

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA
INSTYTUT GEOTECHNIKI

PRACA DOKTORSKA

**WŁAŚCIWOŚCI OSADÓW SPOISTYCH
JEZIORA ROŻNOWSKIEGO W ASPEKCIE
ICH GEOTECHNICZNEGO WYKORZYSTANIA**

Autor:

mgr inż. RAFAŁ GWÓŹDŹ

Promotor:

dr hab. inż. MIECZYŚLAW WACŁAWSKI, prof. P.K.

KRAKÓW 2007



Spis treści:

Wstęp	5
Teza pracy doktorskiej:	7
Rozdział 1	8
1.1. Zarys historyczny, cel powstania i charakterystyka zapory w Rożnowie	8
1.2. Charakterystyka zlewni Jeziora Rożnowskiego	8
1.2.1. Morfologia i hydrografia.....	8
1.2.2. Budowa Geologiczna	9
1.3. Opis procesu załadownia.....	13
1.4. Dotychczasowe badania stanu załadowania zbiornika rożnowskiego	15
Rozdział 2	19
2.1. Budowle ziemne	19
2.1.1. Dobór gruntów do formowania budowli ziemnych	19
2.2. Drogowe budowle ziemne	25
2.2.1. Dobór gruntów do formowania nasypów drogowych.....	25
2.3. Zapory ziemne	27
2.3.1. Dobór gruntów do budowy zapór ziemnych.....	28
2.4. Niskie nasypy dla celów budownictwa wodno-melioracyjnego	33
2.5. Zagęszczone przesłony mineralne	37
2.5.1 Rodzaje przesłon mineralnych w składowisku odpadów	42
2.5.1.1 Przesłony uszczelniające dno i skarpy składowiska.....	43
2.5.1.2 Przesłony uszczelniające powierzchnię składowiska	47
2.5.1.3 Przesłony pionowe.....	48
2.5.2 Wymagania dotyczące gruntów naturalnych do budowy przesłon w składowiskach odpadów.....	49
2.5.2.1 Kryterium wodoprzepuszczalności.....	50
2.5.2.2 Kryterium uziarnienia.....	51
2.5.2.3. Kryterium plastyczności	52
2.5.2.4. Kryterium mineralogiczne	53
Rozdział 3	56
3.1 Charakterystyka badań terenowych i laboratoryjnych	56
3.2 Analiza makroskopowa osadów dennych Jeziora Rożnowskiego	58
3.3 Oznaczenie składu mineralnego	59
3.4 Analiza granulometryczna i określenie rodzaju gruntu.....	60
3.5 Zawartość części organicznych	64
3.6 Właściwości fizyczne	69
3.6.1 Wilgotność naturalna	69
3.6.2 Gęstość objętościowa	69
3.6.3 Gęstość właściwa szkieletu gruntowego	70
3.6.4 Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, współczynnik porowatości całkowitej, wskaźnik porowatości	71
3.6.5 Granice konsystencji	73
3.6.6 Właściwości sorpcyjne.....	76
3.6.7 Odczyn (pH).....	79
3.6.8 Wydzielenie charakterystycznych typów gruntu	79
3.6.8 Wilgotność optymalna i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	81
3.6.9 Współczynnik filtracji	85
3.6.9.1 Badanie w aparacie trójosiowego ściskania	88

3.6.9.2 Badania w cylindrze aparatu Proctora oraz w edometrze	90
3.7 Właściwości mechaniczne.....	93
3.7.1 Wskaźnik pęcznienia.....	93
3.7.2 Ścisłość gruntów	95
3.7.3 Wytrzymałość na ścinanie	99
3.8. Zestawienie zbiorcze parametrów geotechnicznych	102
3.9 Ocena właściwości gruntów powstałych przez namywanie na podstawie badań doświadczalnych.....	104
Rozdział 4.....	109
4.1 Ocena osadów w świetle przepisów ustawy o odpadach.	109
4.2. Ocena przydatności osadów jako materiału do budowy nasypów.....	113
4.2.1. Ocena osadów w oparciu o normę PN-B-06050 z 1999 r.....	113
4.2.2. Ocena osadów w oparciu o normę PN-S-02205 z 1998 r.....	114
4.2.3. Ocena przydatności osadów jako materiału do wznoszenia wodnych budowli ziemnych.	116
4.3. Ocena przydatności osadów do budowy warstw izolacyjnych w składowiskach odpadów.	118
4.3.1. Kryterium przepuszczalności.....	120
4.3.2. Kryterium uziarnienia	120
4.3.3. Kryterium plastyczności	121
5. Podsumowanie i wnioski.....	125
6. Spis literatury	129
6.1. Ustawy, normy i zalecenia:.....	129
6.2. Literatura:.....	130
7. Spis załączników	137

Wstęp

W dwudziestym wieku w Polsce wybudowano na rzekach kilkadziesiąt zbiorników wodnych. Było to związane m.in. ze zwiększonym zapotrzebowaniem na wodę, zarówno dla dynamicznie rozwijającego się przemysłu, jak i zwiększonego zapotrzebowania na wodę pitną dla niektórych miast, szczególnie południowej Polski. W Polsce ogółem wybudowano 43 zapory ziemne i betonowe o wysokości powyżej 15 m, oraz wiele mniejszych [Debczyński W., Szamowski A., 1999]. Do największych należą zapory w Solinie, Rożnowie, Dobczycach, Włocławku, Niedzicy, kaskada zbiorników na rzece Sole. Głównym celem powstających zbiorników jest:

- retencja wód dla celów pitnych, energetycznych i przemysłowych,
- ochrona przeciwpowodziowa,
- utworzenie akwenów dla celów turystyczno-rekreacyjnych,
- podniesienie zwierciadła wody dla żeglugi.

Budowa zapory stanowi naturalną przeszkodę dla materiału mineralnego transportowanego przez rzeki w dużych ilościach, szczególnie w okresach powodziowych. W wyniku tych zjawisk, intensywnie występujących w zbiornikach rzek górskich, rozwija się proces załadowania, już od samego początku piętrzenia wody. Informacje na temat tej problematyki możemy znaleźć m.in. w pracach Onoszki J. [89,90,91], Cyberskiego J. [43,44], Lajczaka A. [74], Sobczaka J. [102], Stanowskiego J. [105], Mrocza J., Ratomskiego J., Waclawskiego M. [84] Ratomskiego J [96]i innych.

Proces załadowania zbiorników stanowi duży problem w ich prawidłowym funkcjonowaniu, ujemnie wpływa na zdolności retencyjne, co w konsekwencji przekłada się na jego długowieczność. Utrudnia to prowadzenie prawidłowej gospodarki wodnej, obniża jakość wód pitnych, może stanowić miejsce gromadzenia się zanieczyszczeń np: metali ciężkich, pestycydów, związków eutrofizujących itp. Dodatkowo przy niskich stanach zbiornika osady cofkowe mogą być rozmywane, powodując zmętnienie wody i uwalnianie zanieczyszczeń z osadów dennych. Ważnym problemem jest również zmniejszanie się ochrony przeciwpowodziowej, ograniczenie zdolności produkcyjnej energii elektrycznej i atrakcyjności rekreacyjno-turystycznej.

Stanowski J. [105], analizując stan załadowania zbiorników retencyjnych w dorzeczu górnej Wisły, stwierdził, iż średnie roczne załadowanie w obrębie

zbiorników wynosi 0,052–1,359 mln m³/rok, co stanowi od 0,02 do 1,2 % początkowej całkowitej pojemności zbiornika.

Szczegółowej analizie w niniejszej pracy poddany został zbiornik rożnowski, z następujących powodów; problem załadowania jest w tym obiekcie największy ze wszystkich sztucznych zbiorników zlokalizowanych w dorzeczu Górne Wisły (ok. 27–30 % pojemności całkowitej), a skutki tego procesu najbardziej uciążliwe. Drugi powód związany jest z dużą powierzchnią zlewni Dunajca, z której transportowany materiał może być reprezentatywny dla całego obszaru Karpat Zewnętrznych, a właściwości zgromadzonych osadów mogą być podobne do osadów zgromadzonych w innych zbiornikach retencyjnych w tym rejonie.

Duży zakres i znaczenie załadowania zbiornika rożnowskiego skłoniło autora do podjęcia badań doświadczalnych, mających na celu rozpoznanie i ocenę właściwości zdeponowanego w cofce materiału gruntowego. Poznanie właściwości geotechnicznych osadu mogłoby mieć w przyszłości wpływ na podjęcie decyzji, co do możliwości zagospodarowania tych osadów w budownictwie. Jest to tym bardziej istotne ponieważ istnieje powszechna opinia, że zgromadzony tam materiał jest nieprzydatny w budownictwie, a eksploatacja dla celów rolniczych bardzo kosztowna. Należy jednak zauważyć, że z zamuleniem zbiornika wiążą się też inne problemy gospodarcze. Ważnym elementem w funkcjonowaniu i roli zbiornika rożnowskiego jest jego ochrona przeciwpowodziowa. Ogromna powódź z 1997 r. Spowodowała bardzo duże i kosztowne zniszczenia szczególnie w miastach zachodniej Polski. Podobny scenariusz mógł spotkać południową Polskę. Na szczęście wiosną 1997 r. została oddana do użytkowania zapora w Niedzicy, która przejęła znaczną część wód powodziowych ze zlewni górnego biegu Dunajca, co w konsekwencji ochroniło wiele miast znajdujących się w dolinie Dunajca przed podtopieniem. Zapora w Rożnowie zapewne nie byłaby w stanie przejąć tak dużej ilości wody, gdyż pojemność zbiornika jest o ok. 30 % mniejsza od pojemności początkowej.

Kolejny aspekt rozważań związanych z załadowaniem zbiornika szczególnie w jego górnej części dotyczy problemów ochrony środowiska oraz rozwoju, a raczej powolnego zaniku turystyki i rekreacji wodnej. Znacznie zmniejszył się obszar żeglowny, przez co turystyka w Tęgoborzy w zasadzie zamarła. Zgromadzony osad porośnięty roślinnością stał się barierą, który zatrzymuje wszystko, co niesie ze sobą Dunajec w stanach powodziowych.

Szersze spojrzenie na ten problem pokazuje, iż częściowe wydobycie i zagospodarowanie osadów dennych zbiornika mogłoby w konsekwencji przynieść o wiele większe zyski niż koszty poniesione przy ich pozyskiwaniu.

Teza pracy doktorskiej:

Wyjaśnienie tej kwestii, stanowiącej cel i przedmiot niniejszej rozprawy, oparto na następującej tezie: osady spoiste zgromadzone w cofce zbiornika rożnowskiego można wykorzystać jako materiał do formowania budowli ziemnych, w szczególności do budowy nasypów drogowych, budowli hydrotechnicznych oraz przesłon mineralnych w składowiskach odpadów.

Wskazanie kierunków wykorzystania badanego materiału będzie możliwe dzięki poznaniu jego właściwości geotechnicznych, które zostaną w większości wykonane przez autora niniejszej pracy w ramach badań własnych.

Osady, współcześnie deponowane w cofce zbiornika rożnowskiego w znacznej części badanego obszaru, zalegają bezpośrednio na holocenijskich madach Dunajce, które są, podobnie jak osady cofkowe, utworami facji powodziowej. Ten materiał mógłby również zostać wykorzystany w budownictwie ziemnym, tym bardziej, iż granica między poszczególnymi formacjami może być trudna do uchwycenia. Ocena właściwości geotechnicznych osadów gromadzonych współcześnie w cofce zbiornika rożnowskiego i osadów powstających na tarasach zalewowych Dunajca stanowić będzie cenne uzupełnienie wiedzy na temat charakteru deponowanego w tym rejonie osadu. Może również posłużyć jako materiał porównawczy dla podobnych obiektów wybudowanych w rejonie południowej Polski.

Rozdział 1

1.1. Zarys historyczny, cel powstania i charakterystyka zapory w Rożnowie

Koncepcja budowy zbiornika rożnowskiego powstała pod koniec I wojny światowej w 1917 r. Projekt oraz budowę zapory w Rożnowie zrealizowano w okresie międzywojennym dwudziestego wieku. Budowę zapory rozpoczęto na początku 1935 r., a ukończono i oddano do użytkowania jesienią 1941 r. Powstała ona na 80-tym kilometrze Dunajca jako zaporę betonową, o wysokości 49 m. Głównym zadaniem zbiornika rożnowskiego miał być produkcja energii elektrycznej oraz ochrona przeciwpowodziowa, gdyż Dunajec często wylewał i powodował ogromne zniszczenia w tym rejonie [Onoszko J., 1959].

Charakterystyka zbiornika rożnowskiego przedstawia się następująco:

- powierzchnia zlewni w przekroju zapory wynosi 4 883 km²,
- całkowita pojemność zbiornika dla rzędnej 270,0 m n.p.m. – 228,7 mln. m³,
- powierzchnia pełnego zbiornika – 1 776 ha, długość – 22 km, maksymalna szerokość – 1,5 km, głębokość przy zaporze – 35 m,
- przeciętny z wielolecia roczny spływ wody – 2,35 mlrd m³,
- roczny spływ lat powodziowych – ok. 3,5 mlrd m³.

1.2. Charakterystyka zlewni Jeziora Rożnowskiego

1.2.1. Morfologia i hydrografia

Zlewnia Jeziora Rożnowskiego leży w rejonie następujących jednostek geomorfologicznych Polski: Tatr Wysokich i Zachodnich, Podhala, Pienin, Gorców, Beskidu Sądeckiego i Wyspowego, Kotliny Sądeckiej i Pogórza Rożnowskiego.

Tatry charakteryzuje rzeźba wysokogórska, ukształtowana w okresie zlodowaceń czwartorzędowych. Tatry Wysokie tworzą wysokie grzbiety górskie o bardzo stromych

skalistych stokach poprzecinane szeregiem dolin polodowcowych m.in. Białej Wody i Suchej Wody. Tatry Zachodnie nieco niższe, są porozcinane m.in. dolinami: Chochołowską, Kościeliską i Bystrej. Obniżają się w kierunku północnym, tworząc łagodne progi zwane Tatrami Regłowymi o wysokości 1 300–1 500 m n.p.m. W Tatrach bierze swój początek rzeka Dunajec, która powstała w wyniku połączenia się dwóch potoków; Czarnego i Białego Dunajca. Pomiedzy Tatrami a Pieninami znajduje się Podhale, którego zasadniczą strukturą jest szeroka i płaska Kotlina Orawsko-nowotarska. Pieniny tworzą grzbiet górski, rozciągający się równoleżnikowo, o bardzo stromych, czasami pionowych ścianach, co można zauważyć w okolicach Trzech Koron. Dalej na północ rozciągają się niższe zaokrąglone grzbiety o łagodnych zboczach i szerokich dolinach budujących Gorce, Beskid Wyspowy i Sądecki. Teren obniża się w kierunku Kotliny Sądeckiej, gdzie poniżej Starego Sącza Dunajec łączy się z Popradem. Powierzchnia Zlewni Dunajca do ujścia Popradu wynosi 2 242 km², natomiast powierzchnia zlewni Popradu, który drenuje południowe stoki Tatr Wysokich po stronie Słowackiej wynosi 2080,7 km² [Stanowski J., 1993]. Kotlina Sądecka ma zarys trójkąta, swój obecny kształt zawdzięcza erozyjnej działalności Dunajca, Popradu i Kamienicy, wpadającej do Dunajca w Nowym Sączu. Płaskie dno kotliny opada od 310,0 do 270,0 m n.p.m., zwiężając się w kierunku południowym. W obrębie Pogórza Rożnowskiego, pomiędzy wzgórzami Ostra Góra (459,5 m n.p.m.) i Łaziska (323,0 m n.p.m.) została zbudowana zapora w Rożnowie.

1.2.2. Budowa Geologiczna

Zlewnia Dunajca leży w obrębie dwóch jednostek geologicznych; Karpat Wewnętrznych obejmujących Tatry, Podhale i Pieniny oraz Karpaty Zewnętrzne obejmujących pasmo Gorców, Beskid Wyspowy i Sądecki, Kotlinę Sądecką i Pogórze Rożnowskie.

Podłoże przedczwartorzędowe Tatr [Książkiewicz M., 1972, Waclawski M. i in., 2005] w południowej części tworzy paleozoiczny trzon krystaliczny złożony ze skał magmowych i metamorficznych. Północną część Tatr budują skały osadowe powstałe w okresie od triasu po starszy eocen. Najliczniej reprezentowane są tu wapienie i dolomity. Prócz nich występują zlepieńce, piaskowce, łupki i margle. Utwory

czwartorzędowe występują głównie w obrębie polodowcowych rynien morfologicznych i dolin potoków. Na zboczach rynien i dolin występują stożki usypiskowe i piargi zbudowane z rumoszu skalnego oraz pokrywy gruzowo-gliniastych utworów morenowych. Na dnie dolin potoków występują pokrywy otoczków i gruboziarnistych żwirów rzeczno-lodowcowych. Na stokach łagodnie nachylonych występują pokrywy utworów zwietrzelinowych lub soliflukcyjnych.

Przedczwartorzędowe podłoże Niecki Podhalańskiej tworzą osady trzeciorzędowe w spągowej części wykształcone jako kompleks zlepieńców, dolomitów, wapieni i margli. Ponad nimi występuje seria piaskowcowo-łupkowych osadów określanych jako flisz podhalański. Pokrywę czwartorzędową na obszarze Niecki Podhalańskiej tworzą utwory fluwioglacjalne i rzeczne wykształcone jako osady żwirowo-piaszczyste oraz utwory zboczowe występujące na stokach dolin i wzniesień, które są reprezentowane przede wszystkim przez gliniasto-rumoszowe zwietrzeliny fliszu podhalańskiego.

W budowie przed czwartorzędowego podłoża Pienin biorą udział utwory z okresu jury i kredy wykształcone jako wapień, rogowce i radiolaryty, z przewarstwieniami margli, łupków marglistych, łupków i piaskowców oraz utwory trzeciorzędowe reprezentowane przez zlepieńce, piaskowce, margle i łupki. Pokrywę czwartorzędową tworzą tu głównie plejstocenijskie osady fluwioglacjalne i rzeczne, a także współczesne osady rzeczne. Osady plejstocenijskie są zgromadzone w stożkach napływowych potoków wypływających z Tatr i Podhala, wykształcone jako otoczaki i żwiry, przeważnie przykryte madami, gliniastymi utworami deluwialnymi i soliflukcyjnymi. Holocenijskie osady rzeczne tworzą dwa tarasy akumulacyjne reprezentowane przez żwiry przykryte madami gliniastymi.

Karpaty zewnętrzne zwane również fliszowymi stanowią masyw o skomplikowanej tektonice płaszczowinowo-fałdowej. Serie skalne, głównie osadów fliszowych z okresu górnej jury, kredy i starszego trzeciorzędu, zostały sfałdowane i nasunięte na siebie w czasie trzeciorzędowej orogenezy alpejskiej. Utwory te, w całym rejonie Gorców, Beskidu Wyspowego i Sądeckiego, tworzą skaliste podłoże terenu i są reprezentowane głównie przez naprzemianlegle ułożone piaskowce i łupki ilaste oraz w mniejszym zakresie zlepieńce, mułowce, margle i wapień. Sfałdowane i odkłute od starszego podłoża warstwy fliszu utworzyły szereg odrębnych, ponasuwanych na siebie jednostek tektonicznych, zwanych płaszczowinami. Przesuwając się z południa na północ spotykamy utwory następujących płaszczowin; magurskiej, podmagurskiej, śląskiej

i podśląskiej. Zlewnia Dunajca, do zapory w Rożnowie, prawie w całości występuje w obrębie płaszczowiny magurskiej. Granica między płaszczowiną magurską a śląską przebiega w okolicy południowej granicy Kotliny Sądeckiej wzdłuż miejscowości Librantowa, Dąbrowa, Zbyszyce, Tęgoborze, Męcina. Pogórze Rożnowskie, w obrębie którego jest zbudowana zapora w Rożnowie, należy już do Płaszczowiny Śląskiej. Obszar Pogórza Rożnowskiego budują mniejsze jednostki tektoniczne m.in. synklina Wojnarowej, antyklina Jankowej, synklina Bobowej, antyklina Rożnów-Ciężkowice, antyklina Czchowa [108]. Odślaniają się tu głównie wychodnie warstw istebniańskich i krośnieńskich. Warstwy istebniańskie dolne są wykształcone jako piaskowce gruboławicowe, zlepieńce i łupki, piaskowce cienkoławicowe, wapniste i łupki ilaste (wiek: senon, kreda górna). Warstwy istebniańskie górne są wykształcone jako piaskowce gruboławicowe i zlepieńce oraz łupki ciemnoszare z wkładkami piaskowców cienkoławicowych i sydereytów (wiek: senon-paleocen, kreda-trzeciorzęd). Warstwy krośnieńskie to piaskowce cienko- i gruboławicowe oraz łupki (wiek: oligocen, trzeciorzęd). Lokalnie odślaniają się warstwy menilitowe wykształcone jako łupki, piaskowce i rogowce (wiek: oligocen, trzeciorzęd). W strefie brzeżnej płaszczowiny magurskiej, w północnej części Kotliny Sądeckiej odślaniają się wychodnie warstw krośnieńskich i grybowskich tj. łupki i piaskowce (wiek: oligocen, trzeciorzęd) należące do jednostki grybowskiej. Obszar Nowego Sącza, czyli centralnej części Kotliny Sądeckiej leży w obrębie jednostki raczańskiej. Występują tu głównie wychodnie warstw inoceramowych, czyli piaskowce, łupki i margle (wiek: kreda górna-trzeciorzęd) oraz łupki pstry (wiek: paleocen-eocen, trzeciorzęd). Południową część Kotliny Sądeckiej budują utwory jednostki bystrzyckiej, głównie piaskowce magurskie z Maszkowic, wykształcone jako piaskowce gruboławicowe i łupki z wkładkami margli łąckich (wiek: eocen, trzeciorzęd) oraz warstwy beloweskie zbudowane z piaskowców cienkoławicowych, łupków i łupków pstrych (wiek: eocen, trzeciorzęd). Najmłodsze osady trzeciorzędowe występujące w Kotlinie Sądeckiej to osady ilaste morza mioceńskiego – warstwy biegonickie, wykształcone jako mułki, łupki ilaste i ility.

Na zboczach dolin rzecznych i wzniesień utwory podłoża fliszowego są praktycznie na całym obszarze Karpat przykryte pokrywą czwartorzędowych utworów zboczowych. Utwory te są reprezentowane przez następujące typy genetyczne: zwietrzliny, koluwia i deluwia. Zwietrzliny są wykształcone jako różnego rodzaju gliny, zwietrzliny gliniaste złożone z okruchów skalnych i materiału drobnoziarnistego o różnym udziale procentowym poszczególnych frakcji, w dolnych partiach przechodzące w okruchy

skalne skał macierzystych. Duże zróżnicowanie pod względem uziarnienia wykazują również koluwia. Mogą one być reprezentowane przez różnego rodzaju spoiste grunty drobnoziarniste. Drugi, częsty rodzaj koluwiów w Karpatach, stanowią grunty o składzie ziarnowym odpowiadającym gruntom gruboziarnistym i gruntom kamienistym. W składzie tych koluwiów, podobnie jak w przypadku zwietrzelin, można wydzielić materiał drobnoziarnisty i okruchy skalne. Niejednokrotnie składniki te tworzą w pokrywach koluwalnych wkładki lub przewarstwienia. U podnóża zboczy oraz w obniżeniach i załomach morfologicznych występują powszechnie drobnoziarniste deluwia. Miąższość pokrywy czwartorzędowej zbudowanej z wymienionych wyżej trzech rodzajów utworów, mieści się w przedziale od 2 do 5 m, a niekiedy osiąga większe wartości, dochodzące nawet do kilkunastu metrów.

W dolinach rzek Karpackich podłoże fliszowe przykrywają czwartorzędowe osady rzeczne, fluwioglacjalne, a lokalnie glacialne. Osady rzeczne mają w ogólności budowę dwudzielną. Dolne partie są zbudowane z gruboziarnistych utworów (otczaków, żwirów i pospółek) należących do facji korytowej, stożków napływowych itp. Utwory te są nadbudowane madami lub pokrywami gliniastych utworów zboczowych reprezentowanymi przez różnego rodzaju gliny i pyły.

Osady czwartorzędowe Kotliny Sądeckiej są głównie związane w dolnych partiach z okresem zlodowaceń południowo-, środkowo- i północnopolskich mających miejsce w plejstocenie. Dominujące osady z tego okresu są wykształcone jako żwiry i głązy rzeczne, piaski i gliny tarasów erozyjno-akumulacyjnych. Na powierzchni odsłaniają się w okolicach centralnej części Starego i Nowego Sącza. Znaczna część osadów plejstocenu jest przykryta osadami holoceniowymi. Są to głównie żwiry i głązy rzeczne, piaski, które w stropowych partiach przechodzą w utwory gliniaste.

Szczegółowa analiza osadów zboczowych otaczających zbiornik rożnowski wykazała obecność trzech rodzajów zwietrzelin gliniastych oraz osadów gliniasto-pylastych lessopodobnych [Myślińska E. i in., 1983]:

- zwietrzeliny piaskowców i łupków o wysokim stopniu zwietrzenia wykształcone jako szaro-żółto-brunatne gliny zwięzłe i łąy o zawartości frakcji łąowej do 34 % i zawartości frakcji grubszych do 30 %,
- zwietrzeliny piaskowców i łupków o mniejszym stopniu zwietrzenia wykształcone jako żółto-brązowo-szare utwory gliniaste od piasków gliniastych do glin zwięzłych o zawartości frakcji łąowej do 38 % oraz frakcji grubszych do 78 %,

- zwietrzeliny łupków i zlepieńców o małym stopniu zwietrzenia i niewielkiej zawartości frakcji iłowej wykształcone jako szare i brązowo-szare rumosze gliniaste, piaski gliniaste, gliny piaszczyste, oraz piaski.

1.3. Opis procesu załadownia

Tempo oraz przebieg procesu załadowania jest odmienny dla każdego ze zbiorników karpackich, jednak ogólny charakter procesu jest zbliżony. Główne czynniki wpływające na proces zamulenia to [Stonawski J., 1993]:

1. Parametry hydrologiczne i hydrograficzne zlewni:
 - powierzchnia zlewni oraz sposób jej użytkowania,
 - gęstość sieci rzecznej i stan regulacji cieków,
 - wielkość opadów w zlewni i wielkość przepływu w rzekach,
 - hipsometria dorzecza.
2. Budowa geologiczna obszaru zlewni:
 - skład mineralno-petrograficzny podłoża,
 - podatność podłoża na rozwój procesów erozyjnych.
3. Geomorfologia czaszy zbiornika
 - rozwój abrazji brzegowej.

Dwa spośród wyżej wymienionych czynników; parametry hydrologiczne i hydrograficzne zlewni oraz budowa geologiczna zlewni zasadniczo decydują o postępie procesu załadowania w obrębie zbiornika rożnowskiego, dostarczając ok. 96 % materiału. Pozostałe 4 % to osad deponowany w jeziorze, w wyniku abrazji brzegowej [Onoszko J., 1959]

Analizując charakter rumowiska dostarczonego do zbiorników retencyjnych można zauważyć duże zróżnicowanie frakcjonalne deponowanego materiału, od frakcji kamienistej aż do iłowej. Proces transportu materiału uruchamia się głównie podczas przepływów powodziowych, gdyż wtedy rzeka posiada największą energię. Można wyróżnić dwa typy rumowiska deponowanego w zbiorniku retencyjnym, tzw. rumowisko wleczone i unoszone [Mroczek J., Ratomski J., Waclawski M., 1997].

Rumowisko wleczone jest transportowane i sedymentowane w zbiorniku w obrębie dawnego koryta rzecznej. Jest to materiał grubo-, średnio- i drobno-ziarnisty

reprezentowany przez frakcję kamienistą, zwirową i w mniejszej ilości piaskową. W rumowisku tym zauważyć można wyraźną segregację materiału w kierunku przepływu wody, od największej do najmniejszej średnicy ziaren. Wraz z rumowiskiem gruboziarnistym przemieszczają się i sedymentują osady piaszczyste. Odkład rumowiska gruboziarnistego jest zlokalizowany w górnej i środkowej części zbiornika, jego miąższość wzrasta w kierunku spływu i osiąga swoje maksimum nieco poniżej środkowej części obszaru akumulacji. Wleczone rumowisko drobnoziarniste frakcji piaskowej jest deponowane w odkładach materiału gruboziarnistego lub w formie łań przybrzeżnych i śródkorytowych.

Transport i sedymentacja rumowiska unoszonego zachodzi głównie podczas przepływów powodziowych, wykorzystując zjawisko powstawania prądów zawieszinowych, zmniejszających swoją prędkość na drodze przepływu. Główna masa prądu zawieszinowego przemieszcza się wzdłuż dawnego koryta rzeki. Towarzyszy mu powolny odpływ zawiesziny transportującej materiał drobnoziarnisty w kierunku poprzecznym na skutek zawirowań powstających przy brzegach koryta. Charakter ruchu rumowiska unoszonego na skutek powstających prądów zawieszinowych znajduje swoje odbicie w procesie sedymentacji. Najintensywniejsza sedymentacja występuje w obszarze dawnego koryta w górnej i środkowej części. Dominującym osadem są utwory piaszczyste i piaszczysto-gliniaste osadzone w formie łań korytowych. Deponowany materiał charakteryzuje się uziarnieniem frakcjonalnym związanym z jednym cyklem powodziowym. W pierwszej kolejności sedymentują cząstki największe, tworząc osady piaszczyste, powoli przechodzące w osady piaszczysto-gliniaste, tworzące końcowy produkt cyklu powodziowego. Poza obszarem koryta rzecznego, na dawnych wyższych tarasach oraz w dolnej części zbiornika, następuje sedymentacja najdrobniejszych cząstek rumowiska unoszonego, wykształconego w postaci utworów gliniastych. Miąższość osadzanych utworów jest uzależniona od morfologii dna zbiornika, a maleje w miarę oddalania się od dawnego koryta rzeki. Największa miąższość osadów występuje w górnych partiach zbiornika, w obrębie dawnych najniższych tarasów zalewowych. Z biegiem koryta wzrasta udział frakcji ilowej, a w związku z tym sedymentacja utworów najdrobniejszych, które przy zaporze są wykształcone jako ily i ily pylaste.

1.4. Dotychczasowe badania stanu załadowania zbiornika rożnowskiego

Pierwszy pomiar stanu załadowania zbiornika Rożnowskiego został przeprowadzony po 15 latach jego użytkowania. W latach 1957 i 1960 zostały przeprowadzone kompleksowe badania terenowe zarówno dna, jak i zboczy zbiornika. Badania były prowadzone przez Instytut Budownictwa PAN w Gdańsku. Wyniki prac zostały opublikowane w pracach Onoszki J. [89,90,91]. Wykonane w 1957 i 1960 r. dały ogólny pogląd dotyczący przebiegu procesu załadowania oraz ilościowej oceny zdeponowanego materiału. Ustalono, że dominujące znaczenie w procesie zamulenia mają osady niesione przez rzekę Dunajec, szczególnie podczas wysokich stanów powodziowych. Stanowią one ok. 90 % zdeponowanego materiału, pozostałą część uzupełniają potoki oraz abrazja brzegowa. Lokalizacja tych osadów na terenie zbiornika nie jest korzystna, większość materiału gromadzi się w górnej partii zbiornika w okolicy cypla zbyszycckiego. Maksymalna miąższość osadów pomierzona w 1957 r. wyniosła od 4 do 5 m, natomiast w 1960 r. już 6 m. Osady te zlokalizowano na dolnych tarasach dawnego koryta Dunajca. Oddalając się stopniowo od dawnego koryta miąższość osadów malała do 2 do 4 m. Średnie zamulenie zbiornika obliczone w 1957 r. wyniosło 1,92 mln m³/rok. Obserwacje zweryfikowane w 1960 r. pokazały, iż wartość załadowania jest nieco mniejsza i wynosi 1,81 mln m³/rok w okresie 16 lat użytkowania, natomiast w latach 1957–1960 – 1,66 mln m³/rok.

Te wyniki potwierdziły pogląd, iż proces załadowania zbiorników maleje w czasie i przebiega podobnie jak w innych zbiornikach opisywanych w literaturze światowej. Onoszko J. przebadał wybrane cechy fizyczne materiału osadzonego w obrębie całego zbiornika. Stwierdził, iż są to osady pochodzenia mineralnego z nielicznie występującymi częściami organicznymi, do kilku procent. Mają one charakter młodych, luźnych osadów gliniastych. Osady piaszczyste występują tylko lokalnie przy ujściach potoków oraz w okolicy mostu w Kurowie. Średnica zastępcza d_{50} mieści się w granicach 0,025–0,0016 mm natomiast gęstość objętościowa $\rho = 1,27 - 1,40 \text{ g/cm}^3$.

Drugim źródłem osadów dennych dostarczanych do zbiornika rożnowskiego jest dynamiczne oddziaływanie wód na brzegi w wyniku czego rozwija się proces abrazji.

Onoszko J. analizując charakter brzegów wyróżnił cztery typy:

- brzegi ustabilizowane – stanowią ok. 33 % linii brzegowej, praktycznie nie mają wpływu na proces załadowania,

- brzegi rumoszowe i skaliste o wys. 3–8 m – stanowią ok. 50 % linii brzegowej, posiadają niewielką plażę rumoszową zakończoną niewysokim klifem skalistym. Praktycznie nie mają znaczenia dla procesu zamulenia, dostarczają niewielką ilość rumoszu skalnego w głąb zbiornika,
- brzegi skaliste wysokości 5–30 m – stanowią ok. 6 % linii brzeg. Tworzą brzegi urwiste i strome, rozwijające się na wychodniach gruboławicowych piaskowców, dostarczają pojedyncze głazy do zbiornika, ale nie mają większego znaczenia dla omawianego zjawiska,
- brzegi gliniaste wys. 2–7 m – stanowią ok. 11 % linii brzegowej. Występują głównie w rejonie Zbyszyc, Znamirowic i Bartkowej. Są to osady stokowe wykształtowane głównie jako pyły piaszczyste, piaski pylaste i gliniaste. Mają one pewien wpływ na zamulenie zbiornika, dostarczając około 50 tys. m³/rok materiału, co stanowi od 2 do 4 % całkowitego osadu dennego.

Charakterystykę procesów denudacyjnych rozwijających się w górnej części Jeziora. Rożnowskiego podejmował w pracy badawczej Cyberski J. [43,44], prowadząc badania terenowe w latach 1961–1964. Stwierdził on, iż abrazja brzegów gliniastych jest źródłem większości materiału dennego pochodzącego z rozwoju procesu denudacji brzegów. Brzegi gliniaste są zbudowane z glin zwietrzelinowych lessopodobnych i tworzą strome, prawie pionowe ściany. Badania pokazały, że średnia roczna denudacja brzegów gliniastych w rejonie Znamirowic wynosi w niektórych miejscach 4,2 m (max. 8 m), a w Zbyszycach 2 m. Na skutek denudacji brzegów rocznie do zbiornika jest dostarczane ok. 20 tys. m³ rumowiska, co stanowiło w tym okresie ok. 1 % rocznego załadowania. Przeprowadzona analiza granulometryczna wykazała zmniejszanie się osadu w kierunku mniejszych cząstek w miarę oddalania się od brzegu, a w odległości ok. 100 m materiał granulometrycznie nie różni się od osadu pobranego w centralnej części tzw.: Wielkiego Plosa. Można z tego wnioskować, iż denudacja brzegów gliniastych ma wpływ na załadowanie tylko w strefie przybrzeżnej. Analiza granulometryczna osadu dennego w rejonie odsłonięcia w Znamirowicach wykazała, iż w strefie brzegowej występują piaski gliniaste ($f_p \approx 86 \%$, $f_{II} \approx 11 \%$, $f_i \approx 3 \%$), 5 m od brzegu glina ($f_p \approx 57 \%$, $f_{II} \approx 31 \%$, $f_i \approx 12 \%$), 25 m od brzegu – glina pylasta ($f_p \approx 25 \%$, $f_{II} \approx 59 \%$, $f_i \approx 16 \%$), 50 m od brzegu – glina pylasta ($f_p \approx 10 \%$, $f_{II} \approx 71 \%$, $f_i \approx 19 \%$) natomiast 100 m od brzegu il pylasty ($f_p \approx 4 \%$, $f_{II} \approx 64 \%$, $f_i \approx 32 \%$).

Zbadana zawartość części organicznych w badanych próbkach zmieniła się w zależności od brzegu od 2 do 10 %.

Od 1980 r. badania stanu załadowania zbiornika rożnowskiego wykonywał Zakład Budownictwa Wodnego Politechniki Krakowskiej. Autorzy opracowania [Sobczak J., i in., 1985] stwierdzili (zgodne z wcześniejszymi prognozami) zmniejszanie się tego procesu. W okresie 1980–1985 osadziło się ok. 2,37 mln m³ osadu, czyli 0,474 mln m³/ rok. Zauważono zwiększanie się załadowania w rejonie delty Dunajca powyżej mostu Kurowskiego. W związku z tym potwierdził się pogląd wysunięty przez Onoszkę J. [91], iż rumowisko odkładane w cofce zbiornika z czasem tworzy pewnego rodzaju naturalną zaporę powodującą zmniejszanie się spadku podłużnego, co pociąga za sobą zmniejszenie prędkości wód dopływających do zbiornika i osadzanie się materiału powyżej cofki zbiornika w delcie Dunajca w Kurowie.

W latach dziewięćdziesiątych została wykonana przez Państwowy Instytut Geologiczny z Warszawy analiza osadów dennych zgromadzonych w cofce zbiornika rożnowskiego [Wojciechowski A., 1994]. Celem przeprowadzonych badań było ustalenie rozprzestrzenienia, miąższości i kubatury mułów oraz określenie właściwości chemiczno-rolnych. Pracami badawczymi objęto odcinek doliny Dunajca od mostu w Kurowie do przewężenia Jeziora Rożnowskiego na wysokości Sienna–Znamirówice. Wykonano 23 otwory badawcze penetrometrem ręcznym w siatce otworów 500 x 500 m (\pm 25 m). Materiał pobierano w interwałach o długości 1 m. Otrzymany materiał przesiewano przez sита 0,2 mm, 1 mm, 2 mm. Do oznaczeń chemicznych użyto próbek osadów drobnoziarnistych frakcji poniżej 0,2 mm, natomiast frakcji grubszych nie analizowano. Zakres badań obejmował oznaczenie wapnia Ca, magnezu Mg, potasu K i fosforu P, kadmu Cd, miedzi Cu, cynku Zn, ołowiu Pb, chromu Cr, węgla, pestycydów DDT i jego metabolitów, pojemności sorpcyjnej, kwasowości hydrolitycznej, zawartości kationów wymiennych, minerałów ciężkich (ilmenitu, rutylu, monacytu, tlenków Fe, granatów), jonu amonowego NH₄, fosforu P, glinu Al, żelaza Fe, pH.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że zdeponowane muły to grunt drobnoziarnisty piaszczysto-pylasto-ilasty, barwy od jasno- do ciemno-szarej. Udział frakcji poniżej 0,2 mm wynosi 79 %, frakcji 0,2–1 – mm 19,7 %, frakcji 1–2 mm – 0,7 %, a frakcji powyżej 2 mm – 0,6 %. Ich średnia miąższość wynosi 3,5 m,

a maksymalna 8,2 m. Objętość nagromadzonego osadu w tej części jeziora wynosi ok. 23,5 mln m³. Autorzy opracowania, w rozważaniach na temat wykorzystania osadów dennych, wykluczyli ich wykorzystanie jako surowca do przemysłowej produkcji płukanych piasków budowlanych, ze względu na niską zawartość frakcji powyżej 1 mm oraz złoża do pozyskiwania ciężkich minerałów użytecznych. Za bardzo korzystne uznali właściwości chemiczno-rolne, które pozwalają na ich wykorzystanie w rolnictwie i ochronie środowiska w postaci materiału do rekultywacji i restytucji obszarów zdegradowanych i skażonych.

Rozdział 2

2.1. Budowle ziemne

Budowle ziemne stanowią bardzo ważne miejsce w budownictwie lądowym i hydrotechnicznym. Gwałtowny rozwój przemysłu komunikacyjnego wymusił budowę dróg samochodowych i kolejowych. Pozyskiwanie nowych atrakcyjnych terenów pod budownictwo spowodowało wkraczanie człowieka w obszar dolin rzecznych, często ulegających okresowym zalaniom przez powodzie. Spowodowało to potrzebę regulacji rzek poprzez budowę kanałów, wałów przeciwpowodziowych i zapór ziemnych. Dużo miejsca szczególnie w ostatnim dwudziestoleciu poświęca się budowie przesłon mineralnych, które stały się niezbędnym elementem konstrukcyjnym składowisk odpadów. Do najistotniejszych budowli ziemnych należy zaliczyć:

- nasypy drogowe i kolejowe,
- zapory ziemne,
- niskie nasypy budownictwa wodno – melioracyjnego,
- przesłony mineralne.

W Polsce najczęściej stosowanym dokumentem regulującym właściwe prowadzenie i wznoszenie budowli ziemnych jest norma PN-B-06050 z 1999 r. – *Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne* [7], która zastępuje normą PN-B-06050 z 1968 r. Norma powyższa określa warunki techniczne, jakie muszą być spełnione przy wykonywaniu robót ziemnych i budowli ziemnych.

2.1.1. Dobór gruntów do formowania budowli ziemnych

Do budowy nasypów stosuje się przede wszystkim grunty naturalne, ale coraz częściej są podejmowane próby zastosowania do wznoszenia nasypów materiałów odpadowych. Przykładem może być stosowanie wyselekcjonowanych materiałów odpadowych z kopalni węgla kamiennego i brunatnego, popioły z elektrowni, odpady z hut itp. [Zawisza E., 2001].

Ekonomicznym rozwiązaniem jest używanie do budowy nasypów materiałów miejscowych, gdyż obniża to znacznie koszty inwestycyjne. Jeżeli na miejscu nie występuje odpowiedni do wbudowania materiał, wówczas często stosuje się metody polepszające właściwości gruntu poprzez:

- regulację wilgotności,
- uzupełnienie charakterystyki uziarnienia dodatkami innych gruntów,
- dodawanie cementu, wapna, bentonitu, popiołów lotnych, żużli wielkopieczowych, itp.,
- zbrojenie geotekstylami.

Przy doborze materiału do budowy nasypów wg normy PN-B-06050 z 1999 r. należy wziąć pod uwagę następujące właściwości:

- uziarnienie,
- odporność na zgniatanie,
- zagęszczalność,
- plastyczność,
- spoistość,
- zawartość części organicznych,
- agresywność chemiczną,
- obecność związków rozpuszczalnych w wodzie,
- podatność na zmiany objętościowe (grunty pęczniejące i zapadowe),
- odporność na wietrzenie.

W zależności od rodzaju budowanych nasypów, niektóre z wymienionych wyżej cech są istotne, a niektóre można pominąć. Od nasypów drogowych wymaga się przede wszystkim dużej wytrzymałości i odporności na zmianę warunków zewnętrznych. W przypadku nasypów spełniających funkcję przesłon przeciwfiltracyjnych oczekuje się przede wszystkim właściwości izolacyjnych. W związku z czym dobór materiału do budowy różnego rodzaju nasypów uzależniony jest od pełnionej w przyszłości funkcji. Ogólne zalecenia dotyczące doboru gruntów przedstawione są w normie [7].

Za najlepsze grunty naturalne do stosowania bez ograniczeń norma uważa grunty powstałe z twardych gatunków skał: głązy, kamienie, żwir, piaski i piaski gliniaste. Natomiast w miejscach suchych (bez dostępu wody gruntowej, kapilarnej i płynącej) do wznoszenia nasypów dopuszcza się użycie:

- gruntów ze skał takich jak margle, wapienie, łupki ilaste,
- pyłów i piasków pylastych,

- glin, lecz nie do wysokich nasypów,
- lessów.

Do wykonania nasypów nie powinno się stosować:

- gruntów pęczniejących,
- iłó i glin zwięzłych o granicy płynności powyżej 65 %,
- torfów i gruntów z domieszkami rozpuszczalnymi w wodzie,
- gruntów o masie szkieletu gruntowego poniżej 1600 kg/m³,
- gruntów zanieczyszczonych.

Bez zastosowania specjalnych środków lub zabiegów nie należy również stosować gruntów:

- zawierających więcej niż 3 % część organicznych,
- zawierających więcej niż 30 % frakcji ilastej,
- zawierających więcej niż 5 % gipsu i soli rozpuszczalnych,
- spoistych o wilgotności naturalnej znacznie większej lub znacznie mniejszej od wilgotności optymalnej (w stanie płynnym i miękkoplastycznym),
- skażonych chemicznie.

Ważnym kryterium jest również rozmieszczenie gruntów w nasypie. Niektóre grunty nie nadają się do wbudowania w wyższe partie nasypu, ale z powodzeniem mogą być używane w partiach niższych, co w wielu przypadkach znacznie obniża koszty realizowanej inwestycji. Rozmieszczenie gruntów w nasypie zależy od przeznaczenia i funkcji nasypu, warunków terenowych i klimatycznych, możliwości wyboru materiałów oraz innych czynników określonych w projekcie budowlanym. W przypadku wykonywania nasypów z różnych gruntów, gdy projekt nie określa ich dokładnego rozmieszczenia, należy przestrzegać następujących zasad:

- do głębokości przemarzania nasypu powinny być stosowane grunty sypkie niewysadzinowe (< 3 % cząstek o średnicy < 0,02 mm), zaś grunty wątpliwe (3–10 % cząstek o średnicy < 0,02 mm i kapilarności biernej poniżej 1,3 m) tylko w korzystnych warunkach wodnych,
- grunty spoiste o wilgotności naturalnej bliskiej wilgotności optymalnej ($0,9 W_{opt} \leq W_n \leq 1,1 W_{opt}$), który nie wymaga dodatkowych zabiegów w celu uzyskania wymaganego wskaźnika zagęszczenia, można wbudować na dowolnym poziomie nasypu, ale zaleca się stosowanie ich poniżej głębokości przemarzania,

- grunty spoiste przekraczające o więcej niż 10 % wilgotność optymalną ($W_n > 1,1 W_{opt}$), można wbudować w niższe partie nasypu, pod warunkiem przewarstwienia ich gruntami przepuszczalnymi, w celu przyspieszenia konsolidacji.

Przy doborze gruntów do budowy nasypów można również korzystać z tab. 1.

Tab.1 Przydatność gruntów naturalnych do wykonywania budowli ziemnych, na podstawie normy PN-B-06050 z 1999 r. – Geotechnika. Roboty ziemne.

Przeznaczenie	Przydatne	Przydatne z zastrzeżeniem	Treść zastrzeżenia
Na dolne warstwy nasypów poniżej strefy przemarzania	– rozdrobnione grunty skaliste twarde, grunty kamieniste, zwiertzelinowe, rumosze, otoczaki, – żwiry, pospółki, również gliniaste, – piaski grubo, średnio i drobnoziarniste, – piaski gliniaste z domieszką frakcji żwirowo-kamienistej o wskaźniku niejednorodności uziarnienia $U \geq 15$	– rozdrobnione grunty skaliste miękkie	gdy pory w gruncie skalistym będą wypełnione gruntem lub materiałem drobnoziarnistym
		– zwiertzeliny i rumosze gliniaste	gdy będą wbudowane w miejsca suche lub zabezpieczone od wód gruntowych i powierzchniowych
		– piaski pylaste, piaski gliniaste, pyły i pyły piaszczyste.	
		– piaski próchnicze z wyjątkiem pylastych piasków próchniczych.	do nasypów nie wyższych niż 3 m, zabezpieczonych przed zawilgoceniem
		– gliny piaszczyste, gliny i gliny pylaste i inne grunty o $W_L < 35\%$	w miejscach suchych lub przejściowo zawilgoconych
Na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania		– gliny piaszczyste zwięzłe, gliny zwięzłe, gliny pylaste zwięzłe oraz inne grunty o granicy płynności W_L od 35 do 60 %	do nasypów nie wyższych niż 3 m, zabezpieczonych przed zawilgoceniem, lub po ulepszeniu spoiwem
		– żwiry i pospółki gliniaste – piaski pylaste i gliniaste – pyły piaszczyste i pyły – gliny o $W_L < 35\%$	pod warunkiem ulepszenia tych gruntów spoiwami takimi jak: cement, wapno, aktywne popioły, itp.
W wykopach i miejscach zerowych do głębokości przemarzania	grunty niewysadzinowe	– piaski drobnoziarniste	o wskaźniku nośności ≥ 10
		– grunty wątpliwe i wysadzinowe	gdy są ulepszone spoiwami takimi jak: cement, wapno, aktywne popioły, itp.

Ważnym elementem przy budowie nasypów jest jego odpowiednie zagęszczenie, gdyż to zapewnia uzyskanie budowli stabilnej, nieulegającej szybkiej degradacji. Najistotniejszym parametrem jest wskaźnik zagęszczenia I_s . Jego wartość należy ustalić w zależności od poziomu zalegania warstwy gruntu w nasypie i możliwości prowadzenia kontroli zagęszczenia. Nie powinien być on mniejszy niż:

- $I_s \geq 0,95$ dla górnych warstw nasypu zalegających do głębokości 1,2 m p.p.t.,

- $I_s \geq 0,90$ dla warstw nasypu zalegających poniżej 1,2 m.

Wilgotność naturalna gruntu W_n w czasie jego zagęszczenia powinna być zbliżona do wilgotności optymalnej W_{opt} . Zaleca się by: $W_n = W_{opt} \pm 2\%$ – dla gruntów spoistych z wyjątkiem pospółek, żwirów i rumoszy gliniastych, dla których $W_n \geq 0,7 W_{opt}$. Jeśli grunt spoisty posiada wilgotność naturalną znacznie wyższą od W_{opt} powinien być osuszony na odkładzie przed wbudowaniem w nasyp.

Na szczególną uwagę zasługują zalecenia przedstawione przez Wiłuna Z. [114]. Podane przez niego kryteria mogą być pomocne we właściwym projektowaniu nasypów. Zaproponował on następujący podział:

1. Grunty grupy *a* – nie nadające się do nasypów – to:
 - ility o granicy płynności $W_L > 65\%$,
 - grunty niezagęszczalne, których, $\rho_{ds} < 1,6 \text{ g/cm}^3$,
 - grunty organiczne.
2. Grunty grupy *b* – mało przydatne grunty spoiste, o wilgotności naturalnej dużo większej od W_{opt} , bez osuszenia nie zapewniają możliwości uzyskania wymaganego wskaźnika zagęszczenia. Wartości wskaźnika zagęszczenia zalecane przez Wiłuna Z., przy wznoszeniu nasypów, przedstawia tab. 2.

Tab. 2. Wartości wskaźnika zagęszczenia I_s dla gruntów spoistych zalecane przy budowie nasypów [Wiłun Z., 1987].

Rodzaj gruntu	Zawartość frakcji żwirowej %	Wskaźniki określone dla gruntów bez frakcji żwirowej			
		Korpusy zapór ziemnych		Korpusy wałów	
		wysokość $h < 15 \text{ m}$	wysokość $h > 15 \text{ m}$	I, II klasy	III, IV klasy
Grunty spoiste	0–25	$I_s \geq 0,95$	$I_s \geq 0,98$	$I_s \geq 0,95$	$I_s \geq 0,92$
	26–50	$I_s \geq 0,92$	$I_s \geq 0,95$		
	> 50	$I_s \geq 0,90$	$I_s \geq 0,93$		

3. Grunty grupy *c* – dobre – wszystkie grunty spoiste o wilgotności bliskiej W_{opt} ($0,9 W_{opt} \leq 1,1 W_{opt}$). Grunty te bez dodatkowych zabiegów można wbudować w nasyp uzyskując wymagany wskaźnik zagęszczenia I_s (tab. 2).
4. Grunty grupy *d* – bardzo dobre – piaski, pospółki i żwiry; dają się łatwo zagęszczać i są mało wrażliwe na zawilgocenia.

Wiłun Z. [114] zaleca by w czasie projektowania robót ziemnych zwracać uwagę na odpowiednie rozmieszczenie gruntów w korpusach ziemnych, uwzględniając następujące wytyczne:

- grunty grupy *a* nie powinny być w ogóle używane i należy je przeznaczyć na odkład, jeżeli nie zostaną zabezpieczone od kontaktu z wodą lub ulepszone dodatkiem wapna ewentualnie innymi stabilizatorami,
- grunty grupy *b*, niespełniające warunków określonych w grupie *c* mogą być wbudowane w niższe partie nasypów, pod warunkiem, że zostaną przewarstwione bardziej przepuszczalnymi gruntami, co zapewni ich konsolidację we właściwym czasie przed rozpoczęciem eksploatacji budowli,
- grunty grupy *c* mogą być wbudowane na dowolnym poziomie nasypu, lecz zaleca się użycie ich poniżej głębokości przemarzania,
- do głębokości przemarzania nasypu powinno się w zasadzie wbudowywać grunty sypkie niewysadzinowe (< 3 % cząstek o średnicy < 0,02 mm), natomiast grunty wątliwe (3–10 % cząstek o średnicy < 0,002 mm i o kapilarności poniżej 1,3 m) tylko w korzystnych warunkach wodnych,
- bezpośrednio pod nawierzchnią (do głębokości 20–50 cm) grunty niewysadzinowe powinny mieć wskaźnik niejednorodności uziarnienia $U > 7$ oraz współczynnik wodoprzepuszczalności $k > 8$ m/dobę ($9,26 \times 10^{-5}$ m/s)
- w warstwach nasypu nie powinny występować gniazda gruntów zasadniczo różnych od gruntów je otaczających.

Analizując powyższe kryteria i wytyczne dla gruntów stosowanych do budowy różnych nasypów, można zauważyć duże podobieństwo w ustalonych wartościach poszczególnych parametrów z ogólnymi zaleceniami stosowanymi np. w USA, czy w Wielkiej Brytani (tab. 3).

Tab. 3. Kryteria jakości gruntów spoistych pod względem przydatności do budowy nasypów stosowane w Wielkiej Brytani i w Stanach Zjednoczonych [Wiłun Z., 1987]

Orientacyjne wartości		Wartość ρ_{ds} [g/cm ³]	Przydatność gruntów do budowy nasypów
granic płynności	granic plastyczności		
> 65	> 22	< 1,60	nie nadają się lub są bardzo złe
65–50	22–19	1,60–1,73	złe
50–32	19–16	1,73–1,92	możliwe
32–24	16–14	1,92–2,06	dobrze
< 24	< 14	> 2,06	bardzo dobre

2.2. Drogowe budowle ziemne

Przy budowie nasypów drogowych należy zwrócić szczególną uwagę na właściwy dobór materiałów do jego formowania. Gwałtownie wzrastający w ostatnich latach ruch samochodowy powoduje, że drogi są bardzo obciążone, często nie wytrzymują nasilającego się ruchu i ulegają zniszczeniu. Obserwując jakość polskich dróg, można stwierdzić, że w wielu miejscach są one w tragicznym stanie. Jedną z przyczyn zniszczenia dróg jest niewłaściwie zaprojektowane i wykonane podbudowy. Przy doborze gruntów do budowy nasypów drogowych nie można pozwolić sobie na jakąkolwiek przypadkowość, gdyż wszelkie błędy uwidoczną się już po kilku latach użytkowania. Przy doborze gruntów do budowy nasypów drogowych najczęściej posługujemy się normą PN-S-02205 z 1998 r. – *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania* [8].

2.2.1. Dobór gruntów do formowania nasypów drogowych

Powyższa norma zawiera wymagania ogólne i szczegółowe dotyczące formowania nasypów drogowych. W wielu punktach wymagania dotyczące zastosowania gruntów przy budowie nasypów drogowych pokrywają się z normą PN-B-06050 z 1999 r. – cytowaną powyżej. Norma zaleca by przy wyborze gruntów i materiałów do nasypów uwzględnić wymagania znajdujące się w tab.1.

Należy również kierować się następującymi wytycznymi:

- wskaźnik niejednorodności uziarnienia U powinien wynosić, co najmniej 3, a grunty o niższym wskaźniku można stosować warunkowo, jeżeli wstępne próby na poletku doświadczalnym wykażą możliwość uzyskania wymaganego zagęszczenia,
- górną warstwę nasypu o grubości co najmniej 0,5 m należy wykonać z gruntów niespoistych, niewysadzinowych, o wskaźniku U co najmniej 5 i współczynniku filtracji $k_{10} \geq 6 \times 10^{-5}$ m/s; a w razie braku takich gruntów, należy górną warstwę ulepszyć spoiwem (cementem, wapnem, lub aktywnymi popiołami) zgodnie z właściwą dokumentacją projektową,

- do górnych warstw nasypów są nieprzydatne grunty spoiste o granicy płynności $W_L > 35 \%$,
- do górnych i dolnych warstw nasypów są nieprzydatne ły i inne grunty spoiste o granicy płynności $W_L > 60 \%$, grunty organiczne o zawartości części organicznych $I_{om} > 2 \%$, z wyjątkiem piasków próchnicznych o $I_{om} \leq 5 \%$, grunty trudnozagęszczalne, których maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego $\rho_{ds} < 1,6 \text{ g/cm}^3$,
- wysadzinowość gruntów należy określać na podstawie kryteriów podanych w tab. 4; podstawowym kryterium jest zawartość drobnych cząstek gruntu, a dodatkowymi, stosowanymi w przypadkach wątpliwych, wskaźnik piaskowy (dla gruntów niespoistych) i kapilarność bierna,
- wilgotność gruntu wbudowywana w nasyp powinna być bliska wilgotności optymalnej $W = W_{opt} \pm 2 \%$.

Tab. 4. Podział gruntów pod względem wysadzinowości wg normy PN-S-02205 z 1998 r.

Właściwości	Jed.	Grupy gruntów		
		Niewysadzinowe	Wątpliwe	Wysadzinowe
Rodzaj gruntu		rumosz żwir pospółka piasek gruby piasek średni piasek drobny	piasek pylasty, zwietrzelina gliniasta, rumosz gliniasty, żwir gliniasty, pospółka gliniasta	mało wysadzinowe: glina piaszczysta zwięzła, glina zwięzła, glina pylasta zwięzła, ił, ił piaszczysty, ił pylasty bardzo wysadzinowe: piasek gliniasty, pył, pył piaszczysty, glina piaszczysta, glina, glina pylasta,
Zawartość cząstek	%			
$\leq 0,075 \text{ mm}$		< 15	15 – 30	> 30
$\leq 0,02 \text{ mm}$		< 3	3 – 10	> 10
Kapilarność bierna H_{kb}	m	< 1	≥ 1	> 1
Wskaźnik piaskowy WP		> 35	25 – 35	< 25

Poniżej zestawiono kryteria doboru gruntów do formowania nasypów. Zauważa się dużą zgodność w ustalonych wartościach poszczególnych parametrów (tab. 5).

Tab.5. Zestawienie wymagań dla gruntów używanych do budowy nasypów.

Kryteria przydatności	Jed.	Wg PN-B-06050 [7]	Wg PN-S-02205 [8]	Wg Wituna Z. [114]
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wg Proctora ρ_{ds}	g/cm ³	1,6	1,6	1,6
Granica płynności W_L	%	< 65	< 60	< 65
Zawartość składników rozpuszczalnych w wodzie	%	< 5	–	–
Zawartość części organicznych I_{om}	%	≤ 3	≤ 2	≤ 2
Zawartość frakcji ilowej f_i	%	≤ 30	–	–
Wskaźnik niejednorodności uziarnienia U	–	–	≥ 3	–

2.3. Zapory ziemne

Historyczne przekazy o budowie zapór ziemnych są bardzo odległe. Początkowo były wznoszone w krajach gorących i suchych, gdzie odczuwano deficyt wody pitnej oraz dla potrzeb rolniczych. Za najstarszą zapórę ziemną jest uważana zapora Sadd-el-Kafara o długości 108 m i wysokości 12 m zbudowana w latach 2778–2563 p.n.e. w Egipcie [Czyżewski K., i in., 1973, Sobczak J., 1975]. W Europie do czasu pierwszej rewolucji przemysłowej budownictwo zapór nie rozwijało się w większym zakresie. Pierwsza rewolucja przemysłowa przyniosła wzrost zapotrzebowania na wodę pitną, do celów przemysłowych i energetycznych, co przyczyniło się do budowy wielu zbiorników retencyjnych. Gwałtowny rozwój budowy zapór ziemnych notowany jest w dwudziestym wieku. Do początku lat siedemdziesiątych wybudowano na świecie 1867 zapór ziemnych i narzutowych (o $h > 15$ m) oraz 598 zapór betonowych. [Czyżewski K., i in., 1973]. Jak widać, ok. 70 % wszystkich zapór to zapory ziemne. Duża liczba zapór ziemnych związana jest m.in. z:

- rozwojem sprzętu i technologii robót ziemnych,
- rozwojem dyscyplin naukowych związanych z budownictwem ziemnym (m.in. mechaniką gruntów, gruntoznawstwem, hydrogeologią, hydrologią i in.), co umożliwia bardziej oszczędne i bezpieczne projektowanie oraz realizację

budowli ziemnych praktycznie z każdego materiału miejscowego i w każdych warunkach geologicznych.

Do końca XIX wieku wszystkie zapory ziemne były wykonywane metodą tradycyjną przez sypanie i zagęszczanie kolejnych warstw. W 1904 r. na rzece Snake River wzniesiono pierwszą namywaną zaporę ziemną Idaho o wysokości 25 m. Pozwoliło to na używanie do budowy zapór gruntów drobnoziarnistych pylastych i lessów, wcześniej uważanych za materiał nieprzydatny [Sobczak J., 1975].

Najpowszechniej stosowanym typem zapór niskich są zapory jednorodne wykonywane z gruntów żwirowo-piaszczysto-gliniastych, natomiast w przypadku zapór wysokich, zapory z rdzeniem wykonanym z gruntów spoistych. Są to konstrukcje wielokrotnie sprawdzone zarówno na całym świecie, jak i w Polsce.

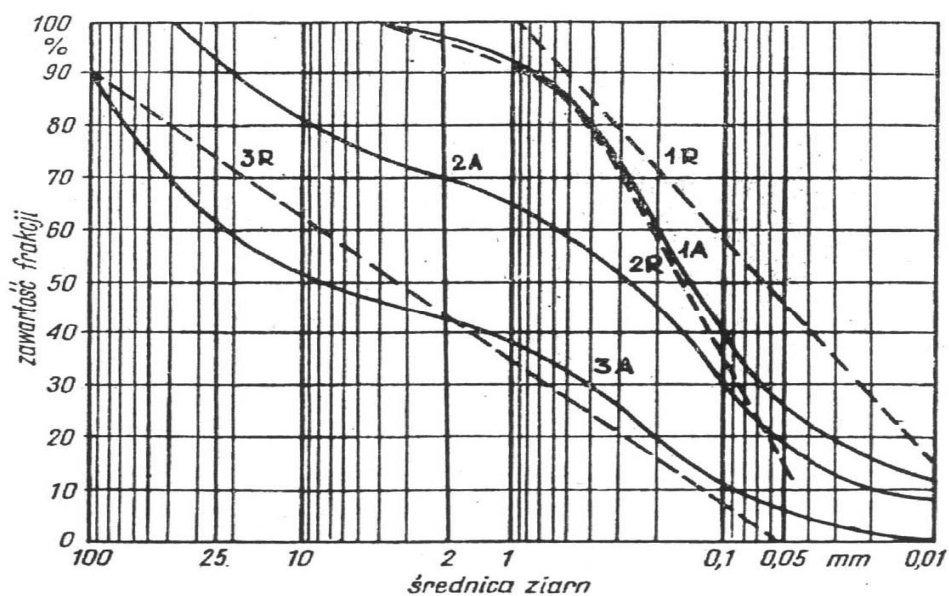
2.3.1. Dobór gruntów do budowy zapór ziemnych

Podczas budowy zapory ziemnej dąży się do tego, by wykorzystać niemalże każdy rodzaj gruntu dostępny na miejscu budowy. W przypadku gruntów, które mają nie najlepsze właściwości, realizuje się różne metody modyfikacji gruntu tak, by uzyskać materiał do wbudowywania, spełniający parametry założone w projekcie. Często konstrukcję zapory uzależnia się od właściwości materiałów miejscowych. Do budowy zewnętrznych części nasypu tzw. części statycznej zapory można użyć grunty kamieniste (rumosze, zwietrzliny i otoczaki), gruboziarniste (żwiry i pospółki) i drobnoziarniste niespoiste (piaski). Grunty spoiste (iły, gliny, pyły, piaski gliniaste, pospółki gliniaste i żwiry gliniaste) są wbudowywane w rdzenie zapory i mają za zadanie ograniczyć filtrację przez korpus zapory.

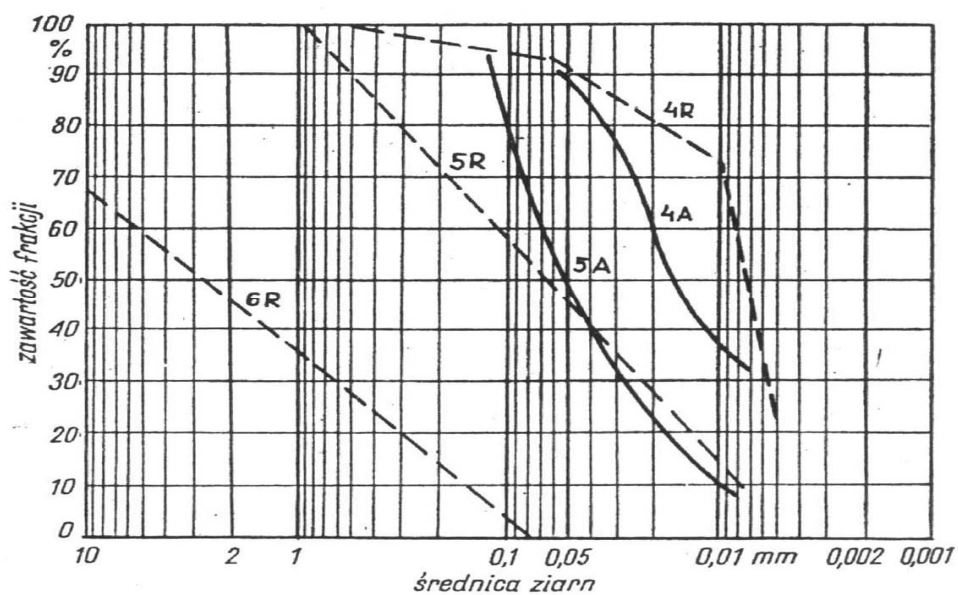
Zaleca się [Sobczak J., 1975] używania gruntów dobrze uziarnionych, charakteryzujących się wskaźnikiem niejednorodności uziarnienia $U > 6$ dla piasków i $U > 4$ dla żwirów, oraz wskaźnik krzywizny $C_u = 1-3$. Nie powinno stosować się gruntów zawierających powyżej 3 % części organicznych, powyżej 5 %, części rozpuszczalnych w wodzie, gruntów kamienistych ulegających rozkładowi pod wpływem czynników atmosferycznych.

Wymagania, jakie są stawiane grustom używanym do wznoszenia zapór ziemnych, są uzależnione w dużej mierze od rodzaju zapory [Sobczak J., 1975], i tak:

1. Na korpus zapór ziemnych bez elementów szczelnych najodpowiedniejsze są grunty piaszczysto-gliniaste lub żwirowo-gliniaste, zawierające 6–20 % cząstek o średnicy $d < 0,01$ mm, charakteryzujące się kątem tarcia wewnętrznego $\varphi > 25^\circ$ (dla materiału nasyconego wodą), wskaźnikiem niejednorodności uziarnienia $U > 60$ i współczynnikiem filtracji $k < 10^{-6}$ m/s.
2. Na plastyczne elementy szczelne zapór sypanych najlepsze są gliny piaszczyste i gliny zawierające ponad 25 % cząstek o średnicy $d < 0,01$ mm. Dla elementów szerokich dopuszcza się grunty o zawartości części drobnych $0,01 > d > 0,005$ mm mniejszej niż 25 %. Współczynnik filtracji $k < 10^{-7}$ m/s, oraz wilgotność przy wbudowaniu $W = W_{opt} \pm 3$ %. Nie zaleca się stosowania, do budowy elementów szczelnych, glin ciężkich i iłów ze względu na trudności przy wbudowaniu.
3. Przy doborze materiału na zapory wznoszone metodą hydrotransportu można korzystać z wykresu krzywej uziarnienia norm amerykańskich lub rosyjskich (rys. 1 i 2). Analizując przedstawione wykresy, widzimy bardzo szeroki zakres uziarnienia gruntów, które można wbudować w korpus zapory i ekran iłowy. Dla zapór jednorodnych (rys. 1) najodpowiedniejsze są grunty piaszczysto-pylaste, zawierające nie więcej niż 15 % cząstek poniżej 0,01 mm. W przypadku używania tej metody do wznoszenia rdzeni zapór można używać gruntów o drobnym uziarnieniu. Niestety krzywe uziarnienia gruntów na rys. 2 nie pokazują jak duży może być udział frakcji najdrobniejszych, poniżej 0,002 mm, można jedynie przypuszczać, iż może to być przedział wartości od kilku do kilkunastu %.

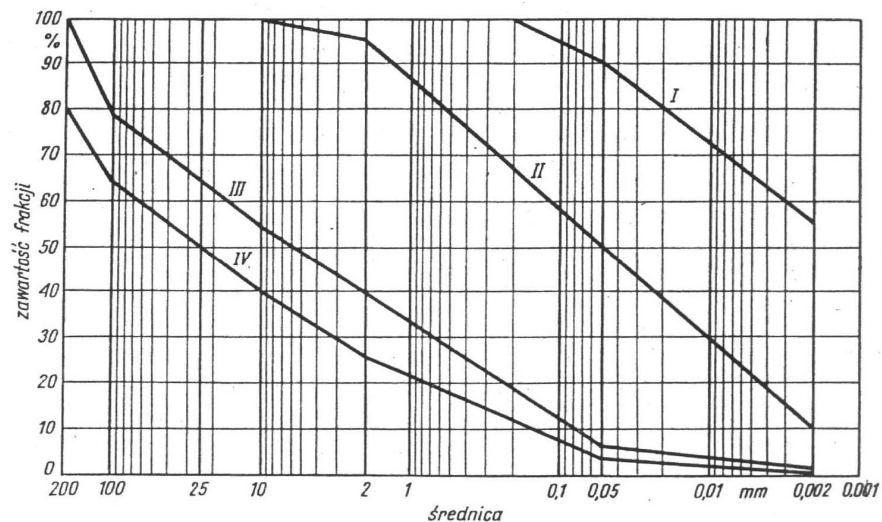


Rys. 1. Graniczne krzywe uziarnienia gruntów nadających się do budowy zapór namywanych: 1A, 2A, 3A – wg normy amerykańskiej, 1R, 2R, 3R – wg normy radzieckiej [Sobczak J., 1975].



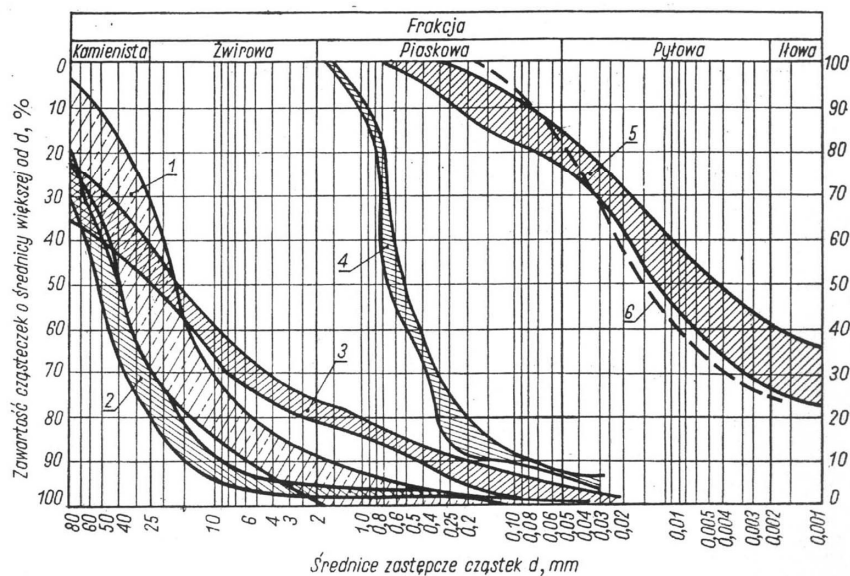
Rys. 2. Graniczne krzywe uziarnienia gruntów nadających się do budowy rdzeni zapór namywanych: 4A, 5A – wg normy amerykańskiej, 4R, 5R, 6R – wg normy radzieckiej [Sobczak J., 1975].

4. Materiał na korpusy zapór narzutowych ma bardzo szeroki zakres uziarnienia. Grunty kamieniste powinny być o wysokiej twardości (granity, syenity, dioryty, piaskowce krzemionkowe), odporne na działanie wody i mrozu, nie mniejsze niż 5 cm wysokości i 30 cm długości. Grunty przydatne na elementy szczelne tych zapór powinny charakteryzować się krzywymi uziarnienia leżącymi między krzywymi granicznymi przedstawionymi na rys. 3. Obszar zawarty między krzywymi I–IV jest przeznaczony dla gruntów wbudowywanych na sucho. Jest to materiał o bardzo szerokim zakresie uziarnienia. Frakcji iłowej może być od kilku do ponad 50 %. Obszar II–III dotyczy gruntów usypywanych w wodzie. Są to grunty o mniejszej zawartości frakcji najdrobniejszych, poniżej 10 %.

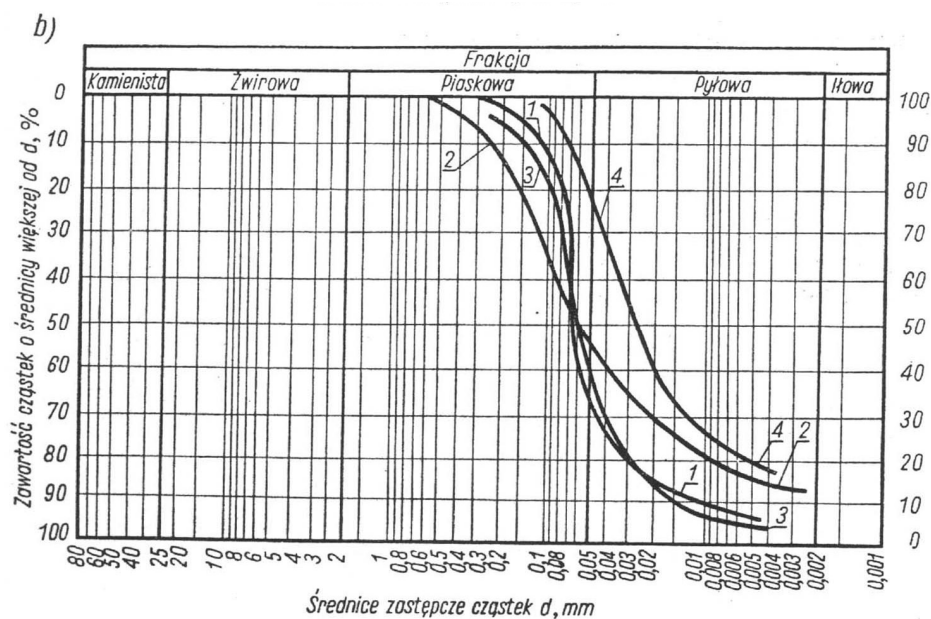


Rys. 3. Graniczne krzywe uziarnienia gruntów nadających się do budowy rdzeni zapór narzutowych [Sobczak J., 1975].

Jak już wcześniej wspomniano, w świecie wybudowano bardzo dużo zapór ziemnych różnego typu. Poniżej przedstawiono przykładowe krzywe uziarnienia gruntów wbudowanych w zapory ziemne:



Rys. 4. Krzywe uziarnienia gruntów użytych do budowy zapór w różnych rejonach świata. Nasypy statyczne zapór: 1 – w Tresnej, 2 – w Schwammenauel w Niemczech, 3 – w Myczkowcach. Rdzenie zapory: 4 – Kingslay w USA, 5 – Avro we Włoszech, 6 – Tustervaten w Norwegii [Czyżewski K., i in., 1973].



Rys. 5. Przykładowe wykresy krzywych uziarnienia gruntów użytych na rdzenie zapór wbudowanych metodą hydrauliczną, zlokalizowane w USA: 1 – w Kingsley, 2 – Fort Peck, 3 – Kinghtville, 4 – Quabbin [Czyżewski K., i in., 1973].

2.4. Niskie nasypy dla celów budownictwa wodno-melioracyjnego

Niskie nasypy o wysokości zazwyczaj do 3 m należą do III i IV klasy budowli hydrotechnicznych [Wiłun Z., 1987] i są wykonywane najczęściej dla celów budownictwa wodno-melioracyjnego. Wyróżnić tu należy:

- wały przeciwpowodziowe,
- obwałowania kanałów,
- zapory boczne i wsteczne,
- groble stawów rybnych.

Spośród wyżej wymienionych budowli najczęściej w praktyce są spotykane wały przeciwpowodziowe. Ich budowa zasadniczo rozpoczęła się w okresie ostatnich stu lat, dzięki rozwojowi miast i intensywnej zabudowie dolin rzecznych. W Polsce jest około 8 500 km wałów wg Egler R. [56] lub 9719 km wg Sokołowski J., Mościej K., [104] za Pieczyrak J. [92]. Wały są budowlami o wysokości kilku metrów, kształcie trapezu, o nachyleniu skarp w stosunku 1:2. Stawiane są im następujące wymagania [Pieczrak J., 1999]:

- odpowiednia wysokość, właściwy rozstaw oraz gładka powierzchnię,
- stateczne (właściwy kształt i z odpowiedniego materiału),
- szczelne,
- posadowione na nośnym i nieprzepuszczalnym podłożu.

Po licznych powodziach, które nawiedziły Polskę w ostatnich latach, zauważono, że stan wałów niestety nie jest najlepszy, a na wielu odcinkach uległy one poważnemu uszkodzeniu i wymagają odbudowy lub modernizacji.

Do budowy wałów najbardziej nadają się grunty gliniasto-piaszczyste lub żwirowo-gliniaste zawierające 6–20 % cząstek o średnicy $d < 0,01$ mm, charakteryzujące się kątem tarcia wewnętrznego $\varphi > 25^\circ$ (dla materiału nasyconego wodą), wskaźnikiem niejednorodności uziarnienia $U > 60$ i współczynnikiem filtracji $k < 10^{-6}$ m/s [Pieczyrak J., 1999 za Sobczak J., 1975].

Wyżej podane warunki nie są jednak zawsze do spełnienia. Duży wpływ na to ma obecność miejscowego materiału, czasami o nie najlepszych właściwościach oraz podłoże, które szczególnie w północnej części Polski jest podłożem słabym. Jeżeli w pobliżu brak jest odpowiednich gruntów, to można stosować materiał gorszej jakości, przy czym powinno się tak dostosować technologię wbudowania gruntu, by osiągnąć

zamierzony cel. Można poprawiać właściwości gruntu przez wzmocnienie go cementem, wapnem, bentonitem, popiołami, można zastosować różne geosyntetyki lub ścianki szczelne. Jedno z takich rozwiązań zostało zrealizowane przy odbudowie wałów przeciwpowodziowych na Odrze k. Wrocławia. Do doszczelnienia wału użyto maty bentonitowej, którą ułożono na odwodnej stronie wału, pomiędzy zagęszczonymi warstwami gliny piaszczystej [Stępnia S., 2001].

Na terenie Północnej Polski często do formowania nasypów budownictwa wodno-melioracyjnego wykorzystuje się materiał miejscowy pozyskiwany z pogłębiania dna rzek, kanałów melioracyjnych i gruntów występujących w podłożu, w sąsiedztwie realizowanych inwestycji. Jest to bardzo często grunt organiczny, wykształcony jako namuły, gytie, rzadziej torfy. Według normy PN-B-06050 z 1999 r. dotyczącej formowania nasypów, powyższy materiał nie powinien być stosowany, jednak brak odpowiedniego gruntu mineralnego w pobliżu budowy, a co za tym idzie bardzo wysokie koszty transportu, sprawiają, że niskie nasypy o wysokości do 2,5 m często wykonuje się z gruntów organicznych. Na podstawie badań przeprowadzonych w latach osiemdziesiątych [Borys M., 1983, 1993] stwierdzono, że w Polsce jest wybudowane wiele kilometrów nasypów z miejscowych gruntów organicznych. Spośród 46 zinwentaryzowanych nasypów 23 stanowiły ogroblowanie stawów rybnych, 20 pełniło funkcję obwałowań rzek, kanałów, polderów, zapór bocznych i czołowych.

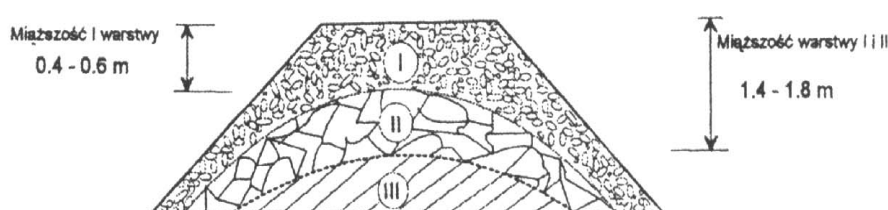
Wieloletnie obserwacje nasypów wykonanych z gruntów organicznych wskazują na znacznie szybszą degradację gruntu organicznego niż gruntu mineralnego. Jest to przede wszystkim związane z odwodnianiem i napowietrzaniem gruntu, w wyniku czego rozwija się proces murszenia [Borys M., 1993]. Zasadnicze zmiany zachodzące podczas tego procesu, to wzrost tempa rozkładu tkanek roślinnych – czyli humifikacja, która zmienia strukturę gruntu od włóknistej do amorficznej oraz mineralizacja substancji organicznej powodująca wzrost części mineralnych. Intensywność tego procesu jest związana z ilością substancji organicznej w gruncie, ilością utraconej wody i wahań uwilgocenia oraz intensywnością procesu napowietrzania gruntu. Objawy degradacji nasypów wykonanych z gruntów organicznych są następujące [Borys M., 1993]:

- powstawanie sieci szczelin w korpusie w strefie przypowierzchniowej do głębokości kilkudziesięciu centymetrów i szerokości kilku centymetrów, powodując w konsekwencji przeobrażenia struktury gruntu,
- wzrost przepuszczalności,

- obniżenie korony nasypu o około 10 %, a w skrajnych przypadkach nawet 20 %,
- pogorszenie właściwości mechanicznych gruntów i odporności na erozję.

Na podstawie badań polowych i laboratoryjnych przeprowadzonych w obwałowaniach Jeziora Drużno, [Mioduszeński W., 1991, 1992, Borys M., 1993, Olchawa A., Walter T., 2002] można wyróżnić trzy charakterystyczne strefy w obrębie nasypu o różnych właściwościach gruntu:

1. Strefa I o miąższości 0,4–0,6 m. W tej warstwie grunt ma gruzelkową strukturę o znacznej porowatości i średnicy agregatów do 1cm. Współczynnik filtracji jest rzędu 10^{-5} m/s, co odpowiada wartości uzyskiwanej dla piasków drobno- i średnioziarnistych.
2. Strefa II występuje do głębokości 1,4–1,8 m poniżej korony nasypu obwałowań. W strefie tej są liczne spękania oraz szczeliny, tworzące bloki o wymiarach od 0,05 do 0,3 m. Współczynnik filtracji gruntu wynosi 10^{-8} m/s, jednak obserwuje się intensywny przepływ wody w obrębie tej strefy przez szczeliny, więc przepuszczalność w rzeczywistości jest dużo większa.
3. Strefa III zalega pod warstwą II i w większości stanowi nieprzepuszczalną dla wody warstwę, współczynnik filtracji jest rzędu 10^{-9} - 10^{-10} m/s. W strefie tej nie obserwuje się żadnych procesów degradacji.



Rys. 6. Przekrój przez obwałowanie Jeziora Drużno wykonanego z gruntów organicznych [Mioduszeński W., 1991, 1992 za Olchawa A., Walter T., 2002].

Degradacja nasypów może być częściowo ograniczona głównie poprzez:

1. Ochronę wilgotności gruntu po jego wbudowaniu w korpus nasypu. W praktyce realizuje się to przez wbudowanie gruntów organicznych w niższe partie nasypu, nad którymi zalegają grunty mineralne.
2. Ograniczenie do minimum ilości powietrza w gruncie. Decydujący wpływ na ten czynnik ma właściwe i staranne zagęszczenie gruntu podczas wykonywania

nasypu, dla których wskaźnik zagęszczenia $I_s \geq 0,92$ [Wiłun Z., 1987]. Bardzo negatywny wpływ na jakość zagęszczonych nasypów mają gryzonie, które kopiąc nory zwiększają jego napowietrzenie. Skuteczne zwalczanie tego problemu jest niestety trudne i bardzo uciążliwe, można jednak częściowo ograniczać obecność drobnych ssaków przez częste koszenie trawy, stosowanie oprysku, tworzenie barier utrudniających migrację gryzoni (rowy wypełnione wodą, utwardzone drogi, itp.).

3. Zmniejszenie zawartości części organicznych. Realizuje się to przede wszystkim dla gruntów o dużej zawartości części organicznych np. torfów, poprzez mieszanie gruntów organicznych z mineralnymi, najlepiej z piaskiem. Jak dowodzą badania doświadczalne prowadzone przez Borys M. [39] zadawalające właściwości mieszanek mineralno-organicznych uzyskuje się przy stosunku wagowym piasku do torfu powyżej 0,6.

Nasypy z gruntów organicznych są wznoszone nie tylko w północnej Polsce. Przykładem udanej inwestycji jest budowa obwałowań o wysokości 2,5 m osadnika oczyszczalni wód śplawiakowych „Pastuchów” koło Jaworzyny Śląskiej [Traczyk R 1990]. Użyty grunt – mady rzeczne – reprezentowany był przez pył piaszczysty o zawartości części organicznych 3,5–4,9 %, wilgotności naturalnej 25–30 %; wilgotności optymalnej 19–21 %, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (wg Proctora) 1,56–1,68 g/cm³, granicy plastyczności 20,8 %, granicy płynności 35,3 %, współczynnika filtracji $2,95 \times 10^{-10}$ m/s (dla $I_s = 0,93$), efektywnym kącie tarcia wewnętrznego $\varphi' = 12 \div 15^\circ$ i spójności $c' = 12\text{--}15$ kPa (dla $I_s = 0,91$) W zrealizowanym projekcie zdecydowano część obwałowań wykonać przy wskaźniku zagęszczenia gruntu $I_s \geq 0,92$, część przy wartości $I_s \geq 0,95$, przy czym nasyp o wskaźniku zagęszczenia $I_s \geq 0,95$ uzyskano dopiero po dodaniu 5 % wapna palonego. Wykonane obwałowania pokazują, iż mady rzeczne mogą być używane do budowy obiektów o podobnej klasie.

2.5. Zagęszczone przesłony mineralne

Zagęszczone przesłony mineralne, często nazywane przesłonami iłowymi lub ekranami iłowymi, mają od wielu lat zastosowanie w budownictwie jako sztuczne bariery hydrauliczne. Formuje się je głównie przy budowie składowisk odpadów. Przesłony iłowe wytwarzane są głównie z naturalnych gruntów spoistych lub z mieszanek gruntów niespoistych i spoistych. Czasami są wzbogacone różnymi dodatkami; np. bentonitem, cementem, wapnem, popiołami lotnymi itp. Coraz częściej są również spotykane geosyntetyczne przesłony iłowe zwane: matą iłową, matą bentonitową, lub prefabrykowaną przesłoną iłową itp. (w skrócie z ang. GCC) [Majer E., 2005, Koda E., Skutnik Z., 2004, Garbulewski K., 2002]. Maty bentonitowe zawierają cienką warstwę minerałów ilastych (najczęściej bentonitu sodowego) ułożoną między dwoma geotekstyliami. Podstawową cechą przesłon iłowych jest bardzo mały współczynnik wodoprzepuszczalności rzędu 10^{-9} – 10^{-10} m/s. Mogą być one np. wykorzystywane w tych rejonach, w których brak jest w pobliżu odpowiednich gruntów spoistych.

W Polsce powstaje, według danych Europejskiej Agencji Środowiska z 1995 r., ok. 120 mln ton odpadów rocznie, łącznie zgromadzono już ok. 2 mld. ton śmieci. Ilość odpadów w krajach Unii Europejskiej wynosi 1,3 biliona ton. W Polsce składowiska zajmującej powierzchnię ok. 12 000 ha [Garbulewski K., 2002]. Są one nadal podstawową metodą zagospodarowania odpadów. Analizując literaturę dotyczącą problemów składowania odpadów, można zauważyć bardzo duży postęp wiedzy dotyczący konstrukcji składowisk oraz wpływu oddziaływania tych obiektów na środowisko naturalne w stosunku do lat ubiegłych.

Do lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku składowiska odpadów lokalizowano głównie w zagłębieniach poeksploatacyjnych kopalni odkrywkowych, naturalnych zagłębieniach terenu, dolinach potoków, obszarach nieużytecznych dla budownictwa. [Prühs H., Kowalów M., 1992]. Jak podaje Daniel D.E. [48] w latach 50 i 60-tych istniała mała znajomość skutków długotrwałego składowania odpadów na lądzie. Grunty ilaste uważano za nieprzepuszczalne, a składanie odpadów na takich gruntach za bezpieczne. Daniel D.E., [48] opisuje różne przykłady budowy składowisk niebezpiecznych zrealizowanych w USA w tamtych latach.

Jednym z przypadków jest zrealizowana budowa stawu o powierzchni 600 ha na wody ściekowe zawierające benzen (substancję rakotwórczą), odprowadzane przez rafinerię ropy naftowej w Teksasie. Znana firma geotektoniczna wykonała liczne badania podłoża gruntowego do głębokości 15 m p.p.t. i uznała podłoże za nieprzepuszczalne o współczynniku wodoprzepuszczalności mniejszym niż 1×10^{-8} m/s. W rezultacie wykonano zamierzoną inwestycję bez dodatkowych przesłon mineralnych, pomimo tego, iż w podłożu na głębokości 100 m występowała warstwa wodonośna stanowiąca zasoby wody pitnej dla miasta. Po 20 latach wykonano system monitoringu wód podziemnych i odkryto ogromne zanieczyszczenie wód gruntowych pod stawem do głębokości 75 m p.p.t. i średnicy 1600 m. Powtórne badania podłoża wykazały większą wodoprzepuszczalność, rzędu 10^{-8} m/s. Ponadto podłoże, uważane za nieprzepuszczalne, wykazywało liczne spękania, przez które odcieki ze składowiska migrowały w głębsze partie gruntowe.

Innym przykładem było składowisko Lowe Canal w Nowym Jorku. W starym kanale zakopano niebezpieczne chemikalia i przykryto gruntami ilastymi w przekonaniu, że stworzy to szczelną pułapkę zabezpieczającą przed migracją zanieczyszczeń. W rzeczywistości chemikalia migrowały na zewnątrz aż do połowy lat siedemdziesiątych. Odkryto negatywny wpływ wydostających się zanieczyszczeń na miejscową ludność, w wyniku czego władze były zmuszone do ewakuacji miejscowej ludności i rewitalizacji składowiska.

Kolejny przypadek opisuje migrację zanieczyszczeń z porzuconego składowiska odpadów w Ontario. W wyniku przeprowadzonych badań odkryto pod składowiskiem zanieczyszczenie warstwy wodonośnej w piaskach o szerokości 600 m, długości 700 m i głębokości 20 m będącej wynikiem migracji wód odciekowych ze składowiska.

Problemy związane z nieszczelnymi składowiskami nie dotyczyły tylko Stanów Zjednoczonych, ale również Europy. Te same błędy popełniono w innych krajach. Prühs H., Kowalów M., [95] opisuje błędne praktyki dotyczące składowania odpadów w Niemczech do początku lat siedemdziesiątych na przykładzie składowisk Hamburg-Georgsweneder, Gerolsheim, Hessheim, Malsch, Sperudlingeu, Münchenhagen.

Badania naukowe prowadzone w wielu krajach w latach 70 i 80 dotyczące metod budowy składowisk, rodzaju stosowanych materiałów izolacyjnych, negatywnego oddziaływania istniejących składowisk na środowisko naturalne doprowadziło do szerokiej i wielowątkowej dyskusji naukowej, wymiany doświadczeń, w których przewodziły Stany Zjednoczone. Powstała koncepcja wielokrotnych barier

zabezpieczających (z ang. Multi-Barrier-Concept), mająca na celu całkowitą ochronę środowiska naturalnego przed negatywnymi skutkami oddziaływania składowisk odpadów. Koncepcja wielokrotnych barier zabezpieczających zakłada ochronę środowiska naturalnego przed negatywnymi skutkami oddziaływania składowiska na środowisko naturalne zarówno podczas składowania odpadów, jak i po jego zakończeniu. Do najważniejszych barier w przyjętej koncepcji należą zagadnienia [Prühs H., Kowalów M., 1992]:

- szkodliwości i neutralizacji odpadów,
- ujęcia wód odciekowych i ich neutralizacja,
- uszczelnienia dna i powierzchni składowiska,
- odpowiedniej lokalizacji składowiska.

Negatywne doświadczenia związane ze składowaniem odpadów pokazały, iż nie można zbudować tego typu obiektu w przypadkowo wybranym miejscu i liczyć na to, że natura sama sobie poradzi z ładunkiem zgromadzonych tam zanieczyszczeń. Składowanie odpadów w miejscach, gdzie w podłożu występowały grunty spoiste uważane za nieprzepuszczalne, bez dodatkowych przesłon izolacyjnych okazało się w wielu przypadkach błędne. Badania i obserwacje wykazały, iż:

1. Trudno jest znaleźć całkowicie jednorodne podłoże nieprzepuszczalne, bez spękań, przewarstwień gruntów bardziej przepuszczalnych, które stanowią uprzywilejowane drogi dla migracji zanieczyszczeń ze składowiska. Garbulewski K. [62] opisuje obserwacje prowadzone przez D'Astous A.Y. [46], dotyczące analizy spękań występujących w podłożu składowisk. Badania wykazały obecność spękań do głębokości 6–15 m p.p.t. w postaci szczelin o szerokości 10–15 μm , w odstępach 1–3 m. Dodatkowo, podczas wykonywania wykopów przy budowie składowiska, na skutek odprężenia gruntu mogą tworzyć się nowe spękania i powiększać już istniejące, co znacznie zwiększa przewodność hydrauliczną podłoża.
2. Proces migracji zanieczyszczeń nie zachodzi tylko na drodze filtracji opisanej liczbowo przez współczynnik filtracji. W gruntach słabo przepuszczalnych bardzo ważnym mechanizmem migracji zanieczyszczeń jest zjawisko dyfuzji [Daniel D.E., 1993, Barone F.S., i in., 1989, Rove R.K., i in., 1988]. Przykładem może być składowisko odpadów niebezpiecznych położone 15 km na południowy zachód od Sarnia w Ontario [Daniel D.E., 1993]. W tym składowisku podłoże, zbudowane z iłów, miało stanowić barierę dla

rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń do środowiska. Wyniki badań wskazywały, że przepływ adwekcyjny był nieistotny, natomiast proces dyfuzji stał się głównym mechanizmem w rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń pod składowiskiem.

3. Wody odciekowe migrujące ze składowiska mogą zmieniać właściwości gruntów spoistych. Silne kwasy i zasady powodują rozpuszczanie minerałów ilastych, w wyniku czego tworzą się kanały i zwiększa się przewodność hydrauliczna. Szczególnie niebezpieczny jest kwas fluorowodorowy i ortofosforowy. [Daniel D.E., 1993]. Ciecze organiczne powodują strącanie cząstek iłu w postaci kłaczków i przyczyniają się do skurczu i powstania spękań. Powoduje to wielokrotne zwiększenie przewodności hydraulicznej [Fernandez F., Quigley R.M., 1985, Foreman D.E., Daniel D.E., 1993, Herzig J., 2001, Korzeniowska-Rejmer E., 2001, Zadora B., 2001].

Powyższe wnioski wskazują potrzebę zachowania najwyższej ostrożności, przy podejmowaniu decyzji o lokalizacji przyszłych składowisk i zachowywaniu najwyższych standardów przy projektowaniu i budowie składowiska, gdyż zjawiska związane z migracją zanieczyszczeń są bardzo złożone.

Wytyczne dotyczące budowy bezpiecznych składowisk zostały zawarte w odpowiednich aktach prawnych najpierw w USA, a następnie w wielu krajach europejskich. Powstały odpowiednie ustawy i przepisy regulujące właściwą budowę i użytkowanie składowisk, metody składowania odpadów oraz rewitalizację składowisk. Pierwsze ustawy pojawiły się w Stanach Zjednoczonych. Są to przepisy ustawy Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) z 1976 r. [17] i jej poprawka Hazardous and Solid Waste Amendments (HSWA) z 1984 r. [18] za Majer E. [75]. Na szczególną uwagę zasługuje często cytowane w Polskiej literaturze przepisy niemieckie, tj. TA Abfall z 1991 r. [19] oraz TA Siedlungsabfall z 1993 r. [20]. W Europie obowiązuje przyjęta przez Parlament Europejski w dniu 26 kwietnia 1999 r. dyrektywa o składowaniu odpadów nr 1999/31/EC [6]. W Polsce podstawowym aktem prawnym dotyczącym budowy składowisk jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów [3], która jest zgodna z dyrektywą europejską.

Problematyka budowy składowisk w Polsce zaczęła intensywnie rozwijać się na początku lat dziewięćdziesiątych. Wielu autorów podejmowało dyskusję naukową zarówno na łamach literatury fachowej, jak i na różnych sympozjach i konferencjach naukowych [76,77,79,80,81]. W 1995 i 1996 r. Instytut Techniki Budowlanej opracował instrukcje ITB [13,14,15] przedstawiające wytyczne dotyczące lokalizacji i typów składowisk, rodzaju stosowanych przesłon izolacyjnych i metod badania gruntów stosowanych jako warstwy izolacyjne. Instrukcje ITB częściej jednak były cytowane w fachowej literaturze niż realizowane w nowo budowanych składowiskach. W rzeczywistości w budowanych w latach dziewięćdziesiątych składowiskach nie stosowano zbyt często uszczelnień mineralnych, a jedynie folię PEHD o grubości 2 mm, ponieważ Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska wydał zalecenie o dofinansowaniu składowisk tylko z izolacją w postaci geomembrany, która w wielu przypadkach nie może stanowić właściwego zabezpieczenia przed niekontrolowaną migracją odcieków ze składowiska do środowiska gruntowego [Majer E., 2005]. Dopiero rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. [3], które zastąpiło rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. [2] wprowadziło nakaz dla inwestorów stosowania przesłon mineralnych jako barier przeciwfiltracyjnych dla wód odciekowych.

Zgodnie z rozporządzeniem [3] składowisko odpadów powinno zapewnić bezpieczne dla środowiska składowanie odpadów, a w szczególności zapobiegać zanieczyszczeniu wód powierzchniowych i podziemnych, gleby i ziemi oraz powietrza. Rozporządzenie wyróżniło następujące typy składowisk;

- składowisko odpadów niebezpiecznych,
- składowisko odpadów inne niż niebezpieczne i obojętne,
- składowisko odpadów obojętnych.

Ustawa wymaga, by składowisko posiadało naturalną barierę geologiczną uszczelniającą podstawę i ściany składowiska, i tak:

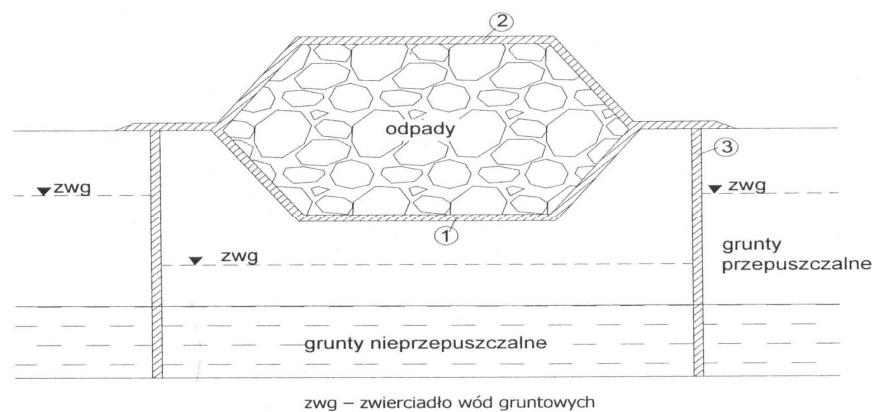
- bariera geologiczna powinna mieć rozciągłość poziomą, przekraczającą obszar projektowanego składowiska odpadów,
- dla składowisk odpadów niebezpiecznych miąższość naturalnej bariery geologicznej powinna wynosić nie mniej niż 5 m, a współczynnik filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s,

- dla składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne miąższość naturalnej bariery geologicznej powinna wynosić nie mniej niż 1 m, a współczynnik filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s,
- w miejscach, gdzie naturalna bariera geologiczna nie spełnia warunków wyżej określonych, stosuje się sztucznie wykonaną barierę geologiczną o minimalnej miąższości 0,5 m, o współczynniku filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s, którą wykonuje się w taki sposób, by procesy osiadania w składowisku odpadów nie mogły jej zniszczyć,
- uzupełnieniem naturalnej lub sztucznej bariery geologicznej jest izolacja syntetyczna,
- uszczelnienie powierzchniowe składowiska wykonuje się z warstwy ekranującej, składającej się z warstwy mineralnej o współczynniku filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s i miąższości $\geq 0,5$ m oraz izolacji syntetycznej.

2.5.1 Rodzaje przesłon mineralnych w składowisku odpadów

W składowisku odpadów można wyróżnić następujące rodzaje przesłon (rys. 7):

- przesłona uszczelniająca dno i skarpy składowiska,
- przesłona uszczelniająca powierzchnię składowiska,
- przesłony pionowe.



Rys. 7. Lokalizacja poszczególnych typów mineralnych przesłon izolacyjnych w składowisku: 1 – przesłona uszczelniająca dno i skarpy, 2 – przesłona uszczelniająca powierzchnię, 3 – przesłona pionowa [Majer E., 2005 za Daniel D.E., 1993].

2.5.1.1 Przesłony uszczelniające dno i skarpy składowiska

Aby przesłona mineralna skutecznie uszczelniała dno i zbocza składowiska powinna charakteryzować się wg Brandla H. [40] następującymi cechami:

- minimalną migracją zanieczyszczeń przez konwekcję i dyfuzję,
- dużą zdolnością adsorbcyjną, opóźniającą migrację zanieczyszczeń,
- odpornością na działanie związków chemicznych oraz erozję,
- elastycznością (niewrażliwością na różnicę osiadania),
- właściwą charakterystykę przy pęcznieniu i kurczeniu.

Nie ma jednego schematu przy wykonywaniu przesłon uszczelniających. To, jaki typ przesłony zostanie zastosowany, jest uzależnione od różnych czynników, takich jak:

1. Wymogi prawne zawarte w odpowiednich przepisach i normach branżowych.
2. Względy ekonomiczne, a czasami również niedostateczna wiedza projektantów.

Budowa składowiska jest bardzo droгим przedsięwzięciem, dlatego jeszcze często stosuje się zasadę minimalizacji kosztów i wymogów prawnych, kosztem ochrony zagrożonych terenów przed negatywnymi skutkami oddziaływania składowiska na podłoże i wody gruntowe. Częstym błędem jest powielanie niewłaściwych rozwiązań skopiowanych z innych projektów. Jak podaje Wysokiński L. [116] po analizie kilkudziesięciu składowisk gminnych z ważnymi decyzjami o pozwolenie na budowę wydanymi w latach 1998–1999 nadal w Polsce są pomijane uszczelnienia mineralne, a ogranicza się tylko do 10 cm warstwy wyrównawczej i folii HDPE – 2 mm. Wprowadzie folia HDPE zapewnia szczelność podłoża na żądanym poziomie, ale tylko wówczas, gdy nie jest uszkodzona, co w praktyce jest niemożliwe do osiągnięcia. Problemem geomembran jest możliwość wystąpienia wad, takich jak pory czy skazy na szwach powstałe podczas łączenia. Jak podaje Daniel E.D. [48] za Darilek G.T., Laine D.L., i Parra J.O. [51] badania prowadzone na 28 obiektach w celu kontroli szczelności wykonanych przesłon z zastosowaniem geomembran wykazały obecność 542 przecieków z przeciętną gęstością powierzchniową 26 nieszczelności na 1 hektar. Spośród wykrytych przecieków 18 % wystąpiło w materiale rodzimym, a 82 % na szwach i w takich miejscach, jak studnie i przejścia. Badania Giroud J.P. i Bonaparte R. [63] prowadzone na składowiskach pokazały, iż może występować nawet 1 defekt na 10 m szwu, natomiast w przypadku zastosowania szczególnej kontroli 1 defekt na 300 m. W innych badaniach [Bonaparte R., Gross A.B., 1990] prowadzonych na 19

składowiskach wyłożonych geomembranami, we wszystkich przesłonach występowały przecieki.

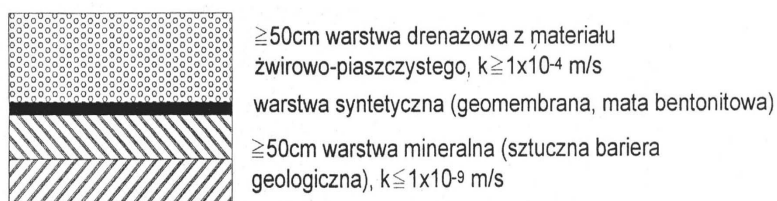
3. Warunki geologiczne występujące w podłożu gruntowym składowiska. Jeżeli w podłożu występują utwory słabo przepuszczalne o odpowiedniej miąższości i wodoprzepuszczalności wówczas miąższość przesłony mineralnej może się zmniejszać. Za dobre warunki wg normy polskiej uważa się warstwę gruntu spoistego o miąższości ≥ 5 m i współczynniku wodoprzepuszczalności $k \leq 10^{-9}$ m/s, natomiast wg normy niemieckiej uważa się warstwę gruntu spoistego o miąższości ≥ 3 m i współczynniku wodoprzepuszczalności $k \leq 10^{-7}$ m/s. Wg instrukcji ITB nr 337 [13] za warunki bardzo dogodne uważa się podłoże ilaste o miąższości ≥ 3 m i $k \leq 10^{-9}$ m/s. W przypadku przepuszczalnego podłoża należy stosować zwiększoną miąższość mineralnej warstwy uszczelniającej oraz przesłony złożone (mineralne + syntetyczne).
4. Rodzaj składowanych odpadów. Generalnie powinno stosować się zasadę; im odpady bardziej niebezpieczne, tym bardziej złożony profil przesłony izolacyjnych.

Poniżej zostaną przedstawione, dla celów porównawczych, różne typy uszczelnień w zależności od rodzaju składowisk, wg przepisów stosowanych w różnych krajach.

W Polsce wg rozporządzenia Ministra Środowiska z dn. 24 marca 2003 r. [3], ze względu na rodzaj składowanych odpadów, składowiska możemy podzielić na:

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

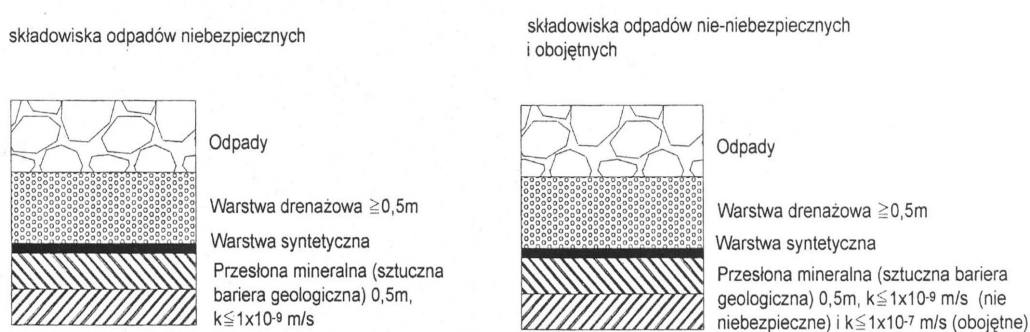
Wymagania minimalne dotyczące profilu uszczelniającego w przypadku braku naturalnej bariery geologicznej są takie same dla każdego typu składowiska.



Rys. 8. Profile uszczelniające podstawę i skarpy składowisk wg rozporządzenia Ministra Środowiska z dn. 24 marca 2003 r [Majer E., 2005].

Wg Dyrektywy Unii Europejskiej nr 199/31/EC z dnia 26 kwietnia 1999 r. [6] składowiska dzielimy na

- składowiska odpadów niebezpiecznych,
- składowiska odpadów nie-niebezpiecznych i obojętnych,
- składowiska odpadów obojętnych.

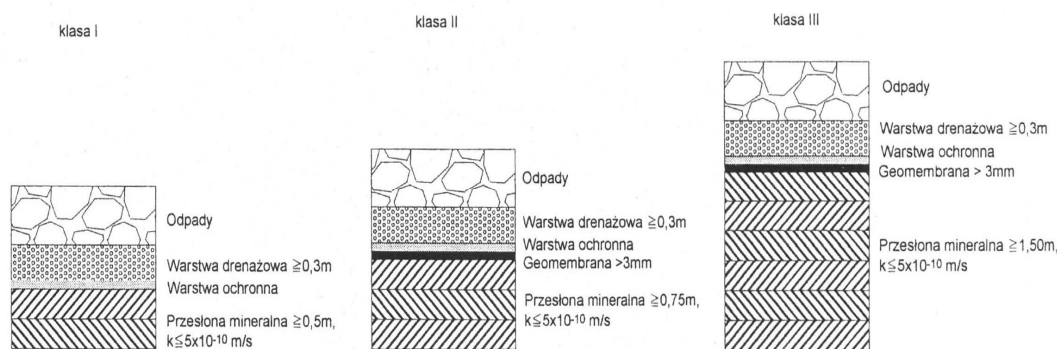


Rys. 9. Profile uszczelniające podstawę i skarpy składowisk wg Dyrektywy Unii Europejskiej nr 199/31/EC [Majer E., 2005].

Wg przepisów niemieckich tj. TA Abfall z 1991 r. [19], oraz TA Siedlungsabfall z 1993 r. [20] zostały wydzielone następujące typy składowisk:

składowiska odpadów obojętnych klasa I,

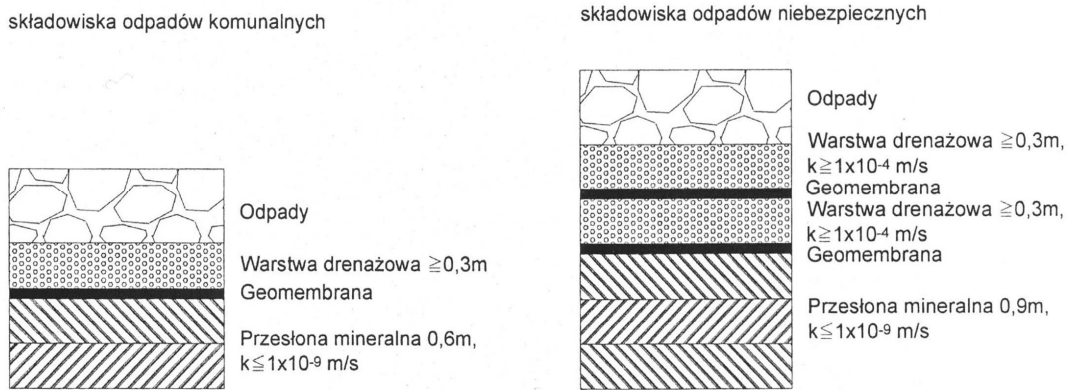
- składowiska odpadów komunalnych klasa II,
- składowiska odpadów niebezpiecznych klasa III.



Rys. 10. Profile uszczelniające podstawę i skarpy składowisk wg TA Abfall z 1991 r., oraz TA Siedlungsabfall z 1993 r. [Majer E., 2005].

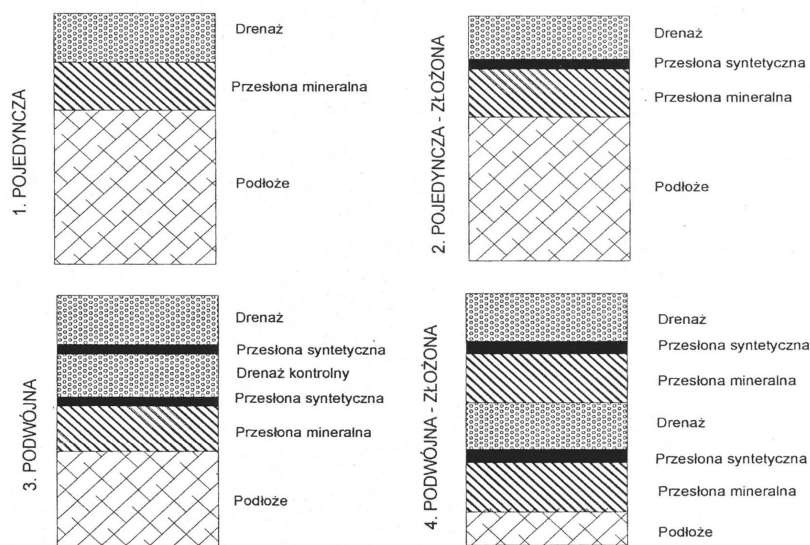
Wg przepisów amerykańskich Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) z 1976 r. za Daniel E.D. [48] zostały wydzielone następujące typy składowisk:

- składowiska odpadów komunalnych,
- składowiska odpadów niebezpiecznych.



Rys. 11. Profile uszczelniające podstawę i skarpy składowisk wg przepisów amerykańskich Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) z 1976 r. [Majer E., 2005].

Przedstawione powyżej profile uszczelnień składowisk dotyczą wymagań minimalnych. Czasami dla zwiększenia bezpieczeństwa można stosować bardziej rozbudowane systemy przesłon mineralno-syntetycznych (rys. 12). Niestety systemy złożone są rozwiązaniem o wiele droższym, w związku z tym mogą być w rzeczywistości rzadko wykonywane.



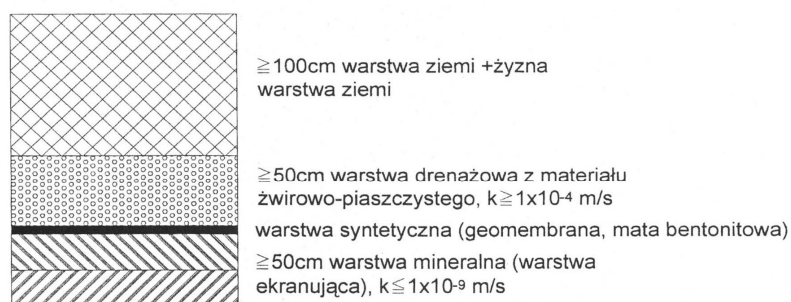
Rys. 12. Profile uszczelniające podstawę i skarpy składowisk wg instrukcji ITB 337 [13].

2.5.1.2 Przesłony uszczelniające powierzchnię składowiska

Najważniejszym zadaniem wierzchniej warstwy izolacyjnej jest:

- ograniczenie do minimum infiltrację wód opadowych w głąb składowiska i odprowadzenie wód opadowych i roztopowych na zewnątrz,
- uniemożliwienie wydostawania się biogazów ze składowiska w sposób niekontrolowany,
- stworzenie bariery biologicznej dla korzeni roślin i gryzoni oraz ochrony przeciwerozyjnej.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dn. 24 marca 2003 r. [3] profil wierzchniej warstwy składowiska przedstawia się następująco:



Rys. 13. Zalecany profil uszczelnienia powierzchni składowisk odpadów [Majer E., 2005].

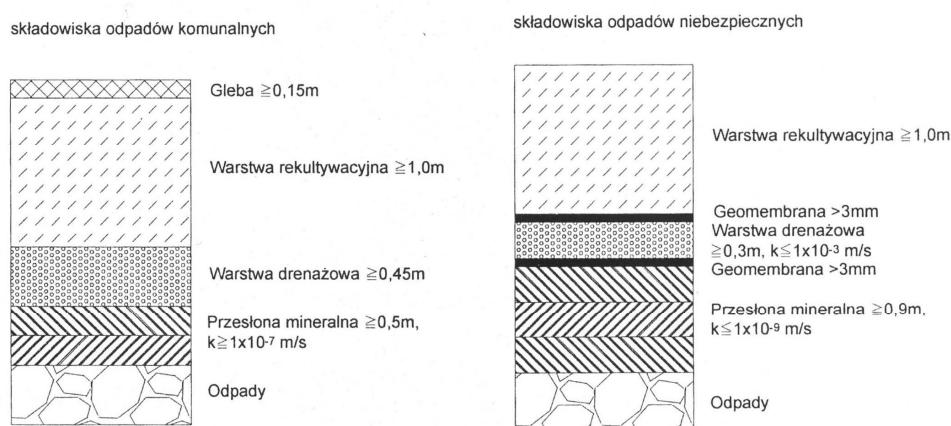
Wg Dyrektywy Unii Europejskiej nr 1999/31/EC z dnia 26 kwietnia 1999 r. [6] profil uszczelnienia powierzchni składowiska można wykonać w następujący sposób:



Rys. 14. Profile uszczelniające powierzchnię składowiska wg Dyrektywy Unii Europejskiej nr 199/31/EC [Majer E., 2005].

Wg przepisów niemieckiej tj. TA Abfall z 1991 r., oraz TA Siedlungsabfall z 1993 r. [Majer E., 2005] minimalny profil uszczelnienia powierzchni składa się z pokrywy rekultywacyjnej o miąższości 50 cm charakteryzującej się współczynnikiem filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

Wg przepisów amerykańskich Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) z 1976 r. za Daniel E.D. [48] profil uszczelnienia powierzchni można wykonać w następujący sposób:



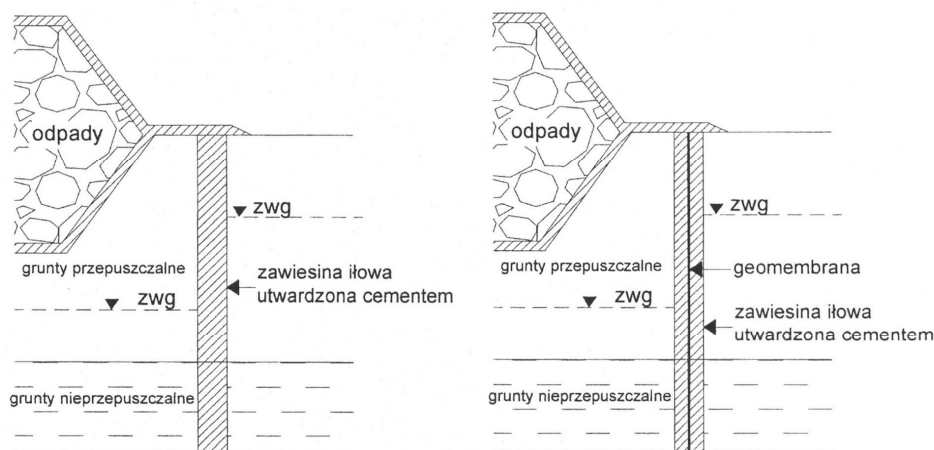
Rys. 15. Profile uszczelniające powierzchni składowisk wg przepisów amerykańskich Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) z 1976 r. [Majer E., 2005].

2.5.1.3 Przesłony pionowe

Przesłony pionowe mogą być zastosowane wówczas, gdy podłoże pod składowiskiem jest dobrze przepuszczalne, w którym znajduje się woda gruntowa, a poniżej występują warstwy nieprzepuszczalne. W konsekwencji może to doprowadzić do poziomego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń migrujących ze składowiska odpadów. Ten problem dotyczy raczej starych składowisk, szczególnie niebezpiecznych, w których popełniono błąd przy wyborze lokalizacji oraz nie zastosowano izolacji dna składowiska o odpowiedniej konstrukcji.

Prawidłowo wykonana przesłona pionowa tworzy pewnego rodzaju zamknięty zbiornik i uniemożliwia rozprzestrzenianiu się skażonej wody gruntowej. Najczęściej wykonuje się je o grubości 0,5–1,6 m i głębokości nawet do 50 m [13]. Do tego typu uszczelnień stosuje się raczej mieszanki gruntowe wtłoczone metodą hydrauliczną. Przykładem może być technologia CS2 stanowiąca mieszankę ilu (2–3 %) i piasku

(ok. 97 %), który wymieszany z wodą tworzy zawiesinę wtłoczoną metodą hydrauliczną w grunt [Garbulewski K., 2000].



Rys. 16. Uszczelnienie pionowe ze ściany szczelinowej [Majer E., 2005 za Zadroga B., Olańczuk-Neyman K., 2001].

2.5.2 Wymagania dotyczące gruntów naturalnych do budowy przesłon w składowiskach odpadów

Głównym zadaniem przesłony izolacyjnej jest uniemożliwienie migracji odcieków ze składowiska do środowiska naturalnego oraz wód gruntowych do wnętrza składowiska, dlatego najczęściej spotykanym kryterium jest odpowiednio niska wodoprzepuszczalność wyrażona przez współczynnik filtracji k , zwany również współczynnikiem wodoprzepuszczalności lub przewodności hydraulicznej.

Praktyka inżynierska pokazała, iż obok przepuszczalności są jeszcze inne ważne właściwości gruntu, które są związane z techniczną możliwością formowania przesłon mineralnych, czyli odpowiednie uziarnienie, wilgotność i plastyczność. Coraz częściej wymienia się jako istotne również właściwości geochemiczne gruntów wynikające ze skład mineralny frakcji ilowej.

2.5.2.1 Kryterium wodoprzepuszczalności

Analizując kryterium wodoprzepuszczalności w różnych krajach widać, że wartość współczynnika filtracji k powinna być mniejsza niż 1×10^{-9} m/s, bez względu na rodzaj składowanych odpadów, przy czym w Niemczech zaleca się $k \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s (tab. 6 i tab. 7). W literaturze trudno jest jednak znaleźć jednoznaczną odpowiedź, dlaczego taka wartość współczynnika filtracji k jest wystarczająca. Może to być po części związane z techniczno-ekonomicznymi możliwościami uzyskania jeszcze niższej wartości współczynnika filtracji k w warunkach terenowych. W Polsce kryterium wodoprzepuszczalności jest określone właściwym rozporządzeniem [3] i wynosi $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s bez względu na rodzaj składowanych odpadów.

Tab. 6. Zestawienie wymagań dla gruntów używanych do budowy mineralnych przesłon izolacyjnych wg różnych przepisów dla składowisk odpadów niebezpiecznych [Majer. E., 2005].

Kryteria Przydatności	Jednostka	Wymagania			
		UE [6]	TA-Abfall [19]	US EPA [21]	PI [3]
Współczynnik filtracji	m/s	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-10}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$
Wskaźnik plastyczności	–	–	–	$10 < I_p < 30$	–
Granica płynności	%	–	–	–	–
Zawartość węgla wapnia	%	–	≤ 15	–	–
Zawartość części organicznych	%	–	≤ 5	–	–
Minimalna grubość warstwy	m	0,50	1,50	0,90	0,50
Zawartość minerałów ilastych	%	–	≥ 10	–	–
Zawartość frakcji iłowej	%	–	≥ 20	–	–
Zawartość frakcji < 0,075 mm	%	–	–	≥ 30	–

Tab. 7. Zestawienie wymagań dla gruntów do budowy mineralnych przesłon izolacyjnych wg różnych przepisów dla składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne [Majer. E., 2005].

Kryteria Przydatności	Jednostka	Wymagania				
		UE [6]	Ta-Siedlungsabfall [20]		US EPA[21,22]	PL [3]
			I klasa	II klasa		
Współczynnik filtracji	m/s	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 5 \times 10^{-10}$	$\leq 5 \times 10^{-10}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$
Wskaźnik plastyczności	–	–	–	–	$10 < I_p < 30$	–
Granica płynności	%	–	–	–	–	–
Zawartość węgla wapnia	%	–	≤ 15	≤ 15	–	–
Zawartość części organicznych	%	–	≤ 5	≤ 5	–	–
Minimalna grubość warstwy	m	0,50	0,50	0,75	0,60	0,50
Zawartość minerałów ilastych	%	–	≥ 10	≥ 10	–	–
Zawartość frakcji iłowej	%	–	≥ 20	≥ 20	–	–
Zawartość frakcji < 0,075 mm	%	–	–	–	≥ 30	–

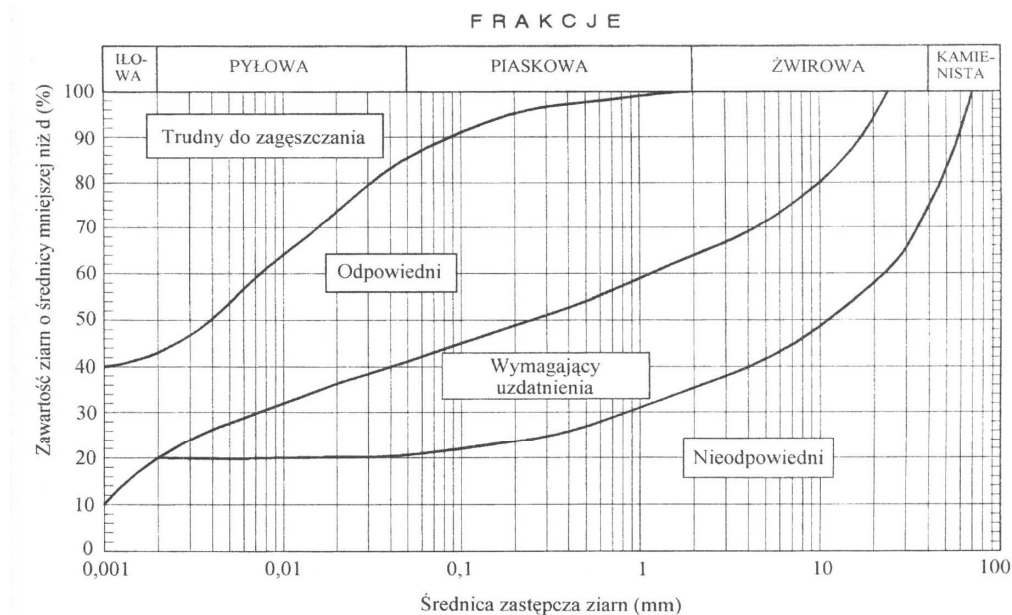
2.5.2.2 Kryterium uziarnienia

Jak wskazuje Daniel D.E i Korrner R.M [48] najczęściej w USA wg (ASTM D – 2487 t 93) do budowy przesłon ilowych stosuje się il chudy (Cl), il tłusty (CH), piasek ilasty (SC) [tłumacz. wg Myślińskiej E., 1998]. Według tych autorów wystarczającym kryterium przydatności gruntów ze względu na uziarnienie jest minimum 30 % obecności cząstek mniejszych niż 0,075 mm [Garbulewski K., 2000 za Daniel D.E., Korrer R.M., 1995], chociaż Benson C.H. i Boutwell G.P. [32] sugerują, że powinno być minimum 50 % frakcji drobnych, poniżej 0,075 mm. Podsumowując, w Stanach Zjednoczonych wymaga się by zawartość frakcji drobnych była na poziomie 30–50 %, gdyż to zapewnia właściwą plastyczność oraz odpowiednią ilość minerałów ilastych, na poziomie 10–20 % [Garbulewski K., 2000]. Obecność frakcji żwirowej (0,075–4,75 wg nory amerykańskiej) nie powinna być większa niż 50–60 % [Daniel E.D., 1993 za Shakoor A., Cook B.D., 1990, Shelley T.L., 1991]. Zbyt dużo frakcji żwirowej może spowodować znaczne zwiększenie przepuszczalności i uruchomienie procesów erozyjnych. Ziaren powyżej 5 mm w zasadzie nie powinno być, gdyż grozi to przebicciem uszczelnienia syntetycznego [Garbulewski K., 2000].

Na podstawie wymagań i analizy właściwości gruntów zastosowanych do uszczelnień składowisk odpadów w USA oraz własnych doświadczeń dotyczących możliwości wykorzystania w budownictwie gruntów drobnoziarnistych Garbulewski K. wydzielił następujące typy gruntów [Garbulewski K., i in., 1994, Garbulewski K., 1998, Garbulewski K., 2000] (rys. 17):

- grunty odpowiednie,
- grunty wymagające uzdatnienia,
- grunty trudne do wbudowania,
- grunty nieodpowiednie.

Wg tego wydzielenia za grunty najodpowiedniejsze można uznać grunty zawierające od 20 – 40 % frakcji ilowej oraz od 20 do 60 % frakcji piaskowej i żwirowej. Decydujący wpływ na rodzaj zastosowanego materiału gruntowego może mieć jednak możliwości pozyskiwania odpowiednich gruntów miejscowych oraz względy ekonomiczne, dlatego czasami używa się gruntów mineralnych, które dopiero po odpowiednim ulepszeniu spełniają minimalne kryteria.



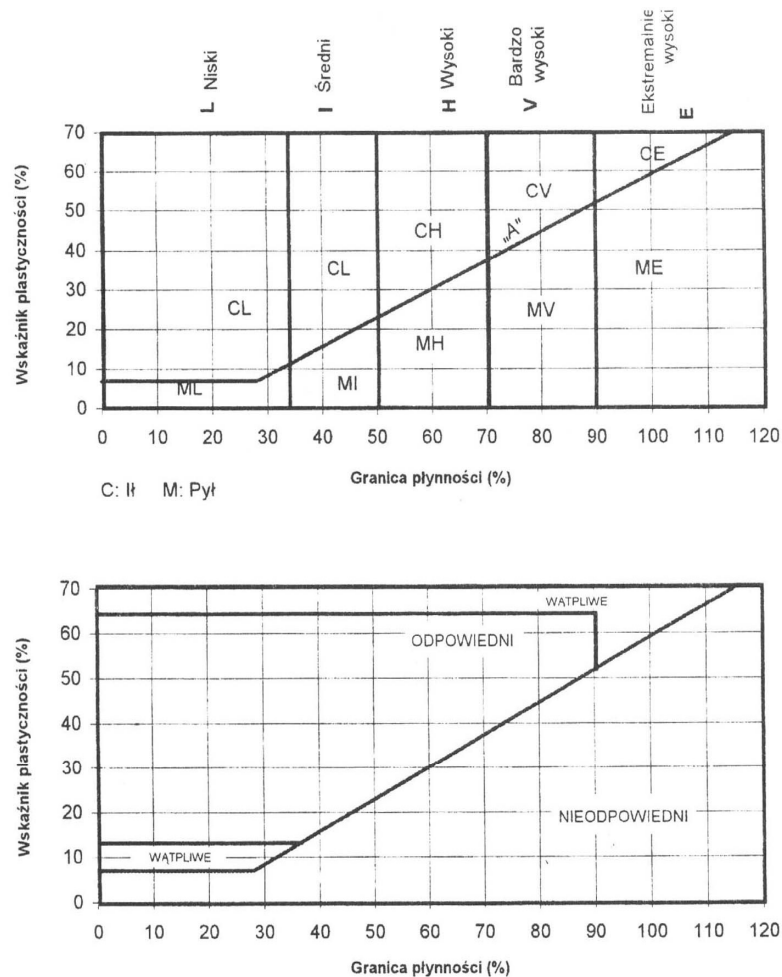
Rys. 17. Ocena przydatności gruntów do budowy wykładzin mineralnych pod względem uziarnienia [Garbulewski K., 2000].

2.5.2.3. Kryterium plastyczności

Kryterium plastyczności jest ściśle związana z techniczną możliwością formowania przesłon mineralnych. Doświadczenia przy formowaniu przesłon mineralnych w USA wskazują, iż grunty o wskaźniku plastyczności I_p w przedziale od 10 do 30 formuje się dobrze i jednocześnie uzyskuje się wysoką wartość współczynnika filtracji k poniżej 10^{-9} m/s. Grunty o wskaźniku plastyczności I_p poniżej 7 mają małe właściwości plastyczne i trudno jest uzyskać wymaganą wodoprzepuszczalność, natomiast grunty wysokoplastyczne o $I_p > 30$ % są trudne do wbudowania, bo przesuszone tworzą trudno urabialne bryły, a zbyt wilgotne są kleiste. Dodatkowo grunty wysokoplastyczne mają tendencje do nadmiernego pęcznienia i skurczu.

Klasyfikacja gruntów zaproponowana przez NRA (ang. National Rivers Authority) [Garbulewski K., 2000 za Jones R. M., i in. 1993] wydziela pod względem plastyczności następujące typy gruntów:

- odpowiednie,
- wątpliwe,
- nieodpowiednie.



Rys. 18. Ocena przydatności gruntów do budowy wykładzin mineralnych pod względem plastyczności [Garbulewski K., 2000].

W klasyfikacji tej wzięto pod uwagę przydatność gruntów w pracach ziemnych. Za grunty odpowiednie uznano te znajdujące się powyżej linii „A” na nomogramie Casagrande’a i charakteryzujące się wskaźnikiem plastyczności I_p z przedziału 15–65.

2.5.2.4. Kryterium mineralogiczne

Duży wpływ na właściwości gruntów spoistych ma rodzaj minerałów ilastych. Generalnie możemy wyróżnić trzy grupy minerałów, różniące się zarówno budową wewnętrzną, jak i właściwościami, tzn. grupa illitu, kaolinitu i smektytu. Minerale grupy kaolinitu charakteryzuje słaba hydrofilność. Nie posiadają one właściwości pęczniących, są nieaktywne chemicznie, nie biorą udziału w reakcjach wymiany jonowej, dlatego praktycznie nie zmieniają swoich właściwości w wyniku kontaktu

z różnymi związkami chemicznymi. Posiadają małą powierzchnię właściwą rzędu $10\text{--}30 \times 10^3 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$. Minerale grupy smektytu (montmorylonit) charakteryzuje bardzo duża hydrofilność, mogą zwiększać swoją objętość nawet 9-krotnie, są silnie pęczniejące, aktywne chemicznie, mają dużą zdolność do wymiany jonowej i sorpcji metali ciężkich. Niestety ich właściwości mogą ulegać zmianom, szczególnie w kontakcie z silnymi kwasami i zasadami, powodując zmianę struktury gruntu (trwała agregacja) i zwiększenie przewodności hydraulicznej nawet o dwa rzędy wielkości. Posiadają bardzo dużą powierzchnię właściwą rzędu $700\text{--}800 \times 10^3 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$. Minerale z grupy illitu mają właściwości pośrednie między grupą kaolinitu i smektytu. Zmiana właściwości mineralogicznych i koloidalno-chemicznych zachodzi w minerałach ilastych w następującym porządku intensywności [Brandl H., 1993]:

montmorylonit sodowy > montmorylonit wapniowy > illit > kaolinit

Mineralne warstwy izolacyjne są narażone na długotrwałe działanie fizykochemiczne odcieków. Ta bariera powinna jednak zostać praktycznie nieprzepuszczalna dla migracji zanieczyszczeń do podłoża gruntowego, dlatego zaleca się konstruowanie wielowarstwowych uszczelnień mineralnych z gruntów zawierających różne minerały ilaste. Najprostszym profilem przesłony mineralnej w składowisku odpadów powinien się składać przynajmniej z dwóch warstw gruntowych o odmiennych właściwościach [Majer E., 2005]:

- warstwy górnej „aktywnej” zbudowanej z gruntów, w składzie których dominują minerały z grupy smektytu. Jej zadaniem jest zmniejszenie stężenia wypływających odcieków dzięki dużym właściwościom sorpcyjnym i jonowymiennym.
- warstwy dolnej „nieaktywnej” zbudowanej z gruntów, w składzie których dominują minerały ilaste z grupy illitu i kaolinitu. Zadaniem tej warstwy jest utrzymanie długoletniej trwałości warstw uszczelnienia mineralnego.

Wielu badaczy tej problematyki podaje wytyczne dotyczące właściwości gruntów, które powinny być spełnione, przy formowaniu przesłon mineralnych. Poniższa tabela przedstawia te najczęściej cytowane w literaturze fachowej.

Tab.8 Zestawienie wymagań dla gruntów używanych do budowy przesłon izolacyjnych w składowiskach wg różnych autorów [Majer E., 2005].

Kryteria przydatności	Jed.	Wysokiński L. [1995]	Daniel D.E., Komer R.M. [1995]	Daniel D.E. [1998]	Benson C.H. i in.[1992 ⁴ , 1998]	Rowe R.K. i in. [1995]	Bagchi A. [1990]	EPA530-R-93-017 [1993]	Arch J. [1998]	NRA ¹
Współczynnik filtracji	m/s	10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹	1x10 ⁻⁹ -10 ⁻¹⁰	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹	≤ 1x10 ⁻⁹
Wskaźnik plastyczności		> 20	≥ 7-10	≥ 12-15	≥ 10	> 7	≥ 15 (10-15)	> 10	10-30	≥ 6-12
Granica płynności	%	> 30	-	-	17-70	-	≥ 30 (25-30)	-	< 90	≤ 65
Zawartość węgla wapnia	%	≤ 10	-	-	-	-	-	-	-	-
Zawartość cz. organicznych	%	≤ 2	-	-	-	-	-	-	-	-
Zawartość frakcji iłowej	%	≥ 20	≥ 10-20	≥ 20-25	≥ 10-20	15-20	≥ 25 (18-25)	-	> 10	> 10
Suma frakcji pyłowej i iłowej	%	≥ 60	≥ 30-50	≥ 50	≥ 50	-	≥ 50 (40-50)	≥ 30	> 30	-
Zawartość frakcji żwirowej	%	brak	≤ 30-50	-	-	-	-	-	< 10	-
Zawartość min. ilastych	% wag.	-	-	-	-	15-20	-	-	-	-
Aktywność	-	-	-	-	-	≥ 0,3	-	-	-	-
Pojemność wym. kationowej	Meq/100g	-	-	-	-	≥ 10	-	-	-	-
Maksymalny rozmiar ziarna	mm	-	25-50	-	-	-	-	-	50	-
Minimalna grubość warstwy	m	0,3-0,9	0,6-0,9 1,2-3,0	-	-	0,6+g ² 0,9-1,0 3-4 (15) ³	-	0,6-0,9	-	-

¹ – National Rivers Authority za Jones E. J. i in. 1995

² – geomembrana

³ – dla składowisk odpadów przemysłowych i toksycznych

⁴ – za Daniel D. E. 1998

Rozdział 3

3.1 Charakterystyka badań terenowych i laboratoryjnych

Pobór osadów dennych zgromadzonych w cofce zbiornika rożnowskiego został poprzedzony gruntowną analizą badań archiwalnych. Najwięcej informacji na temat rozmieszczenia i charakteru zdeponowanych osadów dostarczyły badania wykonane w 1994 r. przez Państwowy Instytut Geologiczny. Wykonano wówczas 23 otwory badawcze sondą ręczną w siatce 500×500 m (± 25 m). Interwał opróbowania wynosił 1,0 m ($\pm 0,2$ m). Następnie próbki przesiewano na mokro przez zestaw sit 0,2; 1,0; 2,0 mm. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, iż maksymalna miąższość mułów zgromadzonych w cofce Jeziora Rożnowskiego wynosi ok. 6 m i występuje w centralnej części cofki, ciągnąc się wzdłuż dawnego koryta Dunajca (zał. 1). W kierunku brzegów, miąższość osadów maleje. Ich średnia miąższość wynosi $3,5 \text{ m} \pm 0,9 \text{ m}$. Osadzony w cofce muł został określony jako osad piaszczysto-pylasto-ilasty barwy od ciemno do jasno szarej. W rozmieszczeniu pionowym i poziomym charakteryzuje się dużą jednorodnością, przy czym w centralnej części, wzdłuż dawnego koryta Dunajca, zwiększa się udział frakcji piaszczystej w części spągowej. Uśredniony skład ziarnowy mułów przedstawia się następująco; frakcja $< 0,2$ mm – 79,0 %; 0,2 – 1,0 mm – 19,7 %, 1,0 – 2,0 mm – 0,7 %, powyżej 2,0 mm – 0,6 %.

Powyższe badania nie pozwoliły na normowe określenie rodzaju gruntu, zgodnie z PN-86/B-02480, gdyż nie został określony procentowy udział frakcji poniżej 0,05 i 0,002 mm, a jedynie dały ogólny pogląd o drobnoziarnistym charakterze zdeponowanego osadu.

W latach 2001–2005 autor niniejszej pracy wykonał badania terenowe w cofce Jeziora Rożnowskiego między mostem w Kurowie a Zbyszycami oraz w strefie przed cofkowej między Nowym Sączem a Kurowem. Celem badań było szczegółowe rozpoznanie osadów dennych zgromadzonych w tej części doliny Dunajca. Wykonano 21 otworów badawczych penetrometrem ręcznym do maksymalnej głębokości ok. 3 m p.p.t. z poborem próbek gruntu do badań laboratoryjnych. Badania terenowe wykonano na trzech etapach. Na pierwszym etapie wykonano 11 otworów badawczych w strefie przybrzeżnej w Tęgoborzy w sieci otworów 25×25 m (poletko nr 1, zał. 2).

Realizacja tych badań zbiegła się w czasie z przeprowadzaną częściową konserwacją zapory w Rożnowie we wrześniu 2001 r., w wyniku czego, znacznie obniżono zwierciadło wody w jeziorze. Spowodowało to odsłonięcie dużej części osadów dennych i możliwość poboru próbek gruntu m.in. o nienaruszonej strukturze. Na drugim etapie, w lipcu 2002 r., wykonano z łodzi 5 otworów badawczych w strefie centralnej cofki (zał. 2). Na trzecim etapie jesienią 2003 r. wykonano kolejne 2 otwory badawcze w strefie cofkowej, w rejonie mostu kurowskiego, oraz 3 otwory w celu pobrania prób z holocenijskich mad rzecznych zdeponowanych na najniższym tarasie Dunajca między Nowym Sączem a Kurowem. Celem badań pierwotnych osadów holocenijskich doliny Dunajca było rozpoznanie gruntów spoistych, które występują pod osadami dennymi zgromadzonymi w cofce zbiornika. Granica między osadami pierwotnymi a obecnie gromadzonymi w czaszy zbiornika może być niekiedy trudna do zlokalizowania, na co wskazywali autorzy wcześniejszego opracowania [Wojciechowski A., 1994]. Autor wyszedł z założenia, że na odcinku kilku kilometrów (tyle mniej więcej w rozprzestrzenieniu poziomym zajmują zasadnicze osady cofkowe) osady pierwotne nie powinny różnić się od utworów występujących w rejonie między Nowym Sączem a Kurowem.

Wykonanie badań laboratoryjnych pobranych osadów obejmowało:

- analizę makroskopową gruntów,
- analizę granulometryczną i oznaczenie składu mineralnego,
- oznaczenie właściwości fizycznych,
- oznaczenie właściwości filtracyjnych przy wilgotności optymalnej i różnych wartościach wskaźnika zagęszczenia I_s ,
- oznaczenie właściwości mechanicznych gruntów przy wilgotności optymalnej i wskaźniku zagęszczenia $I_s \approx 0,95$,
- oznaczenie wybranych właściwości gruntu powstałego w wyniku badań doświadczalnych zrealizowanych wg projektu autorskiego, mających odwzorować proces tworzenia się gruntu technologią hydrotransportu.

3.2 Analiza makroskopowa osadów dennych Jeziora Rożnowskiego

Celem badań makroskopowych jest określenie rodzaju i nazwy gruntu, oraz niektórych jego cech, takich jak: skład mineralny, tekstura, stan gruntu, barwa, wilgotność i zawartość węgla wapnia

Szczegółowa analiza makroskopowa była możliwa, dzięki poborowi próbek gruntu m.in. o nienaruszonej strukturze oraz naturalnym uziarnieniu, na wytypowanym w pierwszym etapie prac badawczych poletku doświadczalnym. Wykonano wówczas 11 otworów badawczych o głębokości od 1,2 do 2,5 m. Analizę makroskopową wykonywano zarówno w warunkach terenowych jak i laboratoryjnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że dominującym gruntem tworzącym osady denne jest pył i glina pylasta, w mniejszej ilości występuje pył piaszczysty. Niekiedy można zaobserwować cienkie wkładki piasków pylastych i gliniastych oraz glin pylastych zwięzłych przechodzących w ił. W strefie przypowierzchniowej, do głębokości ok. 0,2–0,5 m zaobserwowano obecność nierozłożonych części organicznych (korzenie, kawałki drewna, szczątki kostne, pokruszone muszle małż, itp.).

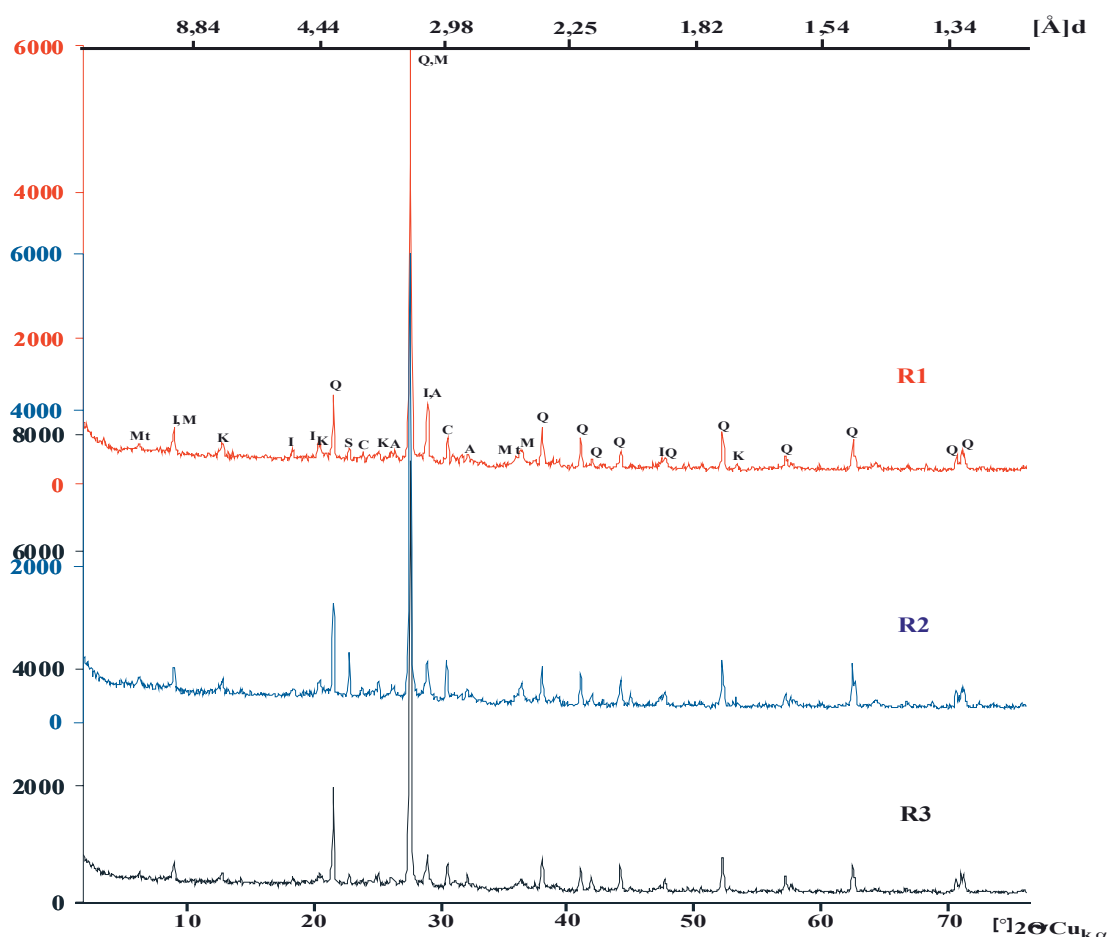
Zdeponowany materiał ma barwę jasno szarą, przy czym w przypadku wkładek gruntów z większą zawartością minerałów ilastych barwa przechodzi w ciemno szarą. Osad charakteryzuje się typowym dla tego rodzaju utworów uwarstwieniem, które uwidacznia się przez zmianę barwy oraz uziarnienie frakcjonalne, związane z jednym cyklem powodziowym. Warstewki pyłu i gliny mają zazwyczaj miąższość około 5–10 cm, natomiast warstewki piasku lub gliny pylastej zwięzłej ok. 1–2 cm.

W strefie przypowierzchniowej do ok. 0,3 m p. p. t. grunt jest w stanie płynnym, tylko w części centralnej cofki, gdzie w okresie letnim osady są odsłonięte, przypowierzchniowa część mułu ulega przesuszaniu, tworząc twardszą pokrywę. W miarę zagłębiania się wilgotność gruntu maleje, a zatem stan gruntu zmienia się z miękko plastycznego na plastyczny.

Badania makroskopowe obejmowały również określenie zawartości węgla wapnia CaCO_3 przy pomocy 5 % roztworu kwasu solnego. Testy wykazały brak reakcji gruntu z kwasem solnym. Tylko w nielicznych próbkach zaobserwowano delikatną i krótkotrwałą reakcję. Wskazują to na bardzo małą zawartość węgla wapnia CaCO_3 w osadach dennych – poniżej 1 %.

3.3 Oznaczenie składu mineralnego

Skład mineralny gruntów jest jedną z najważniejszych cech genetycznych. Od niego zależy rodzaj gruntu oraz większość właściwości fizyko-mechanicznych i chemicznych. Skład mineralny gruntów określono metodą rentgenostrukturalną dla trzech próbek gruntu, pobranych z otworów nr 1, 3 i 5. Badania przeprowadzono na próbkach surowych. Do badań wykorzystano dyfraktometr rentgenowski PHILIPS X'PERT z monochromatyzatorem refleksyjnym. Stosowano promieniowanie charakterystyczne CuK_α oraz filtr Ni. Dyfraktogramy interpretowano za pomocą programu identyfikacyjnego XRAYAN z bazą minerałów ICPDS (Diduszko R., Marciniak H., 1995).



Rys. 19. Dyfraktogramy próbek R1, R2, R3. Objasnienia: A – anhydryt, C – kalcyt, I – illit, K – kaolinit, M – muskowit, Mt – montmorillonit, S – skaień, Q – kwarc.

Badania rentgenograficzne wykazały, że skład fazowy badanych osadów w trzech zbadanych próbkach jest praktycznie identyczny, co świadczy o dużej jednorodności osadu (rys. 19). W składzie mineralnym występuje głównie kwarc, minerały ilaste, a także kalcyt, anhydryt i muskowitz. Minerały ilaste obok kwarcu są jednym z ważniejszych składników i są reprezentowane przez illit oraz kaolinit. Kaolinit charakteryzuje się nieznaczną wielkością krystalitów. O drobnodispersyjności krystalitów świadczy niska intensywność głównej linii dyfrakcyjnej o wartości (d_{hkl}) 7,15 Å względem pozostałych. Stwierdzono także śladowe ilości pakietów pęczniących montmorillonitu wapniowego ($d_{hkl} = 14,9$).

Zawartość ciężkich minerałów użytecznych [Wojciechowski A., 1994] (ilmenitu, rutilu, cyrkonu, monacytu, tlenków Fe i granatów) jest bardzo niska i nie przekracza 0,02 %.

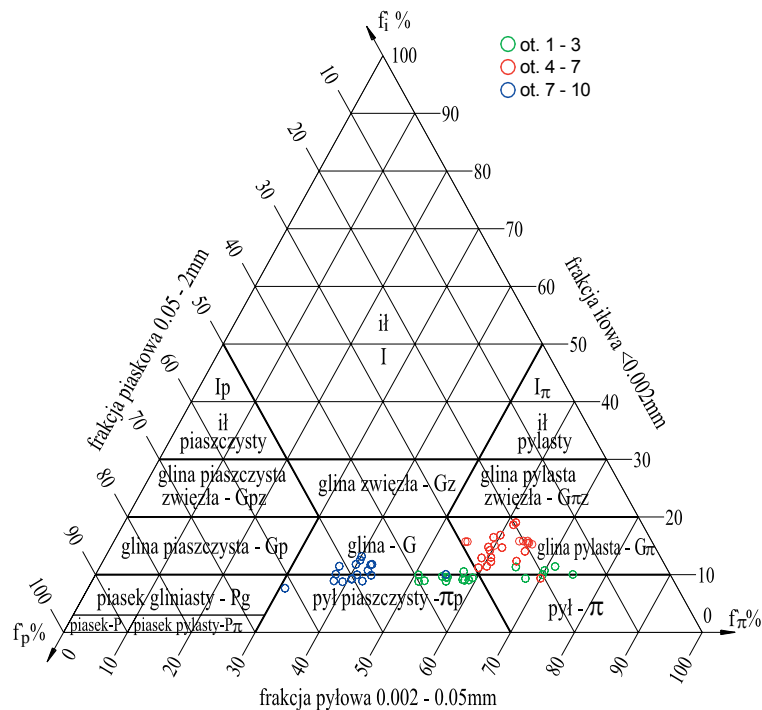
3.4 Analiza granulometryczna i określenie rodzaju gruntu

W celu dokładnego określenia rodzaju gruntu wykonano analizę areometryczną zgodnie z normą PN-88/B-04481.

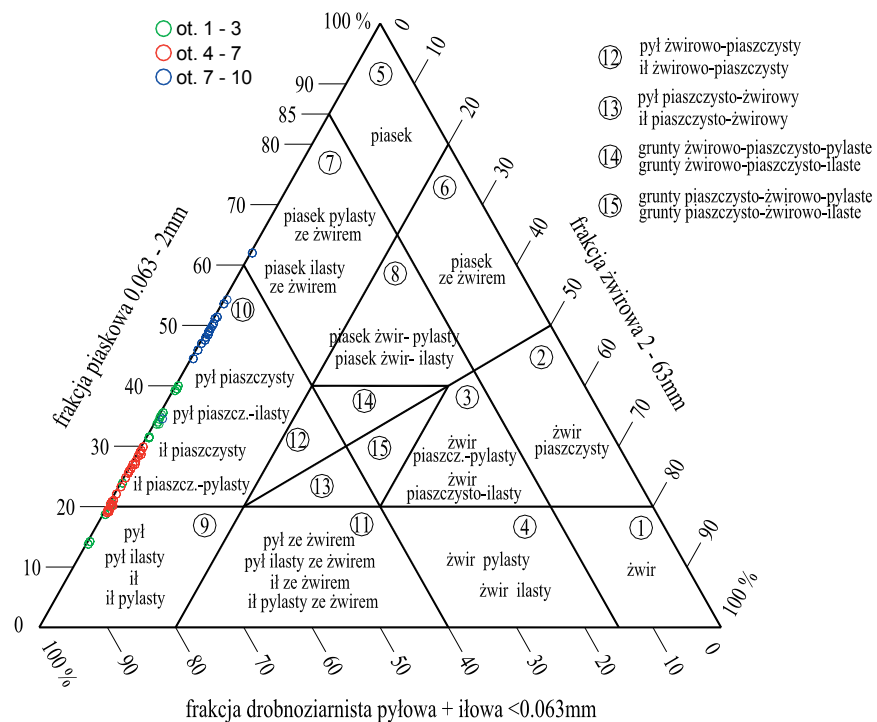
Przed wytypowaniem próbek do analizy granulometrycznej grunt z każdego otworu badawczego został podsuszony do stanu powietrzno-suchego i dokładnie wymieszany. Do badania pobrano po 3–5 próbek o masie 50–60g z każdego otworu badawczego.

Analiza otrzymanych wyników, dokonana zgodnie z normą wg PN-86/B-02480 (tab. 9, rys. 20 – trójkąt Fereta), wykazała obecność gruntów mało i średnio spoistych, tzn: pyłów piaszczystych, pyłów, glin i glin pylastych. Porównując procentową zawartość poszczególnych frakcji, zauważamy wyraźną dominację frakcji pyłowej nad piaskową i iłową.

Rozpatrując rozmieszczenie poziome osadów dennych, zauważono pewne zróżnicowanie, mianowicie za cyplem zbyszyckim (ot. 1, 2, 3) osadziły się pyły piaszczyste i gliny, natomiast w rejonie pomiędzy mostem w Kurowie a cyplem zbyszyckim (ot. 4, 5, 6, 7) osadziły się osady drobniejsze, głównie gliny pylaste i gliny. Na takie zróżnicowanie poziome osadu prawdopodobnie wpływa gwałtowna zmiana przebiegu doliny Dunajca za cyplem zbyszyckim, która może powodować lokalne zaburzenia warunków sedymentacji.



Rys. 20. Trójkont Fereta gruntów spoistych zdeponowanych w cofce Jeziora Rożnowskiego (wg normy polskiej PN-86/B-02480).



Rys. 21. Trójkont Fereta gruntów spoistych zdeponowanych w cofce Jeziora Rożnowskiego (wg normy europejskiej PN-EN ISO 14 688-1).

Tab. 9 Rodzaj gruntów spoistych zdeponowanych w cofce Jeziora Rożnowskiego (wg PN-86/B - 02480).

Nr otworu.	Liczba prób	Zawartość frakcji [mm]			Rodzaj gruntu wg PN-86/B-02480
		fp 2,0-0,05	f π 0,05-0,002	f ι < 0,002	
1	5	34-40	52-58	8-9	pył piaszczysty,
	śr.	35	56	9	
2	5	32-39	51-59	8-11	pył piaszczysty, glina
	śr.	35	55	10	
3	5	14-23	66-75	9-13	pył, glina pylasta
	śr.	19	70	11	
4	5	19-27	61-70	9-16	glina pylasta, pył
	śr.	22	65	13	
5	5	19-24	62-65	14-19	glina pylasta
	śr.	21	63	16	
6	5	18-29	55-67	13-17	glina pylasta,
	śr.	25	50	15	
7	5	21-30	52-63	11-16	glina pylasta
	śr.	27	60	13	
8	4	47-54	38-43	8-12	pył piaszczysty, glina
	śr.	49	41	10	
9	5	35-51	37-55	9-13	pył piaszczysty, glina
	śr.	46	44	11	
10	4	47-62	31-40	7-13	pył piaszczysty, glina
	śr.	52	38	10	

Pierwotne osady holocenijskie Dunajca są wykształcone jako pyły piaszczyste oraz gliny i charakteryzują się największą obecnością frakcji piaskowej.

Określenia nazwy gruntu dokonano również w oparciu o normę europejską PN-EN ISO 14 688-1 wprowadzoną 24 czerwca 2002 r., którą Polska powinna przyjąć jako podstawową po wstąpieniu do Unii Europejskiej.

Według normy europejskiej PN-EN ISO 14 688-1 w osadach cofkowych zbiornika rożnowskiego występuje pył piaszczysto-ilasty, pył ilasty i il piaszczysto-pylasty (tab. 10, rys 21 – trójkąt Fereta).

W dalszych rozważaniach i analizie wyników badań autor będzie używał nazewnictwa gruntów wg normy PN-86/B-02480 ze względu na nadal powszechne stosowanie normy polskiej.

Tab. 10 Rodzaj gruntów spoistych zdeponowanych w cofce Jeziora Rożnowskiego wg różnych norm – zestawienie zbiorcze.

Nr otworu	Rodzaj gruntu wg PN-EN ISO 14 688-1	Rodzaj gruntu wg PN-EN ISO 14 688-1 (wg załącznika krajowego)	Rodzaj gruntu wg PN-86/B-02480	Zawartość frakcji wg PN-EN ISO 14 688-1 [%]		
				fp	ft	fi
1	pył piaszczysto-ilasty	głina pylasta	pył piaszczysty,	2,0-0,063	0,063-0,002	< 0,002
2	pył piaszczysto-ilasty	głina pylasta	pył piaszczysty, glina	31-36	57-62	8-9
3	pył ilasty	pył ilasty	pył, glina pylasta	25-35	57-63	8-11
4	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty	głina pylasta, pył ilasty	głina pylasta, pył	9-19	70-79	9-13
5	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty	głina pylasta, glina ilasta, pył ilasty	głina pylasta, pył	16-25	64-73	9-16
6	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty	głina pylasta, glina ilasta, pył ilasty	głina pylasta	12-21	65-72	14-19
7	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty	głina pylasta, glina ilasta, pył ilasty	głina pylasta,	15-25	58-70	13-17
8	pył piaszczysto-ilasty	głina pylasta, glina ilasta, pył ilasty	głina pylasta	19-27	58-63	14-18
9	pył piaszczysto-ilasty	głina pylasta	pył piaszczysty, glina	44-51	42-48	7-10
10	pył piaszczysto-ilasty	głina pylasta	pył piaszczysty, glina	30-52	39-57	8-12
			pył piaszczysty, glina	45-57	34-45	7-13

Na podstawie wykresów uziarnienia gruntu określono wskaźnik niejednorodności uziarnienia gruntu U :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

gdzie:

d_{10} – średnica ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią 10 % masy próbki

d_{60} – średnica ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią 60 % masy próbki.

Mady holocenijskie Dunajcacy przyjmują wartość $U = 17-23$, a osady denne zbiornika rożnowskiego $U = 3,4-40$. Wynika z tego, że osady denne są gorzej wysortowane i charakteryzują się większą zmiennością granulometryczną.

3.5 Zawartość części organicznych

Określenie procentowej zawartości części organicznych jest bardzo istotne przy właściwej ocenie przydatności gruntów dla potrzeb budownictwa, bowiem jej obecność negatywnie wpływa na niektóre właściwości gruntów mineralnych.

Substancja organiczna charakteryzuje się wysoką hydrofilnością, co powoduje zwiększenie się ścisłości gruntów, plastyczności, właściwości pęczniących, a zmniejszenie wytrzymałości. Dodatkowo właściwości tych gruntów ulegają zmianom w czasie, szczególnie w środowisku tlenowym, co zostało szczegółowo opisane w podrozdziale 2.4. niniejszej rozprawy. Za pozytywne należy uznać zmniejszenie się wodoprzepuszczalności i zwiększenie właściwości sorpcyjnych, szczególnie pożądanym przy formowaniu przesłon iłowych w składowiskach odpadów.

Problemy związane z właściwą oceną gruntów organicznych są znacznie bardziej skomplikowane niż w przypadku gruntów mineralnych. Trudności te wynikają m.in. z braku odpowiednich metod poboru prób o nienaruszonej strukturze, zmiany właściwości gruntów w procesie obciążenia, dużej zmienności parametrów, braku w literaturze zestawień zależności korelacyjnych między poszczególnymi badaniami [Myślińska E., 2001, Bartoszewicz A., 1992, 1994, Borys M., 1993]. Dodatkowo nie wszystkie metody badań gruntów stosowane w przypadku oceny właściwości gruntów mineralnych dają właściwe wyniki przy badaniu gruntów organicznych. Sposób badań gruntów organicznych dla celów geologii inżynierskiej nie został do tej pory

ujednolicony, brak jest również jednolitej ich klasyfikacji. Niektórzy badaczy podjęli trud ustalenia klasyfikacji poszczególnych grup gruntów organicznych z uwzględnieniem ich właściwości geologiczno-inżynierskich i zależności korelacyjnych między poszczególnymi parametrami. Są to jednak klasyfikacje niepełne, dotyczą tylko wybranych grup gruntów występujących w określonych regionach Polski [Myślińska E., 2001, Gołębiowska A., 2006, Borys M., 1993].

W klasyfikacji gruntów organicznych podawanych przez polską normę PN-86/B-02480 o podziale gruntów organicznych decyduje procentowa zawartości części organicznych $I_{om} > 2 \%$ oraz geneza. Grunty próchniczne zawierają od 2 do 5 % części organicznych, głównie pochodzenia roślinnego, tworząc przypowierzchniową warstwę gruntów. Namuł zawiera od 5 do 30 % części organicznych. Powstaje w środowisku wodnym (jeziora, stawy, starorzecza) w wyniku osadzania się substancji mineralnych i organicznych, głównie jako namuły gliniaste, lub piaszczyste. Torfy zawierają powyżej 30 % części organicznych i powstają z obumarłych części roślinnych przy słabym dostępie tlenu.

Według normy europejskiej PN-EN ISO 14 688-1 podział gruntów organicznych jest nieco inny, ale również dokonany na podstawie procentowej zawartości części organicznych OC . W klasyfikacji tej wyróżnione są grunty nisko-organiczne 2–6 % OC , średnio-organiczne 6–20 % OC i wysoko-organiczne $>20 \%$ OC .

Spośród norm występujących w różnych krajach Europy norma niemiecka dopuszcza największą zawartość części organicznych w gruntach mineralnych. Grunty piaszczyste uznaje za organiczne, jeśli zawierają ponad 3 % I_{om} , a grunty pylasto-ilaste, jeżeli zawierają ponad 5 % I_{om} .

Nie bez znaczenia przy ilościowej ocenie tego parametru jest również metodyka badań. Jest to szczególnie istotne przy niskiej zawartości części organicznych, na granicy gruntów mineralnych i organicznych. Najczęściej stosowanymi metodami są: metoda Tiurina, oznaczenie substancji organicznej za pomocą wody utlenionej oraz oznaczenie strat prażenia [Myślińska E., 1998].

Podstawową metodą przy oznaczaniu procentowej zawartości części organicznych wg polskiej normy PN-88/B-04481 jest utlenienie ich 30 % roztworem wody utlenionej. Metodę tą należy stosować w przypadku gruntów o zawartości części organicznych poniżej 10 %. Metoda Tiurina polega na określeniu ilości węgla organicznego w substancji organicznej po utlenieniu go za pomocą dwuchromianu potasu, a stosuje ją się przy znacznej zawartości frakcji ilowej. Przy zawartości w gruncie większej ilości

chlorków, tlenków żelaza i manganu otrzymywane wyniki są zawyżone i zaleca się stosowanie innej metody. Oznaczenie strat prażenia wykonuje się w temperaturze 600–800 °C wg PN-88/B-04481, natomiast w temperaturze 440 °C wg Eurocode 7 [26], normy amerykańskiej ASTM D 2974-87 [23] i brytyjskiej BS 1377:Part 3: 1990 [25] za Myślińską E. [85]. Wyniki uzyskane podczas prażenia są na ogół zawyżone o ok. 3 % jest to spowodowane dehydroksylacją minerałów ilastych i innymi przemianami części mineralnej, dlatego nie zaleca się stosowania tej metody do klasyfikacji gruntów organicznych wg PN-88/B-04481 [Myślińska E., 2001].

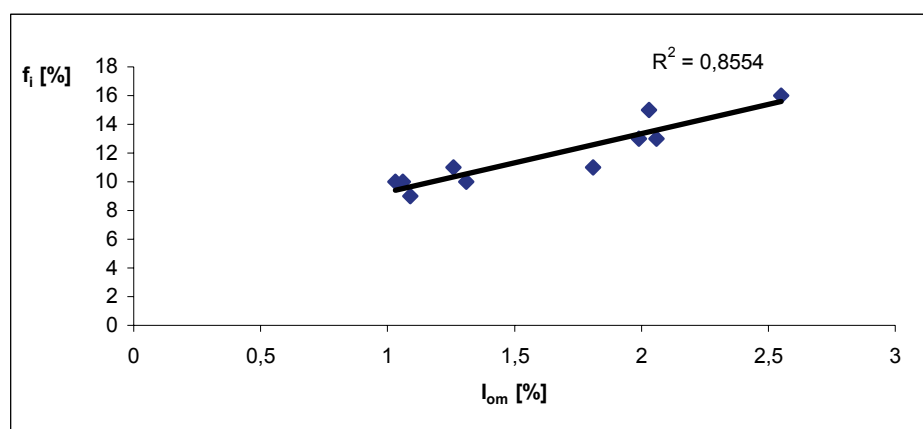
Oznaczenie części organicznych w osadach spoistych zbiornika różnowskiego wykonano za pomocą wody utlenionej wg polskiej normy PN-88/B-04481 dla 31 uśrednionych próbek pobranych z ot. 1–10 oraz metodą strat prażenia w temperaturze 440 °C dla 24 uśrednionych próbek pobranych z ot. 1–9.

Analiza otrzymanych wyników wykazała niższą niż się pierwotnie spodziewano zawartość części organicznych. Procentowa zawartości części organicznych I_{om} wykonana za pomocą wody utlenionej wykazała obecność części organicznych $I_{om} = 0,92\text{--}2,89\%$, średnio 1,83 %, natomiast w przypadku strat prażenia $I_{om} = 2,69\text{--}4,91\%$, średnio 3,71 %. Analizując rozprzestrzenienie poziome tego parametru, można zauważyć, że zmniejsza się on i to czasem dwukrotnie w osadach zdeponowanych za cyplem zbyszycim (ot. 1–3). W pozostałym rejonie (ot. 4–7), w którym stwierdzono utwory o większej zawartości frakcji ilowej, zawartość części organicznych jest wyższa, w niektórych próbkach bliska 3 %.

W pierwotnych madach rzecznych Dunajca (ot. 8 i 10), czyli w osadach pylasto-piaszczystych zawartość części organicznych jest niższa i wynosi od 0,72 do 1,61, a wartość średnia 1,12 % (tab. 11).

W badanych osadach zwrócono również uwagę na stopień rozkładu materii organicznej. Przy ocenie makroskopowej zaobserwowano, że osady cofkowe mają barwę od szarej do ciemno szarej, po pewnym czasie zaczynały wydzielać nieprzyjemny gnilny zapach. Podczas przerabiania tych gruntów przy oznaczaniu wilgotności optymalnej zauważono, że grunt zmieniał barwę na brązową i nieprzyjemny zapach zanikał. Na podstawie tych obserwacji uznano, że grunty cofkowe jako osady młode, pozostające pod wodą charakteryzują się niskim stopniem rozłożenia materii organicznej, mogącej mieć negatywny wpływ na właściwości fizyczne osadu. Osady Dunajca, przeciwnie są osadami dużo starszymi, znajdują się w strefie aeracji, są barwy

jasno brązowej, dlatego uznano je za osady o wysokim stopniu rozłożenia materii organicznej.



Rys. 22. Wykres zależności wartości średnich zawartości części organicznych I_{om} od zawartości frakcji ilowej f_i .

Jak już wcześniej wspomniano, w badanych osadach zawartość części organicznych wzrasta w gruntach bardziej drobnoziarnistych. W związku z tym autor zaproponował wskaźnik części organicznych i_{om} wyrażony formułą:

$$i_{om} = \frac{I_{om}}{f_i} \quad (2)$$

gdzie:

I_{om} – zawartość części organicznych oznaczonych metodą wody utlenionej [%]

f_i – zawartość frakcji ilowej [%].

Otrzymane wartości wskaźnika części organicznych i_{om} dla badanych osadów przedstawiono w tab. 11.

Jak pokazują badania archiwalne [Onoszko J., 1964, Cyberski J., 1965], zawartość części organicznych I_{om} w rzeczonych osadach określono na poziomie kilku procent. Wyjątkowo niskie wartości otrzymał w swoich badaniach Miczyński J. [82], mianowicie zawartość części organicznych określona metodą Tiurina wyniosła 0,8 – 2,0 %, średnio 0,81 %. W badaniach wykonanych w 1994 r. [Wojciechowski A., 1994] określono zawartość całkowitego węgla organicznego, ale dla frakcji poniżej 0,2 mm, która wyniosła 1,26 %.

Tab. 11. Zawartość części organicznych w osadach cofkowych zbiornika roznowskiego oraz w pierwotnych madach rzecznych Dunajca.

Nr ot.	Rodzaj gruntu wg PN-EN ISO 14 688-1	Rodzaj gruntu wg PN-88/B-04481	i_{om}	Zawartość części organicznych I_{om} [%]	
				Met. wody utlenionej	Met. strat prażenia w tem. 440°C
1	pył piaszczysto-ilasty	pył piaszczysty	0,1-0,10	0,92–1,25	2,69–3,11
			0,12	1,09	2,98
2	pył piaszczysto-ilasty	pył piaszczysty, glina	0,09-0,15	0,80–1,82	3,34–3,96
			0,13	1,31	3,57
3	pył ilasty, grunty nisko-organiczne	pył, glina pylasta, grunt próchniczny	0,13-0,17	1,45–2,09	3,61–3,99
			0,16	1,81	3,77
4	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty, grunty nisko-organiczne	pył, glina pylasta, grunt próchniczny	0,14-0,18	1,78–2,31	3,37–3,84
			0,16	2,06	3,51
5	grunty nisko-organiczne	grunt próchniczny	0,15-0,18	2,37–2,89	4,13–4,51
			0,16	2,55	4,36
6	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty, grunty nisko-organiczne	glina pylasta, grunt próchniczny	0,13-0,16	1,60–2,39	3,57–3,90
			0,15	2,03	3,78
7	pył ilasty, il piaszczysto-pylasty, grunty nisko-organiczne	glina pylasta, grunt próchniczny	0,12-0,16	1,23–2,49	–
			0,15	1,99	
8	pył piaszczysto-ilasty	pył piaszczysty, glina	0,09-0,12	0,72–1,30	2,91–3,44
			0,10	1,06	3,19
9	pył piaszczysto-ilasty	pył piaszczysty, glina	0,09-0,13	0,86–1,61	3,06–3,53
			0,11	1,26	3,27
10	pył piaszczysto-ilasty	pył piaszczysty, glina	0,09-0,12	0,85–1,22	–
			0,10	1,03	

Polska norma PN-88/B-04481 zaleca by przy określaniu rodzaju gruntu brać pod uwagę przede wszystkim wyniki otrzymane metodą wody utlenionej. Wartości otrzymane metoda strat prażenia należy traktować jako orientacyjne. W związku z tym stwierdza się, iż w rejonie cofki zbiornika roznowskiego występują grunty na pograniczu gruntów mineralnych i organicznych, o zawartości części organicznych $I_{om} = 0,72–2,89$ %, wykształcone jako pyły, pyły piaszczyste, gliny i gliny pylaste oraz utwory organiczne określane jako grunty próchniczne.

Według normy europejskiej PN-EN ISO 14 688-1 badane osady tworzą pyły ilaste, pyły piaszczysto-ilaste, il piaszczysto-pylaste oraz grunty nisko-organiczne (tab. 11).

3.6 Właściwości fizyczne

3.6.1 Wilgotność naturalna W_n

Wilgotność naturalną określono dla 68 próbek pobranych w otworach badawczych na poletku doświadczalnym nr 1, dla 16 próbek pobranych w ot. 6 i 7 oraz dla 22 próbek pobranych w pierwotnych madach rzecznych w ot. 8–10. W ot. 1–5 wilgotności naturalnej nie oznaczano, gdyż próbki były pobierane spod wody.

Wilgotność naturalna osadów występujących w obszarze poletka nr 1 waha się w szerokim zakresie od 23,8 do 83,1 %, średnio 38,5 %. Zauważono, że bardzo wysoka wilgotność występuje w strefie przypowierzchniowej do głębokości ok. 0,3–0,4 m, i mieści się w przedziale od 58,6 do 83,1 %, średnio 64,8 %. Poniżej, wilgotność wyraźnie zmniejsza się od ok. 25,2 do 59,0 %, średnio 34,8 %.

Wilgotność naturalna osadów pobranych w ot. 6 i 7 w rejonie mostu kurowskiego również jest wysoka i kształtuje się w przedziale od 25,18 do 49,14 %, średnio 36,8 %.

Wilgotność naturalna pierwotnych osadów holocenijskich została określona w obszarze poletka doświadczalnego oraz w strefie przedcofkowej w ot. 8–10. W rejonie poletka doświadczalnego pobrano tylko stropową część pierwotnych mad Dunajca. Ich wilgotność naturalna mieści się w przedziale od 23,8 do 31,4 %, średnio 27,6 %. W strefie przedcofkowej mady rzeczne charakteryzują się niską wilgotnością w przedziale od 11,2 do 22,3 %, średnio 16,2 %.

3.6.2 Gęstość objętościowa ρ

Gęstość objętościowa ρ została oznaczona na wybranych próbkach pobranych w rejonie poletka doświadczalnego nr 1 oraz w ot. 8 i 9. Łącznie wykonano 53 oznaczenia dla próbek o średnicy 38 i wysokości od 20 do 50 mm oraz o średnicy 25,6 mm i wysokości 24,7 mm. Gęstość objętościowa osadów dennych mieści się w przedziale od 1,67 do 1,99 [g/cm³], a wartość średnia wynosi 1,85 [g/cm³]. Niskie wartości gęstości objętościowej są związane z wysoką wilgotnością badanych osadów. Najniższe wartości ρ w przedziale od 1,67 do 1,81 [g/cm³] są charakterystyczne dla wkładek silnie nawodnionych glin pylistych zwięzłych barwy ciemno szarej,

z widocznymi szczątkami organicznymi. Natomiast dominujące w profilu pionowym gliny pylaste i pyły charakteryzują się gęstością objętościową w przedziale od 1,83 do 1,99 [g/cm³].

Gęstość objętościowa pierwotnych osadów mieści się w przedziale 1,96 do 2,14 [g/cm³], a wartość średnia wynosi 2,05 [g/cm³].

3.6.3 Gęstość właściwa szkieletu gruntowego ρ_s

Gęstość właściwa szkieletu gruntowego ρ_s gruntów organicznych o niskiej zawartości części organicznych jest bardzo zbliżona do gruntów mineralnych, która mieści się w przedziale od 2,65 do 2,72 [g/cm³] [Myślińska E., 2001]. Ponieważ oznaczenie laboratoryjne tego parametru w przypadku gruntów organicznych jest uciążliwe i nie zawsze daje dobre rezultaty, można posługiwać się wzorami empirycznymi, z których najczęściej stosowany, szczególnie w literaturze anglojęzycznej jest wzór Skempton i Petley'a [Myślińska E., 2001]. Przy założeniu, że średnia wartość gęstości właściwej szkieletu mineralnego wynosi 2,70 [g/cm³], a części organicznych 1,40 [g/cm³] wzór ma następującą postać:

$$\rho_s = \frac{3,8}{0,013 \times N + 1,4} \quad (3)$$

gdzie:

ρ_s – gęstość właściwa szkieletu gruntowego [g/cm³]

N – zawartość substancji organicznej oznaczonej przez straty prażenia [%].

Gęstość właściwa osadów dennych obliczona wg powyższej formuły, przy obecności części organicznych uzyskanych podczas prażenia $I_{om} = 2,69 - 4,91$ %, średnio 3,71 % mieści się w przedziale od 2,61 do 2,65 [g/cm³], średnio 2,62 [g/cm³].

Gęstość właściwą pierwotnych mad holocenijskich przyjęto na podstawie danych literaturowych [Myślińska E., 2001] równą 2,65 [g/cm³].

3.6.4 Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d , współczynnik porowatości całkowitej n , wskaźnik porowatości e

Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d osadów dennych obliczono wg wzoru:

$$\rho_d = \frac{100 \times \rho}{100 + W} \quad (4)$$

gdzie:

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [g/cm^3]

ρ – gęstość objętościowa gruntu [g/cm^3]

W – wilgotność próbki [%].

Uzyskana wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego osadów cofkowych wynosi od 1,11 do 1,55 [g/cm^3], a wartość średnia wynosi 1,38 [g/cm^3]. Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego pierwotnych mad holocenijskich jest wyższa i mieści się w przedziale od 1,60 do 1,90 [g/cm^3], a wartość średnia wynosi 1,77 [g/cm^3].

Porowatość całkowita n została oszacowana metodą obliczeniową wg formuły:

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad (5)$$

gdzie:

ρ_s – gęstość właściwa szkieletu gruntowego [g/cm^3]

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [g/cm^3].

Otrzymane wartości porowatości n dla osadów cofkowych mieszczą się w przedziale od 0,41 do 0,58. Wartość średnia wynosi 0,47.

Pierwotne mady holocenijskie przyjmują wartość porowatości n w przedziale od 0,28 do 0,40. Wartość średnia wynosi 0,33.

Wskaźnik porowatości e również został oszacowany metodą obliczeniową wg formuły:

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (6)$$

gdzie:

ρ_s – gęstość właściwa szkieletu gruntowego [g/cm^3]

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [g/cm^3].

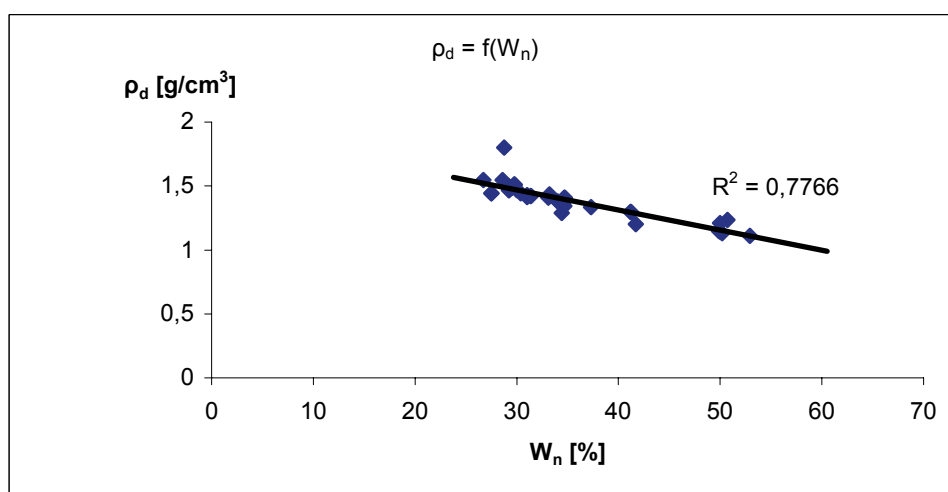
Otrzymane wartości wskaźnika porowatości e dla osadów cofkowych mieszczą się w przedziale od 0,69 do 1,36, a wartość średnia wynosi 0,92.

Pierwotne mady holoceniowe przyjmują wartość wskaźnika porowatości e w przedziale od 0,39 do 0,65. Wartość średnia wynosi 0,50.

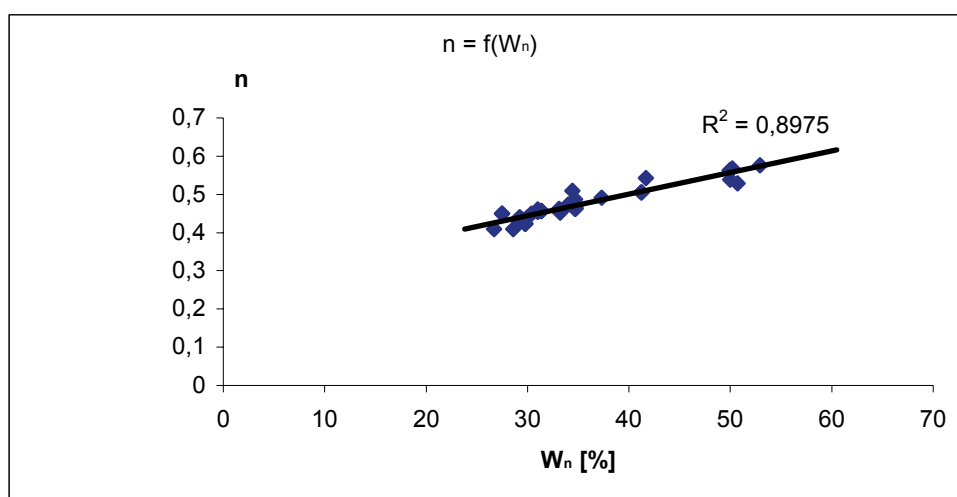
Do obliczenia porowatości n i wskaźnika porowatości e osadów dennych została przyjęta średnia wartość gęstości właściwej szkieletu gruntowego $\rho_s = 2,62$ [g/cm^3] obliczona wg formuły (3).

Niskie wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, wysokie wartości porowatości całkowitej oraz wysoka wilgotność osadów zdeponowanych w cofce zbiornika są zapewne wynikiem bardzo powoli przebiegającego procesu konsolidacji współczesnych osadów dennych, które mają zaledwie kilkadziesiąt lat i konsolidują pod własnym ciężarem.

Sporządzone wykresy zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i porowatości od wilgotności naturalnej mają charakter liniowy, co pokazują rys. 23 i 24.



Rys. 23. Wykres zależności gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_d od wilgotności naturalnej W_n .



Rys. 24. Wykres zależności porowatości całkowitej n od wilgotności naturalnej W_n .

3.6.5 Granice konsystencji

Granica plastyczności W_p została określona zgodnie z normą PN-88/B-02481 dla 42 uśrednionych próbek pobranych w rejonie poletka doświadczalnego oraz w otworach wiertniczych ot. 1–6 oraz ot. 9–10. Wartość granicy plastyczności badanych osadów dennych mieści się w przedziale od 20,0 do 28,0 %. Wartość średnia wynosi 25,2 %. Wartość W_p dla mad Dunajca mieściła się w przedziale od 19,0 do 23,6 %, średnio 21,2 %.

Granica płynności W_L została określona zgodnie z normą PN-88/B-02481 w aparacie Casagrande'a dla 30 uśrednionych prób pobranych z otworów wiertniczych ot. 1–6 oraz ot. 8–9. Wartość granicy płynności badanych osadów określona w aparacie Casagrande'a dla osadów cofkowych oraz mad holoceničkih Dunajca mieści się w przedziale od 30,1 do 49,5 %, a wartość średnia wynosi 41,8 %. Granica płynności określona tylko dla osadów cofkowych przyjmuje wartości w przedziale od 41,6 do 49,5 %, wynosi 45,7 %.

Dla mad Dunajca granica płynności od 30,1 do 37,0 %, a wartość średnia 32,6 %.

Jak zauważono (rys. 25) granica plastyczności i płynności rośnie wraz ze wzrostem frakcji ilowej oraz części organicznych.

Stwierdzono również, że dla gruntów o podobnym uziarnieniu i zawartości części organicznych tzn.; dla pierwotnych mad rzecznych Dunajca pobranych w ot. 8 i 9 oraz dla osadów cofkowych pobranych w ot. 1 i 2 wartość granicy płynności W_L wynosi odpowiednio od 30,1 do 37,0 % oraz od 41,6 do 44,3 %. Różnice otrzymanych wartości należy tłumaczyć, w przypadku osadów cofkowych, niskim, a w przypadku mad Dunajca wysokim stopniem rozłożenia części organicznych.

Ważnym parametrem przy ocenie plastyczności gruntu jest wskaźnik plastyczności I_p , który jest różnicą między granicą płynności W_L , a granicą plastyczności W_p . Wartość wskaźnika plastyczności I_p dla spoistych osadów dennych Jeziora Rożnowskiego mieści się w przedziale od 17,5 do 22,0 %, średnio 20,1 %, natomiast wartość I_p pierwotnych osadów holocenijskich wynosi od 10,3 do 13,6 %, średnio 11,6 %.

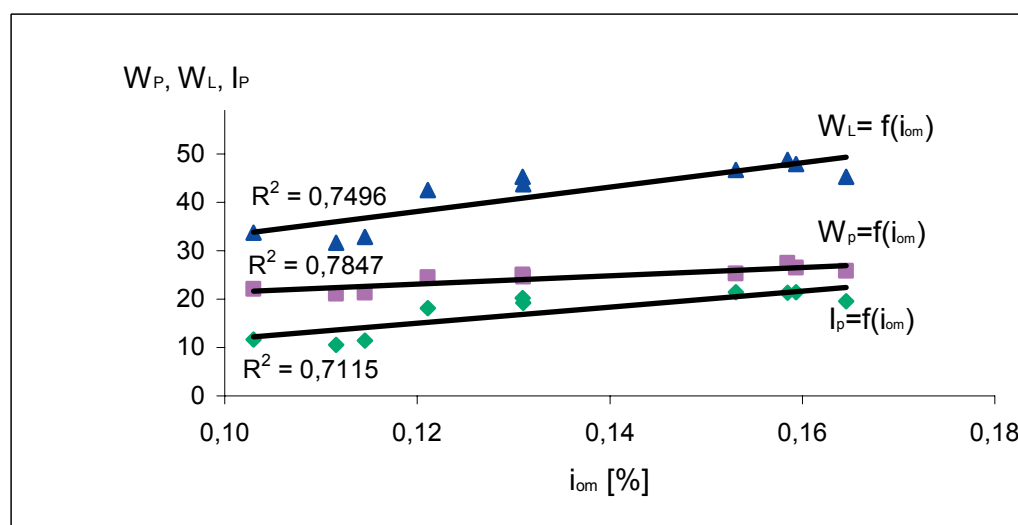
Przy określaniu plastyczności gruntu oblicza się również aktywność A (wg Skemptona), która określa zdolność gruntu do wiązania wody:

$$A = \frac{I_p}{f_i} \quad (7)$$

gdzie:

I_p – wskaźnik plastyczności [%]

f_i – zawartość frakcji iłowej [%].



Rys. 25. Zależność wartości średnich granicy plastyczności W_p i płynności W_L oraz wskaźnika plastyczności I_p od wskaźnika części organicznych i_{om} .

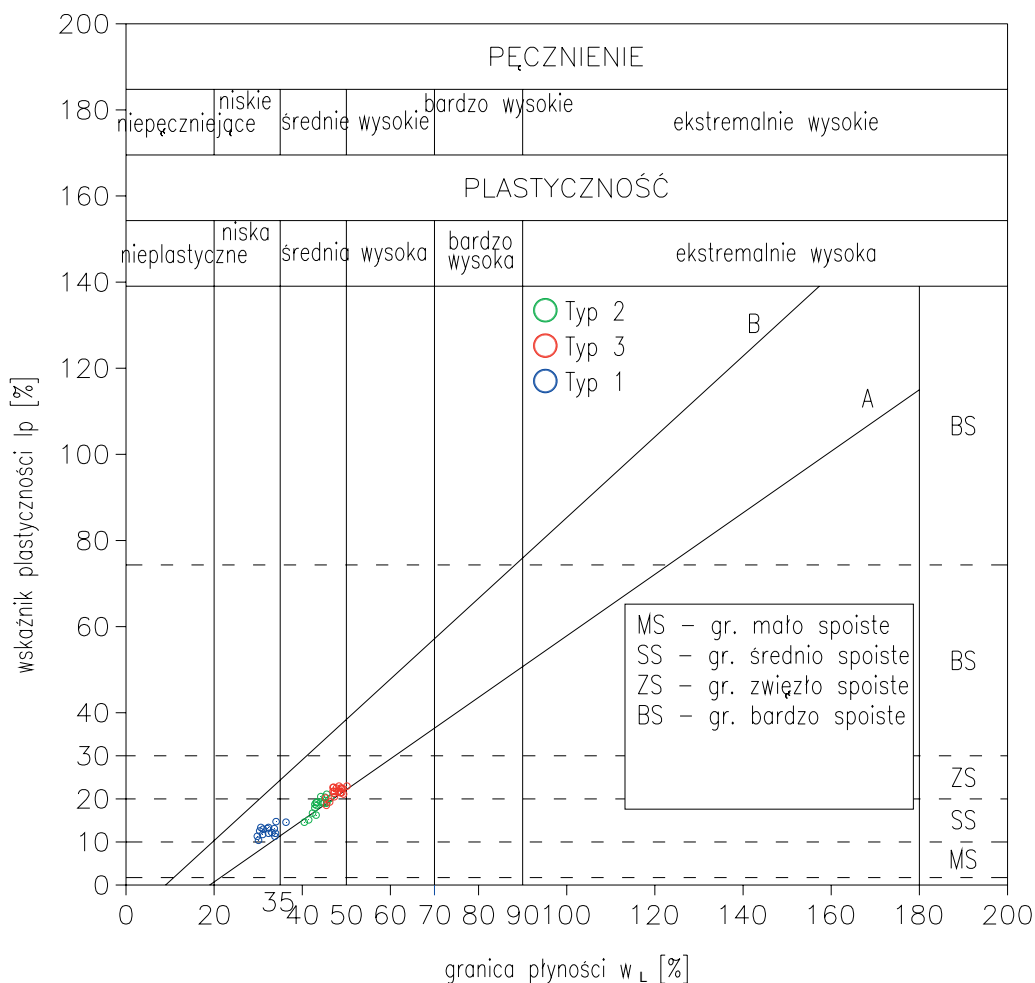
Jak podaje Myślińska E. [85] średnia wartość aktywności A gruntów mineralnych wynosi od 0,75 do 1,25. Wartości tego parametru dla gruntów ze zbiornika rożnowskiego są wysokie i mieszczą się w przedziale od 1,12 do 2,36, średnio 1,71, natomiast dla pierwotnych mady Dunajca wynoszą od 0,76 do 1,39, średnio 1,07.

Analiza otrzymanych wyników potwierdza, iż wzrost wskaźnika plastyczności jest ściśle związany ze wzrostem frakcji iłowej oraz zawartości części organicznych (rys. 17 i 18). Ponadto zauważa się, że niewielka obecność części organicznych o niskim stopniu rozkładu, ok. 2 % powoduje prawie dwukrotny wzrost wskaźnika plastyczności I_p i aktywność A dla gruntów o podobnym składzie granulometrycznym.

Oznaczenie plastyczności gruntów można określić, wykorzystując do tego celu graficzne nomogramy. Najczęściej używany, szczególnie w zachodniej literaturze, jest nomogram Casagrande'a, który przedstawia zależność między wskaźnikiem plastyczności a granicą płynności (rys. 26)

Na podstawie powyższego nomogramu można stwierdzić, że osady cofkowe należą do gruntów o średniej plastyczności i pęcznieniu ($W_L = 35-50 \%$), natomiast pierwotne mady Dunajca to grunty o niskiej plastyczności i niskim pęcznieniu ($W_L < 35 \%$).

Nomogram plastyczności



Rys. 26. Charakterystyka plastyczności i pęcznienia gruntów wg nomogramu Casagrande'a.

3.6.6 Właściwości sorpcyjne

Znaczny wpływ na migrację substancji w wodach podziemnych mają skomplikowane procesy fizykochemiczne zachodzące na kontakcie substancji z wodą i skałą otaczającą. Oddziaływanie ośrodka skalnego na zanieczyszczenia przejawia się głównie przez procesy sorpcyjne (absorpcyjno-desorpcyjne). Ilość składnika zaabsorbowanego przez grunt jest określana przez zdolność sorpcyjną gruntu. Wyrażona jest m. in. przez takie parametry jak pojemność sorpcyjna MBC i powierzchnia właściwa S_r . Największy wpływ na rozpatrywane parametry ma

zawartość minerałów ilastych oraz ich rodzaj, a dodatkowy wpływ może mieć obecność części organicznych, tlenków i wodorotlenków żelaza i manganu oraz węglanów.

Pojemność sorpcyjną i powierzchnię właściwą określono metodą sorpcji błękitu metyloвого. Do badań wytypowano od 3 do 5 uśrednionych próbek o masie ok. 7 g pobranych z ot. 1, 2, 4, 5, 9, 10.

Pojemność sorpcyjną MBC gruntu w stosunku do błękitu metyloвого obliczono wg wzoru:

$$MBC = \frac{100 \times m \times (V_1 + V_{i-1})}{m_s \times 2} \quad (8)$$

gdzie:

MBC – pojemność sorpcyjna gruntu oznaczająca ilość gramów błękitu metyloвого zaadsorbowanego przez 100 g suchego gruntu,

m – masa błękitu metyloвого w gramach zawarta w 1 cm³ roztworu, w przeliczeniu na substancję 3-wodną [g/cm³],

m_s – masa gruntu użytego do badania w przeliczeniu na próbkę wysuszoną w temperaturze 105–110 °C [g],

V_i – objętość roztworu błękitu metyloвого, przy którym zdolność sorpcyjna została przekroczona [cm³],

V_{i-1} – objętość roztworu błękitu metyloвого, przy przedostatniej porcji przed przekroczeniem zdolności sorpcyjnych gruntu [cm³].

Powierzchnię właściwą gruntu S_t obliczono wg formuły:

$$S_t = K_1 \times MBC \quad (9)$$

gdzie:

S_t – powierzchnia właściwa gruntu [m²/g],

K_1 – współczynnik, którego wartość wynosi 20,94 m²/g, określający sumę rzutów powierzchni 1 g cząstek błękitu metyloвого,

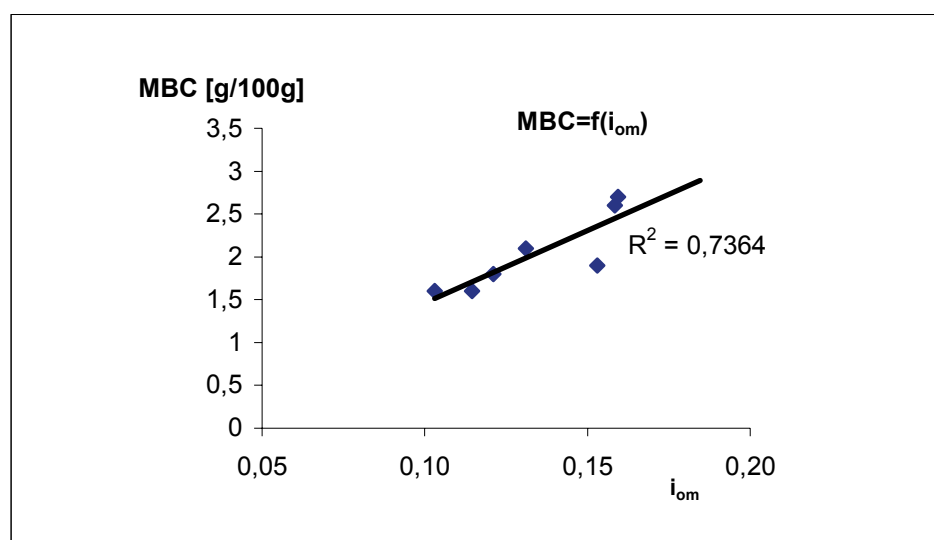
MBC – pojemność sorpcyjna gruntu [g/100g]

Analiza otrzymanych wyników potwierdza, iż decydujący wpływ na wzrost pojemności sorpcyjnej MBC i powierzchni właściwej S_t ma obecność minerałów ilastych. Uzyskane wartości oznaczanych parametrów dla osadów cofkowych są

dwukrotnie wyższe niż dla mad Dunajca. Dodatkowy wpływ ma również obecność części organicznych. Otrzymane wartości $MBC = 1,2 - 2,9$ [g/100g] oraz $S_t = 25,6 - 59,8$ [m²/g] należy traktować jako wartości niskie. Wynika to między innymi z obecności w składzie mineralnym minerałów ilastych z grupy illitu i kaolinitu.

Tab. 12. Zestawienie wyników badań pojemności sorpcyjnej MBC i powierzchni właściwej S_t .

Nr	MBC [g/100g]	S_t [m ² /g]	I_{om} [%]	Fracja [mm]			i_{om}	Rodzaj gruntu
				f_p	f_π	f_i		
ot. 1	1,7 – 2,0	36,5 – 42,0	0,92-1,25	34-40	52-58	8-9	0,12	pył piaszczysty
śr.	1,8	38,5	1,09	35	56	9		
ot. 2	1,7 – 2,4	36,3 – 49,6	0,80 – 1,82	32-39	51-59	8-11	0,13	glina, pył piaszczysty
śr.	2,10	44,0	1,31	35	55	10		
ot. 4	2,4 – 2,7	49,6 – 56,0	1,78 – 2,31	19-27	61-70	9-16	0,16	pył, glina pylasta
śr.	2,6	55,3	2,06	22	65	13		
ot. 5	2,6 – 2,9	54,9 – 59,8	2,37 – 2,89	19-24	62-65	14-19	0,16	glina pylasta
śr.	2,7	57,4	2,55	21	63	16		
ot. 7	1,8 – 2,0-	36,7 - 41,8	1,23 – 2,49	21-30	52-63	11-16	0,15	glina pylasta
śr.	1,9	41,3	1,99	27	60	13		
ot. 9	1,2 – 1,8	25,7 – 37,1	0,86 – 1,61	35-51	37-55	9-13	0,11	glina, pył piaszczysty
śr.	1,6	32,4	1,26	46	44	11		
ot. 10	1,2 – 1,9	25,6 – 39,3	0,85 – 1,22	47-62	31-40	7-13	0,10	glina, pył piaszczysty
śr.	1,6	32,6	1,03	52	38	10		



Rys. 27. Wykres zależności wartości średnich pojemności sorpcyjnej MBC od wskaźnika części organicznych i_{om} .

3.6.7 Odczyn (pH)

Do oznaczenia wartości pH zastosowano metodę kolorymetryczną. Użyto do tego celu papierka wskaźnikowego lakmusowego. Badania wykazały, iż badane grunty charakteryzują się odczynem obojętnym.

Na podstawie analiza materiałów archiwalnych [Wojciechowski A., 1994] stwierdzono, że pH osadów dennych mieści się w przedziale od 7,7 do 8,1, a wartość średnia pH = 7,9.

3.6.8 Wydzielenie charakterystycznych typów gruntu

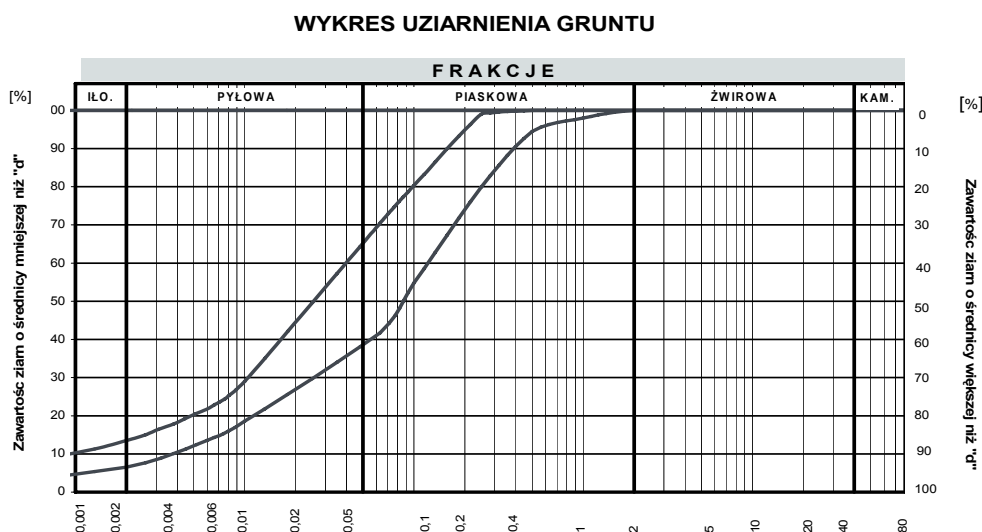
Analiza wyników badań składu mineralnego i właściwości fizycznych pokazała, że osady denne zbiornika rożnowskiego i pierwotne mady Dunajca reprezentowane są przez trzy charakterystyczne typy gruntów:

- **typ 1** – to pyły, pyły piaszczyste i gliny pylaste o zawartości frakcji iłowej od 8 do 13 %, średnio 10 % i części organicznych od 0,7 do 1,6 %, średnio 1,1 %, występujące w ot. 8 – 10 – pierwotne mady Dunajca,



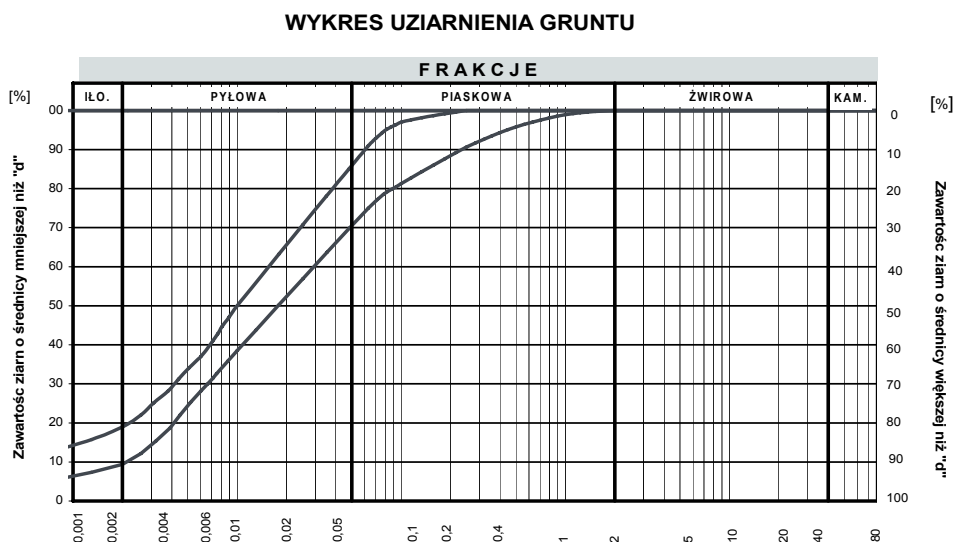
Rys. 28. Wykres granicznych krzywych uziarnienia gruntu typ 1.

- **typ 2** – to pyły, pyły piaszczyste i gliny pylaste o zawartości frakcji iłowej od 8 do 11 %, średnio 10 % i części organicznych od 0,8 do 1,8 % średnio 1,4 %, występujące w ot. 1 – 3 – osady cofkowe za cyplem zbyszycykim,



Rys. 29. Wykres granicznych krzywych uziarnienia gruntu typ 2.

- **typ 3** – to gliny pylaste i grunty próchnicze o zawartości frakcji iłowej od 12 do 19 %, średnio 14 % i części organicznych od 1,5 do 2,9 %, średnio 2,2 %, występujące w ot. 4–7 – osady cofkowe między mostem w Kurowie a cyplem zbyszycykim.



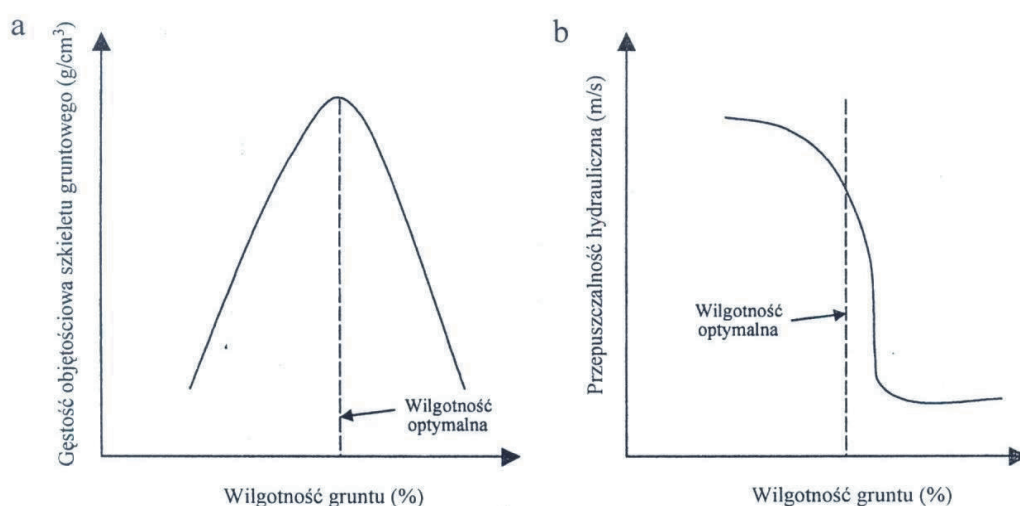
Rys. 30. Wykres granicznych krzywych uziarnienia gruntu typ 3.

Dalsze badania laboratoryjne, czyli określenie wilgotności optymalnej, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, współczynnika filtracji i właściwości mechanicznych realizowano dla wytypowanych trzech rodzajów gruntów.

3.6.8 Wilgotność optymalna W_{opt} i maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{ds}

Przy doborze gruntów do wznoszenia budowli ziemnych bardzo ważną cechą jest określenie wilgotności optymalnej gruntu W_{opt} , przy którym uzyskuje się największe zagęszczenie gruntu wyrażone przez maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego ρ_{ds} . Spełnienie tych wymagań zapewni uzyskanie podłoża o najlepszych właściwościach geotechnicznych.

Zauważono również duży wpływ wilgotności gruntu na wodoprzepuszczalność, szczególnie istotną przy formowaniu przesłon mineralnych w składowiskach odpadów. Wbudowywanie gruntu zbyt suchego powoduje, tworzenie się podłoża o niejednorodnej, porowatej teksturze i dużej przewodności hydraulicznej. Jeżeli zagęszczamy grunt o wilgotności większej od wilgotności optymalnej wodoprzepuszczalność znacznie spada (rys. 31), jednak napotyka się na problem technicznego formowania podłoża związanego ze wzrostem plastyczności.



Rys. 31. Zależność: a – gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, b – przepuszczalności hydraulicznej od wilgotności gruntu [Garbulewski K., 2000 za Daniel E. D., Korner R. M., 1995]

Jak zaleca norma dotycząca budowy nasypów PN-B-06050 z 1999 r. wilgotność gruntu wbudowywana w nasyp powinna być bliska wilgotności optymalnej $W = W_{opt} \pm 2\%$. Jak podaje Garbulewski K [62] w zachodniej literaturze najczęściej zaleca się by wilgotność gruntów przy budowie warstw izolacyjnych mieściła się po wilgotnej stronie krzywej zagęszczalności w zakresie od W_{opt} do $W_{opt} + 3\%$.

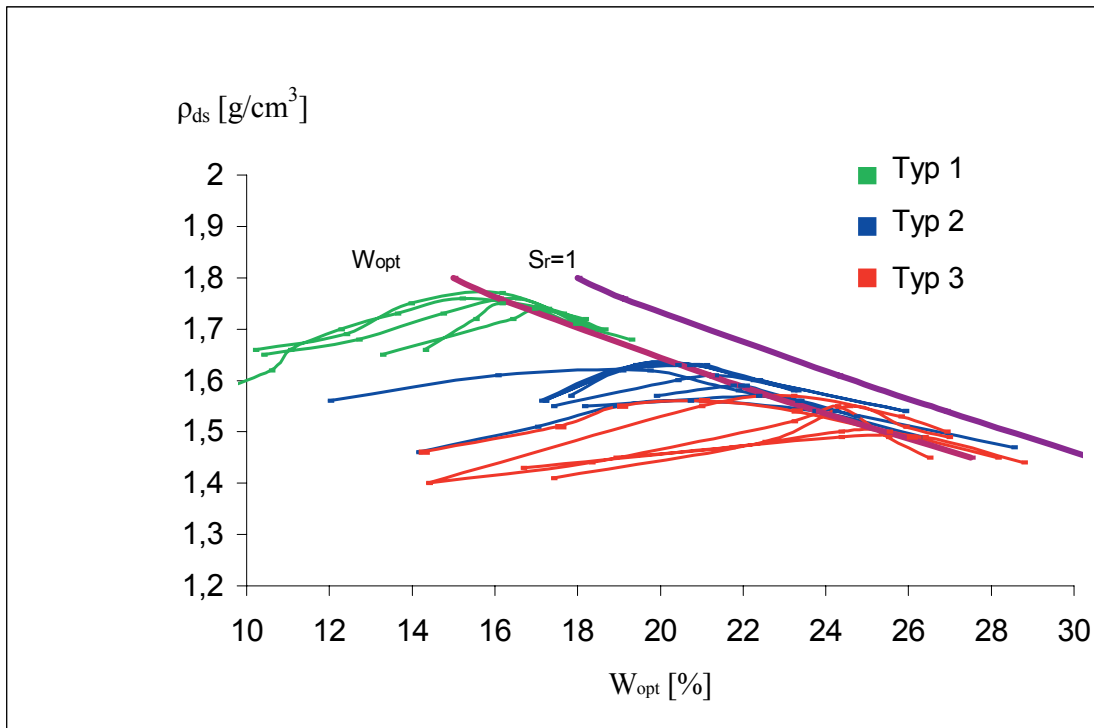
W niniejszej pracy oznaczenie wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wykonano w warunkach laboratoryjnych według metody I Proctora zgodnie z PN-88/B-04481 (zastosowano mały cylinder o objętości 1 dm^3 , ubijak lekki o masie 2,5 kg, zagęszczano 3 warstwy gruntu po 25 uderzeń).

Do badań przygotowano około 30 kg każdego z trzech typów gruntu, następnie wysuszono na powietrzu, rozdrobniono, dokładnie wymieszano i wykonano od 6–10 badań wilgotności optymalnej dla każdego typu gruntów, łącznie wykonano 23 badania powyższej cechy.

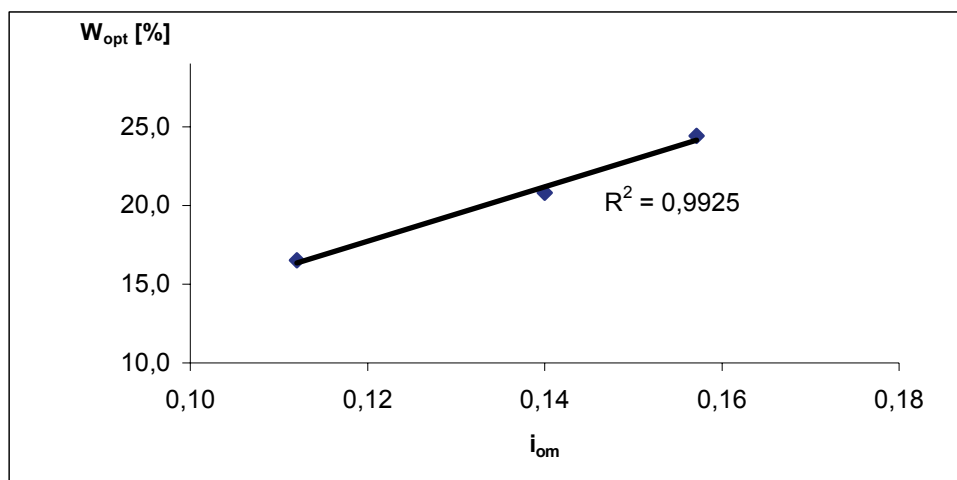
Analiza otrzymanych wyników wykazała, że grunty:

- **typ 1** - nieorganiczne pyły i gliny pylaste charakteryzują się wilgotnością optymalną $W_{opt} = 15,4\text{--}18,0\%$, średnio $16,4\%$, maksymalną gęstością objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,70\text{--}1,77 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, średnio $1,75 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, porowatością całkowitą $n = 0,33\text{--}0,36$, średnio $0,34$, wskaźnikiem porowatości $e = 0,51\text{--}0,56$, średnio $0,52$, stopniem wilgotności $S_r = 0,82\text{--}0,85$, średnio $0,84$ i wilgotnością pełnego nasycenia ($S_r = 1$) $W_{ns} = 18,8\text{--}21,1\%$, średnio $19,6\%$.
- **typ 2** – nisko organiczne pyły i gliny pylaste charakteryzują się wilgotnością optymalną $W_{opt} = 19,8\text{--}22,4\%$, średnio $20,8\%$, maksymalną gęstością objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,57\text{--}1,63 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, średnio $1,61 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, porowatością całkowitą $n = 0,37\text{--}0,40$, średnio $0,39$, wskaźnikiem porowatości $e = 0,60\text{--}0,67$, średnio $0,63$, stopniem wilgotności $S_r = 0,85\text{--}0,88$, średnio $0,87$ i wilgotnością pełnego nasycenia ($S_r = 1$) $W_{ns} = 23,2\text{--}25,5\%$, średnio $23,9\%$.
- **typ 3** – organiczne gliny pylaste (grunty próchnicze) charakteryzują się wilgotnością optymalną $W_{opt} = 23,2\text{--}25,0\%$, średnio $24,4\%$, maksymalną gęstością objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} = 1,51\text{--}1,57 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, średnio $1,54 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, porowatością całkowitą $n = 0,40\text{--}0,42$, średnio $0,41$, wskaźnikiem porowatości $e = 0,67\text{--}0,74$, średnio $0,70$, stopniem wilgotności $S_r = 0,89\text{--}0,91$, średnio $0,91$ i wilgotnością pełnego nasycenia ($S_r = 1$) $W_{ns} = 25,5\text{--}28,1\%$, średnio $26,8\%$.

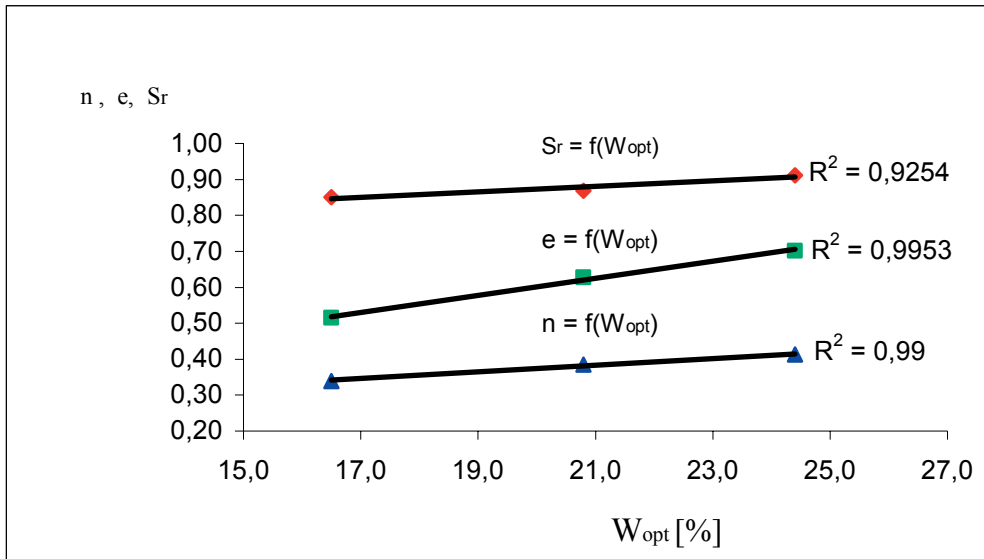
Na wartość mierzonych parametrów, tzn: wilgotności optymalnej W_{opt} i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} , a w konsekwencji na pozostałe parametry (porowatość n , wskaźnik porowatości e , wilgotność pełnego nasycenia W_{ns}) największy wpływ w badanych gruntach ma procentowa zawartość frakcji ilowej i części organicznych, co graficznie obrazują poniższe wykresy.



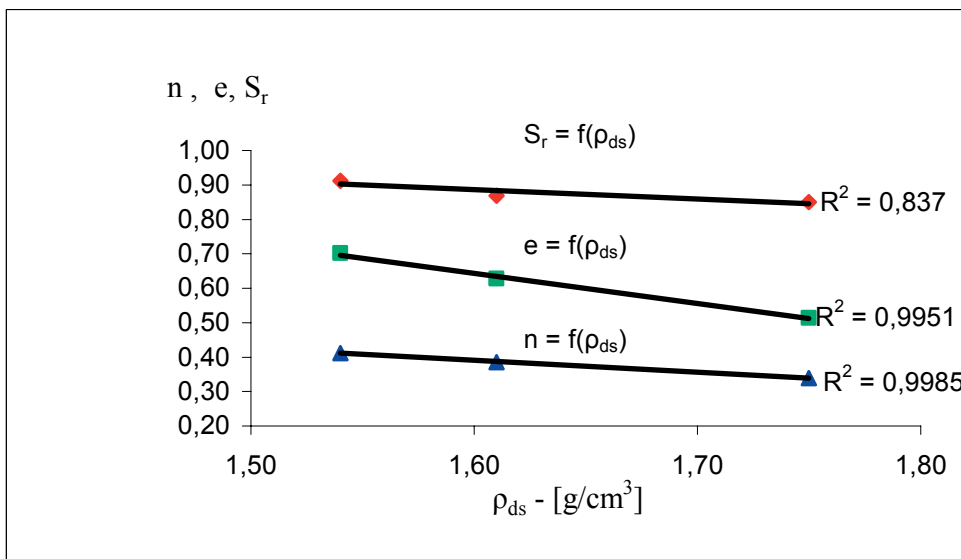
Rys. 32. Wykres zależności maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} od wilgotności optymalnej W_{opt} .



Rys. 33 Wykres zależności wartości średnich wilgotności optymalnej W_{opt} od wskaźnika części organicznych i_{om} .



Rys. 34 Wykres zależności średnich wartości porowatości n , wskaźnika porowatości e i stopnia wilgotności S_r od wilgotności optymalnej W_{opt}



Rys. 35 Wykres zależności średnich wartości porowatości n , wskaźnika porowatości e , i stopnia wilgotności S_r od maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} .

Wzrost wilgotności optymalnej W_{opt} powoduje spadek maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} , a w konsekwencji wzrost porowatości n , wskaźnika porowatości e , wilgotności pełnego nasycenia W_{ns} .

3.6.9 Współczynnik filtracji k

Przy rozwiązywaniu wielu zadań geotechnicznych związanych z gruntami spoistymi jako podłożem obiektów budowlanych lub materiałem do wykonania budowli ziemnej niezbędna jest znajomość właściwości filtracyjnych (przepuszczalności) gruntów spoistych. Oznaczenie tego parametru jest szczególnie istotne przy poszukiwaniu odpowiedniego materiału do budowy przesłon mineralnych w składowiskach odpadów oraz ekranów nieprzepuszczalnych lub ograniczających filtrację wody, stosowanych przy budowie obwałowań przeciwpowodziowych lub zapór ziemnych. Za miarę właściwości filtracyjnych przyjmuje się współczynnik filtracji k , który w przypadku filtracji wody nazywany jest współczynnikiem wodoprzepuszczalności.

W niniejszej pracy rozważano dwa ważne aspekty związane z powyższym parametrem. Pierwszy dotyczył oszacowania wartości współczynnika filtracji rzeczonych osadów przy określonej wilgotności optymalnej i różnych wartościach wskaźnika zagęszczenia, bowiem podstawowym warunkiem właściwego funkcjonowania warstw izolacyjnych w składowiskach odpadów jest odpowiednia przepuszczalność gruntu użytego do jej budowy, która według polskich przepisów powinna spełniać warunek: $k \leq 1 \times 10^{-9}$ [m/s].

Drugi aspekt dotyczył charakteru przebiegu procesu filtracji w gruntach spoistych oraz metodyki interpretacji wyników badań. Badane grunty należą do utworów słabo przepuszczalnych, a więc filtracja wody przez takie utwory przy niskich wartościach spadku hydraulicznego ma charakter filtracji prelinearnej i zachodzi dopiero po przekroczeniu pewnej wartości spadku początkowego. Nasuwa się więc pytanie, czy przy wyznaczaniu współczynnika wodoprzepuszczalności i interpretacji wyników obliczeń opierających się na założeniach liniowego prawa filtracji Darcy nie popełnia się błędów, a jeśli tak, to jakiego rzędu. Pośrednio na ten problem wskazuje również instrukcja ITB nr 339 [14], która zaleca by badania współczynnika filtracji były wykonywane przy minimalnym spadku hydraulicznym $J = 30$.

Liniowe prawo filtracji Darcy odnosi się do przepływu laminarnego, określanego jako filtracja linearna, w której opory ruchu są wywoływane głównie siłami tarcia. Może ona zachodzić w ośrodkach gruntowych o porach nadkapilarnych, np.

w piaskach, w których dominujący udział ma woda wolna (grawitacyjna). Prędkość filtracji linearnej opisywana jest wzorem:

$$v = k \times J \quad (10)$$

gdzie:

V – prędkość filtracji [m/s],

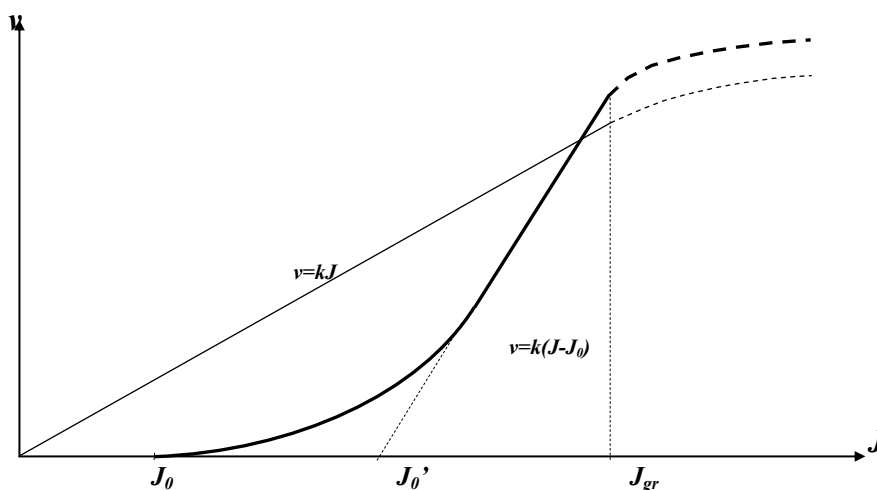
k – współczynnik wodoprzepuszczalności w odniesieniu do przepływu wody lub współczynnik filtracji przy przepływie dowolnego płynu [m/s],

J – spadek hydrauliczny.

Graficznym obrazem związku prędkości filtracji ze spadkiem hydraulicznym w granicach ruchu laminarnego ($J \leq J_{gr}$) jest linia prosta (rys 36), a współczynnik wodoprzepuszczalności k jest jej współczynnikiem kierunkowym i na obszarze tego ruchu ma stałą wartość.

W gruntach spoistych, słabo przepuszczalnych, przeważają mniejszych rozmiarów pory kapilarne i subkapilarne. Głównym czynnikiem oporów ruchu są tu, oprócz sił tarcia wewnętrznego, siły adhezji cząstek wody do składników utworów skalnych.

W tego rodzaju utworach filtracja odbiega od prawa Darcy'ego i rozpoczyna się dopiero wówczas, gdy spadek hydrauliczny przekroczy wartość J_0 , nazywaną spadkiem początkowym



Rys.36. Schemat do analizy wyznaczania współczynnika wodoprzepuszczalności gruntu spoistego. [Wacławski, M., i in., 2005a].

Wartość początkowego spadku hydraulicznego J_0 zależy m.in. od rodzaju gruntu, stopnia jego skonsolidowania, cech geometrycznych porów (w szczególności od rozmiarów porów), a także od składu chemicznego wód porowych. Według przytaczanych w literaturze danych eksperymentalnych, dla utworów gliniastych wartość J_0 waha się w przedziale 0,5–30,0 (większe wartości odpowiadają glinom o wyższym stopniu spoistości i skonsolidowania) [Wacławski M., i in., 2005a].

W rzeczywistych warunkach przepływu wody przez grunty spoiste występują przeważnie dwie pierwsze fazy ruchu: filtracji nieliniowej dla $J \in (J_0, J_0')$ i filtracji quasi linearnej dla $J \in (J_0', J_{gr})$. Te dwie fazy ruchu zachodzące przy małych prędkościach przepływu określa się zwykle łącznie jako filtrację prelinearną [Schaefer R., 1991]. Filtracja prelinearna jest zjawiskiem bardzo złożonym. Do jej opisu wykorzystuje się różne przybliżone formuły analityczne. Do najczęściej przytaczanych w literaturze formuł należą:

- zależność liniowa przypisywana do całego obszaru filtracji prelinearnej, $J \in (J_0, J_{gr})$, uwzględniająca gradient początkowy J_0 :

$$v = k \times (J - J_0) \quad (11)$$

- zależność liniowa oparta na quasi liniowej części obszaru filtracji, $J \in (J_p, J_{gr})$, z pominięciem początkowego, krzywoliniowego odcinka przepływu (rys. 35):

$$v = k \times (J - J_0') \quad (12)$$

We wzorach od (11) i (12) współczynniki k reprezentują właściwości filtracyjne (wodoprzepuszczalności) gruntów spoistych i są odpowiednikami współczynnika wodoprzepuszczalności w prawie Darcy'ego

W niniejszej pracy wykonano badania współczynnika wodoprzepuszczalności trzema metodami laboratoryjnymi:

- w aparacie trójosiowego ściskania,
- w kolumnie Proctota,
- w edometrze.

3.6.9.1 Badanie w aparacie trójosiowego ściskania

Do badania współczynnika filtracji przygotowano po 6 próbek charakterystyczne dla trzech typów gruntów. Próbki w kształcie walca o średnicy 38 mm i wysokości ok. 50 mm uformowano przy wilgotności w zakresie od W_{opt} do $W_{opt} + 3\%$ i wskaźniku zagęszczenia I_s około 1,.

Badania przeprowadzono wg metodyki podanej przez Head'a [66]. Do badań zastosowano wodę poddaną wcześniej procesowi odpowietrzenia. W pierwszym etapie sprawdzano stopień nasycenia próbki, określając wartość parametru Skemptona B wg następującego wzoru:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \delta_3} \quad (13)$$

gdzie:

Δu – przyrost ciśnienia porowego w próbce [kPa],

$\Delta \delta_3$ – przyrost ciśnienia w komorze [kPa].

Próbki poddawano procesowi saturacji, tak by uzyskać wartość parametru $B > 0,95$, gdyż takie próbki można uznać za nasycone [Head K. H., 1985].

Zasadnicze badanie współczynnika filtracji było prowadzone przy różnych wartościach spadku hydraulicznego w przedziale od około 10 do 200. Przepływ wody był z dołu ku górze, przy czym wartość ciśnienia dolnego była stała, natomiast przepływ był regulowany tylko poprzez zmianę ciśnienia górnego. Ciśnienie w komorze utrzymywano na stałym poziomie około 20 [kPa] wyższym od ciśnienia dolnego.

Badanie przy zadanym spadku hydraulicznym trwało aż do momentu ustalenia się wielkości przepływu w czasie. Prędkość filtracji obliczono wykorzystując następującą formułę:

$$v = \frac{dQ}{dt \times A} \quad (14)$$

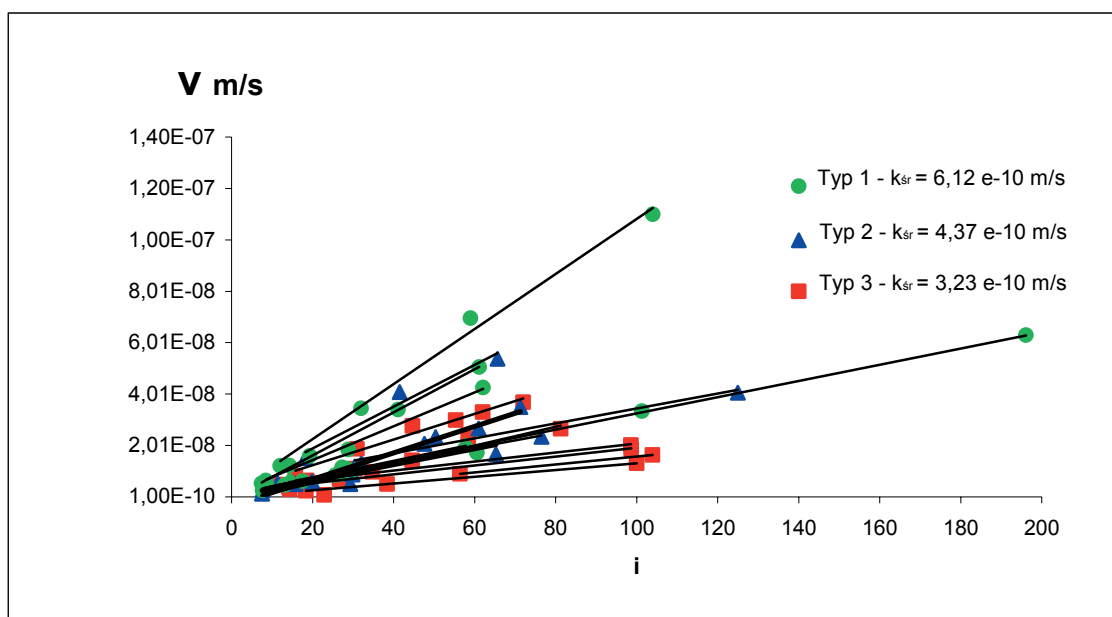
gdzie:

dQ – objętość wody filtrującej przez próbkę gruntu w czasie dt [cm³],

dt – czas po jakim przefiltrowała woda o objętości dQ [s],

A – powierzchnia próbki [cm²].

Następnie dla obliczonych wartości sporządzono wykresy $v=f(J)$ (rys. 36.).



Rys. 37. Wykres zależności prędkości filtracji v od spadku hydraulicznego J uzyskana z badań w aparacie trójosiowego ściskania

Dla przyjętego w badaniach zakresu spadku hydraulicznego otrzymano quasi liniowy charakter zależności prędkości filtracji od spadku hydraulicznego oraz obecność niewielkiego spadku początkowego $J_0 < 5$ [Wacławski M., i in., 2005a, Dembicki E., Jaromińska E., 1999, 2004] W oparciu o uzyskane z badań wartości v i J obliczono współczynnik wodoprzepuszczalności wykorzystując formułę:

$$v = k \times (J - J_0') \quad (15)$$

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu spadku początkowego $J_0' = 0; 3$ i 5 .

Tab. 13. Wyniki obliczeń współczynnika wodoprzepuszczalności gruntów dla różnych wartości spadku początkowego J_0' .

Rodzaj gruntu	Średnia wartość współczynnika wodoprzepuszczalności k_{10} [m/s]		
	$J_0' = 0$	$J_0' = 3$	$J_0' = 5$
Typ 1 – pyły, gliny	$6,12 \times 10^{-10}$	$7,04 \times 10^{-10}$	$8,49 \times 10^{-10}$
Typ 2 – pyły, gliny	$4,37 \times 10^{-10}$	$5,06 \times 10^{-10}$	$5,89 \times 10^{-10}$
Typ 3 – gliny pylaste	$3,23 \times 10^{-10}$	$3,68 \times 10^{-10}$	$4,03 \times 10^{-10}$

Analiza otrzymanych wyników pokazała, iż nie ma istotnych rozbieżności pomiędzy wartościami współczynnika wodoprzepuszczalności k określonymi dla

różnych wartości spadku początkowego. W przypadku gruntów mało i średnio spoiстых można stosować przy obliczaniu wartości współczynnika wodoprzepuszczalności k formułę $v = k \times J$ i pominąć spadek początkowy szczególnie, iż w badaniach laboratoryjnych, często dla skrócenia czasu, przeprowadza się doświadczenia przy wysokich wartościach spadku hydraulicznego.

3.6.9.2 Badania w cylindrze aparatu Proctora oraz w edometrze

Drugim etapem badania właściwości filtracyjnych osadów dennych było określenie zależności współczynnika filtracji od wskaźnika zagęszczenia. Jest to o tyle istotne, że podczas formowania przesłon izolacyjnych w warunkach terenowych uzyskanie wskaźnika zagęszczenia bliskiego 1 jest trudne. W praktyce inżynierskiej stawiane jest wymaganie by wskaźnik zagęszczenia $I_s \geq 0,97$ (Gurbulewski K., 2000). W przypadku formowania wałów przeciwpowodziowych wymagania są nieco niższe, zależne od klasy obiektu, minimalna wartość wskaźnika zagęszczenia $I_s \geq 0,92$ (Wiłun Z. 1987).

Badania laboratoryjne zostały wykonane w dwóch aparatach; w aparacie zbudowanym na bazie cylindra aparatu Proctora oraz w edometrze.

Pierwszą metodę stanowiły badania w prototypowym aparacie zbudowanym na bazie cylindra Proctora dla próbek o średnicy $d = 112,9$ mm i wysokości 100 mm [Klimczyk J., 2002]. Drugą metodą było badanie edometryczne dla próbek o średnicy 65 mm i wysokości 20 mm. W obydwu przypadkach doświadczenia były realizowane przy zmiennym spadku hydraulicznym w zakresie od około 5 do 30 w cylindrze Proctora, a w edometrze od około 5 do 50. W cylindrze Proctora wykonano badania dla trzech wartości wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,92; 0,95; 1,0$, natomiast w edometrze realizowano badanie przy czterech wartościach wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,92; 0,95; 0,98; 1$. Próbkę do badań zostały uformowane przy wilgotności w zakresie od W_{opt} do $W_{opt} + 3$ %. W badaniach stosowano wodę odpowietrzoną, doprowadzoną do aparatury od dołu. W pierwszym etapie poddawano próbki procesowi saturacji przez ok. 100 godzin, a następnie realizowano właściwe badanie parametrów filtracyjnych.

Wartość współczynnika filtracji w powyższych metodach wyznaczono przy zmiennym spadku hydraulicznym, korzystając z następującej formuły:

$$k = \frac{al}{A\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (16)$$

gdzie:

a – powierzchnia przekroju poprzecznego wody wypełniającej biuretę [cm^2],

l – droga filtracji wody przez próbkę gruntu – wysokość próbki gruntu [cm],

A – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [cm^2].

$\Delta t = t_1 - t_2$ – różnica czasu pomiędzy dwoma kolejnymi odczytami [s],

h_1 – wysokość słupa wody w biurecie dla czasu t_1 [cm],

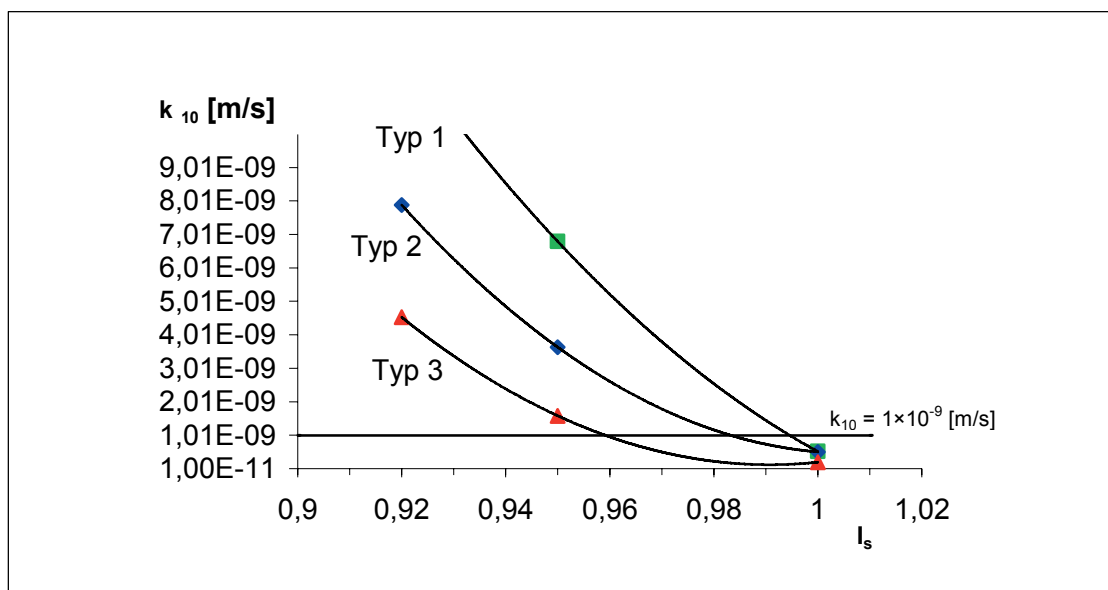
h_2 – wysokość słupa wody w biurecie dla czasu t_2 [cm].

Uzyskane z badań wartości współczynnika wodoprzepuszczalności dla badanych gruntów przedstawiono w tab. 14 i 15 i na rys. 38 i 39.

Analiza otrzymanych wyników pokazuje wyraźny spadek wartości współczynnika wodoprzepuszczalności wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia gruntów gliniastych. Najniższe, a zatem najbardziej korzystne wyniki otrzymujemy w przypadku gruntów typu 3, co jest zapewne związane z największą zawartością minerałów ilastych. Grunty typu 1 mają największą wartość współczynnika filtracji, około 2-3-krotnie wyższą niż grunty typu 3. Grunty typu 2 przyjmują wartości pośrednie badanego parametru. Różnice między wynikami otrzymanymi w poszczególnych metodach są nieznaczne, przy czym wartości uzyskane w przypadku badania w edometrze są niższe.

Tabela 14. Zależność współczynnika filtracji od wskaźnika zagęszczenia otrzymana z badań w cylindrze Proctora.

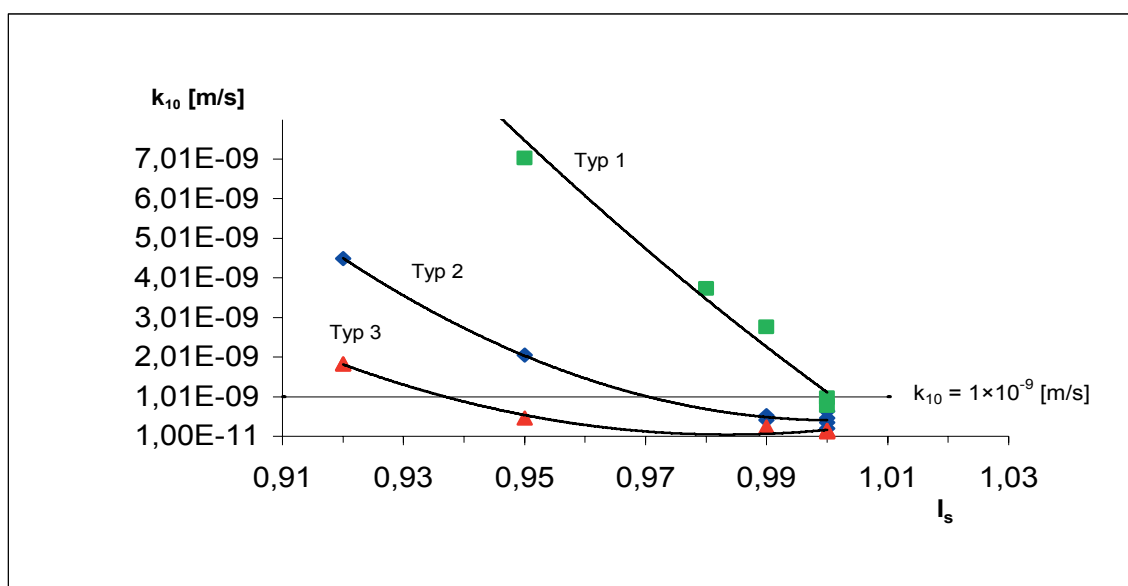
Rodzaj gruntu	I_s	k_{sr} [m/s]	$k_{\text{sr}10}$ [m/s]
Typ 1 – pyły, glina	0,92	$1,63 \times 10^{-8}$	$1,25 \times 10^{-8}$
	0,95	$8,84 \times 10^{-9}$	$6,8 \times 10^{-9}$
	1	$6,80 \times 10^{-10}$	$5,23 \times 10^{-10}$
Typ 2 – pył, glina	0,92	$1,03 \times 10^{-8}$	$7,89 \times 10^{-9}$
	0,95	$4,73 \times 10^{-9}$	$3,64 \times 10^{-9}$
	1	$6,63 \times 10^{-10}$	$5,10 \times 10^{-10}$
Typ 3 – glina pylasta	0,92	$5,89 \times 10^{-9}$	$4,53 \times 10^{-9}$
	0,95	$2,07 \times 10^{-9}$	$1,59 \times 10^{-9}$
	1	$2,64 \times 10^{-10}$	$2,03 \times 10^{-10}$



Rys. 38. Wykres wartości średnich współczynnika wodoprzepuszczalności k_{10} od wskaźnika zagęszczenia I_s w badaniu w cylindrze Proctora.

Tab. 15. Zależność współczynnika filtracji od wskaźnika zagęszczenia dla osadów dennych zbiornika różnowskiego otrzymane w badaniach edometrycznych.

Rodzaj gruntu	I_s	k_{sr} [m/s]	k_{sr10} [m/s]
Typ 1 – pył, glina	0,92	$1,59 \times 10^{-8}$	$1,22 \times 10^{-8}$
	0,95	$9,14 \times 10^{-9}$	$7,03 \times 10^{-9}$
	0,98	$4,24 \times 10^{-9}$	$3,26 \times 10^{-9}$
	1,0	$1,15 \times 10^{-9}$	$8,84 \times 10^{-10}$
Typ 2 – pył, glina	0,92	$5,80 \times 10^{-9}$	$4,46 \times 10^{-9}$
	0,95	$2,68 \times 10^{-9}$	$2,06 \times 10^{-9}$
	0,98	$6,21 \times 10^{-10}$	$4,78 \times 10^{-10}$
	1,0	$5,46 \times 10^{-10}$	$4,2 \times 10^{-10}$
Typ 3 – glina pylasta	0,92	$2,39 \times 10^{-9}$	$1,84 \times 10^{-9}$
	0,95	$6,08 \times 10^{-10}$	$4,68 \times 10^{-10}$
	0,98	$3,12 \times 10^{-10}$	$2,4 \times 10^{-10}$
	1,0	$1,86 \times 10^{-10}$	$1,43 \times 10^{-10}$



Rys. 39. Wykres wartości średnich współczynnika wodoprzepuszczalności k_{10} od wskaźnika zagęszczenia I_s w badaniu edometrycznym.

Wartość $k \leq 1 \times 10^{-9}$ [m/s] dla gruntów typu 1 uzyskujemy przy wskaźniku zagęszczenia ok. 1. Wartość uśredniona współczynnika filtracji w obydwu zastosowanych metodach wynosi $k = 7,04 \times 10^{-10}$ m/s. Dla gruntów typu 2 warunek dla k spełniony jest przy $I_s \geq 0,97$. Wartość uśredniona współczynnika filtracji wynosi $k = 1,62 \times 10^{-9}$ m/s. Dla gruntów typu 3 warunek dla k spełniony jest, przy $I_s \geq 0,95$, a wartość uśredniona wynosi $k = 8,64 \times 10^{-10}$ m/s.

3.7 Właściwości mechaniczne

3.7.1 Wskaźnik pęcznienia

Badanie pęcznienia ma duże znaczenie przy rozpatrywaniu gruntów jako podłoża budowli hydrotechnicznych, nawierzchni drogowych, lotnisk itp. Proces pęcznienia jest charakterystyczny dla gruntów spoistych i zależy od procentowej zawartości i składu mineralnego frakcji ilowej, a dodatkowo od obecności części organicznych. Największy wpływ na właściwości pęczniące ma obecność minerałów ilastych z grupy smektytów.

Charakterystyki pęcznienia można dokonywać różnymi metodami laboratoryjnymi jak również obliczeniowymi. Podstawowym najczęściej stosowanym parametrem jest oznaczenie w edometrze wskaźnika pęcznienia, który obliczamy wg formuły [Myślińska E., 1998]:

$$\varepsilon_p = \frac{h - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (17)$$

gdzie:

ε_p – wskaźnik pęcznienia [%],

h – wysokość próbki po spęcznieniu [mm],

h_0 – wysokość początkowa próbki [mm].

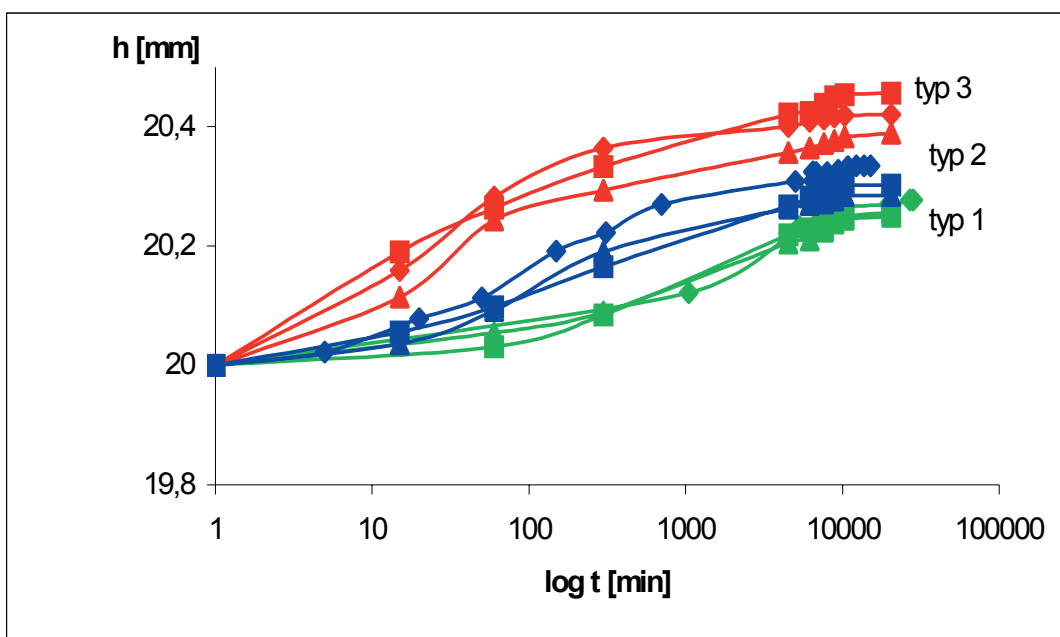
Badaniu poddano próbki reprezentatywne dla trzech typów gruntów. Wykonano po trzy oznaczenia wskaźnika pęcznienia dla każdego typu. Próbki do badania o wysokości 20 mm i średnicy 65 mm były uformowane przy wilgotności w zakresie od W_{opt} do $W_{opt} + 3\%$ i wskaźniku zagęszczenia $I_s \geq 0,95$.

Analizując otrzymane wyniki (tab. 16 i rys. 40) można stwierdzić, iż grunty typu 3 charakteryzują się najwyższą wartością wskaźnika pęcznienia w przedziale od 1,70 do 2,0 %, średnio 1,8 %. Grunty typu 1 przyjmują wartości niższe w przedziale od 0,91 do 1,12 %, średnio 1,02 %. Grunty typu 2 przyjmują wartości pośrednie wskaźnika pęcznienia w przedziale od 1,63 do 1,78 %, średnio 1,71. Otrzymane w badaniach wartości wskaźnika pęcznienia są niskie, co związane jest z zawartością frakcji iłowej, poniżej 20 %, w których dominują minerały z grupy illitu i kaolinitu oraz nieznaczną obecnością części organicznych. Porównując otrzymane wyniki z klasyfikacją gruntów pęczniejących wg Olsona G. W. z 1997. r [Myślińska E., 1998], badane osady można uznać za grunty charakteryzujące się niskim stopniem pęcznienia.

Dla badanych gruntów określono również przybliżoną wartość ciśnienia pęcznienia, które przyjmuje wartość poniżej 12,5 [kPa].

Tabela 16. Wyniki wskaźnika pęcznienia ε_p otrzymane w badaniach edometrycznych.

Nr	ε_p [%]	I_{om} [%]	Fracja [mm]		
			f_p	f_π	f_i
Typ 1	0,91 – 1,12	0,9-1,6	35 - 62	31 - 55	8-13
śr.	1,02	1,09	49	41	10
Typ 2	1,63 – 1,78	0,8 – 1,8	32-40	51-59	8-11
śr.	1,71	1,31	35	55	10
Typ 3	1,7 – 2,0	1,5 – 2,9	19-27	61-70	12-19
śr.	1,8	2,06	21	64	15



Rys. 40. Wykres przebiegu pęcznienia w czasie

3.7.2 Ścisłość gruntów

Ścisłość gruntów zależy od wielu czynników, przede wszystkim od porowatości gruntu, a dodatkowo od procentowej zawartości i składu mineralnego frakcji ilowej oraz zawartości części organicznych.

Badania ścisłości przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w edometrze. Badaniu poddano próbki reprezentatywne dla trzech typów gruntów. Wykonano po trzy oznaczenia dla każdego typu. Próbki do badania o wysokości 20 mm i średnicy 65 mm były uformowane przy wilgotności w zakresie od W_{opt} do $W_{opt} + 3\%$ i wskaźniku zagęszczenia $I_s \geq 0,95$. Ścisłość gruntu scharakteryzowano przez określenie

edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej M_0 i wtórnej M w zakresie obciążeń od 0 do 400 kPa, korzystając z następującej formuły:

$$M_0 = \frac{\Delta\delta}{\varepsilon}; \quad M = \frac{\Delta\delta}{\varepsilon} \quad (18)$$

gdzie:

M_0 – edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej [kPa],

M – edometrycznego modułu ścisłości wtórnej [kPa],

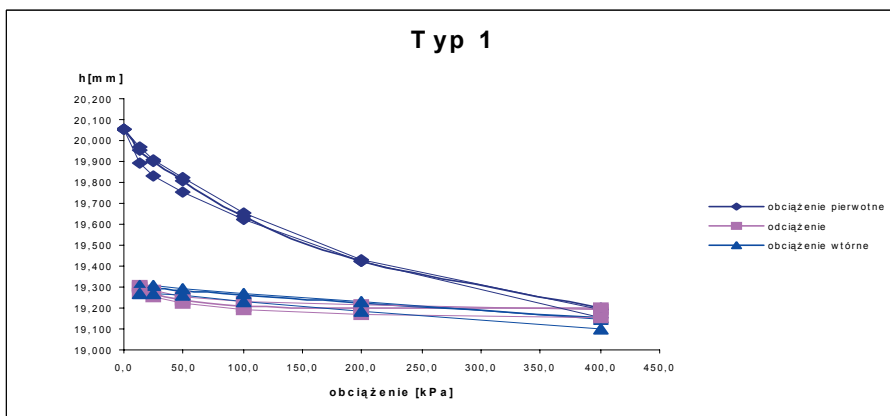
$\Delta\delta$ – przyrost obciążenia jednostkowego próbki, odpowiednio przy obciążeniu pierwotnym lub wtórnym [kPa],

ε – odkształcenie jednostkowe próbki, odpowiednio przy obciążeniu pierwotnym lub wtórnym [mm].

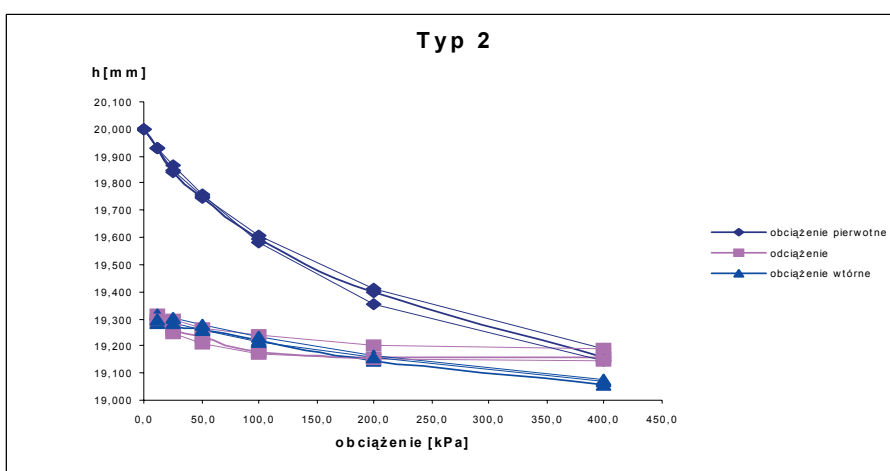
Analizując otrzymane wyniki (tab. 17 i rys. 41 – 43) można stwierdzić, iż grunty typu 1 charakteryzują się najwyższą wartością edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej M_0 i wtórnej M natomiast grunty typu 3 przyjmują wartości niższe. Największe różnice uzyskujemy przy obciążeniu 400 kPa. Moduł ścisłości pierwotnej M_0 uzyskany dla gruntów typu 1 jest o ok. 60 % wyższy, natomiast moduł ścisłości wtórnej o ok. 30 % wyższy w stosunku do osadów typu 3. Duży wpływ na otrzymane wyniki ma obecność części organicznych w badanych gruntach, których nawet niewielka ilość powoduje dużą ścisłość gruntu

Tabela 17. Zestawienie wyników badań edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej M_0 i wtórnej M [kPa]

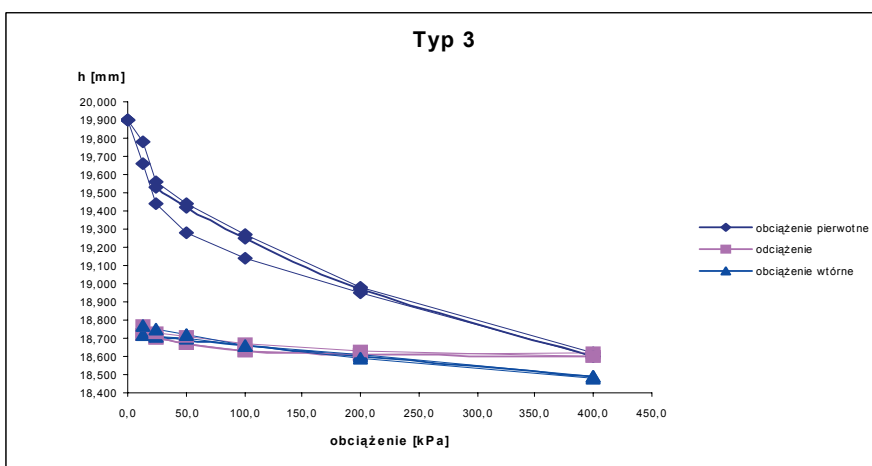
Typ 1	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	średnia
$M_0(0-12,5)$	3650	3504	3472	3542
$M_0(12,5-25,0)$	3002	2899	3862	3254
$M_0(25,0-50,0)$	5142	4986	4869	4999
$M_0(50,0-100,0)$	6718	6570	5474	6254
$M_0(100,0-200,0)$	10264	9946	8645	9618
$M_0(200,0-400,0)$	17181	16150	18259	17196
$M(12,5-25,0)$	68830	48245	40229	52435
$M(25,0-50,0)$	48173	56744	45962	50293
$M(50,0-100,0)$	33205	44848	41050	39701
$M(100,0-200,0)$	43705	50034	44814	46184
$M(200,0-400,0)$	45411	54538	47183	49044
Typ 2				
$M_0(0-12,5)$	1576	2557	3020	2384
$M_0(12,5-25,0)$	4144	4494	3962	4200
$M_0(25,0-50,0)$	6567	5750	6181	6166
$M_0(50,0-100,0)$	7317	5792	5848	6319
$M_0(100,0-200,0)$	9960	8947	8954	9287
$M_0(200,0-400,0)$	14414	17735	15930	16026
$M(12,5-25,0)$	17246	28357	16635	20746
$M(25,0-50,0)$	20534	28344	20513	23130
$M(50,0-100,0)$	22159	26023	20709	22964
$M(100,0-200,0)$	26349	26329	36947	29875
$M(200,0-400,0)$	43550	42549	40985	42361
Typ 3				
$M_0(0-12,5)$	1032	2022	1265	1440
$M_0(12,5-25,0)$	1112	1124	1346	1194
$M_0(25,0-50,0)$	3047	4252	4542	3947
$M_0(50,0-100,0)$	6935	5523	5518	5992
$M_0(100,0-200,0)$	10100	6760	7050	7970
$M_0(200,0-400,0)$	10970	10429	10284	10561
$M(12,5-25,0)$	16178	24633	29245	23352
$M(25,0-50,0)$	17690	33413	27513	26205
$M(50,0-100,0)$	15348	28330	27899	23859
$M(100,0-200,0)$	25922	32745	31625	30097
$M(200,0-400,0)$	32055	31944	34285	32761



Rys. 41. Wykres krzywych ścisłości dla gruntów typ 1.



Rys. 42. Wykres krzywych ścisłości dla gruntów typ 2.



Rys. 43. Wykres krzywych ścisłości dla gruntów typ 3.

3.7.3 Wytrzymałość na ścinanie

Parametry charakteryzujące wytrzymałość gruntu na ścinanie, czyli kąt tarcia wewnętrznego ϕ oraz spójność c zostały oznaczone w aparacie trójosiowego ściskania dla trzech typów gruntu.

Pierwszą serię badań zrealizowano, wykorzystując metodę CIU – badanie ze wstępną konsolidacją izotropową i ścinanie bez odpływu wody, z pomiarem ciśnienia porowego. Metodę CIU stosujemy, gdy obciążenia użytkowe stanowią od 30 do 70 % obciążeń całkowitych przekazywanych przez budowlę. Otrzymane parametry mogą być interpretowane jako parametry efektywne ϕ' i c' , jeżeli podczas badania rejestrowany jest pomiar ciśnienia porowego. W pierwszym etapie realizowano proces saturacji. Próbkę uznawano za nasyconą, gdy wartość parametru Skemptona B wynosiła około 0,98. Następnie próbkę poddawano procesowi konsolidacji izotropowej przy naprężeniu $\delta_3 = 100$ kPa, 200 kPa, 300 kPa. Na drugim etapie, w warunkach bez drenażu, zwiększano naprężenie pionowe δ_1 z prędkością 0,04 – 0,05 mm/min (określoną na podstawie przebiegu konsolidacji wg wzorów empirycznych zawartych w normie BS 1377: part 8: 1990) aż do zniszczenia próbki.

Drugą serię badań zrealizowano wykorzystując metodę CID – badanie ze wstępną konsolidacją izotropową i ścinanie z odpływem wody, z pomiarem ciśnienia porowego. W tym badaniu, zarówno w fazie konsolidacji, jak i ścinania umożliwiony jest odpływ wody. Prędkość narastania obciążeń jest determinowana możliwością rozproszenia ciśnienia porowego u , tak by w każdym momencie badania u było bliskie 0. Metodę CID stosujemy, gdy obciążenia użytkowe stanowią poniżej 30 % obciążeń całkowitych przekazywanych przez budowlę, również stosujemy ją dla oceny stateczności skarp długotrwałych. Otrzymane parametry interpretowane są jako parametry właściwe ϕ_o i c_o . W praktyce parametry efektywne ϕ' i c' oraz parametry właściwe ϕ_o i c_o są do siebie zbliżone i często z sobą utożsamiane.

W pierwszym etapie badania CID próbkę poddawano procesowi saturacji i uznawano je za nasycone, gdy wartość parametru Skemptona B wynosiła około 0,98. Następnie próbkę poddawano procesowi konsolidacji izotropowej przy naprężeniu $\sigma_3 = 100$ kPa, 200 kPa, 300 kPa. Na drugim etapie, w warunkach z drenażem, zwiększano naprężenie pionowe δ_1 z prędkością 0,03–0,04 mm/min, tak by $u = 0$, aż do zniszczenia próbki.

Interpretację wyników dla metody CID i CIU przeprowadzono w oparciu o normę angielską BS 1377: part 8: 1990, wykorzystując teorię Columba-Mohra określoną dla wartości naprężeń efektywnych:

$$\tau_f = \sigma' \times \operatorname{tg} \phi' + c' \quad (19)$$

gdzie:

τ_f - wytrzymałość gruntu na ścinanie [kPa],

$\sigma' = \sigma - u$ - wartość naprężenia efektywnego [kPa],

σ - wartość naprężenia normalnego do powierzchni ścięcia [kPa],

u - ciśnienie wody w porach gruntu [kPa],

ϕ' - kąt tarcia wewnętrznego dla wartości naprężeń efektywnych [$^\circ$],

c' - spójność dla wartości naprężeń efektywnych – dla gruntów przerobionych przyjmuje się wartość bliską 0 [kPa].

Jako kryterium ścięcia próbek gruntu przyjęto największą wartość połowy dewiatora naprężeń głównych – $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$. W celu obliczenia efektywnego kąta tarcia wewnętrznego ϕ' sporządzono wykres zależności $q' = f(p')$, gdzie:

$q' = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ – połowa dewiatora naprężeń efektywnych [kPa],

$p' = \frac{1}{2}(\sigma_1' + \sigma_3')$ – połowa sumy naprężeń efektywnych [kPa].

Linia prosta łącząca punkty o maksymalnych rzędnych q' i p' tworzy z osią odciętych kat β . Wartości ϕ' oblicza się według następującej zależności:

$$\sin \phi' = \operatorname{tg} \beta \quad (20)$$

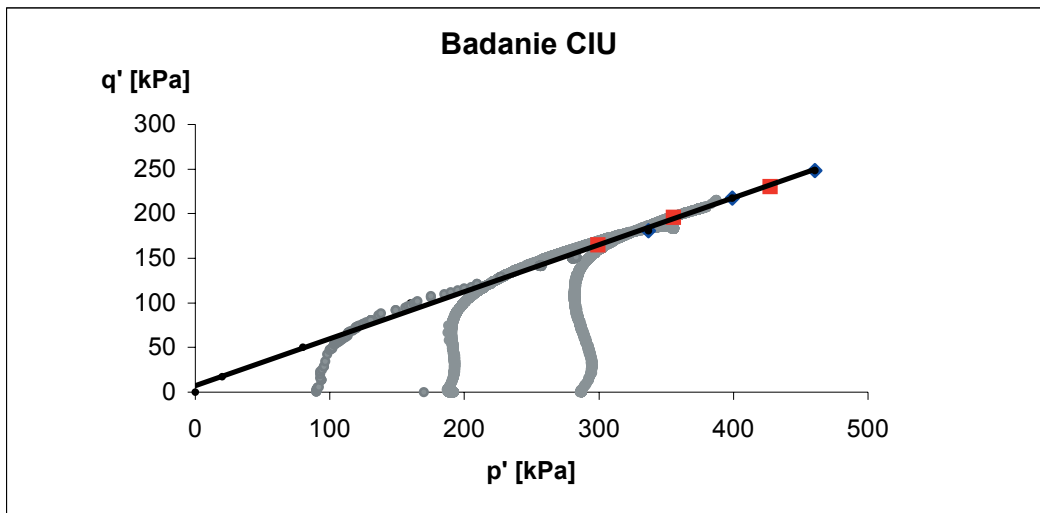
Analizując otrzymane wyniki (tab.19), można stwierdzić, iż przy teście CID grunty typu 1 charakteryzują się najwyższą wartością efektywnego kąta tarcia wewnętrznego $\phi'_{sr} = 32,4^\circ$, grunty typu 2 – $\phi'_{sr} = 31,6^\circ$ natomiast grunty typu 3 przyjmują wartość najniższą $\phi'_{sr} = 31,2^\circ$, przy czym różnice te są nieznaczne. Porównując wyniki badań wykonanych wg metody CIU i CID, można stwierdzić nieznacznie wyższą wartość ϕ' rzędu 10 % w przypadku użycia metody CID. Ogólnie należy uznać, iż otrzymane parametry efektywne przyjmują wartości wysokie, a obecność części organicznych na poziomie od 2 do 3 % nie wpływa znacząco na ich obniżenie.

Tab. 18. Wyniki badań efektywnego kąta tarcia wewnętrznego ϕ' wykonanych metodą CIU i CID

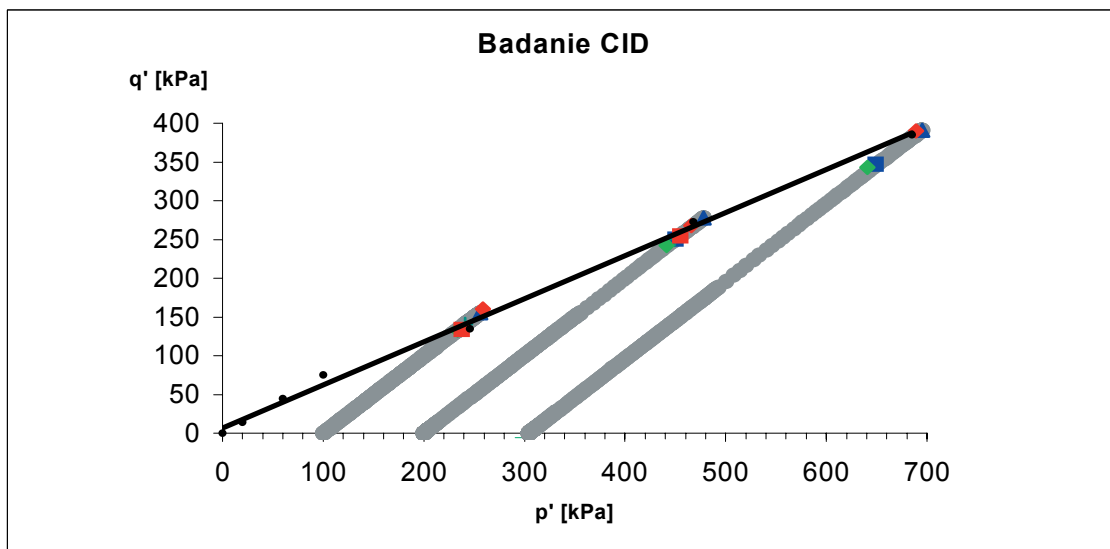
Nr	Rodzaj badania]	σ_3 [kPa]	$q=q'$ [kPa]	p [kPa]	p' [kPa]	ϕ' [°]	$W_{początkowa}$ [%]
Typ 1	CID próbka 1	100	154,8	254,7	256,0	32,5	16,4 – 17,5
		200	278,2	477,3	477,9		
		300	391,0	694,8	695,2		
	CID próbka 2	100	160,3	258,3	259,0	32,3	17,2 – 17,6
		200	268,2	466,0	466,6		
		300	390,4	688,5	689,2		
Typ 2	CIU próbka 1	100	171,0	268,3	326,7	28,7	19,9 – 20,1
		200	207,7	401,0	392,2		
		300	238,2	534,7	450,7		
	CID próbka 2	100	140,1	240,2	2410,4	31,5	20,0 – 20,7
		200	250,2	449,0	450,2		
		300	347,0	647,4	649,0		
	CID próbka 3	100	140,3	239,7	241,3	31,7	20,0 – 20,6
		200	250,1	448,3	449,4		
		300	350,3	648,3	651,1		
Typ 3	CIU próbka 1	100	155,1	254,6	289,2	28,6	23,0 – 24,5
		200	185,7	384	345,6		
		300	220,4	449,3	417,0		
	CID próbka 2	100	133,1	232,5	233,5	31,0	23,6 – 24,2
		200	242,1	440,3	441,3		
		300	342,8	639,9	640,9		
	CID próbka 3	100	133,6	232,2	237,7	31,3	25,8 – 27,3
		200	254,7	454,7	455,1		
		300	347,6	646,5	647,0		

Analizując przebieg wykresów ścieżek naprężeń widzimy, że w przypadku badania CIU mają one charakter krzywoliniowy. Jest to spowodowane tym, że w początkowym etapie badania przykładane obciążenie przejmowane jest przez wodę, w związku z czym rośnie ciśnienie porowe. Następnie stopniowo obciążenie przekazywane jest na szkielet gruntowy powodując spadek ciśnienia porowego i wzrost naprężenia efektywnego.

W przypadku badania CID wykres ścieżek naprężeń ma charakter liniowy, gdyż od samego początku badania ciśnienie porowe jest równe zero. Całe obciążenie przejmuje szkielet gruntowy, co sprawia, że naprężenia główne równe są naprężeniom efektywnym.



Rys. 44. Wykres zależności $q' = f(p')$ dla badania CIU.



Rys. 45 Wykres zależności $q' = f(p')$ dla badania CID.

3.8. Zestawienie zbiorcze parametrów geotechnicznych

Określone w wyniku badań laboratoryjnych parametry geotechniczne współczesnych osadów cofkowych oraz mad Dunajca zostały przedstawione w formie tabelarycznej (tab. 19).

Tab. 19. Parametry geotechniczne osadów zbiornika roznowskiego i mad Dunajca – tabela zbiorcza.

Parametry fizyczne wg PN-88/B-04481	Symbol	Jed. miary	osady zbiornika roznowskiego		mady Dunajca	
			przedział wartości	wartość średnia	przedział wartości	wartość średnia
Zawartość frakcji:						
piaskowej	f_p	%	14 – 39	27	35 – 62	49
pyłowej	f_π	%	51 – 75	60	31 – 55	41
iłowej	f_i	%	8 – 19	13	7 – 13	10
Wskaźnik uziarnienia	U	–	3,4 – 40	20,2	17 – 23	20
Wilgotność naturalna	W_n	%	23,8 – 83,1	38,2	11,2 – 22,3	16,2
Gęstość objętościowa	ρ	g/cm^3	1,67 – 1,99	1,85	1,96 – 2,14	2,05
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	ρ_d	g/cm^3	1,11 – 1,51	1,38	1,60 – 1,90	1,77
Gęstość właściwa	ρ_s	g/cm^3	2,61 – 2,65	2,62	2,65	2,65
Porowatość całkowita	n	–	0,41 – 0,58	0,47	0,30 – 0,40	0,33
Wskaźnik porowatości całkowitej	e	–	0,69 – 1,36	0,92	0,39 – 0,65	0,50
Granica plastyczności	W_p	%	20,0 – 28,0	25,2	19,0 – 23,6	21,2
Granica płynności	W_L	%	41,6 – 49,5	45,7	30,1 – 37,0	32,6
Wskaźnik plastyczności	I_p	–	17,5 – 22,0	20,1	10,3 – 13,6	11,6
Aktywność wg Skemptona	A	–	1,12 – 2,36	1,71	0,76 – 1,39	1,07
Pojemność sorpcyjna	MBC	g/100g	1,7 – 2,9	2,2	1,2 – 1,9	1,6
Powierzchnia właściwa	S_t	m^2/g	36,3 – 59,8	47,3	25,6 – 39,3	32,6
pH		–	7,7 – 8,1	7,9	ok. 7	–
Zawartość CaCO_3		%	< 1%	–	< 1%	–
Zawartość części organicznych	I_{om}	%	0,80 – 2,89	1,83	0,72 – 1,61	1,12
Wskaźnik części organicznych	i_{om}	–	0,12 – 0,16	0,14	0,09 – 0,12	0,11
Straty prażenia w tem. 440°C		%	2,69 – 4,91	3,77	2,91 – 3,53	3,37
Wilgotność optymalna	W_{opt}	%	19,8 – 25,0	22,6	15,4 – 18,0	16,4
Wilgotność pełnego nasycenia	W_{ns}	%	23,2 – 28,1	25,5	18,8 – 21,1	19,6
Stopień wilgotności	S_r	–	0,85 – 0,91	0,89	0,82 – 0,85	0,84
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego	ρ_{ds}	g/cm^3	1,51 – 1,63	1,57	1,70 – 1,77	1,75
Porowatość przy ρ_{ds}	$n_{\rho_{ds}}$	–	0,38 – 0,42	0,40	0,33 – 0,36	0,34
Wskaźnik porowatości przy ρ_{ds}	$e_{\rho_{ds}}$	–	0,61 – 0,70	0,67	0,51 – 0,56	0,52
Współczynnik filtracji dla $I_s = 1$, dla temp. 10 [°C]	k_{10}	m/s	$1,32 \times 10^{-10}$ $8,80 \times 10^{-10}$	$3,4 \times 10^{-10}$	$3,52 \times 10^{-10}$ $1,08 \times 10^{-9}$	$6,73 \times 10^{-10}$
Współczynnik filtracji dla $I_s = 0,95$, dla temp. 10 [°C]	k_{10}	m/s	$2,06 \times 10^{-9}$ $4,68 \times 10^{-10}$	$1,65 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$ $7,03 \times 10^{-9}$	$5,47 \times 10^{-9}$
Wskaźnik pęcznienia	ϵ_p	%	1,63 – 2,0	1,76	0,91 – 1,12	1,02
Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej dla $I_s = 0,95$	M_0 (100–200)	kPa	6,8 – 10,3	8,8	8,9 – 10,0	9,3
Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej dla $I_s = 0,95$	M_0 (200–400)	kPa	10,3 – 18,3	13,9	14,4 – 17,7	16,0
Edometryczny moduł ściśliwości wtórnej dla $I_s = 0,95$	M (100–200)	kPa	25,9 – 37,0	30,0	43,7 – 50,0	46,2
Edometryczny moduł ściśliwości wtórnej dla $I_s = 0,95$	M (200–400)	kPa	31,9 – 43,6	37,6	45,4 – 54,5	49,0
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego dla $I_s = 0,95$, dla met. CID	ϕ'	°	31,0 – 31,7	31,4	32,3 – 32,5	32,4
Efektywny kąt tarcia wewnętrznego dla $I_s = 0,95$, dla met. CIU	ϕ'	°	28,6 – 28,7	28,7	–	–

3.9 Ocena właściwości gruntów powstałych przez namywanie na podstawie badań doświadczalnych

Jedną z metod formowania i wznoszenia nasypów jest metoda hydrauliczna. Najczęściej jest stosowana do budowy ekranów szczelnych zapór ziemnych i do nadbudowy terenów. W rejonie północnej Polski, czasami metodę tą wykorzystuje się podczas usuwania materiału gromadzonego w kanałach żeglownych. Polega ona na rozmyciu osadu przy pomocy specjalnych pomp ziemnych lub hydromonitorów, następnie transportu płynnej masy i zdeponowaniu w żądanym miejscu. Najlepiej do tego nadają się utwory piaszczyste, ze względu na wysoki współczynnik filtracji, co gwarantuje szybkie odsączenia się nadmiaru wody. W przypadku utworów gliniastych metoda ta może być uciążliwa do stosowania ze względu na niski współczynnik filtracji.

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie właściwości filtracyjnych osadów dennych z cofki Jeziora Rożnowskiego w przypadku użycia metody hydrotransportu do wznoszenia budowli ziemnych.

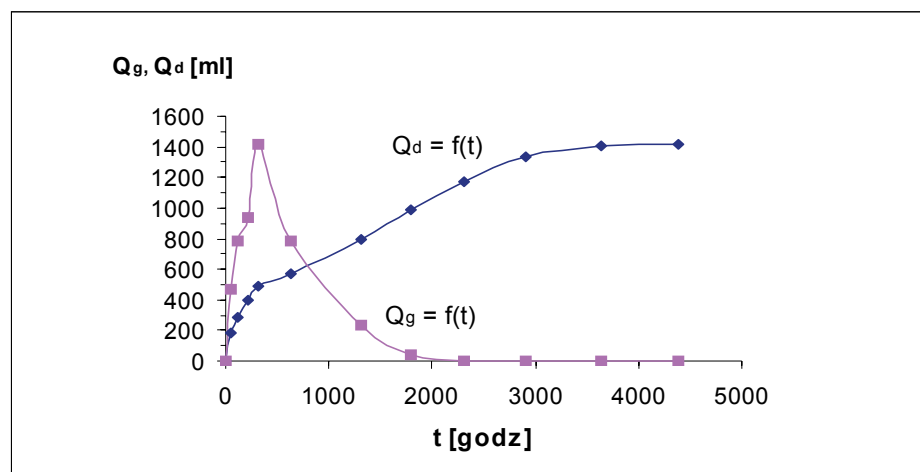
W tym celu grunt pobrany z cofki zbiornika, w rejonie ot. 3 z głębokości 0,0–0,5 m, dokładnie wymieszano z wodą do całkowitego zniszczenia struktury gruntu. Wilgotność powstałej pulpy gruntowej wynosiła ok. 80–85 %. Następnie rozmyty grunt wlano do dwóch plastikowych rur o średnicy wewnętrznej 100 mm, wysokości 1500 mm i objętości 11 775 cm³. Rury zostały umieszczone na podstawach wypełnionych piaskiem średnioziarnistym i zabezpieczone od góry pokrywą chroniącą grunt przed nadmiernym parowaniem wody. Przez otwór umieszczony w dnie podstawy woda spływała do naczynia szklanego. Monitoring grawitacyjnego odsączania się wody realizowano poprzez pomiar objętości wypływającej wody w określonych odstępach czasu. Po okresie dwóch lat zakończono badanie. Wykonano profil wilgotności gruntu, oznaczono gęstość objętościową oraz określono współczynnika filtracji w aparacie trójosiowego ściskania.

Od momentu napełnienia kolumn gruntem obserwowano proces grawitacyjnego odsączania się wody z gruntu. Dokonywano pomiaru, w kolejnych odstępach czasu, objętość wody wypływającej z dna próbki (Q_d) oraz objętości wody, która gromadziła się nad próbką (Q_g) w wyniku zachodzącego procesu osadzania się cząstek gruntu. W pierwszym etapie znaczna ilość wody gromadziła się nad próbką, a następnie

powolnie wnikała w grunt. Jak zauważono, po okresie 26 dni objętość gruntu zmniejszyła się o około 20 % i ustabilizowała do wysokości próbki $h = 1,2$ m. Po okresie około 75 dni woda nad próbką zanikła i następował już tylko powolny odpływ wody przez dno. Proces widocznego wypływu wody z próbki zakończył się po około 180 dniach. Wyniki powyższych badań przedstawione są w tab. 20 oraz na rys. 46. Analiza pomiaru objętości wypływającej wody z próby gruntu w czasie pozwoliła na oszacowanie współczynnika filtracji, przy upraszczającym założeniu, że spadek hydrauliczny jest bliski 1. W momencie ustabilizowania się wysokości gruntu $h = 1,20$ m wartość współczynnika filtracji $k_{10} = 2,34 \times 10^{-8} - 1,52 \times 10^{-8}$ [m/s], a wartość średnia wynosi $1,93 \times 10^{-8}$ [m/s].

Tab. 20 Wyniki badania odsączenia się wody w badaniach doświadczalnych.

t [d]	h [m]	Q_g [ml]	Q_d [ml]	v [m/s]	i	k [m/s]	k_{10} [m/s]
0,0	1,50	0,0	0				
1,9	1,44	471,0	182	1,4E-07	1,04	1,34E-07	1,06E-07
4,9	1,40	785,0	287	8,61E-08	1,07	8,03E-08	6,33E-08
9,0	1,25	942,0	396	6,49E-08	1,1	5,92E-08	4,66E-08
13,0	1,22	1413,0	491	5,57E-08	1,15	4,85E-08	3,82E-08
26,0	1,20	785,0	567	3,22E-08	1,08	2,97E-08	2,34E-08
55,0	1,20	235,5	791	2,12E-08	1,03	2,07E-08	1,63E-08
75,0	1,20	39,3	989	1,94E-08	1,00	1,94E-08	1,52E-08
95,9	1,20	0	1172	1,78E-08			
121,0	1,20	0	1338	1,63E-08			
151,8	1,20	0	1405	1,36E-08			
182,8	1,20	0	1419	1,14E-08			

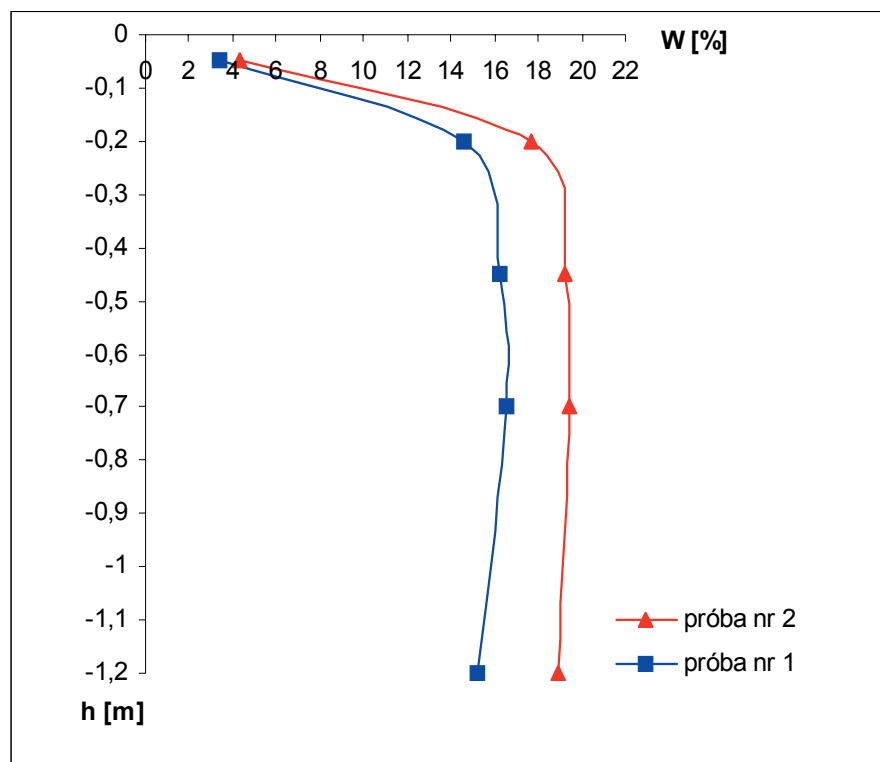


Rys. 46. Wykres zmiany objętości wody wypływającej z gruntu dla próby nr 1.

W drugim etapie, po dwóch latach, wyjęto grunt z plastikowych kolumn, wykonano profil wilgotnościowy gruntu i oznaczono gęstość objętościową ρ , a następnie obliczono gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_d , porowatością całkowitą n i wskaźnik porowatości e (tab. 21).

Tab. 21. Własności fizyczne gruntu powstałego w testach doświadczalnych

	H [m]	W [%]	ρ [g/cm ³]	ρ_d [g/cm ³]	n	e
Próba 1	-0,05	4,35	1,46	1,40	0,44	0,79
	-0,2	17,67	1,57	1,33	0,40	0,67
	-0,45	19,24	1,63	1,37	0,38	0,61
	-0,7	19,47	1,64	1,37	0,37	0,60
	-1,2	18,88	1,66	1,40	0,37	0,58
Próba 2	-0,05	3,4	1,43	1,38	0,45	0,83
	-0,2	14,63	1,51	1,32	0,42	0,74
	-0,45	16,2	1,53	1,32	0,42	0,71
	-0,7	16,6	1,55	1,33	0,41	0,69
	-1,2	15,23	1,57	1,36	0,40	0,67

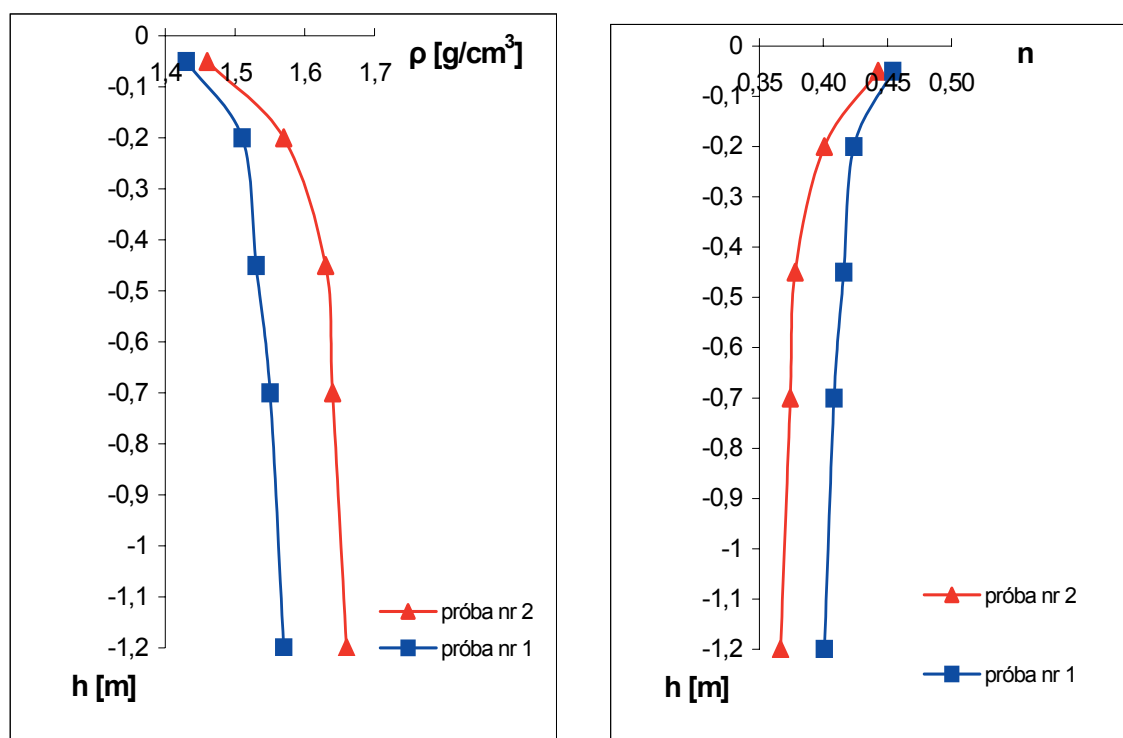


Rys. 47. Wykres zmiany wilgotności gruntu W z głębokością h .

Analizując zależność wilgotności gruntu od głębokości, zauważamy, że do głębokości ok. 0,3 m wilgotność gruntu gwałtownie rośnie od 3–4 % do 16–18 %, a poniżej wilgotność zmienia się nieznacznie. Można stąd wnioskować, iż w strefie przypowierzchniowej do głębokości ok. 0,20 – 0,30 m na zmianę wilgotności znaczny wpływ mają warunki zewnętrzne, przede wszystkim parowanie. Poniżej tej strefy zmiana wilgotności jest związana z warunkami gruntowymi, właściwościami fizycznymi, a szczególnie z gęstością objętościową i współczynnikiem filtracji.

Zauważamy również związek wzrostu gęstości objętościowej ρ i spadku porowatości n z głębokością – rys 48, co jest wynikiem naturalnego zagęszczania się osadu.

Należy również zaznaczyć, że wilgotność gruntu w momencie widocznego zaniku wypływu wody z próbki wynosiła ok. 60 %, a po okresie dwóch lat uzyskała wartość w przedziale 15,2–19,5 %, podczas gdy średnia wilgotność optymalna gruntu pobranego z tego rejonu jest równa się 22,6 %.



Rys. 48. Zależność gęstości objętościowej ρ i porowatości n od głębokości h .

Badania współczynnika filtracji k wykonano w aparacie trójosiowego ściskania dla trzech próbek o średnicy ok. 70 mm i wysokości 95–127,5 mm, pobranych z gruntu powstałego w teście nr 2, z głębokości 0,05 m, 0,6 m, 1,0 m. Badania realizowano przy różnych wartościach spadku hydraulicznego, zgodnie z metodyką opisaną w podrozdziale 3.6.9.1. Otrzymane wyniki współczynnika wodoprzepuszczalności k przedstawiono w tab. 22. Pokazują one wyraźną różnicę uzyskanych wartości współczynnika filtracji dla strefy przypowierzchniowej w porównaniu z wartościami uzyskanymi dla głębokości 0,6 i 1,0 m. Ma to oczywiście związek ze zmniejszającą się w profilu pionowym porowatością osadu.

Porównując średnią wartość współczynnika filtracji uzyskanego w badaniach trójosiowego ściskania dla próbki z głębokości 0,6 i 1,0 m, która wynosi $1,51 \times 10^{-8}$ m/s ze średnią wartości uzyskana przy spadku hydraulicznym ok. 1 podczas odsączania się wody w kolumnie plastikowej równą $1,93 \times 10^{-8}$ m/s, widzimy bardzo dużą zgodność otrzymanych wyników. Świadczyć to może o dużej dokładności metody laboratoryjnej badania współczynnika filtracji realizowanej w aparacie trójosiowego ściskania.

Tab. 22. Zestawienie wyników oznaczenia współczynnika filtracji w aparacie trójosiowego ściskania

Lp	i	v [m/s]	k [m/s]	k_{10} [m/s]
Próbka 1 z głębokości 0,05m d=69,5 mm, h=113,7 mm	3,5	4,87E-05	1,39E-05	1,05E-05
	3,6	4,72E-05	1,31E-05	9,85E-06
	5,6	7,84E-05	1,40E-05	1,05E-05
	5,6	7,22E-05	1,29E-05	9,70E-06
			1,12E-05	8,42E-06
Próbka 2 z głębokości 0,6 m d=70,0 mm, h=127,5 mm	39,9	1,03E-06	2,58E-08	1,94E-08
	31,9	7,21E-07	2,26E-08	1,70E-08
			2,42E-08	1,82E-08
Próbka 3 z głębokości 0,1m d=70,4 mm, h=95,0 mm	21,4	3,21E-07	1,50E-08	1,13E-08
	32,4	5,35E-07	1,65E-08	1,24E-08
			1,58E-08	1,19E-08

Rozdział 4

4.1 Ocena osadów w świetle przepisów ustawy o odpadach.

Ważnym aspektem rozważań dotyczących możliwości zastosowania osadów dennych jest ocena skażenia tych gruntów, w świetle obowiązujących przepisów.

Pozyskiwanie gruntów do wznoszenia nasypów stało się szczególnie kłopotliwe w momencie wejścia w życie ustawy o odpadach z dn. 27 czerwca 1997 r. Wytyczne tej ustawy wskazywały na to, że grunt pozyskiwany w wyniku np. odmulenia kanałów, czy w tym przypadku pozyskiwania materiału dennego ze zbiorników wodnych należy traktować jako odpad, a w związku z tym powinien być deponowany na odpowiednim składowisku [Bortkowski M., i in, 2001]. Ustawa z dnia 27 czerwca 1997 r. została jednak zmieniona przez ustawę z dnia 27 kwietnia 2001 r. – o odpadach [4]. Przepisy tej ustawy z wprowadzoną poprawką z dnia 29 lipca 2005 r. mówią w art. 2. 2 że, masy ziemne pochodzące z pogłębiania akwenów morskich w związku z utrzymaniem infrastruktury zapewniającej dostęp do portów, a także z pogłębiania zbiorników wodnych, stawów, cieków naturalnych, kanałów i rowów w związku z utrzymaniem i regulacją wód nie należy traktować jako odpad, jeżeli stanowią niezanieczyszczony grunt, a ich zastosowanie nie spowoduje przekroczenia wymaganych standardów jakości gleby i ziemi. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. *w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi* [1] podaje progowe wartości, jakie mogą występować zarówno w rodzimych gruntach, jak i w gruntach używanych w pracach ziemnych oraz używanych do tego celu osadach pochodzących z dna zbiorników powierzchniowych wód stojących lub wód płynących. Grunty te powinny spełniać kryteria dopuszczalnych wartości stężeń, wskazanych w załączniku ustawy (tab. 23). W § 1. 1. ustawy o odpadach. [4] czytamy ponadto, iż glebę lub grunt uznaje się za zanieczyszczoną, gdy stężenie co najmniej jednej substancji przekracza wartość dopuszczalną. Wyjątek stanowi tu taki grunt, w którym przekroczenie wartości dopuszczalnej stężenia substancji wynika z naturalnie wysokiej jej zawartości w środowisku.

Progowe dopuszczalne wartości stężenia poszczególnych zanieczyszczeń zawartych w ustawie [1] są uzależnione od kilku czynników, przede wszystkim od rodzaju obszaru

i jego przeznaczenia w naturalnych warunkach, dodatkowo od wodoprzepuszczalności gruntów i głębokości występowania. Wyróżnione są trzy grupy terenów:

- grupę A stanowią:
 - nieruchomości gruntowe wchodzące w skład obszaru poddanego ochronie na podstawie przepisów prawa wodnego,
 - obszary poddane ochronie na podstawie przepisów o ochronie przyrody; jeżeli utrzymanie aktualnego poziomu zanieczyszczenia gruntów nie stwarza zagrożenia dla zdrowia ludzi lub środowiska – dla obszarów tych stężenia zachowują standardy wynikające ze stanu faktycznego;
- grupę B – grunty zaliczone do użytków rolnych z wyłączeniem gruntów pod stawami i gruntów pod rowami, grunty leśne oraz zadrzewione i zakrzewione, nieużytki, a także grunty zabudowane i zurbanizowane z wyłączeniem terenów przemysłowych, użytków kopalnych oraz terenów komunikacyjnych;
- grupę C – tereny przemysłowe, użytki kopalne, tereny komunikacyjne.

Analiza jakości osadów dennych Jeziora Rożnowskiego została dokonana przez autora niniejszej rozprawy w oparciu o dane archiwalne wykonane w 1989 r. [Miczyński J., i in., 1989] i 1994 r. [Wojciechowski A., 1994]. W badaniach z 1989 r. oznaczenie stężenia najważniejszych metali ciężkich, czyli kadmu Cd, miedzi Cu, cynku Zn, ołowiu Pb i chromu Cr wykonano metodą ASA z roztwarzaniem próbek kwasem azotowym, dla 23 próbek pobranych w osadach cofkowych, w rejonie Tęgoborzy. W badaniach z 1994 r. oznaczenie tych samych metali ciężkich wykonano metodą plazmowej atomowej spektrometrii emisyjnej (ICP), dla 65 próbek pobranych w osadach cofkowych oraz w stropowych partiach pierwotnych mad Dunajca w rejonie Tęgoborzy, między mostem w Kurowie a Znamiórowicami. W badaniach z 1994 r. określono również obecność pestycydów DDT i jego metabolitów metodą chromatograficzną dla 20 próbek.

Porównując wyniki archiwalne, można stwierdzić, iż wartości otrzymanych stężeń oznaczonych metali ciężkich są podobne (tab. 23). Jak podają autorzy opracowania z 1994 r., rozmieszczenie badanych metali zarówno w profilu pionowym, jak i poziomym jest jednostajne, jedynie pewne anomalie można zaobserwować w przypadku rozmieszczenia cynku Zn. W jednym otworze badawczym, w rejonie Znamiórowic, uzyskana wartość była dwukrotnie większa niż w pozostałych próbkach i wyniosła 399,0 mg/kg.

Porównując wartości stężeń poszczególnych metali ciężkich występujących w osadach cofkowych zbiornika roznowskiego z wartościami dopuszczalnymi określonymi w rozporządzeniu Ministra Środowiska [1], stwierdza się, że wartości progowe niektórych metali ciężkich, tzn: cynku Zn i miedzi Cu, są przekroczone dla gruntów należących do grupy A. Dla cynku Zn, wg badań z 1994 r. otrzymana średnia wartość stężenia w osadach dennych wyniosła $144,7 \pm 12,4$ mg/kg (max. 399,0 mg/kg), a wg badań z 1989 r. od 40,0 do 160,0 mg/kg, podczas gdy wartość dopuszczalna wynosi 100 mg/kg. Dla miedzi Cu wartość progowa została przekroczona nieznacznie. Otrzymana średnia wartość stężenia wg badań z 1994 r. wyniosła $30,2 \pm 2,0$ mg/kg (max. 50 mg/kg), a wg badań z 1989 r. – 7,5–37,5 mg/kg, podczas gdy wartość dopuszczalna wynosi 30 mg/kg. W przypadku gruntów z grupy B i C wartości stężeń poszczególnych metali nie są przekroczone. Należy tu również nadmienić, że średnia zawartość metali ciężkich, występujących w stropowych partiach pierwotnych mad Dunajca i oznaczonych w badaniach w 1994 r. (tło hydrogeochemiczne), nie odbiega w istotny sposób od wartości średnich określonych dla mułów w strefie cofkowej.

W przypadku pestycydów DDT i jego metabolitów w żadnej z badanych próbek mułów dennych nie stwierdzono pozostałości metabolitów DDT i DDE. Pozostałości metabolitów DDD stwierdzono w 16 z 20 wykonanych oznaczeń, a wartość średnia wyniosła 0,014 mg/kg (max. 0,03 mg/kg). Stężenie pestycydów DDT i jego metabolitów w odniesieniu do wartości progowych określonych w rozporządzeniu [1] zostało przekroczone dla gruntów należących do grupy A, gdyż wartość dopuszczalna równa się 0,0025 mg/kg. W przypadku gruntów grupy B i C, dla których minimalna wartość progowa wynosi 0,025 mg/kg, przekroczenie stężenia wystąpiło tylko w trzech z 20 badanych próbek, jednak te wartości można by pominąć, gdyż dolna granica oznaczalności metody wynosiła 0,01 mg/kg.

Tab. 23. Dopuszczalne i oznaczone wartości stężeń wybranych zanieczyszczeń w osadach Jeziora Rożnowskiego w oparciu o Rozporządzenie Ministra Środowiska [1].

Lp.	Zanieczyszczenie	Wartości stężeń progowych wg Rozporządzenie Ministra Środowiska [1]						Wartości stężeń otrzymane z badań osadów zdeponowanych w cofce J. Rożnowskiego [mg/kg suchej masy]				
		Grupa A			Grupa B			Grupa C				
		Głębokość [m ppt]						wg badań z 1989 r. [82]	wg badań z 1994 r. [115]			
		0-0.3	0.3-15.0	>15	0-2	2-15						
		Wodoprzepuszczalność gruntów k [m/s]						zakres wartości	wartości średnie (max)			
		do	poniżej	do	poniżej	do	poniżej					
		1×10^{-7}						1×10^{-7}				
1	Chrom	50	150	150	190	150	380	500	150	800	10,0 – 51,0	31,6±1,6 (max. 45)
2	Cynk	100	300	350	300	300	720	1.000	300	3.000	40,0 – 160,0	144,7±12,4 (max. 399)
3	Kadm	1	4	5	6	4	10	15	6	20	< 1,7	0,8±0,1 (max. 1,0)
4	Miedź	30	150	100	100	100	200	600	200	1.000	7,5 – 37,5	30,2±2,0 (max. 50)
5	Ołów	50	100	100	200	100	200	600	200	1.000	0,0 – 34,0	23,1±1,5 (max. 37)
6	DDT, DDE, DDD*	0.0025	0.025	0.025	4	0.025	4	0.25	0.025	4	–	0,01 – 0,03

*DDT i jego metabolity to jest DDT [1,1,1-trichloro-2,2-bis (4-chlorofenylo) etan], DDD [1,1-dichloro-2,2-bis (chlorofenylo) etylen] i DDE [1,1-dichloro-2,2-bis(p-chlorofenylo) etan].

4.2. Ocena przydatności osadów jako materiału do budowy nasypów.

Przy ocenie przydatności w geotechnice spoistych osadów dennych, występujących w cofce zbiornika rożnowskiego, skorzystano z zaleceń występujących w normach budowlanych dotyczących omawianej tematyki. Szczególnie ważne są tu dwie pozycje: norma PN-B-06050 z 1999 r. – *Geotechnika, roboty ziemne, wymagania ogólne* oraz norma PN-S-02205 z 1998 r. – *Drogi samochodowe, roboty ziemne*. Analizując zalecenia zawarte w cytowanych wyżej normach, można stwierdzić, iż dotyczą one przede wszystkim nasypów drogowych. Trzeba mieć świadomość, że wymagania stawiane gruntem, zawarte w powyższych normach są istotne z praktycznego punktu widzenia, ale nie wiążące. Nie dotyczą one również wszystkich rodzajów formowanych obecnie nasypów, dlatego dla niektórych typów budowli, np. rdzeni zapór ziemnych czy przesłon mineralnych występujących w składowiskach odpadów, można korzystać z wytycznych występujących w literaturze fachowej, a powstałych na bazie wieloletniego doświadczenia inżynierskiego. Ważnym kryterium decydującym o użyciu danego gruntu jako materiału do wznoszenia budowli jest jego bliska obecność od miejsca budowy, bowiem przekłada się ona bezpośrednio na obniżenie kosztów inwestycji.

4.2.1. Ocena osadów w oparciu o normę PN-B-06050 z 1999 r.

Norma PN-B-06050 przedstawia określone kryteria dla gruntu jako materiału do formowania nasypów. Najistotniejsze cechy kryterialne oraz określone właściwości gruntów spoistych występujących w strefie cofkowej zbiornika rożnowskiego zostały poniżej przedstawione w formie tabelarycznej.

Jak wynika z przedstawionej niżej tabeli 24 pierwotne mady Dunajca, spełniają wszystkie minimalne cechy kryterialne, stawiane gruntem jako materiałowi używanemu do formowania nasypów. W przypadku współczesnych osadów deponowanych w strefie cofkowej w zbiorniku rożnowskim jedna cecha nie spełnia wartości minimalnej, a mianowicie maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{ds} . Norma zaleca by $\rho_{ds} > 1,6 \text{ g/cm}^3$, podczas gdy dla osadów cofkowych wartość ρ_{ds}

mieści się w przedziale od 1,51 do 1,63 g/cm³, średnio 1,57 g/cm³. Wartości $\rho_{ds} < 1,6$ g/cm³ przyjmowały osady gliniaste o podwyższonej zawartości części organicznych, powyżej 2 %, scharakteryzowane jako gliny pylaste – typ 3. Osady o zawartości części organicznych poniżej 2 % – gliny i pyły piaszczyste (typ 2), charakteryzują się wartościami $\rho_{ds} > 1,6$ g/cm³. Można jednak uznać, iż różnice tej cechy są nieznaczne i nie dyskwalifikują osadów cofkowych jako materiału do budowy nasypów. Osady te nadają się przede wszystkim do budowy nasypów o wysokości do 3 m, zabezpieczone przed zawilgoceniem, lub po ulepszeniu spoiwem. Zastosowanie tych gruntów do formowania nasypów drogowych stwarza wiele trudności i ograniczeń, co szczegółowo zostanie omówione w następnym punkcie.

Tab. 24. Zestawienie kryterialnych parametrów geotechnicznych wg normy PN-B-06050 z 1999 r. i uzyskanych w badaniach dla analizowanych osadów.

Parametry fizyczne wg PN-88/B-04481	Jed.	Wg. PN-B-06050 z 1999r nie zaleca się	Zbiornik różnowski		Mady Dunajca	
			Przedział wartości	Wartość średnia	Przedział wartości	Wartość średnia
Zawartość frakcji ilowej f_i	%	> 30	8 – 19	12	7 - 13	10
Granica płynności W_L	%	> 65	41,6 – 49,5	45,7	30,1 – 37,0	32,6
Zawartość CaCO ₃	%	-	< 1%	–	< 1%	–
Zawartość części organicznych I_{om}	%	> 3	0,80 – 2,89	1,83	0,72 – 1,61	1,12
Zawartość gipsu i soli rozpuszczalnych	%	> 3	–	–	–	–
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego ρ_{ds}	g/cm ³	< 1,6	1,51 – 1,63	1,57	1,70 – 1,77	1,75

4.2.2. Ocena osadów w oparciu o normę PN-S-02205 z 1998 r.

Norma PN-S-02205 z 1998 r. przedstawia określone kryteria dla gruntu jako materiału do formowania nasypów drogowych. Najistotniejsze cechy kryterialne oraz określone właściwości gruntów spoistych występujących w strefie cofkowej zbiornika różnowskiego zostały poniżej przedstawione w formie tabelarycznej.

Tab. 25. Zestawienie kryterialnych parametrów geotechnicznych wg normy PN-S-02205 z 1998 r. i uzyskanych w badaniach dla analizowanych osadów.

Parametry fizyczne wg PN-88/B-04481	Jed.	Wg. PN-S-02205 z 1998 r. nie zaleca się	Zbiornik różnowski		Mady Dunajca	
			Przedział wartości	Wartość średnia	Przedział wartości	Wartość średnia
Zawartość frakcji < 0,075 mm	%	> 30	45 – 93	68	66 – 76	71
Zawartość frakcji < 0,02 mm	%	> 10	27 – 66	48	38 – 53	46
Kapilarność bierna H_{kb}	m	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1
Granica płynności W_L	%	> 60	41,6 – 49,5	45,7	30,1 – 37,0	32,6
Zawartość części organicznych I_{om}	%	> 2	0,80 – 2,89	1,83	0,72 – 1,61	1,12
Wskaźnik uziarnienia U	%	> 3	3,4 - 40	20,2	17 - 23	20
Maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds}	g/cm^3	< 1,6	1,51 – 1,63	1,57	1,70 – 1,77	1,75

Jak wynika z przedstawionej wyżej tabeli zarówno pierwotne mady Dunajca, jak i współczesne osady cofkowe nie są dobrym materiałem do budowy nasypów drogowych, ponieważ:

- są gruntami wysadzinowymi (zawartość frakcji $d < 0,075$ mm powyżej 30 %, frakcji $d < 0,02$ mm powyżej 10 %, kapilarność bierna $H_{kb} > 1$),
- część osadów gliniastych tworzących współczesne osady cofkowe (typ 3) charakteryzuje się maksymalną gęstością objętościową szkieletu gruntowego $\rho_{ds} < 1,6 \text{ g/cm}^3$ oraz zawartością części organicznych $I_{om} > 2$ %.

Do budowy nasypów drogowych, pod określonymi warunkami można dopuścić:

- do budowy dolnych partii nasypów poniżej strefy przemarzania – część osadów cofkowych o zawartości części organicznych $I_{om} < 2$ % i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego $\rho_{ds} > 1,6 \text{ g/cm}^3$ – gliny i pyły piaszczyste (typ 2), oraz mady Dunajca (typ 1),
- na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania można zastosować osady Dunajca, pod warunkiem ulepszenia tych gruntów spoiwami takimi jak: cement, wapno, aktywne popioły, itp.

4.2.3. Ocena przydatności osadów jako materiału do wznoszenia wodnych budowli ziemnych.

Przy budowie zapór ziemnych dąży się do tego by w jak największym zakresie wykorzystać materiał miejscowy, i wówczas technologię wznoszenia budowli uzależnia się od rodzaju i właściwości występującego gruntu. W niniejszej pracy rozpatrywano możliwość użycia zarówno metody sypanej, jak i hydraulicznej.

W przypadku metody sypanej stosuje się dwa typy konstrukcji zapór ziemnych; bez elementów szczelnych lub z rdzeniem szczelnym. Wytyczne dotyczące materiału zalecanego do budowy zapór ziemnych możemy znaleźć w pracach Sobczaka J. [103] i Czyżewskiego K. [45].

Kryteria dla materiału na zapory ziemne bez elementu szczelnego oraz z elementem szczelnym przedstawiono w oparciu o zalecenia Sobczaka J., [103] i zestawiono w formie tabelarycznej, wraz z charakterystycznymi wartościami uzyskanymi dla osadów cofkowych ze zbiornika rożnowskiego i mad Dunajca.

Tab. 26 Zestawienie kryterialnych parametrów geotechnicznych gruntu, wg. Sobczaka J. [103], dla zapór bez elementu szczelnego w porównaniu z wartościami uzyskanymi w badaniach dla analizowanych osadów.

Parametry fizyczne wg PN-88/B-04481	Jed.	Wg. Sobczaka J. nie zaleca się	Zbiornik rożnowski		Mady Dunajca	
			Przedział wartości	Wartość średnia	Przedział wartości	Wartość średnia
Zawartość frakcji < 0,01 mm	%	> 20	27 – 66	48	38 – 53	46
Kąt tarcia wewnętrznego φ dla $I_s = 0,95$	°	< 25	31,0 – 31,7	31,4	32,3 – 32,5	32,4
Współczynnik filtracji k dla $I_s = 0,95$	m/s	> 10^{-6}	$2,06 \times 10^{-9}$ $4,68 \times 10^{-10}$	$1,65 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$ $7,03 \times 10^{-9}$	$5,47 \times 10^{-9}$
Zawartość części organicznych I_{om}	%	> 3	0,80 – 2,89	1,83	0,72 – 1,61	1,12
Zawartość części rozpuszczalnych w wodzie	%	> 5	< 1	< 1	< 1	< 1
Wskaźnik uziarnienia U		< 60	3,4 – 40	20,2	17 – 23	20

Tab. 27. Zestawienie kryterialnych parametrów geotechnicznych gruntu, wg. Sobczaka J. [103], dla zapór z elementem szczelnym w porównaniu z wartościami uzyskanymi w badaniach dla analizowanych osadów.

Parametry fizyczne wg PN-88/B-04481	Jed.	Wg Sobczaka J. nie zaleca się	Zbiornik rożnowski		Mady Dunajca	
			Przedział wartości	Wartość średnia	Przedział wartości	Wartość średnia
Zawartość frakcji iłowej f_i	%	> 20	8 – 19	12	7 – 13	10
Zawartość frakcji < 0,01 mm	%	< 25	27 – 66	48	38 – 53	46
Współczynnik filtracji k dla $I_s = 0,95$	m/s	> 10^{-7}	$2,06 \times 10^{-9}$ $4,68 \times 10^{-10}$	$1,65 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-9}$ $7,03 \times 10^{-9}$	$5,47 \times 10^{-9}$
Zawartość części organicznych I_{om}	%	> 3	0,80 – 2,89	1,83	0,72 – 1,61	1,12
Zawartość części rozpuszczalnych w wodzie	%	> 5	< 1	< 1	< 1	< 1

W przypadku budowy korpusu zapór ziemnych bez elementów szczelnych najodpowiedniejsze są grunty piaszczysto-gliniaste lub żwirowo-gliniaste, zawierające 6–20 % cząstek o średnicy $d < 0,01$ mm, charakteryzujące się kątem tarcia wewnętrznego $\varphi > 25^\circ$ (dla materiału nasyconego wodą), wskaźnikiem niejednorodności uziarnienia $U > 60$ i współczynnikiem filtracji $k < 10^{-6}$ m/s. Analizowane grunty charakteryzuje zbyt mała obecność frakcji grubszych piaszczysto-żwirowych, przy czym należy tu zaznaczyć, że wartości minimalne dotyczące wodoprzepuszczalności i wytrzymałości na ścinanie, przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$, są spełnione. Porównując zalecenia podane przez Sobczaka J. [103] z zaleceniami zawartymi w normie PN-B-06050 z 1999 r. – *Geotechnika, roboty ziemne*, należy uznać, iż badany grunt nadaje się do budowy zapór ziemnych bez elementów szczelnych, ale do wysokości 3 m, czyli przede wszystkim grobli ziemnych, zapór wstecznych oraz wałów przeciwpowodziowych. W przypadku wznoszenia zapór wyższych należy powyższy grunt uzupełnić o frakcję grubszą piaszczysto-żwirową.

W przypadku budowy zapór ziemnych z elementów szczelnych najodpowiedniejsze na plastyczne elementy szczelne są gliny piaszczyste i gliny zawierające ponad 25 % cząstek o średnicy $d < 0,01$ mm i współczynniku filtracji $k < 10^{-7}$ m/s, natomiast nie zaleca się stosowania, do budowy elementów szczelnych, glin ciężkich i iłów ze względu na trudności przy wbudowaniu. Badane grunty można uznać, za odpowiednie do budowy elementów szczelnych zapór ziemnych.

W niniejszej pracy rozpatrywano również możliwość wbudowywania gruntu w nasyp metodą hydrauliczną. Jak podaje Sobczak J. [103] przy doborze materiału na zapory wznoszone metodą hydro transportu można korzystać z wykresu krzywej uziarnienia norm amerykańskich lub rosyjskich. Analizując przedstawione wykresy na rys. 1 i 2 . widzimy bardzo szeroki zakres uziarnienia gruntów, które można wbudować w korpus zapory i ekran iłowy, przy czym są to grunty głównie piaszczysto-pylaste, pozbawione najdrobniejszych cząstek, poniżej 0,002 mm. Obecność frakcji iłowej pozytywnie wpływa na zmniejszenie się współczynnika filtracji, który w powstałych tą metodą gruntach ze zbiornika roznowskiego wynosi ok. $1,5 \times 10^{-8}$ m/s. Jest to, więc wartość odpowiednia dla rdzeni iłowych. Niestety, domieszka minerałów ilastych znacznie wydłuża proces odsączania się wody z tworzącego się osadu. Badania własne przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych dla gruntów zawierających ok. 12–15 % frakcji iłowej wykazały, że potrzebny jest okres około dwóch lat, by warstwa gruntu o miąższości ok. 1,2 m uzyskała wilgotność bliską wilgotności optymalnej w granicach 22–24 %.

4.3. Ocena przydatności osadów do budowy warstw izolacyjnych w składowiskach odpadów.

Przy ocenie przydatności gruntów do budowy warstw izolacyjnych należy w pierwszej kolejności uwzględnić wytyczne rozporządzenia Ministra Środowiska z dn. 24 marca 2003 r. [3] w sprawie budowy składowisk. Cytowany akt prawny podaje kryterium wodoprzepuszczalności dla warstwy izolacyjnej wyrażone przez minimalną wartość współczynnika filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Dodatkowe zalecenia dotyczące przydatności gruntów znajdujemy w licznych publikacjach naukowych, instrukcjach i normach. Podają one cenne wskazówki dotyczące wybranych właściwości i zachowania się gruntów wbudowanych jako warstwa izolacyjna oraz zjawisk wynikających z kontaktu warstwy mineralnej z odciekami migrującymi ze składowiska, jak również informacjami dotyczącymi typów i odpowiednich konstrukcji składowisk.

W tab. 28 zostały przedstawione wytyczne aktów prawnych z różnych krajów, normy budowlanej jak i zaleceń publikowanych w literaturze fachowej dotyczących doboru gruntów do budowy składowisk odpadów.

Tab. 28. Zestawienie wymagań dla gruntów używanych do budowy przesłon izolacyjnych w składowiskach wg różnych autorów [Majer E., 2005] i badań własnych autora.

Kryteria przydatności	Jed.	PL, UE [3,6]	PN-B-06050 [7]	TA-Abfall [19] - Niemcy	EPA530-R-93-017 [22] – USA	NRA ¹	Daniel D.E. [1998]	Benson C.H. i in.[1992, 1998]	Rowe R.K. i in. [1995]	Wysokiński L. [1995]	Majer E.		Bad. autora – wart. średnie
											[2005]	J. Rożnowskie Dunajec	
Współczynnik filtracji	m/s	$\leq 1 \times 10^{-9}$	-	$\leq 5 \times 10^{-10}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-9} - 10^{-10}$	10^{-9}	10^{-10}	$3,4 \times 10^{-10}$	$6,73 \times 10^{-10}$
Wskaźnik plastyczności	%	-	-	-	> 10	$\geq 6-12$ ≤ 65	$\geq 12-15$	≥ 10	> 7	> 20	≥ 15 (D) ≥ 30 (BK)	20,1	11,6
Granica płynności	%	-	< 65	-	-	≤ 90	-	17-70	-	> 30	≥ 30	45,7	32,6
Zawartość węgla wapnia	%	-	-	≤ 15	-	-	-	-	-	≤ 10	≤ 15	< 1	< 1
Zaw. części organicznych	%	-	< 3	≤ 5	-	-	-	-	-	≤ 2	≤ 5	1,83	1,12
Zawartość frakcji ilowej	%	-	< 30	≥ 20	-	> 10	$\geq 20-25$	$\geq 10-20$	15-20	≥ 20	≥ 20 (D) ≥ 25 (BK)	13	10
Suma frakcji $< 0,075$ mm	%	-	-	-	≥ 30	-	≥ 50	≥ 50	-	≥ 60	≥ 60	73	61
Zawartość min. ilastych	%	-	-	≥ 10	-	-	-	-	15-20	-	≥ 20	-	-
Aktywność	-	-	-	-	-	-	-	-	$\geq 0,3$	-	dowolna	1,71	1,07-
Zawartość gipsu i soli rozpuszczalnych	%	-	< 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maksymalna gęstość objęściowa szkieletu gruntowego	g/cm ³	-	$> 1,6$	-	-	-	-	-	-	-	-	1,57	1,75
Pojemność sorpcyjna	g/100g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dowolna	2,2	1,6
Powierzchnia właściwa	m ² /g	-	-	-	-	-	-	-	-	-	dowolna	47,3	32,6
Wskaźnik pęcznienia	%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≥ 5	1,8	1,0

(D) – dopuszczalne

(BK) – bardzo korzystne

Za najważniejsze kryteria wpływające na jakość przesłony mineralnej powszechnie uznaje się kryterium przepuszczalności, uziarnienia i plastyczności.

4.3.1. Kryterium przepuszczalności

Jak już wcześniej wspomniano wśród wytycznych wielu państw oraz różnych autorów dominuje przekonanie, iż minimalna wartość współczynnika filtracji zapewniająca skuteczną izolację to wartość $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s, przy czym najostrożniejsze w tym względzie są przepisy niemieckie, bowiem tam zaleca się $k \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s. Przy analizie współczynnika filtracji ważne jest nie tylko, czy badany grunt uzyskuje żądaną wartość wodoprzepuszczalności, ale niezbędnym jest również podanie przy jakiej wartości wskaźnika zagęszczenia. Jak pokazuje praktyka inżynierska [Majer E., 2005] realna wartość wskaźnika zagęszczenia uzyskiwana w warunkach terenowych na wielu wybudowanych już składowiskach mieści się w przedziale 0,90–0,98. Wyniki badań otrzymane dla analizowanych gruntów pokazały, że osady cofkowe zdeponowane w zbiorniku rożnowskim spełniają warunek $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s już przy I_s z przedziału 0,95–0,96. Średnia wartość współczynnika filtracji k_{10} tych osadów, dla $I_s = 0,95$ wynosi $1,65 \times 10^{-9}$ m/s, natomiast dla $I_s = 1$, średnia wartość $k_{10} = 3,4 \times 10^{-10}$ m/s.

W przypadku mad Dunajca współczynnik filtracji jest większy, minimalne kryterium jest spełnione przy wskaźniku zagęszczenia ok. 0,99–1,0. Średnia wartość k_{10} dla $I_s = 1$ wynosi $6,7 \times 10^{-10}$ m/s.

Podsumowując wyniki badań współczynnika wodoprzepuszczalności, można stwierdzić, iż zarówno osady cofkowe zbiornika rożnowskiego jak i osady Dunajca spełniają minimalne kryterium przepuszczalności. Jednak w praktyce, w przypadku użycia osadów Dunajca, należałoby rozważyć ewentualną potrzebę wzbogacenia ich np. bentonitem, dla poprawienia właściwości izolacyjnych.

4.3.2. Kryterium uziarnienia

Analiza zaleceń, jakie najczęściej podają różni autorzy w kwestii uziarnienia (tab. 28) pokazuje, że najlepsze właściwości przesłonowe mają grunty zawierające

powyżej 20, a nawet 25 % frakcji iłowej, chociaż niektórzy autorzy stawiają granicę już przy 10 % f_i . Norma PN-B-06050 z 1999 r. zaleca do formowania nasypów wykorzystywać grunty, które zawierają mniej niż 30 % f_i . Powyżej tej wartości grunty stają się trudne do urabiania, zagęszczania oraz osuszania. Można by zatem stwierdzić, że grunty, które nie stanowią problemów przy formowaniu i jednocześnie posiadają dobre właściwości izolacyjne stanowią bardzo wąską grupę utworów. Może to stwarzać realne problemy w pozyskiwaniu właściwego surowca w wielu rejonach Polski.

Autor niniejszej pracy prowadził badania dla gruntów o zawartości frakcji iłowej od 8 do 19 %. Na podstawie uzyskanych wyników badań zauważa, iż grunty o zawartości frakcji iłowej już na poziomie ok. 13–15 % stanowią właściwy materiał do formowania warstw izolacyjnych. Uzyskiwane wartości współczynnika filtracji przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 1$ są mniejsze niż 5×10^{-10} m/s, natomiast przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95$ poniżej 1×10^{-9} m/s. Dla gruntów zawierających około 10 % f_i wydaje się niezbędnym wzbogacenie ich np. bentonitem lub zastosowanie dodatkowej warstwy geosyntetyku.

Coraz częściej przy ocenie zawartości frakcji iłowej porusza się problem nie tylko jej ilościowej oceny, ale również jakościowej, bowiem rodzaj minerałów ılastych przekłada się na zdolności sorpcyjne i jonowymienne. W rozpatrywanych gruntach analiza mineralogiczna wykazała dominującą obecność illitu i kaolinitu oraz śladowe ilości montmorillonitu wapniowego. Powyższy skład fazowy frakcji ıłowej ma wpływ na niskie właściwości sorpcyjne i jonowymienne, co wyraziło się w uzyskiwanych wartościach pojemności sorpcyjnej MBC na średnim poziomie 2,2 g/100g dla osadów zbiornika rożnowskiego i 1,6 g/100g dla pierwotnych mad Dunajca.

4.3.3. Kryterium plastyczności

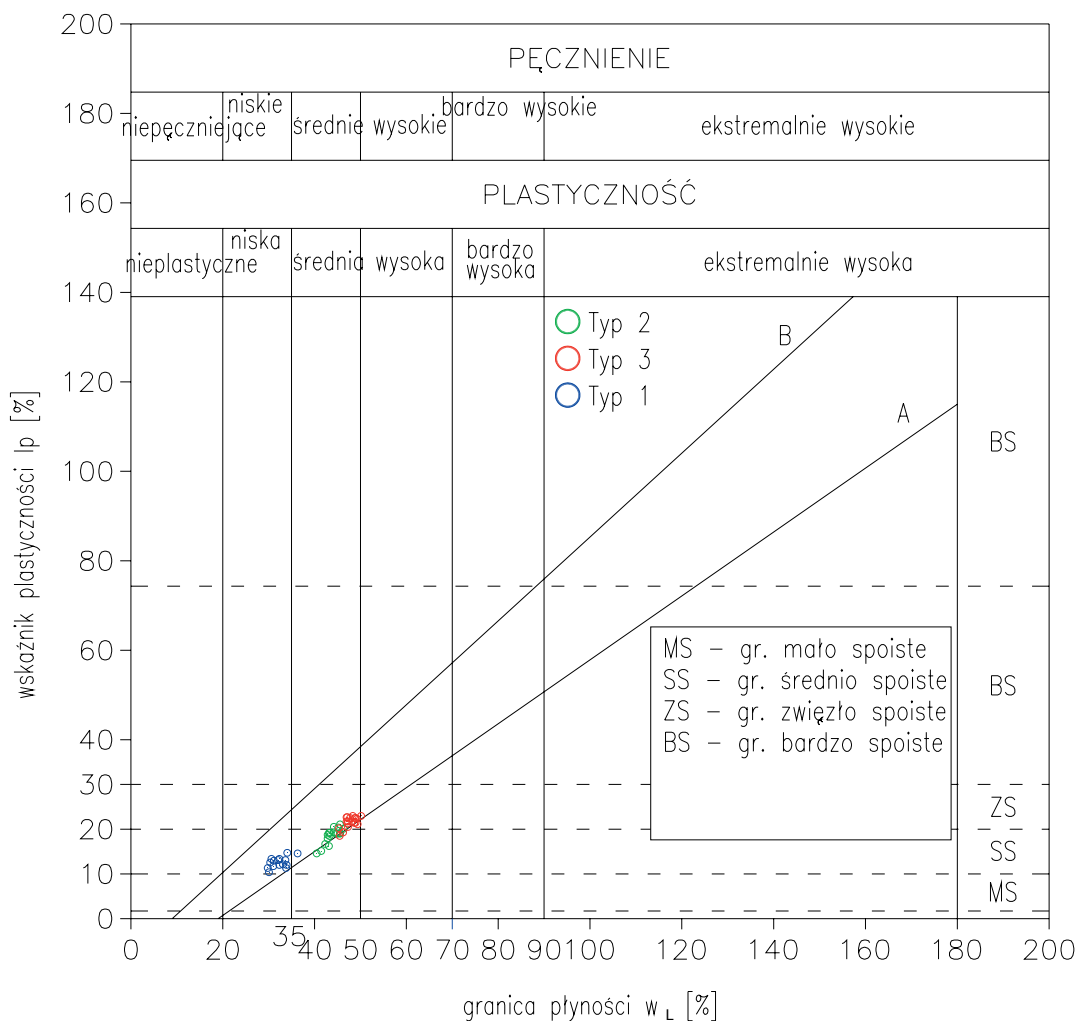
Kryterium plastyczności jest ściśle związane z techniczną możliwością formowania przesłon mineralnych. Doświadczenia przy formowaniu przesłon mineralnych w USA wskazują, iż grunty o wskaźniku plastyczności $I_p = 10$ –30 formuje się dobrze i jednocześnie uzyskuje się wysoką wartość współczynnika filtracji k poniżej 1×10^{-9} m/s. Grunty o wskaźniku plastyczności I_p poniżej 7 mają małe właściwości plastyczne i trudno jest uzyskać wymaganą wodoprzepuszczalność. Natomiast grunty

wysokoplastyczne o $I_p > 30\%$ są trudne do wbudowania, bo przesuszone tworzą trudno urabialne bryły, a zbyt wilgotne stają się kleiste. Dodatkowo grunty wysokoplastyczne mają tendencje do nadmiernego pęcznienia i skurczu. Analizując zalecenia różnych autorów (tab. 28), można zauważyć dużą zgodność, co do wartości wskaźnika plastyczności $I_p \geq 10$, chociaż polscy autorzy wskazują na wyższą wartość I_p , bo powyżej 15. Jak ogólnie wiadomo wartość wskaźnika plastyczności I_p w przybliżeniu odpowiada zawartości frakcji iłowej. W związku z tym można by uznać kryterium plastyczności za mniej istotne przy ocenie właściwości przesłonowych gruntów, gdyż wynika ono bezpośrednio z kryterium uziarnienia. Wyjątek stanowią tu mogą grunty zawierają domieszki materii organicznej lub minerałów z grupy smektytów, dla których wskaźnik plastyczności przyjmuje wartości wyższe.

Średnia wartość wskaźnika plastyczności I_p dla osadów zbiornika rożnowskiego wynosi 20,1, natomiast mady Dunajca 11,6. Wartości te mieszczą się w zakresie wartości zalecanych przez wielu autorów i spełniają wartości kryterialne. Należy tu jednak zaznaczyć, że wysoka wartość I_p dla osadów rożnowskich nie jest tylko związana z obecnością frakcji iłowej na średnim poziomie 13 %, ale również z podwyższoną zawartością części organicznych na średnim poziomie ok. 2 %.

Według klasyfikacji gruntów zaproponowanej przez NRA (ang. National Rivers Authority) [Garbulewski K., 2000 za Jones R.M. i in., 1993] osady ze zbiornika rożnowskiego można uznać za grunty odpowiednie do formowania przesłon mineralnych, ponieważ charakterystyczne punkty zależności $I_p=f(W_L)$ znajdują się powyżej linii „A” na nomogramie Casagrande’a i charakteryzują się wskaźnikiem plastyczności I_p z przedziału 15–65, a mady z Dunajca za grunty wątpliwe, ponieważ wskaźnik plastyczności $I_p < 15$.

Nomogram plastyczności



Rys. 49 Charakterystyka plastyczności gruntów wg nomogramu Casagrande'a.

Poniżej krzywej „A” znajdują się grunty organiczne, wg nomogramu Casagrande'a nieodpowiednie do formowania przesłon mineralnych. W gruntach ze zbiornika rożnowskiego zawartość części organicznej mieści się w przedziale od ok. 1 do 3 %, i jak widać na rys. 49, punkty znajdują się bardzo blisko, lub na linii „A”. Wynika z tego, że zawartość części organicznych na poziomie 3 % stanowi wartość dopuszczalną. Również wg polskiej normy dla nasypów graniczna wartość części organicznych wynosi 3 %. Można z tego wnioskować, że dopuszczalna wartość części organicznych dla gruntów przeznaczonych do formowania przesłon mineralnych powinna wynosić 3 %.

Podsumowując powyższe rozważania, można stwierdzić, iż osady cofkowe zdeponowane w zbiorniku rożnowskim nadają się jako surowiec do wykonywania przesłon mineralnych w składowiskach odpadów. Wykorzystując osady o niższej zawartości frakcji iłowej, poniżej ok. 13–15 % powinno się rozważyć wzbogacenie ich na etapie wykonawczym materiałem poprawiającym właściwości izolacyjne. Ponieważ w składzie mineralnym frakcji iłowej dominuje illit i kaolinitu, zaleca się używanie tych gruntów do formowania dolnej części przesłony mineralnej, tzw. nieaktywnej, której zadaniem jest utrzymanie długoletniej trwałości warstw uszczelnienia mineralnego.

Aby przesłona mineralna spełniała ustaloną w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dn. 24 marca 2003 r. [3] wartość współczynnika filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s, a jednocześnie spełniała zalecenia polskiej normy PN-B-06050 dotyczącej budowy nasypów [7], zdaniem autora, powinna być wykonana z gruntu charakteryzującego się następującymi wartościami kryterialnymi: zawartością frakcji iłowej $f_i = 15\text{--}30$ %, zawartością części organicznych poniżej $I_{om} \leq 3$ % i wskaźnikiem zagęszczenia $I_s \geq 0,95$.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych właściwości geotechnicznych osadów spoistych deponowanych współcześnie w cofce zbiornika rożnowskiego i osadów powstających na tarasach zalewowych Dunajca. Pozwoliło to na sformułowanie następujących wniosków:

1. W cofce zbiornika rożnowskiego grunty spoiste wykształcone są głównie jako pyły piaszczyste, pyły, gliny i gliny pylaste. Porównując średnią procentową zawartość poszczególnych frakcji gruntowych ($f_p = 27\%$, $f_{II} = 60\%$, $f_i = 13\%$), zauważamy wyraźną dominację frakcji pyłowej nad piaskową i iłową. Badane grunty charakteryzuje niższa, niż się pierwotnie spodziewano, zawartość części organicznych w przedziale $I_{om} = 0,80\text{--}2,89\%$, średnio $1,83\%$, co lokalizuje je w obrębie gruntów mineralnych na pograniczu z gruntami organicznymi. Na tarasach zalewowych, pod osadami cofkowymi, występują w znacznej części badanego obszaru pierwotne osady spoiste Dunajca, wykształcone głównie jako pyły piaszczyste i gliny. Średnia procentowa zawartość poszczególnych frakcji gruntowych wynosi $f_p = 49\%$, $f_{II} = 41\%$, $f_i = 10\%$. W tym przypadku dominująca jest frakcja piaskowa, na rzecz frakcji pyłowej, natomiast zawartość frakcji iłowej jest nieznacznie, bo tylko o 3% niższa niż w przypadku gruntów cofkowych. W madach Dunajca mamy również ok. $30\text{--}40\%$ niższą zawartość części organicznych, w przedziale $I_{om} = 0,72\text{--}1,61\%$, średnio $1,12\%$.
2. Analizując charakterystykę strukturalno-teksturalną osadów zbiornika rożnowskiego, zauważamy zróżnicowanie w przekroju pionowym wyrażone uziarnieniem frakcjonalnym, związane z różną intensywnością cykli powodziowych. Zaznacza się to obecnością licznie występujących kilku centymetrowych warstewek od piasku gliniastego, przez pyły i gliny do glin pylastych zwięzłych, a nawet iłów. Pierwotne osady Dunajca wykazują mniejsze zróżnicowanie pionowe i bardziej jednorodną teksturę.
3. Analiza zależności zawartości części organicznych od zawartości frakcji iłowej wskazuje, że ma ona charakter liniowy. Zawartość części organicznych rośnie wraz ze zmniejszaniem się uziarnienia gruntu. Autor zaproponował nowy parametr: współczynnik części organicznych i_{om} . Jest on ilorazem procentowej zawartości

części organicznych i zawartości frakcji iłowej. Dla osadów cofkowych przyjmuje on wartość $i_{om} = 0,1-0,16$.

4. Przy oznaczaniu zawartości części organicznych w gruntach ważna jest nie tylko ocena ilościowa, lecz również stopień rozłożenia części organicznych. Ma to istotny wpływ na wzrost wartości właściwości gruntu bezpośrednio związanych z wilgotnością, takich jak; granica plastyczności i płynności, wskaźnik plastyczności, aktywność, wilgotność optymalna, oraz właściwości geochemicznych, m.in. pojemność sorpcyjna. Osady zdeponowane w cofce zbiornika roznowskiego charakteryzują się niskim stopniem, natomiast mady Dunajca wysokim stopniem rozłożenia części organicznych.
5. Przy ocenie właściwości filtracyjnych podjęto problem charakteru przebiegu procesu filtracji w gruntach spoistych oraz metodyki interpretacji wyników badań związanym z liniowym prawem Darcy. Wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych wykazały, że dla gruntów mało- i średnio spoistych zależność prędkości filtracji od spadku hydraulicznego jest zbliżona do liniowej. Sporządzone wykresy zależności $v = f(J)$, wskazują na minimalną wartość spadku początkowego $J_0 < 5$, możliwą do pominięcia w zagadnieniach praktycznych. W tym przypadku nie ma istotnych rozbieżności pomiędzy wartościami współczynnika wodoprzepuszczalności k , określonymi z zależności ustalonych dla filtracji prelinearnej, a wartościami określonymi dla filtracji linearnej. Dlatego przy obliczaniach wartość współczynnika wodoprzepuszczalności z wykorzystaniem zależności liniowej $v = kJ$ nie popełnia się znaczących błędów.
6. Badania laboratoryjne potwierdziły wyraźny spadek wartości współczynnika filtracji wraz ze wzrostem wskaźnika zagęszczenia badanych osadów. Niższe, a zatem najbardziej korzystne wyniki, otrzymano dla współczesnych osadów zdeponowanych w cofce zbiornika, natomiast dla mad Dunajca uzyskano wyższe wartości współczynnika filtracji.
7. Badania właściwości pęczniejących wykazały, że są to grunty nisko pęczniejące. Związane jest to przede wszystkim z obecnością w składzie mineralnym frakcji iłowej minerałów z grupy illitu i kaolinitu. Otrzymane w badaniach wartości wskaźnika pęcznienia dla mad Dunajca są o ok. 70 % niższe, niż dla tej części osadów cofkowych, których zawartości części organicznych przekraczała 2 %. Edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej dla mad Dunajca charakteryzuje się wartościami wyższymi o 60 %, a moduł ściśliwości wtórnej wartościami wyższymi

o 30 % w stosunku do współczesnych osadów cofkowych. W badaniach wytrzymałości gruntu na ścinanie, wykonanych w aparacie trójosiowego ściskania wg metody CID, efektywny kąt tarcia wewnętrzznego dla mady Dunajca i dla osadów cofkowych różni się nieznacznie, bo o ok. 5%. Kilkuprocentowa obecność części organicznych nie obniża znacząco wytrzymałości gruntu na ścinanie, gdy grunt jest poddany procesowi konsolidacji.

8. Analiza zawartości metali ciężkich (kadmu Cd, miedzi Cu, cynku Zn, ołowiu Pb, chromu Cr) i pestycydów występujących w osadach dennych zbiornika rożnowskiego oraz stropowych partiach mad Dunajca wykazała, iż w świetle przepisów zawartych w ustawie o odpadach [4] i Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [1] badane osady nie należy traktować jako odpad. Można go wykorzystać jako materiał do formowania budowli ziemnych, jednak z pewnym zastrzeżeniem. Badany grunt, ze względu na podwyższone zawartości cynku Zn i miedzi Cu oraz pestycydów, nie może być wykorzystany na terenach chronionych przepisami o ochronie przyrody, a także obszarach poddanych ochronie na podstawie przepisów prawa wodnego.
9. Mady Dunajca spełniają wszystkie minimalne cechy kryterialne stawiane grantom jako materiałowi używanemu do formowania nasypów. W przypadku współczesnych osadów deponowanych w strefie cofkowej część gruntów o podwyższonej zawartości części organicznych, powyżej 2 %, charakteryzuje się wartościami średniej maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{ds} poniżej $1,6 \text{ g/cm}^3$. Można jednak uznać, iż ta różnica jest nieznaczna i nie dyskwalifikuje osadów cofkowych jako materiału do budowy nasypów. Osady te nadają się przede wszystkim do budowy nasypów i zapór ziemnych bez elementów szczelnych do wysokości 3 m, czyli grobli ziemnych, zapór wstecznych oraz wałów przeciwpowodziowych oraz do formowania rdzeni nieprzepuszczalnych w zaporach strefowych. W przypadku wznoszenia wyższych budowli należy badany grunt uzupełnić o frakcję grubszą – piaszczysto-żwirową.
10. W niniejszej pracy rozpatrywano również możliwość wbudowywania gruntu w nasyp metodą hydrauliczną. Badania doświadczalne wykazały, iż obecność frakcji iłowej pozytywnie wpływa na zmniejszenie się współczynnika filtracji, który w powstałych tą metodą gruntach wynosi ok. $1,5\text{--}1,9 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Jest to więc wartość

odpowiednia dla rdzeni nieprzepuszczalnych. Niestety, domieszka minerałów ilastych znacznie wydłuża proces odsączania się wody z tworzącego się osadu. Dla warstwy o miąższości 1,2 m uformowanej z gruntów zawierających 12–15 % frakcji iłowej potrzebny jest okres około dwóch lat, by wilgotność gruntu obniżyła się do wartości wilgotności optymalnej, w granicach 22–24 %.

11. Zarówno pierwotne mady Dunajca, jak i współczesne osady cofkowe nie są dobrym materiałem do budowy nasypów drogowych, ponieważ są gruntami wysadzinowymi, a część osadów gliniastych tworzących współczesne osady cofkowe charakteryzuje się zawartością części organicznych $I_{om} > 2$ %. Do budowy dolnych partii nasypów poniżej strefy przemarzania można użyć części osadów cofkowych o zawartości części organicznych $I_{om} < 2$ %. Natomiast na górne warstwy nasypów w strefie przemarzania można wykorzystać osady Dunajca, pod warunkiem ulepszenia tych gruntów spoiwami, takimi jak: cement, wapno, aktywne popioły, itp.
12. Badane grunty, szczególnie osady cofkowe, można uznać jako odpowiednie do budowy warstw izolacyjnych w składowiskach odpadów, gdyż wartość współczynnika filtracji $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Dla osadów cofkowych wartość kryterialną współczynnika filtracji uzyskujemy już przy wskaźniku zagęszczenia $I_s = 0,95–0,96$, a dla mad Dunajca przy wskaźniku zagęszczenia ok. 0,99–1,0. Wykorzystując osady o niższej zawartości frakcji iłowej, poniżej ok. 13–15 % powinno się rozważyć wzbogacenie ich na etapie wykonawczym materiałem poprawiającym właściwości izolacyjne. Ponieważ w składzie mineralnym frakcji iłowej dominuje illit i kaolinitu, zaleca się używanie tych gruntów do formowania dolnej części przesłony mineralnej, tzw. nieaktywnej, której zadaniem jest utrzymanie długoletniej trwałości warstw uszczelnienia mineralnego.

6. Spis literatury

6.1. Ustawy, normy i zalecenia:

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. Dz. U. nr 165 poz. 1359.
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 1998 r. w sprawie szczegółowych zasad usuwania, wykorzystywania i unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych. Dz. U. Nr 145, poz. 942.
3. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów. Dz. U. nr 61 poz. 549; Dz. U. nr 22 poz. 251 z 5 marca 2001 r.
4. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach. Dz. U. nr 62, poz. 628.
5. Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne. Dz. U. nr 115, poz. 1229.
6. Dyrektywa Rady 1999/31/EC dniu 26 kwietnia 1999 r. o składowiskach odpadów. Tłumacz. OBREM 1999.
7. Norma PN-B-06050:1999 Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
8. Normie PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
9. Norma PN-B-02480:1996 (PN-86/B-02480) Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
10. Norma PN-B-02481:1998 Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
11. Norma PN-B-04481:1998 (PN-88/B-04481) Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
12. Norma PN-EN ISO 14 688-1 Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczenie i opis. Część 2: Zasady klasyfikowania.
13. Instrukcja nr 337/1995 – Projektowanie przesłon izolacyjnych na składowiska odpadów komunalnych. ITB Warszawa.
14. Instrukcja nr 339/1996 – Badania szczelności izolacji mineralnych składowisk odpadów. ITB Warszawa.

15. Instrukcja nr 340/1996 – Projektowanie i wykonanie badań do lokalizacji składowisk odpadów komunalnych. ITB Warszawa.
16. Instrukcja nr 339/2003 – Badania gruntów do budowy przesłon izolacyjnych na składowiskach. ITB Warszawa.
17. Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) z 1976 r.
18. Hazardous and Solid Waste Amendments (HSWA) z 1984
19. TA Abfall: 1991 – Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, Gemeinsames Ministerblatt Nr. 8 vom 12.03.
20. TA Siedlungsabfall: 1993 – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und Sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger Verlags, Kilonia.
21. Requirements for Hazardous Waste Landfill Desing, Construction and Closure 1989 – Seminar Publication, EPA/625/4-89/022, U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
22. Solid Waste Disposal Facility Criteria. Technical Manual 1993 – EPA 530-R-93-017, U.S. Environmental Protection Agency (EPA). www.epa.gov
23. ASTM D 2488 – 93: Srandart Practice for Description and Identification of soils (Visual – Manual Procedure).
24. ASTM D 2974-87. Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils.
25. BS 1377:Part 8: 1990 – British Standart Methods of test. Soils for civil engineering purposes. Part 3: Determination of moisture content. Part 8: Shear strength tests (effective stress). British Standards Institution. London.
26. Eurocode 7: Prenorma europejska. ENV1997-2. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Projektowanie z wykorzystaniem badań laboratoryjnych. European Commitee for Standardization, Bruksela. Wersja polska – Warszawa 1999.

6.2. Literatura:

27. Arch J., 1998 – Clay barriers in landfills in Environmental interactions of clays. Clays and envitonment. Edited by Parker A., Rae J.E., Springer, Berlin.
28. Bagchi A., 1990 – Design, construction and monitoring of sanitary landfill. John Wiley&Sons, New york.

29. Barone F.S., Yanful E.K., Quigley R.M., Rove R.K., 1989 – Effect of multiple contaminant migration on diffusion and adsorption of some domestic waste contaminants in a natural clayey soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(2).
30. Bartoszewicz A. 1992 – Charakterystyka granic konsystencji namulów organicznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 1.
31. Bartoszewicz A. 1994 – Wpływ zawartości substancji organicznej na właściwości fizyczne gruntów organicznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5.
32. Benson C.H. i Boutwell G.P., 1992 – Compaction control and scale-dependent hydraulic conductivity of clay liners. *Proceedings of the 15th Annual Madison Waste Conference*, University of Wisconsin, Madison.
33. Benson C.H., Blotz L.R., Boutwell G.P., 1998 – Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* vol. 124, nr 9.
34. Benson C.H., Zhai H., Resched S.M., 1992 – Assessment of construction quality control measurement and sampling frequencies for compacted soil liners. *Environmental Geotechnics*, Report No. 92-6, University of Wisconsin, Madison.
35. Bereszczczyński, A., 1999 – Usuwanie osadów ze zbiorników przeznaczonych do remontu. *Inżynieria i Budownictwo* nr 11.
36. Bonaparte R., Gross A.B., 1990 – Field behavior of double liner systems, in *Waste Containment Systems: Construction, Regulation, and Performance*. American Society of Civil Engineers, New York.
37. Borkowski, M. ; Mrozińska, G. ; Szutowicz, J. 2001 – Nowe tereny pod budownictwo dla Szczecina. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 5.
38. Borys M., 1983 – Inwentaryzacja i badania nasypów z gruntów organicznych. IMUZ.
39. Borys M., 1993 – Niskie nasypy z miejscowych gruntów organicznych dla potrzeb budownictwa wodno-melioracyjnego. Wydawnictwo IMUZ Falenty.
40. Brandl H., 1993 – Mineralne warstwy uszczelniające w składowiskach odpadów niebezpiecznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 3.
41. Choma-Moryl K, Rinke M.: 2001 – Wybrane grunty spoiste jako naturalne uszczelnienia składowisk odpadów. *Materiały z X Konferencji „Współczesne problemy hydrogeologii”*, tom II, Wrocław.

42. Choma-Motyl K., 2001 – Ocena właściwości hydroizolacyjnych gruntów spoistych na podstawie ich plastyczności. Materiały z X Konferencji „Współczesne problemy hydrogeologii”, tom II, Wrocław.
43. Cyberski J., 1965 – Procesy denudacyjne w strefie przybrzeżnej zbiornika rożnowskiego, Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, Tom I (XIII), Zeszyt 3-4.
44. Cyberski J., 1969 – Sedymentacja rumowiska w zbiorniku rożnowskim, Prace PIHM, Zeszyt 69, Warszawa.
45. Czyżewski K., Wolski W., Wójcicki S., Żbikowski A., 1973 – Zapory ziemne. Arkady, Warszawa.
46. D’Astous A.Y., Ruland W.W., Bruce J.R.G., 1989 – Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay. Canadian Geotechnical J. 26(1).
47. Daniel D.E., Kornner R.M., 1995 – Waste Containment Facilities. Guidance for Construction, Quality Assurance and Quality Control of Liner and Cover System. Published by ASCE Press, New York.
48. Daniel D.E., 1993 – Geotechnical practice for waste disposal. Chapman & Hall, London.
49. Daniel D.E., 1998 – Landfills for solid and liquid waste. Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, A.A. Balkema, Rotterdam.
50. Daniel D.E., Trautwein S.J., 1994 – Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soil. ASTM STP 1142. ASTM Philadelphia.
51. Darilek G.T., Laine D.L., i Parra J.O., 1989 – The electrical leak location method for geomembrane liners: development and applications, Geosynthetics '89, Industrial Fabrics Association International, Minneapolis.
52. Dembicki, E. ; Jaromińska, M., 1999 – Okreslenie współczynnika filtracji gruntów słabo przepuszczalnych. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 5.
53. Dembicki, E. ; Jaromińska, M., 2004 – Prawo Darcy w gruntach słabo przepuszczalnych. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 6.
54. Depczyński W., Szamowski A., 1999 – Budowle i zbiorniki wodne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
55. Diduszko R, Marciniak H., 1995 – XRAYAN program do rentgenowskiej analizy fazowej. Warszawa.

56. Egler R., 1997 – System ochrony przeciwpowodziowej kraju. Materiały szkolenia w zakresie ochrony przed powodzią z wykorzystaniem doświadczeń z powodzi w lipcu 1997r. Główny komitet przeciwpowodziowy. Jurata, maj 1998.
57. Fernandez F., Quigley R.M., 1985 – Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. *Canadian Geotechnical. J.*, 22(2)
58. Foreman D.E., Daniel D.E., 1986 – Permeation of compacted clay with organic chemicals. *J. Geotech. Eng.*, 112(7)
59. Garbulewski K., Wienclaw E., Wolski W., 1994 – Gliny zwałowe jako materiał do budowy wykładziny gruntowej składowiska odpadów w Łukowie. Materiały z seminarium „Geotechniczne aspekty składowania odpadów”, Gdańsk 9–10 czerwca, IMOGEOR Politechnika Gdańska.
60. Garbulewski, K., 2000 – Ocena ekspansywności gruntów na podstawie charakterystyk skurczalności. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 3.
61. Garbulewski, K., 2002 – Odształcenia odpadów komunalnych w składowiskach *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 5.
62. Garbulewski, K., 2000 – Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
63. Giroud J.P. i Bonaparte R., 1989 – Leakage through liners constructed with geomembrans. Part II: composite liners, Geotextiles and Geomembranes.
64. Gołębiewska A., 2006 – Klasyfikacja gruntów organicznych. *Geotechnika w hydrotechnice i budownictwie lądowym*. Monografia wydana z okazji 50-lecia pracy naukowej prof. Wojciecha Wolskiego. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
65. Grabowska-Olszewska B., 1990 – Metody badań gruntów spoistych W.G. Warszawa.
66. Head K. H., 1995 – *Manual of soil laboratory testing*. wydanie II, Pentech Press, London.
67. Head K. H., 1998 – *Manual of soil laboratory testing*. Volume 3 – Effective stress tests. John Wiley & Sons, England.
68. Herzig, J., 2001 – Wpływ zanieczyszczeń organicznych na wybrane parametry fizyczne gruntów spoistych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 3.
69. Jacenków S., 1993 – Możliwości uszczelniania wysypisk odpadów. *Inżynieria Morska i Geotechnika* nr 2.

70. Jaromińska, M., Dembicki, E., 1999 – Określanie współczynnika filtracji gruntów słabo przepuszczalnych. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 5.
71. Jones R. M., Murry E.J., Rix D.W., Humphrey R.D., 1993 – Selection of clays for use as landfill liners. Proceedings of the Symposium on Geotechnics Related to the European Environment “GREEN 93”, Bolton, U.K.
72. Korzeniowska-Rejmer E., 2001 – Wpływ zanieczyszczeń ropopochodnych na charakterystykę geotechniczną gruntów stanowiących podłoże budowlane. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 2.
73. Książkiewicz M., 1972 – Karpaty. Budowa geologiczna Polski. Tektonika t. IV. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
74. Łajczak A.: Studium nad zamulaniem wybranych zbiorników zaporowych w dorzeczu Wisły, Monografie KGW-Pan, nr 8, 1995.
75. Majer E., 2005 – Ocena właściwości przesłonowych ilów do budowy składowisk odpadów. Rozprawa doktorska, archiwum ITB, Warszawa.
76. Materiały konferencyjne z VI Polskiego Kongresu Oczyszczania Miast. Szczecin 1999.
77. Materiały seminarium nt.: „Nowoczesne metody izolacji i uszczelniania składowisk odpadów i zbiorników wodnych”. Politechnika Krakowska, Kraków 1993
78. Materiały z IV krajowej konferencji „Technicznej Kontroli Zapór”. Tom 2 – Zapory ziemne, Porąbka-Kozubnik 27–29 październik 1998
79. Materiały z konferencji „Budowa bezpiecznych składowisk odpadów” 1990–2005, Wisła.
80. Materiały z konferencji „Budowa i eksploatacja bezpiecznych składowisk odpadów”. Szczyrk 29 luty – 2 marzec 2000.
81. Materiały z konferencji „Problemy zagospodarowania odpadów mineralnych” 1995–2004, Wisła.
82. Miczyński J., Komornicki T., Oleksynowa K., Drózdź-Hara M., Strycharski P., Bors A., Głuch K., Kozak J., 1989 – Określenie przydatności mułów Jeziora Rożnowskiego. Archiwum PIG, Warszawa.
83. Mioduszewski W., 1992 – Projektowanie, modernizacja i technologia wykorzystywania wałów przeciwpowodziowych w trudnych warunkach geotechnicznych. Materiały instruktarzowe 97. Imuz, Falenty.

84. Mroczek J., Ratomski J., Waclawski M., 1997 – Sedimentacja rumowiska w zbiorniku Tresna, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, Zeszyt 13, Kraków.
85. Myślińska E., 2001 – Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania. Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa.
86. Myślińska E., i in., 1983 – Wpływ przeobrażeń materiału zboczowego w czaszy zbiornika wodnego Rożnów na powierzchniowe ruchy mas ziemnych, przy różnej prędkości zmian położenia zwierciadła wody, z próbą litologicznej typizacji zboczy. Zakład Prac Geologicznych. Warszawa.
87. Myślińska E., 1998 – Laboratoryjne badania gruntów. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa.
88. Olchawa, A., Walter, T., 2002 – „Zmiany współczynnika filtracji w korpusach obwałowań przeciwpowodziowych wykonanych z gruntów organicznych. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 5.
89. Onoszko J., 1959 – Studia nad zamuleniem zbiornika rożnowskiego. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 17 (uzupełnienie), Budownictwo Wodne II (uzupełnienie), Gdańsk.
90. Onoszko J., 1964 – Zamulenie zbiornika Rożnowskiego w 19-lecie jego eksploatacji, W opr. IBW PAN w Gdańsku „Badania naukowo-kontrolne zapór wodnych w Rożnowie i Czchowie”, PWN, Warszawa-Poznań.
91. Onoszko J., 1962 – Zamulenie zbiornika rożnowskiego, Rozprawy Hydrotechniczne 12, Warszawa-Poznań.
92. Pieczyrak, J., 1999 – Wały przeciwpowodziowe w ujęciu geotechnicznym. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 2.
93. Pisarczyk S., 2004 – Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
94. Pisarczyk S., 2000 – Badania geotechniczne gruntów spoistych stosowanych do budowy uszczelnień mineralnych składowisk odpadów komunalnych, Gospodarka Wodna, nr 9.
95. Prühs H., Kowalów M., 1992 – Kierunki rozwoju w budowie składowisk odpadów. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 2.
96. Ratomski J., 2000 – Podstawy projektowania zabudowy potoków górskich. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. Redakcja Wydawnictwa PK, Kraków.

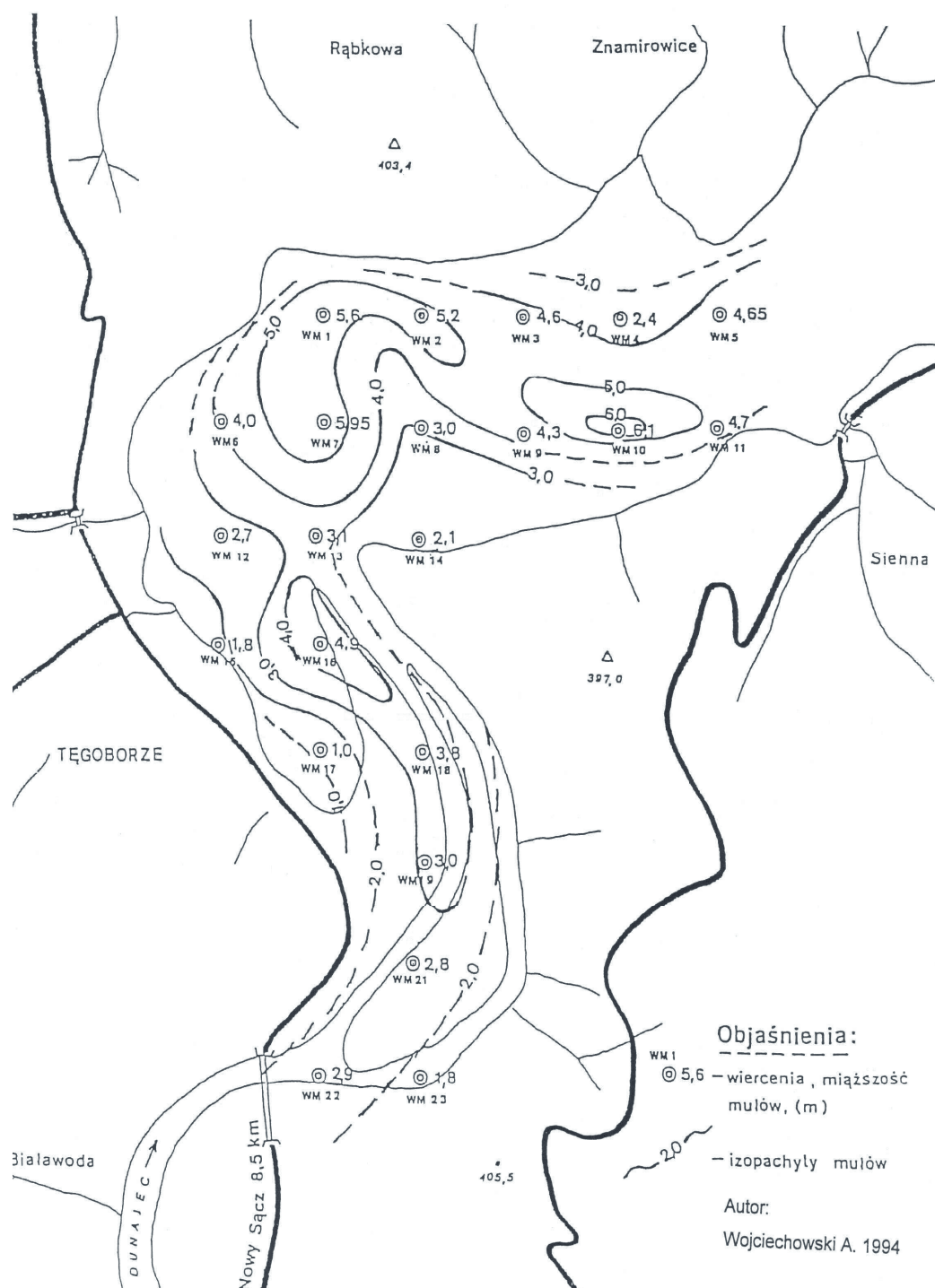
97. Rove R.K., Caers J.C., Barone F., 1988 – Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp. 108-118.
98. Rove R.K., Quigley R.M., Booker J.R., 1995 – Clayey Barrier systems for waste disposal facilities. *E FN SPON* ss 201-218.
99. Schaefer R., 1991 – Modele numeryczne filtracji prelinearnej. *Rozprawy habilitacyjne nr 212*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
100. Shakoor A., Cook B.D., 1990, – The effect of stone content, size and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. *Bul. Assoc. of Eng. Geol.*, XXVII(2).
101. Shelley T.L., 1991. – Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners. *M.S. Thesis*, Univ. of Texas, Austin, Texas.
102. Sobczak J., (red) 1985 – Badanie stanu załadowania zbiornika w Rożnowie. *Praca zlecona nr TRH/HU/2906/83*, Archiwum ZEW Rożnow.
103. Sobczak J., 1975 – *Zapory z materiałów miejscowych.*, PWN, Warszawa 1975.
104. Sokołowski J., Mościej K., 1997 – Ocena obwałowań po powodzi w 1997r. *Powódź 1997. T2. Forum Naukowo-Techniczne Ustroń k. Wisły 10-12 września 1997.* IMGW, Warszawa.
105. Stanowski J., 1993 – Hydrologiczno-fizjograficzne kryteria w prognozie załadowania zbiorników retencyjnych w dorzeczu górnej Wisły. *Rozprawa doktorska*, Archiwum PK, Kraków.
106. Stępniać S., 2001 – Nowe technologie w odbudowie wałów przeciwpowodziowych. *Gospodarka wodna nr 7*.
107. Stępniać S., 2001 – Nowe materiały do powierzchniowego uszczelniania i odwadniania rekultywowanych składowisk odpadów. *Inżynieria i Budownictwo R. 57*, nr 10.
108. Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1989 – Arkusz 1018 Męcina. Arkusz 1035 Nowy Sącz. PIG
109. Traczyk R., 1990 – Wykorzystanie mad rzecznych do budowy obwałowań osadnika. *IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania 11-13 październik*, Kraków.

110. Waclawski M., Gwóźdź R., Wawok M., 2005a – Zagadnienie określania współczynnika wodoprzepuszczalności gruntów spoistych Czasopismo techniczne Ś-16. Wydawnictwo PK, Kraków
111. Waclawski M., Gwóźdź R., Wawok M., 2005b – Ocena przydatności wybranych mad rzecznych do budowy wierzchniej warstwy izolacyjnej wysypisk odpadów komunalnych” Czasopismo techniczne Ś-8. Wydawnictwo PK, Kraków
112. Waclawski M., (red) 2005 – Zarys geologii i hydrogeologii, Wydawnictwo PK, Kraków
113. Wewetzer D., 2000 – Dyrektywy unijne dotyczące składowania odpadów. Konferencji „Budowa i eksploatacja bezpiecznych składowisk odpadów”. Szczyrk 29 luty – 2 marzec.
114. Wiłun Z., 1987 – Zarys geotechniki, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
115. Wojciechowski. A., 1994 – Kompleksowe wykorzystanie osadów deponowanych przez Dunajec w Jeziorze Rożnowskim. PIG Warszawa.
116. Wysokiński L., 2000 – Aktualne problemy budowy składowisk komunalnych w Polsce. Konferencji „Budowa i eksploatacja bezpiecznych składowisk odpadów”. Szczyrk 29 luty – 2 marzec.
117. Zadroga, B., 2001 – Wpływ zanieczyszczeń na fizyczne i mechaniczne właściwości gruntów. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 6.
118. Zadroga B., Olańczuk-Neyman K., 2001 – Ochrona i rekultywacja podłoża gruntowego. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
119. Zapory ziemne. Budownictwo specjalne w zakresie gospodarki wodnej. Ministerstwo Rolnictwa, Departament Gospodarki Wodnej i Melioracji. Wydawnictwo katalogów i cenników – Warszawa 1975.

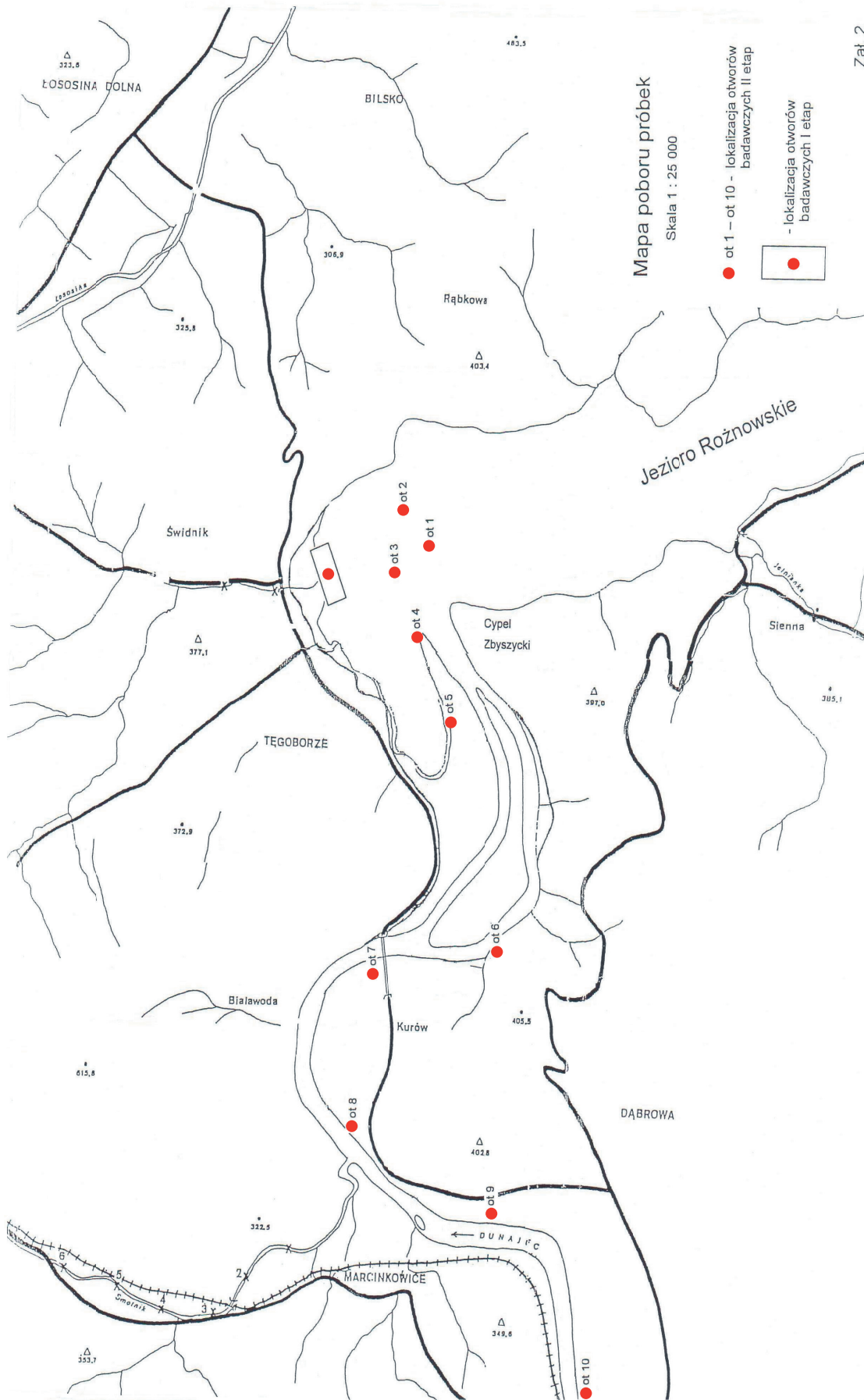
7. Spis załączników

1. Mapa miąższości mułów deponowanych w Jeziorze Rożnowskim i pierwotnych mad rzecznych Dunajca.
2. Mapa poboru próbek

Miąższość mułów deponowanych w Jeziorze Rożnowskim i pierwotnych mad rzecznych Dunajca



Załącznik 1



Zat. 2