

Wpływ zanieczyszczenia olejem napędowym na zmianę uziarnienia, plastyczności i pęcznienia neogeńskich osadów zastoiskowych z rejonu Dobrego

Dorota Izdebska-Mucha¹, Ireneusz Gawriuczenkow¹, Konrad Jarominiak¹



D. Izdebska-Mucha



I. Gawriuczenkow



K. Jarominiak

Effect of diesel fuel contamination on the particle size distribution, plasticity and swelling of Neogene limnic soils from the Dobre area. *Prz. Geol.*, 72: 789–797; doi: 10.7306/2024.68

Abstract. Petroleum products are hazardous to the natural environment, as well as to the stability of underground infrastructure and foundations. Numerous studies have reported negative changes in the geological and engineering parameters of soil contaminated with hydrocarbons. In Poland, the impact of pollution with petroleum hydrocarbons on the physical and mechanical properties of soils is still poorly understood and requires studies considering soil lithology, duration of the pollution and the type of pollutant. The soil tested in this study was Neogene limnic soil, collected in the Dobre area, composed of 12.5% clay, 46.5% silt, 41%

sand, and kaolinite as the dominant clay mineral. Soil samples containing 0%, 2%, and 6% of diesel fuel (ON) were prepared in laboratory to simulate long-term contamination. With the increase in ON content, the clay content decreased by approximately 4% points, resulting in a classification change from loam (G) to sandy silt (Πp) for the 6% ON sample. Greater differences in particle size distribution were observed using the hydrometer method compared to the microaggregate method. Compared to the 0% ON sample, contaminated samples showed an increase in the values of Atterberg limits, plasticity index, consistency index and activity. This changes align with literature data for soils of kaolinitic and illitic composition. Consistent with its lithological composition, the tested soil showed low values of the sorption and swelling parameters, indicating low potential expansivity. Although there was a slight increase in the MBC sorption capacity, cation exchange capacity and specific surface area, the contaminated soil samples revealed lower values of free swelling and higher values of swelling pressures compared to the uncontaminated soil. However, the macroscopic observation of samples after the free swelling test and the reduction in the adsorbed water content after the swelling pressure test point to the conclusion that due to the presence of hydrocarbons in the soil structure, its potential for sorption capacity and volume changes was reduced. This research demonstrates that even a relatively low level of soil contamination with petroleum-derived compounds resulted in a change in its geological and engineering properties. Due to the limited data, the presented conclusions require further research applying higher degree of soil contamination. It was also shown that a careful and comprehensive analysis of test results is necessary for the proper interpretation/assessment of the results of standard tests but conducted for non-standard soil material, where the pore liquid consists of water and hydrocarbons.

Keywords: Neogene limnic soil, hydrocarbons, particle size distribution, plasticity, swelling, sorption, contaminated soils

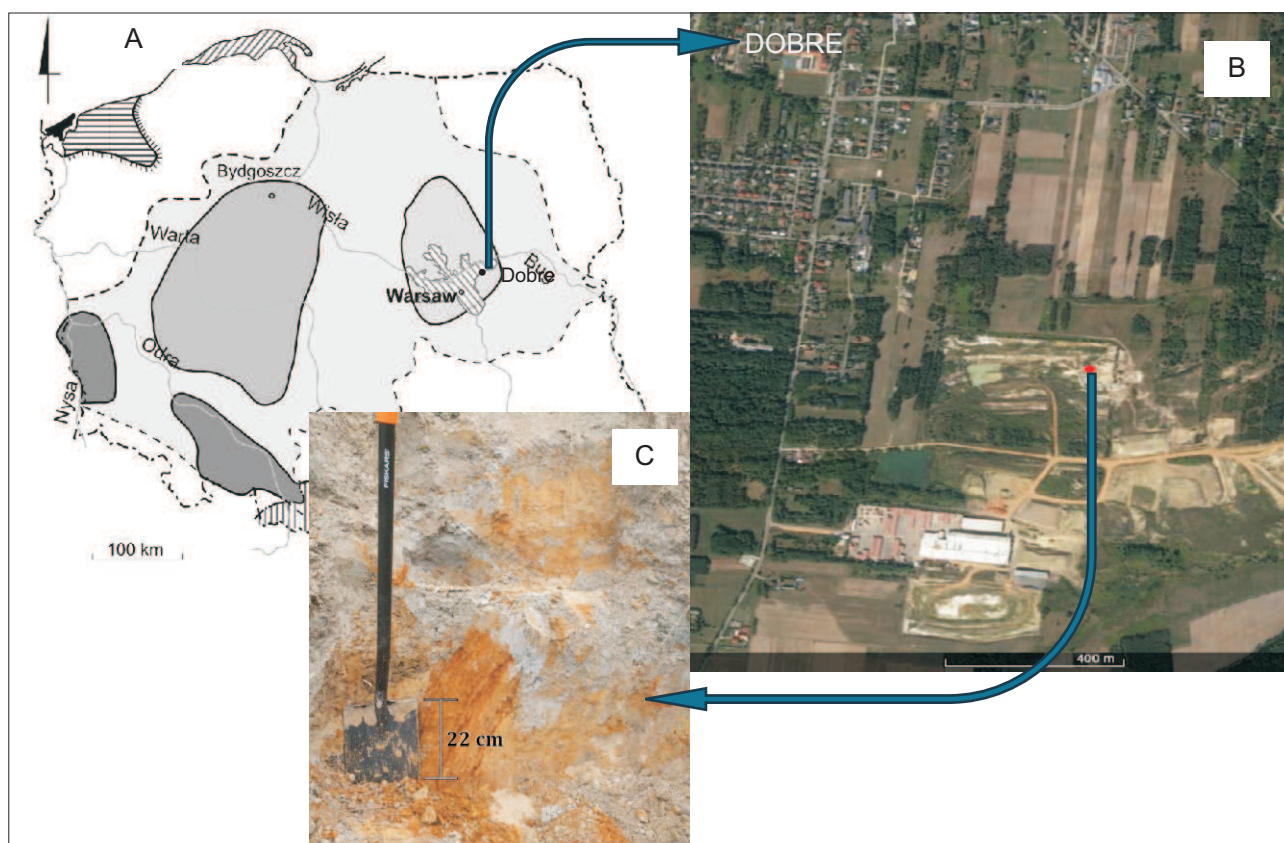
Iły neogeńskie serii poznańskiej są zróżnicowane pod względem składu mineralnego, uziarnienia i właściwości fizykochemicznych. Na ich zróżnicowanie wpłynęła wielkość zbiornika sedymentacyjnego (ryc. 1), w którym wydzielono trzy strefy: centralną, brzeżną i przysudecką (Wichrowski, 1981), różniące się przede wszystkim składem mineralnym oraz granulometrycznym. Oprócz różnicowania poziomu utworów neogeńskich serii poznańskiej, możemy wydzielić kilka poziomów i facji sedymentacyjnych, wynikających z różnych warunków panujących w ówczesnym zbiorniku, np. długości transportu materiału ilastego czy czasu sedymentacji itd. Utwory neogeńskie ze względu na swoje znaczne rozprzestrzenienie oraz potencjalne zagrożenie dla obiektów budowlanych są częstym przedmiotem badań (Gawriuczenkow, Wójcik, 2013; Kumor, 2016).

Iły serii poznańskiej z okolic Dobrego k. Mińska Mazowieckiego w większości cechują się bardzo wysoką zawartością frakcji iłowej (Gawriuczenkow, 2011; Gawriuczenkow, Wójcik, 2018), chociaż można też zaobserwo-

wać występowanie utworów bardziej piaszczystych w brzeżnych częściach zbiornika oraz w jego końcowej fazie istnienia.

Tematyka zanieczyszczeń środowiska gruntowo-wodnego produktami ropopochodnymi jest niezwykle aktualna ze względu na postępujący w szybkim tempie rozwój urbanizacji, przemysłu, infrastruktury drogowej oraz dystrybucji paliw. Ropa naftowa oraz produkty jej przerobu są jednymi z najczęściej wykorzystywanych surowców, szczególnie w uprzemysłowionych państwach. Równocześnie stanowią one bardzo częste źródło zanieczyszczeń środowiska, co jest związane z awariami zarówno na lądzie, jak i na morzu, podczas transportu, wydobycia ropy, a także celowych działań, np. podczas wojny w Zatoce Perskiej (Surygała, Śliwka, 1999; Izdebska-Mucha, Trzciniński, 2007, 2011; Khamehchiya i in., 2007). Ponadto usuwanie zanieczyszczeń ropopochodnych jest technicznie trudne, kosztowne i długotrwałe. Zanieczyszczenia te tworzą poważne zagrożenie zarówno dla zdrowia ludzi i naturalnego środowiska, jak i infrastruktury sieciowej, budynków i ich pod-

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; dizdebsk@uw.edu.pl; i.gawriuczenkow@uw.edu.pl; konrad.jarominiak0@gmail.com; ORCID ID: D. Izdebska-Mucha – 0000-0002-3602-5352; I. Gawriuczenkow – 0000-0001-6986-2782.



Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań: **A** – mapa występowania ilów neogeńskich w Polsce (Grabowska-Olszewska, 1998); **B** – wyrobisko eksploatacyjne zakładów *Winerberger* w Dobrem; **C** – badany grunt w odsłonięciu wyrobiska w Dobrem

Fig. 1. Location of the research area: **A** – map of the Neogene clays in Poland (Grabowska-Olszewska, 1998); **B** – clay excavation in Dobrze, *Wienerberger* company; **C** – the tested soil in the excavation exposure in Dobrze

łoża. Niekorzystne zmiany parametrów geologiczno-inżynierskich gruntów zanieczyszczonych związkami ropopochodnymi stwierdzili np.: Singh i in. (2009), Nazir (2011), Khosravi i in. (2013), Oluremi, Osuolale (2014), Stajszczak (2021, 2023), Haghsheno, Arabani (2022), Li i in. (2022) czy Saeed i in. (2024).

Zagadnienia wpływu zanieczyszczeń węglowodorami ropopochodnymi na fizyczno-mechaniczne właściwości gruntów występujących w Polsce są w niewielkim stopniu rozpoznane. Wymagają one dalszych badań z uwzględnieniem różnych typów litologicznych gruntów, czasu oddziaływania zanieczyszczenia oraz rodzaju tego zanieczyszczenia. Niniejsza praca stanowi kolejny krok w badaniach nad tymi zagadnieniami i dotyczy gruntu średnio/miało spoistego o kaolinitowym składzie frakcji ilowej i genezie zastoiskowej.

Na obszarach zanieczyszczonych można spotkać produkty naftowe o zróżnicowanym składzie chemicznym (węglowodory o różnej długości łańcucha węglowego). Najczęściej obserwowanymi są: ropa naftowa, bituminy, benzyna, olej silnikowy, oleje napędowe (Haghsheno, Arabani, 2022). W niniejszym artykule badaniom poddano próbki gruntu niezanieczyszczonego oraz pasty gruntowe zanieczyszczone olejem napędowym w warunkach laboratoryjnych. Jako zanieczyszczenie wybrano olej napędowy, ze względu na powszechne użytkowanie tego produktu i trudności jego usuwania z gruntów spoistych. Celem pracy było: 1) określenie wpływu zanieczyszczenia olejem napędowym na podstawowe fizyczne i fizykochemiczne właściwości badanego gruntu, 2) analiza wyników w nawiązaniu do wykształcenia litologicznego gruntu i danych literaturo-

wych, 3) uwagi metodyczne odnośnie prowadzenia przedstawionych badań i interpretacji ich wyników dla gruntów zanieczyszczonych olejem napędowym.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Próbki gruntu do badań laboratoryjnych zostały pobrane w rejonie wsi Dobrze k. Mińska Mazowieckiego. Próbki pochodzą z nieczynnego wyrobiska zakładu produkcji materiałów budowlanych *Wienerberger*, położonego między wsiami Dobrze a Rudzienko (ryc. 1).

Próbki gruntu zostały wycięte w formie monolitu w ścianie skarpy wyrobiska, na głębokości ok. 7–8 m. Według dokumentacji geologicznej, sporządzonej na potrzeby wyrobisk eksploatacyjnych na badanym obszarze, w profilu pionowym podłoża stwierdzono występowanie ilów mułkowatych i mułków ilastych o genezie zastoiskowej, wieku neogeńskiego. W otworze nr 17, położonym najbliższej lokalizacji poboru próbek, na podobnej głębokości stwierdzono ropy mułkowate, niebieskie, szare, brązowe, z przewarstwieniami piasku oraz mułki piaszczyste, mułki ilasto-piaszczyste i mułki ilaste, brązowe, niebiesko-brązowe i szare (Gradys, 1977).

Dla gruntu naturalnego oznaczono: wilgotność naturalną (w_n) wg PN-B-04481:1988; gęstość objętościową gruntu (ρ) metodą wyporu hydrostatycznego w ciekłej parafinie z użyciem zestawu do badania gęstości cieczy i ciał stałych (*Radwag*, Polska) oraz gęstość właściwą szkieletu gruntowego (ρ_s) metodą piknometru helowego *AccuPyc 1330* (*Micromeritics*, USA).

Skład mineralny gruntu naturalnego oznaczono metodą analizy termicznej DTA-TG, z wykorzystaniem aparatu Q600 firmy *TA Instruments*. Stosowano następujące warunki analizy: naważka 50–90 mg, czułość dobierana automatycznie przez aparat, szybkość nagrzewania 10°C/min., atmosfera–powietrze. Ilościowy skład mineralny wyznaczono wg metodyki Wyrwickiego (1996).

Analiza wpływu związków ropopochodnych została zaprojektowana na modelowych próbkach gruntu zanieczyszczonego w warunkach laboratoryjnych z zastosowaniem oleju napędowego *Shell V-Power* (karta charakterystyki za: www.epc.shell.com). Olej napędowy (ON) jest mieszaniną węglowodorów o długości łańcucha węglowego C₉–C₂₅. W porównaniu do wody charakteryzuje się niższą gęstością (820–845 kg/m³ w 15,0°C), wyższą lepkością (2–4,5 mm²/s w 40°C) oraz bardzo niską wartością stałej dielektrycznej ($\epsilon = 2$).

Przygotowanie próbek gruntu zanieczyszczonego ON (past gruntowych) polegało na wstępnym rozdrobieniu oraz wysuszeniu gruntu w temperaturze 105–110°C. Następnym etapem było roztarcie i przesianie gruntu przez sito \varnothing 2 mm. Tak przygotowany i ujednolicony materiał został podzielony na trzy części, z których jedna stanowiła próbkę referencyjną 0% ON, a pozostałe zostały wymieszane z olejem napędowym w takiej ilości, aby zawartość ON wynosiła 2 i 6% wag. w stosunku do suchej masy gruntu. Zanieczyszczone próbki poddano homogenizacji w szczelnie zamkniętych słoikach przez okres jednego miesiąca. Przyjęta procedura jest zgodna z metodyką stosowaną w tego typu badaniach, a homogenizacja 2-fazowego układu (bez udziału wody) symuluje proces długotrwałego zanieczyszczenia gruntu (np. Khomehchiyan i in., 2007; Khosravi i in., 2013; Harsh i in., 2016).

Badania składu granulometrycznego przeprowadzono porównawczo dwiema metodami: mikroagregatową i areometryczną. Zgodnie z metodyką analizy mikroagregatowej, nie stosuje się zabiegów służących rozbiciu mikroagregatów występujących w gruncie, zatem uzyskane wyniki obrazują naturalny stan zagregowania fazy stałej gruntu. Próbki do analizy mikroagregatowej zostały przygotowane wg metody Kaczynskiego podanej przez Myślińską (2016). Zawiesiny gruntowe przemyto przez sito \varnothing 0,063 mm, co stanowiło modyfikację procedury Kaczynskiego, a dalsze pomiary zawiesiny przeprowadzono z zastosowaniem areometru. Po zakończeniu pomiarów składu mikroagregatowego do zawiesin dodano dyspergator (pirofosforan sodu) i ponownie wykonano pomiary areometryczne, zgodnie z procedurą wg PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2004. Wszystkie analizy sedymentacyjne zostały uzupełnione analizą sitową frakcji >0,063 mm. Interpretacji składu granulometrycznego gruntu dokonano wg norm PN-B-02480:1986 i PN-EN ISO 14688-1:2018-5.

Oznaczenie granicy plastyczności (w_p) wykonano metodą waleczkowania, a granicy płynności (w_L) metodą Casagrande'a wg PN-B-04481:1988. Granicę skurczalności (w_s) obliczono na podstawie wzoru Krabbego z 1958 r. (za: Schultze, Muhs, 1967):

$$w_s = w_L - 1,25 \times I_p$$

Wyniki badań granicy skurczalności prowadzonych przez Izdebską-Muchę i Wójcik (2011) wykazały, że dla gruntów średnio i mało spoistych (genetycznie glin lodowcowych),

wartości w_s obliczone wg wzoru Krabbego wykazują stosunkowo dobrą zgodność z wartościami oznaczonymi metodą laboratoryjną.

Pojemność sorpcyjną (*MBC*) oraz powierzchnię właściwą (S_v) wyznaczono metodą sorpcji błękitu metylenowego wg PN-B-04481:1988, a na podstawie korelacji podanej przez Piaskowskiego (1984) obliczono powierzchnię zewnętrzną (S_e) oraz pojemność wymiany kationowej (*CEC*).

Badania ciśnienia pęcznienia wykonano w aparacie h-200A produkcji firmy *Geonor* metodą stałej objętości próbki (metoda C), pod obciążeniem pionowym 7 kPa, wg normy ASTM D 4546-14. Przygotowanie próbek do badań obejmowało wstępną kompresję past gruntowych, tak aby uzyskać gęstość objętościową szkieletu gruntowego zbliżoną do gruntu w warunkach *in situ*. Rozpoczynając badania od próbki 0% ON, te same warunki kompresji zastosowano dla pozostałych past gruntowych.

Pęcznienie swobodne (FS_{HG}) oznaczono metodą Holtza i Gibbsa (za Grabowską-Olszewską i in., 1998).

Do badań stosowano wodę dejonizowaną. Wszystkie oznaczenia wilgotności prowadzono, biorąc pod uwagę wydłużony czas suszenia gruntu zanieczyszczonego węglowodorami potrzebny do uzyskania stałej masy gruntu (Salimnezhad i in., 2021).

WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

Właściwości gruntu naturalnego (niezanieczyszczonego)

Na podstawie opisu makroskopowego wykonanego wg PN-B-04481:1988 określono, że badany grunt to glina (G) barwy jasnobrażowo-szarej, mało wilgotna, CaCO₃ < 1%, w stanie półzwardym. Według PN-EN ISO 14688-1:2018-5 grunt określono jako il z pyłem (siCl), barwy jasnobrażowo-szarej, bezwapnistej, o konsystencji zwartej. Wartości podstawowych parametrów fizycznych badanego gruntu przedstawiono w tabeli 1.

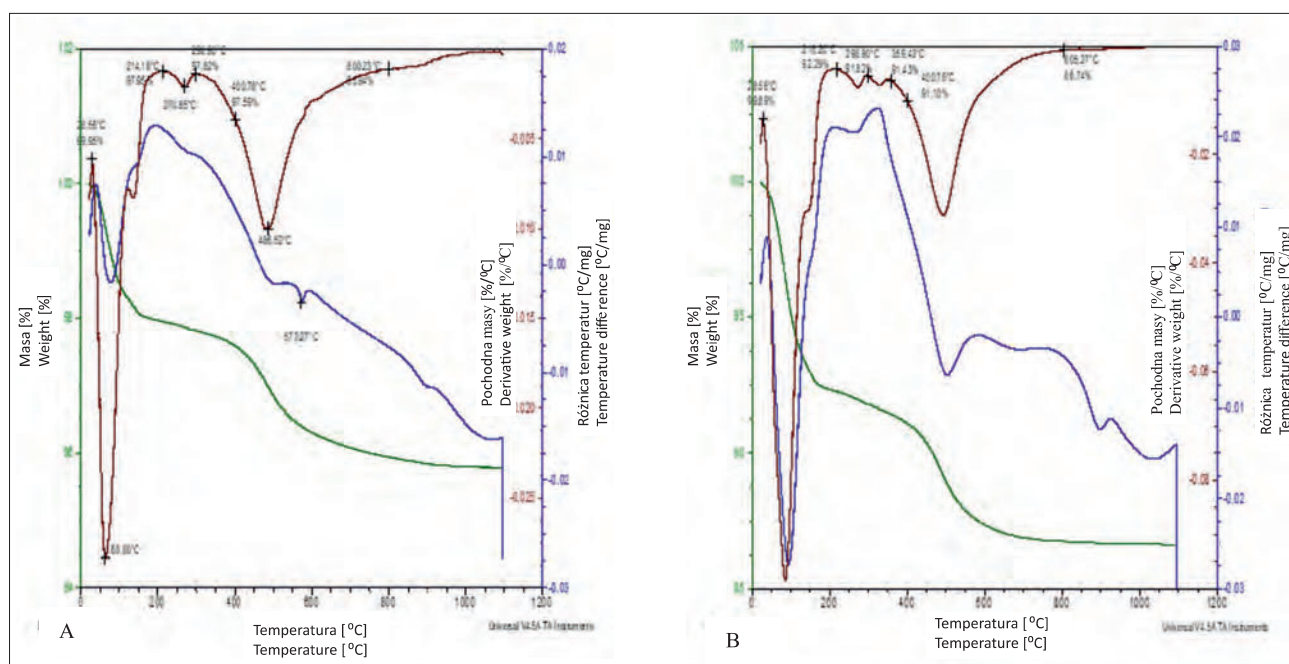
Ilościowy skład mineralny gruntu naturalnego został przedstawiony w tabeli 2, a przykładowe derywatogramy na rycinie 2. Zawartość minerałów ilastych w badanym gruncie waha się od 25,2 do 26,5%. Dominującym minerałem ilastym jest kaolinit, którego zawartość wynosi od 21,6 do 23,3%. W badanym gruncie występuje również illit w ilości od 1,9 do 2,4% oraz beidellit 0,8–1,4%. Ponadto, w badanej próbce stwierdzono obecność goethytu w ilości

Tab. 1. Podstawowe parametry fizyczne badanego gruntu
Table 1. Basic physical parameters of the tested soil

Parametr Parameter	Wartość Value
Wilgotność naturalna Natural moisture content w_n [%]	20,0
Gęstość właściwa szkieletu gruntowego Specific density ρ_s [Mg/m ³]	2,68
Gęstość objętościowa gruntu Bulk density ρ [Mg/m ³]	1,94
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Dry density ρ_d [Mg/m ³]	1,62
Porowatość Porosity n [%]	39,5
Wskaźnik porowatości Void ratio e [–]	0,65
Stopień nasycenia Saturation degree S_r [–]	0,82

Tab. 2. Skład mineralny badanego gruntu
Table 2. Mineralogical composition of the tested soil

Symbol próbki Sample symbol	Skład mineralny [%] Mineral composition [%]						
	Minerały ilaste Clay minerals	W tym: Including:			Goethyt Goethite	Substancja organiczna Organic matter I _{om}	Kwarc i in. Quartz et al.
		Beidellit Beidellite	Kaolinit Kaolinite	Illit Illite			
P1	26,5	0,8	23,3	2,4	1,3	<1	72,3
P2	25,2	1,4	21,6	2,2	1,5	<1	73,3
P3	26,1	1,3	22,9	1,9	1,3	<1	72,6



Ryc. 2. Derywatogramy: **A** – próbki gruntu naturalnego oraz **B** – wyseparowanej frakcji ilowej
Fig. 2. Derivatograms of **A** – the sample with natural composition and **B** – separated clay fraction

1,3–1,5%. Goethyt występuje głównie we frakcjach drobnych, na co wskazują derywatogramy frakcji ilowej (ryc. 2B). Dodatkowo w separowanej próbce frakcji ilowej stwierdzono niewielkie ilości substancji organicznej o zawartości poniżej 1%, najprawdopodobniej w postaci koloidalnych związków próchnicznych, nieoznaczalne w próbce naturalnej. Ilościowo głównym składnikiem badanych próbek jest kwarc, którego zawartość waha się od 72,3 do 73,3%, na co wskazuje pik kwarcowy widoczny na derywatogramach próbki nieseparowanej (ryc. 2A).

Skład granulometryczny

Wyniki badań granulometrycznych wykazały, że badany grunt reprezentuje osady o wysokiej zawartości frakcji pyłowej i piaskowej, co jest zgodne z danymi archiwalnymi dla badanego obszaru (Gradys, 1977). Grunt niezanieczyszczony (próbka 0% ON) został oznaczony jako glina wg klasycznej analizy areometrycznej oraz pył piaszczysty wg analizy mikroagregatowej (tab. 3). Analiza krzywych uziarnienia (ryc. 3A, B) pozwala zaobserwować, że: 1) wpływ zanieczyszczenia olejem napędowym zaznacza się w zakresie rozkładu frakcji pyłowej i ilowej oraz 2) wg analizy mikroagregatowej wpływ obecności związków ro-

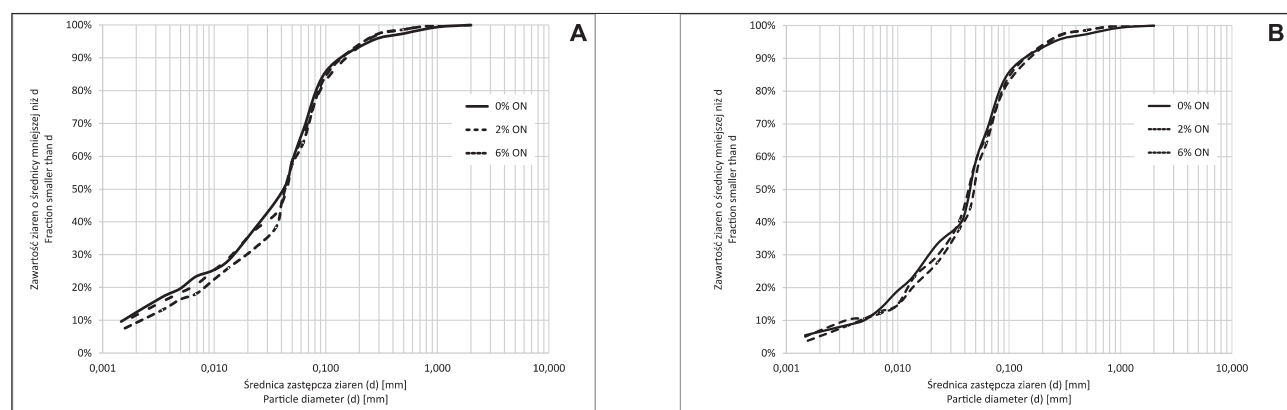
popochodnych zaznacza się słabiej (zbliżony przebieg krzywych uziarnienia) niż w obrazie składu granulometrycznego wg analizy areometrycznej. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości ON do 6% nastąpiła redukcja zawartości frakcji ilowej o maksymalnie ok. 4%, jednak w przypadku badanego gruntu wpłynęło to na zmianę klasyfikacji gruntu z gliny (G) na pył piaszczysty (I_p) wg wyników analizy areometrycznej. Spadek zawartości f_1 można wiązać z efektem agregacji („sklejania”) cząstek gruntowych cząsteczkami węglowodorów o wysokiej lepkości (np. Meegoda, Ratnaweera, 1995; Izdebska-Mucha i in., 2011; Rajabi, Sharifipour, 2019; Karabash i in., 2023). Uwagę zwraca również fakt, że duże nachylenie krzywych uziarnienia na odcinku przebiegu granicy pomiędzy frakcją pyłową i piaskową, tj. 0,05 mm wg PN-B-02480:1986 oraz 0,063 mm wg PN-EN ISO 14688-1:2018-5, spowodowało znaczące różnice (ok. 7–12%) w zawartości tych frakcji oznaczanych wg obu norm (tab. 3). Tendencja przedstawionych zmian uziarnienia gruntów spoistych na skutek zanieczyszczenia związkami ropopochodnymi zgodna jest z danymi literaturowymi, a szerszy przegląd w tym zakresie dla gruntów z rejonu Polski o różnej genezie, litologii i charakterystyce zanieczyszczenia można znaleźć w pracach np. Izdebskiej-Muchy i Trzcńskiego (2021) czy Doba i in. (2022).

Tab. 3. Skład granulometryczny, klasyfikacja gruntu wg PN-B-02480:1986 i PN-EN ISO 14688-1:2018-5 oznaczone metodą areometryczną i mikroagregatową**Table 3.** Particle size distribution, soil classification acc. PN-B-02480:1986 and PN-EN ISO 14688-1:2018-5 determined by the hydrometer and microaggregate methods

Metoda badań Testing method	Zawartość ON ON content [%]	Zawartość frakcji wg PN-B-02480:1986 Fraction content acc. PN-B-02480:1986 [%]				Zawartość frakcji wg PN-EN ISO 14688-1:2018-05 Fraction content acc. PN-EN ISO 14688-1:2018-05 [%]		
		f_p	f_r	f_i	Symbol gruntu Soil symbol	Sa	Si	Cl
Analiza areometryczna Hydrometer analysis	0	41,0	46,5	12,5	G	31,0	56,5	12,5
	2	41,0	47,5	11,5 (-1)*	G	33,0	55,5	11,5
	6	42,0	49,0	9,0 (-3,5)*	Пp	35,0	56,0	9,0
Analiza mikroagregatowa Microaggregate analysis	0	41,0	52,0	7,0	Пp	32,0	61,5	7,0
	2	41,0	52,0	7,0 (0)*	Пp	34,0	59,0	7,0
	6	47,0	48,0	5,0 (-2)*	Пp	35,0	60,0	5,0

* w nawiasach poddano zmianę zawartości frakcji iłowej w stosunku do próbki 0% ON.

* in brackets change in clay content in comparison to sample 0% ON.

**Ryc. 3.** Krzywe uziarnienia wyznaczone metodą areometryczną (A) i metodą mikroagregatową (B)**Fig. 3.** Particle size distribution curves determined by hydrometer (A) and microaggregate methods (B)

Plastyczność

Na podstawie wyników badań granicy plastyczności i płynności można zaobserwować niewielką tendencję rosnącą wartości w_p i w_L próbek gruntu zanieczyszczonego ON, w stosunku do gruntu niezanieczyszczonego, wzrost wartości granic konsystencji wynosi maksymalnie: 2,7 punktów % dla w_p oraz 4,6 punktów % dla w_L (tab. 4). Analogiczną tendencję zmian, wynikającą z matematycznej zależności, wykazały również wyprowadzone parametry obliczeniowe, takie jak: granica skurczalności, wskaźnik plastyczności i aktywność. Na podstawie oznaczonych wartości granic konsystencji oraz przyjmując stałą wartość wilgotności naturalnej gruntu $w_n = 20\%$ (patrz tab. 1), obliczono stopień plastyczności i wskaźnik konsystencji. Stwierdzono, że w badanym zakresie stopnia zanieczyszczenia wszystkie próbki charakteryzowały się stanem półzwardym (wg klasyfikacji PN-B-02480:1986 na podstawie I_L) oraz konsystencją zwartą (wg PN-EN ISO 14688-2:2018-05 na podstawie I_C). Wraz ze wzrostem stopnia zanieczyszczenia wartości I_L wykazywały tendencję spadkową, a wartości I_C rosnące, co wskazuje na zmianę stanu gruntu w kierunku bardziej zwardłego i mniejszą zawartość wody wolnej.

Analiza wpływu stałej dielektrycznej (ϵ) cieczy porowej na zmianę właściwości fizyczno-mechanicznych iłów

o różnym składzie mineralnym wykazały, że redukcja wartości ϵ powoduje redukcją grubości podwójnej warstwy dyfuzyjnej (DDL) i tłumaczy zmianę właściwości gruntów o smektytowym składzie frakcji iłowej (np. Kaya, Fang, 2000; Spagnoli i in., 2011). W badaniach mad o dominującym udziale beidellitu w składzie mineralnym frakcji iłowej, zanieczyszczonej olejem napędowym, stwierdzono redukcję wartości granic konsystencji i wskaźnika plastyczności w stosunku do gruntu czystego (Izdebska-Mucha, Trzciniński, 2021). Jednak w przypadku kaolinitu i illitu teoria DDL nie tłumaczy zmiany parametrów fizyczno-mechanicznych na skutek zmiany chemizmu cieczy porowej (Spagnoli i in., 2011). Wielu badaczy wykazało, że wartości granicy płynności i wskaźnika plastyczności dla gruntów o dominującym udziale kaolinitu lub illitu wykazują tendencję rosnącą na skutek zanieczyszczenia związkami organicznymi o niskiej stałej dielektrycznej, w tym węglowodorami ropopochodnymi (Spagnoli i in., 2011; Khorravi i in., 2013), co jest zgodne jest prawidłowościami stwierdzonymi w niniejszej pracy. Podobnie badania gliny lodowcowej wykształconej jako glina piaszczysta o dominującym udziale illitu i kaolinitu w składzie mineralnym frakcji iłowej wykazały wzrost wartości granic konsystencji i wskaźnika plastyczności w stosunku do wartości tych parametrów dla gruntu niezanieczyszczonego (Izdebska-

Tab. 4. Granice konsystencji i obliczeniowe parametry plastyczności badanych próbek gruntu
Table 4. Atterberg limits and calculated parameters of plasticity of the tested soil samples

Zawartość ON ON content [%]	Granica plastyczności Plastic limit w_p [%]	Granica płynności Liquid limit w_L [%]	Granica skurczalności Shrinkage limit w_s [%]	Wskaźnik plastyczności Plasticity index I_p [%]	Stopień plastyczności Liquidity index I_L [-]	Wskaźnik konsystencji Consistency index I_c [-]	Aktywność Activity A [-]
0	20,1	40,0	15,2	19,9	-0,01	1,01	1,6
2	20,6	44,6	14,6	24,0	-0,02	1,02	2,1
6	22,8	43,6	17,7	20,7	-0,14	1,14	2,3

-Mucha i in., 2011), a zakres zmian był zbliżony do wyników uzyskanych w niniejszej pracy.

Można zauważyć, że badany grunt, wykształcony pod względem granulometrycznym jako glina o niskiej zawartości frakcji ilowej (12,5%), składający się głównie z kwarcu i kaolinitu, wykazuje stosunkowo wysokie wartości wskaźnika plastyczności i aktywności. Według klasyfikacji Skemptona z 1953 r. (za: Head, 1992) badany grunt można zaklasyfikować jako normalnie aktywny, a wartości A wykazują tendencję rosnącą wraz ze wzrostem zanieczyszczenia i kształtują się na poziomie odpowiadającym gruntom smektytowym. Być może te podwyższone wartości są efektem obecności koloidalnej substancji organicznej w składzie frakcji ilowej gruntu, która zwiększa hydrofilność gruntu i wykazuje wysokie zdolności sorpcyjne w stosunku do zanieczyszczeń organicznych (np. Lee i in., 1989; Ukalska-Jaruga i in., 2015).

Właściwości sorpcyjne i pęcznienie

Badania sorpcji błękitem metylenowym wykazały, że wraz ze wzrostem zanieczyszczenia wzrosły wartości parametrów sorpcyjnych gruntu, jednak różnice te są niewielkie, w szczególności pomiędzy próbką 2 i 6% ON (tab. 5). Najniższą wartością pojemności wymiany kationowej 11,4 cmol/kg charakteryzowała się próbka niezanieczyszczona, próbka 2% ON uzyskała najwyższą wartość, tj. 13,4 cmol/kg, a próbka 6% ON – 13,1 cmol/kg. Wzrost zdolności sorpcyjnych gruntu zanieczyszczonego względem błękitu metylenowego został również stwierdzony w modelowych badaniach gliny lodowcowej oraz iltu neogennego zanieczyszczonego olejem napędowym (Dobak i in., 2022).

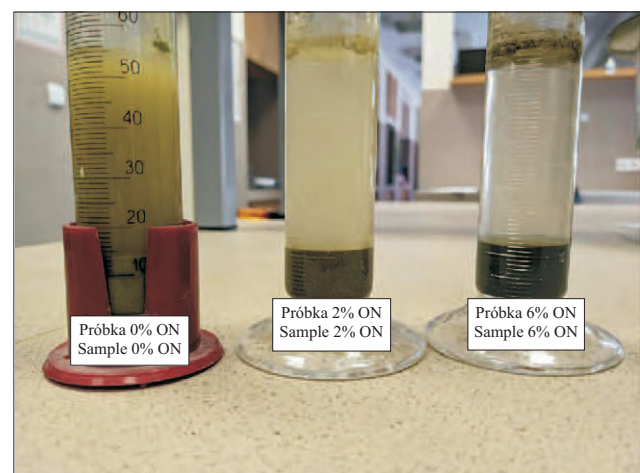
Tab. 5. Właściwości sorpcyjne badanych gruntów oznaczone metodą sorpcji błękitu metylenowego

Table 5. Sorption properties of the tested soils determined by the methylene blue method

Parametr Parametr	Zawartość oleju napędowego Diesel fuel content		
	0% ON	2% ON	6% ON
Pojemność sorpcyjna Methylene blue capacity MBC [g/100g]	4,24	5,02	4,90
Powierzchnia właściwa Specific surface area S_t [m ² /g]	89	105	103
Pojemność wymiany kationowej Cation exchange capacity CEC [cmol/kg]	11,4	13,4	13,1
Powierzchnia zewnętrzna External surface area S_e [m ² /g]	18,5	21,3	20,9

Wyniki badań pęcznienia swobodnego wykazały, że badany grunt nie wykazuje właściwości ekspansywnych. Próbka 0% ON charakteryzowała się najwyższą wartością $FS_{HG} = 40\%$. Dla próbki przy zanieczyszczeniu 2% ON odnotowano wartość pęcznienia 10%, a przy 6% zanieczyszczeniu – 20%. Obserwacja próbek w cylindrach sedymentacyjnych po zakończeniu badania (ryc. 4) pozwala zauważyć, że w próbce 0% ON nad osadem w zawieszynie występują jeszcze zdyspergowane cząstki koloidalne, podczas gdy w próbce 2% ON zawieszina jest wyraźnie bardziej przejrzysta, a w próbce 6% ON cały materiał gruntowy uległ sedymentacji i powyżej widoczny jest słup czystej wody. Obecność cząsteczek węglowodorów na powierzchni szkieletu mineralnego powoduje flokulację cząstek ilowych i szybsze tempo ich sedymentacji, jak również ogranicza adsorpcję wody na szkielecie gruntowym. W efekcie w gruncie zanieczyszczonym olejem napędowym zaobserwowano spadek zawartości frakcji ilowej, pełną sedymentację gruntu w zawieszynie (próbka 6% ON) oraz niższe wartości FS_{HG} w porównaniu do próbki gruntu czystego. W próbkach gruntu zanieczyszczonego zróżnicowanie objętości osadu po zakończeniu pęcznienia (i wynikowej wartości FS_{HG}) jest raczej efektem „pulchności” struktury sedymentującego gruntu o zróżnicowanej zawartości węglowodorów, aniżeli procesu pęcznienia minerałów iltowych i substancji organicznej na skutek sorpcji wody.

Wyniki badań ciśnienia pęcznienia wykazały, że badany grunt niezanieczyszczony (0% ON) charakteryzuje się niską wartością ciśnienia pęcznienia = 15,5 kPa, co jest zgodne z jego charakterystyką litologiczną. W efekcie zastosowania jednakowych warunków komprymacji zarówno



Ryc. 4. Pęcznienie swobodne badanych gruntów oznaczone metodą Holtza i Gibbsa
Fig. 4. Free swelling of the tested soils determined by Holtz and Gibbs method

Tab. 6. Wyniki badań ciśnienia pęcznienia
Table 6. Results of swelling pressure tests

Parametr Parameter	Jednostka Units	Zawartość oleju napędowego Diesel fuel content		
		0% ON	2% ON	6% ON
Ciśnienie pęcznienia Swelling pressure σ_{sp}	kPa	15,5	22,25	24,0
Czas do osiągnięcia max Time to reach max σ_{sp}	min	15	10	5
Wilgotność początkowa Initial moisture content w_0	%	1,28	4,01	6,90
Wilgotność końcowa Final moisture content w_f	%	31,0	33,06	28,30
Wilgotność potrzebna do nasycenia Adsorbed water content Δw	%	29,2	29,05	21,40
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego inicjalna Initial dry density ρ_{d0}	Mg/m ³	1,59	1,55	1,51
Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego końcowa Final dry density ρ_{df}	Mg/m ³	1,42	1,38	1,34

dla próbki 0% ON, jak i dla past zawierających 2 i 6% ON, wartości początkowej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wyniosły odpowiednio: 1,59; 1,55 i 1,51 mg/m³. Pomimo niższych wartości ρ_{d0} i wyższych w_0 , stwierdzono jednak, że zanieczyszczone próbki charakteryzowały się nieznacznie wyższym σ_{sp} niż próbka niezanieczyszczona (tab. 6). Najwyższe wartości σ_{sp} stwierdzono dla próbki zanieczyszczonej 6% ON i wyniosło ono 24,0 kPa, natomiast dla próbki zanieczyszczonej 2% ON – 22,3 kPa. Zaobserwowano również, że czas, po jakim grunt osiągnął maksimum ciśnienia pęcznienia, był krótszy dla próbek zanieczyszczonych niż dla próbki 0% ON (ryc. 5). Najszybciej najwyższe wartości ciśnienia pęcznienia uzyskała próbka 6% ON i osiągnęła je po 5 minutach, próbka zanieczyszczona 2% ON – po 10 min, natomiast próbka 0% ON – po 15 min. Szybsze tempo wzrostu ciśnienia pęcznienia

może być związane z niższą gęstością objętościową próbek gruntu zanieczyszczonego, co ułatwia szybszą penetrację wody w strukturę gruntu.

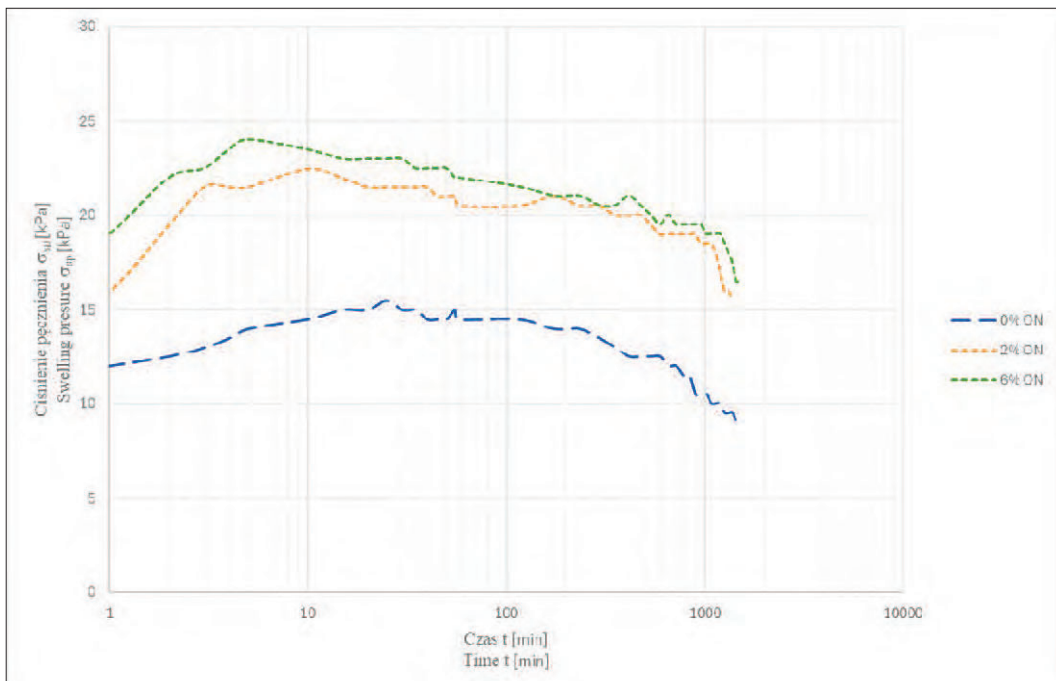
Redukcja ilości wody zaadsorbowanej przez próbki 2 i 6% ON podczas badania ciśnienia pęcznienia (tab. 6) wskazuje, że to nie wzrost zdolności sorpcyjnych gruntu zanieczyszczonego w stosunku do wody jest odpowiedzialny za wzrost ciśnienia pęcznienia. Wzrost wartości σ_{sp} nie powinien być zatem pochopnie interpretowany jako wzrost zdolności ekspansyjnych gruntu zanieczyszczonego, co potwierdzają wyniki badań pęcznienia swobodnego. Uzyskane wyniki badań ciśnienia pęcznienia wskazują raczej, że obecność w przestrzeni porowej fazy węglowodorowej nie mieszającej się z wodą oraz węglowodorowo-mineralna struktura pasty wpływają na zmianę warunków procesu pęcznienia osmotycznego,

w porównaniu do gruntu niezanieczyszczonego. Dokładne wyjaśnienie tego wpływu wymaga głębszej analizy fizykochemicznej na poziomie mikrostrukturalnym.

Zaobserwowane różnice wartości charakterystyk właściwości sorpcyjnych i pęcznienia badanych gruntów są niewielkie, niemniej sygnalizują wyraźne zmiany właściwości gruntu na skutek zanieczyszczenia związkami ropopochodnymi.

PODSUMOWANIE

Badaniom poddano zastoiskowe osady neogeńskie z rejonu wsi Dobre, wykształcone pod względem granulometrycznym jako glina, o kaolinitowym składzie frakcji ilowej.



Ryc. 5. Krzywe ciśnienia pęcznienia badanych gruntów
Fig. 5. Swelling pressure curves of the tested soils

Analizę wpływu związków ropopochodnych na zmianę właściwości badanego gruntu przeprowadzono na modelowych próbkach zanieczyszczonych w warunkach laboratoryjnych olejem napędowym w ilości 2 i 6% w stosunku do suchej masy gruntu. Badania prowadzono w porównaniu do referencyjnej próbki gruntu niezanieczyszczonego (0% ON).

Analizy granulometryczne zanieczyszczonego gruntu wykazały, że wraz ze wzrostem zawartości ON nastąpił spadek zawartości frakcji ilowej, który można wiązać z procesem agregacji pokrytych węglowodorami cząstek minerałów ilastych. W przypadku zanieczyszczenia 6% ON spowodowało to nawet zmianę klasyfikacji gruntu z gliny (G) na pył piaszczysty (Πp). Większe różnice zmiany uziarnienia gruntu stwierdzono z zastosowaniem metody areometrycznej niż metody mikroagregatowej.

Zanieczyszczone pasty gruntowe wykazały wzrost wartości granic konsystencji, wskaźnika plastyczności, wskaźnika konsystencji i aktywności oraz spadek wartości stopnia plastyczności w stosunku do próbki gruntu niezanieczyszczonego.

W badaniach właściwości sorpcyjnych gruntu metodą sorpcji błękitu metylenowego stwierdzono nieznaczny wzrost wartości pojemności sorpcyjnej MBC, pojemności wymiany kationowej i powierzchni właściwej próbek gruntu zanieczyszczonego w stosunku do gruntu czystego.

Badania parametrów sorpcji i pęcznienia potwierdziły, że badany grunt nie wykazuje zdolności ekspansyjnych, co zgodne jest z jego wykształceniem litologicznym. Zanieczyszczone próbki gruntowe wykazały niższe wartości pęcznienia swobodnego, a wyższe ciśnienia pęcznienia, w stosunku do gruntu czystego. Jednak obserwacja próbek po badaniu pęcznienia i analiza wilgotności gruntu po badaniu ciśnienia pęcznienia sugerują, że na skutek obecności węglowodorów w strukturze gruntu jego potencjał zdolności sorpcyjnych i zmian objętościowych ulega redukcji.

Przeprowadzone badania pokazały, że już nawet stosunkowo niewielki stopień zanieczyszczenia gruntu związkami ropopochodnymi spowodował zmianę jego właściwości geologiczno-inżynierskich. Należy podkreślić, że wyniki przedstawionych badań sygnalizują kierunek zmian, których można się spodziewać w gruncie w sytuacji zanieczyszczenia i mogą być odnoszone przede wszystkim do podłoża o podobnej litologii i rodzaju polutanta.

Z uwagi na zakres danych, prezentowane wnioski wymagają badań poszerzających rozpoznanie zachowania się gruntu przy wyższym stopniu zanieczyszczenia, jak również dla zanieczyszczeń innymi węglowodorami (np. benzyny czy oleje silnikowe).

Wyniki prowadzonych badań mają istotne znaczenie przy planowaniu działań remedacyjnych i modelowaniu migracji zanieczyszczeń (wpływ na parametry filtracyjne gruntów) oraz przy ocenie wpływu zanieczyszczeń węglowodorami na parametry mechaniczne gruntów (ściśliwość, wytrzymałość).

Autorzy serdecznie dziękują Recenzentom za rzetelną ocenę niniejszej pracy, konstruktywne i cenne uwagi i komentarze.

LITERATURA

ASTM D 4546-14 – Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils.
DOBAK P., IZDEBSKA-MUCHA D., STAJSZCZAK P., WÓJCIK E., KIELBAŚIŃSKI K., GAWRIUCZENKOW I., SZCZEPAŃSKI T.,

ZAWRZYKRAJ P., BĄKOWSKA A. 2022 – Effects of hydrocarbon contamination on the engineering geological properties of Neogene clays and Pleistocene glacial tills from Central Poland. *Act. Geol. Pol.*, 72 (4): 529–555.

GAWRIUCZENKOW I. 2011 – Ocena ekspansyjności ilów plioceńskich z rejonu Dobrego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446 (2): 273–276.

GAWRIUCZENKOW I., WÓJCIK E. 2013 – Porównanie właściwości ekspansyjnych ilów neogeńskich z Mazowsza. *Prz. Geol.* 61 (4): 243–247.

GAWRIUCZENKOW I., WÓJCIK E. 2018 – Prediction of swell pressure in Neogene clays from Warsaw, based on the swell index. *Geol., Geoph., Environ.*, 44 (2): 219–229.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1998 – Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.

GRADYS A. 1977 – Dokumentacja geologiczna w kategorii C2 złoża surowca ilastego do produkcji cienkościennych elementów ceramiki budowlanej w rejonie Tadeuszów–Rudzienko. *Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol.*, nr inw. 12 321, Warszawa.

HAGHSHENO H., ARABANI M. 2022 – Geotechnical properties of oil-polluted soil: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 29 (22): 32670–32701; doi: 10.1007/s11356-022-19418-1

HARSH G., PATEL A., HIMANSHU B., TIWARI P. 2016 – Effect of rate of crude oil contamination on index properties and engineering properties of clays and sands. *Indian J. Sci. Technol.*, 9 (30): 1–4.

HEAD K.H. 1992 – Manual of soil laboratory testing. Vol. 1, Soil classification and compaction tests, London.

IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J. 2007 – Zmiany mikrostrukturalne gliny lodowcowej spowodowane zanieczyszczeniem olejem napędowym. *Geologos*, 11: 463–471.

IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J. 2011 – Właściwości geologiczno-inżynierskie i mikrostrukturalne glin lodowcowych zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 469–476.

IZDEBSKA-MUCHA D., SZYSZKO C., TRZCIŃSKI J. 2011 – Właściwości geologiczno-inżynierskie i mikrostrukturalne glin lodowcowych zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 459–468.

IZDEBSKA-MUCHA D., WÓJCIK E. 2011 – Analiza parametrów skurczalności gruntów spoistych według różnych norm. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446 (2): 321–327.

IZDEBSKA-MUCHA D., TRZCIŃSKI J. 2021 – Clay soil behaviour due to long-term contamination by liquid petroleum fuels: microstructure and geotechnical properties. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 80: 3193–3206.

KARABASH Z., AL-OBAYDI M.A., AWAD M.A., AL-KHASHAB M.N. 2023 – Geotechnical properties of clay soil contaminated with different types of oil. *Geotech. Geol. Eng.* 41: 2677–2689; <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02420-w>

KAYA A., FANG H.-Y. 2000 – The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils. *Can. Geotech. J.*, 37: 943–950.

KHAMEHCHIYAN M., CHARKHABI A.H., TAJIK M. 2007 – Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Eng. Geol.*, 89: 220–229.

KHOSRAVI E., GHASEMZADEH H., SABOUR M.R., YAZDANI H. 2013 – Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Eng. Geol.*, 166: 11–16.

KUMOR M.K. 2016 – Hy ekspansywne podłoża budowlanego Bydgoszczy. Wybrane problemy geotechniczne. Wydaw. Uczel. UTP w Bydgoszczy, 235.

LEE J.F., CRUM J.R., BOYD S.A. 1989 – Enhanced retention of organic contaminants by soils exchanged with organic cations. *Environ. Sci. Technol.*, 23 (11): 1365–1372.

LI R., ZHANG S., LI R., BAI W., WANG L. 2022 – Experimental study on mechanical behaviors of loess based on two different modes of oil contamination. *Geofluids*, article ID 6411520, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/6411520>

MEEGODA J.N., RATNAWEERA P. 1995 – Treatment of oil-contaminated soils for identification and classification. *Geotech. Test. J.*, 18: 41–49.

MYŚLIŃSKA E. 2016 – Laboratoryjne badania gruntów i gleb. Wydaw. UW.

NAZIR A.K. 2011 – Effect of motor oil contamination on geotechnical properties of over consolidated clay. *Alex. Eng. J.*, 50 (4): 331–335.

OLUREMI J.R., OSUOLALE O.M. 2014 – Oil contaminated soil as potential applicable material in civil engineering construction. *J. Environ. Earth. Sci.*, 4: 87–99.

PIASKOWSKI A. 1984 – Właściwości sorpcyjne i powierzchnia właściwa polskich gruntów. Badania nad sorpcją błękitu metylenowego. *Arch. Hydrotech.*, 31 (3): 297–314

PN-B-02480:1986 – Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.

PN-B-04481:1988 – Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.

PN-EN ISO 14668-1:2018-5 – Badania geotechniczne – Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów – Część 1: Oznaczenie i opis. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa

PKN-CEN ISO/TS 17892-4:2004 – Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów część 4: Oznaczenie składu granulometrycznego.

RAJABI H., SHARIFIPOUR M. 2019 – Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review. Bull. Eng. Geol. Environ., 78: 3685–3717.

SAEED H., NALBANTOGLU Z., UYGAR E. 2024 – A comprehensive review of hydrocarbon contaminated soil behavior, geotechnical properties and potential remediation. Soil Sediment Contam.: An Inter. J., 1–45; <https://doi.org/10.1080/15320383.2024.2395952>

SALIMNEZHAD A., SOLTANI-JIGHEH H., SOORKI A.A. 2021 – Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. J. Rock Mech. Geotech. Eng., 13 (3): 653–670; <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>

SCHULTZE E., MUHS H. 1967 – Bodenuntersuchungen f r Ingenieurbauten. Verlag. Berlin/Heidelberg/New York.

SINGH S.K., SRIVASTAVA R.K., JOHN S. 2009 – Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation. Can. Geotech. J., 46 (9): 1077–1083.

SPAGNOLI G., FERNANDEZ-STEEGER T., FEINENDEGEN M., AZZAM R., STANJEK H. 2011 – Influence of the dielectric constant, electrolyte concentration and pH of the pore fluids on the shear strength of monomineralic clays. Riv. Ital. di Geotec., 58 (3): 11–24.

STAJSZCZAK P. 2021 – Zmiany właściwości filtracyjnych mieszanki gruntowej il-piasek na skutek zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi w aspekcie mineralnych barier izolacyjnych. Prz. Geol. 69 (1): 33–42.

STAJSZCZAK P. 2023 – Wpływ zanieczyszczenia produktami ropopochodnymi na zmiany ścisłości ilów mio-plioceńskich z rejonu Bud Mszczonowskich w warunkach ciągłego przyrostu obciążenia. Prz. Geol. 71 (9): 447–460.

SURYGAŁA J., ŚLIWKA E., 1999 – Wycieki ropy naftowej. Przem. Chem., 78: 323–325.

UKALSKA-JARUGA A., SMREZAK B., KLIMKOWICZ-PAWLAS A., MALISZEWSKA-KORDYBACH B. 2015 – Rola materii organicznej w procesach akumulacji trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO) w glebach. Pol. J. Agron., 20: 15–23.

WICHROWSKI Z. 1981 – Studium mineralogiczne ilów serii poznańskiej. Arch. Mineral., 37 (2): 93–196. www.epc.shell.com (dostęp: 21.05.2024 r.).

WYRWICKI R. 1996 – Analiza derywatograficzna. [W:] Kościwko H., Wyrwicki R. (red.), Metodyka badań kopalni ilastych. Państw. Inst. Geol., Warszawa–Wrocław: 56–76.

Praca wpłynęła do redakcji 29.05.2024 r.
Akceptowano do druku 16.12.2024 r.



8.WPGI
2024

ZESZYT
ABSTRAKTÓW

 Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna
  BDGI
BUDOWLANOŚĆ I GOSPODARSTWO WODNE
  MPGN
MAGAZYN PRACOWNIKÓW
GOSPODARSTWA WODNEGO
  MgiP50k
MAGAZYN PRACOWNIKÓW
GOSPODARSTWA WODNEGO
  CBGS
CENTRUM BADAŃ
GEOL. I SKAL
 

Dofinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
I GOSPODARKI WODNEJ