

## Stabilizacja osadów dennych cofki Zbiornika Czorsztyńskiego z wykorzystaniem spoiw hydraulicznych

## Stabilization of bottom sediments from the backwater of Czorsztyn Reservoir using hydraulic binding agent

### 1. Wstęp

Budowa zbiorników zaporowych na ciekach wodnych powoduje szereg zmian w środowisku przyrodniczym, jedną z nich jest znaczne zmniejszenie prędkości przepływu, przez co następuje osadzanie się rumowiska rzeczno-niesionego przez dopływy w obrębie czaszy zbiornika. Proces ten wywołuje w zbiornikach wodnych szereg negatywnych skutków, utrudniających ich prawidłowe funkcjonowanie - zmniejszenie pojemności zbiornika, pogorszenie jakości wody, erozja dna poniżej zapory. Problemy eksploatacyjne spowodowane zamulaniem najwcześniej mogą wystąpić w części cofkowej, gdzie odkładają się grubsze frakcje rumowiska [rys. 1] i następuje zmniejszenie spadku zwierciadła wody, przez co przekrój końcowy cofki przemieszcza się w górę rzeki.

Zamulanie występuje w każdym zbiorniku zaporowym, przebiega jednak z różną intensywnością. W przypadku, gdy proces ten wpływa negatywnie na funkcjonowanie zbiornika rozwiązaniem może być wydobycie zalegających na dnie osadów. Powstaje wtedy problem zagospodarowania wydobytych osadów. Najczęściej materiał ten zostaje rozplantowany na miejscu, do nadbudowy obwałowań lub wyrównania terenu wokół zbiornika (1, 2). W literaturze przedmiotu brak przykładów wykorzystania osadów dennych w inżynierii lądowej. W niniejszej pracy dokonano analizy możliwości stabilizacji osadów dennych do celów budownictwa drogowego, co może stanowić nowy kierunek ich gospodarczego wykorzystania.

### 2. Charakterystyka osadów dennych cofki zbiornika czorsztyńskiego

Zbiornik Czorsztyński powstał w 1997 roku, przez spiętrzenie wód Dunajca zaporą ziemną w miejscowości Niedzica, na południu Polski. Jego pojemność całkowita wynosi 234 mln m<sup>3</sup>, a główne funkcje to ochrona przeciwpowodziowa, wyrównanie przepływów poniżej zapory oraz produkcja energii elektrycznej. Po 16 latach eksploatacji w rejonie cofki utworzył się już cypel o długości ponad

### 1. Introduction

Construction of reservoirs on watercourses causes a number of alteration in the natural environment. Among others there is a significant reduction in flow velocity, whereby deposition of river load carried by tributaries within the reservoir bowl takes place. This process causes a number of negative effects in reservoirs, hindering their proper functioning - reducing the reservoir capacity, deterioration of water quality, erosion of the bottom below the dam. First, problems caused by silting may occur in backwater zone, where coarse fractions of the sediment are being deposited [Fig. 1]. Simultaneously, a reduction in the water-level of reservoir occurs, whereby the final section of backwater moves up the river.

Siltation takes place in all dam reservoirs, however it occurs with a different intensity. In the case where the process negatively affects the functioning of the reservoir, the solution may be extraction of the sediments from the bottom of the reservoir. Then, a disposal problem of excavated sediments appears. Most often this material is used on the spot, to expand embankments or leveling area around the reservoir (1, 2).

In the literature there is a lack of examples of utilization of such bottom sediments in construction works. Paper presents an analysis of possibility of sediments stabilization from the point of view of its utilization in road construction industry, what can be a new direction of its industrial utilization.

### 2. Characteristic of bottom sediments from the backwater of Czorsztyn Reservoir

Czorsztyn Reservoir was constructed in 1997, due to the damming of the Dunajec river water by earthen dam in Niedzica, in the south part of Poland. Its total capacity is 234 million m<sup>3</sup>, and the main functions are flood protection, compensation of flows below the dam and electrical energy production. After 16 years in service, the headland with a length of over 200 meters at a normal level of damming and a width of approximately 20 - 30 m in the backwater area was created (4).

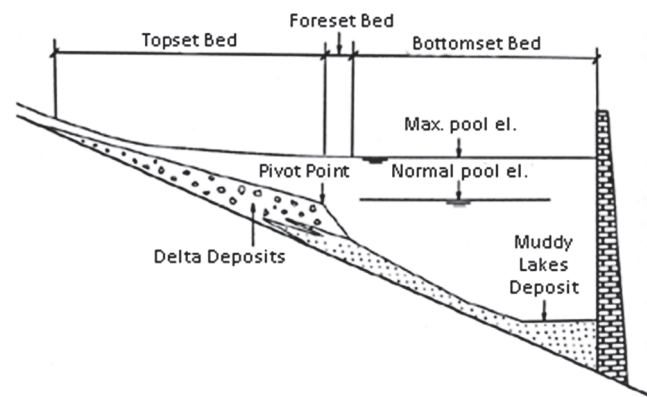
200 m przy normalnym poziomie piętrzenia i szerokości około 20 – 30 m (4).

Osady denne pobrano w rejonie cofki Zbiornika Czorsztyńskiego przy ujściu Dunajca, w okolicy miejscowości Dębno [rys. 2]. Szczegółowa lokalizację, metodykę oznaczania właściwości fizycznych i mechanicznych oraz charakterystykę badanych próbek osadów dennych podano w pracy (5). Ogółem pobrano 26 próbek osadów, jednak ze względu na specyfikę materiału istotne są parametry próby uśrednionej, która powstała przez zmieszanie wszystkich próbek. W tabelicy 1 zestawiono parametry geotechniczne materiału uśrednionego, który został sklasyfikowany jako piasek pylasty kilkufrakcyjny, o zawartości części organicznych pozwalającej zaliczyć go do gruntów mineralnych. Jest to materiał słabo przepuszczalny, o stosunkowo dużych wartościach wytrzymałości na ścinanie i nośności.

Na podstawie przeprowadzonej oceny przydatności osadów do celów budownictwa ziemnego (5) stwierdzono, że można je stosować do formowania nasypów drogowych pod warunkiem polepszenia ich właściwości geotechnicznych. Zastrzeżenia dotyczyły uziarnienia osadów (zbyt niska wartość wskaźnika różnoziarnistości) oraz wysadzinowości - ze względu na zbyt wysoką zawartość cząstek drobnych materiał ten został sklasyfikowany jako wątpliwy. Podjęto zatem próbę polepszenia właściwości geotechnicznych przedmiotowych osadów poprzez stabilizację z wykorzystaniem cementu i wapna.

## 2. Stabilizacja gruntów cementem i wapnem

Stabilizacja cementem jest metodą wzmocnienia gruntów niespoistych, mało i średnio spoistych oraz kruszyw w celu poprawy nośności i zmniejszenia wrażliwości na wpływy atmosferyczne (7). Metoda polega na zmieszaniu rozdrobnionego gruntu z optymalną ilością cementu i wody, a w razie potrzeby – dodatków ulepszających oraz zagęszczeniu takiej mieszanki, tak aby wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach mieściła się w wyznaczonych normowo granicach. Dodatek cementu powoduje zmniejszenie nasiąkliwości cząstek ilowych oraz powstanie szkieletu nośnego w gruncie na skutek wytrącania produktów hydratacji cementu i wiązania zaczynu cementowego z rozproszoną frakcją piaskową i pyłową. Dzięki temu uzyskuje się poprawę wytrzymałości i zmniejszenie ściśliwości (9). Cząstki gruntowe nie związane cementem są wypełniaczem szkieletu nośnego, a jednocześnie amortyzatorem sił zewnętrznych, działających na szkielet nośny i nadają cementogruntom znaczną podatność (8). Małe dodatki cementu ulepszają



Rys 1. Strefy sedymentacji w zbiorniku (3)

Fig. 1. Sedimentation areas in the reservoir (3)

Bottom sediments were collected from the area of backwater Czorsztyń Reservoir by the Dunajec estuary, near Dębno village [Fig. 2]. Detailed location and characteristics of samples of bottom sediments tested are presented in (5). Total number of 26 sediment samples were collected. However, due to the nature of the material, parameters of the averaged sample are important. That's why final test sample was obtained by mixing all 26 collected samples. Table 1 summarizes the geotechnical properties of material, which has been classified as dusty multi-granular sand, containing organic matter allowing to classify it as mineral soil. It is a poorly permeable material, with relatively large values of shear strength and bearing capacity.

Based on the results of assessment of reservoir settlements suitability for construction works (5) it was found that if some of its geotechnical properties would be improved, settlements can be used for some road structures and hydrotechnical embankments. The objections related to sediment were grain size (too low value of multi-granular index) and swelling - due to too high content of fine particles, the material was classified as questionable. Therefore, an attempt to improve geotechnical properties of these sediments was made, so as to meet the required criteria specified by standards.



Rys. 2. Lokalizacja poboru próbek osadów dennych (6)

Fig. 2. Location of bottom sediments samples collection (6)

grunt – zwiększają jego spójność, zmniejszają nasiąkliwość i plastyczność. Stosowanie cementu w większej ilości [5–15%] pozwala natomiast uzyskiwać znaczne wytrzymałości mieszanek (8).

Najlepsze wyniki stabilizacji cementem uzyskuje się dla gruntów o wskaźniku piaskowym od 20 do 50%, zawartości ziarn > 2 mm co najmniej 30% oraz zawartości cząstek < 0,075 mm nie więcej niż 15%. Decydującym sprawdzianem przydatności gruntu do stabilizacji cementem są wyniki wytrzymałości na ścisnienie stabilizowanego gruntu (10). Na wyniki stabilizacji istotny wpływ może mieć zawartość części organicznych, która znacznie zmniejsza wytrzymałość stabilizowanego gruntu. Ogólnie przyjęto granicę 2% zawartości części organicznych jako dopuszczalną ponieważ mimo, że uzyskiwano dobre wyniki stabilizacji cementem gruntów zawierających nawet 3–4% części organicznych, jednak w przypadku innych gruntów zawartość 0,5% części organicznych istotnie wpływała na pogorszenie nośności gruntu (8).

Stabilizacja gruntów wapnem jest jedną z najstarszych form wzmocnienia słabego podłoża gruntowego. Wapno stosuje się w celu ulepszenia lub stabilizacji gruntów spoistych lub małospoistych lub wstępnego ulepszenia gruntów do dalszej stabilizacji cementem. Dla gruntów w stanie plastycznym lub płynnym, w celu osuszenia-ulepszenia, stosuje się wapno palone, natomiast wapno hydratyzowane do gruntów niewymagających osuszenia.

Zjawiska fizykochemiczne zachodzące po zmieszaniu gruntu z wapnem to wymiana jonowa, koagulacja i osuszenie. Wymiana jonowej, w której jony  $Ca^{2+}$  zastępują jony  $Na^{+}$ , towarzyszy zjawisko flokulacji oraz aglomeracji cząstek gruntu, w wyniku czego grunt plastyczny ulega przekształceniom w grunt quasi-piaskowy, dający się zagęszczać. Zwiększa się wartość granicy plastyczności, przez co wskaźnik plastyczności ulega zmniejszeniu, a to oznacza, że właściwości mechaniczne stają się mniej zależne od ilości wody zawartej w gruncie (11). Wymiana jonowa zachodzi natychmiast po dodaniu wapna powodując flokulację i wzrost porowatości [co ma wpływ na wilgotność optymalną], a następnie zanika z upływem czasu, co związane jest ze zmianą pH oraz reakcją pucolanową, która z czasem powoduje cementację agregatów gruntu i zmniejszanie porowatości (12). Dzięki reakcji pucolanowej w dłuższym okresie następuje wzrost wytrzymałości gruntu. Dodatek wapna powoduje również wzrost wartości pH, a w środowisku zasadowym znacząco wzrasta rozpuszczalność związków krzemu oraz glinu zawartych w gruncie, stąd mogą one wchodzić w reakcję z jonami wapna. Wynikiem tego jest tworzenie fazy C-S-H [calcium-silicate-hydrate] oraz CAH [calcium-aluminate-hydrates], które powodują sklejanie się cząstek gruntu i wzrost

## 2. Stabilization of soils with cement and lime

Stabilization with cement is a method of non-, weak- and moderately-cohesive soils as well aggregate processing in order to increase bearing capacity as well as decrease sensitivity to weather conditions (7). The principal of stabilization is to mix soil with optimal dosage of cement and water followed by proper compaction of the mix in order to obtain acceptable strength after 7 and 28 days of curing. Introduction of cement results in decrease of absorbability of clay particles and formation of mineral skeleton within the soil as a result of cement hydration products precipitation in spaces between soil grains as well as binding of dispersed sand and dust fraction by hydrating cement paste. It results in increased strength and decreased compressibility (8, 9). Loose soil particles unbounded by cement play a role of filler in carrying skeleton simultaneously amortizing external forces affecting skeleton. They also increase modulus of subgrade reaction of stabilized soils (8). Small additives of cement improves soil – increase its cohesion, decrease absorbability and plasticity. Use of cement in larger quantities [5% - 15%] allows to obtain considerable strength (8).

Stabilization with cement is most effective for soils with sand equivalent within the range between 20% and 50%, content of grains >2 mm at least 30% and content of grains smaller than 0.075 mm not lower than 15%. Compressive strength is critical parameter deciding if soil is suitable for stabilization process (10). Organic

Tablica 1 / Table 1

CHARAKTERYSTYKA GEOTECHNICZNA BADANYCH OSADÓW DENNYCH (5)  
GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF BOTTOM SEDIMENTS STUDIED (5)

Właściwości / Properties	Wartość / Value
zawartość frakcji [%]: / fraction content [%]:	
- piaskowej / sand 2-0,063 mm	74,9
- pyłowej / silt 0,063 – 0,002 mm	24,4
- ilowej / clay <0,002 mm	0,7
nazwa gruntu wg / soil classification acc. to PN EN ISO 14688-2:2006	siSa
multi-granular index	11,8
gęstość właściwa szkieletu / specific density	2,66 g·cm <sup>-3</sup>
wskaźnik piaskowy / sand index	30 %
zawartość części organicznych / organic matter content	1,44 %
wilgotność optymalna / optimum moisture content	14,8 %
maksymalna gęstość objętościowa szkieletu / maximum bulk density	1,65 g·cm <sup>-3</sup>
współczynnik filtracji przy: / filtration coefficient for:	
- $i_s=0,90$	$6,63 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $i_s=1,00$	$1,98 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
kąt tarcia wewnętrznego przy: / internal friction angle for:	
- $i_s=0,90$	30,4°
- $i_s=0,95$	31,1°
- $i_s=1,00$	31,7°
spójność przy: / cohesion for:	
- $i_s=0,90$	24,3 kpa
- $i_s=0,95$	25,8 kpa
- $i_s=1,00$	28,4 kpa
wskaźnik nośności / bearing capacity ratio	11,0 %
pęcznienie / swelling	0,06 %

jego wytrzymałości na ściskanie (11). Podsumowując, dodatek wapna do gruntu powoduje:

- zmniejszenie wilgotności gruntu,
- zmianę struktury gruntu na gruzełkową,
- obniżenie plastyczności – wzrasta granica plastyczności, a wskaźnik plastyczności ulega zawężeniu (13),
- spadek maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu, a wzrost wilgotności optymalnej, dzięki czemu stabilizowany grunt jest łatwiej zagęszczać,
- wzrost wartości pH,
- zmniejszenie zdolności gruntu do skurczu i pęcznienia (14),
- wzrost odporności gruntu na działanie wody i mrozu,
- wzrost nośności stabilizowanego gruntu, co widoczne jest we wzroście wskaźnika nośności CBR.

Zgodnie z (7) stabilizację wapnem stosuje się w celu ulepszenia miejscowego gruntu, nieprzydatnego do wbudowania w nasypy, zwłaszcza gruntów zwięzłych i bardzo spoistych o granicy płynności  $w_L > 30\%$  oraz gruntów nadmiernie zawilgoconych. Do stabilizacji wapnem nadają się przede wszystkim grunty spoiste o wskaźniku plastyczności  $\geq 7\%$  zawierające minerały ilaste, które wchodzi w reakcję z dodanym wapnem. Nieprzydatne są grunty zawierające ponad 15% frakcji kamienistej, ponad 10% części organicznych lub charakteryzujące się wskaźnikiem piaskowym  $\geq 30\%$ . Według zaleceń amerykańskich (14) do stabilizacji wapnem nadają się grunty zawierające co najmniej 25% cząstek

matter content may be important factor influencing results of stabilization process. In general, 2% is considered to be acceptable value for organic matter content. This is due to the fact, that since it is possible to obtain good results in case of soils with organic matter content within the range 3% to 4%, however on the other hand there are cases, where 0.5% of organic matter resulted in decrease of bearing capacity of stabilized ground (9).

Stabilization of soils with lime is one of the oldest methods used in weak ground enforcing. Lime is used for improvement and stabilization of cohesive as well as weak-cohesive soils or for initial improvement of soils dedicated to stabilization with the use of cement. For plastic or fluid soils in order to dry and improve, burnt lime is used, while hydrated lime is used in case of soils which do not require drying.

Ionic exchange, coagulation and drying are main physiochemical phenomena occurring during stabilization of soils with lime. As a result of ionic exchange,  $Ca^{2+}$  ions substitutes  $Na^+$  ions. It is accompanied with flocculation and agglomeration of soil particles, what results in transformation of plastic soil into quasi-sand soil, suitable for compaction. Yield stress is increasing and due to that plasticity of soil decreases, its properties are less dependent of water content (11). Ionic exchange proceeds immediately after lime is added, causing flocculation and increase in porosity [what influence the optimal moisture]. Later, ionic exchange intensity starts to decrease, what is connected with pH change and pozzolanic reaction, what leads to cementation of agglomerates and decrease

Tablica 2 / Table 2

PIELĘGNACJA PRÓBEK DO BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCISKANIE

CURING SCHEMES OF SAMPLES FOR COMPRESSIVE STRENGTH TESTS

Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength	Stabilizator / Stabilizer		Pielęgnacja próbek / Curing scheme
	rodzaj type	dodatek dosage [%]	
$r_0$	cement	0, 3, 6, 9, 12	bez pielęgnacji, badanie bezpośrednio po zagęszczeniu / measurement immediately after compaction
$r_7$	cement	3, 6, 9, 12	3 doby w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone 1 cm w wodzie, 3 doby zanurzone całkowicie w wodzie / 3 days at room temperature with protection against drying out, 1 day immersed in 1 cm water, 3 days immersed totally in water
	wapno / lime	3, 6, 9	
$r_{28}$	cement	3, 6, 9, 12	13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone 1 cm w wodzie, 14 dób zanurzone całkowicie w wodzie / 13 days at room temperature with protection from drying out, one day immersed in 1 cm water, 14 days immersed totally in water
	wapno / lime	3, 6, 9	
	cement	3, 6, 9, 12	13 dób w temperaturze pokojowej z zabezpieczeniem przed wysychaniem, 1 doba zanurzone całkowicie w wodzie, 14 dób cykle <sup>*)</sup> zamrażania i odmrażania / 13 days at room temperature with protection from drying out, one day immersed totally in water, 14 days cycles <sup>*)</sup> freezing and thawing
	wapno / lime	3, 6, 9	

\*) jeden cykl to 8-godzinne zamrażanie w temperaturze  $-23^{\circ}C$  i 16-godzinne odmrażanie w wodzie w temperaturze pokojowej

$R_0, R_7, R_{28}$  - wytrzymałość na ściskanie próbek po 0, 7, 28 dobach pielęgnacji,

$R_{28}^{z-o}$  - wytrzymałość na ściskanie próbek po 28 dobach pielęgnacji poddanych 14 cyklom zamrażania i odmrażania,

$n = R_{28}^{z-o} / R_{28}$  - wskaźnik mrozoodporności

< 0,075 mm oraz charakteryzujące się wskaźnikiem plastyczności  $\geq 10\%$ .

### 3. Cel i metodyka badań

Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu stabilizacji osadów dennych spoiwami hydraulicznymi na polepszenie ich właściwości geotechnicznych. Parametry geotechniczne osadów spełniają wymagania określone dla gruntów przydatnych do stabilizacji, zarówno cementem (10), jak i wapnem (15). Do stabilizacji wykorzystano cement portlandzki klasy 32,5 R oraz wapno hydratyzowane, których dodatek wynosił 3, 6, 9 oraz 12 % w stosunku do suchej masy gruntu. Dla każdej mieszanki gruntu i stabilizatora oznaczono wilgotność optymalną oraz maksymalną gęstość objętościową szkieletu w aparacie Proctora przy standardowej energii zagęszczania  $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Wytrzymałość na ścislenie oznaczono na próbkach bezpośrednio po zagęszczeniu oraz po 7 i 28 dobach pielęgnacji [tab. 2] przy zastosowaniu prasy aparatu do oznaczania kalifornijskiego wskaźnika nośności CBR (Tritech 100). Próbkę o średnicy i wysokości 8 cm formowano przy wilgotności optymalnej dla danej mieszanki i wskaźniku zagęszczenia  $I_s \approx 1,0$ . Badania wykonano w trzech powtórzeniach [po 3 próbki osadów każdej mieszanki, razem 78 próbek]. Oznaczenie wytrzymałości na ścislenie dokonano również na próbkach po 14 cyklach zamrażania i odmrażania [razem 28 dni], które posłużyły do obliczenia wskaźnika mrozoodporności.

Dla próbek stabilizowanych wapnem wykonano także:

- oznaczenie wskaźnika nośności na próbkach o wilgotności wyznaczonej z krzywej Proctora odpowiadającej 99% maksymalnej gęstości objętościowej, po 7 dobach pielęgnacji [por. tab. 2]. Wskaźnik nośności oznaczono zgodnie z (16) przy obciążeniu 22,0 N i penetracji trzpienia o powierzchni  $20 \text{ cm}^2$  do głębokości 2,5 i 5,0 mm zagłębianego ze stałą prędkością  $1,25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . W trakcie procesu nasycania wodą [ostatnie 4 doby pielęgnacji] dokonywano pomiaru zmian wysokości próbki w celu oznaczenia pęcznienia.
- oznaczenie odczynu pH. Próbkę gruntu powietrznie suche o masie 10 g zalano odpowiednio  $25 \text{ cm}^3$  wody destylowanej i  $25 \text{ cm}^3$  roztworu KCl o stężeniu  $1 \text{ mol/dm}^3$ . Po upływie 24 godzin, wartość pH zmierzono za pomocą pehametru.

### 4. Wyniki badań

#### 4.1. Zagęszczalność

Wyniki badań zagęszczalności mieszanek osadów dennych z dodatkiem stabilizatora przedstawiono w tablicy 3 oraz na rysunku 3. Wilgotność optymalna osadów wynosiła około 15% [por. tab. 1], dodatek 3% cementu spowodował jej zmniejszenie do około 13%, natomiast dalsze zwiększanie dodatku cementu do 12% powodowało stopniowe jej zwiększanie do ponad 16%. Wraz ze zwiększaniem dodatku wapna od 3 do 9% wilgotność optymalna wzrastała do 16,5%. W przypadku wapna uzyskano zatem stały

in porosity (12). Due to pozzolanic reaction, increase in strength of stabilized soil is observed in longer periods of time. Introduction of lime results pH. In elevated pH solubility of silica and alumina from soil increases, and they can react with calcium ions. It results in formation of C-S-H phase [calcium silicate hydrate] as well as CAH [calcium aluminate hydrate] which bind soil particles what is responsible for compressive strength gains (11). Concluding, addition of lime results in:

- decrease in soil humidity
- formation of nodular structure
- plasticity decrease – increase of yield stress, plasticity index is narrowed (13)
- decrease of maximal bulk density of skeleton and increase in optimal moisture content, what results in easier compaction of soil
- pH increase
- decreased shrinkage and swelling ability (14)
- increased resistance to water and freeze-thaw
- increase in bearing capacity of ground (increase of CBR bearing capacity index).

According to (7) stabilization with lime is applied mainly to cohesive and very cohesive soils of liquid limit  $w_L > 30\%$  as well as containing excess of moisture which cannot be build in into embankment on site. Lime can be used to stabilize all cohesive soils possessing plasticity index higher than 7%, containing clay minerals which reacts with calcium ions. Soils containing more than 15% of gravel, over 10% of organic matter or possessing sand equivalent higher than 30% are unsuitable. According to American Lime Association recommendation (14) soils containing at least 25% particles smaller than 0.075 mm and of plasticity index higher than 10% are suitable for stabilization.

### 3. The aim and methods

The aim of the study was to determine the effect of bottom sediments stabilization by hydraulic binders on improvement of their geotechnical properties. Geotechnical properties of the sediments meet the requirements for soils suitable for the stabilization with cement (10) as well as lime (15). For stabilization Portland cement 32.5 R and hydrated lime were used. Their additions were 3, 6, 9 and 12 % with respect to the dry weight of soil. For each mixture of soil and stabilizer optimum moisture content and maximum bulk density of sample in Proctor apparatus [standard compaction energy  $0.59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ ] were determined. Compressive strength was determined on samples immediately after compaction and after 7 and 28 days of curing [tab. 2] using apparatus for determination of California bearing ratio index CBR [Tritech 100]. Samples having a diameter and a height of 8 cm were formed at the optimum moisture content for the mixture and compaction index  $I_s \approx 1.0$ . The tests were performed in triplicate [3 specimens each sediments mixture, a total of 78 samples]. Determination of compressive strength were also made on samples after 14 freezing and thawing cycles [total 28 days], which were used to calculate the frost resistance.

Spoiwo / Binder		Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu The maximum bulk density [g · cm <sup>-3</sup> ]	Wilgotność optymalna Optimum moisture content [%]
rodzaj / type	dodatek / dosage [%]		
cement	3	1,658	12,6
	6	1,668	15,6
	9	1,672	15,8
	12	1,654	16,2
wapno lime	3	1,682	15,6
	6	1,697	15,8
	9	1,695	16,5

wzrost wilgotności optymalnej wraz ze zwiększaniem dodatku stabilizatora, natomiast w przypadku cementu niewielki dodatek stabilizatora spowodował obniżenie tego parametru, a następnie zaobserwowano jego wzrost wraz ze zwiększaniem ilości cementu. Podobne zależności uzyskano w pracy (18).

Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu osadów dennych wynosiła 1,65 g · cm<sup>-3</sup> [por. tab. 1], natomiast wraz ze zwiększaniem dodatku cementu początkowo zwiększyła się do 1,67 g · cm<sup>-3</sup> [przy 9% dodatku], a następnie zmniejszyła się do 1,65 g · cm<sup>-3</sup> [przy 12% dodatku]. Optymalna ilość dodatku cementu ze względu na zagęszczenie wynosi zatem 9%. W przypadku wapna wraz ze zwiększaniem jego dodatku maksymalna gęstość objętościowa szkieletu zwiększyła się do około 1,70 g · cm<sup>-3</sup> [przy 6 i 9% dodatku].

#### 4.2. Wytrzymałość na ściskanie

Próbki osadów niestabilizowanych wykazały bardzo małą wytrzymałość na ściskanie, natomiast próbki stabilizowane cementem odznaczały się dużo większą wytrzymałością niż próbki stabilizowane wapnem, przy czym była ona istotnie zależna od czasu pielęgnacji i dodatku stabilizatora [tab. 4, rys. 4] i tak:

- osady niestabilizowane wykazały wytrzymałość na ściskanie wynoszącą zaledwie 0,06 MPa,
- 3% dodatek cementu do osadów powodował zwiększenie wytrzymałości na ściskanie od 0,08 do 0,27 MPa, a taki sam dodatek wapna od 0 do 0,12 MPa wraz z wydłużeniem czasu pielęgnacji od 0 do 28 dni. Wskazuje to, że próbki stabilizowane cementem miały wytrzymałość 1,6-krotnie większą po 7 dobach pielęgnacji i 2,2-krotnie większą po 28 dobach pielęgnacji niż próbki stabilizowane wapnem,
- próbki z 6% dodatkiem cementu wykazały większą wytrzymałość na ściskanie niż próbki z takim samym dodatkiem wapna: 2,8-krotnie po 7 dobach pielęgnacji i 2,7-krotnie po 28 dobach pielęgnacji,
- próbki z 9% dodatkiem cementu wykazały rów-

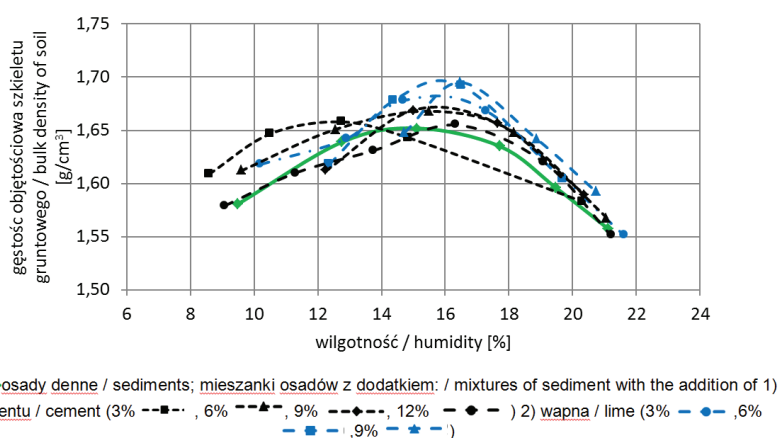
For samples stabilized with lime following tests were also performed:

- determination of bearing capacity index for samples with moisture content determined with the Proctor curve corresponding to 99% of the maximum bulk density, after 7 days of storage [tab. 2]. Bearing capacity index was determined according to (9) with a load of 22.0 N and the penetration of the mandrel of 20 cm<sup>2</sup> surface to a depth of 2.5 i 5.0 mm immersing with a constant speed 1.25 mm·min<sup>-1</sup>. During the process of impregnation with water [ast 4 days of storage] height of sample was measured in order to determine the swelling ratio.
- pH-value measurement; 10 g of air-dry samples of soils, were poured with 25 cm<sup>3</sup> distilled water and 25 cm<sup>3</sup> KCl solution at a concentration of 1 mol/dm<sup>3</sup>. After 24 hours the pH-value was recorded.

### 4. Results

#### 4.1. Compactibility

The test results of the compactibility of mixtures of bottom sediments with the stabilizers are shown in table 3 and figure 3.



Rys. 3. Zależność gęstości objętościowej szkieletu gruntowego od wilgotności osadów dennych oraz ich mieszanek z dodatkiem stabilizatora

Fig. 3. Relationship between moisture and soil bulk density of bottom sediments and their mixtures with stabilizer

niez dużo większą wytrzymałość na ściskanie niż próbki z takim samym dodatkiem wapna: 2,8-krotnie po 7 dobach pielęgnacji i 3,8-krotnie po 28 dobach pielęgnacji,

- próbki z 12% dodatkiem cementu wykazały największą wytrzymałość na ściskanie: 1,14 MPa po 7 dobach pielęgnacji i 1,91 MPa po 28 dobach pielęgnacji [nie badano próbek z 12% dodatkiem wapna].

Podane powyżej wyniki wskazują, że wraz z wydłużeniem czasu pielęgnacji różnice pomiędzy wartościami wytrzymałości na ściskanie osadów stabilizowanych oboma stabilizatorami znacznie się zwiększały.

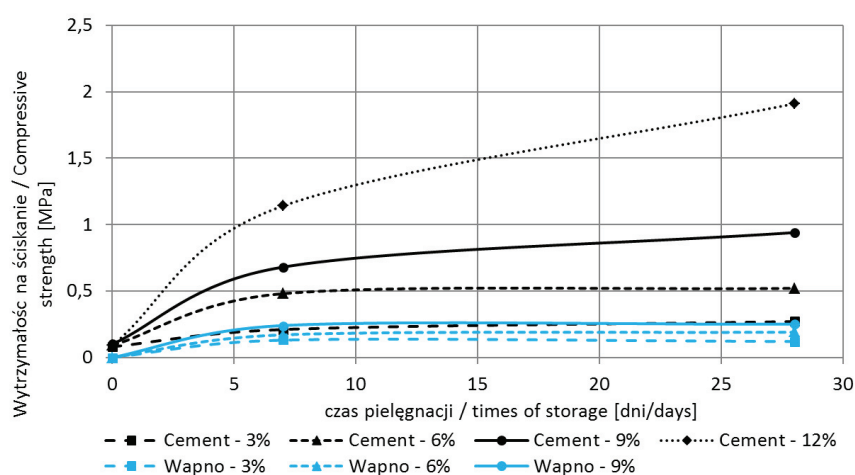
Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykazały przydatność osadów stabilizowanych cementem lub wapnem do wybranych zastosowań w budownictwie drogowym. Polska norma PN-S-96012:1997 „Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem” wymaga, aby wytrzymałość na ściskanie dla podbudowy zasadniczej lub pomocniczej nawierzchni drogowej wynosiła po 7 dniach co najmniej 1,6 MPa, a po 28 dniach co najmniej 2,5 MPa. Wymagań tych nie spełnia żadna mieszanka [rys. 5 – a]. Wymagania dotyczące górnej warstwy ulepszonego podłoża wynoszą: co najmniej 1,0 MPa po 7 dniach i 1,5 MPa po 28 pielęgnacji. Wymagania te

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE OSADÓW DENNYCH NIESTABILIZOWANYCH ORAZ STABILIZOWANYCH CEMENTEM LUB WAPNEM

COMPRESSIVE STRENGTH OF BOTTOM SEDIMENTS NON-STABILIZED AND STABILIZED WITH CEMENT OR LIME

Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength [MPa]	Stabilizator / Stabilizers		
	dodatek / dosage [%]	rodzaj / type	
		cement	wapno / lime
	0	0,06	-
	3	0,08	-
	6	0,09	-
	9	0,10	-
	12	0,09	-
	3	0,21	0,13
	6	0,48	0,17
	9	0,68	0,24
	12	1,14	-
	3	0,27	0,12
	6	0,52	0,19
	9	0,94	0,25
	12	1,91	-
	3	-	-
	6	0,08	-
	9	0,42	-
	12	1,46	-



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie osadów dennych stabilizowanych różnymi ilościami wapna i cementu

Fig. 4. Compressive strength of bottom sediments stabilized with various amounts of lime and cement

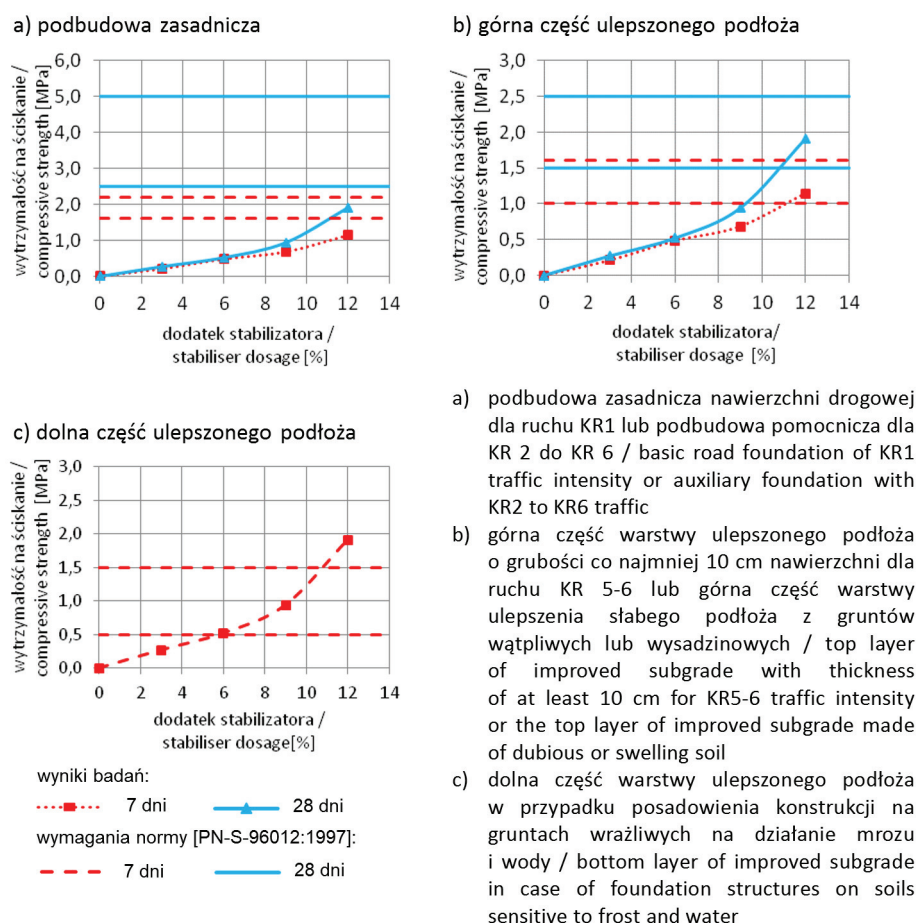
Sediments optimum moisture content was about 15% [tab. 1], 3% addition of cement caused decrease to about 13%, whereas further increasing the addition of cement to 12% resulted in a gradual increase to over 16%. With the increasing addition of lime from 3 to 9% optimum moisture content increased to 16.5%.

Maximum bulk density of the bottom sediments was  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [tab. 1], whereas with increasing cement addition initially grew to  $1.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [with 9% addition], and then decreased to  $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [with 12% addition]. Together with increasing addition of lime maximum bulk density increased to about  $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  [with 6 and 9% lime addition].

#### 4.2. Compressive strength

Non-stabilized sediment samples showed very low compressive strength, while samples stabilized with cement characterized by a much higher strength than that of the samples stabilized with lime, while it was significantly dependent on the time of storage and addition of stabilizer [tab. 4, fig. 4] and thus:

- nonstabilized sediments showed a compressive strength of only 0.06 MPa,
- 3% addition of cement to the sediments resulted in compressive strength increase from 0.08 to 0.27 MPa, and the same addition of lime from 0 to 0.12 MPa with duration of curing time from 0 to 28 days. This indicates that the samples stabilized with cement had a strength 1.6 times higher after 7 days of storage and 2.2 times higher after 28 days of storage than the samples stabilized with lime,
- sample with 6% addition of cement showed higher compressive strength than samples with the same lime addition by 2.8 times after 7 days of growing and by 2.7 times after 28 days of storage,
- samples with 9% cement addition also showed much higher compressive strength than samples with the same lime addition: 2.8 times after 7 days of storage and 3.8 times after 28 days of storage,



Rys. 5. Zależność wytrzymałości na ściskanie osadów dennych stabilizowanych cementem od procentowej zawartości cementu na tle wymagań normowych

Fig. 5. Compressive strength of bottom sediments stabilized with various amounts of cement in relation to standard requirements

spełnia mieszanka z 12% dodatkiem cementu [rys. 5 – b]. Wymagania dotyczące dolnej części warstwy ulepszanego podłoża – co najmniej 0,5 MPa po 28 dniach pielęgnacji – spełnia mieszanka z 6, 9 i 12% dodatkiem cementu [rys. 5 – c].

Polska norma PN-S-96011:1998 „Drogi samochodowe. Stabilizacja gruntów wapnem do celów drogowych” wymaga, żeby wytrzymałość na ściskanie materiału na podbudowę pomocniczą dla dróg o ruchu bardzo lekkim wynosiła co najmniej 0,5 MPa po 7 dniach pielęgnacji i 0,7 MPa po 28 dniach. Dla górnej warstwy ulepszanego podłoża drogi [do 1,0 m poniżej niwelety drogi] norma wymaga, żeby wytrzymałość na ściskanie wynosiła co najmniej 0,3 MPa po 7 dniach i 0,4 MPa po 28 dniach pielęgnacji. Wymagań tych nie spełnia żadna mieszanka [rys. 6 – a, b]. Do wstępnego ulepszenia gruntów przeznaczonych do dalszej stabilizacji lub na dolne warstwy ulepszanego podłoża [poniżej 1,0 m od niwelety drogi] norma wymaga, aby wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach wynosiła co najmniej 0,2 MPa. Wymaganie to spełnia mieszanka z 9% dodatkiem wapna [rys. 6 – c].

### 4.3. Wskaźnik mrozoodporności

Próbki osadów stabilizowanych cementem i poddanych cyklem zamrażania – odmrażania wykazały dużo mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż próbki nie poddane takim cyklom [tab. 5]. Mieszanka z 3% dodatkiem cementu uległa całkowitej degradacji

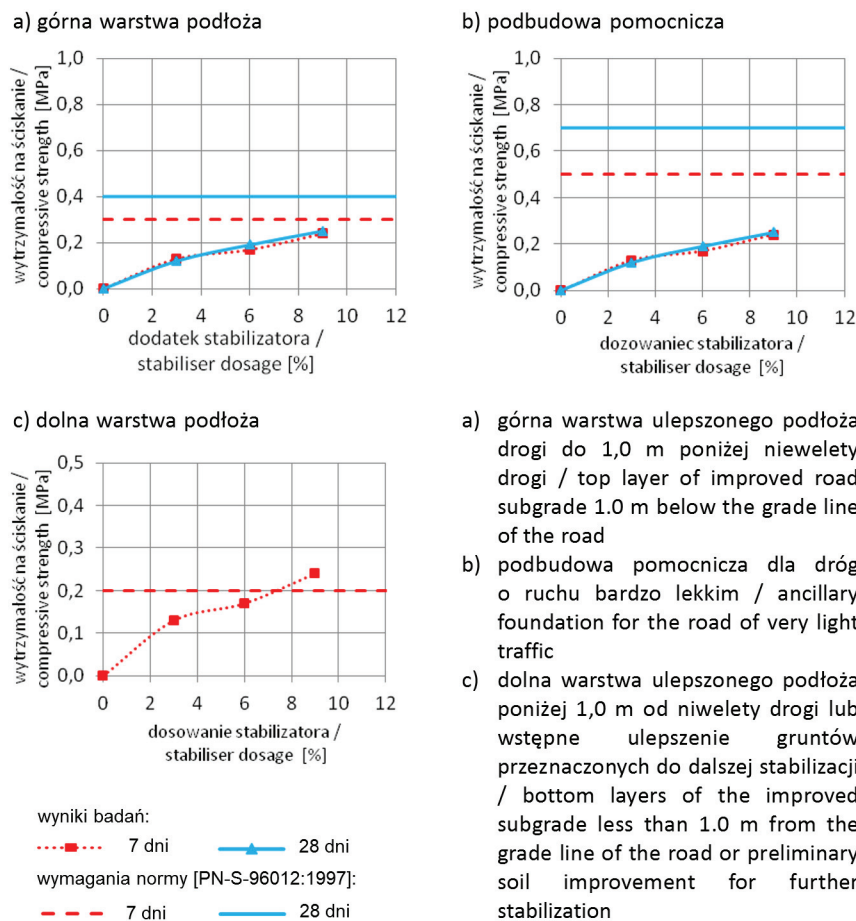
- a) podbudowa zasadnicza nawierzchni drogowej dla ruchu KR1 lub podbudowa pomocnicza dla KR 2 do KR 6 / basic road foundation of KR1 traffic intensity or auxiliary foundation with KR2 to KR6 traffic
- b) górna część warstwy ulepszanego podłoża o grubości co najmniej 10 cm nawierzchni dla ruchu KR 5-6 lub górna część warstwy ulepszenia słabego podłoża z gruntów wątpliwych lub wysadzinowych / top layer of improved subgrade with thickness of at least 10 cm for KR5-6 traffic intensity or the top layer of improved subgrade made of dubious or swelling soil
- c) dolna część warstwy ulepszanego podłoża w przypadku posadowienia konstrukcji na gruntach wrażliwych na działanie mrozu i wody / bottom layer of improved subgrade in case of foundation structures on soils sensitive to frost and water

– samples with 12% addition of cement showed the highest compressive strength: 1.14 MPa after 7 days of storage and 1.9 MPa after 28 days of storage (no samples were tested with 12% lime addition).

The above results indicate that differences between compressive strength of sediments stabilized with both types of stabilizer greatly increased between 7 and 28 days. Obtained results of compressive strength showed that sediments stabilized with cement or lime can be applied for selected structural units in road construction. Polish standard (10) requires that the compressive strength of basic or auxiliary road foundation after 7 days was at least 1.6 MPa, and after 28 days of at least 2.5 MPa. None of examined mixtures meet these requirements [fig. 5 – a]. The requirements for the top layer of improved substructure are: at least 1.0 MPa after 7 days and at least 1.5 MPa after 28 days. These requirements were fulfilled by mixture stabilized with 12% of cement [Fig 5 – b]. The requirements for the bottom layer of improved substructure are – at least 0.5 MPa after 28 days – corresponds to a mixture of 6, 9 and 12% addition of cement [Fig. 5 – c].

Polish standard (15) requires that the compressive strength of material for the auxiliary foundation for road of very light traffic should be at least 0.5 MPa after 7 days and 0.7 MPa after 28 days. For the top layer of improved road subgrade (1.0 m below the grade





Rys. 6. Zależność wytrzymałości na ściskanie osadów dennych stabilizowanych wapnem od procentowej zawartości wapna na tle wymagań normowych

Fig. 6. Compressive strength of bottom sediments stabilized with lime vs. dosage of lime in relation to standard requirements

w wyniku zamrażania-odmrażania. Wraz ze zwiększaniem dodatku cementu do 6, 9, i 12% następowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie odpowiednio do 0,08, 0,42 i 1,46 MPa [to jest odpowiednio 6,4-, 2,2-, i 1,3-krotnie mniej niż w przypadku mieszanek nie poddanych cykлом zamrażania-odmrażania, przy czym wraz ze zwiększaniem dodatku cementu różnice pomiędzy podanymi wartościami dla próbek mrożonych i nie mrożonych bardzo wyraźnie się zmniejszały]. Wartości wskaźnika mrozoodporności zwiększały się od 0,15 do 0,45 i 0,76 odpowiednio do zwiększania dodatku cementu od 6 do 9 i 12% [tab. 5]. Według wymagań normy (10) wskaźnik mrozoodporności gruntu stabilizowanego cementem nie powinien być mniejszy od 0,6 dla mieszanek przeznaczonych do górnej i dolnej ulepszonego podłoża oraz 0,7 do podbudowy zasadniczej nawierzchni drogowej. Wymagania te spełnia tylko mieszanka z 12% dodatkiem cementu.

Próbki osadów stabilizowanych wapnem i poddanych cyklem zamrażania-odmrażania ulegały degradacji po 1 cyklu – przy 3% dodatku wapna, lub po 2 cyklach – przy 6 i 9% dodatku wapna [tab. 6]. Norma (15) dotycząca materiałów stabilizowanych wapnem nie określa minimalnej wartości wskaźnika mrozoodporności. Odporność na zamrażanie i odmrażanie określa się na podstawie liczby cykli, po których próbki ulegają degradacji. Według tego kryterium liczba ta powinna wynosić co najmniej 3 dla górnej warstwy

line of the road) standard requires, that the compressive strength is at least 0.3 MPa after 7 days and 0.4 MPa after 28 days. This requirement is not fulfilled for investigated mixtures [fig. 6 – a,b]. For preliminary improvements of soil designed for further stabilization or for lower layers of the improved subgrade [less than 1.0 m from the grade line of the road] standard requires, that the compressive strength after 7 days is at least 0.2 MPa. This requirement corresponds to a mixture with 9% lime addition [fig. 6 – c].

### 4.3. Frost resistance index

Samples of sediments stabilized with cement and subjected to cycles of freezing – thawing showed a much lower compressive strength than the samples not subjected to freeze - thaw [tab. 5]. Mixture with 3% cement addition was completely degraded by the freeze-thaw. The increase of cement dosage to 6%, 9% and 12% resulted in increase of compressive strength up to 0.08, 0.42 and 1.46 MPa respectively. It is respectively 6.4-, 2.2- and 1.3-times lower than in the case of mixtures not subjected to cycles of freezing-thawing. With increasing cement content, difference between compressive strength of samples subjected and not subjected to freeze-thaw cycles is more significant.

Values of freeze resistance ratio increased from 0.15 to 0.45 and 0.76 respectively for increasing cement content from 6 to 9 and

Tablica 5 / Table 5

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE MIESZANEK OSADÓW DENNYCH STABILIZOWANYCH CEMENTEM

COMPRESSIVE STRENGTH OF MIXTURES OF SEDIMENTS STABILIZED WITH CEMENT

Dodatek stabilizatora Stabiliser addition [%]	Wskaźnik mrozoodporności Frost resistance index [-]	Wymagania normowe (10) / Standard requirements (10)		
		dolna część warstwy ulepszonych podłoża bottom layer of the improved subgrade	górną część warstwy ulepszonych podłoża top layer of the improved subgrade	podbudowa zasadnicza basic foundation
3	-	0,6	0,6	0,7
6	0,15			
9	0,45			
12	0,76			

ulepszonych podłoża i co najmniej 5 dla podbudowy pomocniczej. Wymogów tych nie spełnia żadna z badanych mieszanek. Norma powyższa nie określa warunku mrozoodporności do wstępnego ulepszenia lub dolnej warstwy ulepszonych podłoża.

**4.4. Wskaźnik nośności**

Wskaźnik nośności oznaczony po 7 dobach pielęgnacji próbek wynosił 11% dla osadów niestabilizowanych. Osady stabilizowane wapnem wykazały prawie 2-krotnie większe wartości wskaźnika nośności [23 – 25% praktycznie nie wykazując zależności od dodatku wapna w zakresie od 3 do 9% – tab. 7]. Norma (15) określa minimalne wymagane wartości wskaźnika nośności wynoszące: co najmniej 15% dla dolnej warstwy ulepszonych podłoża [poniżej 1,0 m od niwelety drogi] lub wstępnego ulepszenia gruntu, co najmniej 25% dla górnej warstwy ulepszonych podłoża [do 1,0 m poniżej niwelety drogi] oraz co najmniej 40% dla podbudowy pomocniczej dla dróg o ruchu bardzo lekkim.

Mieszanki z 3, 6 i 9% dodatkiem wapna spełniają wymóg tylko dla dolnej warstwy ulepszonych podłoża. Wartości pęcznienia liniowego pomierzone podczas pielęgnacji próbek były pomijalnie małe – 0,06% [próbki niestabilizowane] i 0,03% [próbki stabilizowane wapnem, 2-krotnie mniejsze pęcznienie próbek niestabilizowanych].

12% [tab. 5]. According to the requirements of the standard (10) index of frost resistance of soil stabilized with cement should not be less than 0.6 for the mixture for the top and bottom layer of improved road base and 0.7 MPa for the basic substructure of the road surface. These requirements are fulfilled by mixture with 12% addition of cement.

Sediment samples stabilized with lime and subjected to freeze-thaw cycles were degraded after 1 cycle – sample with 3% lime addition or after 2 cycles – samples with 6 and 9% lime addition [tab. 6]. Polish standard (15) does not specify minimum frost resistance index for materials stabilized with lime. Resistance to freezing and thawing is determined by the number of cycles after which the samples degrade. According to this criterion this number should be at least 3 for the top layer of improved subgrade and at least 5 for the auxiliary road foundation. None of tested mixtures comply with these requirements. The standard does not specify frost resistance requirements for initial improvement or improved bottom layer of the subgrade.

**4.4. Bearing capacity index**

Bearing capacity index of non-stabilized sediments after 7 days of curing was 11%. Sediments stabilized with lime resulted in nearly 2-times increase in the value of the bearing capacity index [tab. 7]. Standard requirement (15) specifies the minimum required

Tablica 6 / Table 6

MROZOODPORNOŚĆ OSADÓW STABILIZOWANYCH WAPNEM

FREEZE-THAW RESISTANCE OF BOTTOM SEDIMENTS STABILIZED WITH LIME

dodatek stabilizatora / stabiliser addition [%]	liczba cykli zamrażanie- odmrażanie / number of freeze-thaw cycles	liczba cykli zamrażanie-odmrażanie / number of freeze-thaw cycles		
		górną część warstwy ulepszonych podłoża / top layer of the improved subgrade	podbudowa pomocnicza dla dróg o ruchu bardzo lekkim / auxiliary foundation for very light traffic	wstępne ulepszenie lub dolne warstwy ulepszonych podłoża / preliminary improved subgrade or bottom layers of improved subgrade
3	1	≥3	≥5	-
6	2			
9	3			

#### 4.5. Odczyn

Odczyn pH próbek osadów niestabilizowanych wynosił 7,6 i był większy od wartości wymaganej według cytowanej normy zarówno dla podbudowy pomocniczej jak i dla obu warstw ulepszonych podłoża. Odczyn próbek osadów stabilizowanych wapnem był dużo wyższy i wynosił od 12,0 do 12,4 odpowiednio do zwiększania dodatku wapna od 3 do 9%.

#### 5. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań i analizy można wyprowadzić następujące wnioski:

1. Osady denne z cofki Zbiornika Czorszyńskiego [materiał uśredniony] według klasyfikacji geotechnicznej można określić jako piaski pylaste kilkufrakcyjne, których uziarnienie mieści się w strefie uziarnienia gruntów przydatnych do stabilizacji cementem lub wapnem.

2. Osady denne stabilizowane cementem wykazały dużo większą wytrzymałość na ściskanie i mrozoodporność niż osady stabilizowane wapnem, przy czym były one wyraźnie zależne od dodatku spoiwa:

- osady z 3% dodatkiem cementu nie spełniają wymagań normowych PN-S-96012:1997 dotyczących wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności ani dla podbudowy zasadniczej lub pomocniczej nawierzchni drogowej, ani dla górnej i dolnej części warstwy ulepszonych podłoża,
- osady z 6 i 9% dodatkiem cementu nie spełniają wymagań odnośnej normy dotyczących wskaźnika mrozoodporności dla warstw jak wyżej,
- osady z 12% dodatkiem cementu spełniają wymagania normy dotyczące wytrzymałości i wskaźnika mrozoodporności dla wszystkich wyżej wymienionych warstw drogowych

3. Osady denne stabilizowane 3, 6 i 9% dodatkiem wapna nie spełniają wymagań normy PN-S-96011:1998 dotyczących wytrzymałości na ściskanie i wskaźnika mrozoodporności ani dla podbudowy pomocniczej dla dróg o ruchu bardzo lekkim, ani dla górnej warstwy ulepszonych podłoża drogi. Mogą natomiast być wykorzystane do wstępnego ulepszenia gruntów lub na dolne warstwy ulepszonych podłoża drogi.

4. Stabilizacja przedmiotowych osadów dennych spoiwami hydraulicznymi polepsza w sposób istotny ich właściwości geotechniczne. Znacznie lepsze efekty stabilizacji osiągnięto przy zastosowaniu cementu niż wapna. Zalecony dodatek cementu do osiągnięcia odnośnych wymagań normowych dla drogowych warstw konstrukcyjnych i ulepszonych podłoża wynosi 12% w stosunku do suchej masy gruntu. Użycie tak dużej ilości cementu może spowodować wystąpienie tzw. spękań odbitych, należy zatem rozważyć zastosowanie sposobów zapobiegających, takich jak siatki lub membrany przeciwspekaniowe. Stabilizacja wapnem może być stosowana

Tablica 7 / Table 7

WŁAŚCIWOŚCI OSADÓW DENNYCH NIESTABILIZOWANYCH ORAZ STABILIZOWANYCH WAPNEM

PROPERTIES OF BOTTOM SEDIMENTS NONSTABILIZED AND STABILIZED WITH LIME

Właściwości / Properties	Dodatek stabilizatora Stabiliser dosage [%]	Wartość Value
Wskaźnik nośności California bearing ratio index $cbr_7$ [%]	0	11,0
	3	23,0
	6	24,9
	9	23,1
Pęcznienie / Swelling [%]	0	0,06
	3	0,04
	6	0,03
	9	0,03
Odczyn pH / pH value [ ]	0	7,6
	3	12,0
	6	12,2
	9	12,4

value of load capacity index to be 15% for lower layer of improved subgrade [less than 1.0 m from the grade line of the road] or the initial soil improvement, at least 25% for the top layer of improved base [less than 1.0 m from the grade line of the road] and at least 40% for auxiliary foundation for the roads with very light traffic. Mixtures with 3%, 6% and 9% lime comply with the requirement for the bottom layer of improved subgrade. Swelling of samples during storage were negligible - 0.06% [non-stabilized sample] and 0.03% [samples stabilized with lime, 2-fold less swelling of nonstabilized samples].

#### 4.5. pH - value

The pH-value of the non-stabilized sediments samples was 7.6 and was higher than the value required by the standard requirements for both the auxiliary substructure and the two layers of improved base. The pH of the sediments samples stabilized with lime was much higher and ranged from 12.0 to 12.4 in accordance with the increasing lime addition from 3 to 9%.

#### 5. Conclusions

As a result of research and analysis the following conclusions can be drawn:

1. Bottom sediments collected from the area of Czorsztyń Reservoir backwater (averaged material), according to the geotechnical classification can be described as multifractional silty sands, with particle size distribution in the range for soils suitable for stabilization with cement or lime.

2. Bottom sediments stabilized with cement showed much higher compressive strength and frost resistance than sediments stabilized with lime; properties were strongly dependent on the binders dosage:

w ograniczonym zakresie w stosunku do stabilizacji cementem (por. wniosek 3), jednak jest godna polecenia ze względu na stosunkowo duże wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu po stabilizacji oraz z uwagi na właściwości osuszające, istotne w przypadku gruntów o dużym zawilgoceniu.

## Literatura / References

1. Dymkowski A., Lewandowski R. Rekultywacja wybranych stref brzegowych i częściowe odmulenie zbiorników Rożnów i Czchów. *Gospodarka Wodna*. Warszawa. Wydawnictwo Sigma-Not, **10**, 420-423 (2001)
  2. Madeyski M., Bednarz J. Wykorzystanie osadów dennych wybranego zbiornika wodnego. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Inżynieria Środowiska*, **25**, 283-292 (2004)
  3. Morris G.L., Fan J. *Reservoir Sedimentation Handbook*, Mac-Graw Hill Company Publishing, New York, 2009
  4. Kozielska-Sroka E., Michalski P., Zydróń T. (2010) Geotechnical and hydrodynamic conditions of transformation of the north banks of the Czorsztyn Reservoir during its life-time. *Pieniny – Zapora – Zmiany – Monografie Pienińskie*, **2**, 63-82 (in Polish, summary in English)
  5. Koś K. "Geotechnical characteristics of bottom sediments from Czorsztyn Reservoir's backwater and possibilities of their usage for earthwork purposes" 5th Polish Conference of Young Geotechnicians, September 4-7, 2012, Wrocław, Poland
  6. Gorce 1:50 000, Compass Publishing (2010)
  7. Wytyczne wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Warszawa 2002
  8. Wiłun Z. *Zarys geotechniki*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa, 2000
  9. Pisarczyk S. *Grunty nasypowe. Właściwości i geotechniczne i metody ich badania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2004
  10. PN-S-96012:1997 Roads. Base and ground improved with cement
  11. Gąsiorowski S. Ulepszanie i stabilizacja gruntów spoiwem wapiennym. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, **43**, 64-66 (2012)
  12. Russo G., Dal Vecchio S., Mascolo G. Microstructure of a Lime Stabilised Compacted Silt. *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Springer Proceedings in Physics. **112**, 49-56 (2007)
  13. Majewski J., Pożyczka R., Wrzeski R. Ulepszanie i stabilizacja gruntów wapnem. *Kruszywo. Wypełniacz. Wapno. Poradnik drogowo – budowlany*. Stowarzyszenie Przemysłu Wapienniczego. Kraków, 2001
  14. National Lime Association. *Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil*. Technical Brief, 2006
  15. PN-S-96011:1998 Roads. Lime stabilization for road purposes.
  16. PN-S-02205:1998 Roads. Earthworks. Requirements and testes.
  17. PN-EN 14227 *Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym*
  18. Glinicka M.J. Właściwości geotechniczne gruntów spoistych z terenu Białegostoku wzmacnianych cementem lub wapnem. *Drogi i Mosty*. **4**, 23-39 (2006)
- sediments with 3% addition of cement do not comply with standard requirements (10) for the compressive strength and frost resistance index neither for basic or auxiliary substructure nor auxiliary road surface or the top and bottom layers of improved base
  - sediments with 6 and 9% cement addition do not comply with standard requirements for frost resistance index for the layers as above,
  - sediments with 12% cement addition comply with standard requirements for the compressive strength and frost resistance index for all road layers mentioned above.
3. Bottom sediments stabilized with 3, 6 and 9% lime addition do not comply with standard requirements (8) on the compressive strength and frost resistance index neither for auxiliary foundation for road of very light traffic, nor for the top layer of improved subgrade. However, they may be used for initial soil improvements or for the bottom layer of improved subgrade.
  4. Stabilization of investigated bottom sediments with hydraulic binders improved significantly their geotechnical properties. Much better stabilizing effects were obtained with cement than with lime. Recommended cement addition to achieve the relevant standard requirements for road construction layers and improved subgrade is 12% in relation to the dry weight of the soil. The use of such large quantities of cement can cause the occurrence of reflective cracking, therefore the use of prevention methods, such as anticracking mesh or membrane should be consider. Stabilization with lime has limited applicability comparing to the stabilization with cement, however, it is highly recommended for soils with large moisture content due to the drying properties of lime, and also relatively high values of strength parameters of the soil after stabilization