59	272,1	0,83	1,02	
							Średnia:	0,95	-	298,3		0,88	
9	5	38,82	8,093	3,730	-	-	-	-	0,63	289,7	0,65	0,80	
10	5		8,123	3,710	-	-	-	-	0,67	311,4	0,5	0,62	
		Średnia:	8,15	3,73		Średnia:	-	-	-	300,6	-	0,71	

Tabela Z.II.16. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – seria C-S-G

L.p.	Nr belezki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości e	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Pole powierzchni A	Siła F	Wytrzymałość na ściskanie R_{cg}	UWAGI
			%	g/cm^3			cm^2	kN	kPa	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1			1,36	1,00	1,04	16,00	0,45	281,25	
2				1,36	1,00	1,04	16,00	1,20	750,00	
3	2	1	27,98	1,34	1,02	1,03	16,00	1,10	687,50	próbki pękają krucho, powstają stożki
4				1,34	1,02	1,03	16,00	0,85	531,25	
5	3			1,36	1,00	1,04	16,00	1,28	800,00	
6				1,36	1,00	1,04	16,00	1,00	625,00	
7			Średnia:	1,36	1,01	1,03	-	Średnia:	612,50	
8	4			1,24	1,19	0,95	16,00	0,48	300,00	
9				1,24	1,19	0,95	16,00	0,35	218,75	
10	5	2	28,93	1,26	1,16	0,96	16,00	0,50	312,50	
11				1,26	1,16	0,96	16,00	0,62	387,50	
12	6			1,24	1,20	0,94	16,00	0,65	406,25	
13			Średnia:	1,24	1,20	0,94	16,00	0,68	425,00	
14	7			1,25	1,18	0,95	-	Średnia:	341,67	
15				1,24	1,19	0,95	14,80	0,20	135,14	
16	8	3	37,06	1,24	1,19	0,95	16,00	0,20	125,00	
17				1,24	1,19	0,95	16,00	0,25	156,25	
18	9			1,24	1,19	0,95	13,60	0,20	147,06	
19			Średnia:	1,24	1,19	0,95	-	Średnia:	110,29	
20	10			1,26	1,16	0,96	16,00	0,50	312,50	
21				1,26	1,16	0,96	16,00	0,45	281,25	
22	11	4	38,57	1,25	1,18	0,95	16,00	0,62	387,50	
23				1,25	1,18	0,95	16,00	0,35	218,75	
24	12			1,23	1,22	0,94	16,00	0,45	281,25	
			Średnia:	1,23	1,22	0,94	16,00	0,40	250,00	
				1,25	1,18	0,95	-	Średnia:	288,54	

Tabela Z.II.16. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – seria C-S-G (c.d.)

L.p.	Nr beleczki	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości e	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Pole powierzchni A	Siła F	Wytrzymałość na ściskanie R_{cg}	UWAGI
-	-	-	%	g/cm^3	-	-	cm^2	kN	kPa	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25	13			1,23	1,21	0,94	16,00	0,60	375,00	próbki rozplaszczają się
26				1,23	1,21	0,94	16,00	0,25	156,25	
27	14	5	40,70	1,22	1,23	0,93	14,40	0,20	138,89	
28				1,22	1,23	0,93	16,00	0,20	125,00	
29	15			1,22	1,23	0,93	16,00	0,25	156,25	
30				1,22	1,23	0,93	14,00	0,28	200,00	
			Srednia:	1,22	1,22	0,93	-	Srednia:	191,90	

Tabela Z.II.17. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – zestawienie

L.p.	Seria	Wilgotność W	Wytrzymałość na ściskanie kPa	Wytrzymałość na ściskanie przy smukłości $\frac{H}{D}=1,0$ kPa
-	-	%		
1	2	3	4	5
1	C-S-1 (R_{c1})	25,21	1169,9	1157,1
2		27,98	1073,6	1063,2
3		31,69	1120,4	1112,0
4		35,29	602,1	587,7
5		38,48	550,2	548,9
6	C-S-2 (R_{c2})	25,43	677,1	769,3
7		28,12	735,7	837,2
8		32,73	538,2	612,3
9		36,18	298,3	339,1
10		38,82	300,6	341,7
11	C-S-G (R_{cg})	27,98	612,5	-
12		28,93	341,7	-
13		37,06	145,6	-
14		38,57	288,5	-
15		40,70	191,9	-

Tabela Z.II.18. Badania wytrzymałości na jednoosiowe rozciąganie – charakterystyka badań

Seria	Oznaczenie serii	Partia materiału	Średnia wysokość próbek H_{sr}	Średnia średnica próbek D_{sr}	Stosunek $\frac{H_{sr}}{D_{sr}}$	Wilgotność optymalna w_{opt}	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu ρ_{ds}	Sposób formowania próbek	Liczba oznaczeń w serii	Zakres wilgotności	UWAGI	
												cm
1	R-S (R_r)	3	3,86	3,50	1,10	7	8	określona masę materiału o znanej wilgotności zagęszczano statycznie, przez ściskanie w ręcznej prasie, w formie cylindrycznej o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa)	10	24,89÷39,02	11	
2	R-S-T (R_{rt})		4,67	5,02	0,93				5	24,29÷38,84		
3	R-S-U (R_{ru})	III	8,12	3,72	2,18	37,7	1,31	określona masę materiału o znanej wilgotności zagęszczano statycznie, przez ściskanie w prasie hydraulicznej, w specjalnie do tego celu przystosowanej formie o znanej objętości, do momentu uzyskania wcześniej ustalonej, na podstawie badań w aparacie Proctora, gęstości objętościowej (metoda standardowa)	5	25,24÷38,25	12	
4	R-S-G (R_g)		beleczki o wymiarach 4 x 4 x 16 cm							5	27,94÷40,97	

Oznaczenia:

R – badanie wytrzymałości na rozciąganie

S – próbki zagęszczane statycznie przez ściskanie

T – badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

U – badanie wytrzymałości na rozciąganie przy ściskaniu w aparacie trójosiowego ściskania

G – badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Tabela Z.II.19. Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie -- seria R-S

L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Wysokość próbki H	Średnica D	Masa próbki m_m	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości, e	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Powierzchnia zerwania A_z	Odczyt O	Siła F	Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie R_r
-	-	%	cm	cm	g	g/cm ³	g/cm ³	-	-	cm ²	mm	N	kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1			3,82	3,5	63,35	1,72	1,38	1,05	0,97	10,18	0,250	33,8	33,2
2	1	24,89	3,85	3,5	65,71	1,77	1,42	1,08	0,91	10,18	0,040	5,4	5,3
3			3,80	3,5	63,45	1,74	1,39	1,06	0,96	10,18	0,080	10,8	10,6
4			3,82	3,5	63,96	1,74	1,39	1,06	0,95	10,18	0,180	24,3	23,9
5					Średnia:	1,74	1,40	1,07	0,95	-	-	Średnia:	18,2
6	2	27,16	3,90	3,5	64,52	1,72	1,35	1,03	1,01	10,18	0,140	18,9	18,6
7			3,84	3,5	64,90	1,76	1,38	1,06	0,97	10,18	0,170	23,0	22,5
8			3,91	3,5	64,65	1,72	1,35	1,03	1,01	10,18	0,170	23,0	22,5
9	3	31,48	3,92	3,5	64,85	1,73	1,36	1,04	1,00	-	-	Średnia:	21,2
10					Średnia:	1,73	1,36	1,04	1,00	-	-	Średnia:	21,2
11			3,90	3,5	65,42	1,72	1,31	1,00	1,08	10,18	0,110	14,9	14,6
12	4	35,86	3,90	3,5	65,42	1,74	1,33	1,01	1,05	10,18	0,120	16,2	15,9
13			3,90	3,5	64,98	1,73	1,32	1,01	1,07	10,18	0,115	15,5	15,3
14					Średnia:	1,73	1,32	1,01	1,06	-	-	Średnia:	15,3
15			3,90	3,5	63,47	1,69	1,25	0,95	1,18	10,18	0,120	16,2	15,9
16	5	39,02	3,85	3,5	63,99	1,73	1,27	0,97	1,14	10,18	0,170	23,0	22,5
17			3,83	3,5	63,12	1,71	1,26	0,96	1,16	10,18	0,080	10,8	10,6
			3,85	3,5	63,38	1,71	1,26	0,96	1,16	10,18	0,110	14,9	14,6
					Średnia:	1,71	1,26	0,96	1,16	-	-	Średnia:	15,9
			3,90	3,5	62,32	1,66	1,19	0,91	1,28	10,18	0,060	8,1	8,0
			3,84	3,5	62,60	1,69	1,22	0,93	1,23	10,18	0,075	10,1	9,9
			3,85	3,5	62,56	1,69	1,22	0,93	1,24	10,18	0,060	8,1	8,0
					Średnia:	1,68	1,21	0,92	1,25	-	-	Średnia:	8,6

Tabela Z.II.20. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu – seria R-S-T

L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Wysokość próbki H	Średnica D	Masa próbki m_m	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości, e	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Odczyt O	Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu R_H	Przesunięcie w momencie zniszczenia ΔD	Odkształcenie jednostkowe ε	UWAGI
		%	cm	cm	g	g/cm ³	g/cm ³	-	-	mm	kPa	mm	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		24,29	4,935	5,026	165,86	1,69	1,36	1,04	1,00	0,55	70,93	0,6	1,19	materiał kruchy, gwałtownie pęka, z hukiem
2	1		5,018	5,034	165,93	1,66	1,34	1,02	1,03	0,50	63,33	0,8	1,59	
3			4,870	5,020	165,87	1,72	1,38	1,06	0,96	0,45	58,89	0,25	0,50	w środku po pęknięciu wydzielił się płatek materiału
4			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5					Średnia:	1,69	1,36	1,04	1,00	-	64,4	-	1,09	
6			4,855	5,031	169,95	1,76	1,38	1,05	0,97	0,53	69,41	0,75	1,49	
7	2	27,4	4,700	5,028	168,65	1,81	1,42	1,08	0,92	0,57	77,17	0,9	1,79	
8			4,778	5,030	170,5	1,80	1,41	1,08	0,93	0,80	106,50	0,65	1,29	
9			4,725	5,015	170,2	1,82	1,43	1,09	0,90	0,60	81,00	0,86	1,71	
10					Średnia:	1,80	1,41	1,08	0,93	-	83,5	-	1,57	
11	3	31,38	4,695	5,026	171,64	1,84	1,40	1,07	0,94	0,57	77,27	0,35	0,70	
12			4,700	5,025	173,41	1,86	1,42	1,08	0,92	0,40	54,18	0,49	0,98	
13			4,615	5,035	171,37	1,86	1,42	1,08	0,92	0,57	78,47	0,54	1,07	
14			4,670	5,033	171,82	1,85	1,41	1,07	0,93	0,40	54,45	0,51	1,01	
15					Średnia:	1,85	1,41	1,08	0,93	-	66,1	-	0,94	
16	4	35,52	4,500	5,023	164,57	1,85	1,36	1,04	1,00	0,17	24,06	0,35	0,70	
17			4,720	5,019	165,94	1,78	1,31	1,00	1,07	0,21	28,36	0,09	0,18	
18			4,500	5,024	165,04	1,85	1,37	1,04	0,99	0,29	41,04	0,22	0,44	
19			4,500	5,030	163,8	1,83	1,35	1,03	1,01	0,20	28,27	0,26	0,52	
20					Średnia:	1,83	1,35	1,03	1,02	-	30,4	-	0,46	
21			4,500	5,020	160,48	1,80	1,30	0,99	1,10	0,21	29,74	0,13	0,26	
22	5	38,84	4,550	5,014	160,06	1,78	1,28	0,98	1,12	0,20	28,05	0,17	0,34	
23			4,503	5,000	160,11	1,81	1,30	1,00	1,09	0,26	36,95	0,17	0,34	
24			4,475	5,018	160,19	1,81	1,30	1,00	1,09	0,26	37,04	0,36	0,72	
25					Średnia:	1,80	1,30	0,99	1,10	-	31,6	-	0,31	

Tabela Z.II.21. Wytrzymałość na rozciąganie przy trójosiowym ściskaniu – seria R-S-U

L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Wysokość próbki H	Średnica D	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Wskaźnik porowatości, e	Spójność c_u	Kąt tarcia wewnętrzznego ϕ_u	Wytrzymałość na rozciąganie przy trójosiowym ściskaniu R_{tu}	Przesunięcie w momencie zniszczenia ΔH	Odształcenie jednostkowe ε
-	-	%	g	cm	cm	g/cm ³	g/cm ³	-	-	kPa	°	kPa	mm	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1			149,07	8,13	3,73	1,68	1,34	1,02	1,03				2,20	2,71
2	1	25,24	148,51	8,11	3,73	1,67	1,34	1,02	1,03	158,63	43,62	135,91	2,25	2,77
3			149,46	8,11	3,75	1,66	1,33	1,01	1,05				2,00	2,47
4			148,73	8,15	3,72	1,68	1,34	1,02	1,03				2,10	2,58
5					Średnia:	1,67	1,34	1,02	1,04				Średnia:	2,63
6			152,79	8,14	3,72	1,72	1,35	1,03	1,01				3,20	3,93
7	2	27,53	152,82	8,13	3,73	1,72	1,35	1,03	1,02	205,42	37,27	203,63	3,00	3,69
8			153,70	8,15	3,73	1,72	1,35	1,03	1,01				2,30	2,82
9			152,95	8,17	3,73	1,71	1,34	1,03	1,02				3,30	4,04
10					Średnia:	1,72	1,35	1,03	1,02				Średnia:	3,62
11	3	31,44	153,04	8,06	3,73	1,74	1,32	1,01	1,06				3,30	4,09
12			153,76	8,07	3,73	1,74	1,33	1,01	1,05	192,51	33,49	206,92	2,90	3,60
13			153,29	8,09	3,73	1,73	1,32	1,01	1,06				3,00	3,71
14	4	36,77	154,17	8,13	3,73	1,74	1,32	1,01	1,06				3,60	4,43
15					Średnia:	1,74	1,32	1,01	1,06				Średnia:	3,96
16			149,32	8,10	3,72	1,70	1,24	0,95	1,19				5,80	7,16
13			147,19	8,11	3,72	1,67	1,22	0,93	1,23	83,12	33,90	88,58	3,60	4,44
14			149,43	8,09	3,72	1,70	1,24	0,95	1,19				4,10	5,07
15	5	38,25	149,22	8,09	3,72	1,70	1,24	0,95	1,19				7,50	9,27
16					Średnia:	1,69	1,24	0,94	1,20				Średnia:	6,48
13			148,12	8,13	3,72	1,68	1,22	0,93	1,24				4,20	5,16
14			147,32	8,10	3,72	1,68	1,21	0,93	1,24	82,38	31,07	93,08	3,30	4,08
15			148,02	8,20	3,71	1,68	1,21	0,93	1,24				5,55	6,77
16			147,58	8,09	3,71	1,69	1,22	0,93	1,22				8,50	10,51
					Średnia:	1,68	1,22	0,93	1,24				Średnia:	6,63

Tabela Z.II.22. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – seria R-S-G

L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność w	Masa próbki m_m	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Wskaźnik porowatości, e	Nacisk jednostkowy na jedną beleczkę przy formowaniu	Masa naczynka z ciężarkami M_n	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu R_g	Ugięcie w momencie zniszczenia s	Strzałka ugięcia w momencie zniszczenia (graniczna) f_{gr}	UWAGI
-	-	%	g	g/cm ³	g/cm ³	-	-	kPa	g	kPa	mm	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	27,94	445,30	1,74	1,36	1,04	1,00	6770,8	-	-	-	1	
2			440,45	1,72	1,34	1,03	1,02		66,65	78,0	0,6	$\frac{1}{192}$	
3			446,30	1,74	1,36	1,04	1,00		66,75	78,1	0,44		
4			Średnia:	1,73	1,36	1,03	1,01	-	Średnia:	78,0	0,52		
5	2	28,94	410,45	1,60	1,24	0,95	1,19	3645,8	53,6	62,7	1,145	1	pęknięcie ukośne
6			415,10	1,62	1,26	0,96	1,16		57,9	67,7	1,05	$\frac{1}{91}$	
7			407,90	1,59	1,24	0,94	1,20		57,65	67,5	1,11		
8			Średnia:	1,61	1,25	0,95	1,18	-	Średnia:	66,0	1,10		
9	3	36,73	434,00	1,70	1,24	0,95	1,19	1510,4	67	78,4	2,78	1	
10			433,90	1,69	1,24	0,95	1,19		99,1	115,9	3,7	$\frac{1}{32}$	
11			434,15	1,70	1,24	0,95	1,19		90,1	105,4	2,79		
12			Średnia:	1,70	1,24	0,95	1,19	-	Średnia:	99,9	3,09		
13	4	38,75	448,25	1,75	1,26	0,96	1,16	2421,9	62,45	73,1	1,4	1	
14			443,50	1,73	1,25	0,95	1,18		67,05	78,4	1,58	$\frac{1}{74}$	
15			435,20	1,70	1,23	0,94	1,22		53	62,0	1,11		
16			Średnia:	1,73	1,25	0,95	1,18	-	Średnia:	71,2	1,36		
17	5	40,97	443,90	1,73	1,23	0,94	1,21	1041,7	66,80	78,2	2,7	1	
18			440,85	1,72	1,22	0,93	1,23		75,75	88,6	3,29	$\frac{1}{30}$	
19			439,45	1,72	1,22	0,93	1,23		112	131,0	4,03		
20			Średnia:	1,72	1,22	0,93	1,18	-	Średnia:	99,3	3,34		

Tabela Z.II.23. Wytrzymałość na rozciąganie – zestawienie

L.p.	Seria	Wilgotność W		Wytrzymałość na rozciąganie kPa
		%		
1	2	3	4	
1	R-S (R_r)	24,89		18,2
2		27,16		21,2
3		31,48		15,3
4		35,86		15,9
5		39,02		8,6
6	24,29		64,4	
7	R-S-T (R_{rt})	27,40		83,5
8		31,38		66,1
9		35,52		30,4
10		38,84		31,6
11		25,24		135,9
12	R-S-U (R_{ru})	27,53		203,6
13		31,44		206,9
14		36,77		88,6
15		38,25		93,1
16		27,94		78,0
17	R-S-G (R_g)	28,94		66,0
18		36,73		99,9
19		38,75		71,2
20		40,97		99,3

Tabela Z.II.24. Wskaźnik kruchości – zestawienie

L.p.	Seria	Wilgotność średnia w_{sr} dla R_r i R_c	Wytrzymałość na ściskanie R_c	Wytrzymałość na rozzciąganie R_r	Wskaźnik kruchości $\frac{R_r}{R_c}$
		%	kPa	kPa	-
		3	4	5	6
1	2	27,96	612,5	78,0	0,127
2	C-S-G	28,93	341,7	66,0	0,193
3	i	36,90	145,6	99,9	0,686
4	R-S-G	38,66	288,5	71,2	0,247
5		40,84	191,9	99,3	0,517
6		24,75	1169,9	64,4	0,055
7	C-S-1	27,69	1073,6	83,5	0,078
8	i	31,54	1120,4	66,1	0,059
9	R-S-T	35,41	602,1	30,4	0,050
10		38,66	550,2	31,6	0,057

Tabela Z.II.25. Edometryczne badanie ścisłości - parametry próbek przed rozpoczęciem i po zakończeniu badania

Nr oznaczenia	Wilgotność w		Gęstość objętościowa ρ		Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d		Wskaźnik porowatości e		Wskaźnik zagęszczenia I_s	
	Początkowa w	Końcowa w_k	Początkowa ρ	Końcowa ρ_k	Początkowa ρ_d	Końcowa ρ_{dk}	Początkowy e	Końcowy e_k	Początkowy I_s	Końcowy I_{sk}
	%		g/cm ³		g/cm ³		-		-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	27,38	36,71	1,79	1,96	1,40	1,43	0,943	0,888	1,00	1,02
2	30,56	38,21	1,75	1,88	1,34	1,36	1,030	0,978	0,96	0,97
3	32,47	38,10	1,79	1,81	1,35	1,39	1,015	0,950	0,96	0,99
4	34,20	40,55	1,81	1,95	1,35	1,39	1,015	0,938	0,97	0,99

Tabela Z.II.26. Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej i współczynnik ścisłości objętościowej

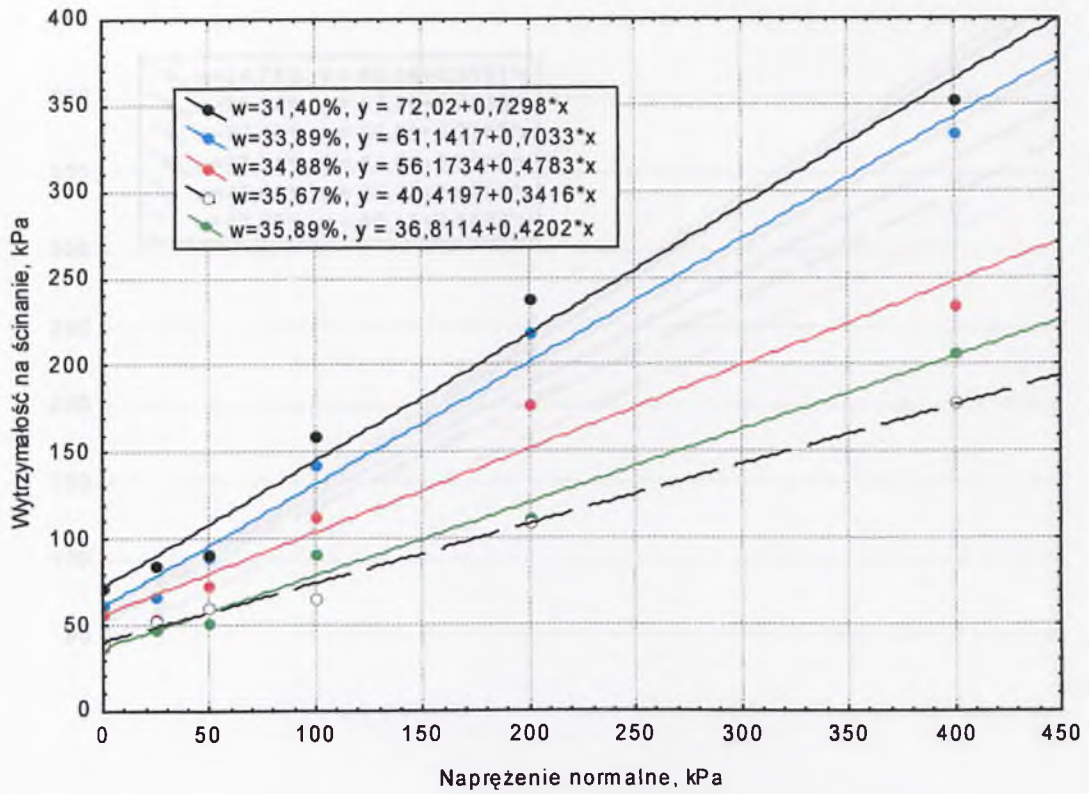
L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność początkowa w	Przyrost naprężeń $\Delta\sigma$	Wysokość początkowa h_1	Wysokość końcowa h_2	Zmiana wysokości Δh	Początkowy wskaźnik porowatości e_{i-1}	Końcowy wskaźnik porowatości e_i	Zmiana wskaźnika porowatości $ e_{i-1} - e_i $	Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej M_0	Współczynnik ścisłości objętościowej m_v	Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej M_0 dla $\Delta\sigma = 200 - 50 = 150 \text{ kPa}$
-	-	%	kPa	mm	mm	mm	-	-	-	kPa	1/kPa	kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1			12,5	20,000	19,981	0,019	0,943	0,941	0,002	13158	7,60E-05	
2			25	19,981	19,938	0,043	0,941	0,937	0,004	11617	8,61E-05	
3	1	27,38	50	19,938	19,865	0,073	0,937	0,930	0,007	13656	7,32E-05	12700
4			100	19,865	19,745	0,120	0,930	0,918	0,012	16554	6,04E-05	
5			200	19,745	19,491	0,254	0,918	0,893	0,025	15547	6,43E-05	
6			12,5	20,000	19,979	0,021	1,030	1,028	Średnia: 0,002	14106	7,09E-05	
7			25	19,979	19,930	0,049	1,028	1,023	0,005	11905	8,40E-05	
8	2	30,56	50	19,930	19,862	0,068	1,023	1,016	0,007	10193	9,81E-05	14203
9			100	19,862	19,768	0,094	1,016	1,006	0,010	14654	6,82E-05	
10			200	19,768	19,636	0,132	1,006	0,993	0,013	21130	4,73E-05	
11			12,5	20,000	19,969	0,031	1,015	1,012	Średnia: 0,003	17567	6,62E-05	
12			25	19,969	19,902	0,067	1,012	1,005	0,007	8065	1,24E-04	
13	3	32,47	50	19,902	19,798	0,104	1,005	0,994	0,011	7451	1,34E-04	8862
14			100	19,798	19,631	0,167	0,994	0,978	0,016	9568	1,05E-04	
15			200	19,631	19,411	0,220	0,978	0,955	0,023	11855	8,44E-05	
16			12,5	20,000	19,974	0,026	1,015	1,012	Średnia: 0,003	17846	5,60E-05	
17			25	19,974	19,918	0,056	1,012	1,007	0,005	10957	1,00E-05	
18	4	34,20	50	19,918	19,838	0,080	1,007	0,998	0,009	9615	1,04E-04	11749
19			100	19,838	19,719	0,119	0,998	0,987	0,011	8917	1,12E-04	
20			200	19,719	19,322	0,397	0,987	0,947	0,040	12449	8,03E-05	
									Średnia: 0,040	16671	6,00E-05	
									Średnia: 0,040	9934	1,01E-04	
									Średnia: 0,040	11517	0,91E-05	

Tabela Z.II.27. Edometryczny moduł odprężenia

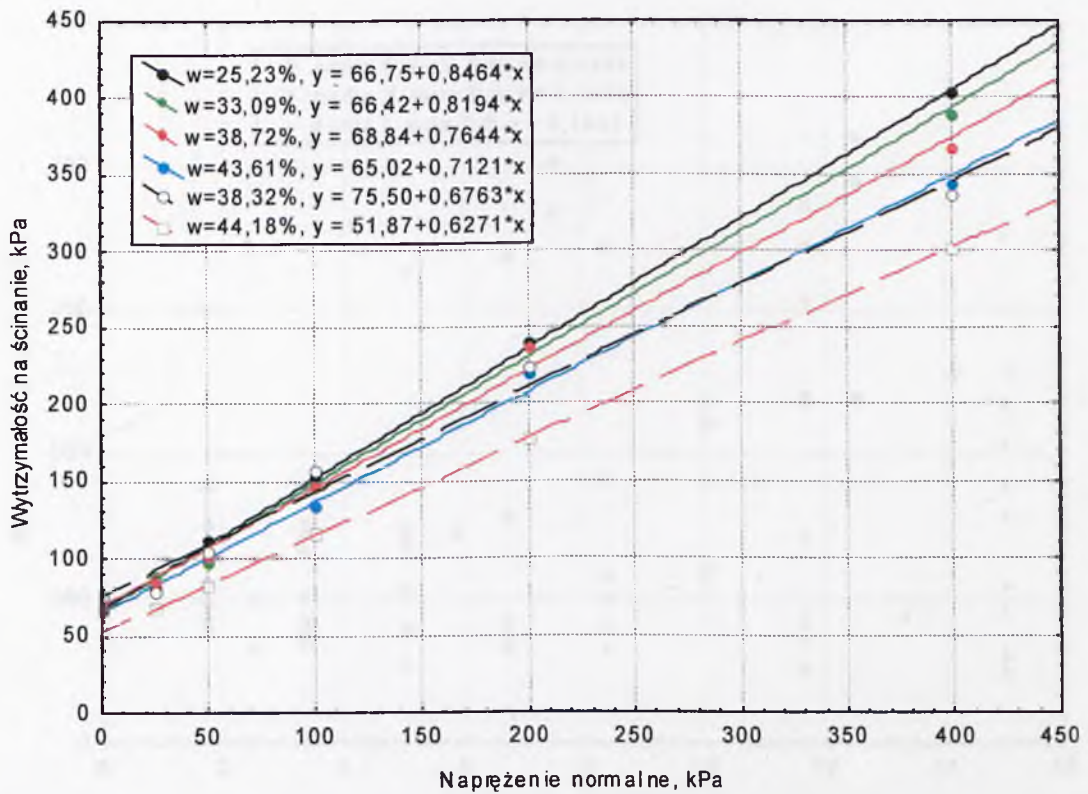
L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność początkowa w	Przyrost naprężeń $\Delta\sigma$	Wysokość początkowa h_1	Wysokość końcowa h_2	Zmiana wysokości Δh	Początkowy wskaźnik porowatości e_{i-1}	Końcowy wskaźnik porowatości e_i	Zmiana wskaźnika porowatości $ e_{i-1} - e_i $	Edometryczny moduł odprężenia \bar{M}	Edometryczny moduł odprężenia \bar{M} dla $\Delta\sigma = 200 - 50 = 150 \text{ kPa}$
-	-	%	kPa	mm	mm	mm	-	-	-	kPa	kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1			200	19,491	19,512	0,021	0,893	0,895	0,002	185629	
2			100	19,512	19,535	0,023	0,895	0,898	0,003	84835	
3	1	27,38	50	19,535	19,557	0,022	0,898	0,900	0,002	44398	45178
4			25	19,557	19,577	0,020	0,900	0,902	0,002	24446	
5			12,5	19,577	19,595	0,018	0,902	0,904	0,002	13595	
6			200	19,636	19,655	0,019	0,993	0,995	0,002	206695	
7			100	19,655	19,675	0,020	0,995	0,997	0,002	98275	
8	2	30,56	50	19,675	19,693	0,018	0,997	0,999	0,002	54653	55777
9			25	19,693	19,708	0,015	0,999	1,000	0,001	32822	
10			12,5	19,708	19,720	0,012	1,000	1,001	0,001	20529	
11			200	19,411	19,435	0,024	0,955	0,958	0,003	161758	
12			100	19,435	19,461	0,026	0,958	0,961	0,003	74750	
13	3	32,47	50	19,461	19,483	0,022	0,961	0,963	0,002	44230	44320
14			25	19,483	19,501	0,018	0,963	0,965	0,002	27060	
15			12,5	19,501	19,514	0,013	0,965	0,966	0,001	18751	
16			200	19,322	19,346	0,024	0,947	0,949	0,002	65310	
17			100	19,346	19,365	0,019	0,949	0,951	0,002	161017	
18	4	34,20	50	19,365	19,385	0,020	0,951	0,953	0,002	101821	52912
19			25	19,385	19,401	0,016	0,953	0,954	0,001	48412	
20			12,5	19,401	19,413	0,012	0,954	0,956	0,002	30289	
									Średnia:	72350	

Tabela Z.II.28. Edometryczny moduł ścisłości wtórnej

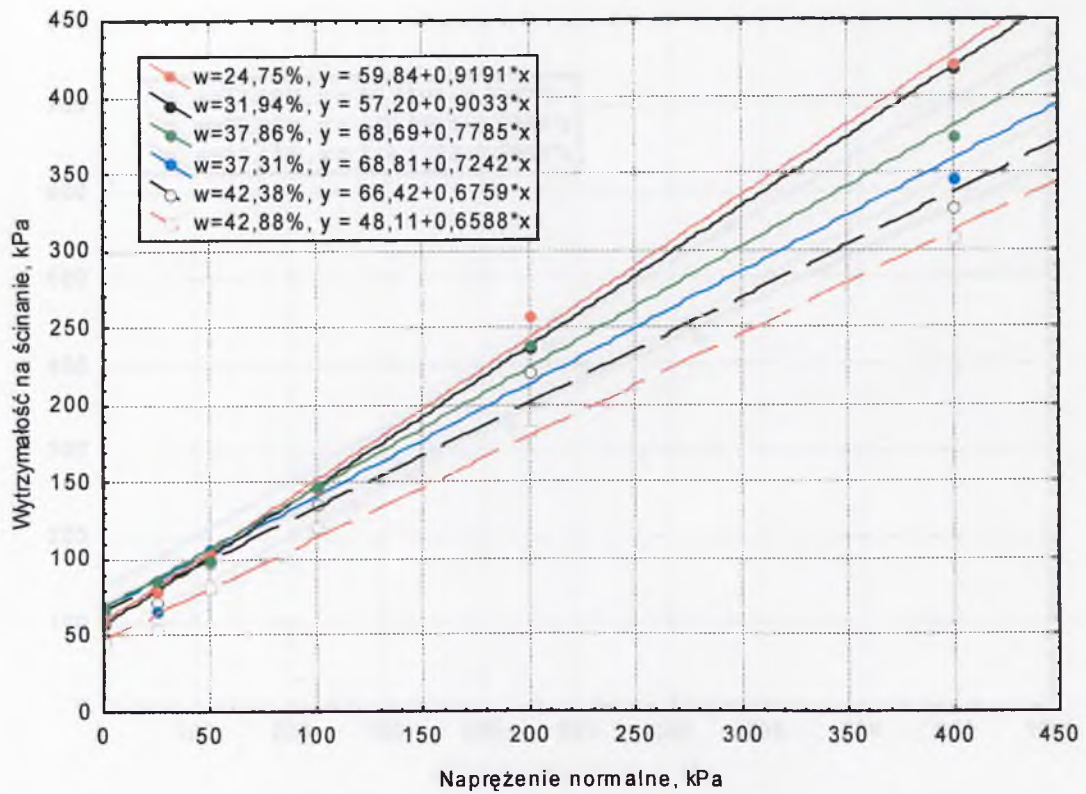
L.p.	Nr oznaczenia	Wilgotność początkowa w	Przyrost naprężeń $\Delta\sigma$	Wysokość początkowa h_1	Wysokość końcowa h_2	Zmiana wysokości Δh	Początkowy wskaźnik porowatości e_{i-1}	Końcowy wskaźnik porowatości e_i	Zmiana wskaźnika porowatości $ e_{i-1} - e_i $	Edometryczny moduł ścisłości wtórnej M	Edometryczny moduł ścisłości wtórnej M dla $\Delta\sigma = 200 - 50 = 150 \text{ kPa}$
-	-	%	kPa	mm	mm	mm	-	-	-	kPa	kPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	27,38	12,5	19,595	19,586	0,009	0,904	0,903	0,001	27215	45905
2			25	19,586	19,573	0,013	0,903	0,901	0,002	37665	
3			50	19,573	19,553	0,020	0,901	0,899	0,002	48933	
4			100	19,553	19,522	0,031	0,899	0,896	0,003	63074	
5			200	19,522	19,440	0,082	0,896	0,888	0,008	47615	
6								Średnia:		44900	
6	2	30,56	12,5	19,72	19,716	0,004	1,001	1,001	0,000	61625	67214
7			25	19,716	19,708	0,008	1,001	1,000	0,001	61612	
8			50	19,708	19,696	0,012	1,000	0,999	0,001	82117	
9			100	19,696	19,672	0,024	0,999	0,997	0,002	82067	
10			200	19,672	19,615	0,057	0,997	0,991	0,006	69025	
11								Średnia:		71289	
11	3	32,47	12,5	19,514	19,508	0,006	0,966	0,965	0,001	40654	38503
12			25	19,508	19,492	0,016	0,965	0,964	0,001	30481	
13			50	19,492	19,469	0,023	0,964	0,961	0,003	42374	
14			100	19,469	19,432	0,037	0,961	0,958	0,003	52619	
15			200	19,432	19,353	0,079	0,958	0,950	0,008	49195	
16								Średnia:		43065	
16	4	34,20	12,5	19,413	19,409	0,004	0,956	0,955	0,001	60666	48523
17			25	19,409	19,399	0,01	0,955	0,954	0,001	48523	
18			50	19,399	19,38	0,019	0,954	0,952	0,002	51050	
19			100	19,38	19,349	0,031	0,952	0,949	0,003	62516	
20			200	19,349	19,238	0,111	0,949	0,938	0,011	34863	
								Średnia:		51523	



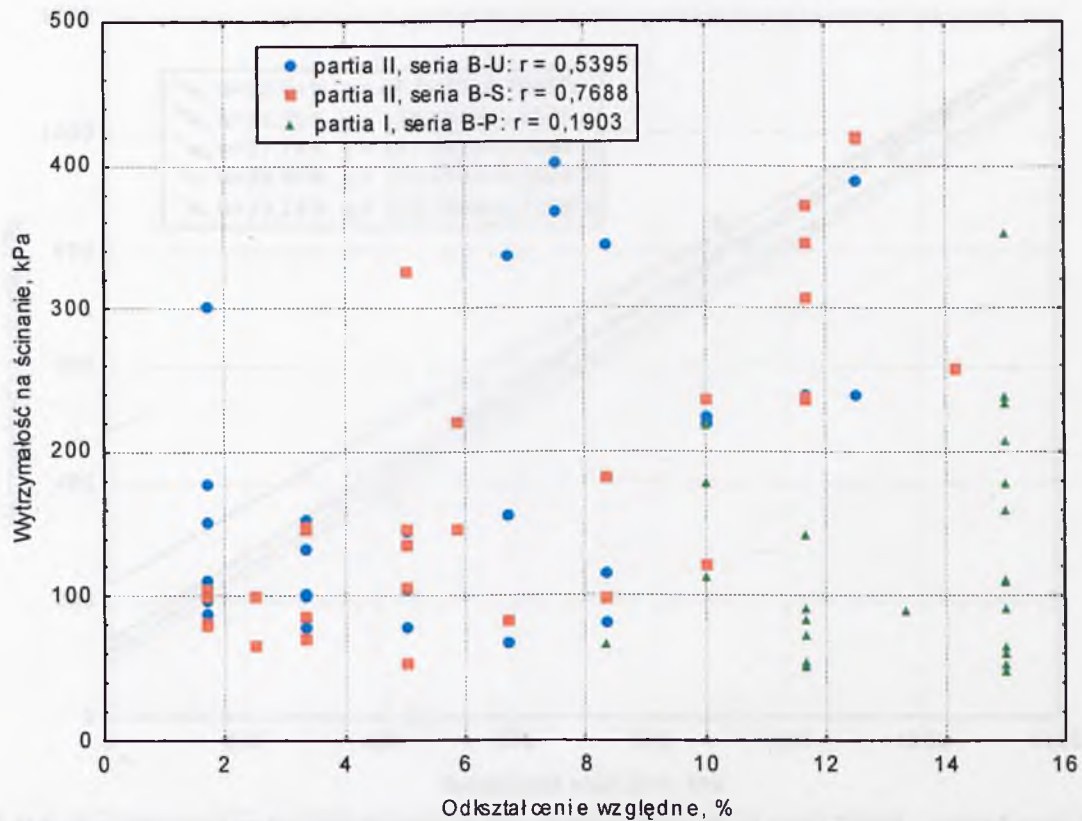
Rys. Z.II.1. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia I, seria B-P.



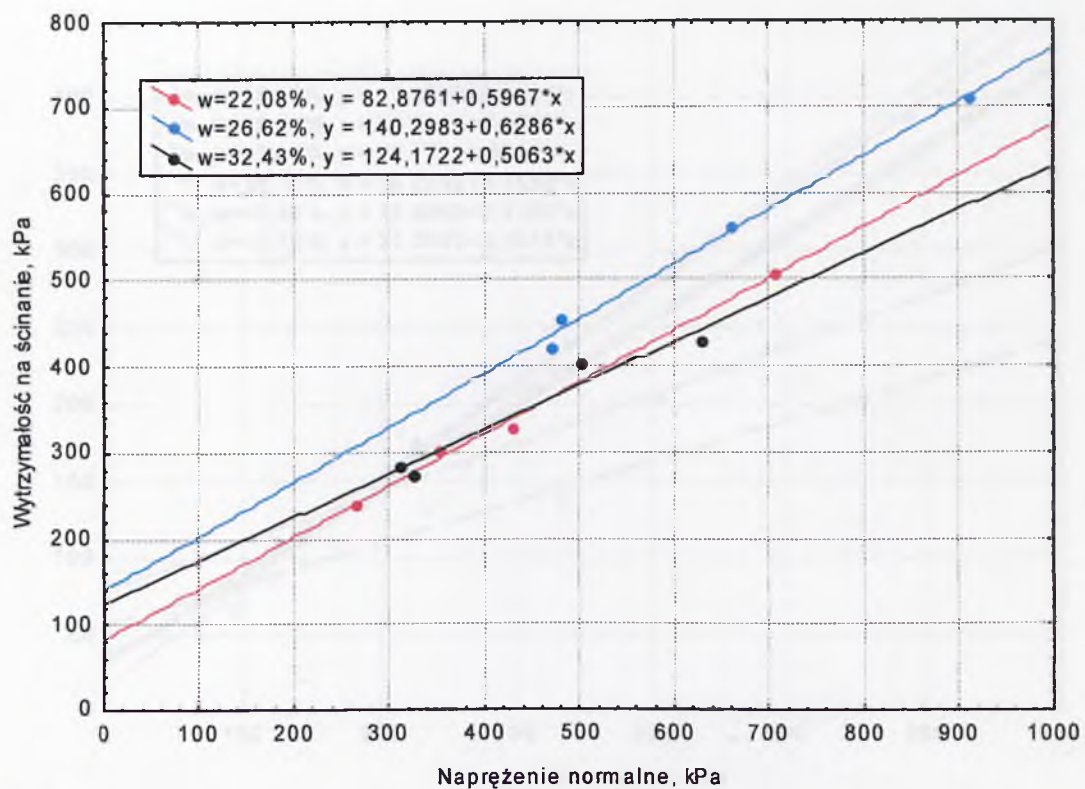
Rys. Z.II.2. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, seria B-U.



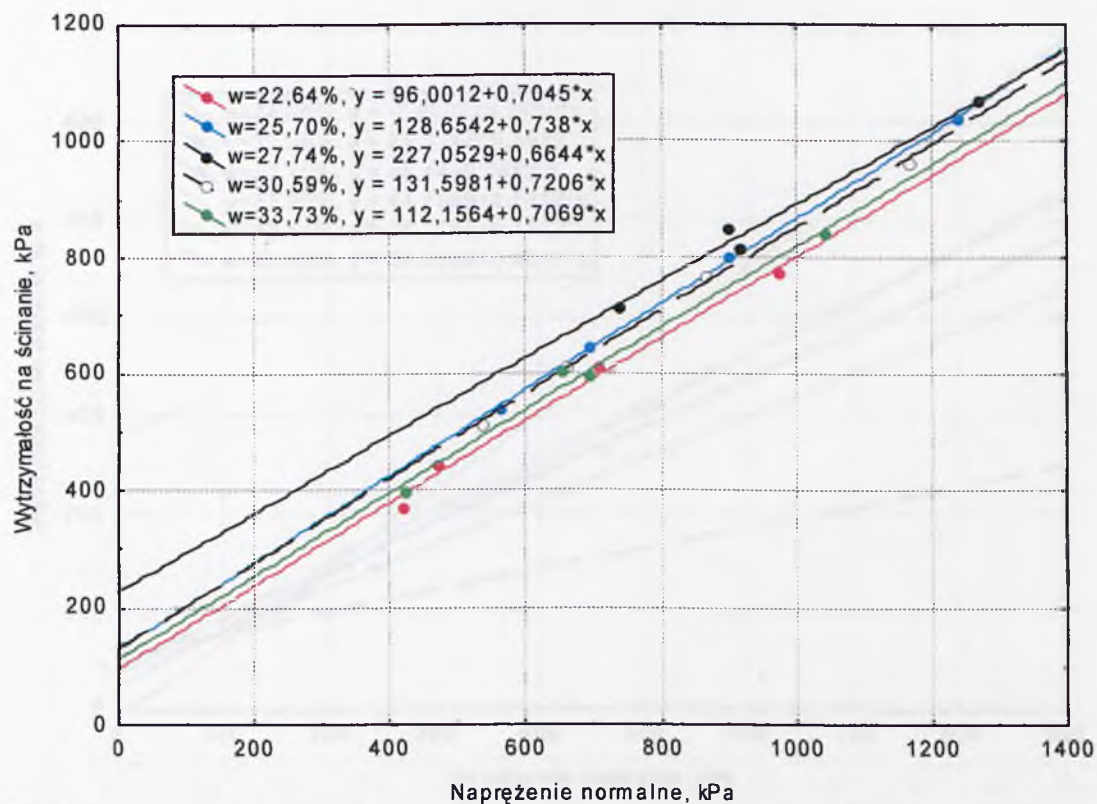
Rys. Z.II.3. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie bezpośredniego ścinania – partia II, seria B-S



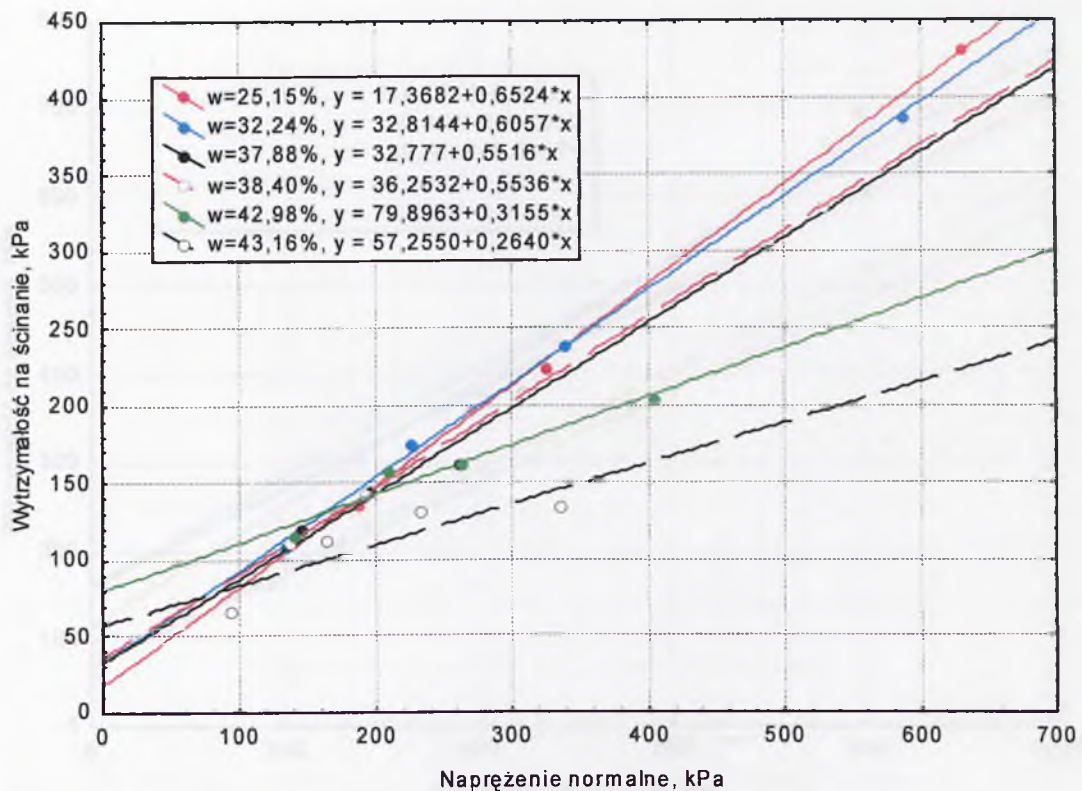
Rys. Z.II.4. Zależność wytrzymałości na ścinanie od odkształcenia względnego dla badania w aparacie bezpośredniego ścinania



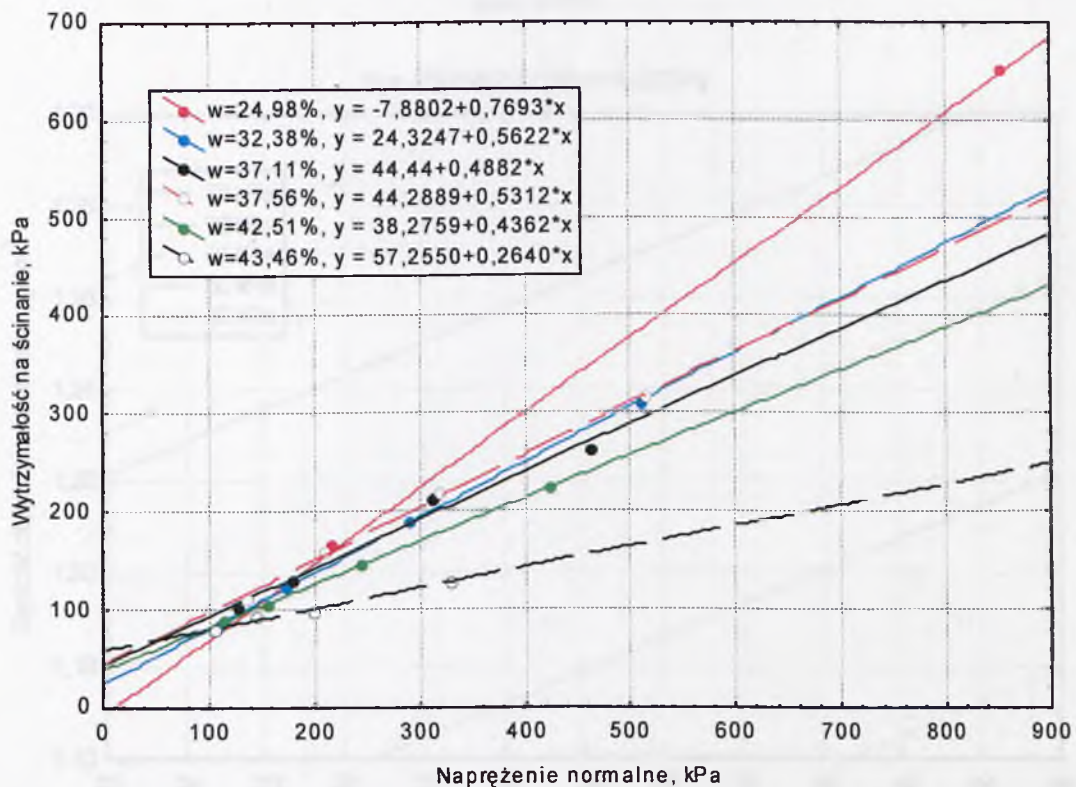
Rys. Z.II.5. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ścinania wg teorii Treski – partia I, seria T-S-1



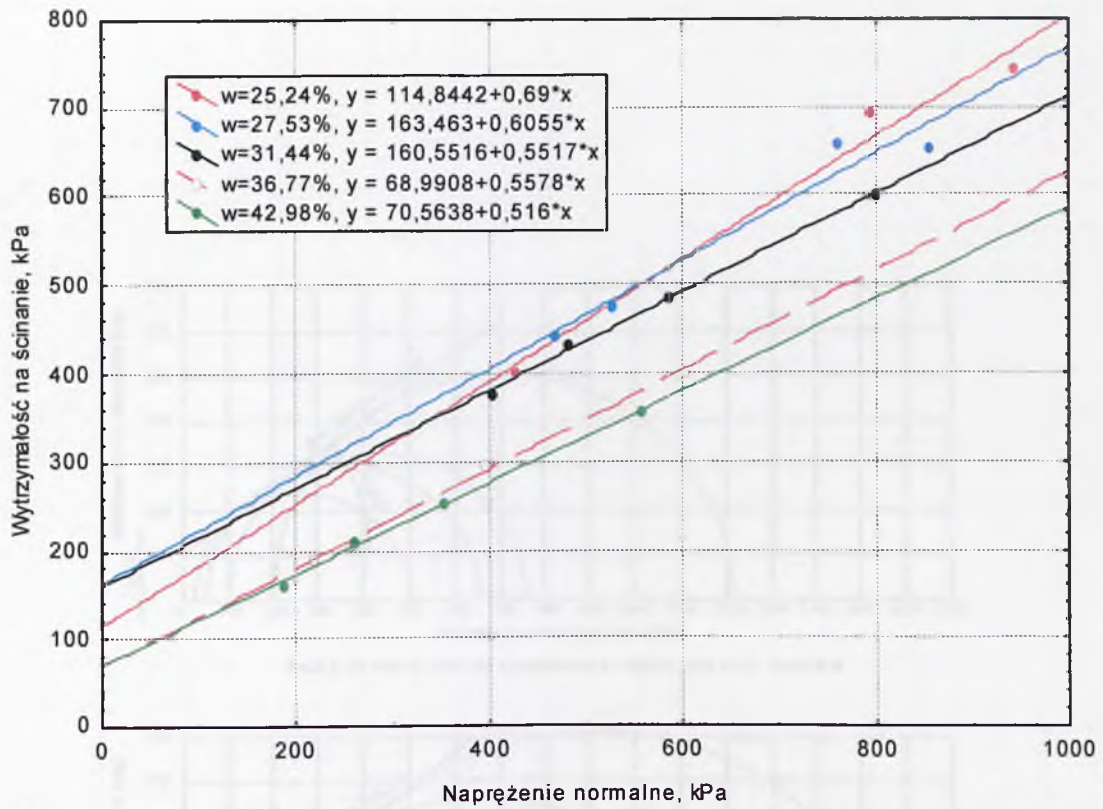
Rys. Z.II.6. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ścinania wg teorii Treski – partia I, seria T-S-2



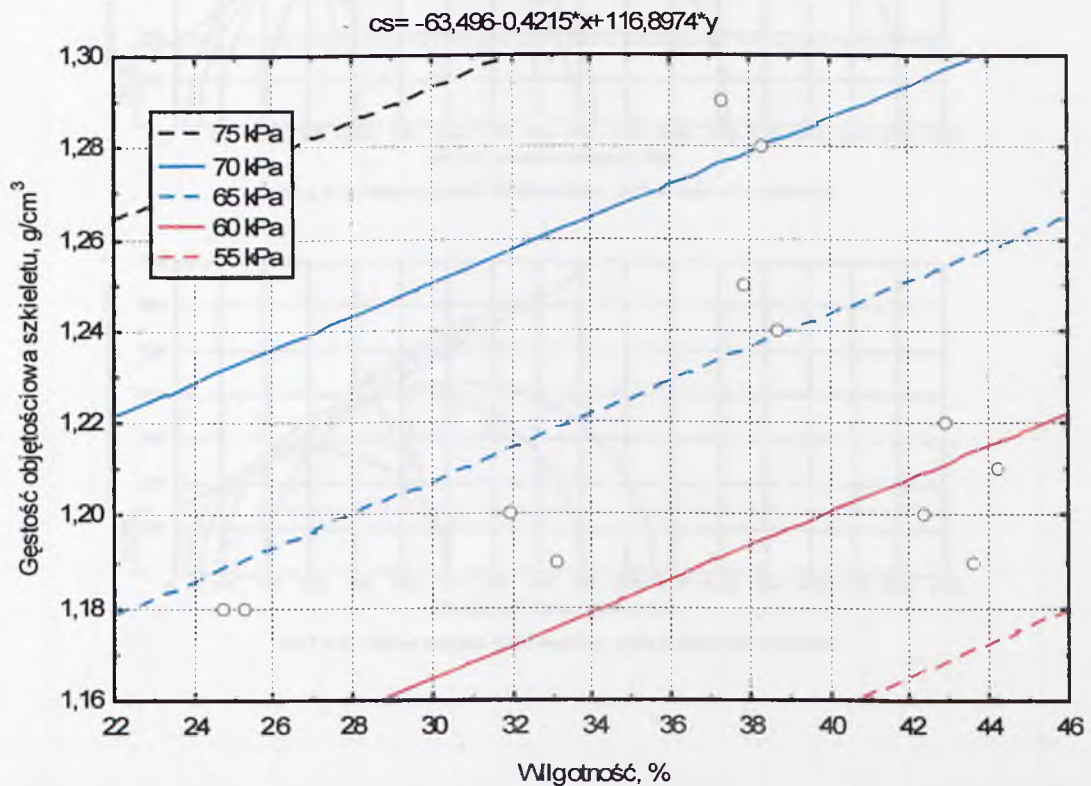
Rys. Z.II.7. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ścinania wg teorii Treski – partia II, seria T-S



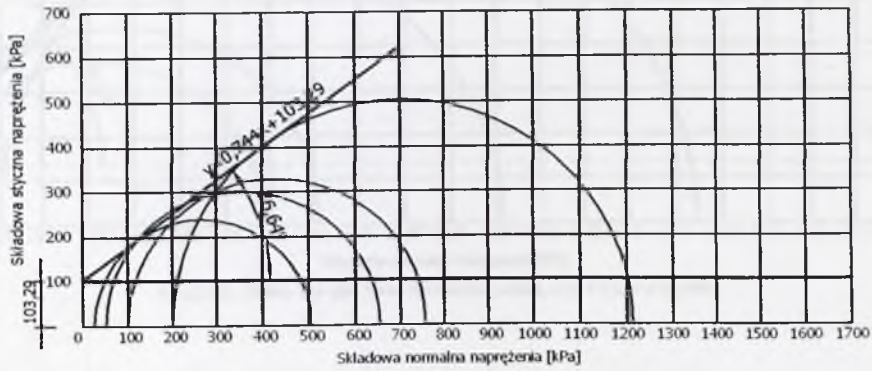
Rys. Z.II.8. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ścinania wg teorii Treski – partia II, seria T-U



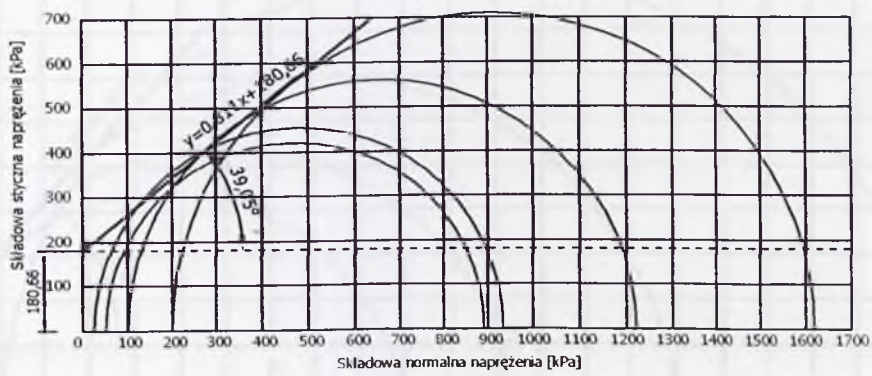
Rys. Z.II.9. Wytrzymałość na ścinanie w aparacie trójosiowego ścinania wg teorii Treski – partia III, seria T-S-R



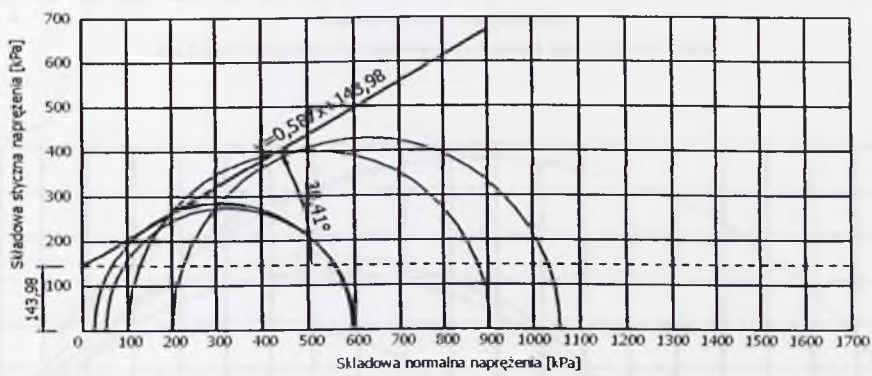
Rys. Z.II.35. Zmienność spójności w zależności od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu – partia II, seria B-U i B-S



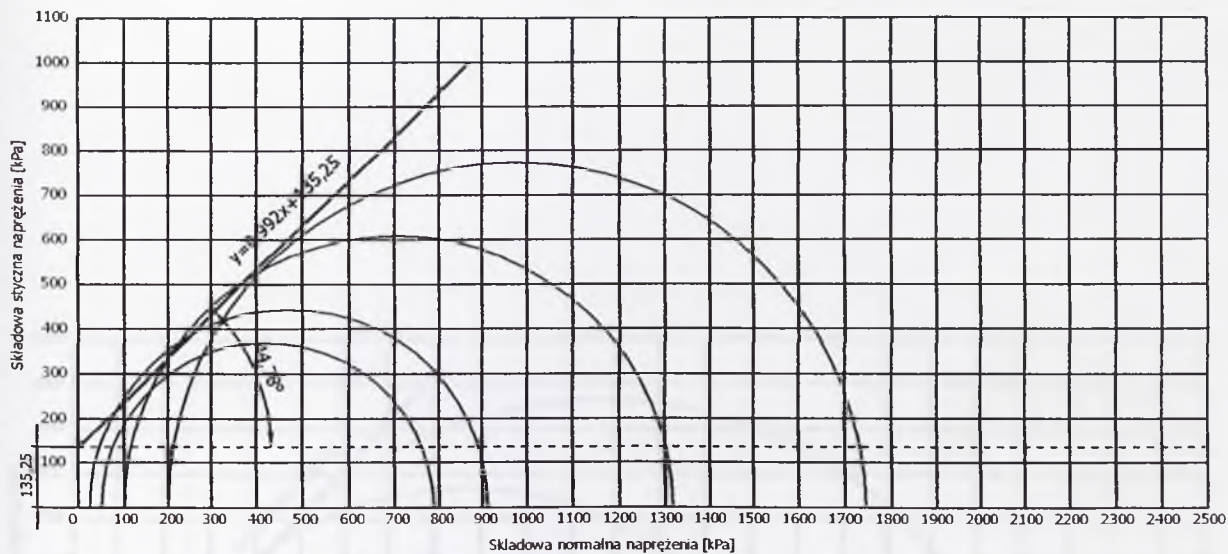
Rys.Z.II.10. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-1, w=22.08%



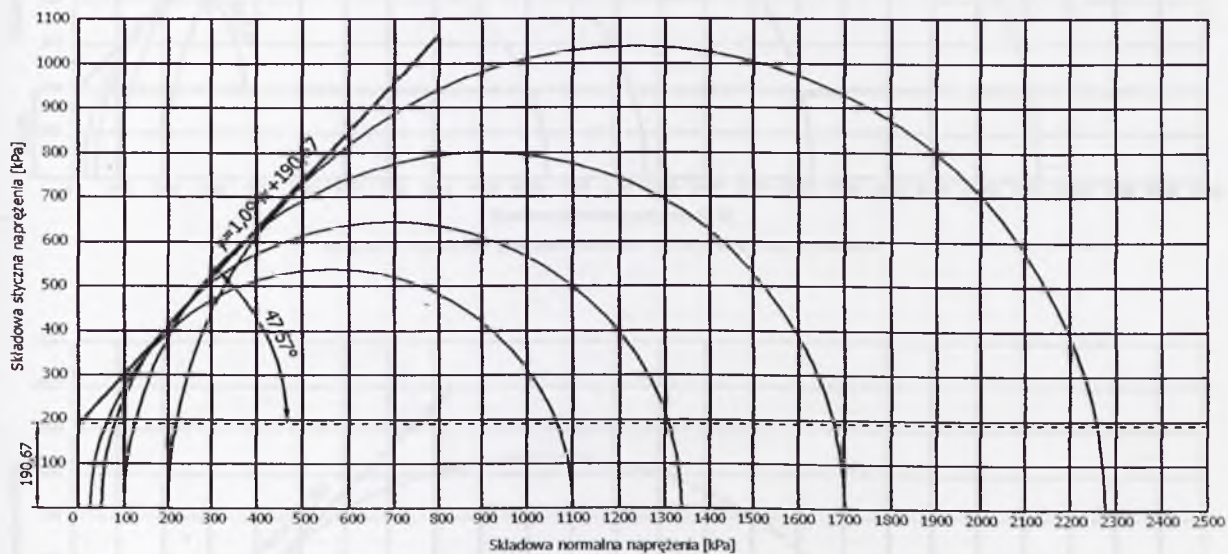
Rys.Z.II.11. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-1, w=26.62%



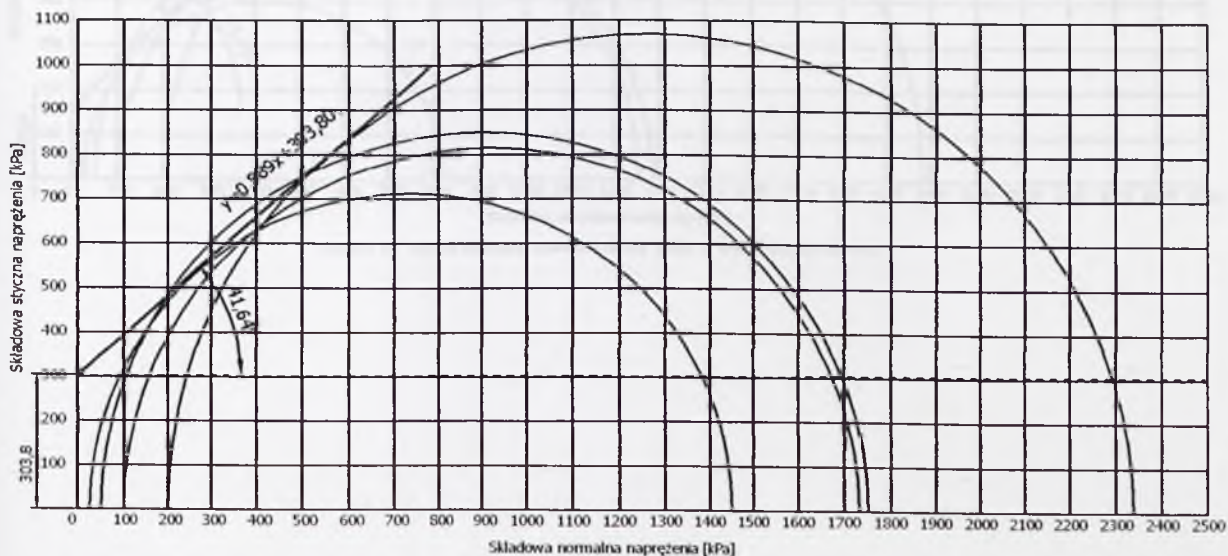
Rys.Z.II.12. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-1, w=32.43%



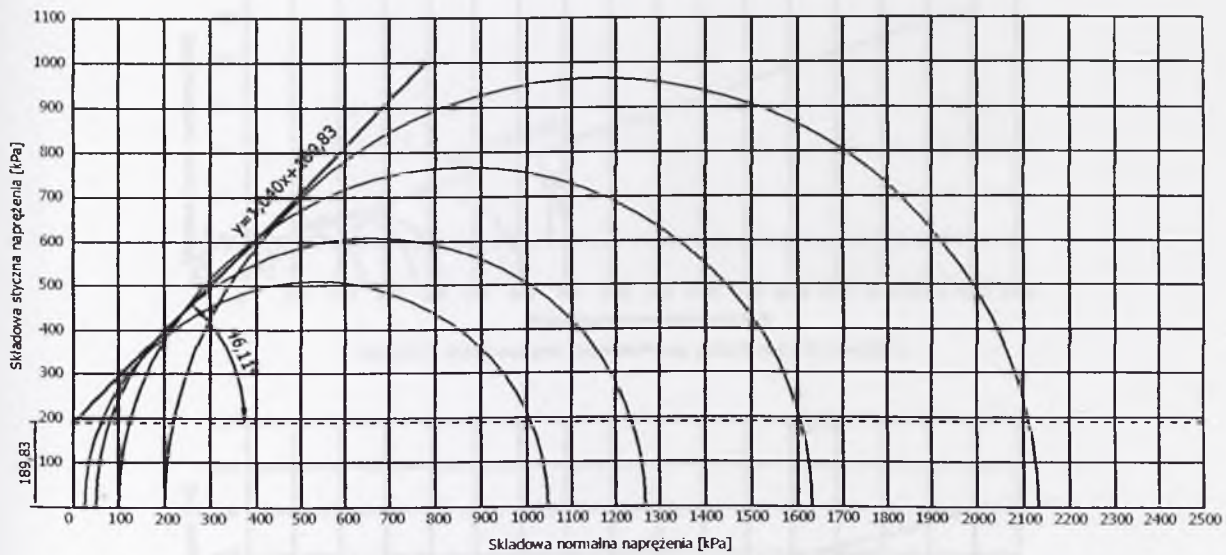
Rys.Z.II.13. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-2, w = 22.64%



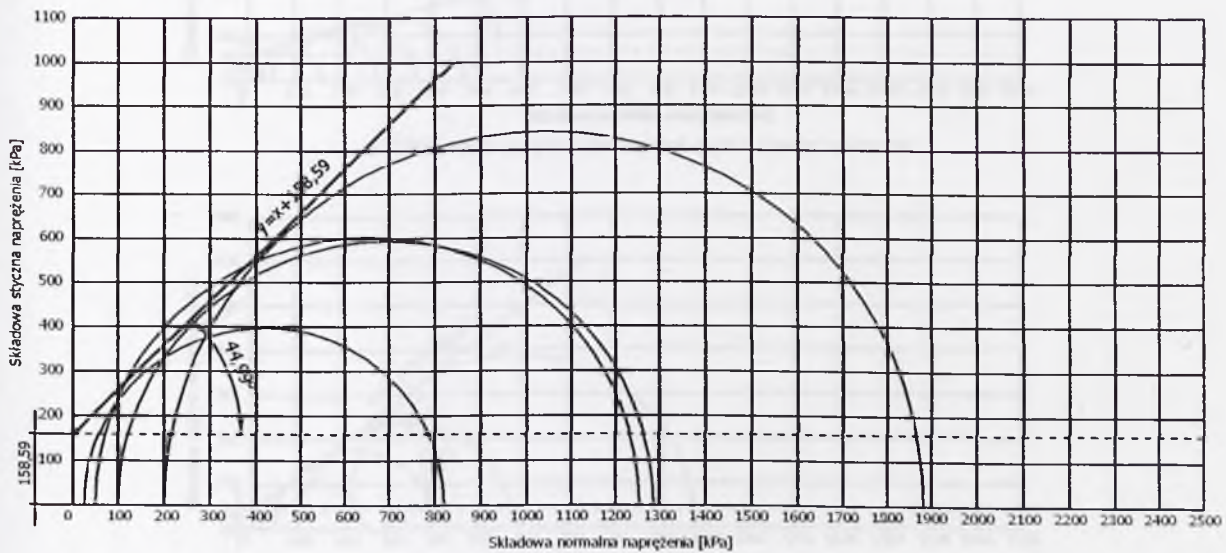
Rys.Z.II.14. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-2, w = 25.70%



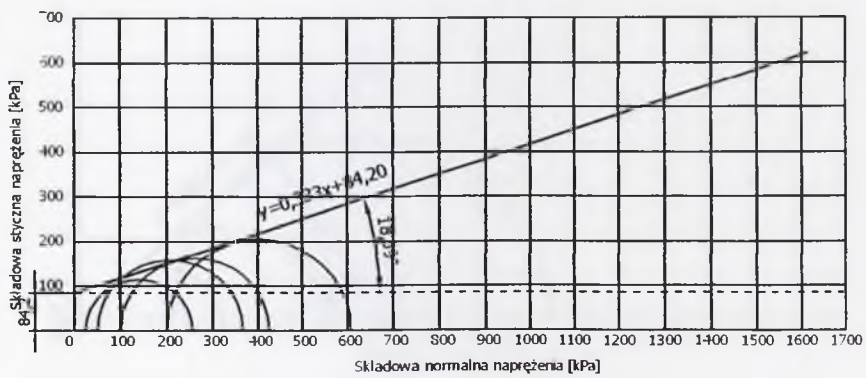
Rys.Z.II.15. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-2, w = 27.74%



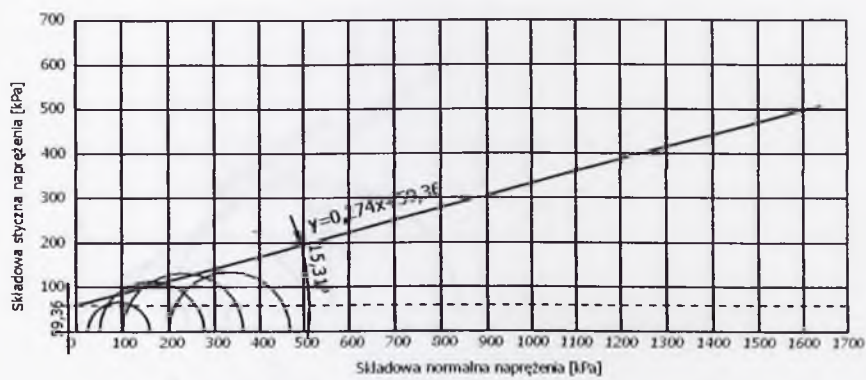
Rys.Z.II.16. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-2, w = 30,59%



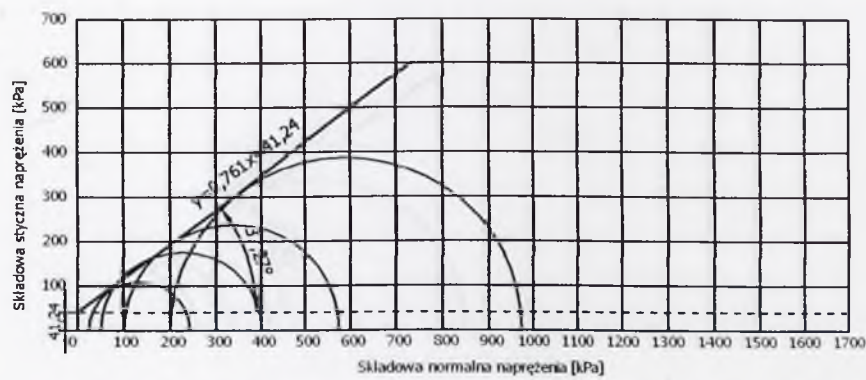
Rys.Z.II.17. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia I, seria T-S-2, w = 33,73%



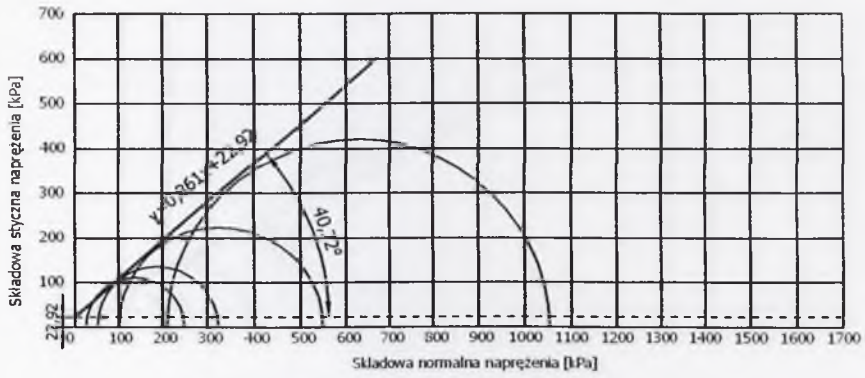
Rys.Z.II.18. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-S, w=42.96%



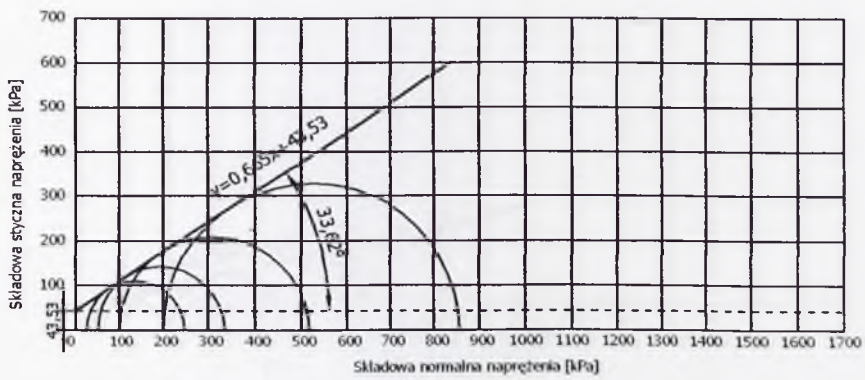
Rys.Z.II.19. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-S, w=43.16%



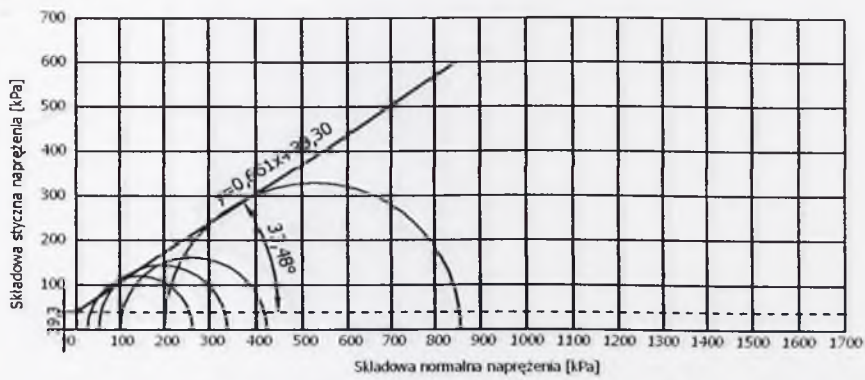
Rys.Z.II.20. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-S, w=32.24%



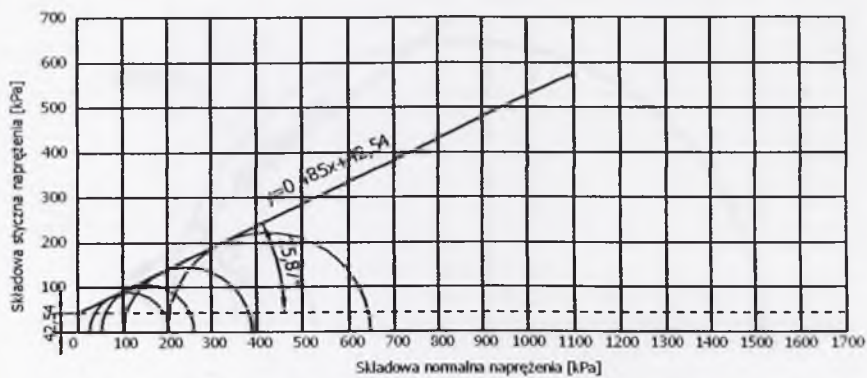
Rys.Z.II.21. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-S, w=25.15%



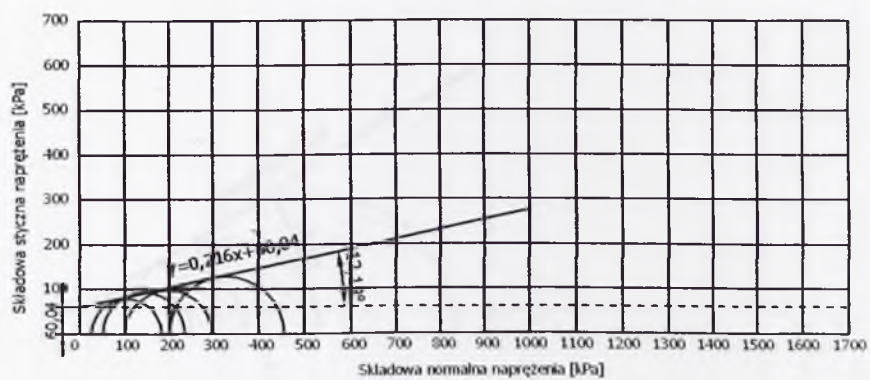
Rys.Z.II.22. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-S, w=38.40%



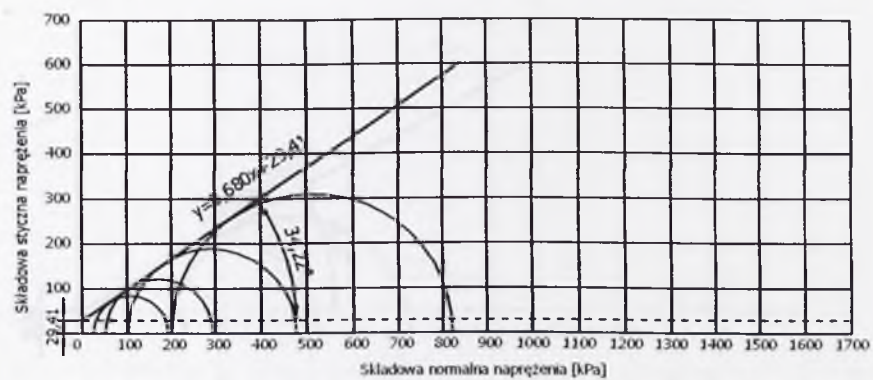
Rys.Z.II.23. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-S, w=37.85%



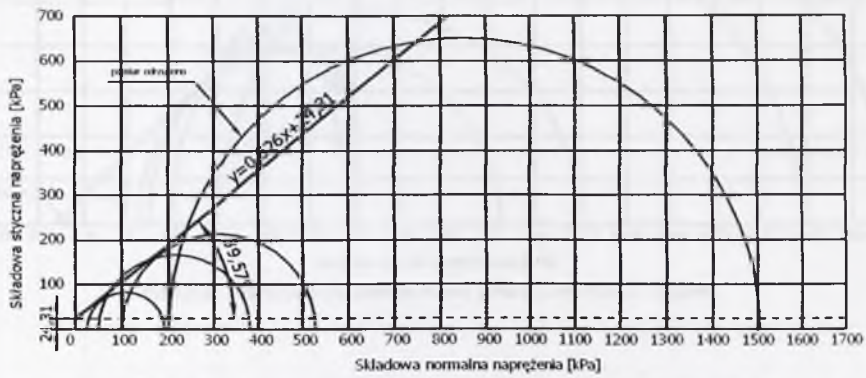
Rys.Z.II.24. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-U, $w=42.51\%$



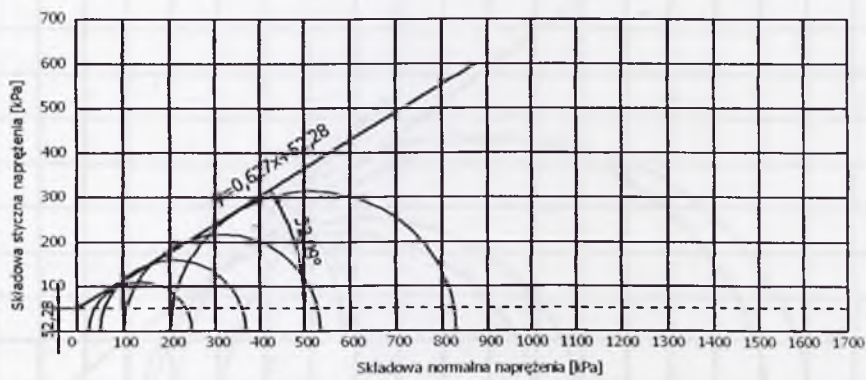
Rys.Z.II.25. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-U, $w=43.46\%$



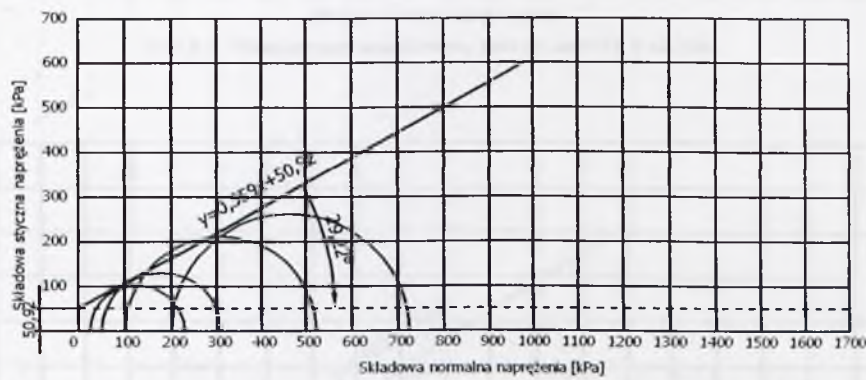
Rys.Z.II.26. Wykres naprężeni Coulomba-Mohra, partia II, seria T-U, $w=32.38\%$



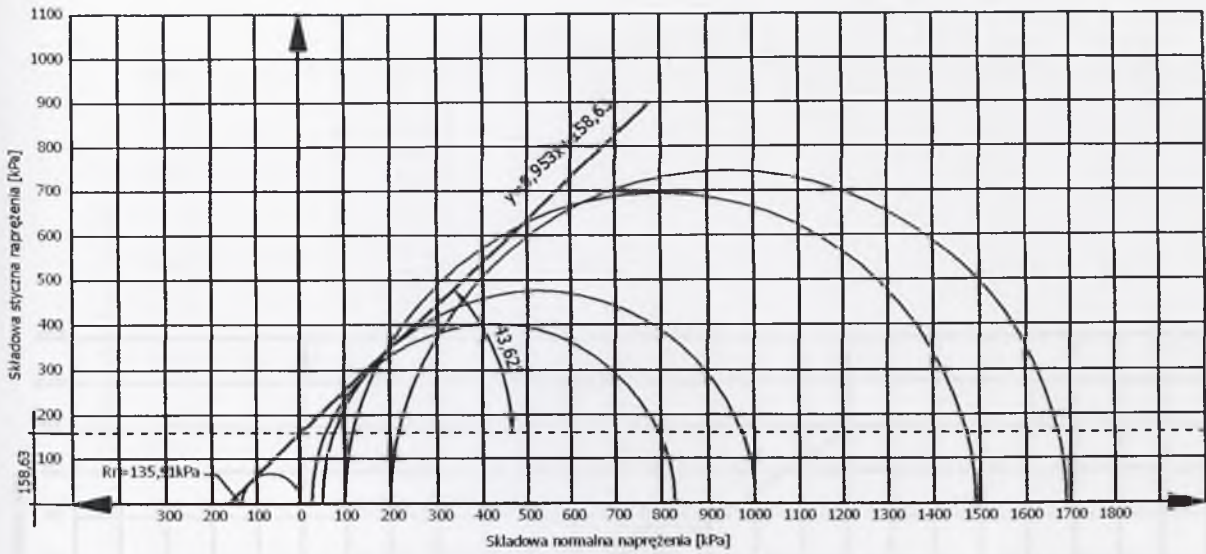
Rys.Z.II.27. Wykres naprężen Coulomba-Mohra, partia II, seria T-U, w=24.98%



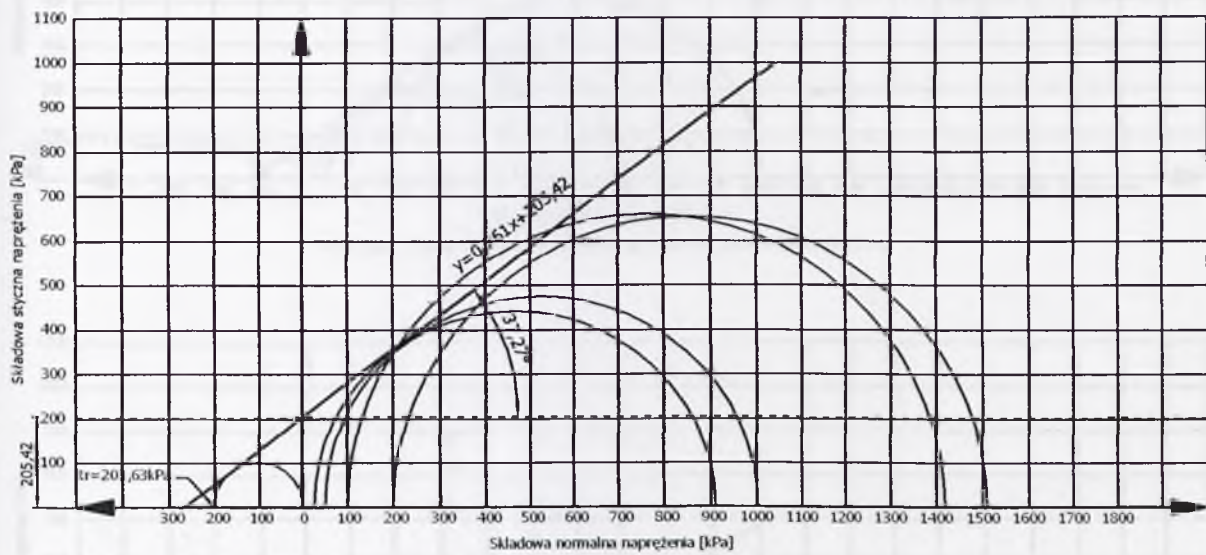
Rys.Z.II.28. Wykres naprężen Coulomba-Mohra, partia II, seria T-U, w=37.56%



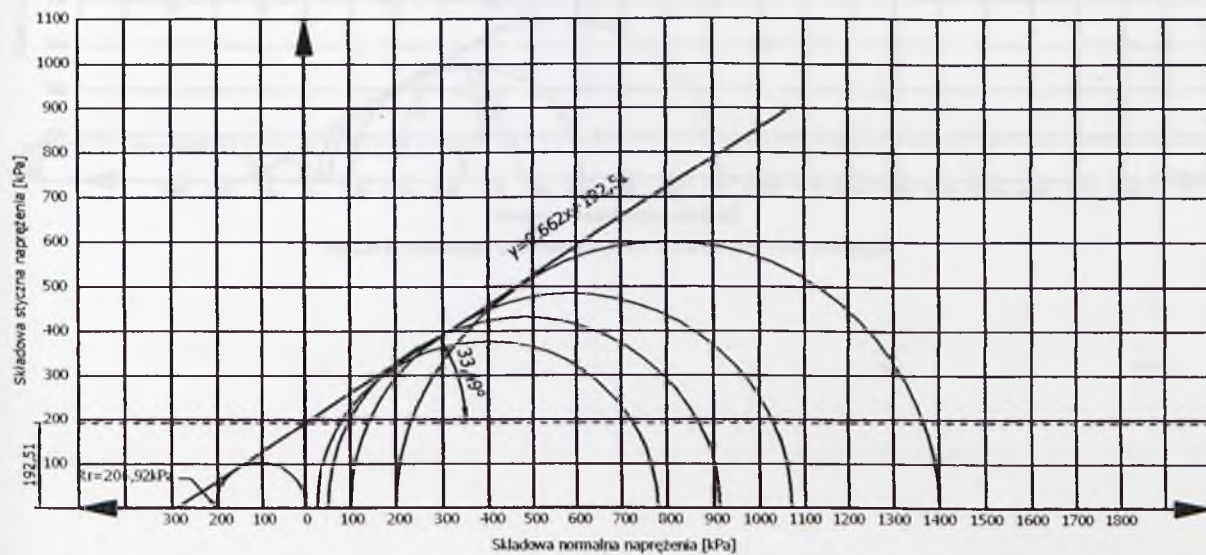
Rys.Z.II.29. Wykres naprężen Coulomba-Mohra, partia II, seria T-U, w=37.11%



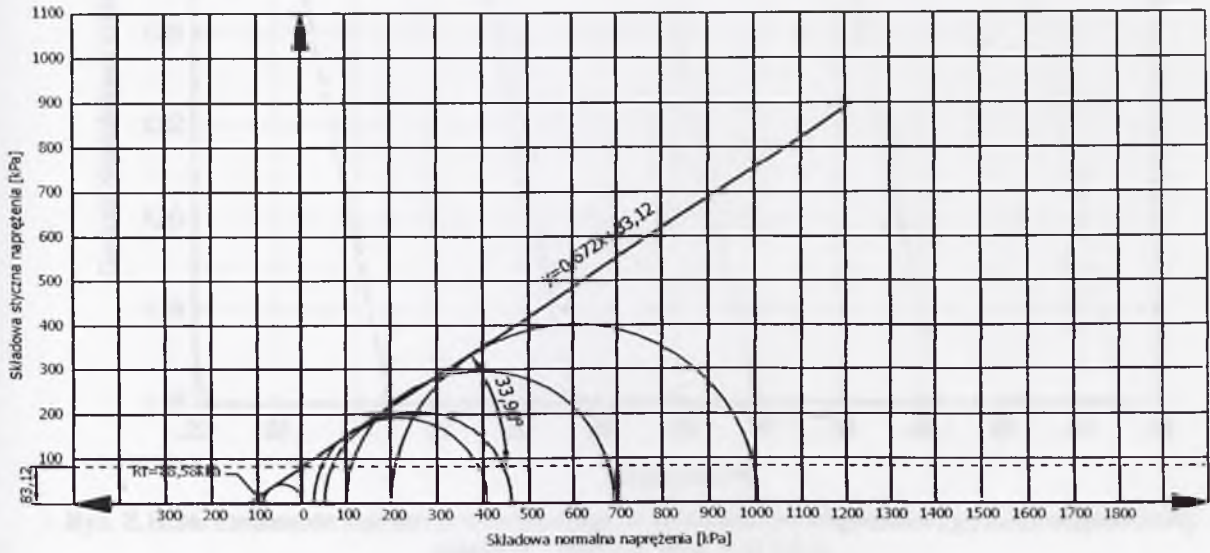
Rys.Z.II.30. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia III, seria T-S-R, w = 25.24%



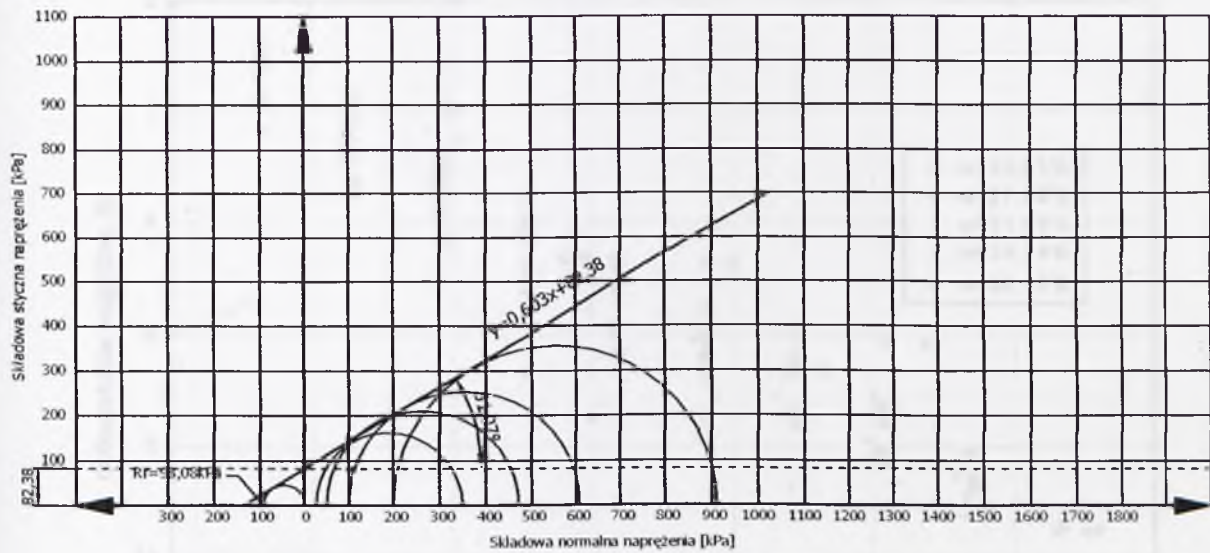
Rys.Z.II.31. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia III, seria T-S-R, w = 27.53%



Rys.Z.II.32. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia III, seria T-S-R, w = 31.44%

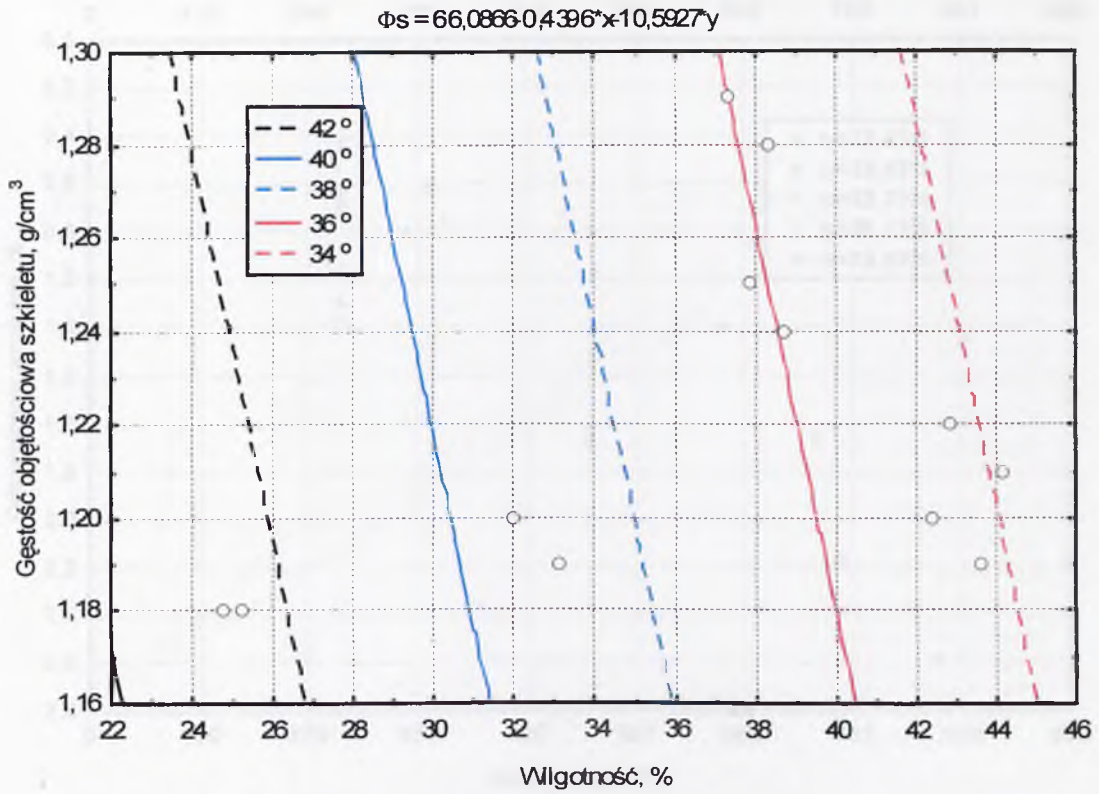


Rys.Z.II.33. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia III, seria T-S-R, w = 36.77%

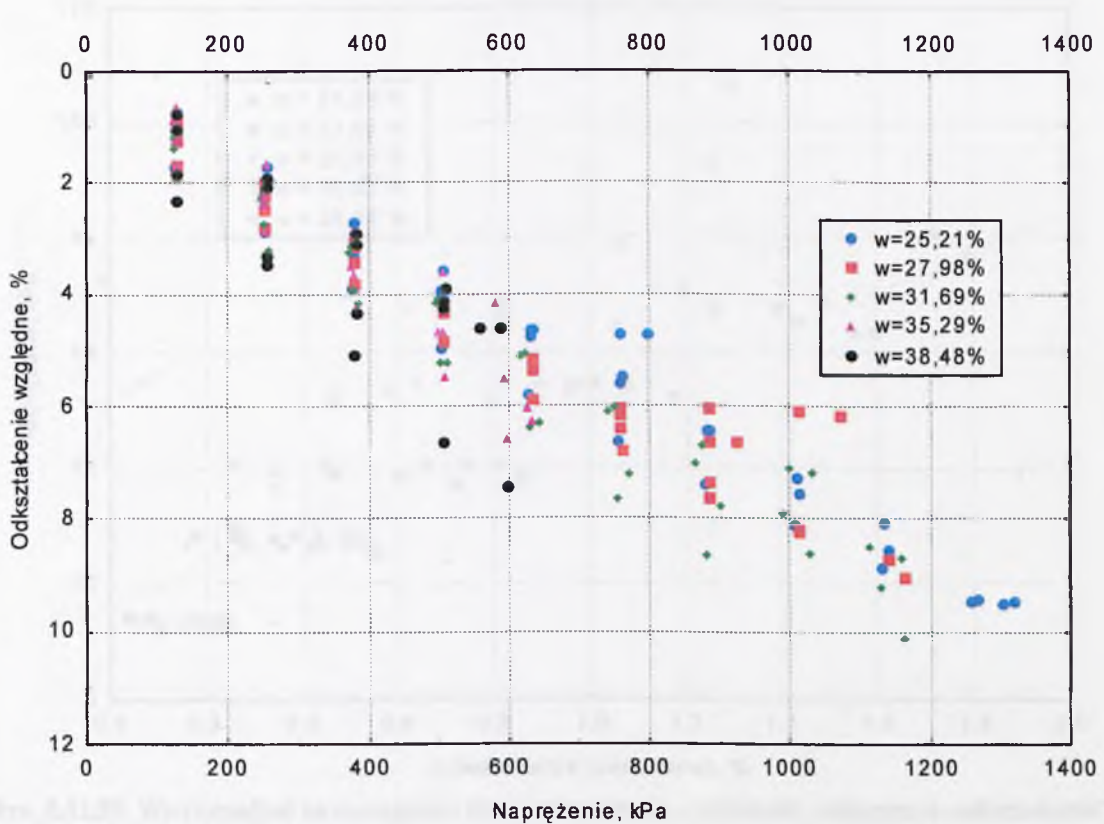


Rys.Z.II.34. Wykres naprężeń Coulomba-Mohra, partia III, seria T-S-R, w = 38.25%

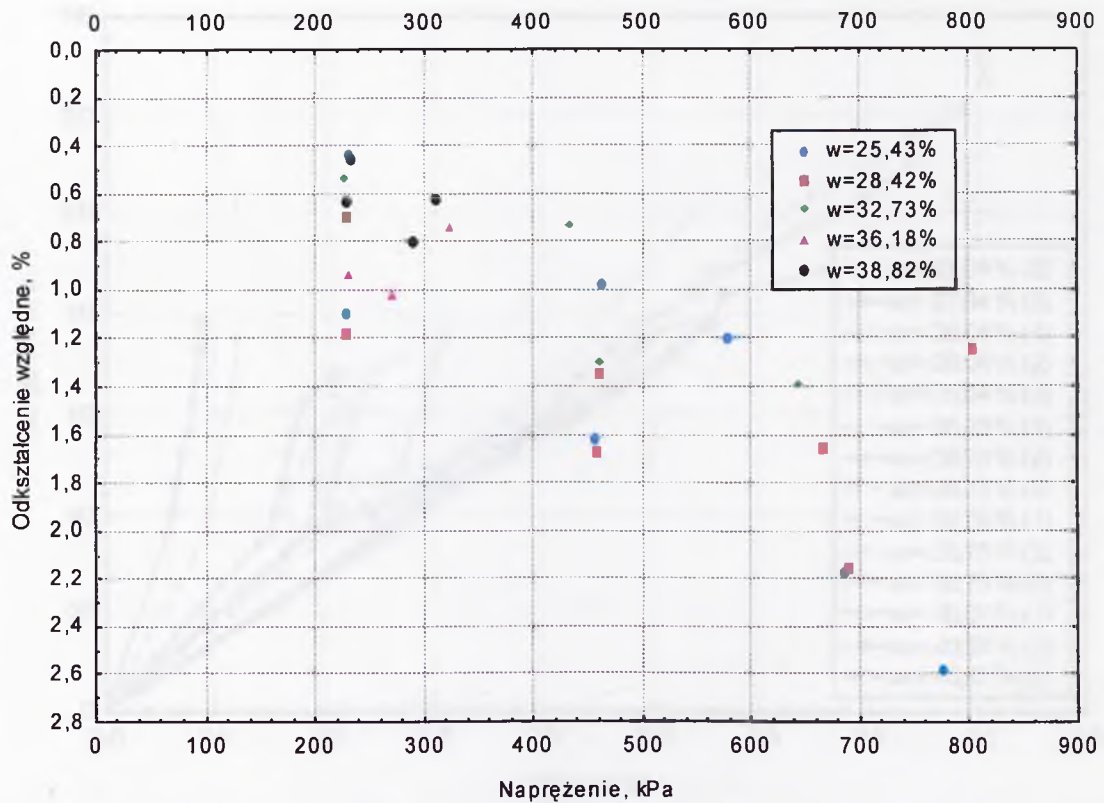
Rys. Z.II.27. Wykresy sił i momentów wzdłuż linii podziału części - wycięcia „wycięcia” - partia C-01



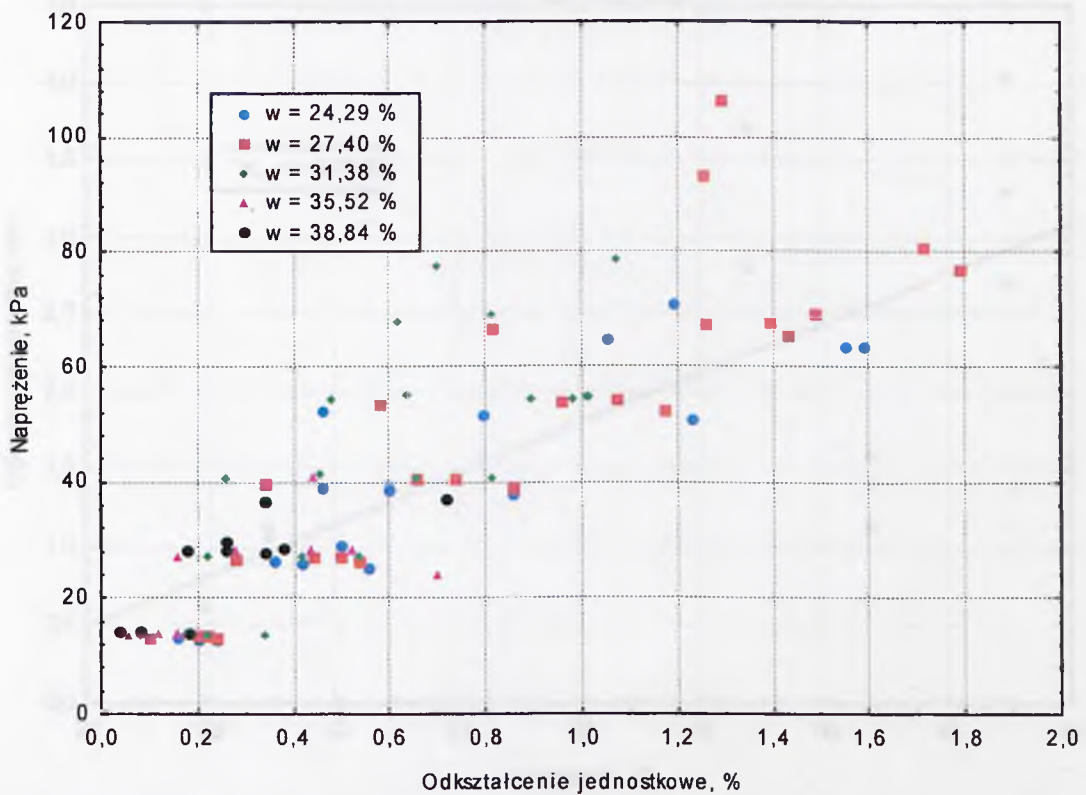
Rys. Z.II.36. Zmienność kąta tarcia wewnętrznego w zależności od wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu – partia II, seria B-U i B-S



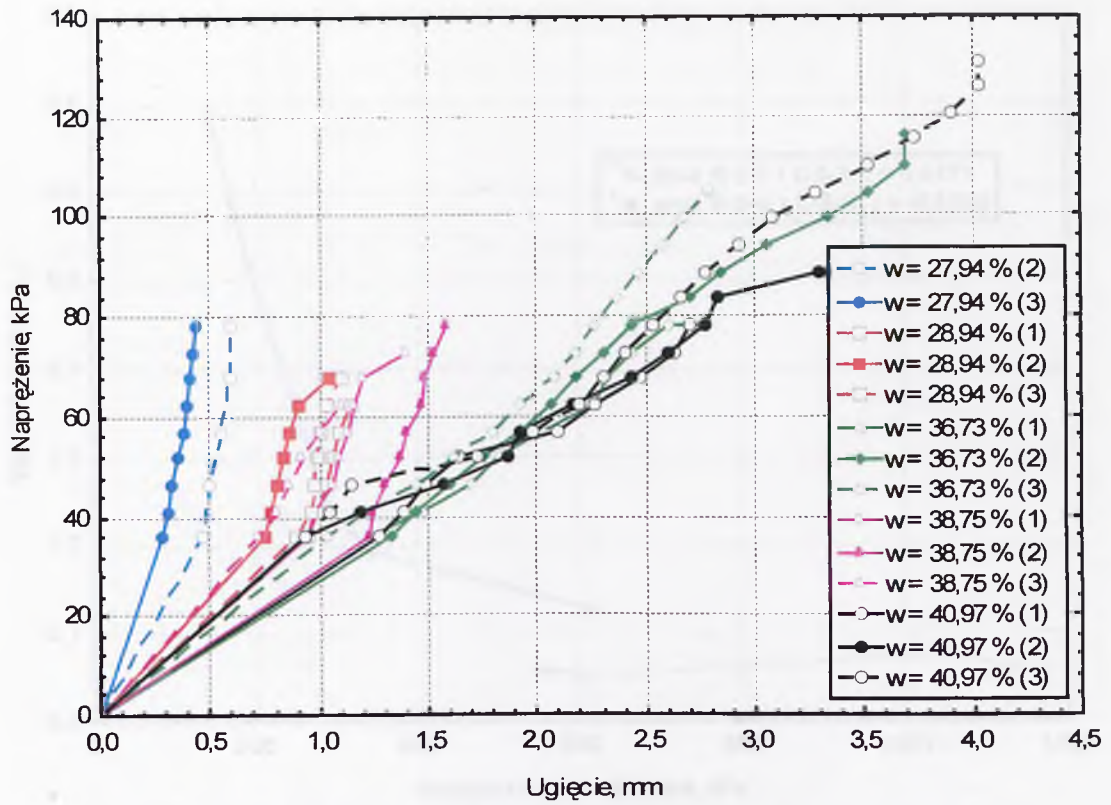
Rys. Z.II.37. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – zależność „napężenie–odkształcenie” – seria C-S-1



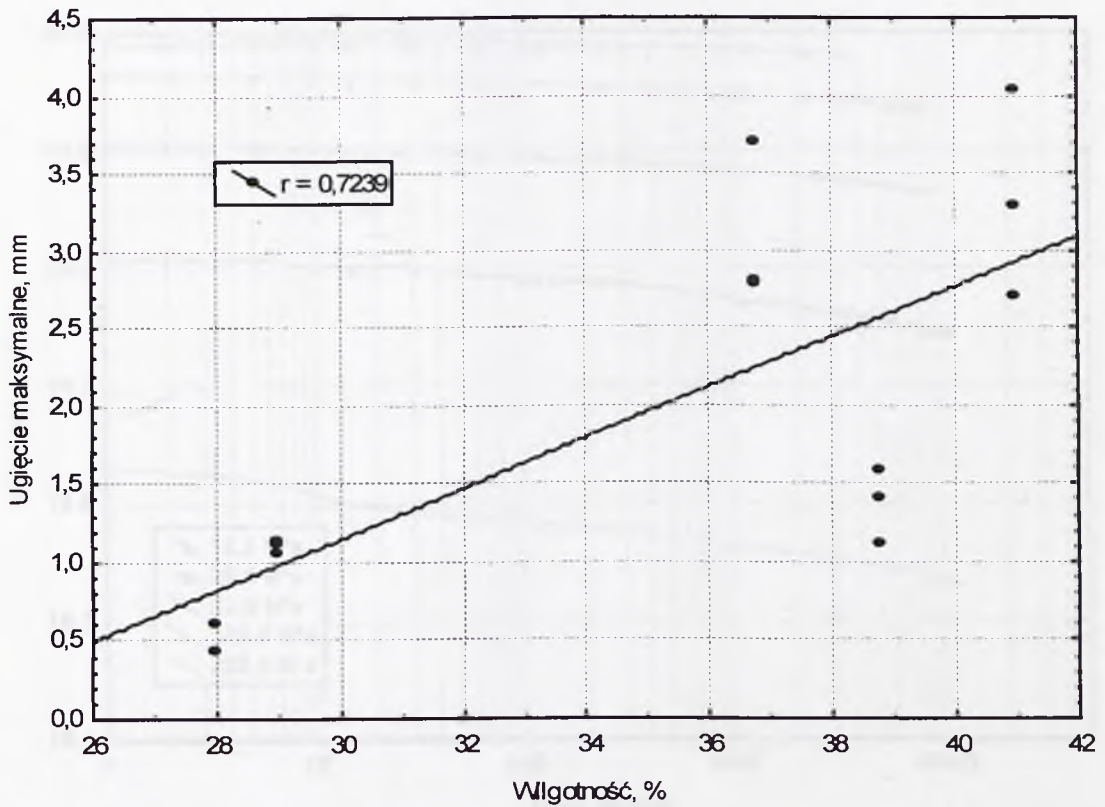
Rys. Z.II.38. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie – zależność „napężenie–odkształcenie” – seria C-S-2



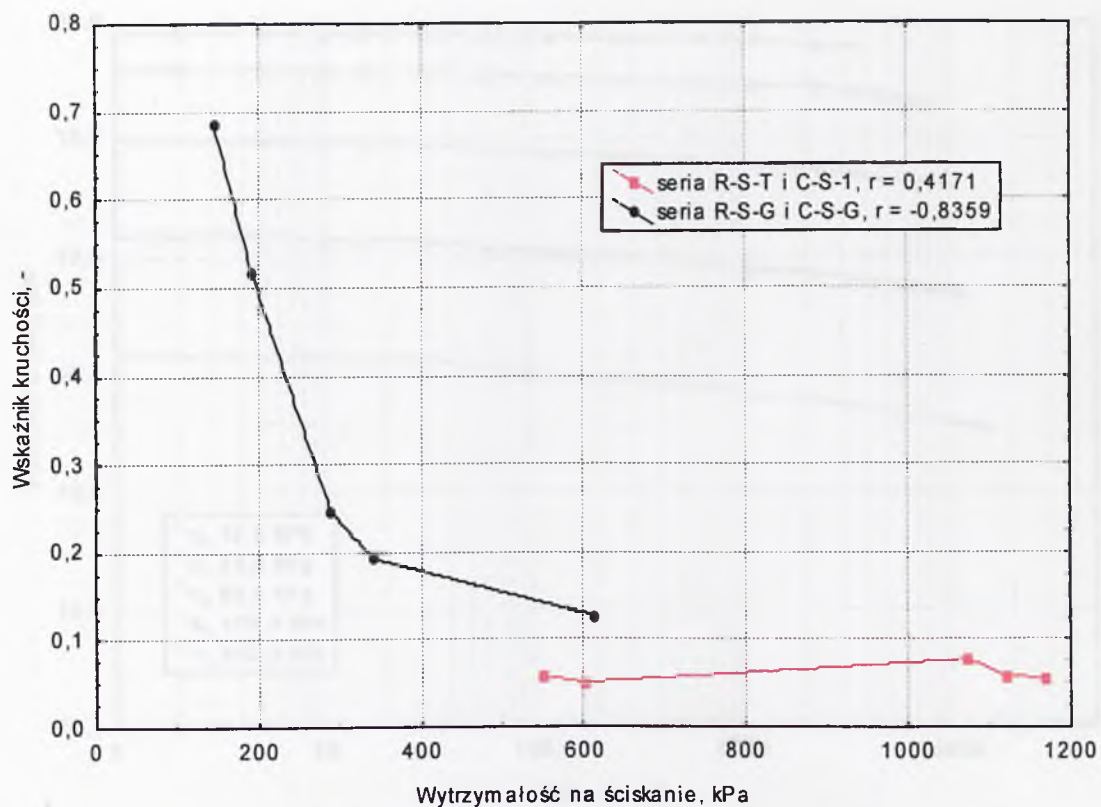
Rys. Z.II.39. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu – zależność „napężenie–odkształcenie”
 – seria R-S-T



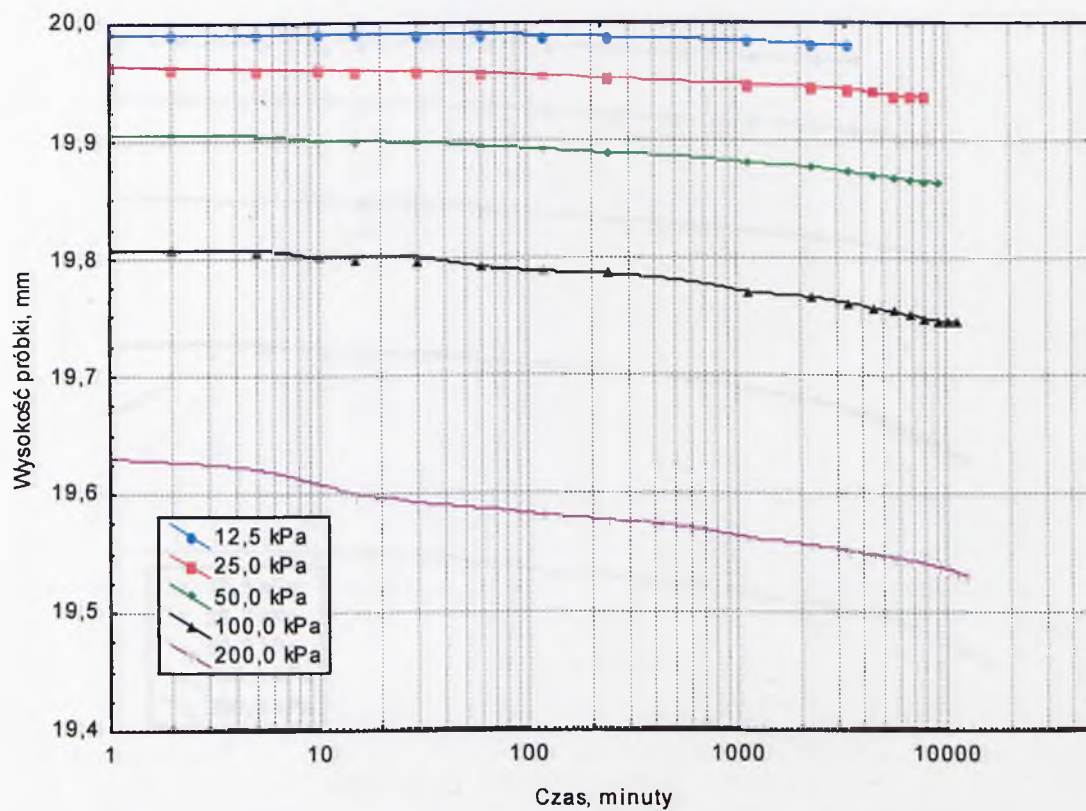
Rys. Z.II.40. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu – ugięcie belki – seria R-S-G



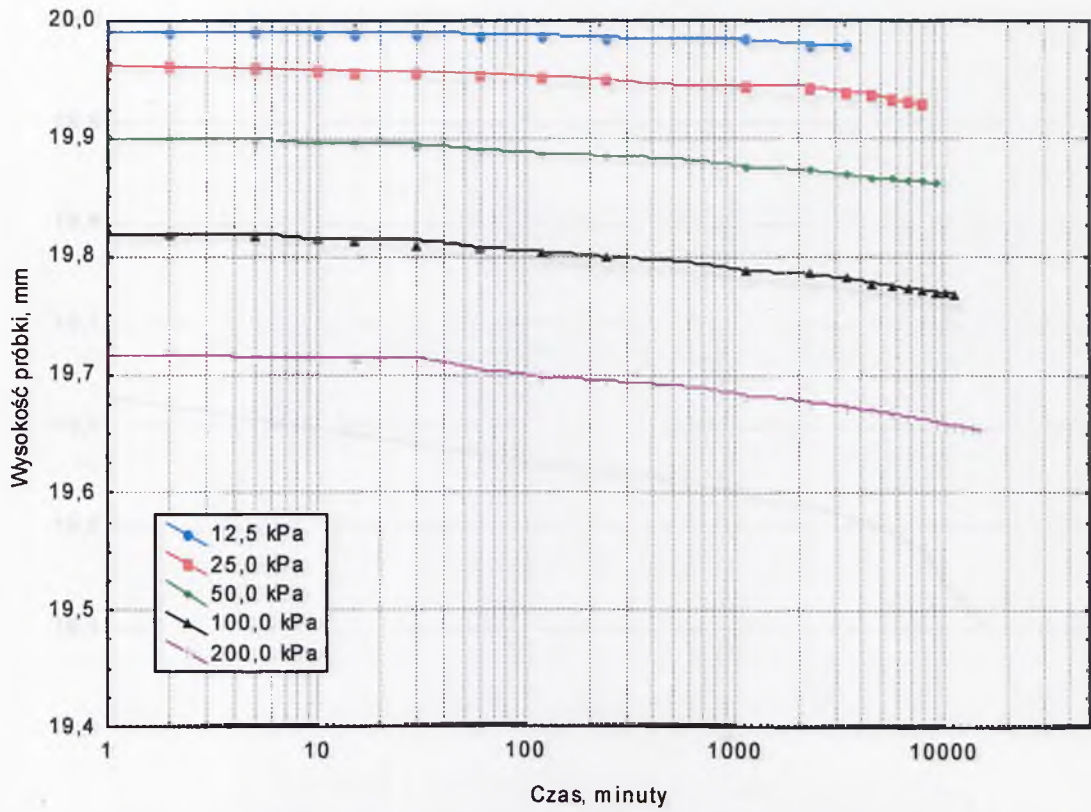
Rys. Z.II.41. Zależność maksymalnego ugięcia (przy zniszczeniu) od wilgotności – seria R-S-G



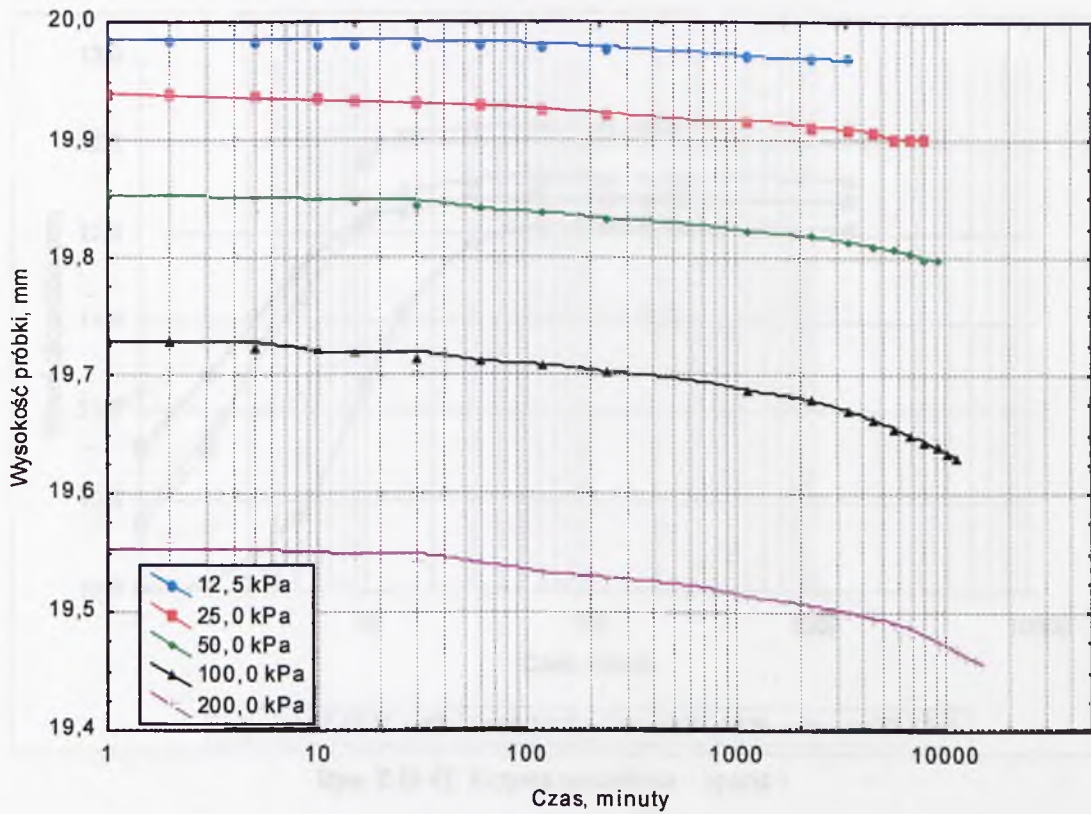
Rys. Z.II.42. Zależność wskaźnika kruchości od wytrzymałości na ściskanie



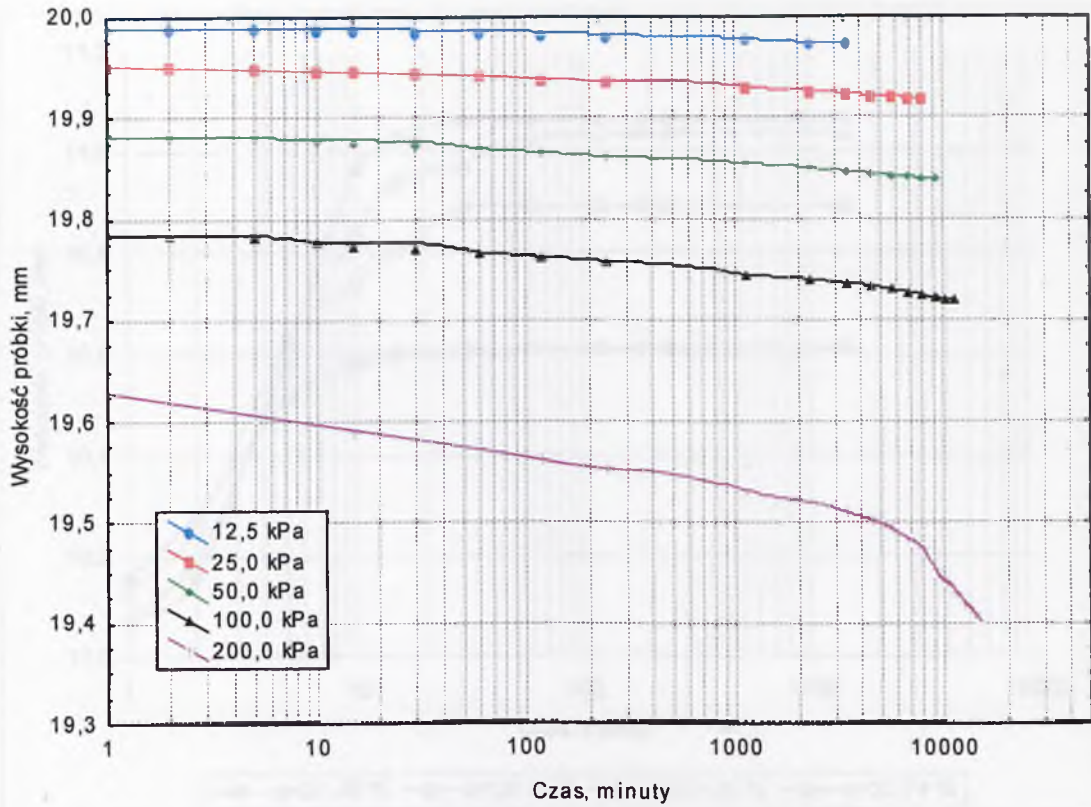
Rys. Z.II.43. Krzywe konsolidacji – próbka nr 1: $w = 27,38\%$



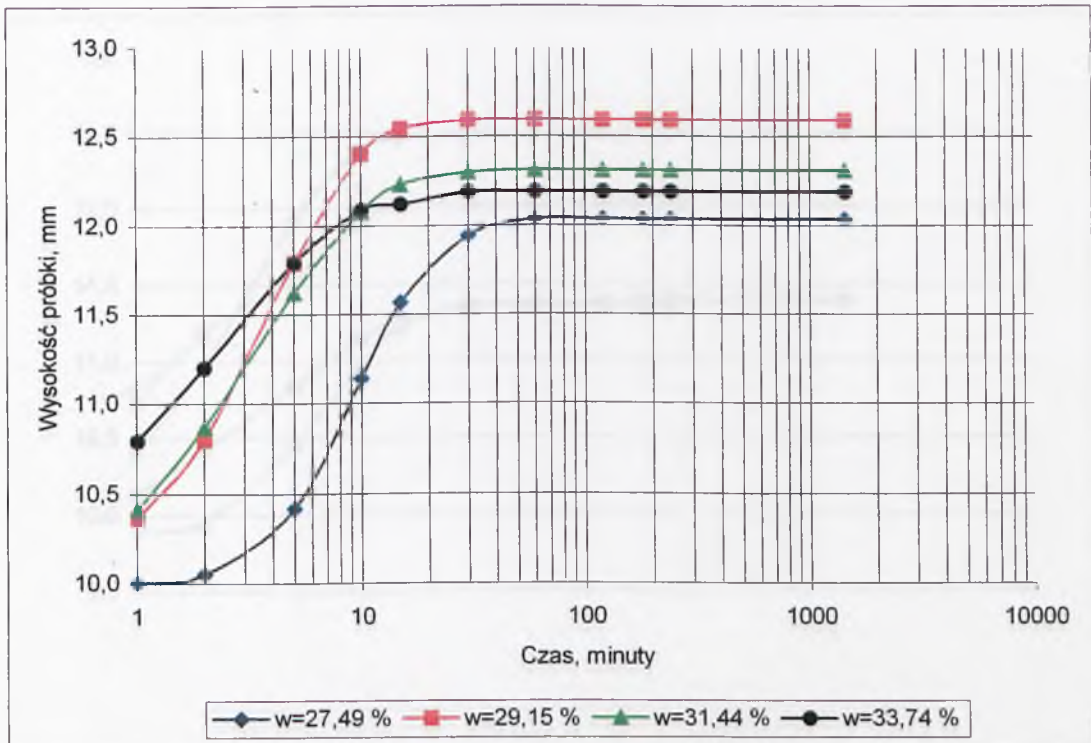
Rys. Z.II.44. Krzywe konsolidacji – próbka nr 2: $w = 30,56\%$



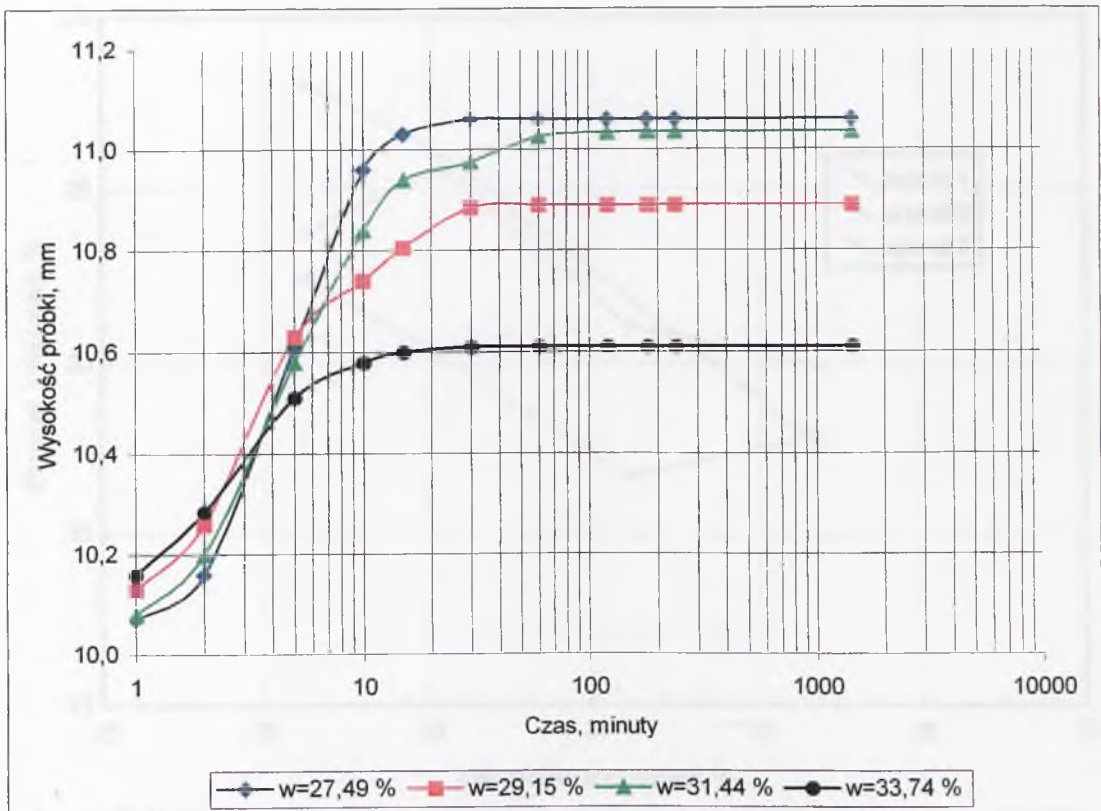
Rys. Z.II.45. Krzywe konsolidacji – próbka nr 3: $w = 32,47\%$



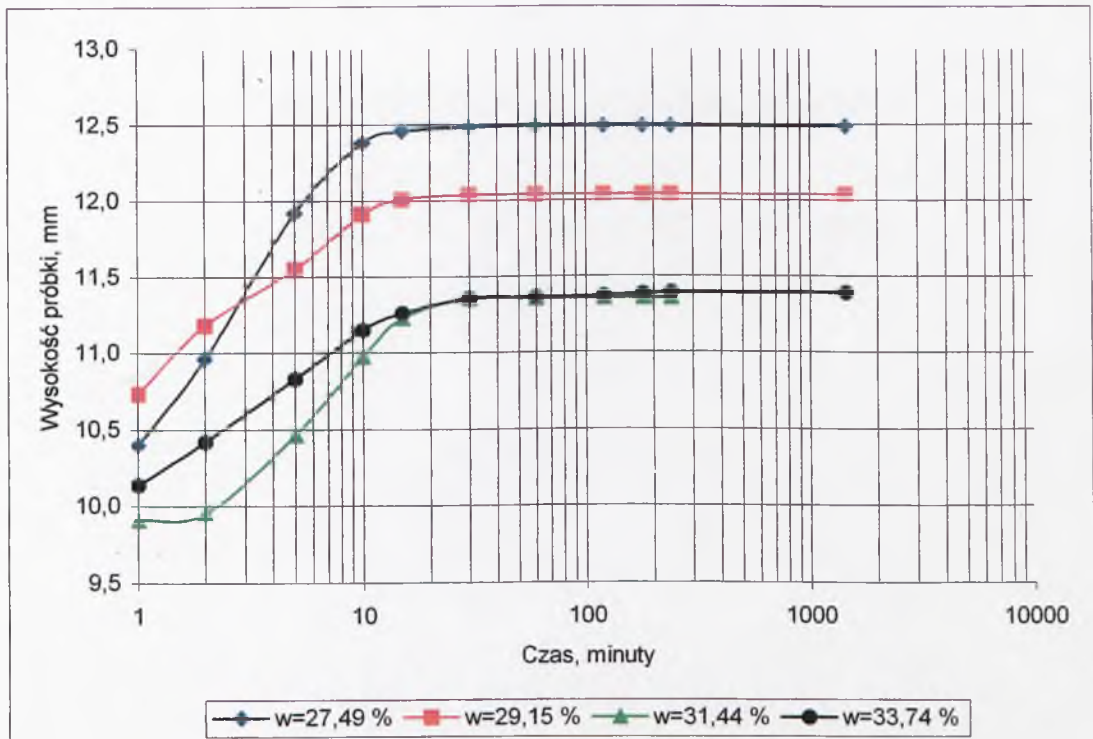
Rys. Z.II.46. Krzywe konsolidacji – próbka nr 4: $w = 34,20\%$



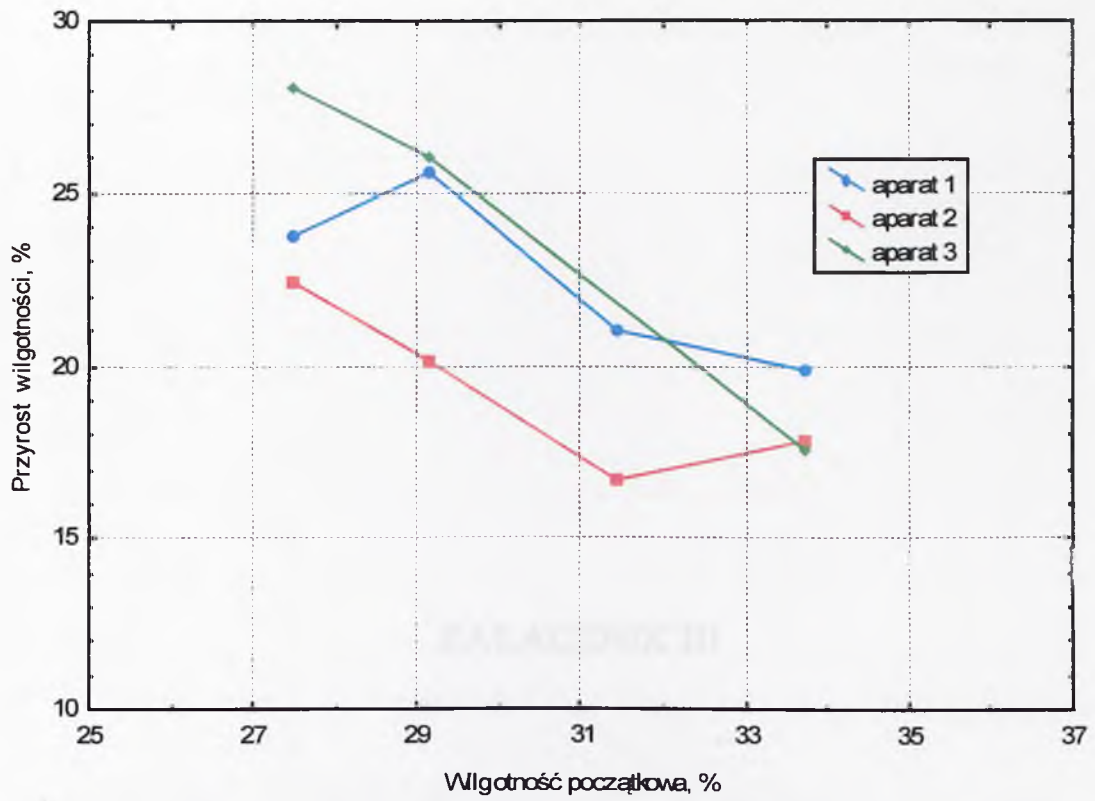
Rys. Z.II.47. Krzywe pęcznienia – aparat 1



Rys. Z.II.48. Krzywe pęcznienia – aparat 2



Rys. Z.II.49. Krzywe pęcznienia – aparat 3



Rys. Z.II.50. Przyrost wilgotności podczas pęcznienia w zależności od wilgotności początkowej

Tablica 2.16.1. Plan totalnego kosztu inwestycji - Analiza

Lp	Warianty Inwestycyjne (I)	Warianty (II)				
		1	2	3	4	5
1	100	1	1	1	1	1
2	100	1	1	1	1	1
3	100	1	1	1	1	1
4	100	1	1	1	1	1
5	100	1	1	1	1	1

ZAŁĄCZNIK III

Tablica 2.16.2. Inwestycje

Lp	Koszt inwestycji (I)	Koszt (II)				
		1	2	3	4	5
1	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
3	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
4	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
5	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000

PRZEPUSZCZALNOŚĆ HYDRAULICZNA

Tablica 2.16.4. Przepuszczalność hydrauliczna osadów z dekarbonizacji wody

OSADÓW Z DEKARBONIZACJI WODY

Lp	k_{10}	α	k_{20}
1	1	1	1,000
2	1	1	1,000
3	1	1	1,000
4	1	1	1,000
5	1,000	1	1,000
6	1,000	1	1,000
7	1	1,000	1,000
8	1	1,000	1,000
9	1	1	1,000
10	1	1	1,000
11	1	1	1,000

* 1,000 - wartość nominalna
 ** 1,000 - wartość nominalna

Tabela Z.III.1. Plan badań filtracji krótkotrwałej – ilość serii

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Wilgotność w				
		%				
1	2	3	4	5	6	7
-	-	28	30	32	34	36
1	1,05	3	-	3	-	-
2	1,03	-	4	-	3	-
3	1,00	3	-	8	-	3
4	0,97	-	3	-	3	-
5	0,95	3	-	3	-	3

Tabela Z.III.3. Program badań

x_k	$x_{k \min} \div x_{k \max}$	$\bar{x}_x (\alpha = 1,414)$				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
1	2	3	4	5	6	7
x_1	28÷36, %	28	30	32	34	36
x_2	0,95÷1,05	0,95	0,97	1,00	1,03	1,05

Tabela Z.III.4. Przepuszczalność hydrauliczna wyznaczona wg programu badań

u	x_k		\bar{z}
	x_1	x_2	$*10^{-9}$
1	3	4	5
1	-1	-1	5,383
2	-1	1	3,331*
3	1	1	6,174
4	1	-1	7,702
5	-1,414	0	9,326
6	1,414	0	1,197
7	0	1,414	3,525
8	0	-1,414	1,069
9	0	0	8,958
10	0	0	5,992
11	0	0	4,000**

* Średnia z 4 pomiarów

** średnia z 2 pomiarów

Tabela Z.III.2. Przepuszczalność hydrauliczna – badania w aparatach o $D = 10,0$ cm

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości e	Gęstość objętościowa ρ	Wilgotność założona w_z	Wilgotność w	Wilgotność końcowa w_k	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}				Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$	Siła F	Nacisk q_n
								przy $i \geq 30$ rosnącym	przy $i \geq 30$ malejącym	przy $i \leq 30$ rosnącym	przy $i \leq 30$ malejącym			
-	-	g/cm^3	-	g/cm^3	%	%	%	10^{-9} m/s				kN	kPa	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1				1,88		27,71	31,83	2,319	2,383	2,564	2,351	85,0	10823	
2				1,88	28,0	27,85	33,43	4,653	4,093	4,036	4,373	97,0	12350	
3				1,90		28,88	31,23	8,188	8,602	7,696	8,395	102,0	12987	
4	1,05	1,47	0,850	1,94		31,60	33,60	0,457	0,416	0,161	0,437	123,0	15661	
5*				1,94	32,0	31,94	34,85	5,587	5,539	5,351	5,563	71,0	9040	
6*				1,94		32,12	33,99	5,072	4,079	3,853	4,576	75,0	9549	
7				1,86		29,15	31,95	5,759	5,499	5,408	5,629	69,5	8849	
8				1,86	30,0	29,17	31,35	5,728	5,544	5,713	5,636	71,0	9040	
9				1,86		29,33	34,12	0,958	0,918	0,914	0,938	93,0	11841	
10	1,03	1,44	0,889	1,88		30,37	33,87	1,159	1,080	0,943	1,120	94,0	11968	
11*				1,92		33,17	35,34	9,756	8,391	8,655	9,074	57,5	7321	
12*				1,92	34,0	33,18	34,68	8,167	6,837	6,879	7,502	65,0	8276	
13*				1,92		33,19	35,93	1,986	1,905	1,408	1,946	82,5	10504	
14				1,79		27,71	34,06	5,020	5,032	4,635	5,026	58,0	7385	
15				1,79	28,0	27,85	32,85	8,423	8,306	8,043	8,365	64,0	8149	
16				1,81		28,88	33,78	14,578	14,599	14,265	14,589	75,5	9613	
17				1,84		31,50	35,35	10,881	9,123	11,560	10,002	58,0	7385	
18	1,00	1,40	0,943	1,84		31,51	32,78	14,596	14,568	14,361	14,582	37,0	4711	
19				1,84	32,0	31,61	35,73	2,293	2,288	1,954	2,291	68,5	8722	
20*				1,85		31,94	36,23	8,148	7,722	7,544	7,935	58,5	7448	
21				1,85		32,12	35,98	4,730	4,603	4,607	4,667	60,0	7639	

* przy zagęszczeniu przez ścisłkanie pod prasą hydrauliczną następowało wyciskanie wody z próbki

Tabela Z.III.2. Przepuszczalność hydrauliczna – badania w aparatach o $D = 10,0$ cm (c.d)

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości e	Gęstość objętościowa ρ	Wilgotność założona w_z	Wilgotność w	Wilgotność końcowa w_k	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}				Średnia hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$	Siła F	Nacisk q_n
								przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	przy $i \leq 30$	10^9 m/s			
		g/cm ³	-	g/cm ³	%	%	%	9	10	11	12	13	14	
22				1,85		32,20	34,65	5,320	5,431	5,185	5,376	39,0	4966	
23				1,85	32,0	32,20	33,51	3,418	3,503	3,660	3,461	54,0	6875	
24				1,85		32,20	34,06	4,942	4,135	4,606	4,539	49,5	6303	
25*	1,00	1,40	0,943	1,90		35,79	34,91	20,941	20,623	19,572	20,782	21,5	2737	
26*				1,91	36,0	36,38	36,07	9,573	9,112	8,531	9,343	38,0	4838	
27*				1,91		36,62	36,16	5,691	5,887	4,884	5,789	42,0	5348	
28				1,76		29,36	34,91	8,366	8,345	8,132	8,356	30,0	3820	
29				1,76	30,0	29,36	34,90	4,920	4,841	4,918	4,881	62,5	7958	
30				1,77		29,64	35,81	2,913	2,913	2,337	2,913	66,5	8467	
31*	0,97	1,36	1,000	1,81		33,17	36,76	11,335	11,297	10,950	11,316	45,0	5730	
32				1,81	34,0	33,18	37,25	8,687	8,406	8,914	8,547	42,0	5348	
33				1,81		33,25	36,99	3,214	3,271	2,545	3,243	57,0	7257	
34				1,70		27,71	36,31	17,627	15,766	15,679	16,697	34,0	4329	
35				1,70	28,0	27,85	37,46	18,539	18,190	18,524	18,365	36,0	4584	
36				1,71		28,88	36,96	25,248	24,906	25,790	25,077	45,5	5793	
37				1,75		31,61	38,48	5,422	4,808	4,961	5,115	51,0	6494	
28	0,95	1,3	1,045	1,76	32,0	31,94	38,06	17,674	16,827	17,934	17,251	36,0	4584	
29				1,76		32,12	37,01	9,812	9,587	9,546	9,700	33,5	4265	
40				1,81		36,38	38,83	13,495	13,246	12,317	13,371	31,5	4011	
41*				1,82	36,0	36,62	38,20	21,094	19,592	16,812	20,343	11,0	1401	
42				1,81		35,65	35,82	2,526	2,268	1,811	2,397	9,5	1210	

* przy zagęszczeniu przez ścisnienie pod prasą hydrauliczną następowało wyciskanie wody z próbki

Tabela Z.III.5. Przepuszczalność hydrauliczna – badania w cylindrze aparatu Proctora – próbki zagęszczane mechanicznie (seria F-U-P)

L.p.	Wilgotność w	Gęstość objętościowa		Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości; e	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}			Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$	Wilgotność końcowa w_k
		ρ	g/cm^3				przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	przy $i \leq 30$		
-	%	g/cm^3	g/cm^3		-	-	m/s			%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	18,91	1,686	1,42	0,918	0,96	1,721E-08	1,680E-08	1,704E-08	1,700E-08	31,13	
2	21,78	1,738	1,43	0,906	0,97	2,845E-09	2,050E-09	2,570E-09	2,448E-09	30,04	
3	23,74	1,762	1,42	0,910	0,97	2,640E-09	2,052E-09	2,453E-09	2,346E-09	29,28	
4	26,07	1,804	1,43	0,901	0,97	2,068E-09	1,562E-09	2,470E-09	1,815E-09	28,80	
5	26,71	1,820	1,44	0,894	0,98	4,240E-09	3,745E-09	3,982E-09	3,993E-09	29,89	
6	27,08	1,866	1,47	0,852	1,00	2,151E-09	1,359E-09	1,737E-09	1,755E-09	28,87	
7	28,51	1,818	1,41	0,923	0,96	2,677E-09	1,480E-09	2,677E-09	2,079E-09	30,17	
8	30,68	1,760	1,35	1,020	0,92	3,161E-09	1,875E-09	2,795E-09	2,518E-09	32,69	
9	32,79	1,758	1,32	1,055	0,90	2,061E-09	1,157E-09	2,583E-09	1,609E-09	33,56	
10	34,06	1,780	1,33	1,049	0,90	8,647E-09	7,176E-09	8,091E-09	7,912E-09	35,20	

Tabela Z.III.6. Przepuszczalność hydrauliczna – badania w cylindrze aparatu Proctora – próbki zagęszczane statycznie (seria F-S-P)

L.p.	Wilgotność w	Gęstość objętościowa ρ	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości, zagęszczenia, e	Wskaźnik I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}			Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$	Wilgotność końcowa w_k	Siła F	Nacisk q_n
						przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	przy $i \leq 30$				
-	%	g/cm ³	g/cm ³	-	-	m/s			%	kN	kPa	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	18,91	1,686	1,42	0,918	0,96	1,541E-08	1,505E-08	1,578E-08	1,523E-08	30,64	100,0	10000
2	21,78	1,738	1,43	0,906	0,97	2,554E-09	1,478E-09	1,806E-09	2,016E-09	30,88	99,7	9970
3	23,74	1,762	1,42	0,910	0,97	2,019E-09	1,129E-09	1,381E-09	1,574E-09	29,63	127,0	12700
4	26,07	1,804	1,43	0,901	0,97	1,626E-09	1,147E-09	1,440E-09	1,387E-09	29,10	122,0	12200
5	26,71	1,820	1,44	0,894	0,98	3,476E-09	2,995E-09	3,021E-09	3,236E-09	30,96	97,0	9700
6	27,08	1,866	1,47	0,852	1,00	2,376E-09	1,904E-09	2,220E-09	2,140E-09	29,17	108,0	10800
7	28,51	1,818	1,41	0,923	0,96	4,065E-09	3,991E-09	3,938E-09	4,028E-09	31,40	61,0	6100
8	30,68	1,760	1,35	1,020	0,92	2,692E-09	2,145E-09	2,170E-09	2,419E-09	34,68	64,5	6450
9	32,79	1,758	1,32	1,055	0,90	1,938E-09	1,367E-09	2,052E-09	1,653E-09	35,35	38,5	3850
10	34,06	1,780	1,33	1,049	0,90	2,020E-08	1,969E-08	2,059E-08	1,994E-08	35,93	60,0	6000

Tabela Z.III.7. Charakterystyka próbek – filtracja długotrwała

L.p.	Rodzaj próbki	Wskaźnik zagęszczenia I_s	Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	Wskaźnik porowatości e	Gęstość objętościowa ρ	Wilgotność założona w_z	Wilgotność w	Wilgotność końcowa w_k	Siła F	Nacisk q_n
			g/cm ³	-	g/cm ³	%	%	%	kN	kPa
1	WD	1,00	1,40	0,943	1,84	32,0	31,50	37,96	60,5	7703
2	WW				1,84		31,50	35,54	68,0	8658
3	NaOH				1,84		31,50	36,21	72,0	9167
4	HCl				1,85		31,95	35,79	36,5	4647
5	O1				1,85		32,40	34,58	28,5	3629
6	O2				1,84		31,25	35,38	32,5	4138

WD – woda destylowana,

WW – woda wodociągowa,

NaOH – 0,2% roztwór NaOH,

HCl – 0,43% roztwór HCl,

O1 – odcieki ze składowiska odpadów komunalnych w Otwocku, początek badania po 3 dniach od uformowania próbki,

O2 – odcieki ze składowiska odpadów komunalnych w Otwocku, początek badania po 18 dniach od uformowania próbki

Tabela Z.III.8. Przepuszczalność hydrauliczna – woda destylowana (WD)

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}						Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$
		przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	10 ⁻⁹ m/s				
		3	4	5	6	7	8	
-	-							
1	2							
1	1	14,993	15,136	14,634				15,065
2	2	16,270	17,128	-				16,699
3	4	22,732	23,791	-				23,262
4	6	23,903	24,405	-				24,154
5	8	20,630	21,549	25,789				21,090
6	12	19,594	20,492	-				20,043
7	14	19,960	19,037	22,540				19,499
8	18	17,875	13,750	-				15,813
9	21	16,608	16,900	17,351				16,754
10	25	14,062	14,221	-				14,142
11	29	14,445	14,475	13,479				14,460
12	36	12,285	13,219	11,148				12,752
13	43	10,354	10,784	9,414				10,569
14	50	8,843	7,630	-				8,237
15	57	4,661	4,590	5,217				4,626
16	64	3,505	3,806	-				3,656
17	71	3,388	3,466	-				3,427
18	78	3,146	3,280	-				3,213
19	85	3,951	4,360	-				4,156
20	92	3,299	3,499	-				3,399
21	98	2,925	2,896	-				2,911

Tabela Z.III.9. Przepuszczalność hydrauliczna – woda wodociągowa (WW)

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}						Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $t \geq 30$
		przy $t \geq 30$, rosnącym	przy $t \geq 30$, malejącym	przy $t \leq 30$				
10^{-9} m/s								
		3	4	5	6	7	8	6
-	-							
1	2							
1	1	10,881	9,123	11,560				10,002
2	2	12,696	12,738	-				12,717
3	4	17,382	15,308	-				16,345
4	6	20,990	21,245	-				21,118
5	8	19,272	18,523	19,470				18,898
6	12	20,353	14,440	-				17,397
7	14	13,556	13,430	13,480				13,493
8	18	10,983	11,035	-				11,009
9	21	9,774	9,841	9,080				9,808
10	25	8,763	9,364	-				9,064
11	29	8,599	9,146	7,905				8,873
12	36	7,638	7,605	6,665				7,622
13	43	6,671	6,698	5,200				6,685
14	50	6,320	5,714	-				6,017
15	57	5,034	4,914	4,020				4,974
16	64	4,228	3,679	-				3,954
17	71	3,888	3,136	-				3,512
18	78	3,329	3,906	-				3,618
19	85	3,513	3,566	-				3,540
20	92	3,487	3,748	-				3,618
21	98	3,651	3,327	-				3,489

Tabela Z.III.10. Przepuszczalność hydrauliczna – roztwór NaOH o pH > 11 (NaOH)

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}						Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$
		przy $i \geq 30$, rosnącym		przy $i \geq 30$, malejącym		przy $i \leq 30$		
		10^{-9} m/s						
		3	4	5	6			
-	-							
1	2							
1	1	12,991	11,016	12,079			12,004	
2	2	6,508	6,157	-			6,333	
3	4	14,706	15,173	-			14,940	
4	6	18,117	18,125	-			18,121	
5	8	19,027	18,413	18,521			18,720	
6	12	17,348	17,836	-			17,592	
7	14	17,255	16,286	17,071			16,771	
8	18	16,349	16,814	-			16,582	
9	21	16,491	16,499	16,144			16,495	
10	25	17,017	16,868	-			16,943	
11	29	17,970	17,164	18,335			17,567	
12	36	17,413	17,940	18,601			17,677	
13	43	17,912	18,162	18,244			18,037	
14	50	19,954	18,246	-			19,100	
15	57	18,150	18,391	18,438			18,271	
16	64	15,729	18,905	-			17,317	
17	71	18,903	19,034	-			18,969	
18	78	16,294	23,866	-			20,080	
19	85	19,403	18,122	-			18,763	
20	92	18,478	18,712	-			18,595	
21	98	18,686	18,314	-			18,500	
22	106	18,369	18,524	-			18,447	
23	112	19,484	18,389	-			18,937	
24	120	17,823	17,880	-			17,852	

Tabela Z.III.11. Przepuszczalność hydrauliczna – roztwór HCl o pH < 3 (HCl)

L.p.	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}						Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$
		przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	10^{-9} m/s				
		3	4	5	6			
-	-							
1	2							
1	1	12,208	12,059	11,974			12,134	
2	2	11,627	12,472	-			12,050	
3	5	17,785	18,342	-			18,064	
4	7	20,865	21,109	-			20,987	
5	9	25,407	23,889	26,399			24,648	
6	13	22,628	23,093	-			22,861	
7	16	22,294	24,202	26,575			23,248	
8	20	27,364	24,708	-			26,036	
9	23	28,902	27,120	25,655			28,011	
10	26	27,412	27,414	-			27,413	
11	30	26,369	26,389	24,808			26,379	
12	37	26,384	26,310	26,148			26,347	
13	44	25,723	25,484	25,056			25,604	
14	49	25,303	25,473	-			25,388	
15	58	24,518	19,928	23,362			22,223	
16	65	22,970	23,434	-			23,202	
17	72	27,210	25,057	-			26,134	
18	78	20,521	20,591	-			20,556	
19	85	19,263	18,842	19,882			19,053	
20	93	20,758	19,659	-			20,209	
21	103	17,971	17,445	-			17,708	
22	114	15,697	15,462	-			15,580	

Tabela Z.III.12. Przepuszczalność hydrauliczna – odcieki ze składowiska odpadów komunalnych (O1)

L.p. zagęszczenia,	Wskaźnik I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}				Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$
		przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	przy $i \leq 30$		
-	-	10 ⁻⁹ m/s				
1	2	3	4	5	6	
1	1	5,367	5,843	5,115	5,605	
2	4	1,639	1,685	-	1,662	
3	8	0,933	1,074	-	1,004	
4	15	0,437	0,401	-	0,419	
5	29	0,115	0,179	-	0,147	
6	44	0,139	0,192	-	0,166	
7	67	0,077	0,088	-	0,083	
8	108	0,062	0,032	-	0,047	

Tabela Z.III.13. Przepuszczalność hydrauliczna – odcieki ze składowiska odpadów komunalnych (O2)

L.p. zagęszczenia,	Wskaźnik I_s	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}				Średnia przepuszczalność hydrauliczna k_{10} przy $i \geq 30$
		przy $i \geq 30$, rosnącym	przy $i \geq 30$, malejącym	przy $i \leq 30$		
-	-	10 ⁻⁹ m/s				
1	2	3	4	5	6	
1	1	8,213	8,063	4,855	8,138	
2	4	4,406	3,622	-	4,014	
3	8	0,646	0,574	-	0,610	
4	15	0,335	0,297	-	0,316	
5	29	0,162	0,152	-	0,157	
6	44	0,164	0,135	-	0,150	
7	67	0,070	0,082	-	0,076	
8	108	0,083	0,052	-	0,068	

Tabela Z.III.14. Analiza chemiczna cieczy filtracyjnych: WD, WW, NaOH i HCl

L.p.	Ciecz probiercza	Czas działania na próbkę dni filtracji	Parametr							
			pH	Przewodnictwo elektryczne $\mu\text{S/cm}$	Ca^{2+} $\text{mgCa}^{2+}/\text{dm}^3$	Mg^{2+} $\text{mgMg}^{2+}/\text{dm}^3$	Na^+ $\text{mgNa}^+/\text{dm}^3$	Fe^{3+} $\text{mgFe}^{3+}/\text{dm}^3$	Cl^- $\text{mgCl}^-/\text{dm}^3$	
1			-							
1	Woda destylowana	1-26	8,38	108	0	0	0	9,9	0	23,3
2		26-91	7,80	48,3	0	0	0	10,6	0	21,3
3	Woda wodociągowa	1-35	7,49	1137	63,2	20,1	130	130	0,048	241,4
4		35-91	7,70	1513	59,0	17,4	125	125	0,057	259,0
5		1-26	11,7	11600	0	0	1240	1240	0	20,3
6	0,2% NaOH	26-72	-	-	-	-	-	-	-	-
7		72-91	11,8	10011	0	0	1265	1265	0	20,5
8		1-17	2,46	2714	1,0	0,2	6,5	6,5	-	355
9	0,43% HCl	17-31	2,63	2772	1,0	0,1	6,1	6,1	-	355
10		31-66	-	-	-	-	-	-	-	-
11		66-87	2,38	2733	0,7	0,2	6,4	6,4	-	234

Tabela Z.III.15. Analiza chemiczna filtratów uzyskanych w wyniku filtracji cieczy: WD, WW, NaOH i HCl

L.p.	Ciecz probiercza	Okres gromadzenia filtratu	Parametr						
			pH	Przewodnictwo elektryczne $\mu\text{S/cm}$	Ca^{2+} $\text{mgCa}^{2+}/\text{dm}^3$	Mg^{2+} $\text{mgMg}^{2+}/\text{dm}^3$	Na^+ $\text{mgNa}^+/\text{dm}^3$	Fe^{3+} $\text{mgFe}^{3+}/\text{dm}^3$	Cl^- $\text{mgCl}^-/\text{dm}^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		1-2 (pierwsze 500 ml)	8,81	1872	5,4	210	147	0,025	170,4
2	Woda destylowana	7	7,93	282	1,9	30	11,2	0,07	21,3
3		14	7,7	176	1,7	14	10,2	0,148	21,3
4		28	8,04	204	1,8	9,9	11	0,032	21,3
5		77-91	7,45	226	3,3	14,6	21,9	0,046	36,5
6		1-3 (pierwsze 500 ml)	7,8	2189	5,8	230	184	0,025	301,2
7	Woda wodociągowa	7	7,94	1084	2,1	55	143	0,068	241,4
8		14	7,55	1074	2,5	51	139	0,054	241,4
9		28	7,77	1180	2,6	55	153	0,033	273,3
10		84-91	8,11	1799	4,4	96	257	0,062	354,4
11		1-4 (pierwsze 500 ml)	8,42	1981	5	215	180	0,034	167
12	0,2% NaOH	7	8,84	623	1	30	110	0,085	24,8
13		14	9,01	520	0,4	10	136	0,105	21,3
14		28	10,45	2953	0	3,3	875	0,097	21,3
15		57	11,9	5300	0,4	0	1310	0,066	24,8
16		91	11,8	5115	0	0	1324	0,059	14,2
17	0,43% HCl	1-3 (pierwsze 500 ml)	8,32	3089	15,3	250	190	0,060	426
18		7	8,17	984	19,2	105	6,7	0,060	291
19		14	7,93	954	54,0	95	6,5	0,065	284
20		28	7,60	1111	165	135	5,4	0,059	294
21		56	7,67	1115	210	15	25	0,044	291
22		84	7,64	1112	225	15	30	0,082	277

Tabela Z.III.16. Analiza chemiczna odcieków oraz filtratów uzyskanych w wyniku ich filtracji

L.p.	Oznaczenie	Jednostka	Odcieki	Filtrat (1 tydzień)	Filtrat (2 tyg. - 3,5 miesiąca)
1	2	3	4	5	6
1	pH	-	8,35	8,98	9,25
2	Przewodnictwo	μS/cm	12615	7831	21320
3	ChZT	mgO ₂ /dm ³	3744	1516	5950
4	Ca ²⁺	mgCa ²⁺ /dm ³	42,9	80	135
5	Mg ²⁺	mgMg ²⁺ /dm ³	20	400	240
6	Na ⁺	mgNa ⁺ /dm ³	240	1050	2060
7	K ⁺	mgK ⁺ /dm ³	145	505	1340
8	Fe ³⁺	mgFe ²⁺ /dm ³	8,24	3,82	2,29
9	Mn ²⁺	mgMn ²⁺ /dm ³	5,4	0,53	1,3
10	Cl ⁻	mgCl ⁻ /dm ³	2201	1874	5254
11	SO ₄ ²⁻	mgSO ₄ ²⁻ /dm ³	-	750	15
12	PO ₄ ³⁻	mgPO ₄ ³⁻ /dm ³	150	24,2	19,5
13	NH ₄ ⁺	mgNH ₄ ⁺ /dm ³	1226	94,5	150,4
14	NO ₃ ⁻	mgNO ₃ ⁻ /dm ³	-	134,5	137,3
15	Nog	mgN/dm ³	1305	203,7	350
16	N org	mgN/dm ³	121	109,2	323,5
17	Pb ²⁺	mgPb ²⁺ /dm ³	0,504	nw	0,414
18	Zn ²⁺	mgZn ²⁺ /dm ³	0,424	1,302	2,716
19	Cu ²⁺	mgCu ²⁺ /dm ³	624	0,471	4,448
20	Cr ²⁺ , Cr ⁷⁺	mgCr ^{(7+)(2+)/dm³}	0,392	0,062	nw
21	Ni ²⁺	mgNi ²⁺ /dm ³	0,932	0,246	0,615
22	Cd ²⁺	mgCd ²⁺ /dm ³	0,088	nw	0,034

nw – nie wykryto

– pomiar nie był możliwy

Tabela Z.III.17. Zawartość frakcji po filtracji długotrwałej – analiza areometryczna wykonana zgodnie z normą [152]

Fracja	Zawartość frakcji							
	Próbka nr 4*	Próbka nr 5*	Próbka nr 6*	WD	WW	NaOH	HCl	O1
mm	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
> 1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0-0,5	2,0	2,0	3,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0
0,5-0,25	2,0	2,0	3,0	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0
0,25-0,1	2,0	2,0	4,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
0,1-0,05	14,0	12,0	15,0	16,0	22,0	26,0	24,0	19,0
0,05-0,02	13,0	39,0	16,0	32,0	29,0	26,0	24,0	28,0
0,02-0,006	43,0	15,0	41,0	30,0	22,0	27,0	29,0	28,0
0,006-0,002	8,0	14,0	6,0	8,0	10,0	9,0	8,0	9,0
<0,002	16,0	14,0	12,0	10,0	13,0	8,0	8,0	9,0
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100

* oznaczenia zgodne z p. 6.2.3.

Tabela Z.III.18. Zawartość frakcji po filtracji długotrwałej – analiza areometryczna wykonana w aparacie laserowym z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek

Frakcja	Zawartość frakcji							
	Próbka nr 7*	Próbka nr 8*	Próbka nr 9*	WD	WW	NaOH	HCl	O1
mm	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
>0,125	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,125-0,063	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1
0,063-0,031	9,6	6,4	11,1	3,4	3,9	5,5	4,0	4,0
0,031-0,016	32,0	32,4	32,3	24,1	23,2	25,8	23,4	23,1
0,016-0,008	31,1	34,0	29,2	33,3	32,7	32,1	32,6	32,5
0,008-0,004	14,2	14,8	13,2	19,3	19,5	18,1	19,4	19,5
0,004-0,002	5,4	5,1	5,7	8,8	9,1	8,0	9,1	9,2
0,002-0,001	3,0	2,8	3,5	5,2	5,2	4,7	5,5	5,6
<0,001	4,7	4,5	4,8	5,9	6,1	5,8	6,0	6,0
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100

* oznaczenia zgodne z p. 6.2.3.

Tabela Z.III.19. Zawartość frakcji po filtracji długotrwałej – analiza areometryczna wykonana w aparacie laserowym bez wykorzystania ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek

Frakcja	Zawartość frakcji							
	Próbka nr 7*	Próbka nr 8*	Próbka nr 9*	WD	WW	NaOH	HCl	O1
mm	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
> 1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0
1,0-0,5	0,1	0,1	0,1	5,6	8,00	6,2	9,7	4,7
0,5-0,25	7,4	7,0	11,0	13,2	13,8	16,3	17,6	15,0
0,25-0,125	13,4	12,3	17,4	9,8	9,2	10,0	9,0	10,7
0,125-0,063	11,1	8,2	9,6	6,8	6,3	6,1	5,9	6,7
0,063-0,031	12,5	9,2	8,6	5,1	5,0	4,9	4,6	5,1
0,031-0,016	18,9	19,8	16,3	13,4	12,7	12,1	11,2	12,7
0,016-0,008	19,4	22,5	18,3	20,4	19,3	18,6	17,2	19,5
0,008-0,004	9,6	11,6	9,9	13,1	12,5	12,6	11,8	12,7
0,004-0,002	3,0	3,8	3,9	5,9	5,8	6,0	6,0	6,0
0,002-0,001	1,7	2,0	2,1	3,1	3,1	3,3	3,4	3,4
<0,001	3,0	3,5	2,8	3,6	3,5	3,9	3,6	3,5
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100

* oznaczenia zgodne z p. 6.2.3.

Tabela Z.III.20. Oznaczenie gęstości właściwej osadów po zakończeniu badania filtracji długotrwałej

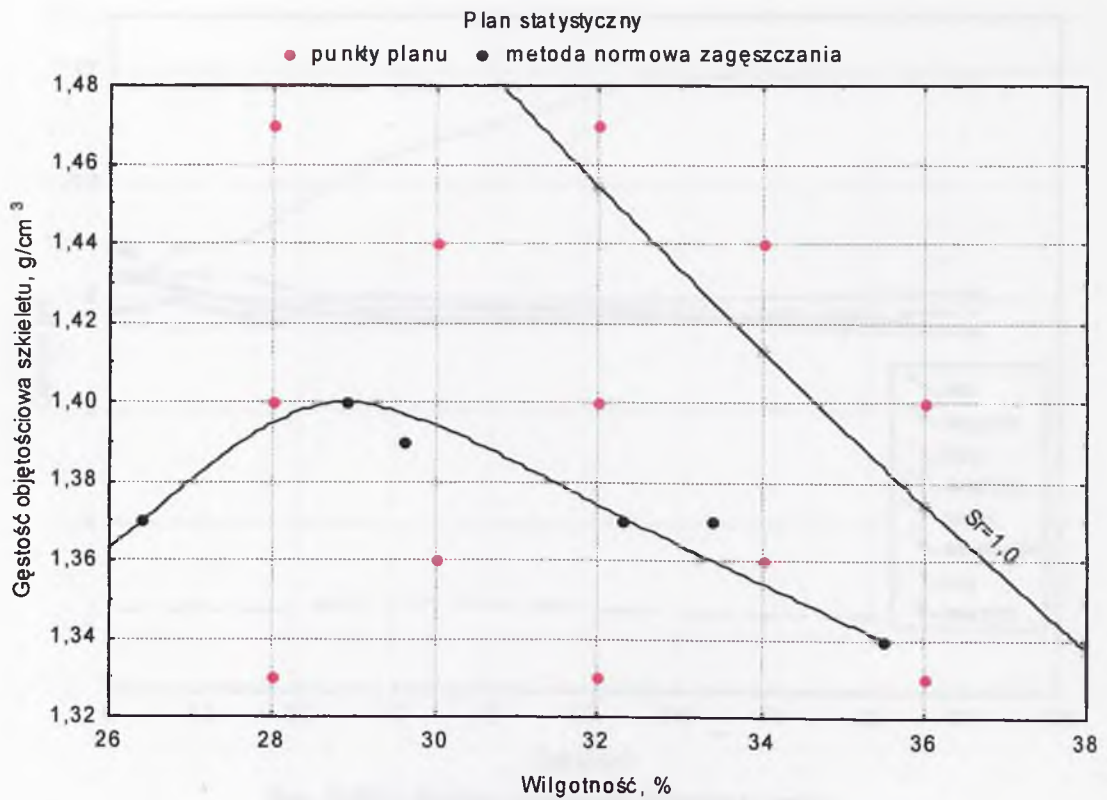
Nr pomiaru	Próbka	Gęstość właściwa ρ_s	Wartość średnia
-	-	g/cm^3	g/cm^3
1	2	3	4
1	6*	2,674	2,67
2	7*	2,676	
3	8*	2,656	
4	WD	2,67	2,67
5	WW	2,66	
6	NaOH	2,67	
7	HCl	2,69	
8	O1	2,68	

* oznaczenia jak w p. 6.2.5.

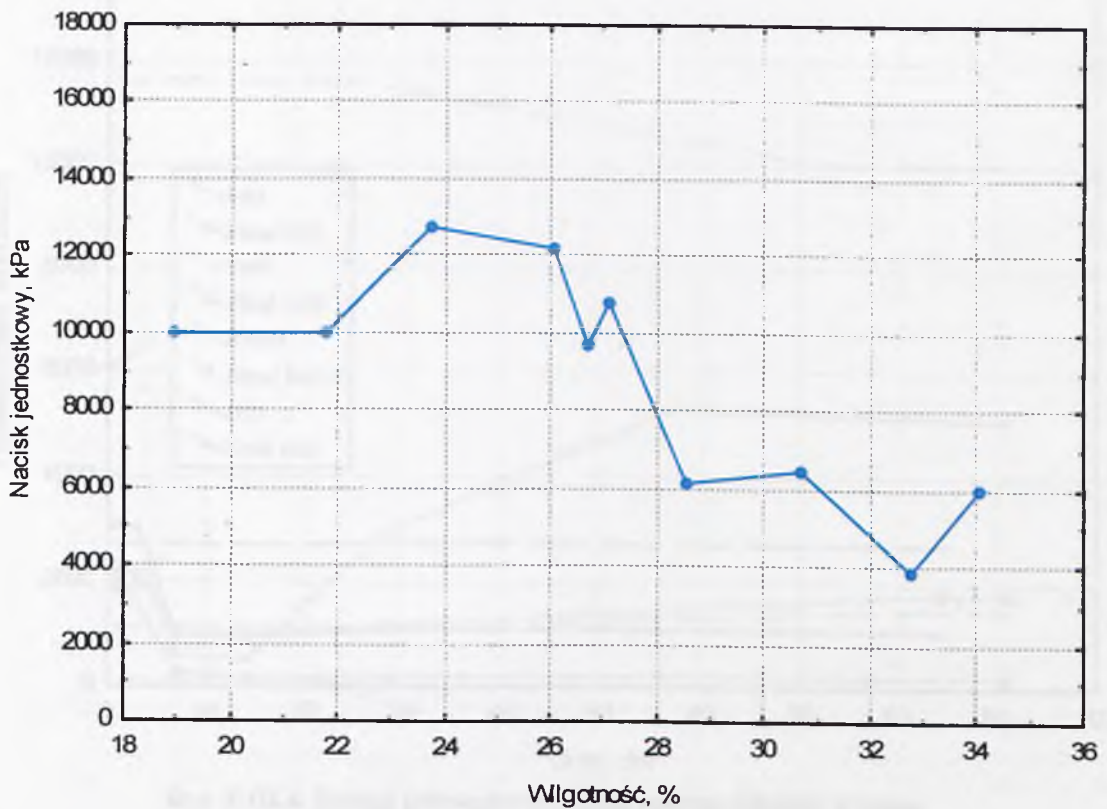
Tabela Z.III.21. Oznaczenie powierzchni właściwej po zakończeniu filtracji długotrwałej

Nr pomiaru	Próbka	Sposób pomiaru	Powierzchnia właściwa S_t	Wartość średnia
-	-	-	m^2/g	m^2/g
1	2	3	4	5
1	7*	Analiza areometryczna w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząstek	1,15	1,140
2	8*		1,12	
3	9*		1,15	
4	WD		1,45	1,454
5	WW		1,48	
6	NaOH		1,39	
7	HCl		1,47	
8	O1		1,48	
9	10*	Analiza areometryczna w aparacie laserowym „Mastersizer 2000” bez użycia ultradźwięków	0,721	0,722
10	11*		0,721	
11	12*		0,723	
12	WD		0,915	0,909
13	WW		0,896	
14	NaOH		0,943	
15	HCl		0,888	
16	WD	0,910		

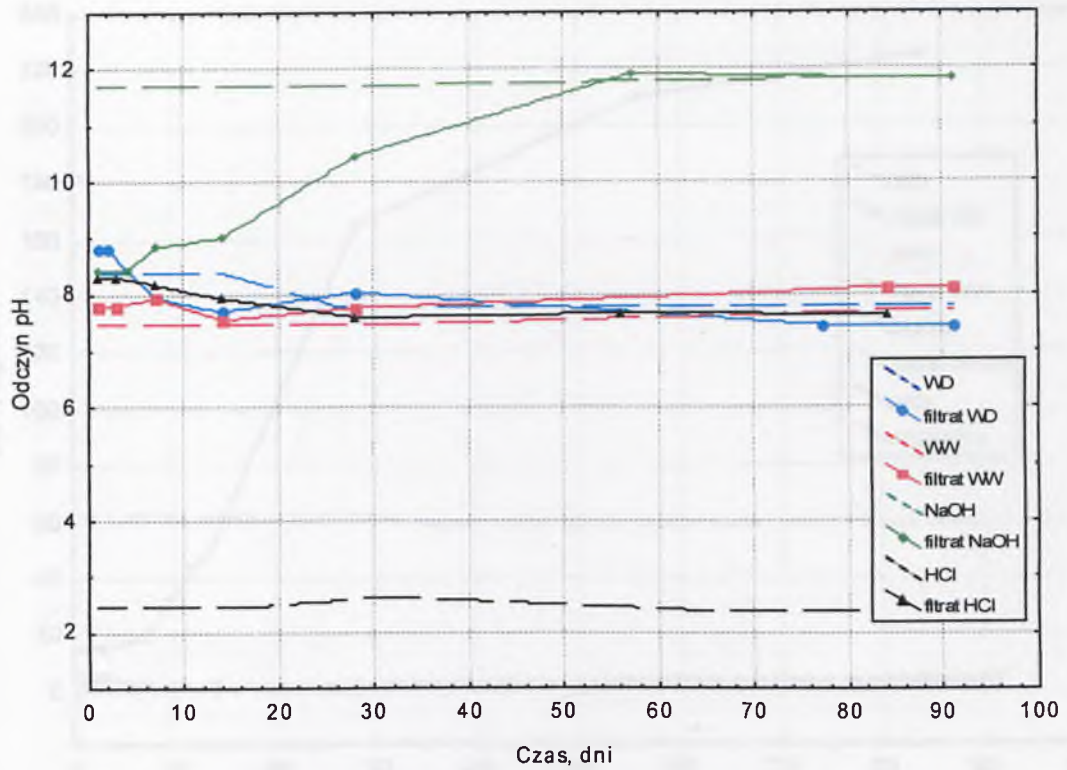
* oznaczenia jak w p. 6.2.4.



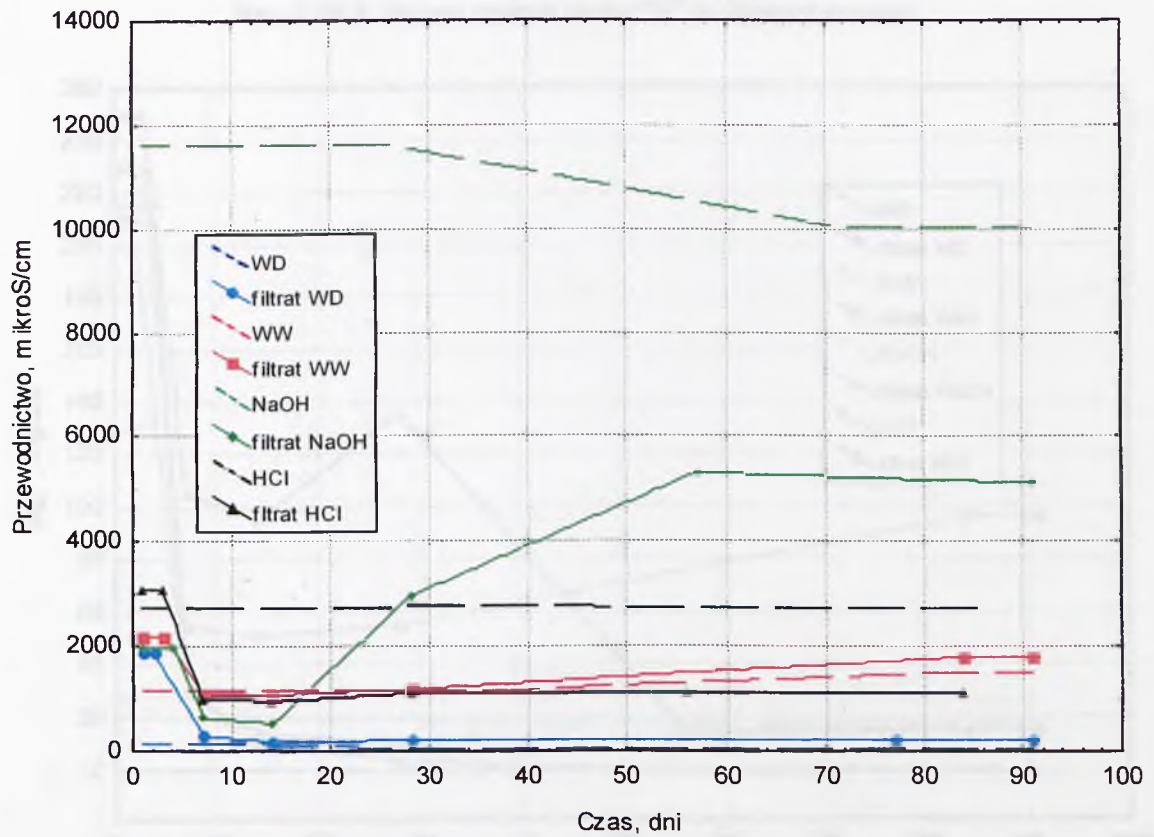
Rys. Z.III.1. Układ punktów pomiarowych



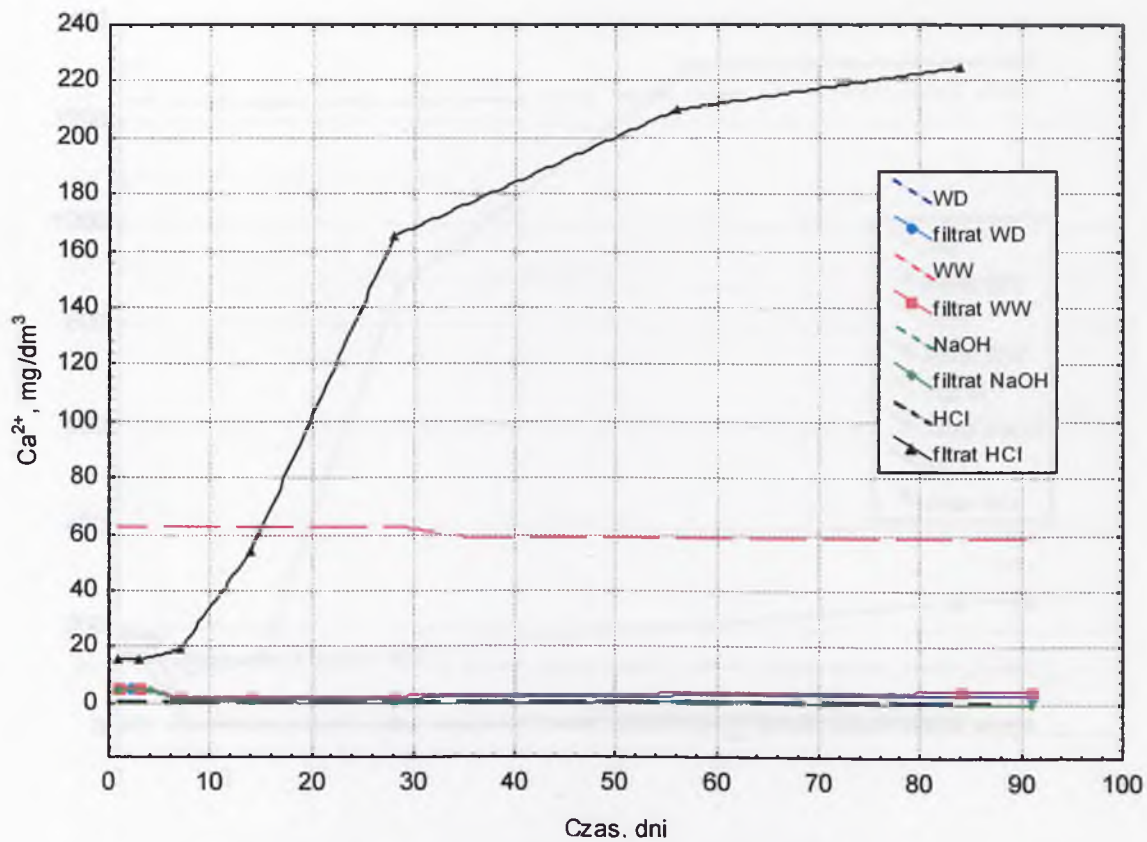
Rys. Z.III.2. Zależność nacisku od wilgotności początkowej – seria F-S-P



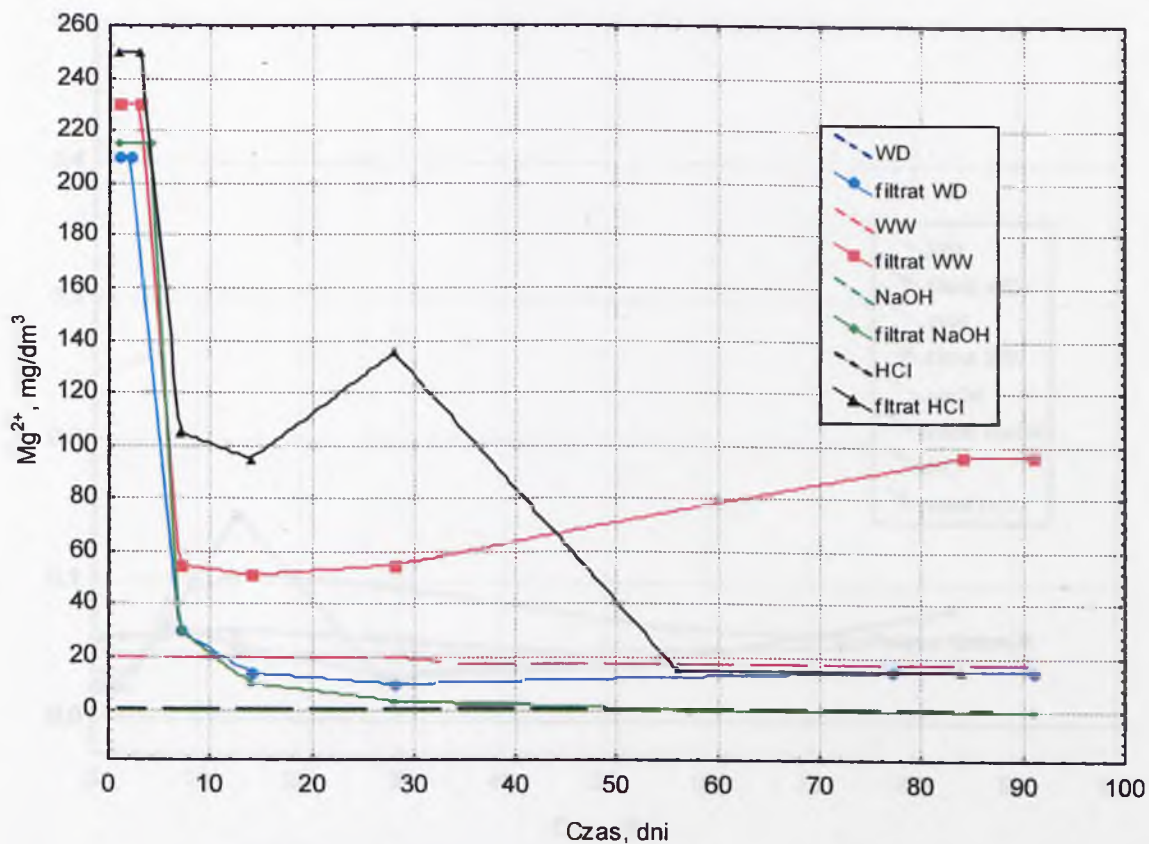
Rys. Z.III.3. Zmiana odczynu pH filtratów w czasie



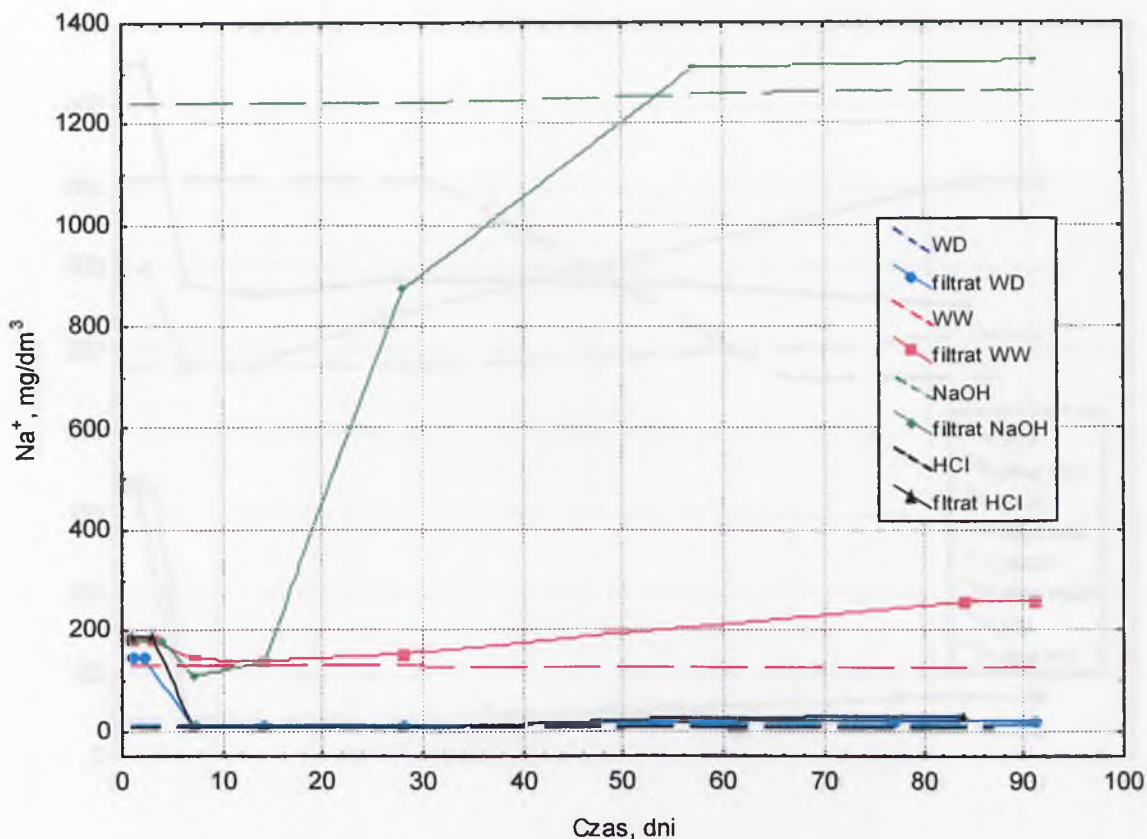
Rys. Z.III.4. Zmiana przewodnictwa elektrycznego filtratów w czasie



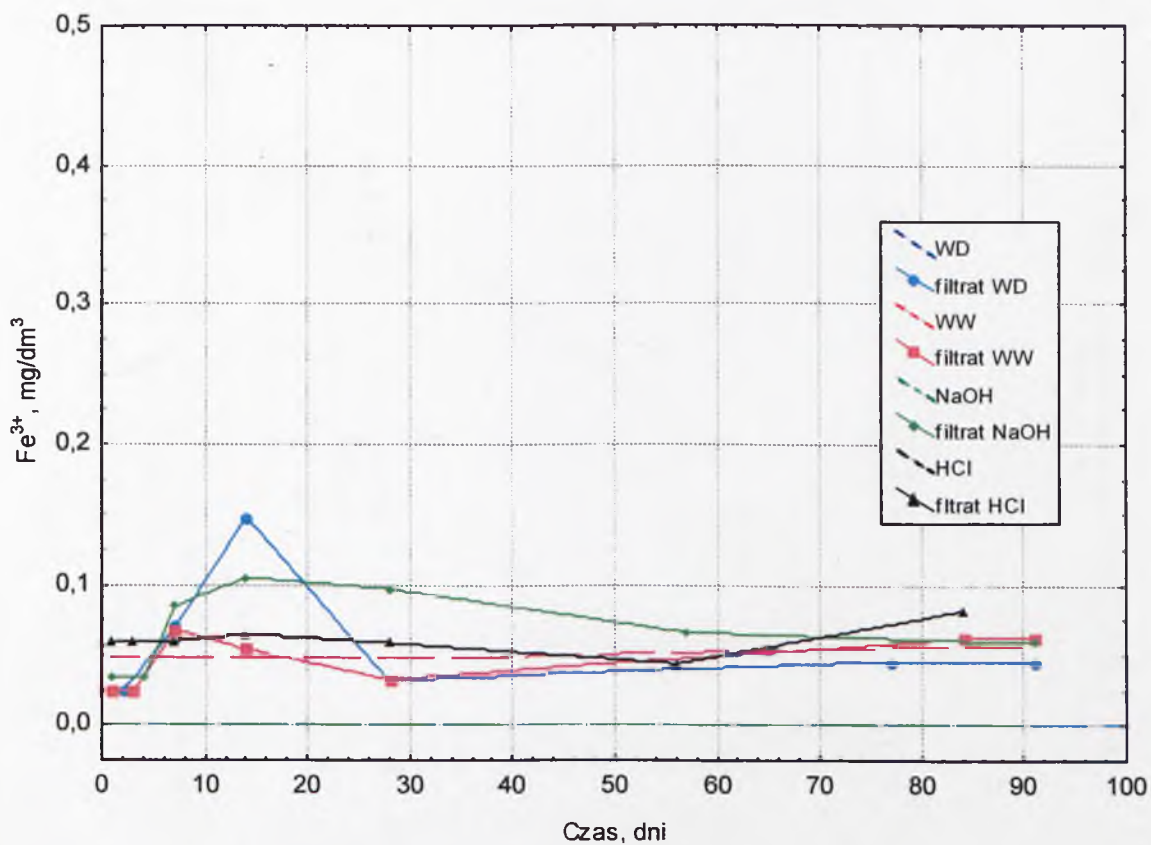
Rys. Z.III.5. Zmiana stężenia jonów Ca^{2+} w filtratach w czasie



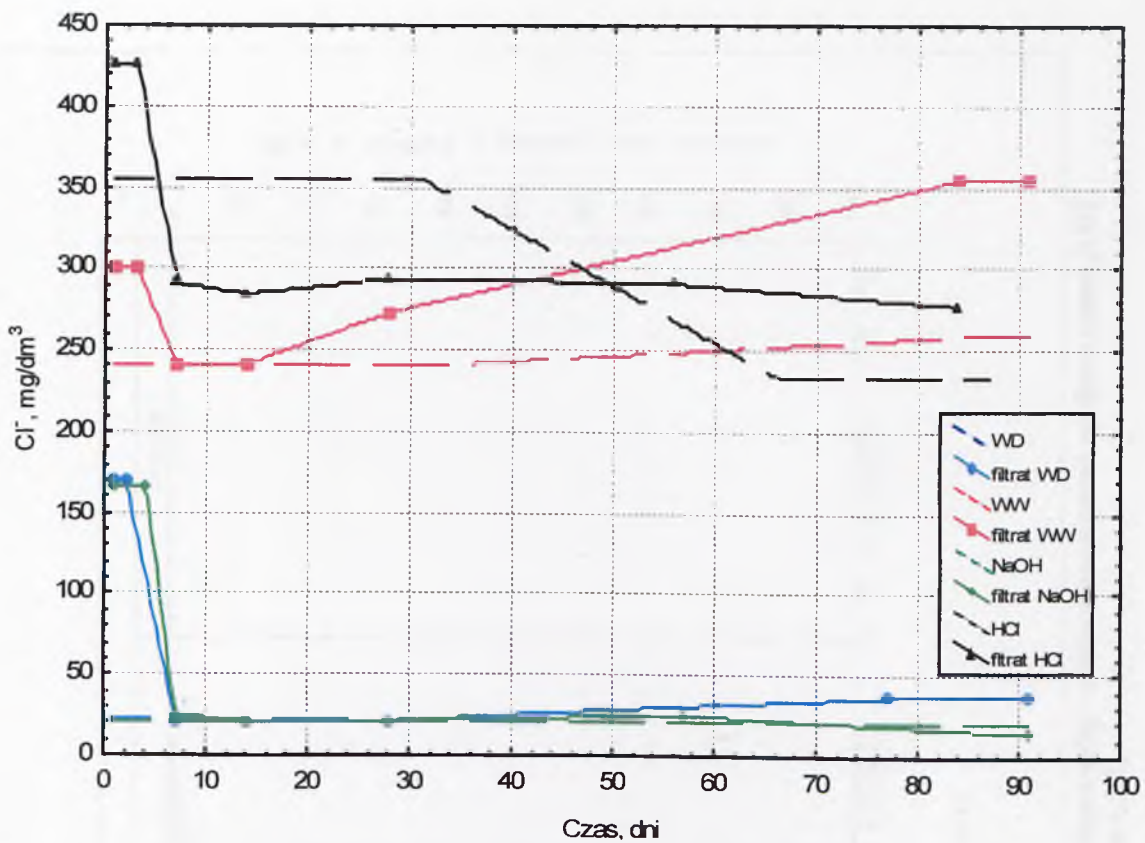
Rys. Z.III.6. Zmiana stężenia jonów Mg^{2+} w filtratach w czasie



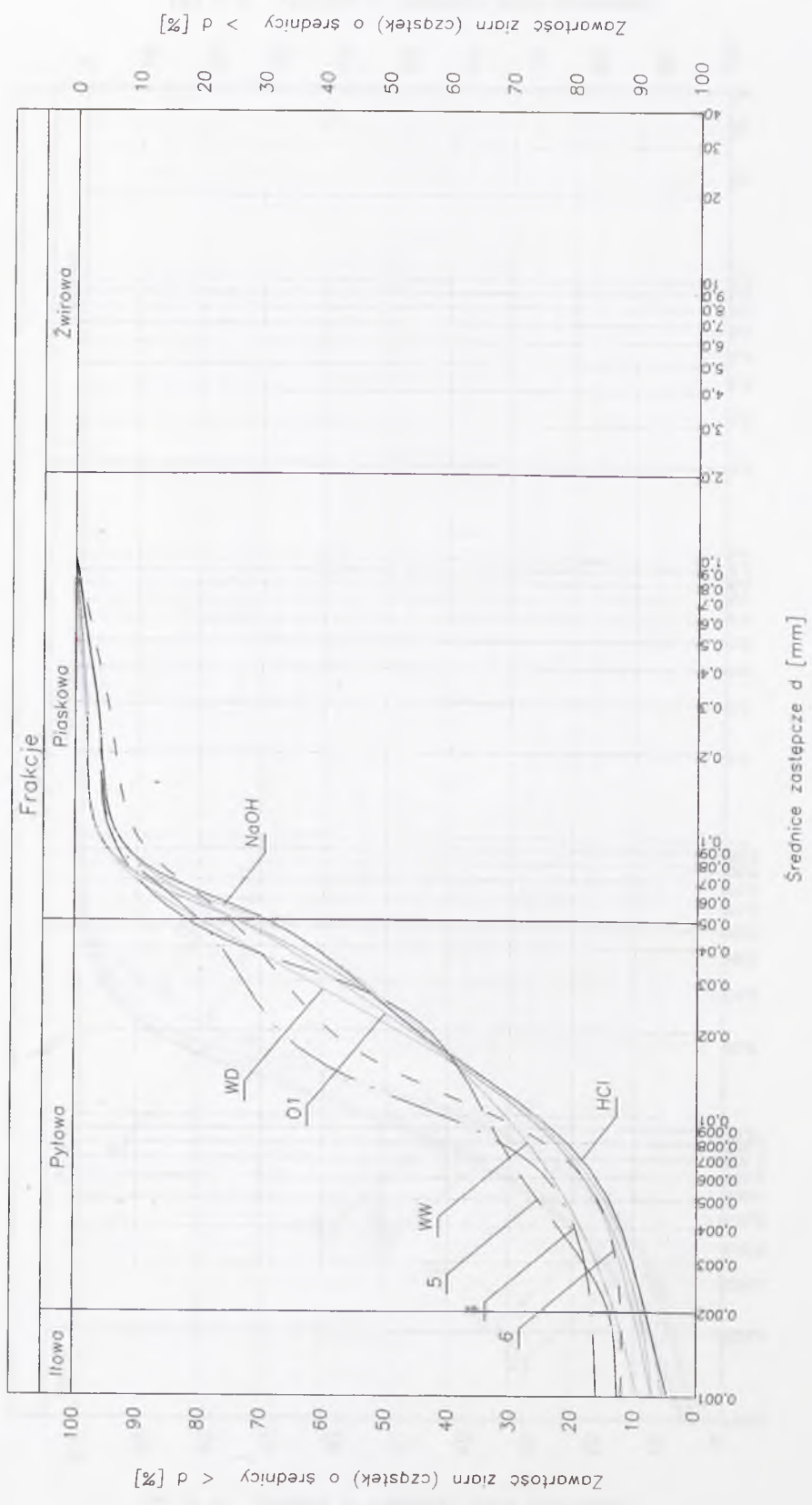
Rys. Z.III.7. Zmiana stężenia jonów Na⁺ w filtratach w czasie



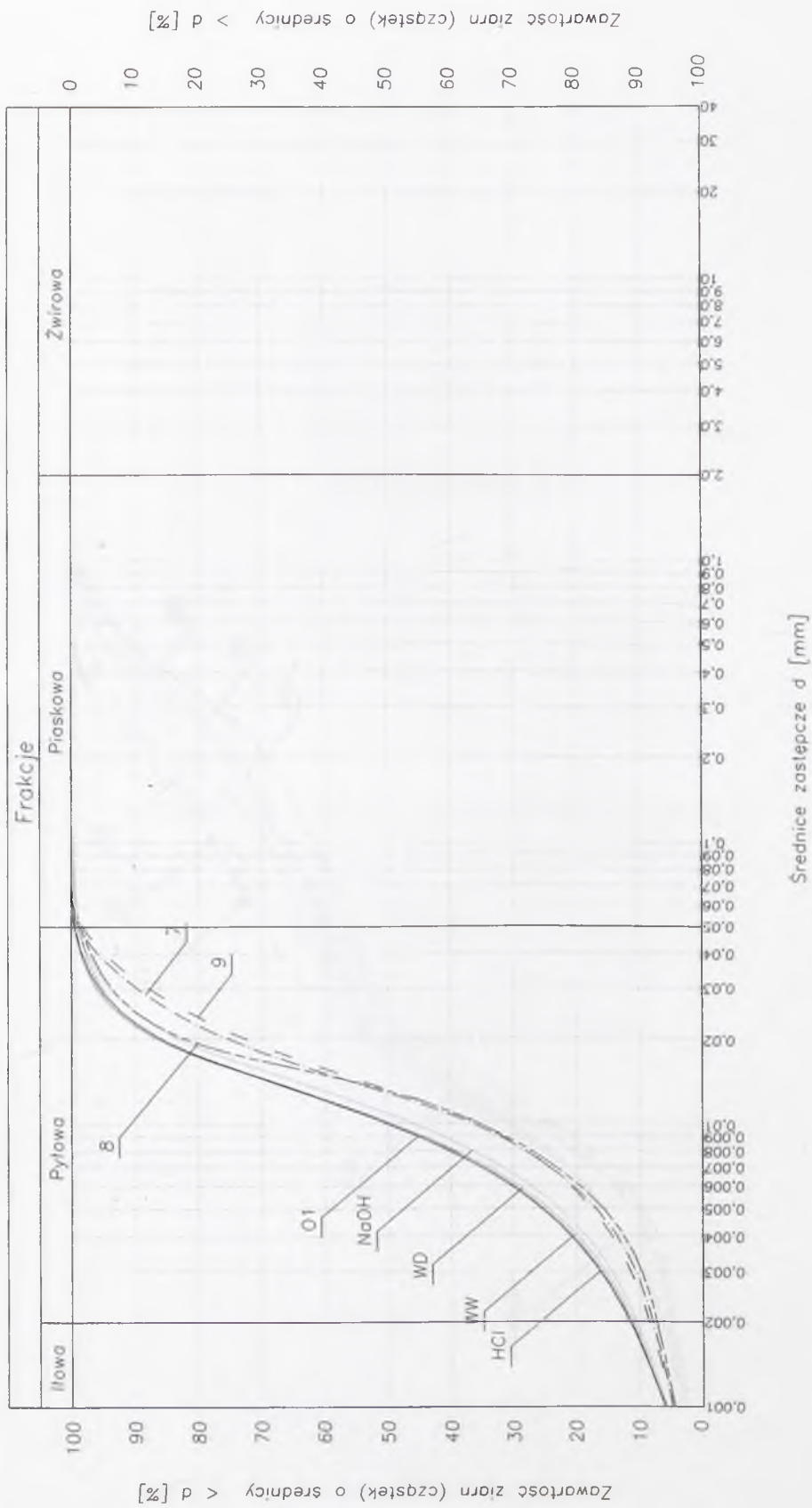
Rys. Z.III.8. Zmiana stężenia jonów Fe³⁺ w filtratach w czasie



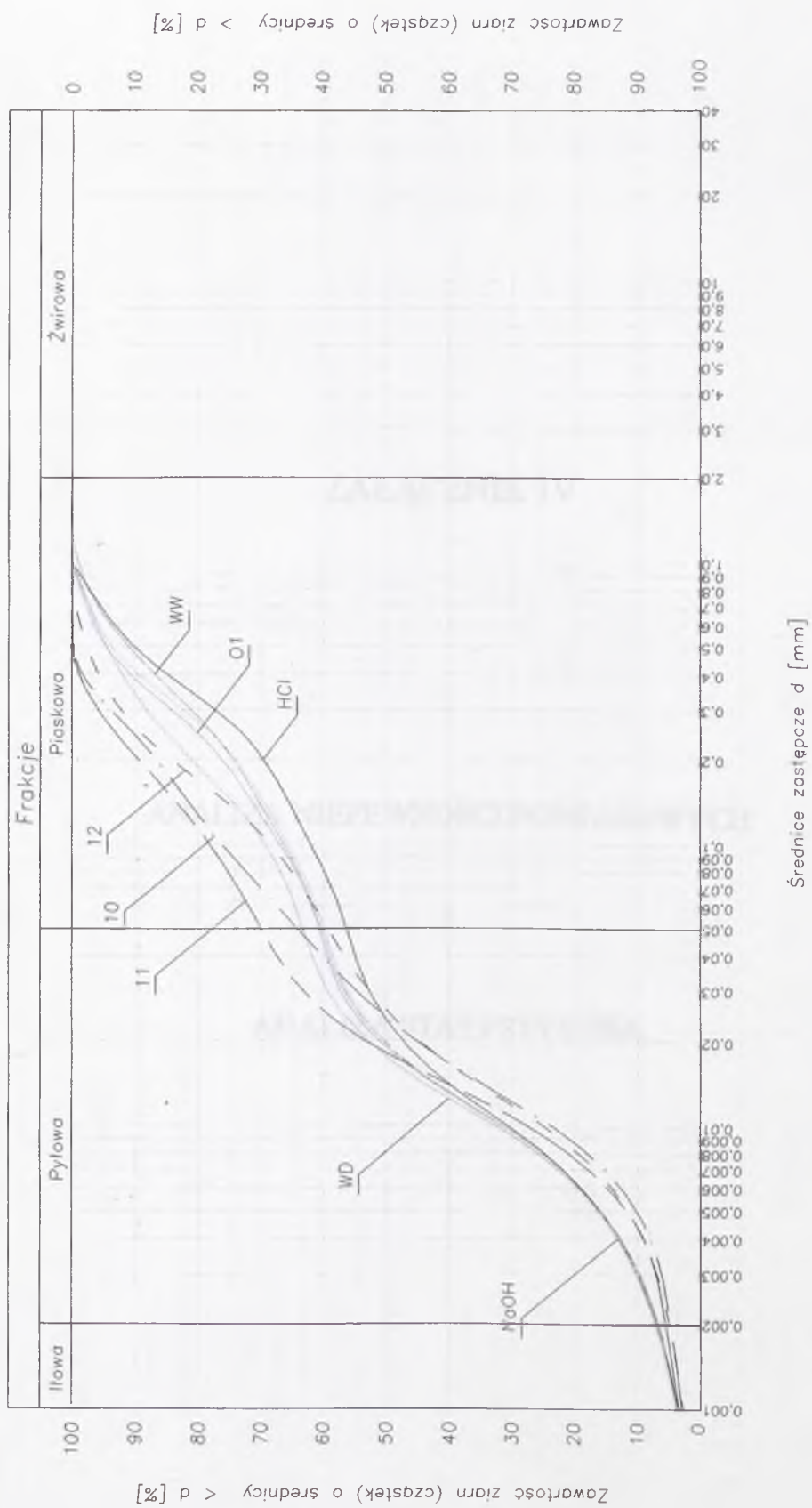
Rys. Z.III.9. Zmiana stężenia jonów Cl^- w filtratach w czasie



Rys. Z.III.10. Krzywe uziarnienia osadów z dekarbonizacji wody po filtracji długotrwałej – analiza areometryczna zgodnie z normą [152] (oznaczenia 4-6 jak w Tabeli 6.2.2).



Rys. Z.III.11. Krzywe uziarnienia osadów z dekarbonizacji wody po filtracji długotrwałej – analiza laserowa z wykorzystaniem ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek (oznaczenia 7-9 jak w Tabeli 6.2.2).



Rys. Z.III.12. Krzywe uziarnienia osadów z dekarbonizacji wody po filtracji długostrzałej – analiza laserowa bez wykorzystania ultradźwięków do dyspersji agregatów cząsteczek (oznaczenia 10-12 jak w Tabeli 6.2.2).

Tabela 3. Podstawowe wzory i symbole

Symbol	Opis	Wzrost	Wzrost	Wzrost
\bar{x}	Średnia arytmetyczna	$\frac{\sum x_i}{n}$	$\frac{\sum x_i}{n}$	$\frac{\sum x_i}{n}$
s^2	Wariancja	$\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$	$\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2$	$\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2$
s	Odchylenie standardowe	$\sqrt{s^2}$	$\sqrt{s^2}$	$\sqrt{s^2}$
σ	Odchylenie standardowe populacji	$\sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}$	$\sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N} - \mu^2}$	$\sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N} - \mu^2}$
μ	Średnia populacji	$\frac{\sum x_i}{N}$	$\frac{\sum x_i}{N}$	$\frac{\sum x_i}{N}$
σ^2	Wariancja populacji	$\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}$	$\frac{\sum x_i^2}{N} - \mu^2$	$\frac{\sum x_i^2}{N} - \mu^2$
σ	Odchylenie standardowe populacji	$\sqrt{\sigma^2}$	$\sqrt{\sigma^2}$	$\sqrt{\sigma^2}$
ρ	Koef. korelacji	$\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$	$\frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y}$	$\frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y}$
r	Koef. korelacji	$\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$	$\frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y}$	$\frac{\sum x_i y_i}{n} - \bar{x} \bar{y}$
r^2	Koef. determinacji	r^2	r^2	r^2
χ^2	Statystyka chi-kwadrat	$\sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$	$\sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$	$\sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$
F	Statystyka F	$\frac{s_1^2}{s_2^2}$	$\frac{s_1^2}{s_2^2}$	$\frac{s_1^2}{s_2^2}$
t	Statystyka t	$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$	$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$	$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$
z	Statystyka z	$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$	$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$	$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$

ZAŁĄCZNIK IV

ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH

I

ANALIZA STATYSTYCZNA

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
1		Wilgotność, $w, \%$	$0,10 \pm 0,25 \%$	$0,20 \pm 0,53 \%$	$w = \frac{m_{ml} - m_{st}}{m_{st} - m_t} 100\%$	$\Delta m_{st} = \Delta m_{ml} = \Delta m_t = \pm 0,01g$
2		Gęstość objętościowa, $\rho, g/cm^3$	$0,0002 \pm 0,001 g/cm^3$	$0,01 \pm 0,06 \%$	$\rho = \frac{m}{V}$	$\Delta m_m = \pm 0,01g, V = const.$
3	6.2.2	Gęstość objętościowa szkieletu, $\rho_d, g/cm^3$	$0,0062 \pm 0,0076 g/cm^3$	$0,58 \pm 0,67 \%$	$\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$	$\Delta \rho$ jak w poz.2, Δw jak w poz. 1
4		Porowatość, n	$0,0022 \pm 0,0027$	$0,36 \pm 0,49 \%$	$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}$	$\Delta \rho_d$ jak w poz.3, $\Delta \rho_s = 0,0007 g/cm^3$
5		Wskaźnik porowatości, e	$0,013 \pm 0,016$	$0,92 \pm 1,09 \%$	$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$	$\Delta \rho_d$ jak w poz.3, $\Delta \rho_s = 0,0007 g/cm^3$
6	6.2.5	Gęstość właściwa, $\rho_s, g/cm^3$	$0,0006 \pm 0,0007 g/cm^3$	$0,02 \%$	$\rho_s = \frac{\rho_w(m_g - m_t)}{m_{wt} + (m_g - m_t) - m_{wg}}$	$\Delta m_g = \Delta m_t = \Delta m_{wt} = \Delta m_{wg} = \pm 0,001g, \rho_w = 1,0 g/cm^3$
7		Granica plastyczności, $w_p, \%$	$0,7 \pm 1,41 \%$	$2,02 \pm 3,47 \%$	jak w poz. 1	jak w poz. 1
8	6.2.6	Granica płynności, $w_L, \%$	$0,41 \pm 3,96 \%$	$0,69 \pm 6,36 \%$	jak w poz. 1	jak w poz. 1

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.1)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
9		Granica skurezalności, $w_s, \%$	0,63±0,72 %	1,71÷1,93 %	$w_s = \rho_w \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right)$ $\rho_d = \frac{m_s}{V}$ $V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$\Delta \rho_d = 0,01 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho_d}{\rho_d} = 0,87 \pm 0,96 \%,$ $\Delta \rho_s = 0,0007 \text{ g/cm}^3$ $\Delta m_s = \pm 0,01 \text{ g}, \Delta V = 0,23 \pm 0,27 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 0,89 \pm 0,99 \%,$ $\Delta D = \Delta H = 0,01 \text{ cm}$
10	6.2.6	Wilgotność, $w, \%$	0,01±0,014 %	0,02±0,03 %	$w = \frac{m_m - m_s}{m_s} \cdot 100\%$	$\Delta m_s = \Delta m_m = \pm 0,01 \text{ g}$
11		Wskaźnik zageszczenia, I_s	0,0073±0,0087	0,85±0,93 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$ $\rho = \frac{m_m}{V}$ $V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$\Delta \rho_d = 0,01 \pm 0,012 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho_d}{\rho_d} = 0,85 \pm 0,93 \%,$ $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ $\Delta \rho = 0,015 \pm 0,017 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0,86 \pm 0,94 \%,$ <p>w jak w poz. 10</p> $\Delta m_m = \pm 0,01 \text{ g}, \Delta V = 0,24 \pm 0,28 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 0,87 \pm 0,97 \%$ $\Delta D = \Delta H = 0,01 \text{ cm}$
12		Wilgotność, $w, \%$	0,04±0,27 %	0,11±2,29 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1
13	6.2.8	Gęstość objętościowa szkieletu, $\rho_d, \text{ g/cm}^3$	0,0024±0,0057 g/cm ³	0,18±0,48 %	$\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$ $\rho = \frac{m_{ml} - m_t}{V}$	$\Delta \rho = 0,0014 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0,11 \pm 0,19 \%,$ $\Delta m_{ml} = \pm 2 \text{ g}, m_t = \text{const.}, V = 1000 \text{ cm}^3,$ <p>w jak w poz. 12</p>

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.2)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
14	7.2.1	Kat tarcia wewnętrzznego, $\phi_s, ^\circ$	0,12÷3,03 °	0,37÷13,44 %	6	7
					$a = \frac{N \sum_{i=1}^N \sigma_i \tau_{fi} - \sum_{i=1}^N \sigma_i \sum_{i=1}^N \tau_{fi}}{N \sum_{i=1}^N (\sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i \right)^2}$ $\sigma_i = \frac{O_i \cdot C_2}{A}$ $\tau_i = \frac{O_i \cdot C_1}{A}$	$\Delta \sigma_i = 3 \text{ kPa}, \Delta \tau_{fi} = 1,5 \text{ kPa},$ $\Delta O_i = \pm 0,01 \text{ mm}, C_2 = 107,5269 \text{ kG/mm},$ $A = 36,0 \text{ cm}^2$ $\Delta O_i = \pm 0,01 \text{ mm}, C_1 = 52,3560 \text{ kG/mm},$ $A = 36,0 \text{ cm}^2$
15		Spójność, $c_s, \text{ kPa}$	0,59÷13,25 kPa	1,13÷23,92 %	$c_s = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i)^2 \sum_{i=1}^N \tau_{fi} - \sum_{i=1}^N \sigma_i \sum_{i=1}^N \sigma_i \tau_{fi}}{N \sum_{i=1}^N (\sigma_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i \right)^2}$ $\sigma_i, \tau_i \quad \text{jak w poz. 14}$	jak w poz. 14
16		Odkształcenie jednostkowe, $\varepsilon, \%$	0,8 %	5,3÷47,9%	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} 100\%$	$\Delta(\Delta L) = \pm 0,5 \text{ mm}, L = 60 \text{ mm}$
17		Wilgotność, $w, \%$	0,04÷0,59 %	0,13÷1,67 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.3)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
18	7.2.1	Wskaźnik zanieczyszczenia, I_s	0,0008±0,0054	0,09±0,56 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100+w}$ $\rho = \frac{m_{mi} - m_i}{V} \quad (\text{partia I})$ $\rho = \frac{m_m}{V} \quad (\text{partia II})$ $V = AH$	$\Delta\rho_d = 0,001 \pm 0,00075 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho_d}{\rho_d} = 0,09 \pm 0,56 \%$ $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3 \text{ (partia I)}, \rho_{ds} = 1,28 \text{ g/cm}^3 \text{ (partia II)},$ $\Delta\rho = 0,0003 \pm 0,002 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,0002 \pm 0,11 \%$ <p>w jak w poz. 17</p> partia I: $\Delta m_{mi} = \pm 2 \text{ g}, m_i = \text{const.}, V = 1000 \text{ cm}^3,$ partia II: $\Delta m_m = \pm 0,01 \text{ g}, \Delta V = 0,0003 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 0,0002 \%$ $\Delta H = 0,01 \text{ cm}, A = 36,0 \text{ cm}^2$
19	7.2.2	Kąt tarcia wewnętrzznego, $\phi_u, ^\circ$	0,23±7,17 °	0,69±39,65 %	$\phi_u = \arcsin(\text{tg}\phi_T)$ $\phi_T = \arctg(a)$ $a = \frac{N \sum_{i=1}^N p_i q_i - \sum_{i=1}^N p_i \sum_{i=1}^N q_i}{N \sum_{i=1}^N (p_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)^2}$ $p_i = \frac{\sigma_{1i} + \sigma_{3i}}{2}$ $q_i = \frac{\sigma_{1i} - \sigma_{3i}}{2}$ $\sigma_{1i} = \sigma_{3i} + \frac{4O_i \cdot C}{\pi D^2}$	$\Delta\phi_T = 0,15 \pm 5,47 ^\circ, \frac{\Delta\phi_T}{\phi_T} = 0,51 \pm 37,02 \%$ $\Delta p_i = \Delta q_i = 7,74 \pm 12,84 \text{ kPa},$ $\frac{\Delta p_{1i}}{p_{1i}} = 1,04 \pm 8,43 \%, \frac{\Delta q_{1i}}{q_{1i}} = 1,24 \pm 11,58 \%$ $\Delta\sigma_{1i} = 10,48 \pm 20,68 \text{ kPa}, \frac{\Delta\sigma_{1i}}{\sigma_{1i}} = 0,91 \pm 6,61 \%$ $\Delta\sigma_{3i} = \pm 5,0 \text{ kPa}, \Delta O_i = \pm 0,01 \text{ mm},$ $C = 50,2513 \text{ kG/mm}, \Delta D = \pm 0,01 \text{ cm}$

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.4)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
20		Spójność, c_u , kPa	1,22÷103,66 kPa	2,87÷50,46 %	$c_u = \frac{c_T}{\cos \phi_u}$ $c_T = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i)^2 \sum_{i=1}^N q_i - \sum_{i=1}^N p_i \sum_{i=1}^N p_i q_i}{N \sum_{i=1}^N (p_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N p_i \right)^2} \cdot \phi_u$	$\Delta c_T = 1,02 \div 66,92 \text{ kPa}, \frac{\Delta c_T}{c_T} = 2,66 \div 42,27 \%$ ϕ_u, p_i, q_i , jak w poz. 19
21		Wilgotność, w , %	0,06÷1,22 %	0,25÷5,66 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1
22	7.2.2	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	0,01÷0,02	0,85÷1,64 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$ $\rho = \frac{m_m}{V}$ $V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$\Delta \rho_d = 0,01 \div 0,024 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho_d}{\rho_d} = 0,85 \div 1,64 \%$, $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ (partia I), $\rho_{ds} = 1,28 \text{ g/cm}^3$ (partia II), $\rho_{ds} = 1,31 \text{ g/cm}^3$ (partia III), $\Delta \rho = 0,009 \div 0,012 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho}{\rho} = 0,65 \div 0,67 \%$, w jak w poz. 21 $\Delta m_m = \pm 0,01 \text{ g}, \Delta V = 0,56 \div 0,60 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 0,65 \div 0,67 \%$ $\Delta D = \Delta H = \pm 0,01 \text{ cm}$
23	7.2.4	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, R_c , kPa	4,56÷8,90 kPa	0,59÷2,23 %	$R_c = \frac{40 \cdot C}{\pi D^2}$	$\Delta O = \pm 0,01 \text{ mm}, C = 50,2513 \text{ kG/mm}, \Delta D = \pm 0,01 \text{ cm}$

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.5)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
24		Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, R_c , kPa	4,95±10,53 kPa	0,68±2,28 %	$R_c^1 = \frac{9R_c}{7 + 2\frac{D}{H}}$	ΔR_c jak w poz. 23, $\Delta D = \Delta H = \pm 0,01$ cm
25		Odkształcenie jednostkowe, ε , %	0,01±0,03 %	0,42±2,12 %	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} 100\%$	$\Delta(\Delta L) = \pm 0,01$ mm, $\Delta L = \Delta H = \pm 0,01$ cm
26		Wytrzymałość na ściskanie, R_{cg} , kPa	6,88±10,25 kPa	1,28±7,21 %	$R_g = \frac{F}{b^2}$	$\Delta F = \pm 0,01$ kN, $\Delta b = \pm 0,01$ cm
27		Wilgotność, w , %	0,08±0,62 %	0,25±2,36 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1
	7.2.4					$\Delta\rho_s = \pm 0,0007$ g/cm ³
					$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$	$\Delta\rho_d = 0,001\pm 0,016$ g/cm ³ , $\frac{\Delta\rho_d}{\rho_d} = 0,11\pm 1,15$ %
					$\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$	$\Delta\rho = 0,0002\pm 0,011$ g/cm ³ , $\frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,011\pm 0,65$ %
					$\rho = \frac{m_m}{V}$	w jak w poz. 27
28		Wskaźnik porowatości, e	0,002±0,025	0,2±2,34 %	$R_c: V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$R_c: \Delta m_m = \pm 0,01$ g, $\Delta V = 0,55\pm 0,61$ cm ³ , $\frac{\Delta V}{V} = 0,59\pm 0,66$ %
						$\Delta D = \Delta H = \pm 0,01$ cm $R_{cg}: V = 256$ cm ³ , $\Delta m_m = \pm 0,05$ g

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.6)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
29		Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie bezpośrednie, R_r , kPa	1,36±1,51 kPa	4,56±25,56 %	$R_r = \frac{4O \cdot C}{\pi D^2}$	$\Delta O = \pm 0,01$ mm, $C = 13,5$ kG/mm, $\Delta D = \pm 0,01$ cm
30		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, R_{rt} , kPa	2,52±2,56 kPa	0,17±0,80 %	$R_{rt} = \frac{2O \cdot C_1}{\pi DH}$	$\Delta O = \pm 0,01$ mm, $C_1 = 50,2513$ kG/mm, $\Delta D = \Delta H = \pm 0,01$ cm
31	7.2.5	Wytrzymałość na rozciąganie przy ścinaniu, R_{rn} , kPa	13,35±134,80 kPa	11,22±66,20 %	$R_{rn} = 2c_u \cdot tg(45^\circ - \frac{\phi_u}{2})$	$\Delta c_u = 9,60 \div 103,66$ kPa, $\frac{\Delta c_u}{c_u} = 8,48 \div 50,46$ % $\Delta \phi_u = 1,31 \div 5,32$ °, $\frac{\Delta \phi_u}{\phi_u} = 3,91 \div 19,25$ %
32		Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, R_g , kPa	0,06 kPa	0,02±0,09 %	$R_g = 1,17M_n$	$\Delta M_n = \pm 0,05$ g
33		Odstąpienie jednostkowe, ε , % dla (R_{rt})	0,22±0,25 %	14,16±120,40%	$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} \cdot 100\%$	$\Delta(\Delta D) = \pm 0,01$ mm, $\Delta D = \pm 0,01$ cm
34		Wilgotność, W , %	0,03±1,22 %	0,09±4,66 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.7)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
35	7.2.5	Wskaźnik porowatości, e	0,003±0,084	0,25±7,88 %	$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100+w}$ $\rho = \frac{m}{V}$ $R_r, R_{rt}, R_{ru}: V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$\Delta\rho_s = \pm 0,0007 \text{ g/cm}^3$ $\Delta\rho_d = 0,001 \pm 0,053 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho_d}{\rho_d} = 0,11 \pm 3,74 \%$ $\Delta\rho = 0,0002 \pm 0,054 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,011 \pm 3,02 \%$ w jak w poz. 34 $R_g: V = 256 \text{ cm}^3, \Delta m_m = \pm 0,05 \text{ g}$ $R_r, R_{rt}, R_{ru}:$ $\Delta V = 0,55 \pm 1,13 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 0,60 \pm 3,01 \%$ $\Delta H = \pm 0,01 \text{ cm}, \Delta m_m = \pm 0,01 \text{ g},$ $R_{rt}, R_{ru}: \Delta D = \pm 0,01 \text{ cm},$ $R_r: \Delta D = \pm 0,05 \text{ cm}$
36		Graniczne strzałka ugięcia, f_{gr} , dla R_g	$\frac{1}{10000}$	0,25±2,27 %	$f_{gr} = \frac{s}{l}$	$\Delta s = \pm 0,01 \text{ mm}, \frac{\Delta s}{s} = 0,25 \pm 2,27 \%$ $l = 100 \text{ mm}$
37	7.2.6	Wskaźnik kruchości $\frac{R_r}{R_c}$	0,002±0,049	1,75±7,10 %	-	$\Delta R_r = 10,25 \text{ kPa}, \Delta R_c = 0,06 \text{ kPa}$
38	7.2.7	Wilgotność, w , %	0,05±0,42 %	0,13±1,45 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.8)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
39		Wskaźnik zagęszczenia, I_s	0,009±0,012	0,97±1,24 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$ $\rho = \frac{m_{mt} - m_m}{V}$ $V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$\Delta\rho_d = 0,013 \pm 0,017 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho_d}{\rho_d} = 0,97 \pm 1,24 \%$ $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3,$ $\Delta\rho = 0,016 \pm 0,019 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho}{\rho} = 0,92 \pm 0,95 \%$ <p>w jak w poz. 38</p> $\Delta m_{mt} = \Delta m_i = \pm 0,01 \text{ g},$ $\Delta V = 0,35 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 0,90 \pm 0,91 \%$ $\Delta D = \Delta H = \pm 0,01 \text{ cm}$
40	7.2.7	Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej M_0 , kPa	50±1384 kPa	0,50±10,52 %	$M_0 = \frac{\Delta\sigma_{1h_{i-1}}}{h_{i-1} - h_i}$	$\Delta\sigma_1 = 12,5; 25; 50; 100; 200 \text{ kPa},$ $\Delta h_{i-1} = \Delta h_i = \pm 0,01 \text{ cm}$
41		Edometryczny moduł odprężenia \bar{M} , kPa	1511±21768 kPa	7,70±16,67 %	$\bar{M} = \frac{\Delta\sigma_{1h_i}}{h_i - h_{i-1}}$	<p>jak w poz. 40</p>
42		Edometryczny moduł ściśliwości wtórnej M , kPa	626±30330 kPa	1,80±49,99 %	<p>jak w poz. 38</p>	<p>jak w poz. 40</p>
43		Współczynnik ściśliwości objętościowej, m_v , 1/kPa	$5 \cdot 10^{-7} \pm 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/kPa}$	0,50±10,52 %	$m_v = \frac{1}{M_0}$	$\Delta M_0 \text{ jak w poz. 40}$

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.9)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
44	7.2.8.	Wskaźnik pęcznienia $V_p, \%$	0,21±0,23 %	0,87±3,38 %	$V_p = \frac{h'' - h'}{h'} 100\%$	$\Delta h' = \Delta h'' = \pm 0,01 \text{ cm}$
45		Wilgotność, $w, \%$	0,08±0,27 %	0,15±0,94 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1
46	7.2.8.	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	0,010±0,016	1,23±1,62 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100+w}$ $\rho = \frac{m_{mt} - m_m}{V}$ $V = \frac{\pi D^2}{4} H$	$\Delta \rho_d = 0,013 \pm 0,023 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho_d}{\rho_d} = 1,22 \pm 1,62 \%$ $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3$ $\Delta \rho = 0,020 \pm 0,027 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta \rho}{\rho} = 1,17 \pm 1,43 \%$ $\Delta m_{mt} = \Delta m_i = \pm 0,01 \text{ g}$ w jak w poz. 45 $\Delta V = 0,35 \pm 0,37 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 1,14 \pm 1,36 \%$ $\Delta D = \Delta H = \pm 0,01 \text{ cm}$ $\Delta T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
47		8.4.1.	Przepuszczalność hydrauliczna, $k_{10}, \text{ m/s}$	(0,062±2,207) × 10 ⁻⁹ m/s	8,11±24,14 %	$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T}$ $k_T = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$ $\Delta t = t_2 - t_1$

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.10)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
48		Prędkość przepływu, v , m/s	$(0,85 \pm 87,11) \times 10^{-9}$ m/s	8,89 ± 26,47 %	$v = k_{10} i$	Δk_{10} jak w poz. 45, $\Delta i = 0,26, \frac{\Delta i}{i} = 0,72 \pm 4,03 \%$
49		Wilgotność, w , %	0,04 ± 0,48 %	0,11 ± 1,35 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1
50	8.4.1	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	0,019 ± 0,024	1,86 ± 2,30 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100+w}$ $\rho = \frac{m_m}{V}$ $V = AH$	$\Delta \rho_d = 0,026 \pm 0,033$ g/cm ³ , $\frac{\Delta \rho_d}{\rho_d} = 1,86 \pm 2,30 \%$, $\rho_{ds} = 1,4$ g/cm ³ , $\Delta \rho = 0,028 \pm 0,038$ g/cm ³ , $\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1,50 \pm 1,92 \%$, $\Delta w = \pm 0,48 \%$, $\Delta m_m = \pm 2$ g, $\Delta V = 7,854$ cm ³ , $\frac{\Delta V}{V} = 1,67 \%$ $A = 78,54$ cm ² , $\Delta H = \pm 0,1$ cm
51		Wskaźnik porowatości, e	0,037 ± 0,047	3,88 ± 5,00 %	$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$ ρ_d jak w poz. 50	$\Delta \rho_s = \pm 0,0007$ g/cm ³ $\Delta \rho_d$ jak w poz. 50
52		Nacisk jednostkowy, q_n , kPa	63,7 kPa	0,41 ± 5,26 %	$q_n = \frac{F}{A}$	$A = 78,54$ cm ² , $\Delta F = \pm 0,5$ kN

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.11)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
53		Przepuszczalność hydrauliczna, k_{10} , m/s	$(0,048 \pm 1,195) \times 10^{-9}$ m/s	7,67 ÷ 8,67 %	6	7
					$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T}$ $k_T = \frac{\alpha L}{A \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$ $\Delta t = t_2 - t_1$	$\Delta T = 0,1$ °C, $\Delta k_T = 0,060 \pm 2,295 \times 10^{-9}$ m/s, $\frac{\Delta k_T}{k_T} = 7,67 \div 8,67$ %, $\alpha = 0,283$ cm ² , $A = 100,0$ cm ² , $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \pm 0,1$ cm, $L = 10,0$ cm, $\Delta L = \pm 0,1$ cm, $\Delta(\Delta t) = \pm 60$ s, $\frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} = 6,67$ % $\Delta t_2 = \Delta t_1 = 30$ s
54	8.4.2	Prędkość przepływu, v , m/s	$(0,48 \pm 54,40) \times 10^{-9}$ m/s	8,00 ÷ 9,97 %	6	
					$v = k_{10} i$	Δk_{10} , jak w poz. 53, $\Delta i = 0,11$, $\frac{\Delta i}{i} = 0,32 \div 1,39$ %
55		Wilgotność, w , %	0,06 ± 0,34 %	0,19 ± 1,42 %	6	
					jak w poz. 1	jak w poz. 1
56		Wskaźnik zagęszczenia, I_s	0,012 ± 0,014	1,37 ± 1,40 %	6	
					$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100 + w}$ $\rho = \frac{m_{mi} - m_l}{V}$ $V = AH$	$\Delta \rho_d = 0,018 \div 0,020$ g/cm ³ , $\frac{\Delta \rho_d}{\rho_d} = 1,37 \div 1,40$ %, $\rho_{ds} = 1,47$ g/cm ³ , $\Delta \rho = 0,019 \div 0,021$ g/cm ³ , $\frac{\Delta \rho}{\rho} = 1,11 \div 1,12$ %, $\Delta w = \pm 0,34$ %, $\Delta m_{mi} = \pm 2$ g, $m_l = \text{const.}$, $\Delta V = 10,0$ cm ³ , $\frac{\Delta V}{V} = 1,0$ %, $A = 100,0$ cm ² , $\Delta H = \pm 0,1$ cm

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.12)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
1	2	3	4	5	6	7
57	8.4.2	Wskaźnik porowatości, e	0,026±0,029	2,72±3,04 %	$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$ ρ_d jak w poz. 55	$\Delta\rho_s = \pm 0,0007 \text{ g/cm}^3$ $\Delta\rho_d$ jak w poz. 56
58		Nacisk jednostkowy, q_n , kPa	50,0 kPa	0,39±1,30 %	$q_n = \frac{F}{A}$	$A = 100,0 \text{ cm}^2$, $\Delta F = \pm 0,5 \text{ kN}$
59	8.5.1	Przepuszczalność hydrauliczna, k_{10} , m/s	(0,037±3,550) × 10 ⁻⁹ m/s	5,75±86,10 %	$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T}$ $k_T = \frac{aL}{A\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$ $\Delta t = t_2 - t_1$	$\Delta T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta k_T = 0,001 \pm 4,264 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, $\frac{\Delta k_T}{k_T} = 3,10 \pm 11,69 \%$, $a = 0,283 \text{ cm}^2$, $A = 78,54 \text{ cm}^2$, $\Delta h_1 = \Delta h_2 = \pm 0,1 \text{ cm}$, $L = 6,0 \text{ cm}$, $\Delta L = \pm 0,1 \text{ cm}$, $\Delta(\Delta t) = \pm 60 \text{ s}$, $\frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} = 1,67 \pm 6,67 \%$, $\Delta t_2 = \Delta t_1 = 30 \text{ s}$
60		Prędkość przepływu, v , m/s	(1,313±147,91) × 10 ⁻⁹ m/s	6,63±86,92 %	$v = k_{10} i$	Δk_{10} jak w poz. 59, $\Delta i = 0,11$, $\frac{\Delta i}{i} = 0,73 \pm 4,36 \%$
61		Wilgotność, w , %	0,10±0,48 %	0,29±1,35 %	jak w poz. 1	jak w poz. 1

Tabela 1. Analiza niepewności systematycznych (c.d.13)

L.p.	Rozdział	Parametr	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Oznaczenia pomocnicze	
					Wzory	Dokładności
62	8.5.1	Wskaźnik zagęszczenia, I_s	0,023	2,26÷2,27 %	$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{ds}}$ $\rho_d = \frac{100\rho}{100+w}$ $\rho \approx \frac{m_m}{V}$ $V \approx AH$	$\Delta\rho_d = 0,032 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho_d}{\rho_d} = 2,26\div2,27 \%$ $\rho_{ds} = 1,4 \text{ g/cm}^3,$ $\Delta\rho = 0,035 \text{ g/cm}^3, \frac{\Delta\rho}{\rho} = 1,90 \%$ $\Delta w = \pm 0,48 \%$ $\Delta m_m = \pm 2 \text{ g}, \Delta V = 7,854 \text{ cm}^3, \frac{\Delta V}{V} = 1,67 \%$ $A = 78,54 \text{ cm}^2, \Delta H = \pm 0,1 \text{ cm}$
63		Wskaźnik porowatości, e	0,044±0,045	4,70 %	$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$	$\Delta\rho_s = \pm 0,0007 \text{ g/cm}^3$ $\Delta\rho_d \text{ jak w poz. 62}$
64		Nacisk jednostkowy, q_n , kPa	63,7 kPa	0,69÷1,75 %	$q_n = \frac{F}{A}$	$A = 78,54 \text{ cm}^2, \Delta F = \pm 0,5 \text{ kN}$

Tabela 2. Analiza statystyczna (liczba pomiarów $N \geq 4$)

L.p.	Rozdział	Parametr	Liczba pomiarów N	Rozstęp	Wartość średnia \bar{x}	Mediana	Odchylenie standardowe $S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$	Odchylenie standardowe średniej $\overline{S_x} = \frac{S_x}{\sqrt{N}}$	Poziom ufności $P = 95\%$		Współczynnik zmienności $U = \frac{S_x}{\bar{x}}$
									Kwantyl t_s	Niepewność $\pm t_s \cdot \overline{S_x}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	6.2.5	Gęstość właściwa $\rho_s, \text{g/cm}^3$	8	2,656÷2,805	2,718	2,703	0,053	0,019	2,365	0,045	1,95 %
2		Granica plastyczności $w_p, \%$	9	34,12÷40,89	37,27	37,66	2,449	0,816	2,306	1,882	6,57 %
3	6.2.6	Granica płynności $w_L, \%$	4	58,40÷65,33	62,34	62,82	2,884	1,442	3,182	4,588	4,63 %
4		Granica skurczalności $w_s, \%$	17	33,96÷37,29	36,14	36,28	0,921	0,223	2,120	0,473	2,55 %
5	7.2.7	Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej, M_0, kPa , dla $\Delta\sigma = 150 \text{ kPa}$	4	8862÷14203	11878,5	12224,5	2250,497	1125,249	3,182	3580,54	18,95 %
6		Edometryczny moduł odprężenia, M, kPa , dla $\Delta\sigma = 150 \text{ kPa}$	4	44320÷55777	49546,75	49045,0	5672,913	2836,457	3,182	9025,61	11,45 %

Tabela 2. Analiza statystyczna (liczba pomiarów $N \geq 4$), (c.d.1)

L.p.	Rozdział	Parametr	Liczba pomiarów N	Rozstęp	Wartość średnia \bar{x}	Mediana	Odchylenie standardowe $S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}$	Odchylenie standardowe średniej $\overline{S_x} = \frac{S_x}{\sqrt{N}}$	Poziom ufności $P = 95\%$		Współczynnik zmienności $U = \frac{S_x}{\bar{x}}$
									Kwantyl t_s	Niepewność $\pm t_s \cdot \overline{S_x}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	7.2.7	Edometryczny moduł ściśliwości wtórnej, M_0 , kPa dla $\Delta\sigma = 150$ kPa,	4	38503+67214	50036,25	47214,0	12212,67	6106,34	3,18	19430,36	24,41 %
8	8.4.1	Przepuszczalność hydrauliczna $k_{10,dr}$ ($i \geq 30$), m/s, przy $I_s = 1,0$ i $w = 32,0\%$	8	(2,291+14,582) $\times 10^{-9}$	6,606 $\times 10^{-9}$	5,021 $\times 10^{-9}$	4,053 $\times 10^{-9}$	1,433 $\times 10^{-9}$	2,365	3,389 $\times 10^{-9}$	61,35%

1. OGÓLNE WYTYCZNE

1.1. BADANIA LABORATORYJNE

Do badań należy podjąć następujące działania: ...

ZAŁĄCZNIK V

OGÓLNE WYTYCZNE

1. ...
2. ...
3. ...
4. ...
5. ...

1. OGÓLNE WYTYCZNE

1.1. BADANIA LABORATORYJNE

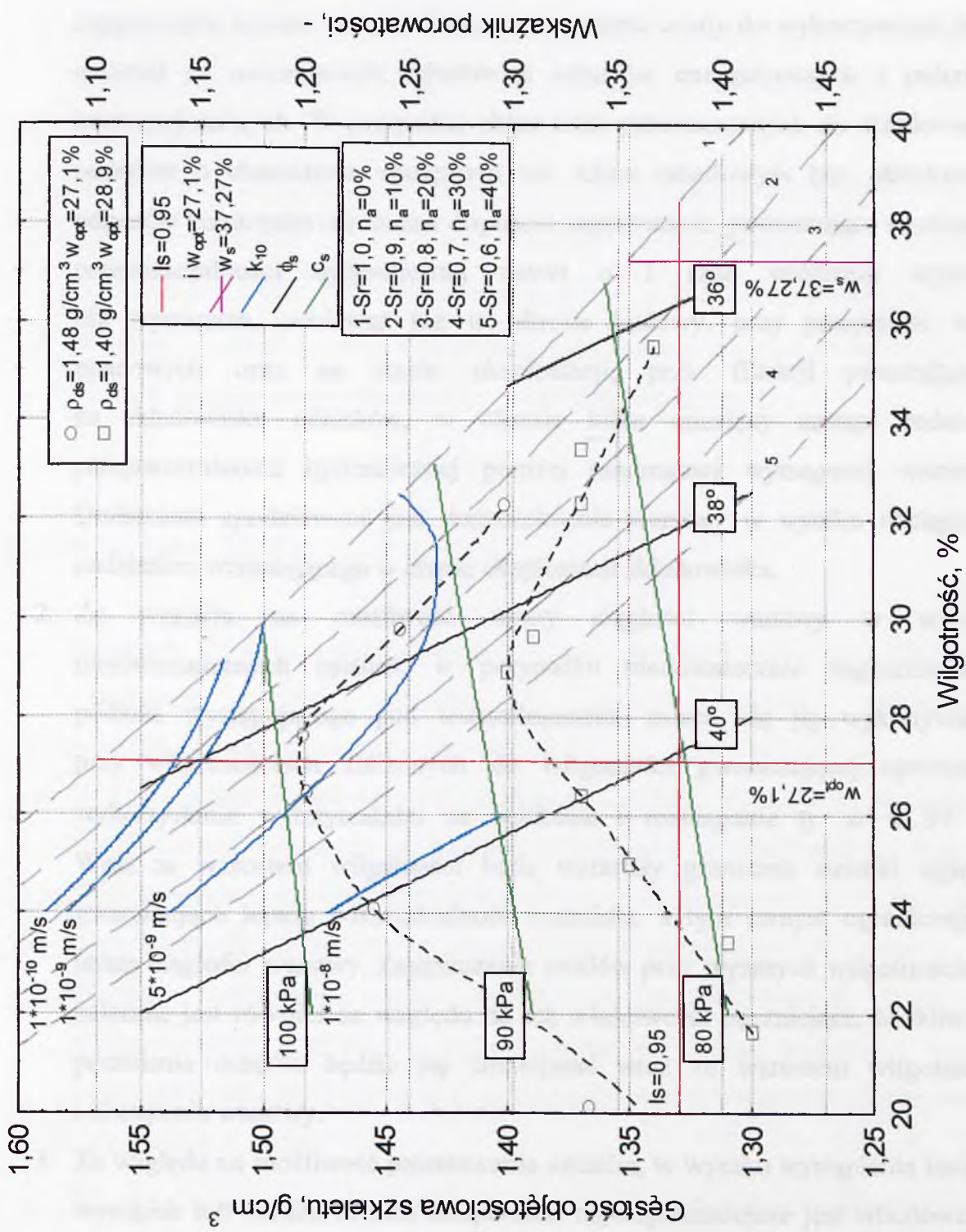
Dla każdej partii osadów z dekarbonizacji wody wbudowywanych w konstrukcję składowiska odpadów należy wykonać badania laboratoryjne ich właściwości fizycznych, mechanicznych i filtracyjnych. Badania powinny być wykonane zgodnie z zaleceniami jak dla gruntów spoistych stosowanych do budowy warstw uszczelniających określonymi w Instrukcji ITB [5], z uwzględnieniem proponowanych zmian w metodyce badań wynikających z badań własnych autorki:

1. Skład granulometryczny osadów należy określić na podstawie analizy areometrycznej wykonywanej zgodnie z normą [2]. Nie zaleca się stosowania laserowych metod oznaczania uziarnienia.
2. Kąt tarcia wewnętrznego i spójność zaleca się oznaczać z badań w aparacie bezpośredniego ścinania, na próbkach formowanych przez ściskanie lub ubijanie, bezpośrednio w skrzynce aparatu zgodnie z normą [2].
3. Wytrzymałość na rozciąganie zaleca się określać z badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu zgodnie z zaleceniami normy [3].
4. Badanie wytrzymałości na ściskanie zaleca się wykonywać na połówkach beleczek uzyskanych z badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu wg zaleceń normy [3].
5. Badanie przepuszczalności hydraulicznej zaleca się wykonywać na próbkach, których objętość nie przekracza 500 cm^3 . W przypadku wykonywania badań w aparatach uniemożliwiających odkształcenia boczne badanego materiału, zaleca się wykonywanie próbek bezpośrednio w cylindrach aparatów, przez ściskanie lub ubijanie. W warunkach laboratoryjnych oznaczenia przepuszczalności hydraulicznej należy wykonywać wodą wodociągową lub destylowaną i odciekami pobranymi ze składowiska odpadów. Nie zaleca się wykorzystywania do badań innych cieczy (cieczy probierczych).

1.2. KRYTERIA WBUDOWANIA

Warunki wbudowania osadów z dekarbonizacji wody w warstwę uszczelnienia należy określić na podstawie analizy poszczególnych właściwości geotechnicznych osadów pod względem wpływu oznaczonych parametrów na skuteczną pracę uszczelnienia i wyznaczyć dopuszczalne zakresy wartości granicznych wilgotności i zagęszczenia przy wbudowaniu. W celu wyznaczenia dopuszczalnego zakresu wilgotności formowania i zagęszczenia („akceptowanej strefy”) dla osadów z dekarbonizacji wody z EC Rzeszów wykonano nomogram (Rys.Z.V) według następującej procedury:

1. Na wykres zagęszczalności obejmujący krzywe uzyskane z badań w aparacie Proctora 3 metodami, naniesiono warstwice przepuszczalności hydraulicznej w funkcji wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu $k_{10} = f(w, I_s)$ wyznaczone na podstawie planu eksperymentu.
2. Wstępną „akceptowaną strefę” zagęszczania ograniczono kolejno przez:
 - linię pełnego nasycenia porów wodą $S_r = 1,0$,
 - linię minimalnego wymaganego zagęszczenia $I_s = 0,95 \rho_{ds}$ dla metody normalnej zagęszczania tj. $\rho_{ds} = 1,33 \text{ g/cm}^3$,
 - linię wilgotności optymalnej w_{opt} dla metody zmodyfikowanej Proctora tj. $w_{opt} = 27,1 \%$,
 - linię wilgotności odpowiadającej granicy skurczalności $w = w_s = 37,27 \%$, której wartość jest zbliżona do wilgotności gwarantującej optymalne wykorzystanie parametrów wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie materiału, określonej na podstawie wskaźnika kruchości tj. $w = 37,06 \%$.
3. Na tak zmodyfikowany wykres naniesiono liniowe zależności wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności określone z badań w aparacie bezpośredniego ścinania w funkcji wilgotności i gęstości objętościowej szkieletu $\phi_s = f(w, I_s)$ i $c_s = f(w, I_s)$.



Rys. Z. V. Nomogram do wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego i spójności w zależności od wilgotności formowania i zagęszczenia.

Przy doborze optymalnej wilgotności formowania i zagęszczenia na podstawie określonej graficznie „akceptowanej strefy” zagęszczenia należy zwrócić uwagę, że:

1. Przepuszczalność hydrauliczna we wstępnej „akceptowalnej strefie” zagęszczania wynosi $k \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s, co dopuszcza osady do wykorzystania jako materiał na uszczelnienia składowisk odpadów energetycznych z palenisk konwencjonalnych. W przypadku składowisk przeznaczonych do składowania odpadów o charakterze obojętnym lub lekko zasadowym (np. składowisk odpadów komunalnych) można dopuścić zagęszczanie gwarantujące uzyskanie przepuszczalności hydraulicznej nawet o 1 rząd wielkości wyższej niż wymagana, ponieważ już w okresie budowy, przy przepływie wód opadowych oraz na etapie eksploatacji, przy filtracji powstających na składowisku odcieków, w okresie kilku miesięcy nastąpi redukcja przepuszczalności hydraulicznej poniżej minimalnej wymaganej wartości. Dodatkowo spodziewane jest doszczelnienie warstwy w wyniku obciążenia nadkładem wzrastającego w czasie eksploatacji składowiska.
2. Ze względu na możliwość utraty ciągłości warstwy w wyniku nierównomiernych osiadań, w przypadku niedostatecznie zagęszczonego podłoża występującego pod uszczelnieniem, zaleca się jej wykonywanie przy wilgotnościach zbliżonych do wilgotności gwarantującej optymalne wykorzystanie wytrzymałości na ścislenie i rozciąganie tj. $w \approx 37$ %. Wraz ze wzrostem wilgotności będą wzrastały graniczne strzałki ugięcia gwarantujące lepszą odkształcalność materiału, a tym samym ograniczające utratę ciągłości warstwy. Zagęszczanie osadów przy wyższych wilgotnościach zalecane jest również ze względu na ich właściwości pęczniące. Możliwość pęcznienia osadów będzie się zmniejszać wraz ze wzrostem wilgotności i obciążenia warstwy.
3. Ze względu na możliwość powstawania szczelin, w wyniku wystąpienia bardzo wysokich lub bardzo niskich temperatur, najbezpieczniejsze jest wbudowanie materiału przy możliwie niskich wilgotnościach, zbliżonych do wilgotności optymalnej $w \approx w_{opt} \leq w_s$.

Dla określonej optymalnej wilgotności formowania gwarantującej uzyskanie najniższej wartości przepuszczalności hydraulicznej ($w = w_{opt} + 2\%$, tj. $w \approx 31\%$) i przyjętego zagęszczenia należy sprawdzić dla osadów z dekarbonizacji wody:

1. Stateczność warstwy uszczelnienie na skarpie, przyjmując wartości kąta tarcia wewnętrznego ϕ_s i spójności c_s na podstawie nomogramu (Rys.Z.V) wg zaleceń [4].
2. Podatność na odkształcenia i wpływ naprężeń zginających na możliwość utraty ciągłości warstwy, przyjmując wartość wytrzymałości na ściskanie $R_c \approx 200$ kPa i wytrzymałości na rozciąganie $R_r \approx 70$ kPa, wg zaleceń [4].
3. Wielkość osiadań warstwy uszczelnienia, przyjmując wartości edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej $M_0 = 11,9$ MPa, wg normy [1].

1.3. ZALECENIA DO WYKONAWSTWA

Zalecenia do wykonawstwa opracowano na podstawie najnowszej Instrukcji ITB dotyczącej badań gruntów i kontroli jakości wykonanych z nich mineralnych warstw uszczelniających [5]:

1. W celu uzyskania maksymalnej skuteczności ochrony środowiska naturalnego przed zanieczyszczeniem odciekami powstającymi na składowisku zaleca się wykonywanie systemów uszczelnień podwójnych złożonych, czyli systemów warstw naturalnych dodatkowo uzupełnionych warstwami syntetycznymi.
2. Warstwę uszczelnienia należy wykonywać na specjalnie do tego celu przygotowanym podłożu, tj. oczyszczonym z humusu, kamieni i innych zanieczyszczeń, wyrównanym i zagęszczonym do wskaźnika zagęszczenia co najmniej $I_s \geq 0,95$.
3. Przed wbudowaniem w konstrukcję, dla każdej partii osadów z dekarbonizacji wody należy oznaczyć wymagane parametry geotechniczne, w badaniach laboratoryjnych i polowych.

4. Uszczelnienie wykonywane z osadów należy formować warstwami o stałej grubości przy wilgotności formowania $w \approx 31\%$, zagęszczając do wymaganego wskaźnika zagęszczenia. Grubość zagęszczanej warstwy, rodzaj i liczbę przejść maszyny zagęszczającej po jednym śladzie oraz gęstość objętościową szkieletu należy ustalić na poletku doświadczalnym. W prowadzonych badaniach na poletku należy również zweryfikować wyznaczoną w badaniach laboratoryjnych wilgotność formowania oraz określić przepuszczalność hydrauliczną wykonywanych warstw.
5. Warstwa nie powinna być wykonywana podczas opadów atmosferycznych, w okresie zimowym oraz przy silnym promieniowaniu słonecznym.
6. Po wykonaniu warstwy uszczelnienia powinna być przeprowadzona kontrola jakości jej wykonania.
7. Wykonane warstwy uszczelnienia należy odpowiednio zabezpieczyć przed nadmiernym zawilgoceniem, wysuszeniem i przemarzaniem.

1.4. PODSUMOWANIE

Analiza warunków wbudowania osadów w warstwę uszczelnienia prowadzi często do wykluczających się wzajemnie wytycznych i nie można określić jednego uniwersalnego zagęszczenia i odpowiadającej temu zagęszczeniu optymalnej wilgotności formowania, przy osiągnięciu których, na etapie wbudowywania, wszystkie wymagane dla bezpiecznego składowania osadów cechy warstwy uszczelnienia, będą przyjmowały najkorzystniejsze wartości. Gwarancję jakości i skuteczności uszczelnienia może zapewnić jedynie właściwe wykonanie warstwy oraz odpowiednie jej zabezpieczenie na etapie budowy i eksploatacji.

1.5. LITERATURA

- [1] PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Oznaczenia statyczne i projektowanie.
- [2] PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- [3] PN-88/B-04300 Cement. Metody badań. Oznaczanie cech fizycznych.
- [4] Geoteko (1994): Geotechnika składowiska odpadów. Projektowanie i roboty zabezpieczające. Zalecenia techniczne. Warszawa, 1994.
- [5] Majer E., Wysokiński L. (2005): Badania gruntów i kontrola jakości wykonanych z nich przesłon izolacyjnych na składowiskach odpadów. Instrukcja ITB nr 411/2005, Warszawa, 2005.



BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Warszawskiej

C. 132047



40000000140512