

Charakterystyka właściwości geotechnicznych utworów lessowych Płaskowyżu Nałęczowskiego

Krzysztof Nepelski¹, Zbigniew Frankowski²



K. Nepelski



Z. Frankowski

Geotechnical properties of loess deposits of the Nałęczów Plateau. Prz. Geol., 72: 816–831; doi: 10.7306/2024.71

A b s t r a c t. The paper presents the characteristics of geotechnical properties of loess occurring in the Nałęczów Plateau. The physical and mechanical properties of aeolian loess from the Kazimierz Dolny, Nałęczów and Lublin regions, obtained from field and laboratory tests, are compared. It has been shown that field methods, like static sounding CPT/CPTU, dilatometric DMT, vane FVT and pressuremetric PMT tests, are very useful for assessing the loess subsoil for construction purposes. The summary provides guidelines for the scope of loess subsoil tests and for design.

Keywords: CPTU, DMT, loess, soil stiffness

Lessy to grunty specyficzne, geologicznie są to utwory młode, tworzące piękne krajobrazy, lecz inżyniersko są problematyczne i wymagają odpowiedniego podejścia. Parametry wytrzymałościowe lessów wysoczyznowych wskazują, że są to generalnie grunty nośne. Wiadomo o tym od dawna, gdyż na lessach posadawiano budynki i wznoszono całe miasta, które przetrwały setki lat. Zniszczenia, które wystąpiły po II wojnie światowej, dotyczące m.in. Sandomierza, Jarosławia, Lublina, nie zostały spowodowane przekroczeniem nośności wskutek zwiększonego obciążenia, a wywołało je działanie wody. Stąd też dla gruntów pylastych, a szczególnie lessów, nie tylko parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe są istotne w procesie projektowania, lecz także ocena zapadowości i deformacji filtracyjnych, gdyż to działanie wody jest główną przyczyną powodującą awarie, a nawet katastrofy. W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych przez autorów na obszarze Płaskowyżu Nałęczowskiego, będącym jednym z regionów o największym nagromadzeniu lessów w Polsce.

CZĘŚĆ HISTORYCZNA

Badania geologiczne i geologiczno-inżynierskie są realizowane na obszarze Płaskowyżu Nałęczowskiego od początku lat 50. ub.w. Badania właściwości fizyczno-mechanicznych lessów występujących w tym rejonie (między Kazimierzem Dolnym a Nałęczowem) przeprowadzono już w latach 1954–1956 (Malinowski, 1959). Dotyczyły rozpoznania obszaru na potrzeby regulacji Wisły i projektowanej zapory w Kazimierzu Dolnym. Próbkę lessu do badań laboratoryjnych pobrano z 14 otworów i odkrywek: Kwaskowa Góra i Łopatki-Cegielnia. Badania uziarnienia i składu minerałów ciężkich lessu młodszego z okolic Lublina opisali Maruszczak i Racinowski (1976). Krótka charakterystykę gruntów występujących w Lublinie, ze wskazaniem przydatności pokrywy lessowej dla celów

budowlanych, w tym rodzaju posadowienia i fundamentowania przedstawili Grabowski i Witkowski (1987). Właściwości litologiczne lessów we wschodniej części Płaskowyżu Nałęczowskiego zostały opisane przez Harasimiuka (1986).

Ukształtowanie pokrywy lessowej i erozji wąwozowej w zachodniej części Płaskowyżu Nałęczowskiego przedstawili Harasimiuk i Henkiel (1978) oraz Gardziel i in. (2006). W rejonie Kazimierza Dolnego erozję wąwozową w lessach opisali Frankowski i Grabowski (2006), a ocenę stateczności wąwozów Frankowski i in. (2009). Problemy związane z posadowieniem obiektów na lessach Płaskowyżu Nałęczowskiego omówili Gazda i Franus (2013). Charakterystyka geotechniczna lessów występujących w Lublinie została podana przez Nepelskiego (2021a).

CHARAKTERYSTYKA POKRYWY LESSOWEJ PŁASKOWYŻU NAŁĘCZOWSKIEGO

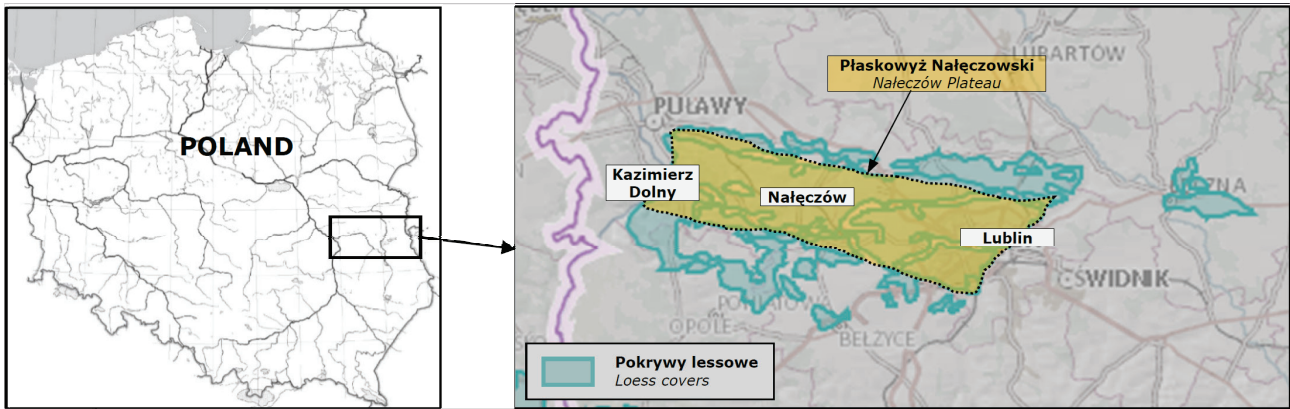
Płaskowyż Nałęczowski

Płaskowyż Nałęczowski to region geograficzny we wschodniej Polsce (ryc. 1), za jego naturalne granice przyjmuje się doliny: Wisły na wysokości Kazimierza Dolnego na zachodzie oraz Bystrzycy na wysokości Lublina na wschodzie. Płaskowyż głównie pokrywają lessy, które powstały podczas zlodowacenia północnopolskiego (zlodowacenie Wisły), ale nie jest to ciągła pokrywa, lecz różnej wielkości płyty, których miąższość zmienia się i wynosi od kilku do ok. 30 m. W rejonie występują liczne formy erozyjne, jak wąwozy i suche doliny (Harasimiuk, 1987).

Maksymalna miąższość lessów występuje w zachodniej części płaskowyżu, w rejonie Kazimierza Dolnego, gdzie średnio wynosi ona od 20 m do 30 m. Generalnie najmniejsza miąższość pokrywy lessowej występuje w centralnych częściach wyniosłości podłoża, a maksymalna na jej zboczach. W profilu na Kwaskowej Górze gleby kopal-

¹ Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin; k.nepelski@pollub.pl; ORCID ID: 0000-0001-9495-6457.

² Emerytowany pracownik Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego; frankowski.zbyszek@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-5468-9558.



Ryc. 1. Zasięg Płaskowyżu Nałęczowskiego
Fig. 1. Nałęczów Plateau range

ne rozdzielają poziomy lessów młodszych dolnych i górnych. Lessy młodsze górne są węglanowe i niezwiertzałe (Dowgiało, 2015). W rejonie Nałęczowa pokrywy lessowe występują równoleżnikowo, o miąższości ok. 12–15 m, budując wierzchovinę Płaskowyżu Nałęczowskiego. Powstały w warunkach klimatu peryglacialnego, przy północno-wschodnim kierunku nawiewania pyłów (Buraczyński i in., 2013). W rejonie Lublina zaleganie utworów lessowych ogranicza rzeka Bystrzyca, a maksymalne ich miąższości, dochodzące do 25 m, występują na południe od doliny Ciemięgi (Harasiumiuk, Henkiel, 1982). W holocenie pokrywa lessowa uległa przeobrażeniom, głównie w strefie przypowierzchniowej, m.in. w wyniku erozji wąwozowej na stokach oraz powierzchniowej na terenach gospodarowanych przez człowieka.

Grupy facjalne lessów

Głównym czynnikiem tworzącym lessy był wiatr, jednak często inne procesy występujące równolegle lub w późniejszym okresie miały znaczący wpływ na jego parametry. Do tej grupy genetycznej zalicza się zarówno grunty o genezie „czysto” eolicznej, jak również lessopodobne, które powstały przy współdziałaniu innych czynników lub zostały częściowo przeobrażone w późniejszych stadiach. Podział i charakterystykę lessów Lubelszczyzny wykonali m.in. Malinowski (1971) oraz Maruszczak (2000). Klasyfikacje te szczegółowo dzielą grunty lessowe w zależności od czynników genetycznych, składu granulometrycznego oraz ukształtowania terenu, jednak na cele inżynierskie można to uprościć i sprowadzić do trzech głównych grup facjalnych: lessów typowych – eolicznych, oraz lessopodobnych: eoliczno-deluwialnych i eoliczno-aluwialnych (Nepelski, 2021a).

Biorąc pod uwagę przyjęty podział, budowa pokrywy lessowej Płaskowyżu Nałęczowskiego jest zasadniczo powtarzalna (ryc. 2). Górną, przypowierzchniową strefę, przeciętnie 1–2-metrową, stanowią lessy eoliczno-deluwialne. Są to grunty, które pierwotnie zostały akumulowane przez wiatr w formie lessów typowych, a następnie zostały redeponowane lub przeobrażone przez florę i faunę, dlatego najczęściej są ciemniejsze, barwy brązowej lub ciemnobrązowej. Zauważalne są także liczne smugowania oraz cienkie warstwowania. Pod względem granulometrycznym utwory te są zazwyczaj klasyfikowane jako gliny pylaste z pogranicza pyłów. Mają wyższą wilgotność i stan twardoplastyczny bądź plastyczny.

Główne podłoże tworzą lessy typowe, facji eolicznej. Ich miąższość osiąga do kilkunastu metrów. W ujęciu granulometrycznym są to pyły, makroskopowo jednorodne, sporadycznie z cienkimi przewarstwieniami piaszczystymi, zazwyczaj barwy jasnobrązowej lub żółtej, o niskiej wilgotności w stanie od zwartego lub twardoplastycznego.

Najgłębiej, poniżej lessów typowych, występują lessy zaliczane do grupy eoliczno-aluwialnej, które są ułożone bezpośrednio na podłożu zwietrzelinowo-skalistym lub wodnolodowcowych piaskach. Facja ta jest dużo bardziej niejednorodna, występująca w postaci glin i glin pylastych lub pyłów z przewarstwieniami piasków i piasków pylastych. Opisana duża zmienność uwidacznia się również w sondowaniach.

W niniejszym artykule skupiono się na charakterystyce lessów typowych, które stanowią główne podłoże w strefie posadowienia budynków na Płaskowyżu Nałęczowskim.

CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH LESSÓW

Wykaz symboli stosowanych w tekście (pogrupowane wg badań)

CPT(CPTU) – sondowanie statyczne (z pomiarem ciśnienia wody w porach):

q_c (q_{cE}/q_{cM}) – opór stożka (pomiar stożkiem elektrycznym/mechanicznym),

q_t – skorygowany opór stożka,

q_n – opór stożka netto,

f_s (f_{sE}/f_{sM}) – tarcie na pobocznicy (pomiar stożkiem elektrycznym/mechanicznym),

u_2 – ciśnienie wody w porach,

N_{kt} – współczynnik empiryczny do wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie,

R_f – współczynnik tarcia,

α_m – współczynnik empiryczny do wyznaczenia modułu ściśliwości,

β – współczynnik przejścia stożków (mechaniczny/elektryczny).

DMT – test dylatometrem płaskim:

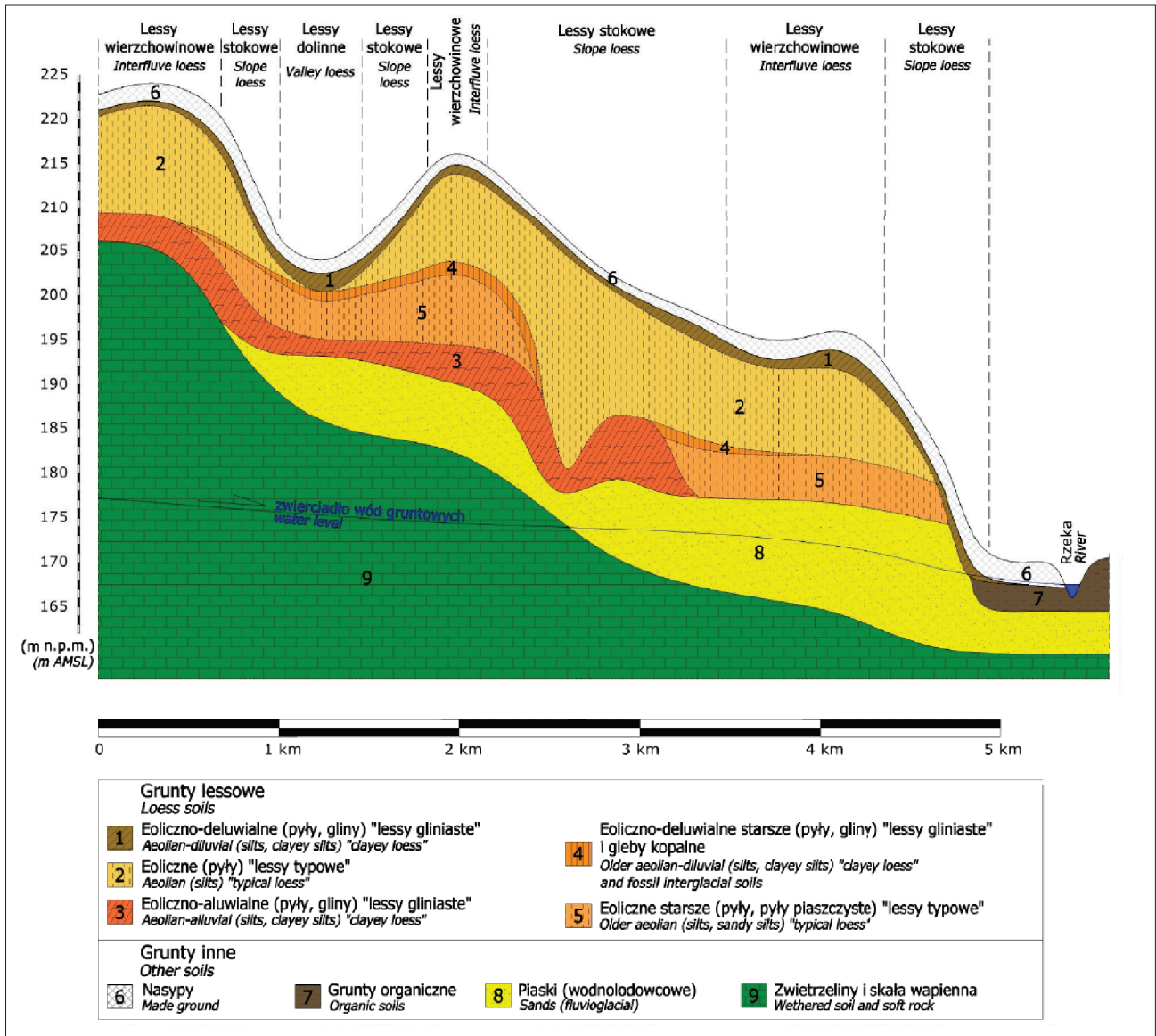
E_D – moduł dylatometryczny,

I_D – wskaźnik materiałowy (badanie DMT),

K_D – wskaźnik parcia bocznoego,

M_{DMT} – moduł ściśliwości wyznaczony w badaniu DMT,

$p_{0,DMT}$ – pierwszy skorygowany odczyt ciśnienia z pomiaru DMT.



Ryc. 2. Schematyczna budowa pokrywy lessowej na Lubelszczyźnie na przykładzie rejonu Lublina (na podstawie Nepelskiego, 2021a, 2023)

Fig. 2. Schematic structure of the loess cover in the Lublin region (based on Nepelski, 2021a, 2023)

PMT – badanie presjometrem Menarda:

p_L – naprężenie graniczne,

pf – naprężenie pełzania,

p_0 – parcie boczne gruntu,

E_p – moduł presjometryczny.

Pozostałe symbole:

c_u – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu,

$c_{u,CPTU}$ – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu wyznaczona w badaniu CPTU,

$c_{u,DMT}$ – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu wyznaczona w badaniu DMT,

$c_{u,PMT}$ – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu wyznaczona w badaniu PMT,

w_n – wilgotność naturalna,

w_L – granica płynności,

w_p – granica plastyczności,

u_0 – ciśnienie wody,

G_0 – moduł odkształcenia postaciowego (ścianania),

I_L – stopień plastyczności,

M_0 – moduł ściśliwości edometryczny (pierwotny),

V_S – prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej w gruncie,

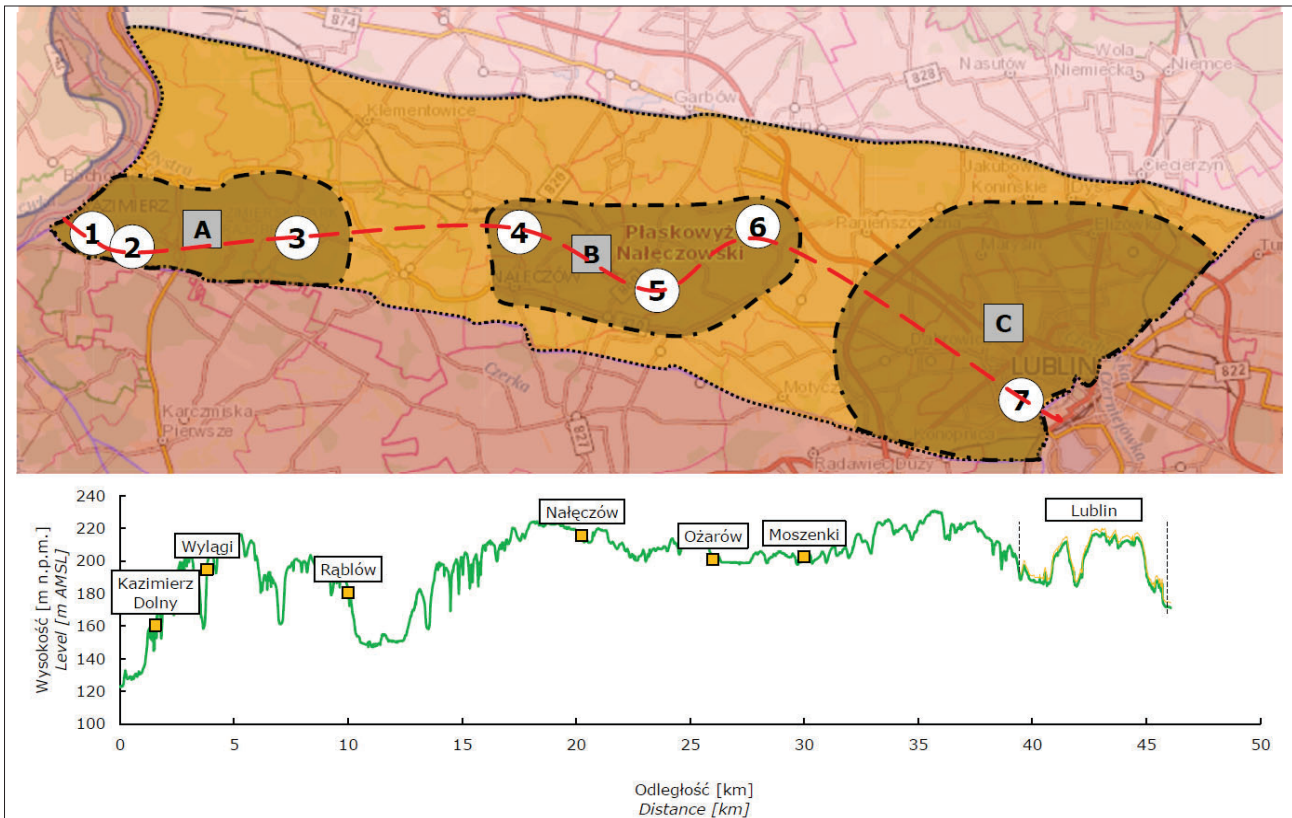
σ_{v0} – naprężenie pionowe,

σ'_{v0} – naprężenie pionowe (efektywne),

ρ_d – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego.

Parametry geotechniczne są identyfikowane w badaniach laboratoryjnych i polowych. Bardzo dobrą metodą pozwalającą na identyfikację budowy podłoża są testy *in situ*, głównie te dostarczające quasi-ciągłych danych, jak sondowania statyczne CPT/CPTU oraz testy dylatometryczne DMT. Rozkład parametrów na głębokości, w szczególności: q_c , R_f (CPT) oraz M_{DMT} , I_D (DMT), stanowi bardzo dobrą podstawę do wydzielenia warstw geotechnicznych.

Lessy Płaskowyżu Nałęczowskiego scharakteryzowano na podstawie badań wykonanych w rejonach Lublina, Kazimierza Dolnego oraz Nałęczowa (ryc. 3). Przedstawiono wyniki dotyczące lessów typowych.



Ryc. 3. Lokalizacja analizowanych badań. Rejony: A – Kazimierz Dolny (1 – Kwaskowa Góra, 2 – Wylągi, 3 – Rąblów), B – Nałęczów (4 – Piotrowice, 5 – Ożarów, 6 – Moszenki), C – Lublin (7 – dane z całego Lublina)

Fig. 3. Location of analyzed research. Regions: A – Kazimierz Dolny (1 – Kwaskowa Góra, 2 – Wylągi, 3 – Rąblów), B – Nałęczów (4 – Piotrowice, 5 – Ożarów, 6 – Moszenki), C – Lublin (7 – data from the entire Lublin)

Tab. 1. Zestawienie podstawowych właściwości lessów z Płaskowyżu Nałęczowskiego
Table 1. Summary of the basic properties of the loess from Nałęczów Plateau

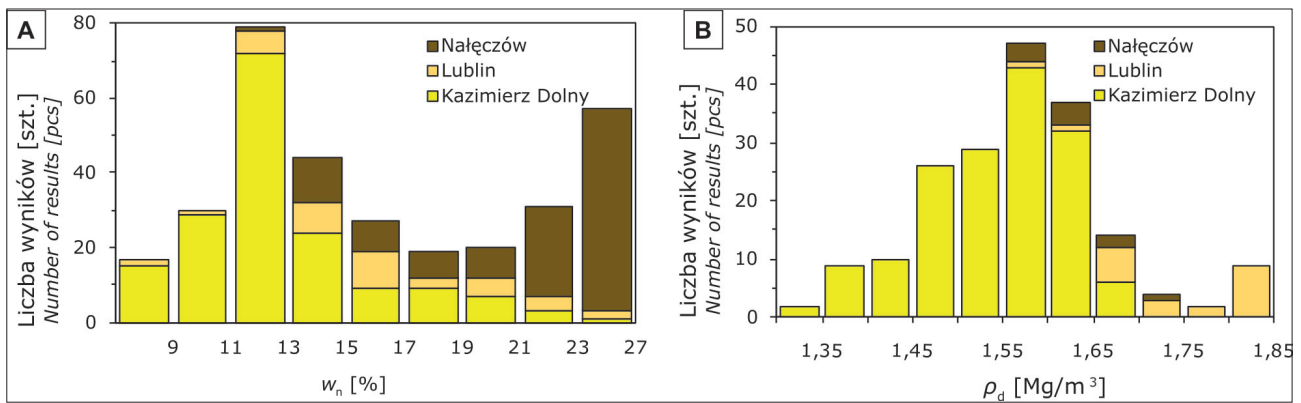
Rejon Area	Miara zmienności Measures of variability	Parametr / Parameter			
		w_n [%]	w_L [%]	w_p [%]	ρ_d [Mg/m ³]
Kazimierz Dolny	minimum / <i>minimum</i>	7,2	23,8	18,6	1,39
	maksimum / <i>maximum</i>	25,8	32,7	24,7	1,73
	średnia / <i>mean</i>	12,5	26,5	20,6	1,58
	liczba próbek <i>number of samples</i>	169	25	25	157
Nałęczów	minimum / <i>minimum</i>	12,6	26,8	18,4	1,56
	maksimum / <i>maximum</i>	26,4	32,7	20,9	1,74
	średnia / <i>mean</i>	21,6	28,6	20,0	1,63
	liczba próbek <i>number of samples</i>	114	22	22	10
Lublin	minimum / <i>minimum</i>	5,9	21,3	15,0	1,56
	maksimum / <i>maximum</i>	25,5	29,6	19,9	1,85
	średnia / <i>mean</i>	16,0	25,8	18,2	1,74
	liczba próbek <i>number of samples</i>	41	41	41	22

Parametry klasyfikacyjne

Analizowane lessy granulometrycznie są klasyfikowane głównie jako pyły, rzadziej gliny pylaste. Zawartość frakcji pyłowej waha się w zakresie 60–90%, przeciętnie ok. 80%, a frakcji ilowej 3–30%, lecz najczęściej poniżej 10% (Frankowski i in., 1998; Buraczyński, Henkiel, 2010, 2013). W tabeli 1 zebrano dane statystyczne z badań autorów dotyczące podstawowych parametrów, takich jak: wilgotność naturalna, granice plastyczności i płynności oraz

gęstość objętościowa szkieletu gruntowego (Frankowski, Grabowski, 2006). Na rycinie 4 przedstawiono rozkład statystyczny dla wilgotności oraz gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Z zebranych danych wynika, że lessy kazimierskie i lubelskie charakteryzują się zbliżonym rozkładem wilgotności, przy czym lubelskie mają wyższą gęstość. Dane te wpisują się w zakres wartości dla lessów Wyżyny Lubelskiej wg badań Frankowskiego i in. (1998), które obejmowały wyniki z rejonów położonych w otoczeniu Ka-



Ryc. 4. Histogramy wartości wilgotności naturalnej (A) oraz gęstości objętościowej szkieletu gruntowego (B)
 Fig. 4. Histograms of natural moisture (A) and bulk density of soil skeleton (B)

zimierza Dolnego, Kraśnika, Izbicy i Zamościa. Zgodnie z tymi badaniami wilgotność waha się w zakresie 7,2–21,9% (średnio 12,5%), granica płynności w_L w zakresie 23,8–27,3% (średnio 25,5%), a granica plastyczności w_p 18,6–24,7% (średnio 20,6%). Natomiast dużo wyższą wilgotność zaobserwowano w lessach z okolic Nałęczowa.

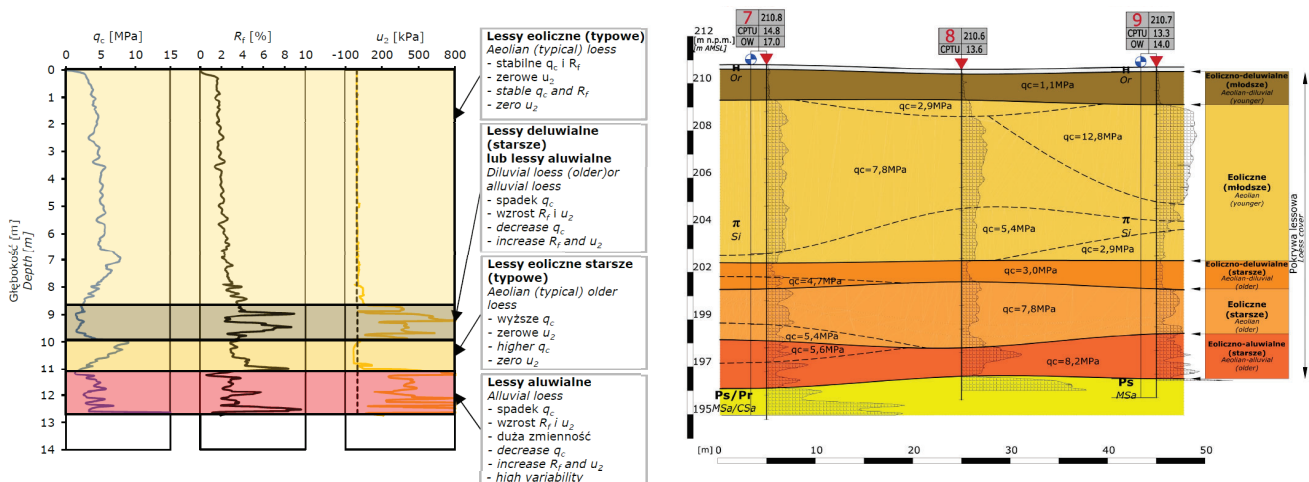
Sondowania statyczne CPT/CPTU

Sondowania statyczne są obecnie najbardziej uniwersalną metodą badawczą w geotechnice stosowaną na całym świecie. Co prawda, wykonywane pomiary nie dostarczają wprost parametrów geotechnicznych, a są jedynie podstawą do ich wyprowadzania z zastosowaniem odpowiednich wzorów korelacyjnych, to jednak liczba danych jakich dostarczają oraz stosunkowa prostota i szybkość wykonania badania uczyniły tę metodę niezwykle popularną. Testy CPT sprawdzają się również bardzo dobrze przy gruntach lessowych, niemniej jednak należy odpowiednio podejść do ich interpretacji i wyznaczania parametrów geotechnicznych z tych wyników.

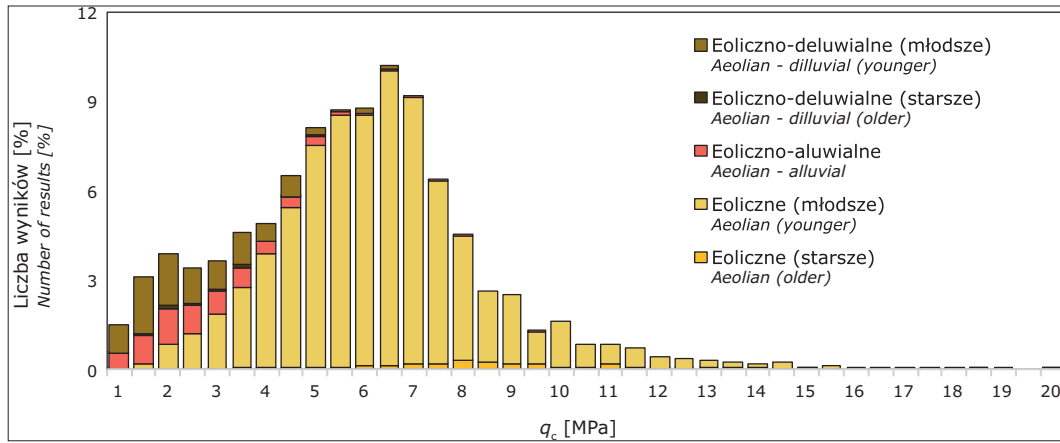
Oprócz wyprowadzania parametrów, sondowania stanowią podstawę do budowy modelu geotechnicznego (Nepelski i in., 2023), a w przypadku lessów mogą być także pomocne przy interpretacji stref facjalnych (Nepelski,

2021a). Według obserwacji z licznych sondowań w lessach typowych rejestruje się stosunkowo wysokie opory stożka q_c , które łącznie ze współczynnikiem tarcia R_f mają stabilny przebieg, a odczyty ciśnienia wody w porach u_2 są zerowe lub występuje nieznaczne podciśnienie (co jest typowe dla gruntów nienasyconych). Lessy aluwialne i deluwialne charakteryzują się niższymi wartościami q_c oraz wyższymi R_f , a ich przebieg ma najczęściej dużą zmienność. Znaczący bywa przy tym także wzrost ciśnienia u_2 . W lessach typowych obserwuje się „strefowość”, tj. występowanie stref o zbliżonych q_c , różniące się znacząco pomimo braku zauważalnych makroskopowo innych czynników. Są to wskazówki przy identyfikacji facji z sondowań CPTU. Na rycinie 5 przedstawiono przykłady interpretacji testu CPTU w odniesieniu do facji (ryc. 5A) oraz do budowy modelu geotechnicznego (ryc. 5B). Należy zwrócić uwagę na wydzielone strefy o zróżnicowanych oporach stożka w obrębie lessów typowych.

Charakterystykę parametrów z sondowań statycznych CPT i CPTU w Lublinie opisali szczegółowo Nepelski i Lal (2021). Analiza opiera się na wynikach z 1136 sondowań CPT i CPTU łącznie (ok. 8385 mb profilu lessowego i lessopodobnego) wykonanych w latach 2015–2020 w Lublinie w 152 lokalizacjach. W badaniach stosowano głównie piezostożek z elektronicznym systemem pomiaro-



Ryc. 5. Charakterystyka podłoża lessowego na podstawie testów CPTU na obszarze Lublina: A – analiza testu CPTU, B – przykład budowy modelu podłoża lessowego
 Fig. 5. Characteristic of the loess subsoil based on CPTU tests in the Lublin area: A – analysis of CPTU test, B – example of the loess subsoil model



Ryc. 6. Rozkład statystyczny oporów stożka q_c w lessach w rejonie Lublina (Nepelski, Lal, 2021)
 Fig. 6. Statistic distribution of the cone resistance q_c in loess in the Lublin area (Nepelski, Lal, 2021)

Tab. 2. Zestawienie parametrów CPT dla lessów z Płaskowyżu Nałęczowskiego
 Table 2. Summary of the CPT parameters in the loess from Nałęczów Plateau

Nr No.	Lokalizacja Location		Facja Facies	Liczba danych [mb] Number of data	q_c		R_f	
					Zakres Range	Średnia Mean	Zakres Range	Średnia Mean
A1	Kazimierz Dolny	Kwaskowa Góra	eoliczna aeolian	67,5	2,1–12,4	6,7	0,9–3,8	1,9
A2		Wylągi	eoliczna aeolian	50,1	2,8–13,2	8,1	0,6–6,4	1,8
A3		Rąblów	eoliczna aeolian	22,5	1,6–14,3	6,2	0,2–6,7	2,7
B4	Nałęczów	Piotrowice	eoliczna aeolian	158,3	1,5–7,0	3,7	0,2–12,5	2,1
B5		Ożarów	eoliczna aeolian	14,5	0,5–5,8	3,0	0,5–9,0	2,6
B6		Moszenki	eoliczna aeolian	26,5	1,0–4,2	2,5	0,2–5,5	1,3
C7	Lublin	Lublin	ogólnie all	8385,0	0,3–21,8	6,1	0,2–11,0	3,2
			eoliczna aeolian	6796,9	0,9–23,6 2,5–14,5*	6,7 7,2*	0,7–5,7	2,4 4,5*

* dane z pomiarów stożkiem mechanicznym / data from mechanical cone measurements.

wym, z automatyczną rejestracją danych co 1 cm (6098 mb). W części testów użyto stożka mechanicznego, w którym odczyty wykonywano manualnie w odstępach 20 cm (2287 mb). Dla lessów typowych opory stożka wahają się w zakresie 0,9–23,6 MPa, ze średnią 6,7 MPa. Dla grup facjalnych eoliczno-deluwialnych i eoliczno-aluwialnych uzyskuje się niższe wartości q_c oraz wyższe R_f . Rozkład oporów stożka q_c w obrębie Lublina wraz z podziałem na grupy facjalne przedstawiono na rycinie 6. Ze względu na dużą liczbę pomiarów dane te można traktować jako odniesienie dla pozostałych wyników.

Z badań wykonywanych w Kazimierzu Dolnym (Frankowski, Pietrzykowski, 2017) wynika, że wartości q_c wahają się w zakresie 2,1–12,4 MPa, ze średnią 6,7 MPa, a w sąsiednich miejscowościach Wylągi oraz Rąblów (łącznie 72,6 mb) uzyskiwano q_c w zakresie 1,6–14,3 MPa, z uogólnioną średnią 7,5 MPa. Przedstawione wyniki wskazują na podobne zachowanie dla lessów z dwóch skrajnych obszarów Płaskowyżu Nałęczowskiego. Natomiast nieco odmienne wartości rejestrowano w centrum płaskowyżu, w pasie ciągnącym się od okolic Nałęczowa w kierunku Lublina.

Pomimo iż facja lessów eolicznych zazwyczaj występuje w stanie od zwartego lub twaroplastycznego, to w tym rejonie spotyka się te grunty mocno uplastycznione. W Piotrowicach pod Nałęczowem opory stożka wynosiły 1,5–7,0 MPa, ze średnią 3,7 MPa. Natomiast w lokalizacjach Ożarów oraz Moszenki (łącznie 40,1 mb) w lessach typowych rejestrowano q_c w zakresie 0,5–5,8 MPa, średnio 2,7 MPa. Wartości te znacznie odbiegają od danych referencyjnych z Lublina i Kazimierza Dolnego. Podsumowanie wyników zestawiono w tabeli 2.

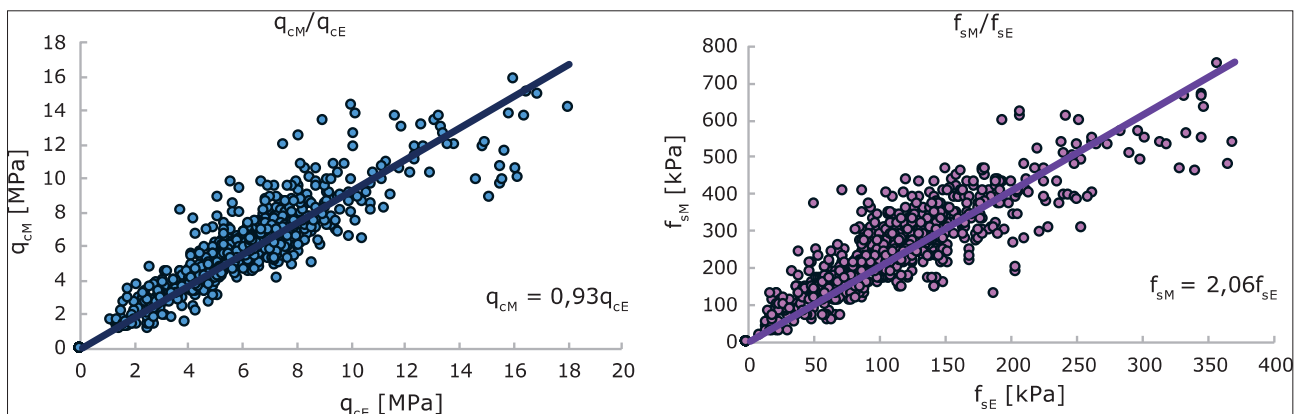
W analizie lessów typowych z Lublina (zdecydowana większość danych) dodatkowo rozdzielono wyniki ze względu na rodzaj zastosowanego stożka, ponieważ wpływa on na rejestrowane wartości q_c oraz f_s . Dlatego odczyty wykonane stożkiem mechanicznym powinny być korygowane. W normie PN-B-04452 były podane przykładowe współczynniki przejścia stożków β . Należy jednak mieć na uwadze, że są one dużym uproszczeniem, gdyż proporcja w różnych odczytach różnymi typami stożka nie jest stała i zależy m.in. od mierzonej wartości. Różnice uwidaczniają się szczególnie przy gruntach bardzo słabych. Uogólnienie

niony trend zmienności współczynnika β w zależności od wartości oporu q_c podali Briaud i Miran (1992). Wynika z niego, że dla gruntów słabych, przy $q_c \sim 1$ MPa, współczynnik ten wynosi 1,7 i zmniejsza się nieliniowo wraz ze wzrostem q_c . Przy wartości $q_c \sim 4-5$ MPa następuje wyrównanie wartości, natomiast przy wysokich $q_c > 20$ MPa odczyty stożkiem mechanicznym stanowią ok. 0,7 wartości ze stożka elektrycznego. Wyniki badań uzyskane dla lessów (Nepelski i in., 2019) wpisują się w ten trend. Według wykonanej analizy dla typowych lessów eolicznych, przy średniej wartości q_c badanych gruntów 5,8 MPa, opory stożka mierzone stożkiem mechanicznym stanowią ok. 93% wartości q_c uzyskanej przy pomiarze z użyciem stożka elektrycznego (ryc. 7A). O ile różnicę w odczytach q_c można uznać za niewielką, to różnica w przypadku tarcia na poboczniczy jest znaczna. Wartości f_s uzyskane z sondowania stożkiem mechanicznym są ponad dwukrotnie wyższe niż wskazywane przez odczyty ze stożka elektrycznego (ryc. 7B). Biorąc pod uwagę, że na podstawie f_s wyznacza się współczynnik tarcia R_f , który służy do rozpoznania rodzaju gruntu, przy interpretacji wyników należy brać pod uwagę rodzaj zastosowanego stożka. Współczynnik R_f dla lessów eolicznych wyznaczony stożkiem mechanicznym jest 2,2 razy większy niż wyznaczony z badania ze stożkiem elektrycznym.

Testy dylatometrem płaskim DMT

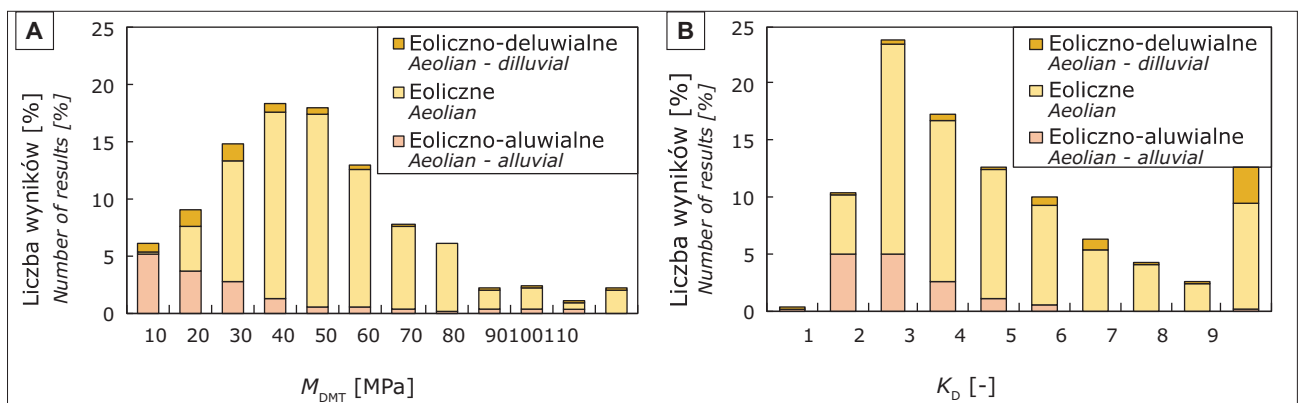
Dylatometr płaski jest bardzo dobrym narzędziem do oceny odkształcalności podłoża oraz jego stopnia prekonsolidacji. Testy dylatometryczne DMT są wykonywane w stanie naturalnych naprężeń, a zgodność rzeczywistych osiadań z szacowanymi na podstawie tych parametrów była wielokrotnie potwierdzana (Marchetti, 2015; Godlewski, 2018). Wykonując dodatkowo przy tych badaniach pomiary sejsmiczne (SDMT), na podstawie pomiaru prędkości rozchodzenia się fali poprzecznej V_s , w gruncie można także wyznaczyć początkowy moduł odkształcenia postaciowego G_0 .

Na rycinie 8 przedstawiono rozkład statystyczny parametrów rejestrowanych w badaniach DMT w Lublinie opracowany na podstawie 27 testów, wraz z rozdzieleniem tych danych w zależności od facji. Dla głównej grupy facjalnej – lessów eolicznych, wykonano porównanie dla trzech analizowanych lokalizacji: Lublina, Kazimierza Dolnego oraz Nałęczowa. W tabeli 3 podano zestawienie ogólne wraz z wartością średnią, natomiast na rycinie 9 zaprezentowano rozkład statystyczny, który lepiej odzwierciedla rejestrowane wartości. Dane wskazują, podobnie jak przy sondowaniach CPT, że dla lessów lubelskich i kazimierskich uzyskiwane są zbliżone wartości M_{DMT} (zarówno



Ryc. 7. Korelacja pomiędzy parametrami z testów CPT uzyskiwanymi stożkiem elektrycznym (q_{cE} , f_{sE}) i mechanicznym (q_{cM} , f_{sM}) (Nepelski i in., 2019)

Fig. 7. Correlation between CPT tests parameters from electric (q_{cE} , f_{sE}) and mechanical cone (q_{cM} , f_{sM}) (Nepelski i in., 2019)

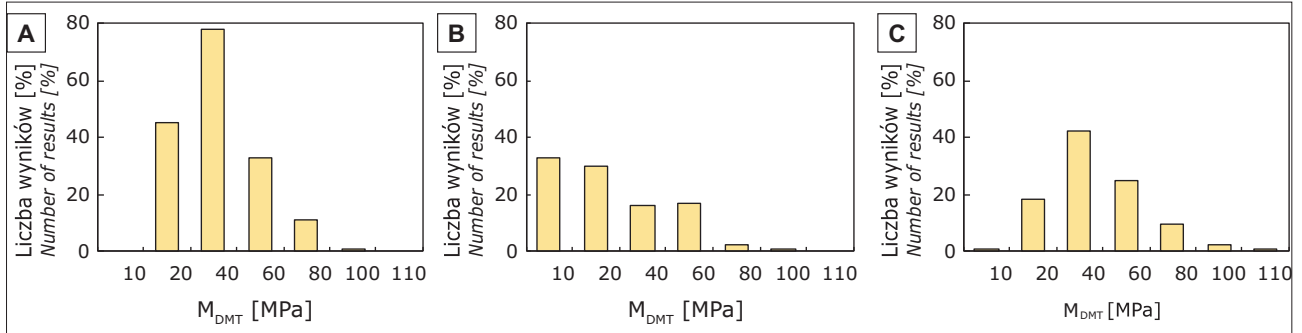


Ryc. 8. Rozkład statystyczny parametrów DMT w lessach w rejonie Lublina: A – moduł ściśliwość M_{DMT} , B – wskaźnik parcia bocznego K_D (Nepelski, Rudko, 2022)

Fig. 8. Statistical distribution of DMT parameters in loess in the Lublin area: A – constrained modulus M_{DMT} , B – horizontal stress index K_D (Nepelski, Rudko, 2022)

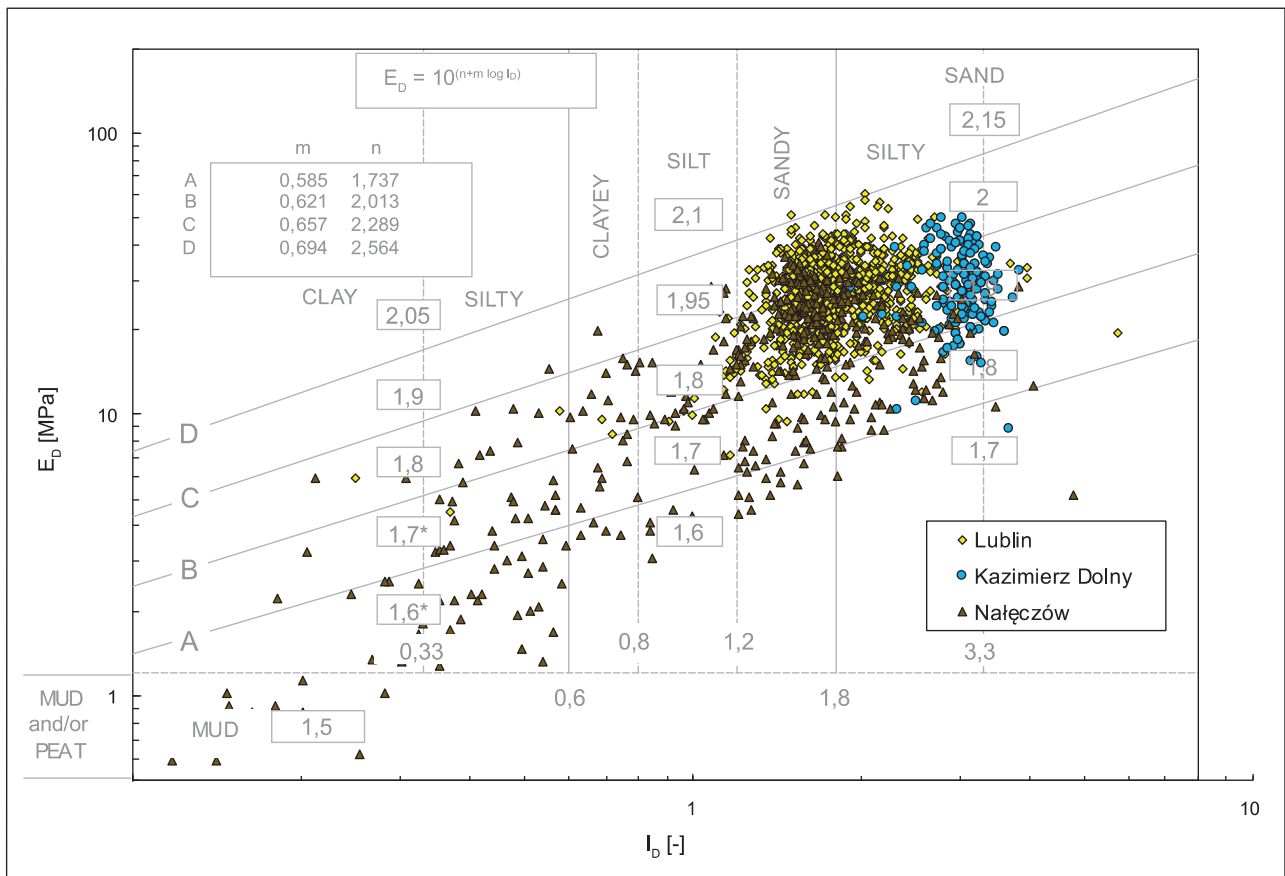
Tab. 3. Zestawienie parametrów DMT dla facji lessów typowych
Table 3. Summary of the DMT parameters for typical loess facies

Nr No.	Lokalizacja Location		Liczba pomiarów Number of measurements	K_D		M_{DMT}	
	Miejscowość Place	Rejon Area		Zakres Range	Średnia Mean	Zakres Range	Średnia Mean
A1	Kazimierz Dolny	Kwasowa Góra	168	1,4–17,8	3,3	12,5–94,0	42,0
B4	Nałęczów	Piotrowice	270	0,6–16,8	3,9	0,2–91,7	24,1
C7	Lublin	cały	2658	1,3–35,2	5,2	3,8–171,3	47,4



Ryc. 9. Rozkład statystyczny modułów ściśliwość M_{DMT} dla facji eolicznej (lessy typowe): **A** – Kazimierz Dolny (Kwasowa Góra), **B** – Nałęczów (Piotrowice), **C** – Lublin

Fig. 9. Statistical distribution of constrained modulus M_{DMT} for aeolian facies (typical loess): **A** – Kazimierz Dolny (Kwasowa Góra), **B** – Nałęczów (Piotrowice), **C** – Lublin



Ryc. 10. Dane z testów DMT na tle nomogramu klasyfikacyjnego (Marchetti, Crapps, 1981)

Fig. 10. DMT test data against the background of the classification nomogram (Marchetti, Crapps, 1981)

średnia, jak i rozkład), natomiast zdecydowanie niższe moduły ściśliwości uzyskiwano w rejonie Nałęczowa.

Dane z testów nałożono na nomogram klasyfikacyjny DMT (ryc. 10), który wskazuje na zachowanie pylasto-

-piaszczyste dla lessów kazimierskich i lubelskich (przy czym kazimierskie są bardziej piaszczyste), natomiast dla nałęczowskich pylasto-ilaste.

Korelacja CPT-DMT

W porównaniu do testów CPT, odczyty DMT wykonywane są w mniejszej częstotliwości (standardowo DMT co 20 cm, a CPT co 1–2 cm), a samo badanie jest bardziej czasochłonne i trudniejsze do wykonania w mocnych gruntach, ze względu na potrzebę większej siły wciskającej. Najbardziej cenionym parametrem z testów DMT jest moduł ściśliwości M_{DMT} . Z wyników CPT szacuje się również moduły ściśliwości, jednak w tym przypadku jest to parametr interpretowany ze sporą niepewnością, ponieważ zależy od przyjętego przez interpretatora współczynnika empirycznego α_m . Najczęściej do wyznaczenia modułu ściśliwości z badań CPT stosuje się formułę Sanglerat'a (1972):

$$M = \alpha_m q_c \tag{1}$$

lub Senneiset'a i in. (1982):

$$M = \alpha_m (q_t - \sigma_{v0}) \tag{2}$$

W procesie interpretacji kluczowa jest wartość współczynnika α_m , która może być przyjmowana w szerokim zakresie 1–15 (Sanglerat, 1972; Ciloglu i in., 2014). Jednym ze sposobów określania wartości α_m jest korelowanie wyników CPT z testami DMT wykonanych w węzłach badawczych, co było praktykowane przez wielu badaczy (Marchetti, 1980; Robertson, 2009; Mayne, 2016), również dla gruntów lessowych (Młynarek i in., 2015).

Z analizy węzłów CPT-DMT wykonywanych w Lublinie wynika, że średni współczynnik α_m wynosi 6,8 dla wszystkich grup facjalnych oraz 7,5 dla facji lessów eolicznych. Szczegółowa charakterystyka jest opisana w pracach Nepelskiego (2021a) oraz Nepelskiego i Rudko (2022). Zbiorcze wyniki zależności $M_{DMT}-q_c$ przedstawiono na rycinie 11, natomiast w tabeli 4 zestawiono wartości α_m

wyprowadzone dla poszczególnych grup facjalnych z rozdzieleniem w zależności od wskaźnika K_D (wg Nepelski, 2021a). Tabelę uzupełniono o dane z Kazimierza Dolnego i Nałęczowa.

Na rycinie 12 przedstawiono dane z węzłów CPT-DMT wykonanych w Kazimierzu Dolnym i Nałęczowie. Podobnie jak dla lessów lubelskich, zauważalne jest zachowanie relacji pomiędzy q_c a M_{DMT} , dodatkowo warunkowanej wskaźnikiem K_D (ryc. 13). Współczynniki α_m dla lessów kazimierskich są na bardzo zbliżonym poziomie jak rejestrowane w Lublinie. Natomiast w przypadku danych z Nałęczowa współczynniki α_m dla $K_D < 4$, które stanowią zasadniczą część lessów typowych są znacznie niższe niż w Lublinie i Kazimierzu Dolnym.

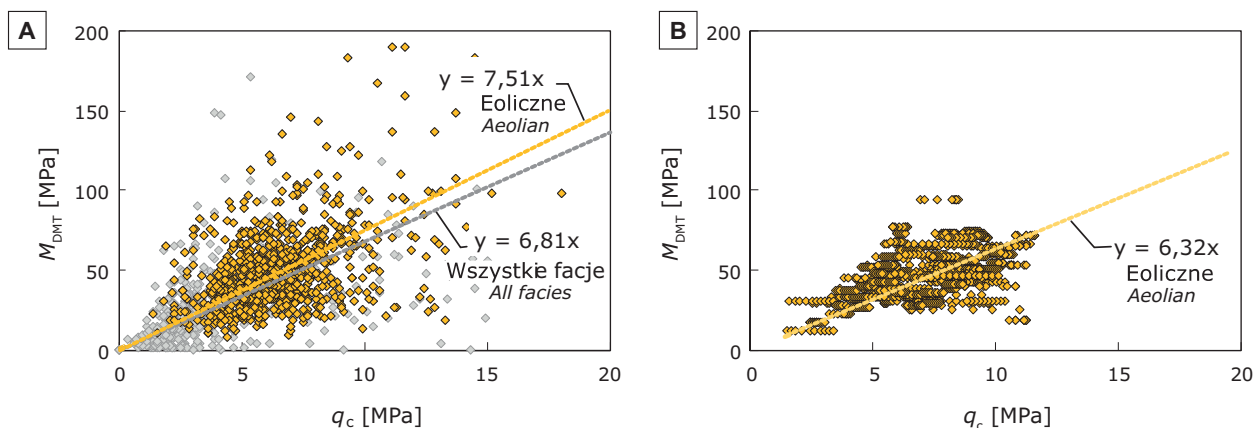
Sondowania FVT

Istotną właściwością lessów wysoczyznowych jest ich wysoka wytrzymałość na ścinanie bez odpływu c_u , która jednak pod wpływem zawodnienia ulega znacznemu zmniejszeniu (Frankowski, Grabowski, 2006). Według badań Frankowskiego i in. (2010) dla lessów z rejonu Kazimierza Dolnego wynosi ona od 50 kPa do ponad 200 kPa, a dla rejonu Lublina (Godlewski i in., 2024) od ok. 50 kPa do ponad 350 kPa (tab. 5). Pomiar wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w testach FVT jest znacznie łatwiejszy do wykonania w różnych punktach i głębokościach, niż oznaczenie z wymaganą dokładnością wartości kąta tarcia wewnętrznej i spójności.

Szeroko stosowaną metodą wyprowadzania wartości c_u są korelacje z wynikami testów CPTU lub DMT. Powszechnie stosuje się zależności:

$$C_{U,CPTU} = \frac{q_n}{N_{kt}} \text{ dla badań CPTU oraz} \tag{3}$$

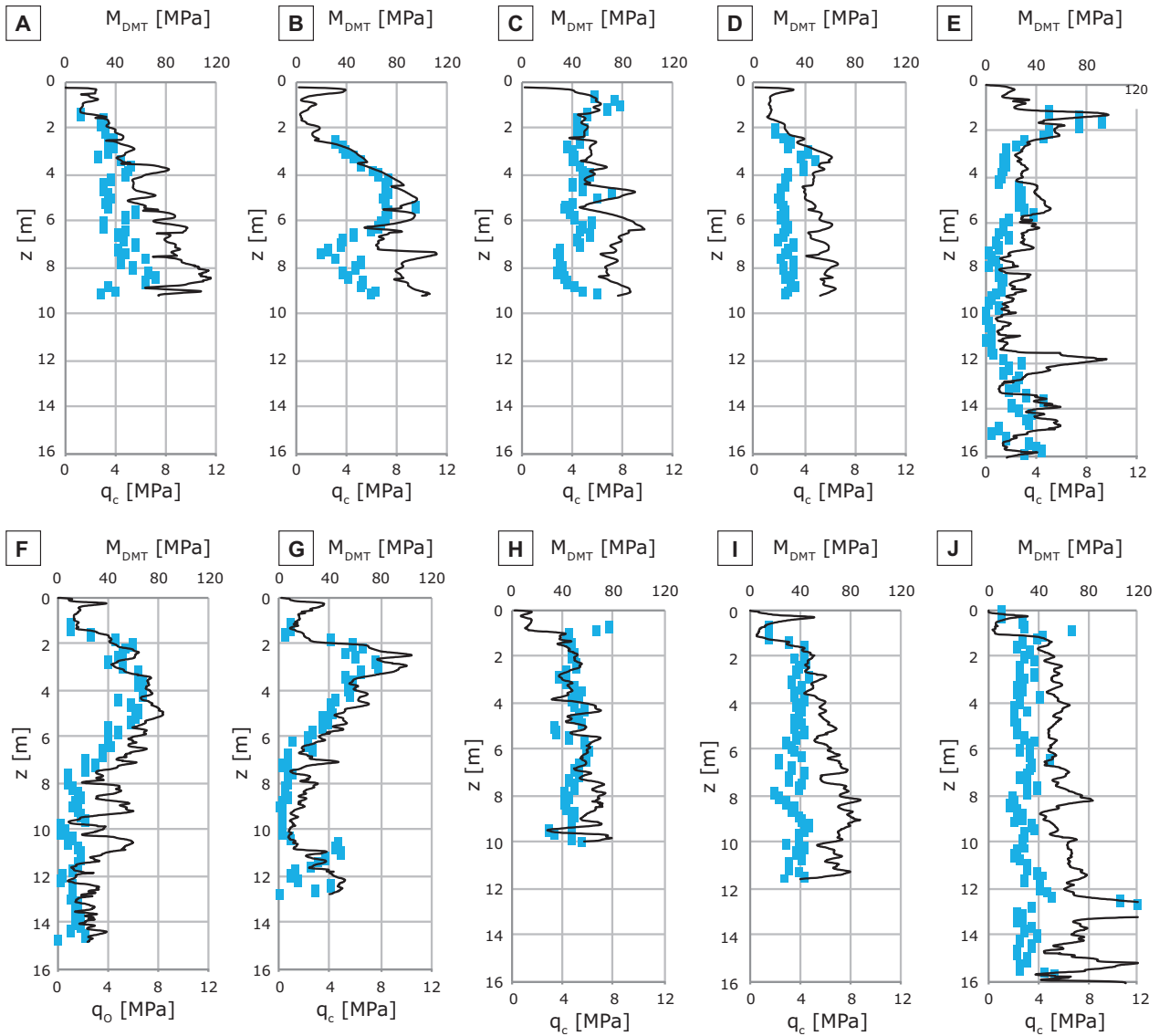
$$C_{U,DMT} = 0,22\sigma'_{v0} (0,5K_D)^{1,25} \text{ dla badań DMT, wg Marchettiego (1980)} \tag{4}$$



Ryc. 11. Określenie współczynnika α_m na podstawie zależności $M_{DMT}-q_c$: **A** – Lublin, **B** – Kazimierz Dolny
 Fig. 11. Determination of the α_m coefficient based on the $M_{DMT}-q_c$ relationship: **A** – Lublin, **B** – Kazimierz Dolny

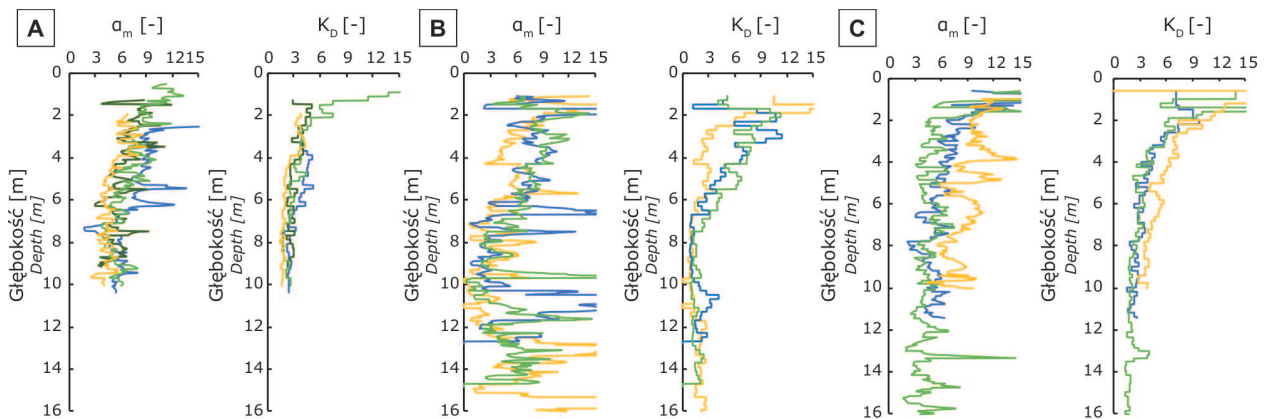
Tab. 4. Współczynniki α_m dla lessów typowych wyprowadzone z węzłów CPT-DMT
 Table 4. The α_m coefficients for typical loess derived from CPT-DMT test

Lublin		Kazimierz Dolny		Nałęczów	
$K_D < 4$	$K_D > 4$	$K_D < 4$	$K_D > 4$	$K_D < 4$	$K_D > 4$
5,5	9,4	5,6	8,9	4,0	8,7
7,5		6,3		5,6	



Ryc. 12. Rozkład na głębokości modułów ścisłości M_{DMT} na tle oporów stożka q_c : **A** – KD1, **B** – KD2, **C** – KD3, **D** – KD4, **E** – N14, **F** – N20, **G** – N31, **H** – L1, **I** – L2, **J** – L3 (oznaczenia punktów: KD – Kazimierz Dolny, N – Nałęczów, L – Lublin)

Fig. 12. Distribution of M_{DMT} constrained moduli at depth against the background of cone resistances q_c : **A** – KD1, **B** – KD2, **C** – KD3, **D** – KD4, **E** – N14, **F** – N20, **G** – N31, **H** – L1, **I** – L2, **J** – L3 (point: KD – Kazimierz Dolny, N – Nałęczów, L – Lublin)



Ryc. 13. Rozkład na głębokości współczynnika α_m i wskaźnika K_D : **A** – Kazimierz Dolny, **B** – Nałęczów, **C** – Lublin

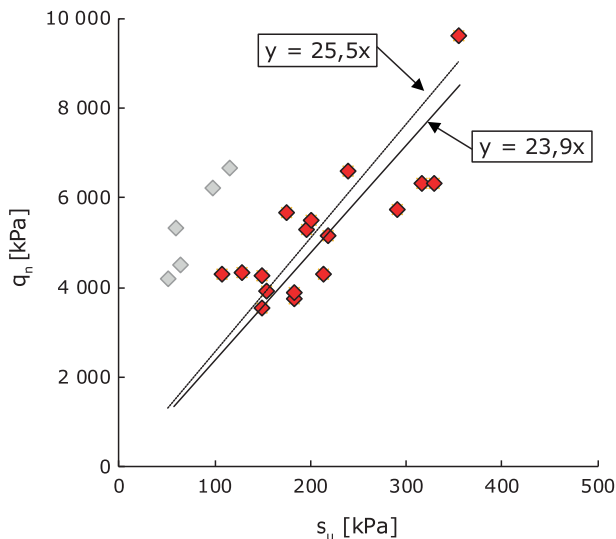
Fig. 13. Distribution of the α_m coefficient and the K_D index at depth: **A** – Kazimierz Dolny, **B** – Nałęczów, **C** – Lublin

Przy interpretacji testów CPTU istotne jest dobranie odpowiedniego współczynnika N_{kt} , który zasadniczo przyjmuje wartości w zakresie 10–20, jednak dla niektórych gruntów stosowane są wartości zarówno niższe, jak i wyż-

sze. Według badań dla lessów z Kazimierza Dolnego (Frankowski i in., 2010) współczynniki N_{kt} osiągają wartości nawet 30–45. Natomiast ze wstępnych badań lessów z Lublina (Godlewski i in., 2024), wykonanych na dużo mniej-

Tab. 5. Zestawienie wartości wytrzymałości na ścinanie z badań FVT dla facji lessów typowych
Table 5. Summary of the shear strength from FVT tests for typical loess facies

Lokalizacja Location		Liczba wyników Number of measurements	c_u [kPa]	
Miejscowość Place	Rejon Area		Zakres Range	Średnia Mean
Kazimierz Dolny	Kwaskowa Góra (ZF)	252	20–242	126
Lublin	Elizówka	22	51–354	180



szym zbiorze wynika, że ten współczynnik osiąga wartość ok. 25 (ryc. 14). Wyniki z obydwu lokalizacji wskazują, że wskaźniki N_{kt} dla pyłów lessowych znacząco odbiegają od typowych wartości.

Przy badaniach DMT pierwotna formuła Marchettiego (1980) opiera się na efektywnych naprężeniach pionowych σ'_{v0} oraz wskaźniku K_D (czyli $p_{0,DMT}$, σ'_{v0} oraz u_0) i przeznaczona jest dla gruntów o $I_D < 1,2$. Pyły lessowe charakteryzują się wskaźnikiem $I_D \sim 2,0$, dlatego zależność [4] nie jest właściwa dla tych gruntów. Pierwotna formuła była wielokrotnie modyfikowana przez różnych badaczy, dostosowując ją do gruntów o różnorodnym składzie granulometrycznym i genezie. Z badań dla lessów z Kazimierza Dolnego (Frankowski i in., 2010) wyprowadzono zależność:

$$C_{U,DMT} = 1,3\sigma'_{v0}(0,5K_D)^{1,25} \quad [5]$$

Natomiast w badaniach dla lessów z Lublina, Godlewski i in. (2024) wyprowadzili zależność opierającą się na wartości $p_{0,DMT}$ oraz parcia bocznego, które w uproszczeniu przyjęto jako $0,5\sigma_{v0}$. Takie podejście *de facto* bazuje na parametrach z pierwotnej formuły Marchettiego, jednak upraszcza ją, co w przypadku tych gruntów jest możliwe ze względu na ich pracę w stanie nienasyconym, znacznie powyżej wody gruntowej. Formuła przybrała postać:

$$C_{U,DMT} = 0,66(p_{0,DMT} - 0,5\sigma_{v0}) \quad [6]$$

Ponadto Godlewski i in. (2024) zaproponowali szacowanie wartości c_u z pomiarów presjometrycznych w formie:

←

Ryc. 14. Wyznaczenie współczynnika N_{kt} z zależności c_u - q_n dla lessów w Lublinie (Godlewski i in., 2024)

Fig. 14. Determination of N_{kt} coefficient from c_u - q_n correlation for loess in Lublin (Godlewski i in., 2024)

$$C_{U,PMT} = \frac{P_L - P_0}{4,35} \quad [7]$$

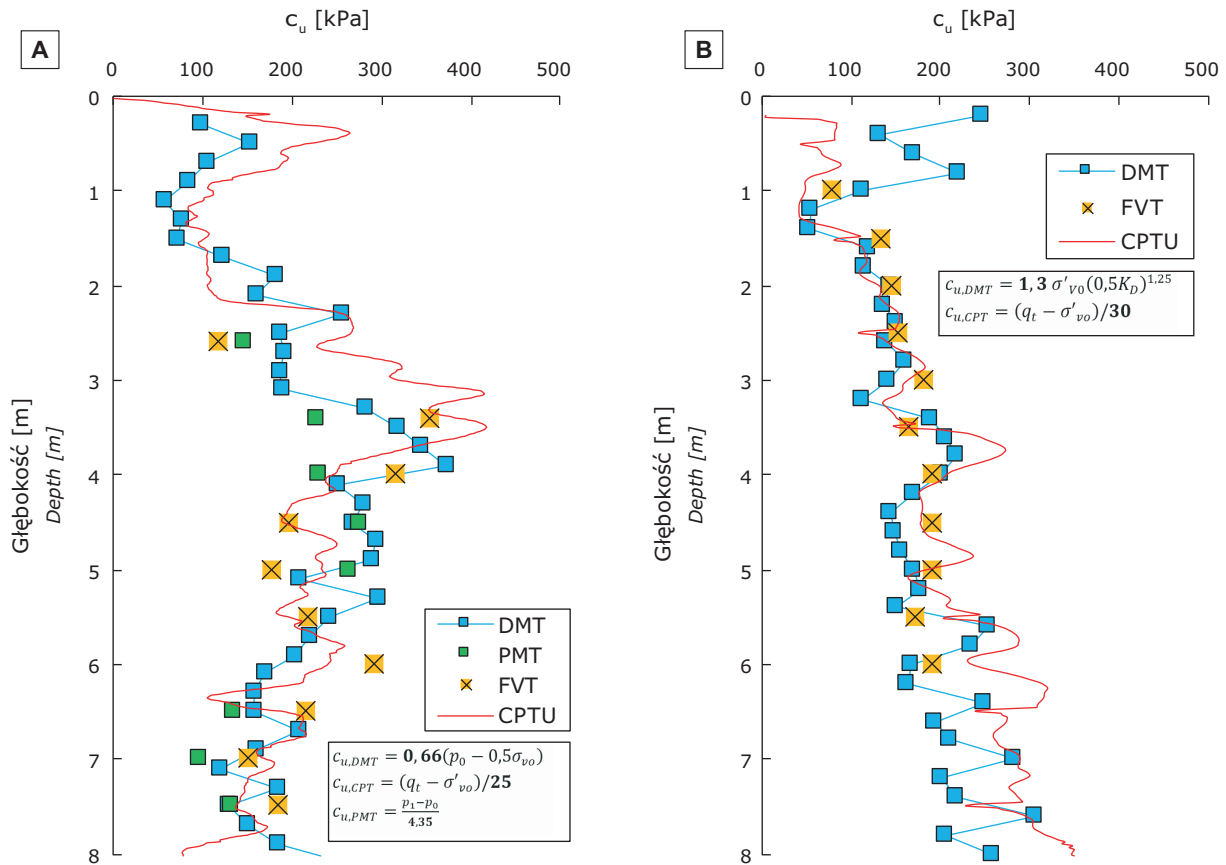
Na rycinie 15 przedstawiono porównanie wartości c_u wyprowadzonych z testów DMT, CPTU i PMT na tle wartości pomierzonych z sondowań FVT dla przykładowych punktów z Lublina i Kazimierza Dolnego.

Ze względu na nieco odmienne podejście, na rycinie 16 porównano formuły interpretacyjne [5] i [6] dla danych z punktu Elizówka (punkt nr 2). Formuła [5] wyprowadza nieco wyższe wartości w wyższych partiach, natomiast wraz z głębokością wyniki charakteryzują się dużą zbieżnością.

Badania presjometrem Menarda PMT

Na rycinie 17 przedstawiono histogramy wartości modułu presjometrycznego E_p i naprężeń granicznych p_L z rozdzielaniem w zależności od lokalizacji. Zarówno wartość średnia E_p dla Kazimierza Dolnego (12,0 MPa), która jest nieznacznie niższa niż dla Lublina (15,4 MPa), jak i rozkład wartości wskazują na relatywnie niższe wartości w zachodniej części Płaskowyżu. Pomimo niewielkiej różnicy, można uznać, że wartości rejestrowane w Lublinie są zbliżone do kazimierskich i wpisują się w ogólną charakterystykę lessów Wyżyny Lubelskiej z badań Frankowskiego i in. (1998), wg których średnia wartość E_p wynosi 11,1 MPa. W uplastycznionych lessach z okolic Nałęczowa uzyskano najniższe wartości E_p , średnio 5,3 MPa, co znacząco odbiega od pozostałych rejonów, lecz pokrywa się z danymi z CPT i DMT. Należy zaznaczyć, że w Kazimierzu Dolnym wykonano dużo więcej pomiarów (264) niż w Lublinie (106) i Nałęczowie (10).

Badania potwierdzają, że pomimo innego zakresu odkształceń oraz warunków badania, moduł presjometryczny (odkształcenia) dobrze koreluje z pierwotnym modułem edometrycznym (ściśliwości) M_0 . Na rycinie 18 przedstawiono zależność pomiędzy tymi modułami dla lessów typowych z Lublina. Pomiar presjometryczny mogą służyć również do identyfikacji lessów zapadowych na podstawie wskaźnika p_L - p_f . Dane zebrane z pomiarów w Lublinie (ryc. 19) wskazują, że większość lessów jest niezapadowych, a zapadowe mogą występować w strefie przypowierzchniowej.



Ryc. 15. Porównanie wartości c_u wyprowadzonych z badań CPTU, DMT, PMT oraz FVT: **A** – Lublin (Elizówka punkt nr 2), **B** – Kazimierz Dolny (Kwaskowa Góra punkt nr 1)

Fig. 15. Comparison of c_u values determined in CPTU, DMT, PMT and FVT tests: **A** – Lublin (Elizówka point No. 2), **B** – Kazimierz Dolny (Kwaskowa Góra point No. 1)

OCENA PODŁOŻA LESSOWEGO NA CELE BUDOWALNE

Problematyka posadawiania na lessach

Podłoże lessowe w inżynierii budowlanej jest traktowane jako problematyczne głównie ze względu na problemy związane z oddziaływaniem wody (osiadanie zapadowe, erozja powierzchniowa i wewnętrzna), które wynikają m.in. z makroporowatości. Większość lessów Lubelszczyzny, szczególnie tych wysoczyznowych, pracuje w stanie nienasyconym. Według składu granulometrycznego lessy to głównie pyły, a więc grunty „prześciowe”, z pogranicza spoistych i niespoistych, przez co ich zachowanie jest często odmienne od gruntów typowo piaszczystych czy iltastych. Lessy są kojarzone głównie ze zjawiskiem osiadania zapadowego, gdy pod wpływem nasycenia gruntu wodą dochodzi do dodatkowego osiadania bez przyrostu obciążenia. Jednak w ocenie autorów, nie mniej ważne jest uwzględnianie zróżnicowanej sztywności, a w kontekście oddziaływania wody przede wszystkim konieczność zabezpieczenia przed wypłukiwaniem.

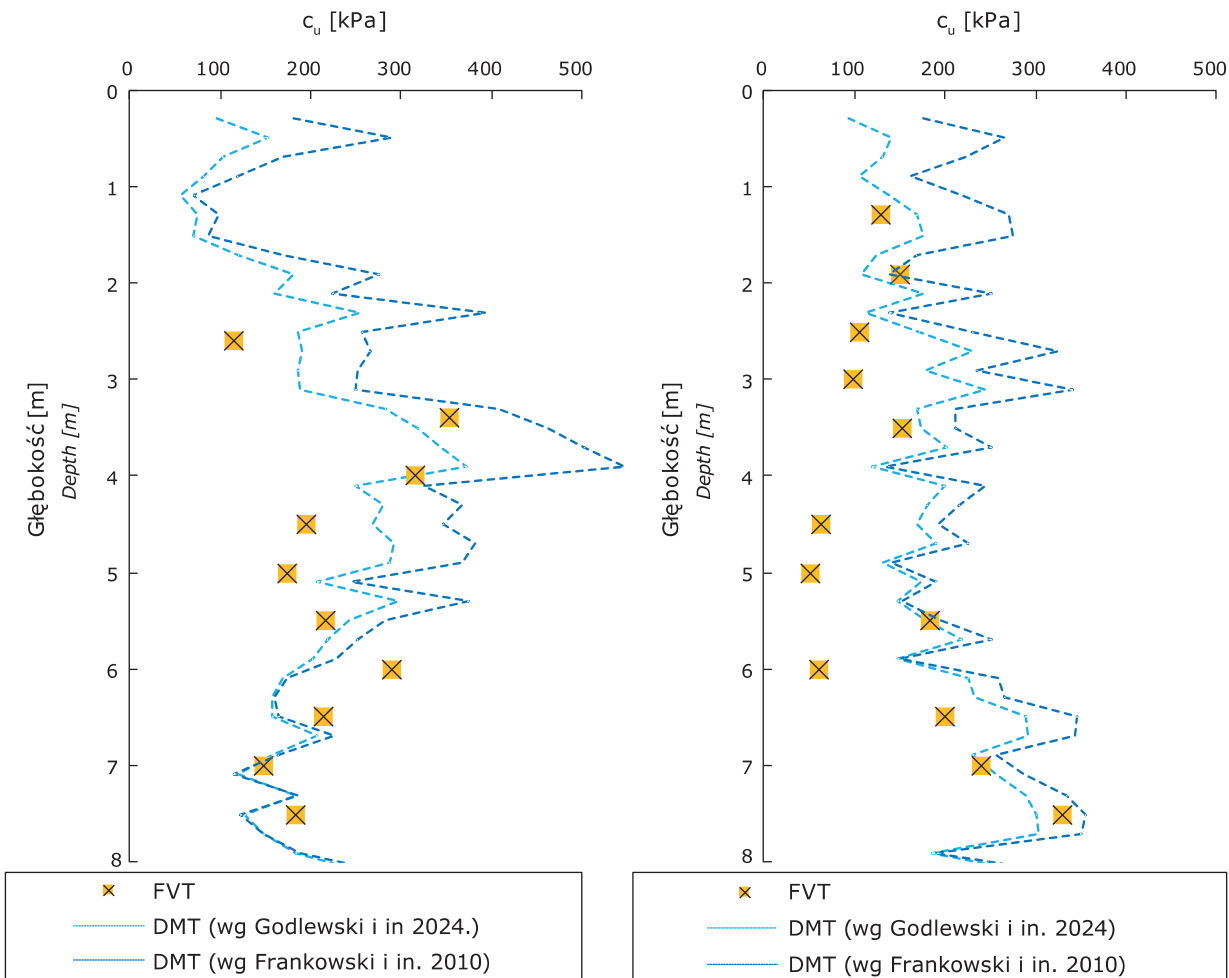
Sztywność podłoża

Jak pokazują doświadczenia, parametry gruntu uzyskiwane różnymi metodami badawczymi mogą się znacząco od siebie różnić. W szczególności odnosi się to do parametrów odkształceniowych i uwidacznia się również w bada-

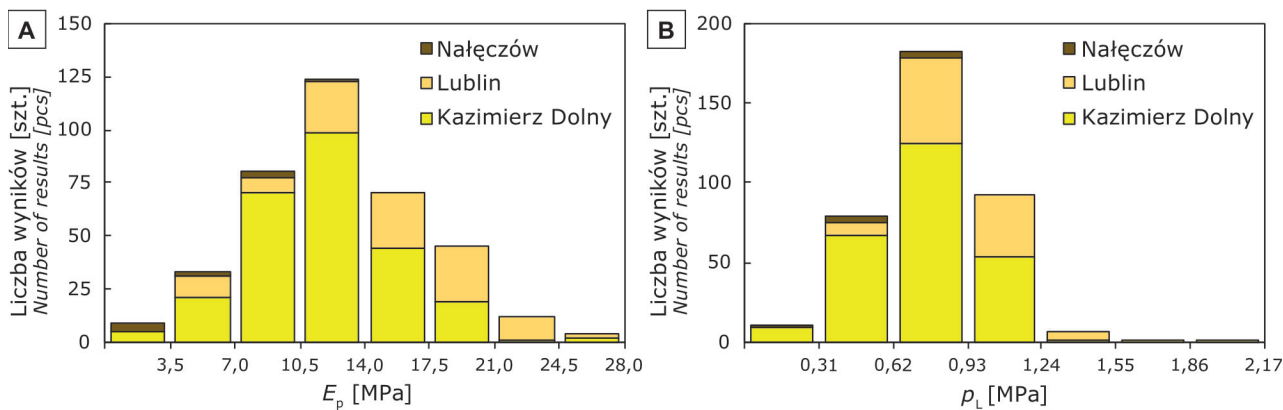
niach lessów. Różnice wynikają najczęściej z warunków brzegowych, jakie są przy danym badaniu, zakresu odkształceń i naprężeń, stanu nasycenia, a także prędkości przykładanego obciążenia podczas pomiaru (Atkinson, Salfors, 1991; Godlewski, 2018). Z badań polowych są wyprowadzane są moduły, wyrażone pojedynczymi wartościami, lecz podłoże gruntowe jest typowym ośrodkiem o silnie nieliniowym zachowaniu obciążenie–odkształcenie. Dlatego właściwszym jest opisywanie sztywności gruntu za pomocą funkcji, którą można uzyskać np. z badań trójosiowych. Są one jednak czasochłonne i kosztowne, dlatego najczęściej wykonuje się je jedynie na wybranych, reprezentatywnych próbkach.

Parametry odkształceniowe można w przybliżeniu wyprowadzać z testów *in situ*, nie zawsze jednak bezpośrednie porównanie wartości z różnych metod jest zasadne, natomiast informacja z kilku metod pozwala na lepszą ocenę odkształcalności gruntu. Na rycinie 20 przedstawiono krzywą degradacji sztywności z zaznaczonymi metodami badawczymi pozwalającymi na wyznaczenie odkształcalności podłoża w danym zakresie odkształceń (Atkinson, Salfors, 1991).

Metodykę wyprowadzania parametrów odkształceniowych dla gruntów lessowych z badań polowych przedstawił Nepelski (2021b) na przykładzie badań w węźle CPTU-SDMT-PMT. W zależności od warunków i metodologii interpretacji badania, uzyskuje się moduły ściśliwości (np. testy edometryczne, DMT), odkształcenia (np. badania trójosiowe, PMT) lub ścinania (np. pomiary sejsmiczne).



Ryc. 16. Porównanie interpretacji wartości c_u z badań DMT w lessach, wg formuł różnych autorów
 Fig. 16. Comparison of interpretation c_u values from DMT tests in loess, acc. to formulas of different authors

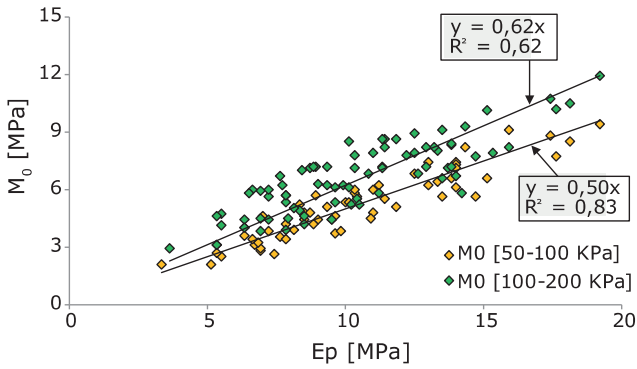


Ryc. 17. Histogramy parametrów z badań PMT: **A** – moduł presjometryczny E_p , **B** – naprężenia graniczne p_L
 Fig. 17. Histograms of the PMT tests parameters: **A** – pressuremeter modulus E_p , **B** – limit pressure p_L

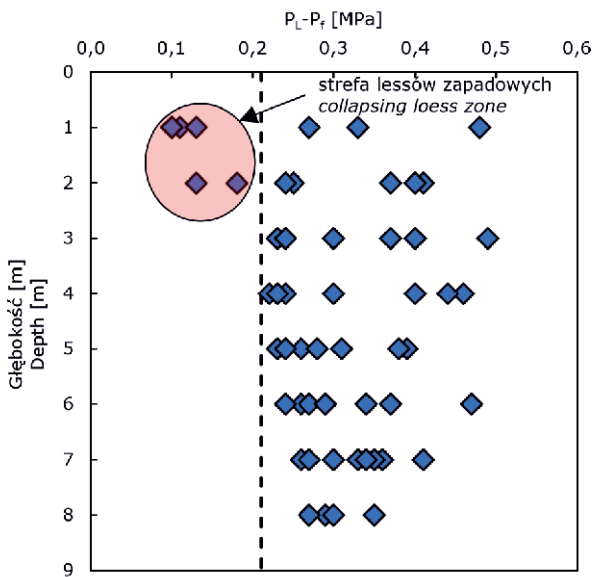
Po przeliczeniu wyników na moduł ściśliwości zauważalny jest trend, iż najmniejsze wartości uzyskuje się z badań PMT, nieco wyższe z CPT (interpretowane), wyższe z DMT oraz najwyższe (początkowe) z pomiaru sejsmicznego. Według podstaw teoretycznych (Atkinson, Sallfors, 1991) oraz doświadczeń z pomiarów budynków posadowionych na lessach (Nepelski, 2020), do szacowania osiadania typowych konstrukcji inżynierskich posadowionych na lessach zaleca się wykorzystywać wyniki z badań DMT lub CPT (stosując współczynniki α_m skalibrowane z testami DMT).

Wydzielanie warstw geotechnicznych

Identyfikacja sztywności oraz podział na warstwy geotechniczne podłoża lessowego są możliwe z wykorzystaniem testów *in situ* (np. CPT, DMT, FVT, PMT). Należy jednak zwrócić uwagę, że w praktyce krajowej przyjęło się wydzielanie warstw geotechnicznych na podstawie stanu, gdzie pyły traktuje się jako grunty spoiste i opisuje się je parametrem I_L . Zdaniem autorów dla tych gruntów nie powinno to mieć miejsca, a właściwszym jest przyjmowa-

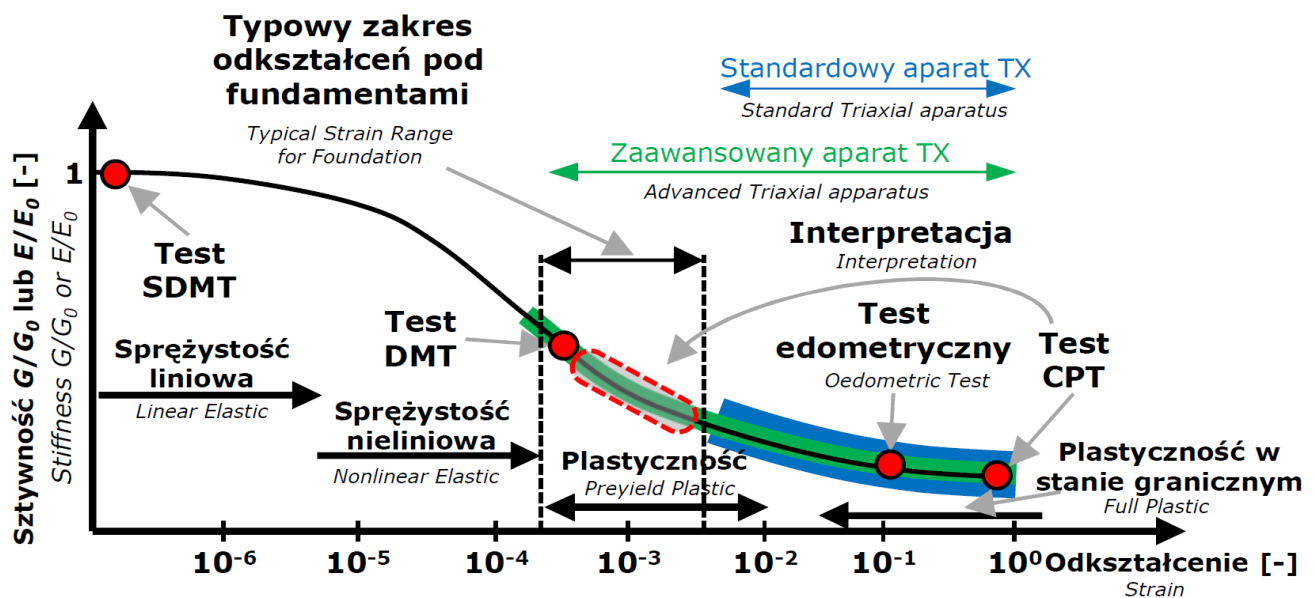


Ryc. 18. Zależność pomiędzy wartościami modułów edometrycznych i presjometrycznych dla lessów typowych z Lublina
 Fig. 18. Relationship between the values of oedometric and pressuremetric modules for typical loess from Lublin



Ryc. 19. Zestawienie wartości p_L-p_f w zależności od głębokości
 Fig. 19. Summary of p_L-p_f values depending of depth

nie za parametr wiodący wartości q_c . Przywiązanie do parametru I_L jako wiodącego jest efektem wieloletniego stosowania w Polsce norm PN w tym PN-81-B-03020, gdzie stopień plastyczności był wykorzystywany do korelacyjnego wyznaczania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych. Na świecie jednak temu parametrowi przypisuje się dużo mniejsze znaczenie (Tschuschke, 2013). Należy mieć na uwadze, że polskie normy dopuszczały określanie parametrów geotechnicznych z wykorzystaniem korelacji, jednak powinno się to odbywać na podstawie wartości I_L określonej w badaniach laboratoryjnych, najlepiej o liczności umożliwiającej ocenę statystyczną. Sama analiza makroskopowa służy jedynie do określenia stanu, na co wskazywał zapis z normy PN-88-B-04481: *Nie należy określać powyższą metodą [wałeczkowania – dop. Nepelski] wartości stopnia plastyczności I_L , a ograniczać się jedynie do określenia stanu gruntu*. Ponadto dla gruntów lessowych (granulometrycznie pyłów) przy analizie makroskopowej wg PN-88-B-04481 różnica jednego waleczka powodowała zmianę stanu, więc nawet przy takim podejściu niemożliwe jest określenie stopnia plastyczności z większą dokładnością niż 0,25. Natomiast inny zapis tej normy: *Pojęcia I_L nie należy stosować w przypadku gruntów małościomych*, wskazywał, że pyłów w ogóle nie powinno się klasyfikować wartością I_L . Zatem wydzielenie warstw geotechnicznych w obrębie pyłów na podstawie makroskopowego rozpoznania stanu budzi wątpliwość. Lepszym pod tym względem zdają się być testy *in situ*, gdyż pozwalają na wydzielenie stref o odmiennej sztywności i przypisanie odpowiednich parametrów odkształceniowych wyprowadzonych np. z oporu stożka. Możliwa jest również identyfikacja stref potencjalnie zapadawych, ponieważ wg Borowczyka i Frankowskiego (1977, 1979a, b) kryterium orientacyjnym wskazującym na możliwość występowania struktury nietrwałej jest m.in. opór stożka $q_c < 3\text{MPa}$, wytrzymałość na ścinanie $c_u < 90\text{ kPa}$ lub wartość wskaźnika $p_L-p_f < 0,21\text{ MPa}$ z badania PMT. Natomiast Dušan i in. (2014) wskazywali na możliwość identyfikacji stref zapadawych na podstawie wskaźników



Ryc. 20. Krzywa degradacji sztywności podłoża gruntowego
 Fig. 20. Stiffness degradation curve of the subsoil

Tab. 6. Ocena przydatności podłoża lessowego do posadowienia na podstawie wyników z CPT**Table 6.** Assessment of the suitability of the loess subsoil for foundations based on the CPT results

Opór stożka q_c Cone resistance q_c	Ocena przydatności do posadowienia Assessment of the suitability for foundations	Uwagi Notes
<1,2 MPa	bardzo niekorzystne <i>very unfavourable</i>	możliwa podatność na osiadanie zapadowe (przy niskiej wilgotności) <i>possible collapsing (at low moisture)</i>
1,2–2,5 MPa	niekorzystne <i>unfavourable</i>	
2,5–4,0 MPa	średnio korzystne <i>medium unfavourable</i>	
4,0–6,5 MPa	korzystne <i>favourable</i>	należy wydzielać strefy ze względu na zróżnicowaną sztywność <i>zones should be separated due to different stiffness</i>
>6,5 MPa	bardzo korzystne <i>very favourable</i>	

K_D oraz I_D z testów DMT. Dzięki wypracowanym kryteriom, po ustaleniu strefy potencjalnie zapadowej, możliwe jest wytypowanie miejsc poboru próbek do właściwych badań zapadowości w laboratorium. Na podstawie badań przeprowadzonych w południowo-wschodniej Polsce ustalono, że grunty zapadowe występują najczęściej do głębokości 2–3 m poniżej powierzchni terenu, najgłębiej do 5 m (Borowczyk, Frankowski, 1979a), a na podstawie badań (Nepelski, Lal, 2021) szacuje się, że w obrębie Lublina jest ok. 3–4 % lessów zapadowych.

Dla wydzielonych na podstawie oporów stożka q_c warstw można dokonać uogólnionej oceny przydatności do posadowienia np. wg kryterium zaproponowanego w tabeli 6. Zaznacza się jednak, że jest to ocena wstępna, a do właściwej należy uwzględnić także takie czynniki jak: rodzaj konstrukcji, wielkość i charakter obciążeń, głębokość posadowienia itp.

Doświadczenia zebrane podczas badań wykonywanych na lessach pozwoliły na zdefiniowanie i zaproponowanie wytycznych do badań podłoża oraz projektowania obiektów na gruntach lessowych.

Wytyczne do badań podłoża lessowego

- ❑ Wiodącą metodą w rozpoznaniu powinny być testy *in situ*.
- ❑ Jako parametr wiodący przy wydzielaniu warstw geotechnicznych zaleca się przyjmowanie oporów stożka q_c . Wartość I_L nie powinna być podstawą do wydzielenia geotechnicznych dla lessów, natomiast może stanowić parametr pomocniczy o drugo- lub trzeciorzędym znaczeniu.
- ❑ Podstawowy rozstaw punktów badawczych dla typowych budynków powinien wynosić 20–30 m. Zaleca się wykonywanie w każdym punkcie sondowania CPT/CPTU oraz w zależności od potrzeb inne testy *in situ*, np. DMT/SDMT, PMT, FVT. Istotnym jest jednak, aby testy były wykonywane w węzłach badawczych. Liczbę odwiertów należy dostosowywać do warunków oraz możliwości interpretacji profilu gruntowego z testów *in situ*. Przy klarowności interpretacji sondowań liczba odwiertów może być mniejsza niż sondowań.

- ❑ Dodatkowe punkty badawcze należy sytuować w zależności od uwarunkowań terenowych (np. zbocza, wąwozy, doliny rzeczne, roślinność) i projektowych (np. zwiększone obciążenia, konstrukcja wrażliwa na osiadanie, odpowiedzialny element).
- ❑ Jako sprawdzenie parametrów wyprowadzonych z testów *in situ* powinny być wykonywane badania laboratoryjne. Miejsca poboru próbek należy dobierać po analizie testów *in situ*.
- ❑ Możliwość występowania gruntów zapadowych oraz ich zasięg można wstępnie określać z testów *in situ*, co następnie powinno się potwierdzać badaniami laboratoryjnymi.

Wytyczne do projektowania

- ❑ Przy gruntach lessowych nie należy stosować gruntów i innych wstawek filtracyjnych, np. nie należy stosować zewnętrznych zasypek piaskowych oraz kolumn żwirowych jako wzmocnienie podłoża.
- ❑ W przypadku potrzeby wymiany gruntu pod fundamentami jako gruntu zasypowego nie należy stosować piasku, a np. chudy beton, stabilizację cementowo-piaskową lub samozagęszczające mieszanki o niskich właściwościach filtracyjnych.
- ❑ Należy dokładnie zagęszczać podłoże przy budynku oraz pod posadzkami piwnic, aby zapobiec migracji wód oraz wypłukiwaniu drobnych cząstek. W razie potrzeby stosować dodatki stabilizujące grunt.
- ❑ Dna wykopów fundamentowych należy zabezpieczyć niezwłocznie po ich wykonaniu chudym betonem.
- ❑ Należy zapewnić dobre odwodnienia powierzchniowe ze spadkami od budynku.
- ❑ Nie należy wykonywać stałych dołów i zbiorników, w których może się gromadzić woda w odległości mniejszej niż 10 m od budynku.
- ❑ Sieci wodociągowe i kanalizacyjne należy prowadzić w oddaleniu od budynków i nie prowadzić ich pod fundamentami bez szczelnych rur osłonowych.
- ❑ Przewody wprowadzane do budynków należy układać w szczelnych przejściach.

PODSUMOWANIE

Podłoże lessowe jako podłoże budowlane wymaga odpowiedniego podejścia inżynierskiego, poczynając od etapu badań gruntu, poprzez projektowanie, wykonawstwo jak i eksploatację obiektów. Lessy Płaskowyżu Nałęczowskiego stanowią zasadniczo dobre podłoże nośne, jednak należy je odpowiednio zabezpieczać przed działaniem wody oraz należy je rozpoznać właściwości na etapie projektowym, do czego rekomenduje się wykorzystywanie testów *in situ*. Najczęściej podłoże do posadawiania budynków stanowią lessy typowe, facji eolicznej. Wieloletnie badania autorów wskazują na zbliżone zachowanie tych gruntów na dwóch skrajnych obszarach płaskowyżu, w rejonach Lublina i Kazimierza Dolnego. Natomiast nieco odmienne właściwości mają lessy występujące w centrum płaskowyżu, w kilkunastokilometrowym pasie ciągnącym się od okolic Nałęczowa w kierunku Lublina.

Autorzy składają podziękowania Recenzentom za ich cenne uwagi, które przyczyniły się do poprawienia jakości publikacji.

LITERATURA

- ATKINSON J., SALLFORS G. 1991 – Experimental determination of soil properties (stress-strain-time). In Proc. 10th ECSMFE, 3: 915–956.
- BOROWCZYK M., FRANKOWSKI Z. 1977 – Nowe kryterium oceny osiadania zapadowego lessów określone na podstawie badań presjometrycznych. Inż. Bud., 3: 91–92.
- BOROWCZYK M., FRANKOWSKI Z. 1979a – Wytyczne wykonywania badań lessów metodami polowymi. Instrukcje i metody badań geologicznych, z. 40, Wydaw. Geol.
- BOROWCZYK M., FRANKOWSKI Z. 1979b – Zmienność właściwości geotechnicznych lessów w świetle współczesnych metod badań. Kwart. Geol., 23 (2): 447–461.
- BRIAUD J.L., MIRAN J. 1992 – The Cone Penetrometer Test. Report No. FHWA-SA91-043. FHA, Wasington, D.C.
- BURACZYŃSKI J., HENKIEL A., SZWAJGIER W. 2013 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. 747 Nałęczów. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- CILOGLU F., CETIN K.O., EROL A.O. 2014 – CPT-based compressibility assessment of soils. International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas: 629–636.
- DOWGIAŁŁO W.D., MAŁEK M. 2015 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. 746 Kazimierz Dolny. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DUŠAN B., ZORAN B., ČEBAŠEK V., ŠUŠIĆ N. 2014 – Characterisation of collapsing loess by seismic dilatometer. Eng. Geol., 181: 180–189.
- FRANKOWSKI Z., KACZYŃSKI R., BOGUĆKI A., WOŁOSHYN P. 1998 – Nonhomogeneity of the physical-mechanical properties of soli medium composed of tertiary clays and quaternary loesses. J. Theoretic. Appl. Mech., 36 (3): 581–595.
- FRANKOWSKI Z., MAJER E., GAŁKOWSKI P., JAROS M., MADEJ M., MAJER K., MIODUSZEWSKA I., PIETRZYKOWSKI P. 2009 – Ocena stateczności zboczy wąwozów lessowych w rejonie Kazimierza Dolnego i Szczepieszyna. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa. Nr inw. 8140/2022.
- FRANKOWSKI Z., MAJER E., PIETRZYKOWSKI P. 2010 – Geological and geotechnical problem of loess deposits from south-eastern Poland. In Proc. of the International Geotechnical Conference „Geotechnical challenges in megacities”, Moscow, 2: 546–553.
- FRANKOWSKI Z., PIETRZYKOWSKI P. 2017 – Charakterystyki odształceniowe lessów południowo-wschodniej Polski. Prz. Geol., 65 (10): 832–839.
- FRANKOWSKI Z., GRABOWSKI D. 2006 – Geologiczno-inżynierskie i geomorfologiczne uwarunkowania erozji wąwozowej w lessach w rejonie Kazimierza Dolnego (wąwóz Opolska Droga). Prz. Geol., 54 (9): 777–783.
- GARDZIEL Z., HARASIMIUK M., JEZERSKI W., PAWŁOWSKI A., ZGŁOBICKI W. 2006 – Erozja wąwozowa w zachodniej części Płaskowyżu Nałęczowskiego (Wyżyna Lubelska). Prz. Geol., 54 (9): 768–776
- GAZDA L., FRANUS M., 2013 – Projektowanie geotechniczne w warunkach występowania pokryw lessowych Płaskowyżu Nałęczowskiego. Budow. Arch., 12 (3): 83–90.
- GODLEWSKI T. 2018 – Evaluation of stiffness degradation curves from in situ tests in various soil types. Arch. Civil Eng., 64 (4): 285–307. <https://doi.org/10.2478/ace-2018-0075>
- GODLEWSKI T., NEPELSKI K., GAŚKA B., WITOWSKI M. 2025 – Assessment of shear strength of soils from in situ research on a regional basis. Arch. Civil Eng., w druku nr 4/2025.
- GRABOWSKI Z., WITKOWSKI M. 1987 – Charakterystyka geologiczno-inżynierska gruntów z terenu m. Lublina i wnioski geotechniczne dotyczące tych gruntów. Wydaw. Uczel. PL, Materiały Konferencji pt. „Geotechnika w Ośrodku Lubelskim”, 77–90.
- HARASIMIUK M. 1986 – Lithologic Properties as Indices of the Sedimentation Conditions of the Vistulian Loesses in the Eastern Part of the Nałęczów Plateau (SE Poland). Ann. UMCS, sec. B, 41: 179–202.
- HARASIMIUK M. 1987 – Fizjografia okolic wsi Klementowice-Kolonia na Płaskowyżu Nałęczowskim. Spraw. Archeolog., 39: 53–57.
- HARASIMIUK M., HENKIEL A. 1978 – Wpływ budowy geologicznej i rzeźby podłoża na ukształtowanie pokrywy lessowej w zachodniej części Płaskowyżu Nałęczowskiego. Ann. UMCS, sec. B, 30/31 (4): 55–84.
- HARASIMIUK M., HENKIEL A. 1982 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. 749 Lublin. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MALINOWSKI J. 1971 – Badania geologiczno-inżynierskie lessów. Wydaw. Geol., Warszawa.
- MALINOWSKI J. 1959 – Wyniki badań geotechnicznych lessu między Kazimierzem Dolnym a Nałęczowem. Wydaw. Geol., Warszawa.
- MARCHETTI S. 1980 – In situ tests by flat dilatometer. J. Geotech. Eng. Div., 105 (3): 299–321.
- MARCHETTI S. 2015 – Some 2015 Updates to the TC16 DMT Report 2001. The 3rd International Conference on the Flat Dilatometer: 43–65.
- MARCHETTI S., CRAPPS D.K. 1981 – „Flat Dilatometer Manual”. Internal Report of G.P.E. Inc.
- MARUSZCZAK H. 2000 – Definicja i klasyfikacja lessów oraz utworów lessopodobnych. Prz. Geol., 48 (7): 580–586.
- MARUSZCZAK H., RACINOWSKI R. 1976 – Dynamika akumulacji eolicznej lessu młodszego w okolicy Lublina w świetle badań uziarnienia i składu minerałów ciężkich. Biul. Inst. Geol., 297.
- MAYNE P. W. 2016 – Evaluating effective stress parameters and undrained shear strengths of soft-firm clays from CPTu and DMT. Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC 2016, 1(July 2016): 19–39.
- MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J., MAŃKA M. 2015 – Geotechnical parameters of loess soils from CPTu and SDMT. [W:] Marchetti S., Monaco P., Viana da Fonseca A. (red.), International Conference on the Flat Dilatometer DMT'15, Rzym: 481–489.
- NEPELSKI K. 2020 – Numeryczne modelowanie pracy konstrukcji posadowionej na lessowym podłożu gruntowym. Politechnika Lubelska, Lublin.
- NEPELSKI K. 2021a – Charakterystyka lessów lubelskich jako podłoża budowlanego. Prz. Geol., 69 (12): 835–849.
- NEPELSKI K. 2021b – Parametry odształceniowe lessów lubelskich wyznaczone z badań CPTU, SDMT oraz Presjometrem Menarda. Przyrodnicze i Geotechniczne Aspekty Budownictwa, Poznań: 47–56.
- NEPELSKI K. 2023 – Geotechnical Interpretation of the Geological Structure of Loess Covers in Lublin Region. Architecture, Civil Eng. Environ., 16 (3): 101–110; <https://doi.org/10.2478/acee-2023-0037>
- NEPELSKI K., GODLEWSKI T., RUDKO M., WITOWSKI M. 2023 – Budowa modelu geotechnicznego podłoża lessowego. Materiały Budowlane, 606: 44–47.
- NEPELSKI K., LAL A., GRZEGORCZYK M. 2019 – Comparative analysis of the CPT results obtained with the use of electric and mechanical penetrometer cone. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019: 1–7; <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0877>
- NEPELSKI K., LAL A. 2021 – CPT Parameters of Loess Subsoil in Lublin Area. Appl. Sci., 11 (13), 6020; <https://doi.org/10.3390/app11136020>
- NEPELSKI K., RUDKO M. 2022 – CPT-DMT correlation for loess subsoil from Lublin area in Poland. In Proc. of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering., Sydney
- PN-81-B-03020 – Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie. 1981.
- PN-88-B-04481 – Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu. 1988.
- PN-B-04452 – Geotechnika, Badania polowe. 2002.
- ROBERTSON P.K. 2009 – CPT-DMT Correlations. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 135 (11): 1762–1771.
- SANGLERAT G. 1972 – The penetrometer and soil exploration. Amsterdam: Elsevier.
- SENNESET K., JANBU N., SVANO G. 1982 – Strength and deformation parameters from cone penetration tests. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam: 863–870.
- TSCHUSCHKE W. 2013 – Identyfikacja konsystencji gruntów mało spoistych na podstawie charakterystyk penetracji z badania statycznego sondowania. Budow. Inż. Środ., 4 (3): 247–252.

Praca wpłynęła do redakcji 6.06.2024 r.
Akceptowano do druku 9.12.2024 r.