

ZNACZENIE INFILTRACJI WÓD W PROCESIE ZAGĘSZCZANIA GRUNTÓW BEZKOHEZYJNYCH NA PRZYKŁADZIE WYNIKÓW BADAŃ Z OBSZARÓW UJĘĆ WODY MIASTA POZNAŃ ORAZ BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

THE IMPORTANCE OF WATER INFILTRATION IN THE PROCESS OF NON-COHESIVE SOIL COMPACTION BASED ON INVESTIGATIONS IN GROUNDWATER INTAKES FOR THE CITY OF POZNAŃ AND EXPERIMENTAL STUDIES

ROBERT RADASZEWSKI¹, MICHAŁ NOWAK²

Abstrakt. Proces zagęszczania szkieletu mineralnego gruntów sypkich zachodzi pod wpływem wielu czynników, m. in.: wibracji, drenażu wód, przeciążenia nadkładem, itp. Jednym z ważniejszych jest opisany w artykule przepływ wody przez ośrodek gruntowy. W pracy przeanalizowano wpływ filtracji wody na zmiany upakowania szkieletu mineralnego piasków aluwialnych doliny Warty z obszarów ujęć wody dla m. Poznania i wywołany, m. in. tym procesem – spadek sprawności hydraulicznej pracujących tam stawów infiltracyjnych. Artykuł zawiera także wyniki badań eksperymentalnych, wykonywanych w ramach realizacji projektu badawczego nr NN 307 3526 33, dotyczących analizy czynników odpowiedzialnych za proces zagęszczania drobnoziarnistych osadów bezkohezyjnych. W badaniach tych określano zarówno udział procesu filtracji wody pośród innych mechanizmów odpowiedzialnych za całkowite dogęszczenie szkieletu mineralnego osadów sypkich, jak też minimalny czas niezbędny do istotnej przebudowy struktury takich gruntów. Próba porównania wyników badań prowadzonych w środowisku naturalnym z wynikami badań eksperymentalnych wynikała z faktu, że opisywane w pracy procesy zachodzą, w pierwszym przypadku, pod wpływem ograniczonej liczby czynników, przy ich stosunkowo stabilnym natężeniu. Eksperyment badawczy pozwolił zarówno rozszerzyć spektrum czynników wpływających na zmiany ułożenia szkieletu mineralnego badanych osadów, jak też stworzył możliwość analizy, większej niż naturalna, dynamiki zmian.

Słowa kluczowe: infiltracja, stopień zagęszczenia gruntów, porowatość, sprawność hydrauliczna.

Abstract. The compaction process of loose soils mineral skeleton is influenced by many factors, e.g.: vibrations, overloading and water flow through soils. The aim of the present paper is to assess significance of the last factor. In particular were studied the effects of water filtration on changes in the compaction of the mineral skeleton of alluvial sands, and on decrease in hydraulic efficiency of infiltration ponds in the Warta river valley, in areas of water intakes for the city of Poznań. Moreover, experimental studies on the analysis of factors responsible for the compaction process in fine-grained non-cohesive deposits were also conducted (within research project no. NN 307 3526 33). It was found that, along with other mechanisms, water filtration process is responsible for the total compaction of the mineral skeleton in loose deposits and affects minimum time limit required for the significant structural reconstruction in such soils. The experiment allowed to extend the spectrum of factors affecting changes in the position of the mineral skeleton in the analysed deposits, as well as provided opportunity of assessment of wider range of dynamic of changes than in natural conditions.

Key words: infiltration, soil density index, porosity, hydraulic efficiency.

¹ Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Instytut Geologii, Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód, ul. Maków Polnych 16, 61-606 Poznań; e-mail: micho@amu.edu.pl

² URS/Scott Wilson, ul. Chłapowskiego 29, 60-965 Poznań; e-mail: Michal.Nowak@scottwilson.com

WSTĘP

Obecność, a szczególnie przepływ wody w ośrodku gruntowym, wywołuje zmiany w jego strukturze. Powszechnie znanym (m.in.: Liszkowski, 1971, 1975; Wiłun, 1976; Gradziński i in., 1986; Kowalski, 1988; Pazdro, Kozerski 1990, Przybyłek, Wojewoda, 1996; Dobak, 1999; Pisarczyk, 2001) jest fakt, że filtracja wody w gruncie prowadzi do zmian zagęszczenia jego szkieletu mineralnego, zarówno zmniejszania, jak i zwiększania przestrzeni porowej. Mechanizm procesów powodujących to zjawisko, chociaż dobrze poznany teoretycznie, jest stosunkowo trudny do udokumentowania i parametrycznego opisu.

Jednym z miejsc, gdzie w rzeczywistej skali można dokumentować skutki wzmożonego przepływu wód przez ośrodek gruntowy, są obszary infiltracyjnych ujęć wód. Na terenie dwóch takich ujęć wody dla miasta Poznania (Poznań-Dębina (P-D) i Mosina-Krajkowo (M-K), wykonano przedstawiane w pracy badania. Polegały one na określeniu litologii osadów zalegających w dnach stawów infiltracyjnych oraz prześledzeniu zmian ich zagęszczenia wraz z głębokością. Podjęto także próbę określenia wpływu czasu trwania infiltracji na zmiany zagęszczenia analizowanych gruntów. W tym przypadku badania wykonano w stawach o różnej długości funkcjonowania, a także na obszarach pomiędzy stawami (w odległościach kilkudziesięciu metrów od granic stawów), gdzie proces wymuszonej infiltracji wód nie zachodził.

Z uwagi na fakt, że zmiany upakowania szkieletu mineralnego osadów w obszarze badanych ujęć zachodzą od blisko 100 lat, w efekcie powtarzających się procesów, jako uzupełnienie badań terenowych, wprowadzono badania eksperymentalne. Ich celem była analiza szerszej gamy, dynamiczniej niż w rzeczywistości zmieniających się czynników wpływających na wartość stopnia zagęszczenia, które podzielono na 2 grupy: czynniki wewnętrzne (związane z cechami litologicznymi osadów) i zewnętrzne (nie związane z litologią). Dokładniej podział ten opisano w dalszej części, w podrozdziale „Problematyka badawcza”.

Wykonane w tym zakresie badania miały jedynie charakter poglądowy, były obciążone tzw. efektem skali i czasu.

Mając świadomość tych ograniczeń, wytypowane grunty, tj. piaski wydmy (wydm śródlądowych i nadmorskich) z obszarów tarasów nadzalewowych dolin Warty i Noteci, Wisły – obszar Puszczy Kampinoskiej i wybrzeża morskiego z okolic Łeby, poddano filtracji wody i działaniu mrozu. Z racji zbliżonej genezy wszystkie te osady zachowywały bardzo duże podobieństwo cech strukturalno-teksturalnych (uziarnienie, wysortowanie, obtoczenie, warstwowanie itp.). To pozwoliło wyłączyć te cechy (jako mało zmienne) z analizy czynników różnicujących zmiany stopnia zagęszczenia i pozwoliło skoncentrować się głównie na tzw. czynnikach zewnętrznych.

PROBLEMATYKA BADAWCZA

Ułożenie szkieletu mineralnego w przestrzeni gruntu jest opisywane różnymi parametrami. Dla przykładu, w sedymentologii poprzez analizę kontaktów międzyziarnowych określa się tzw. gęstość upakowania szkieletu mineralnego. W hydrogeologii używany jest w tym celu współczynnik porowatości (n) lub wskaźnik porowatości (e). W artykule wykorzystano natomiast parametry stosowane w gruntoznawstwie, tj.: stopień zagęszczenia gruntów (I_D) oraz gęstość objętościową szkieletu gruntowego (ρ_D). Posłużono się tymi wielkościami ze względu na fakt, że opisują one ilościowo analizowaną cechę, a ponadto określane są stosunkowo prostymi metodami terenowymi i laboratoryjnymi.

Stopień zagęszczenia oznaczono lekką sondą dynamiczną (DPL), stosując się zarówno podczas badań, jak i interpretacji ich wyników, do literatury z tego zakresu (m.in.: Dudycz, 1980; PN-B/2002-04452; Frankowski, 2003). Mając na uwadze fakt, że standardowy (normowy) zakres stosowalności sondy DPL rozpoczyna się poniżej tzw. głębokości krytycznej (t_c), która wg PN-B/2002-04452 wynosi 0,6 m, przy interpretacji wyników stopnia zagęszczenia osadów w strefie przypowierzchniowej (do głębokości – t_c), zastosowano korektę wyników sondowania (N_{kor}), wg Jarec-

kiego i Dudycza (1982), *vide*: „Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych” (1997) – por. [w.1]:

$$N_{kor} = N_{10} \frac{0,6}{z} \quad [w.1]$$

gdzie:

N_{10} – liczba uderzeń ubijaka sondy przy jej wpedzie o każde 10 cm,

$[z]$ – głębokość (wyrażaną w metrach) w zakresie głębokości: 0– t_c (0,6 m).

Przedstawiony schemat oceny zagęszczenia gruntów zalegających bezpośrednio pod powierzchnią stosuje się powszechnie przy kontroli nasypów budowlanych, stąd przyjęto, że jego użycie w prowadzonych badaniach może być także uprawnione.

Gęstość objętościową szkieletu gruntowego (ρ_D) wyznaczono metodą „cylindra” (por. PN-88/B-04481).

Zmiany ułożenia szkieletu mineralnego w gruncie są pochodną wielu, często nakładających się na siebie czynników, co znacząco utrudnia ich precyzyjne wyodrębnienie. Czynniki te podzielono na dwie grupy: (1) wewnętrzne – obejmujące

mujące granulometrię i skład mineralny ziaren, ich kształt i wysortowanie, typ warstwowania, itp. oraz (2) zewnętrzne (niezwiązane z „cechami materiałowymi” gruntów, a jedynie z warunkami zewnętrznymi występującymi poza gruntem), do których zaliczono m.in.: ciężar nadkładu, przepływ wody w gruncie, w tym wahania poziomu wód gruntowych, zjawiska mrozowe, drgania (wibracje), itp.

W pracy skoncentrowano się na określeniu wpływu działania wody na ułożenie szkieletu mineralnego analizowanych gruntów i w konsekwencji zmianach ich właściwości filtracyjnych. Przepływająca przez pory gruntu woda, generuje tzw. ciśnienie hydrodynamiczne (spływowe), które może zmieniać położenie ziaren szkieletu mineralnego. W szczególnych przypadkach, przy odpowiednim uziarnieniu gruntów oraz prędkości płynącej wody (spowodowanej różnym spadkiem hydraulicznym), zmiany struktury gruntu, wywołane jej przepływem, określane są mianem procesów deformacji filtracyjnych gruntów (Liszkowski, 1971, 1975). Wśród nich można wymienić: sufozję, sufozję progresyw-

na, erozję wewnętrzną, przebicie i wyparcie hydrauliczne oraz fluidyzację.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że dogęszczanie szkieletu mineralnego analizowanych gruntów jest najprawdopodobniej efektem przemieszczeń poszczególnych ziaren, wywołanych ciśnieniem spływowym. Być może zasadne byłoby rozpatrywanie tego procesu w połączeniu z efektem tzw. uderzenia hydraulicznego, o którym, w odniesieniu jednak do innych warunków przepływu wód, pisali Liszkowska i Liszkowski (2001).

Strefy silniej zagęszczonego podłoża gruntowego nie wskazują wzbogacenia w namyte drobne frakcje, co mogłoby potwierdzać ewentualny udział procesów deformacji filtracyjnych w dogęszczaniu szkieletu. Brak także przesłanek wskazujących na dogęszczenie szkieletu mineralnego badanych gruntów w efekcie tzw. hydrokompakcji (osiadania zapadowego), rozumianej klasycznie, jako skutek niszczenia przez wodę wewnątrzstrukturalnych wiązań gruntu, przy zachowanym stałym ich obciążeniu.

CHARAKTERYSTYKA PROWADZONYCH BADAŃ

Prezentowane wyniki uzyskano w ramach realizacji dwóch tematów badawczych: „Wpływ filtracji wód podziemnych na stopień zagęszczenia gruntów” (temat badań własnych IG UAM) oraz „Stopień zagęszczenia piasków eolicznych jako narzędzie do interpretacji warunków akumulacji wydm” (grant MSWiI nr NN 307 3526 33). Pierwszy obejmował charakterystykę zmian stopnia zagęszczenia piaszczystych osadów tarasowych, wywołanych filtracją wody w warunkach rzeczowych. Drugi natomiast koncentrował się m.in. na eksperymentalnych badaniach laboratoryjnych, przeprowadzonych dla drobnoziarnistych piasków eolicznych (przekształconych z piasków rzecznych i rzecznołodowcowych – tarasowych).

Pierwszy temat realizowano na obszarze dwóch ujęć infiltracyjnych wody: Poznań-Dębina (P-D) oraz Mosina-Krajkowo (M-K), dostarczających wodę dla miasta Poznania. Ich lokalizację prezentuje [figura 1](#), a widok ogólny [figura 2](#).

Głównym celem tych badań była analiza wpływu infiltrującej w grunt, poprzez dna stawów, wody, na jego zagęszczenie. Badania prowadzono do głębokości 3 m, a skrajnie – 5 m pod poziomem den stawów. Dla tak miększej warstwy określano cechy strukturalno-teksturalne osadów. W tym celu, z powierzchni dna stawów infiltracyjnych wykonano 32 wiercenia badawcze, przewiercając ponad 70 mb gruntu, pobierając przy tym 90 próbek gruntów do dalszych analiz laboratoryjnych. Analizy te objęły: oznaczenia składu mineralnego i granulometrycznego oraz ustalenie klas kulistości i obtoczenia ziaren budujących szkielet gruntu, według metodyki Krygowskiego (1964).

Dla określenia stopnia zagęszczenia analizowanego podłoża gruntowego wykonano w dnach stawów infiltracyj-

nych, w bezpośrednim sąsiedztwie wierceń badawczych, 40 sondowań dynamicznych, o łącznym metrażu ponad 120 m.

Ostatnim etapem była próba korelacji wyników stopnia zagęszczenia z cechami strukturalno-teksturalnymi badanych gruntów oraz z długością funkcjonowania stawów infiltracyjnych, co było utożsamiane z czasem trwania procesu dogęszczania na drodze wymuszonej filtracji wody. Porównano ze sobą charakterystyki zagęszczenia gruntów z sond zlokalizowanych w stawach o różnej długości funkcjonowania: od ok. 5 lat (staw nr 2 ujęcia M-K), przez 50-letnie stawy nr 15 i 18 ujęcia P-D, do 65-letnich stawów nr: 5, 10, 11 ujęcia P-D oraz dodatkowo z sond wykonanych poza stawami (obszary bez wymuszonej infiltracji).

Ujęcie wody „Poznań-Dębina” jest ujęciem infiltracyjnym, którego funkcjonowanie opiera się na przepompowywaniu wody z pobliskiej rzeki Warty do stawów infiltracyjnych, a stamtąd, poprzez infiltrację, woda jest wstępnie oczyszczana w ośrodku gruntowym i zbierana systemem lewarów do stacji uzdatniania (por. [fig. 3](#)). Analogicznie działa staw nr 2, zlokalizowany na tzw. wyspie krajkowskiej ujęcia Mosina-Krajkowo (por. [fig. 2B](#)).

Taki obieg wody w osadach podścielających stawy infiltracyjne ujęć, odbywający się przy zmiennym, w zakresie 0,25–1,0, wymuszonym pionowym spadku hydraulicznym (i), zależnym m.in. od stanów wód gruntowych i wód rzeki Warty, powoduje w pierwszej kolejności, odkładanie się na powierzchni den stawów substancji organicznej, np. w postaci mat glonowych o kilkucentymetrowej grubości (por. [fig. 4A](#)). Następnie powstawanie stref zakolmatowania („cementacji chemicznej”), (por. Skolasińska, 2000; [fig. 4B](#)) i wreszcie wywołuje także zmiany ułożenia szkieletu mineralnego, powodujące wzrost jego gęstości (spadek poro-



Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań – tereny infiltracyjnych ujęć wody dla miasta Poznania: Poznań-Dębina oraz Mosina-Krajkowo

Location of the study area – the area of infiltration water intakes for the city of Poznań: Poznań-Dębina and Mosina-Krajkowo

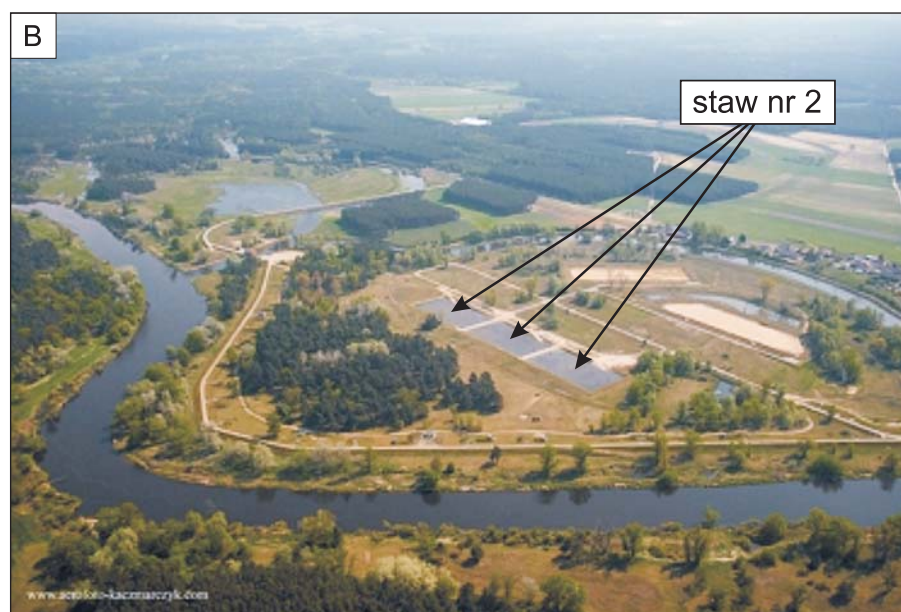


Fig. 2. Widok na tereny ujęć wody

A – Poznań-Dębina (P-D), B – Mosina-Krajkowo (M-K) (www.aerofoto-kaczmarczyk.com)

A view of the area of water intakes for the city of Poznań

A – Poznań-Dębina (P-D), B – Mosina-Krajkowo (M-K) (www.aerofoto-kaczmarczyk.com)

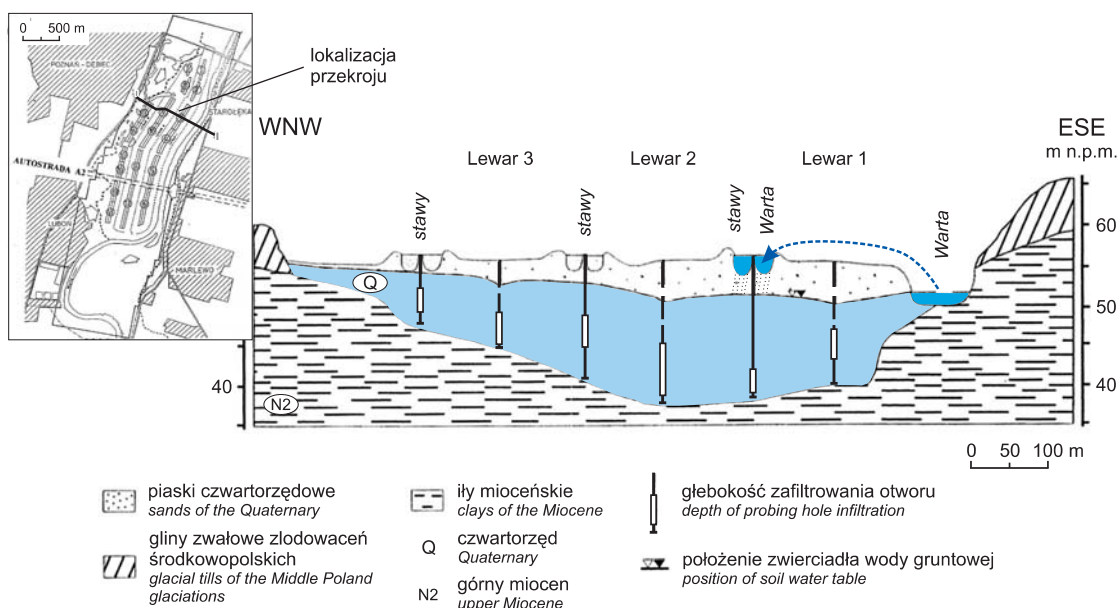


Fig. 3. Schemat funkcjonowania infiltracyjnego ujęcia wody Poznań-Dębina na tle przekroju hydrogeologicznego przez dolinę Warty w obszarze ujęcia (wg J. Przybyłka, 1997)

The diagram of operation for the Poznań-Dębina infiltration water intake in view of the hydrogeological profile of the Warta river valley in the area of the water intake (according to J. Przybyłek, 1997)

watości) i tym samym spadek współczynnika filtracji. Konsekwencją występowania tych zjawisk jest konieczność okresowego czyszczenia den stawów w celu poprawy ich sprawności hydraulicznej (fig. 4C). Zasadne w tym miejscu jest pytanie: do jakiej głębokości i jak często powinny być prowadzone wspomniane prace „udroźniające” dna stawów? Na obecnym etapie badań niemożliwe było ilościowe wyodrębnienie analizowanego efektu zagęszczania hydrodynamicznego od kolmatacji biogenicznej i chemicznej.

Prowadzony, niezależnie od wcześniej opisanych prac, drugi temat badawczy obejmował m.in. laboratoryjny eksperyment badawczy. Badania te nie oddawały ściśle warunków rzeczywistych, gdyż zarówno skala obserwowanych zjawisk, jak i czas ich trwania odbiegały od warunków procesu naturalnego. Niemniej jednak uzyskano z nich poglądowe dane o wielkości zmian zagęszczenia szkieletu mineralnego oraz tempa z jakim mogą one zachodzić. Eksperymentowi poddano 14 próbek eolicznych piasków drobnoziarnistych



Fig. 4. Następstwa stosowania wymuszonej infiltracji wód

A – mata glonowa na powierzchni dna stawu nr 2 M-K; **B** – widok ogólny i zbliżenie strefy inicjalnej cementacji osadu związkami żelaza w osadach stawu nr 7 P-D (wg K. Skolasińskiej, 2000); **C** – prace poprawiające właściwości hydrauliczne osadów podścielających staw infiltracyjny nr 5 P-D

Consequences of applied enforced water infiltration

A – a mat of algae on the surface of the bottom in pond no. 2 M-K; **B** – a general view and a close-up of zone of deposit initial cementation with iron compounds in deposits of pond no. 7 P-D (according to K. Skolasińska, 2000); **C** – works improving hydraulic properties of deposits underlying infiltration pond no. 5 P-D

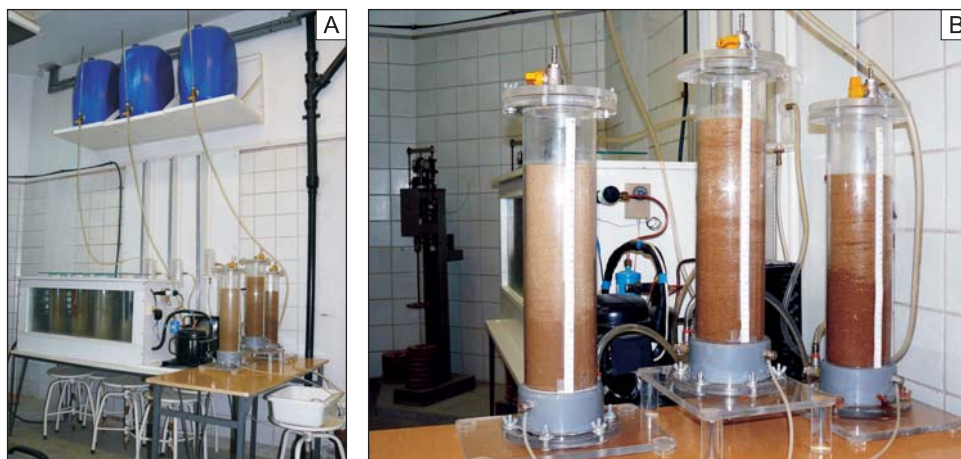


Fig. 5. Stanowisko do badań eksperymentalnych

A – widok ogólny; **B** – zbliżenie komór filtracyjnych z gruntem

The testing station for experimental analyses

A – a general view; **B** – a close-up of filtration chamber with soil

z obszarów Słowińskiego i Kampinoskiego Parku Narodowego (SPN i KPN) oraz Międzyrzecza Warty i Noteci (MWN), o masach od 4 do 6,5 kg każda. Mniejsze znaczenie miała, w kontekście wykonywanych badań, geneza badanych osadów, o wiele ważniejsze było bardzo duże podobieństwo ich cech strukturalno-teksturalnych.

Badania polegały na umieszczeniu w specjalnych kolumnach, o walcowym kształcie (wysokość = 50 cm, średnica = 12 cm; [fig. 5](#)), maksymalnie luźno usypanego osadu i poddaniu go działaniu czynników dogęszczających. Były nimi: samoistne dogęszczenie ciężarem własnym, filtracja wody (z góry i z dołu), przemrażanie (w wariantach całkowitego nasycenia wodą lub po odpływie grawitacyjnym wody), od-

mrażanie (w wariantach z możliwością odpływu wody, albo bez takiej możliwości). Badania prowadzono w dwóch turach. Pierwsza trwała 31, a druga 45 dni. Przepływ wody generowany był zmiennym w czasie spadkiem hydraulicznym (i), w zakresie: od maksymalnie $i = 1$, aż do ustania przepływu wody ($i = 0$). Zmiany te wywoływano poprzez spływ wód ze zbiorników podwieszonych ponad komorami z piaskiem do zbiorników przelewowych, które posiadały płynną regulację wysokości położenia ([fig. 5](#)).

Pełna charakterystyka przedstawianych badań opisana została w pracy Radaszewskiego (2011). W tym artykule uwypuklono wyłącznie wpływ filtracji wody na zmiany zagęszczenia szkieletu mineralnego w badanych osadach.

WYNIKI BADAŃ

Badane osady, w zdecydowanej przewadze (ponad 95%) zaklasyfikowano, wg PN-B/86-02480, jako piaski drobne i średnie (średnia średnica ziaren – $M_z = 0,2-0,3$ mm). Są to piaski dobrze wysortowane, dla których współczynnik nierównomierności uziarnienia (U) nie przekracza 4; średnio obtoczone. Morfoskopia ziaren wskazuje dominację ziaren w typie młodocianym i dojrzałym bez wyraźnej obróbki lub ze słabymi jej śladami, co w ujęciu Krygowskiego (1964) odpowiada klasom: α i β . Udział ziaren bardzo dobrze obtoczonych (klasa γ – *op. cit*) jest na poziomie kilku %. Opisywane właściwości osadów były bardzo zbliżone, przez co, przy interpretacji wyników zagęszczenia, przyjmowano je za stałe, eliminując ich istotny wpływ na ostateczny wynik zróżnicowania stopnia zagęszczenia. Wskazuje to tym sa-

mym, że zmiany wartości I_D kształtowane były głównie przez tzw. czynniki zewnętrzne, w tym opisywaną w artykule filtrację wody.

W badaniach przeanalizowano zmienność wartości stopnia zagęszczenia I_D uzyskanego z sondowań dynamicznych sondą DPL. Przyjęto, że jest to właściwe i wiarygodne, w tym zakresie prac, narzędzie badawcze, podobnie jak wiarygodna jest sama interpretacja wyników, dokonana po uwzględnieniu przedstawianych wcześniej norm i wytycznych, szczególnie w odniesieniu do przypowierzchniowej warstwy osadów – korekty wg Jareckiego i Dudycza (1982, *vide* Instrukcja ..., 1997).

Wyniki I_D z sondowań osadów, wykonanych do maksymalnej głębokości 5m pod dnami stawów infiltracyjnych

obu ujęć są porównywalne ze sobą. Generalizując zarysowała się prawidłowość nieco lepszego naturalnego maksymalnego zagęszczenia szkieletu mineralnego osadów z ujęcia Mosina-Krajkowo ($I_D = 0,7$) w stosunku do osadów ujęcia Poznań-Dębina ($I_D = 0,65$), co widoczne jest na figurze 6A. Figura ta przedstawia także uśrednione dla stawów infiltracyjnych, o różnej długości funkcjonowania, wyniki stopnia zagęszczenia, uzyskane z 31 sondowań. Przy ich interpretacji pominięto pierwsze 20 cm osadów od powierzchni den stawów, ponieważ makroskopowe obserwacje wskazywały na ich „antropogeniczne rozluźnienie”. Wszystkie wykresy stopnia zagęszczenia osadów poddawanych wymuszonej infiltracji wody zachowują podobny przebieg. Od powierzchni do głębokości ok. 1,5 m (P-D) lub 2,5 m (M-K) następuje spadek wartości I_D , a poniżej zauważalny jest słaby trend wzrostowy lub utrzymywanie się wartości I_D na zbliżonym poziomie. Całkowita rozpiętość wartości I_D dla stawów pracujących od 50 i więcej lat mieści się w zakresie $I_D = 0,35-0,65$, natomiast w młodszych stawach ujęcia M-K zakres ten jest szerszy i wynosi odpowiednio 0,28–0,70.

Analiza zmienności wartości I_D (fig. 6B), wykonana dla poszczególnych generacji stawów w analogicznych przelotach głębokości, wykazuje stosunkowo niskie wartości odchylenia standardowego, wynoszące na ogół ok. 0,1 lub mniej. Jedynie wyniki sondowań wykonanych w stawach 15 i 18 (P-D) są bardziej zróżnicowane ($\sigma_{\max} = 0,20$). Wszyst-

ko to wskazuje na powtarzalność przedstawianych trendów zagęszczenia badanych osadów. Odmiernym, od przedstawianych, trendem cechuje się wykres zmian stopnia zagęszczenia osadów nie podlegających wymuszonej infiltracji – pomiędzy stawami. Tu wartości I_D wzrastają wraz z głębokością, przy czym należy zaznaczyć, że w tym przypadku, w celu umożliwienia bezpośredniego porównania tych wyników z wynikami z obszarów stawów, na wykresie pominięto strefę przypowierzchniową (ok. 1,5 m).

Po skorygowaniu uzyskiwanych wartości stopnia zagęszczenia, wg wcześniej przytaczanego i komentowanego wzoru Jareckiego i Dudycza (1982 *W*: Instrukcja ..., 1997) uznano, że stosunkowo najwyższymi wartościami stopnia zagęszczenia I_D (powyżej 0,55) charakteryzuje się przypowierzchniowa strefa badanych osadów (do głębokości ok. 0,5 m – P-D) i 0,8 – M-K). Silniejsze dogęszczenie szkieletu mineralnego w tej strefie powoduje obniżenie współczynnika porowatości $[n]$, a w konsekwencji także wodoprzepuszczalności badanych osadów. Jak wynika z empirycznego wzoru do obliczeń współczynnika filtracji $[k]$, wg: Slichtera (*W*: Pazdro, Kozerski, 1990), wzrost zagęszczenia osadu wyrażony zmianą współczynnika porowatości $[n]$, np. z 36 na 30%, powoduje niemal dwukrotne obniżenie wartości współczynnika filtracji $[k]$.

Poza zagęszczeniem osadów, także pogłębiające się z czasem, zachodzące w nich: kolmatacja biogeniczna, chemiczna oraz tzw. aerokolmatacja, obniżają ich wodoprze-

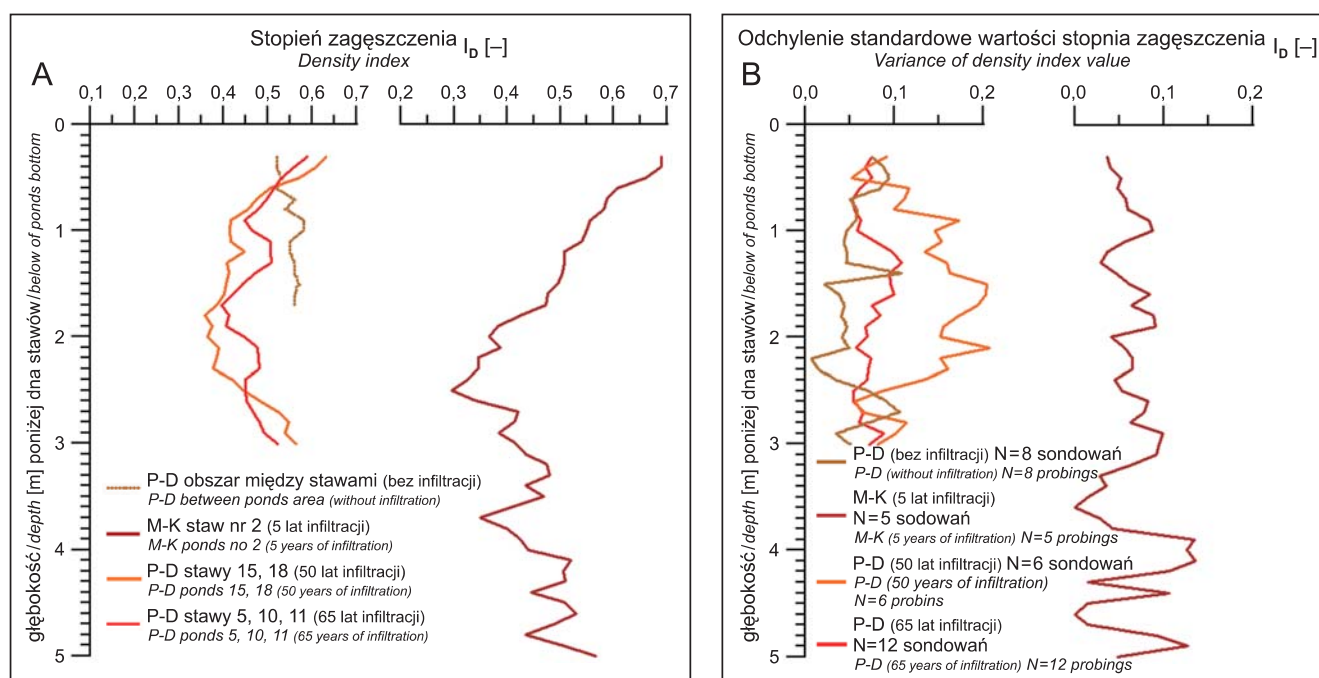


Fig. 6. Charakterystyka uśrednionego (z 31 sondowań) stopnia zagęszczenia I_D osadów podścielających różnowiekowe stawy infiltracyjne na terenach ujęć wody: (A) Poznań-Dębina (P-D) i Mosina-Krajkowo (M-K) oraz zakres jego zmienności (B)

Characteristics of averaged density index I_D (from 31 probings) of deposits underlying infiltration ponds of different ages in the area of water intakes P-D and M-K (A) and range of I_D variability (B)

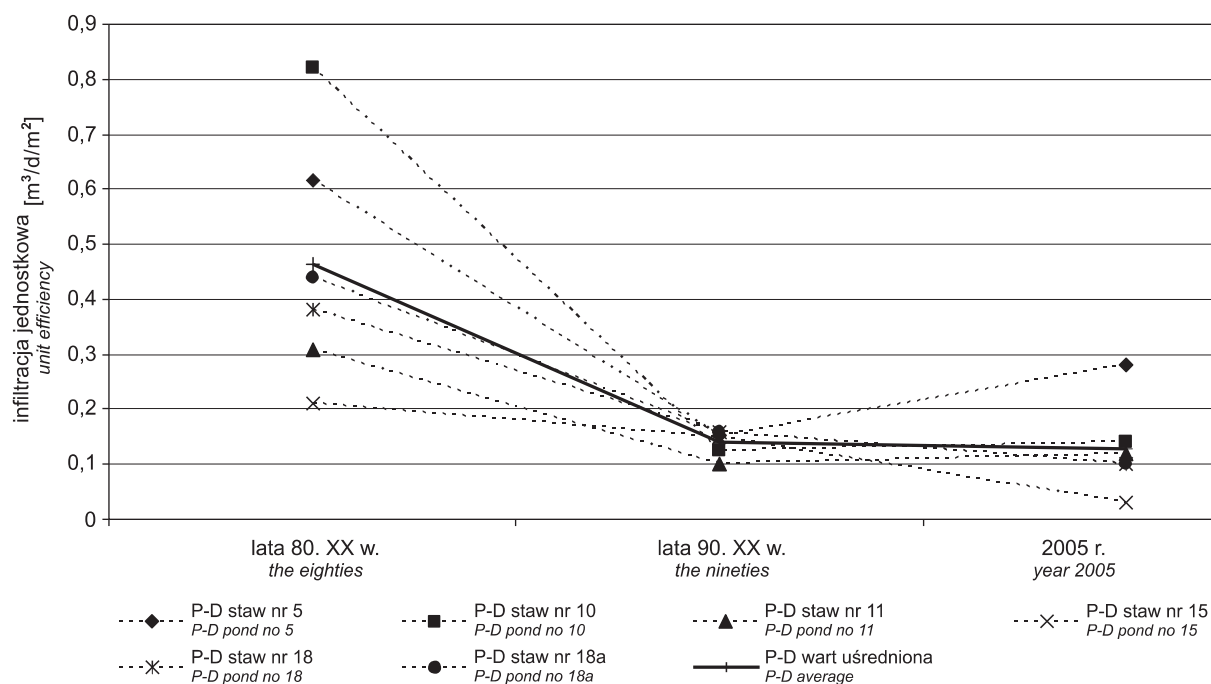


Fig. 7. Zmiany wartości infiltracji jednostkowej [q] stawów infiltracyjnych ujęcia P-D w latach 1980–2005 (na podstawie danych – Górski i in., 2006)

Changes of values of unit efficiency [q] infiltration ponds in the area of water intakes P-D in the years 1980–2005 (on the base input data – Górski *et al.*, 2006)

puszczalność. Przykładem tego mogą być przedstawione na figurze 7, wartości infiltracji jednostkowej [q] zachodzącej poprzez dna stawów infiltracyjnych w funkcji ich czasu pracy – od lat 80. XX wieku do 2005r. Spadek infiltracji jednostkowej stawów utrzymywał się do lat 90. XX wieku, po czym od tego okresu ich sprawność hydrauliczna zaczęła się nieco polepszać, co należy wiązać z cyklicznymi pracami dekolmatacyjnymi, prowadzonymi przeciętnie 2 razy w roku.

Przedstawiana na figurze 7 wartość [q] jest wypadkową wszystkich podanych wcześniej czynników ograniczających możliwości przepływu wody, wśród których jest także zmiana I_D .

Poza generalną tendencją obniżania zdolności infiltracyjnych stawów wraz z czasem ich działania stwierdzono, że stawy o początkowo lepszej sprawności hydraulicznej, w zdecydowanie szybszym tempie tracą swoją sprawność w stosunku do stawów o początkowo przeciętnych wartościach infiltracyjnych.

Z uwagi na fakt, że wykonane analizy granulometryczne nie wykazywały w przypowierzchniowej strefie silniejszego zagęszczenia – wzrostu zawartości drobniejszych frakcji, uznano, że zagęszczenie to nie jest wynikiem kolmatacji mechanicznej. Również przeprowadzane przez Skolasińską w 2000 r. badania nie wskazują na takie prawidłowości, a jedynie sygnalizują obecność w analizowanym osadzie niewielkich otoczek wytrąceń żelazistych na ziarnach kwarcu (fig 4B). Są one, obok powierzchniowej maty glonowej

odkładanej w dnach stawów, czynnikiem spowalniającym i ograniczającym infiltrację, jednakże wydaje się, że nie powinny mieć istotnego wpływu na zmiany wartości I_D odnotowywane w sondowaniach. Tym bardziej, że technika sondowań DPL nakazuje interpretację wyników, po ich wcześniejszym uśrednieniu dla 10-centymetrowych odcinków badanych profili, a fragmentarycznie scementowane ziarna ograniczone są do mało mięjszych warstw, czy wręcz lamin. Fakt ten stał się przesłanką do wnioskowania, że większy opór gruntu podczas sondowań jest raczej wynikiem mocniej dogęszczonego szkieletu mineralnego, niż obecnością opisywanej cementacji. Tym bardziej, że strefy takiej cementacji występują mozaikowo w warstwie przypowierzchniowej do głębokości ok. 1,2 m, w której generalnie wartości I_D stopniowo maleją.

Wykonany eksperyment laboratoryjny, polegający na dogęszczeniu początkowo wysuszonych i maksymalnie luźno usypanych piasków poprzez filtrację przez nie wody, wykazał różne możliwości dogęszczania ich szkieletu ziarnowego w zależności od granulacji (piaski drobno oraz średnioziarniste), co związane było z miejscem ich pochodzenia (MWN oraz KPN, SPN) – por. figurę 8A. Odnotowywane zmiany gęstości objętościowej szkieletu gruntowego [ρ_D], wyrażane bezpośrednio w badaniu zmianami wysokości słupa gruntu w cylindrach badawczych (przy wysokości początkowej w zakresie: 34–37 cm, mieściły się w zakresach 2–6% (KPN i SPN) oraz 7,5–8,0% (MWN). Rejestrowany

wzrost gęstości objętościowej szkieletu mineralnego był zatem odwrotnie proporcjonalny do wielkości frakcji.

Eksperyment wykazał ponadto, że główna część odkształceń badanych gruntów jest wynikiem filtracyjnej działalności wody, a najbardziej wyraźny charakter tych zmian obserwowany był już przy pierwszym zawodnieniu próbek, co prezentuje figura 8A, B.

Pierwsze nawodnienie powodowało dogęszczenie badanych piasków w zakresie około 50% całkowitej wartości stwierdzonej po 31 (I tura badań) lub 45 (II tura badań) dobach badania. Zachodziło ono w czasie: 1–2 godzin, podczas gdy wartości graniczne ρ_{Dmax} , przy stosowanych w eksperymencie założeniach (por. Radaszewski, 2011), uzyskiwano po upływie 8–10 dób. Pozostały czas eksperymentu, pomimo stosowania różnych mechanizmów dogęszczania nie przynosił już istotnych zmian w zagęszczeniu osadów, co może

wskazywać na fakt, że rejestrowane po 10 dobach badań wartości ρ_D , były praktycznie wartościami maksymalnymi.

Szybkie tempo zagęszczania analizowanych piasków, stwierdzone w eksperymencie, dobrze koresponduje z wynikami sondowań dynamicznych DPL wykonanych w stawach o różnej długości funkcjonowania na terenie obu opisywanych ujęć. W nich także tempo takiego procesu było na tyle szybkie, że przypowierzchniowa strefa silniejszego dogęszczenia zauważalna jest w profilach sondowań wykonanych, np. w stawie nr 2 w Krajkwie, który funkcjonował zaledwie od 4 lat.

Należy przy tym jednak zaznaczyć, że początkowe zagęszczenie osadów w badaniu eksperymentalnym było znacząco słabsze od potencjalnego, teoretycznie przyjmowanego zagęszczenia osadów deponowanych w środowisku rzeczonym (tu na tarasach Warty). Stąd też bezpośrednia ekstrapolacja wniosków z badań eksperymentalnych i terenowych jest ograniczona.

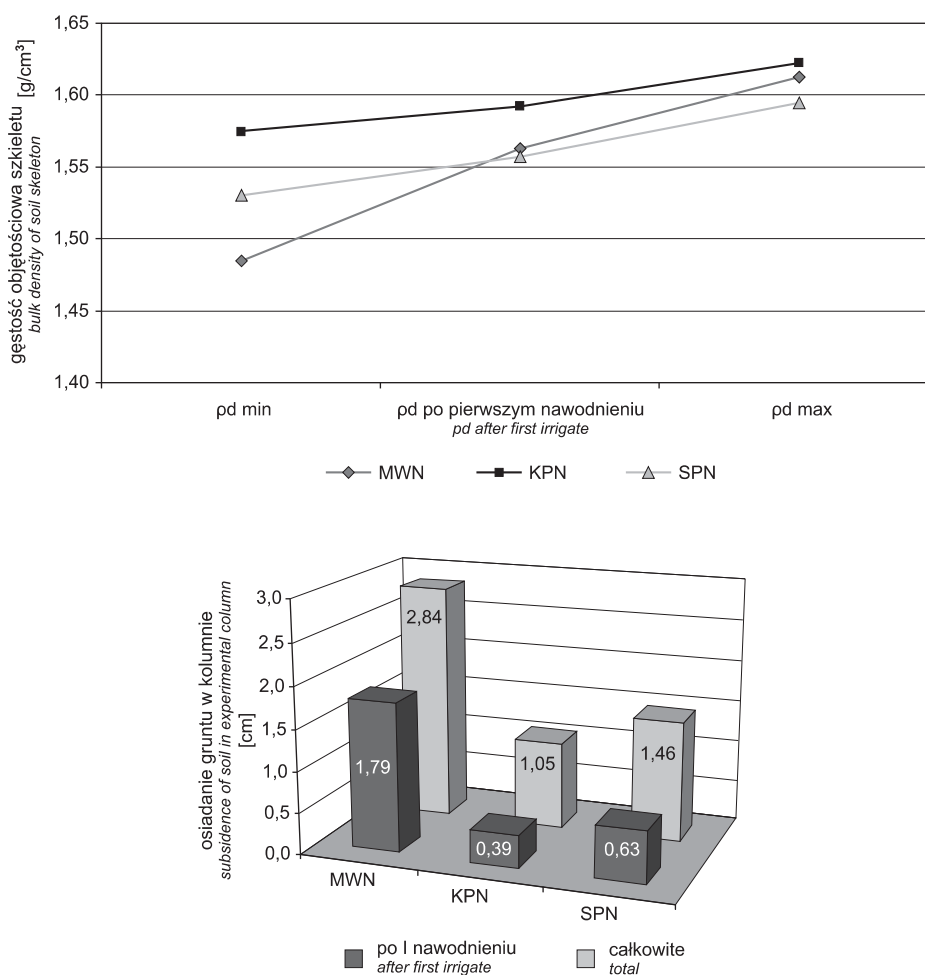


Fig. 8. Wpływ pierwszego nawodnienia gruntów w eksperymentalnych kolumnach piaskowych na zagęszczenie ich szkieletu mineralnego wyrażony przez: **A** – wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego [ρ_D]; **B** – całkowite osiadanie powierzchni gruntu w kolumnach badawczych (wartości średnie z 14 analiz)

The effect of first soil saturation in experimental sand columns on compaction of their mineral skeleton expressed in: **A** – values of bulk density of soil skeleton [ρ_D]; **B** – total settlement of soil surface in experimental columns (mean values from 14 analyses)

PODSUMOWANIE

Badane osady z obszarów stawów obu analizowanych ujęć wody wykazują stosunkowo najwyższe wartości stopnia zagęszczenia I_D w przypowierzchniowej strefie, do głębokości ok. 0,5–0,8 m. Przyjmując, że uzyskiwane w tym zakresie głębokości wyniki sondowań są, po zastosowaniu przedstawionej w artykule korekty (wg Jarecki, Dudycz, 1982 *W: Instrukcja ...*, 1997), dopuszczalne i wiarygodne, zasadną wydaje się robocza teza, że w obrazie zagęszczenia badanego podłoża ukryty jest czynnik wymuszonej filtracji wody.

Maksymalne wartości stopnia zagęszczenia I_D wynoszą dla osadów z ujęcia P-D ok. 0,65, M-K ok. 0,7 i klasyfikują badane grunty, wg PN-86/B-02480, jako średnio zagęszczone i zagęszczone. Wartości te są bliskie maksymalnym wartościom zagęszczenia naturalnego dla gruntów normalnie konsolidowanych (Wiłun, 1976).

Jako mechanizm powodujący wzrost zagęszczenia badanych osadów, przyjęto wzajemne przemieszczanie się ziaren szkieletu gruntowego wywołane ciśnieniem hydrodynamicznym. Nie znaleziono natomiast przesłanek wskazujących ich dogęszczenie poprzez kolmatację mechaniczną, czy hydrokompakcję.

Tempo zmian upakowania szkieletu mineralnego w badanych osadach wydaje się stosunkowo szybkie. Wskazują na to chociażby wyniki badań stawu nr 2 ujęcia M-K, w którym pomimo krótkiego okresu funkcjonowania zaobserwo-

wano takie same trendy zagęszczenia, jak w innych zdecydowanie dłużej funkcjonujących stawach. Jeszcze dobitniej szybkie tempo zmian zagęszczenia osadów, wywołane przepływem wody, dokumentują wyniki przeprowadzonego eksperymentu. Autorzy mają tu jednak świadomość, że wpływ na to miały zapewne: zarówno początkowe – minimalne zagęszczenie piasków, jak też anormalnie wysoka wartość spadku hydraulicznego.

Pomimo, że przedstawione wyniki należy traktować jako wstępne, a dokładniejsze ustalenie wpływu infiltracji wód na stopień zagęszczenia gruntów będzie możliwe po wykonaniu kolejnych podobnych badań, to już teraz uprawniona wydaje się teza, że stopień zagęszczenia gruntów (I_D) może być dobrym markerem zmian warunków hydrogeologicznych w czasie. Problemem, pozostającym wciąż do rozwiązania, jest jak, spośród tak wielu czynników wpływających na możliwości infiltracyjne gruntów, wydzielić tę część, za którą odpowiada dogęszczenie jego szkieletu mineralnego?

W świetle uzyskanych wyników zasadne wydaje się także rozważenie, czy dla poprawy sprawności hydraulicznej stawów w obszarze analizowanych ujęć, nie należałoby zwiększyć zakresu głębokości wykonywanych dotychczas w obrębie stawów prac, poszerzając je o zabiegi spulchniające (rozluźniające) szkielet mineralny do głębokości przynajmniej ok. 0,6 m.

LITERATURA

- DOBĄK P., 1999 — Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. *W: Studia Rozprawy Monograficzne* 65, PAN Kraków Wyd. Inst. Gosp. Surowcami Miner. i Energią.
- DUDYCZ D., 1980 — Interpretacja sondowań udarowych wykonywanych od powierzchni w nasypach formowanych. Narada „Geoprojektu” Bocheniec k/Małogoszczy. Wyd. Geol., Warszawa.
- FRANKOWSKI Z., 2003 — Interpretacja wyników sondowań dynamicznych i badań presjometrycznych. Sondowania dynamiczne. *W: Nowoczesne Metody Badań Gruntów*: 12–22. ITB Warszawa.
- GÓRSKI J., PRZYBYŁEK J., STRYCYŃSKA M., KASZTELAN D., REMISZ W., THEUSS T., 2006 — Kompleksowa dokumentacja hydrogeologiczna. Podstawa do opracowania koncepcji programowo-przestrzennej w zakresie przebudowy stawów infiltracyjnych na ujęciu wody Dębina w Poznaniu. Archiwum IG UAM Poznań.
- GRADZIŃSKI R., KOSTECKA A., RADOMSKI A., UNRUG R., 1986 — Zarys Sedymentologii. Wyd. Geol., Warszawa.
- INSTRUKCJA badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych (Załącznik). Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa, luty 1997 r.
- KOWALSKI W.C., 1988 — Geologia inżynierska. Wyd. Geol., Warszawa.
- KRYGOWSKI B., 1964 — Graniformometria mechaniczna – teoria, zastosowanie. PWN, Poznań.
- LISZKOWSKI J., 1971 — Filtracyjne deformacje utworów lessowych. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW*, 13: 87–132.
- LISZKOWSKI J., 1975 — Geologiczne modele rozwoju filtracyjnych deformacji gruntów w Polsce. Materiały Konf. Aktualne problemy geologii inżynierskiej: 133–151. IAEG, Warszawa.
- LISZKOWSKA E., LISZKOWSKI J., 2001 — Wpływ ekstremalnych warunków hydrogeologicznych na reżim ciśnień piezometrycznych w wodonościach krasowych. *W: Współczesne Problemy Hydrogeologii* (red. T. Bocheńska, S. Staško), t. 10: 201–208, Wrocław.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 — Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- PISARCZYK S., 2001 — Gruntoznawstwo Inżynierskie. PWN, Warszawa.
- PN-86/B-02480 — Polska Norma budowlana „Grunty budowlane. Klasyfikacja i opis gruntów”.
- PN-88/B-04481 — Polska Norma budowlana „Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu”.
- PN-2002/B-04452 — Polska Norma budowlana „Geotechnika. Badania polowe”.
- PRZYBYŁEK J., 1997 — Hydrogeologiczna ocena sprawności infiltracyjnego ujęcia wody „Dębina” w Poznaniu przed kolizją

- z projektowaną autostradą A2. *W: Współczesne Problemy Hydrogeologii* (red. J. Górski, E. Liszkowska), t. 8: 95–102. WIND, Wrocław.
- PRZYBYŁEK J., WOJEWODA J., 1996 — Zmiany pierwotnych cech osadów wodonośnych w dolinie Warty oraz objawy spadku ich przepuszczalności w strefie ujęcia wody dla miasta Poznania w Dębinie. *W: Mat. Międzynarodowej Konferencji Zaopatrzenie w wodę miast i wsi:129–145. PZITS, Poznań.*
- RADASZEWSKI R., 2010 — Raport z realizacji projektu badawczego MSWiI nr NN 307 3526 33 pt. „Stopień zagęszczenia piasków eolicznych jako narzędzie do interpretacji warunków akumulacji wydym”. *Archiwum IG UAM Poznań.*
- RADASZEWSKI R., 2011 (w druku) — Wybrane czynniki naturalnego dogęszczania gruntów bezkohezyjnych w świetle badań eksperymentalnych. *Nauka Przyroda Technologie.*
- SKOLASIŃSKA K., 2000 — Przeobrażenia osadów doliny rzecznej w warunkach infiltracji wód powierzchniowych na przykładzie poznańskich ujęć wody. (manuskrypt rozprawy doktorskiej). UAM Poznań.
- WIŁUN Z., 1976 — Zarys geotechniki, Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa.

SUMMARY

The major objective of the presented paper was to analyse density indexes [I_D] in fine- and medium-grained sands subjected to the groundwater flow. The assessed groundwater flow occurred either under actual conditions of enhanced infiltration in the Poznań–Dębina and Mosina–Krajkowo water intakes, as well as in an experimental run in laboratory conditions.

Analyses were conducted for deposits with similar structural and textural properties, which comprised of alluvial deposits on river flood terraces of rivers and of aeolian deposits. In terms of grain size distribution they were fine and medium-grained sands, composed mainly of moderately rounded quartz grains, partly covered by thin iron-oxides, calcareous and clay coatings. The very small variations in structural and textural properties between the studied deposits made it possible to assume, that they do not affect the study results. It allowed to limit the analyses of compacting mechanisms to the group of the so-called external factors.

The analysed deposits from both water intake areas indicated higher I_D values in the near surface zone (to a depth of 0,6m.) than in the deeper subsoil. Assuming that I_D values are correct (after the use of Jarecki & Dudycz (1982) correction formula), it can be noticed that the draft thesis on the influence of the groundwater flow on the deposits compaction can be accepted.

Such an highly compacted zone was not observed in probings performed outside the area of these ponds, although the deposits lithology was the same.

Maximum values of density index I_D in the deposits from water intakes: P-D amounts to approx. 0.65, while for the deposits from water intake M-K to approx. 0.7, which classified the analysed soils according to the Polish standard PN-86/B-02480 to medium-compacted and compacted deposits. These values are close to maximum values of natural compaction for normally consolidated soils (Wiłun, 1976).

It was assumed that the mechanism causing an increase in the compaction of the analysed deposits was translocation of grains in the soil skeleton caused by the hydrodynamic pressure of flowing water. However, in this case the mechanism of compaction through mechanical colmatation was rejected,

since in the zone of maximum compaction no elevated contents of potentially silted up particles of the smallest fractions were found. In turn, the zone of the so-called chemical colmatation, documented by Skolasińska (2000) and observed in the form of iron compounds coatings on the surface of some grains, although significantly reducing potential water permeability of soil, due to the low strength of such bonds cementing grains and slight thickness of such zones, may not be reflected in the probing results. Moreover, its depth range does not coincide with the range of the strongly compacted zone, documented in probings.

Water permeability of the analysed soils deteriorates with time. It was illustrated through presentation of unit efficiency [q] with time of operation of individual ponds. This is affected by (1) small particles of the clay and dust fractions transported in the suspension in the river water, which are deposited directly on the surface of pond bottoms, forming a poorly permeable layer, (2) the layer of organic substances – the mat of algae lying on bottom of ponds and forming a tight coating, and (3) the so-called aerocolmatation process, i.e. an expansion of the aeration zone, destroying the natural hydraulic bond in the subsoil of infiltration bonds. All these processes cause that the ponds must be periodically drained and their bottoms are cleaned, including removal of the least permeable surface sediment layer. Such actions probably disturb compaction of the mineral skeleton in these parts of the deposits, but it does not explain the observed pattern of the varying density index.

The rate of changes in the packing of the mineral skeleton in the analysed deposits is relatively rapid. For instance analyses conducted in pond no. 2 in the M-K water intake, in which similar to the other ponds compaction trends were observed, despite the short period of its operation – 4 years. A relationship between the infiltration rate and compaction changes were also observed. In ponds with high infiltration parameters the bottom sediments change their properties in a relatively short time frame, while in ponds with initially average values of infiltration these changes were slower and less diverse. The rapid rate of changes in deposit compaction caused by water flow is evidenced by the results of the

experiment, in which an almost 50% increase in compaction for originally loose deposits was observed after only a dozen of minutes of water infiltration. However, the authors are well aware that the effect on such an extreme rapid rate of changes was probably affected by the initial conditions, i.e. minimum compaction of sands, and the abnormally high value of hydraulic gradient.

The presented results are preliminary, and more accurate assessment of the effect of water infiltration on density index of soil will only be possible after more similar studies. However, at present it seems to be likely that the density index of soils (I_D) may be a good indicator of changes in hydrogeological conditions in time.

A problem which still remains to be solved is how to identify effect of this relationship among so many factors influencing infiltration capacity of soils, which are also responsible for the compacting of its mineral skeleton. The fact that both these processes are conjugated seems to be self-evident.

Based on the results, it seems important to consider if it would be necessary for the improvement of hydraulic efficiency of ponds in the area of the analysed water intakes, to increase the depth and range of works performed so far in the ponds. For instance through extending them to include also loosening of the mineral skeleton to at least a depth of approx. 0.6 m.