

mgr inż. Jakob Machon

**WPLYW ROZTWORÓW WPROWADZONYCH DO GRUNTÓW
NIESPOISTYCH NA ICH WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE**

**INFLUENCE OF SOLUTIONS ADDED INTO NON-COHESIVE
SOILS ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES**

Rozprawa doktorska

Promotor:

prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer

Szczecin, 2022 r.

SPIS TREŚCI

SPIS TREŚCI	3
STRESZCZENIE	6
ABSTRACT	8
WYKAZ OZNACZEŃ	9
1 Wstęp	13
1.1 Konieczność uzdatniania gruntu pod budowę dróg w Niemczech.....	13
1.2 Rozwój historyczny	13
1.3 Sposoby poprawy właściwości gruntów	14
1.4 Pierwsze stabilizacje gruntu w Stanach Zjednoczonych.....	15
2 Cel, teza i zakres rozprawy	16
2.1 Cel rozprawy doktorskiej	16
2.2 Teza rozprawy doktorskiej	16
2.3 Zakres rozprawy doktorskiej	16
3 Przegląd literatury	17
3.1 Grunty niespoiste – struktra żwirów i piasków	18
3.1.1 Wpływ napięcia powierzchniowego na grunty niespoiste	20
3.2 Grunty spoiste – pyły i ły	23
3.3 Wymiana między fazą stałą i ciekłą	23
3.4 Przegląd dodatków do gruntu.....	27
3.5 Dodatki tradycyjne (przewidziane normami).....	28
3.5.1 Wapno.....	30
3.5.2 Cement.....	30
3.6 Dodatki nietradycyjne (niestandardowe).....	30
3.6.1 Stabilizatory jonowe.....	30
3.6.2 Stabilizatory enzymatyczne.....	31
3.6.3 Stabilizatory ligninosulfonowe.....	31
3.6.4 Sole.....	32
3.7 Rys historyczny zastosowania soli do stabilizacji gruntów	33
4 Metody i program badań	39
5 Badania w naturze	41
5.1 Klasyfikacja badanego w naturze gruntu z Moorburga.....	42
5.1.1 Krzywa uziarnienia materiału gruntowego	43
5.1.2 Wyniki dyfrakcji rentgenowska	44

5.1.3	Wyniki badania straty masy gruntu przy wyprażaniu	45
5.1.4	Wyniki badania zawartości wapnia	46
5.1.5	Wyniki badania pH gruntu	47
5.2	Badania w naturze płytą statyczną	47
5.2.1	Opis eksperymentu przeprowadzonego w naturze	47
5.2.2	Przygotowanie próbek roztworów	48
5.2.3	Zastosowane chlorki	49
5.2.4	Przebieg badania	49
5.2.5	Wyniki pomiarów płytą statyczną	51
6	Pomiary laboratoryjne parametrów gruntowych	54
6.1	Opis badanego gruntu z zatoki Jadebusen	54
6.1.1	Klasyfikacja gruntu w oparciu o niemieckie normy	55
6.1.2	Krzywa uziarnienia materiału gruntowego	55
6.1.3	Wyniki dyfrakcji rentgenowskiej	57
6.1.4	Wyniki badania straty masy gruntu przy wyprażaniu	58
6.1.5	Wyniki badania zawartości wapnia	58
6.1.6	Wyniki badania wartości pH gruntu	59
6.1.7	Wyniki badania soli w gruncie	60
6.2	Zastosowane chlorki	60
6.2.1	Chlorek sodu	60
6.2.2	Chlorek wapnia	61
6.2.3	Chlorek glinu	62
6.3	Badanie zagęszczania materiału gruntowego w aparacie Proctora	62
6.3.1	Przygotowanie próbek	63
6.3.2	Przebieg doświadczenia	65
6.3.3	Opis i wyniki pojedynczego testu zagęszczania w aparacie Proctora	67
6.3.4	Wyniki testu zagęszczania w aparacie Proctora przy optymalnej wilgotności	70
6.4	Zagęszczanie w aparacie Proctora przy zmiennej energii zagęszczania	71
6.4.1	Przebieg doświadczenia	71
6.4.2	Dyskusja wyników	76
6.5	Badania edometryczne materiału gruntowego	78
6.5.1	Przygotowanie próbek do edometru	79
6.5.2	Przebieg doświadczenia	80
6.5.3	Wyniki badań edometrycznych	82
6.6	Badania wytrzymałości na ścinanie materiału gruntowego	87
6.6.1	Przygotowanie próbek	87
6.6.2	Przebieg doświadczenia	89
6.6.3	Wyniki	91
6.6.4	Dyskusja wyników	97

6.7	Badania wodoprzepuszczalności materiału gruntowego.....	99
6.7.1	Przygotowanie próbek	99
6.7.2	Przebieg doświadczenia.....	100
6.7.3	Wyniki badań współczynnika filtracji.....	101
6.7.4	Dyskusja wyników	104
6.8	Pomiary potencjału elektrokinetycznego zeta	104
6.8.1	Przygotowanie próbek	106
6.8.2	Przebieg doświadczenia.....	108
6.8.3	Wyniki badań potencjału elektrokinetycznego zeta	110
6.9	Analiza statystyczna wyników eksperymentalnych	112
7	Wpływ dodatków soli na projektowanie skarp.....	113
7.1	Stateczność skarpy.....	113
7.1.1	Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego wodą.....	115
7.1.2	Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego roztworem wodnym NaCl.....	116
7.1.3	Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego roztworem wodnym CaCl ₂	117
7.1.4	Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego roztworem wodnym AlCl ₃	118
7.1.5	Podsumowanie - Stateczność skarp zbudowanych z piasku	119
8	Wnioski końcowe i program dalszych badań	121
8.1	Dyskusja uzyskanych wyników	121
8.2	Podsumowanie i wnioski końcowe	124
8.3	Program dalszych badan.....	126
	BIBLIOGRAFIA	127
	SPIS RYSUNKÓW	137
	SPIS WYKRESÓW	139
	SPIS TABEL	141

STRESZCZENIE

Przedmiotem prezentowanej pracy są badania laboratoryjne i w naturze nad wpływem dodatków powierzchniowo-czynnych, wybranych roztworów chlorków o wybranych stężeniach na właściwości mechaniczne gruntów niespoistych do słabo spoistych gruntów piaszczystych oraz ich wpływu na elektryczną podwójną warstwę na cząstkach gruntu, a tym samym na wzajemne siły oddziaływania pomiędzy ładunkami elektrycznymi na cząstkach stałych i ładunkami elektrycznymi zdysocjowanych w roztworze wodnym.

Aby ocenić właściwości mechaniczne gruntu, w laboratorium przeprowadzone zostały badania zagęszczania w aparacie Proctora, modułu edometrycznego, odporności na ścinanie i wodoprzepuszczalności badanego gruntu piaszczystego. Eksperymenty w naturze były oceniane za pomocą płyty statycznej do badania nośności i zagęszczenia podłoża.

Badany grunt jest drobnym piaskiem z częściami średnio piaszczystymi, pylastymi i gliniastymi. Zgodnie z (DIN EN ISO 14688-1, 2011-06) [94] jest określany jako $fS, m\bar{s}, u'$. Zagęszczalność określa się w testach Proctora zgodnie z normą (DIN 18127, 2012-09) [79], przy czym wytrzymałość na ścinanie określa się za pomocą testu bezpośredniego ścinania zgodnie z (DIN 18137-3, 2002-09) [86]. Laboratoryjne badania modułu ściśliwości przeprowadzane są w edometrze zgodnie z normą (DIN 18135, 2012-04) [84]. Badania w naturze modułów E_{v1} i E_{v2} przeprowadzono za pomocą płyty statycznej zgodnie z normą (DIN 18134, 2012-04) [83]. Zmodyfikowane badania laboratoryjne wpływu stosowanych chlorków na wodoprzepuszczalność gruntu oparte są na normie (DIN 18130-1, 1998-05) [82]. Badania te typowe dla badań mechaniki gruntów, pokazują wpływ wprowadzanych do gruntu chlorków na jej właściwości mechaniczne. Ponadto prowadzone zgodnie z normą (ISO13099-2, 2012-06) [103] pomiary potencjałów zeta cząstek a tym samym badania ilościowe podwójnej warstwy elektrycznej powinny dostarczyć możliwego wyjaśnienia występujących różnic we właściwościach mechanicznych gruntu pojawiających na skutek dodania do niego roztworów chlorków.

Sole, takie jak sól drogowa (NaCl), ale także inne środki rozmrażające, takie jak chlorek wapnia ($CaCl_2$) i chlorek magnezu ($MgCl_2$) lub inne sole są stosowane w celu zapobiegania tworzeniu się lodu, lub rozmrażania lodu i śniegu na ulicach i chodnikach. Chociaż chlorki, głównie chlorek sodu (NaCl) i chlorek wapnia ($CaCl_2$), w różnych

stężeniach, są stosowane w Stanach Zjednoczonych od początku ubiegłego wieku do stabilizacji gruntu na drogach gruntowych i ogólnie drogach, to w Niemczech i innych częściach Europy nie jest rozważany ich dalszy wpływ na właściwości mechaniczne podłoża. Uwzględnienie parametrów uzyskanych w pomiarach laboratoryjnych właściwości mechanicznych gruntu ma na celu pokazanie ich wpływu na analizę stateczności skarpy.

ABSTRACT

Subject of this work are laboratory tests and field tests on the effect of surface-active additives, selected chlorides in selected concentrations, on the mechanical properties of a non-cohesive to weakly cohesive sandy soil. This influences the electrical double layer of the soil particles and thus the mutual attraction forces and electrical charging forces.

In order to be able to assess the mechanical properties, tests on compaction, the oedometer modulus, the shear resistance and the water permeability of the present sandy soil are carried out in the laboratory. The field tests are evaluated using the plate load test.

This sandy soil is a fine sand with medium-sandy, silty and clayey portions. According to (DIN EN ISO 14688-1, 2011-06) [94] this sand is classified as $fS, m\bar{s}, u'$. The compactability is determined by Proctor-tests according to (DIN 18127, 2012-09) [79], with the shear strength being determined using the direct shear test according to (DIN 18137-3, 2002-09) [86]. The examinations of the oedometer module are carried out in the laboratory according to (DIN 18135, 2012-04) [84] in the oedometer consolidation device, with the determination of the E-modules E_{v1} and E_{v2} as field tests using a plate load test according to (DIN 18134, 2012-04) [83]. Modified laboratory tests on the influence of the chlorides used on the water permeability of the soil are based on (DIN 18130-1, 1998-05) [82]. These investigations, which are common in soil mechanics, show the influence of the chlorides brought into the soil on its mechanical properties. In addition, according to (ISO13099-2, 2012-06) [103] measurements of the zeta potentials of the particles and thus the measurement of the electrical double layer of the particles should provide a possible explanation for the differences that occur in the emerging mechanical properties of the fine sand.

Salts, chlorides such as sodium chloride (NaCl) but also other thawing agents such as calcium chloride (CaCl₂) and magnesium chloride (MgCl₂) or other salts are applied to prevent ice formation or to thaw ice and snow on streets and pavements. While chlorides, principally sodium chloride (NaCl) and calcium chloride (CaCl₂), in varying concentrations, have been used in the United States since the beginning of the last century to stabilize the soil of low cost roads and roads in general, they remain in Germany and most of Europe disregarded. The calculation of a slope failure using the parameters obtained in the laboratory for the mechanical properties is intended to show the effects on project planning.

WYKAZ OZNACZEŃ

Litery łacińskie:

A	[m ²]	pole powierzchni
a ₀	[mm]	stała w wielomianie 2. stopnia, wyraz wolny
a ₁	[mm/(MN/m ²)]	stała w wielomianie 2. stopnia
a ₂	[mm/(MN ² /m ⁴)]	stała w wielomianie 2. stopnia
b	[-]	wyraz wolny funkcji logarytmicznej
c, c _(Lsg)	[%]	stężenie roztworów
c'	[N/cm ²]	efektywna spójność gruntu
C _C	[-]	wskaźnik różnoziarnistości
c _{mea}	[kN/m ²]	zmierzona kohezja
c _r	[kN/m ²]	zredukowana kohezja w celu utrzymania równowagi
C _U	[-]	wskaźnik krzywej uziarnienia
d	[mm]	średnica płyty sztywnej
d	[cm]	średnica
d ₁	[mm]	średnica cylindra Proctora
d ₁₀	[mm]	średnica ziarna przy 10 [%] całkowitego przejścia
d ₃₀	[mm]	średnica ziarna przy 30 [%] całkowitego przejścia
d ₆₀	[mm]	średnica ziarna przy 60 [%] całkowitego przejścia
E _d / R _d	[-]	współczynnik bezpieczeństwa
E _e	[V/m]	natężenie pola elektrycznego
E _s	[kPa]	edometryczny moduł ścisłości
E _v	[MN/m ²]	moduł odkształcenia
E _{v1}	[MN/m ²]	moduł odkształcenia przy obciążeniu pierwotnym
E _{v2}	[MN/m ²]	moduł odkształcenia przy obciążeniu wtórnym
G	[S/m]	przewodność elektryczna, konduktancja

G_u	[kg]	masa uderzająca w cylindrze Proctora
g	[m/s ²]	przyspieszenie ziemskie
h	[m]	wysokość upadku masy w cylindrze Proctora
h_0	[mm]	wysokość początkowa próbki w edometrze
h_1	[mm]	wysokość cylindra Proctora
h_w	[m]	różnica wysokości słupków wody
i	[-]	spadek hydrauliczny
k_f	[m/s]	współczynnik filtracji
l	[m]	droga przepływu, wysokość próbki
m	[g]	masa
m_L	[-]	współczynnik przyjętej funkcji logarytmicznej
m_d	[g]	masa próbki suchej
m_f	[g]	masa próbki wilgotnej
m_w	[g]	masa wody porowej
m_z	[g]	masa cylindra Proctora
n	[-]	ilość punktów pomiarowych
n_1	[-]	liczba uderzeń na warstwę w cylindrze Proctora
n_2	[-]	liczba warstw próbki w cylindrze Proctora
n_a	[%]	stopień porowatości
pH	[-]	odczyn roztworu (kwasowości i zasadowości roztworów)
Q	[m ³ /s]	ilość przepływającej wody w czasie
r	[cm]	promień
R^2		współczynnik determinacji
S	[-]	wartości S odchylenia standardowego σ_r
s'	[-]	odkształcenie względne próbek
S_f	[-]	współczynnik bezpieczeństwa

S_{ma}	[kN/m ²]	maksymalna wytrzymałość na ścinanie
S_{nfe}	[kN/m ²]	wytrzymałość na ścinanie wymagana do równowagi
s_p	[mm]	wielkość osiadania płyty
S_r	[-]	stopień wilgotności gruntu
T	[°C]	temperatura
t	[s]	czas
v	[m/s]	prędkość naładowanych cząstek
V_{Ca}	[%]	zawartość objętościowa wapnia
V_{gl}	[%]	strata prażenia
V_w	[m ³]	objętość wody wypływającej z próbki
V_Z	[cm ³]	objętość cylindra Proctora
w	[%]	wilgotność, zawartość wody
$w_{opt(mod)}$	[%]	optymalna zawartość wody przy zmodyfikowanej energii zagęszczania
$w_{opt.}$	[%]	optymalna zawartość wody
$W_{\rho Pr}$	[MNm/m ³]	energia właściwa zagęszczania
\bar{X}	[-]	średnia empiryczna według wzoru
X_i	[-]	wielkość wyrażenia na i-tym elemencie próbki

Litery greckie:

γ	[N/m ³]	ciężar właściwy
Δh	[mm]	zmiana wysokości próbki w edometrze
Δs	[mm]	przyrost osiadań odpowiadający przyjętemu zakresowi obciążeń 0,3 σ_{max} i 0,7 σ_{max}
$\Delta s'$	[-]	przyrost odkształcenia względnego próbek
$\Delta \sigma$	[MN/m ²]	przyrost obciążenia

$\Delta\sigma$	[kPa]	przyrost obciążenia
ε	[-]	stała dielektryczna
ζ	[V]	potencjał zeta
η	[Pa · s]	lepkość dynamiczna
λ	[nm]	długość fali
μ	[m ² /(V · s)]	ruchliwość elektroforetyczna
ρ_d	[g/cm ³]	gęstość próbki suchej
ρ_f	[g/cm ³]	gęstość próbki wilgotnej
ρ_{Pr}	[%]	gęstość Proctora
$\rho_{Pr(mod)}$	[g/cm ³]	zmodyfikowana gęstość Proctora
ρ_s	[g/cm ³]	gęstość właściwa szkieletu gruntowego
ρ_w	[g/cm ³]	gęstość wody
σ	[kPa]	oznaczenie obciążeń
σ_0	[MN/m ²]	średnie naprężenie normalne pod płytą
σ_{max}	[MN/m ²]	obciążenie maksymalne
ΣMsf	[-]	numeryczny parametr stabilności, odpowiadający globalnemu bezpieczeństwu
σ_n	[kN/m ²]	składowa naprężenia normalnego
σ_r		odchylenie standardowe
τ	[N/cm ²]	wytrzymałość na ścinanie
φ	[°]	efektywny kąt tarcia wewnętrznego
φ'	[rad]	efektywny kąt tarcia wewnętrznego
φ_r	[°]	zredukowany kąt tarcia w celu utrzymania równowagi

1 Wstęp

Aby grunt został uznany za grunt budowlany, musi wypełnić określone wymagania, podlega wymaganiom technicznym. Dotyczy to wielu parametrów, w tym składu, uziarnienia i właściwości mechanicznych. W przypadku budowy dróg nacisk kładziony jest na nośność i odkształcalność istniejącego gruntu. Ze względu na ukształtowane na przestrzeni wieków struktury osadowe w Niemczech, środki infrastrukturalne związane z nową budową i rozbudową sieci drogowej często muszą wykorzystywać jako teren budowlany tereny, które bez dalszych działań nie spełniają wymaganych kryteriów gruntowo-mechanicznych.

1.1 Konieczność uzdatniania gruntu pod budowę dróg w Niemczech

W procesie od planowania do eksploatacji dróg publicznych w Niemczech istnieją instrukcje, które mają charakter informacyjny i doradczy, ale w niektórych przypadkach muszą być również koniecznie przestrzegane. Zasady „Dodatkowych przepisów i wytycznych technicznych” (po niemiecku w skrócie „ZTV”) są częścią dokumentacji projektu w części technicznej. Ogólne warunki i procedury dotyczące robót ziemnych przy budowie dróg publicznych w Niemczech regulują „Dodatkowe przepisy i wytyczne techniczne do robót ziemnych w budownictwie drogowym” (po niemiecku w skrócie „ZTV E-Stb”). Jeżeli grunt nie spełnia wymagań technicznych, konieczne są jego ulepszenia. Procedura jest podsumowana w wytycznych dotyczących traktowania gruntu spoiwami (po niemiecku w skrócie „M BmB”), przy czym w zależności od istniejących grup gruntu, odpowiednie (DIN 18196, 2011-05) [87] wapno drobne lub wapno hydratyzowane wg (DIN EN 459-1, 2015-07) [93], cement zgodnie z (DIN EN 197-1, 2011-11) [92] lub (DIN 1164-10, 2013-03) [76] lub stosuje się hydrauliczne spoiwa gruntowe i podkładowe zgodnie z (DIN 18506, 2002-02) [88].

1.2 Rozwój historyczny

Historia dróg brukowanych ma swoje korzenie w odległej przeszłości. Niektóre rodzaje były już znane w starożytnej Mezopotamii i Egipcie. Grecja i Cesarstwo Rzymskie stosowały stabilizację wapnem. W średniowieczu i w okresie późniejszym skromne zapotrzebowanie na nowe drogi nie było powodem do nowych rozwiązań, tak że rozwój nastąpił dopiero na początku XIX wieku wraz z rozpoczęciem budowy dróg

makadamowych (z dwóch uwałowanych warstw wg Johna Loudona McAdama). Dalszy rozwój nastąpił z użyciem kruszonego kamienia oraz walca parowego w drugiej połowie XIX wieku. W Europie tak budowane drogi szutrowe powstawały przez następne prawie sto lat [35].

1.3 Sposoby poprawy właściwości gruntów

W KÉZDI (1979) [31] opisane są możliwości poprawy właściwości mechanicznych gruntu i stabilizacji korzystnych jego właściwości na różne sposoby:

- procesy mechaniczne, które zapewniają stabilność gruntu bez dodawania obcych substancji. Może to być
 - zagęszczanie, zmniejszenie pustej przestrzeni pomiędzy ziarnami
 - odwadnianie i utrzymywanie stałej zawartości wody
 - mieszanie różnych rodzajów gruntu.

Należy tutaj zauważyć, że techniki te są zwykle łączone, ponieważ na przykład zagęszczanie jest wymagane w prawie wszystkich przypadkach.

- metody fizyczne

Praktyczne reakcje fizyczne prowadzące do stabilizacji to:

- zmiana temperatury np. spadek temperatury i krzepnięcie gorącego asfaltu zmieszanego z gruntem
- hydratacja, związanie i utwardzenie dzięki hydratacji cementu portlandzkiego
- parowanie, np. wysychanie gruntu wzmocnionego emulsją bitumiczną
- adsorpcja, zmiana właściwości powierzchniowych cząstek

- metody chemiczne

Reakcje chemiczne stosowane do tej pory do stabilizacji gruntu to np.:

- wymiana jonowa, zmiana kompleksu adsorpcyjnego cząstek gruntu przez wymianę zasad
- strącanie, zmieszanie dwóch roztworów daje nowy związek, który może wywierać działanie stabilizujące

- polimeryzacja, w określonych warunkach, w wyniku interakcji kilku prostych związków powstają nowe wielkocząsteczkowe związki o działaniu stabilizującym i
- utlenianie, np. Kwasami

1.4 Pierwsze stabilizacje gruntu w Stanach Zjednoczonych

Przy zastosowaniu europejskich metod zbudowano także pierwsze autostrady w Stanach Zjednoczonych. Tam jednak szybko okazało się, że tempo budowy dróg nie nadąża za rosnącym popytem, a koszty budowy są niedopuszczalnie wysokie ze względu na pracę ręczną i ogromne zapotrzebowanie na przeładunek i transport materiałów. Ponadto zbudowane w ten sposób drogi nie spełniały wymagań stale rosnącego i przyspieszającego ruchu i były niszczone szybciej, niż można było je naprawić. Dlatego konieczne było opracowanie nowych metod, ekonomicznych, które umożliwiłyby szybką budowę stałych dróg. Na drogach miejskich i autostradach rozwój ten doprowadził do wprowadzenia betonu i czarnej nawierzchni, a na drogach drugorzędnych do regularnego stosowania ustabilizowanego gruntu.

Na początku XX wieku Stany Zjednoczone przeprowadziły pierwsze eksperymenty z mieszaninami piasku i gliny. Dobre wyniki zmotywowały późniejsze projekty budowlane z różnymi mieszankami. W tym czasie po raz pierwszy zastosowano cement, bitum i niektóre sole do stabilizacji gruntu i opracowano szereg innych technik stabilizacji.

Stabilizacja gruntu solami jest metodą fizykochemiczną, Aby zrozumieć, jak działają sole, należy najpierw poznać podstawowe elementy gruntu, a mianowicie cząstki stałe gruntu, pory między nimi i wodę oraz ich wzajemne relacje.

2 Cel, teza i zakres rozprawy

2.1 Cel rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej jest wykazanie, że dodatek wodnych roztworów chlorków do gruntu wpływa na zmianę jego parametrów mechanicznych, wielkości tych zmian w zależności od rodzaju użytego chlorku na podstawie badań laboratoryjnych i w naturze oraz ich wpływu na projektowanie. Badanymi parametrami są gęstość gruntu, edometryczny moduł ściśliwości, kąt tarcia wewnętrznego, wodoprzepuszczalność i z nimi powiązana grubość warstwy związanej wody mierzona na podstawie pomiaru potencjału zeta. Celem rozprawy było również wskazanie na zastosowanie wyników badań do projektowania skarp.

2.2 Teza rozprawy doktorskiej

Teza rozprawy została następująco sformułowana:

„Istnieje możliwość z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością zmiany własności mechanicznych gruntów niespoistych poprzez wprowadzenie do szkieletu gruntu odpowiednich roztworów, które powlekając powierzchnię zewnętrzną ziaren, wywołują efekty adhezyjne i elektrostatyczne”.

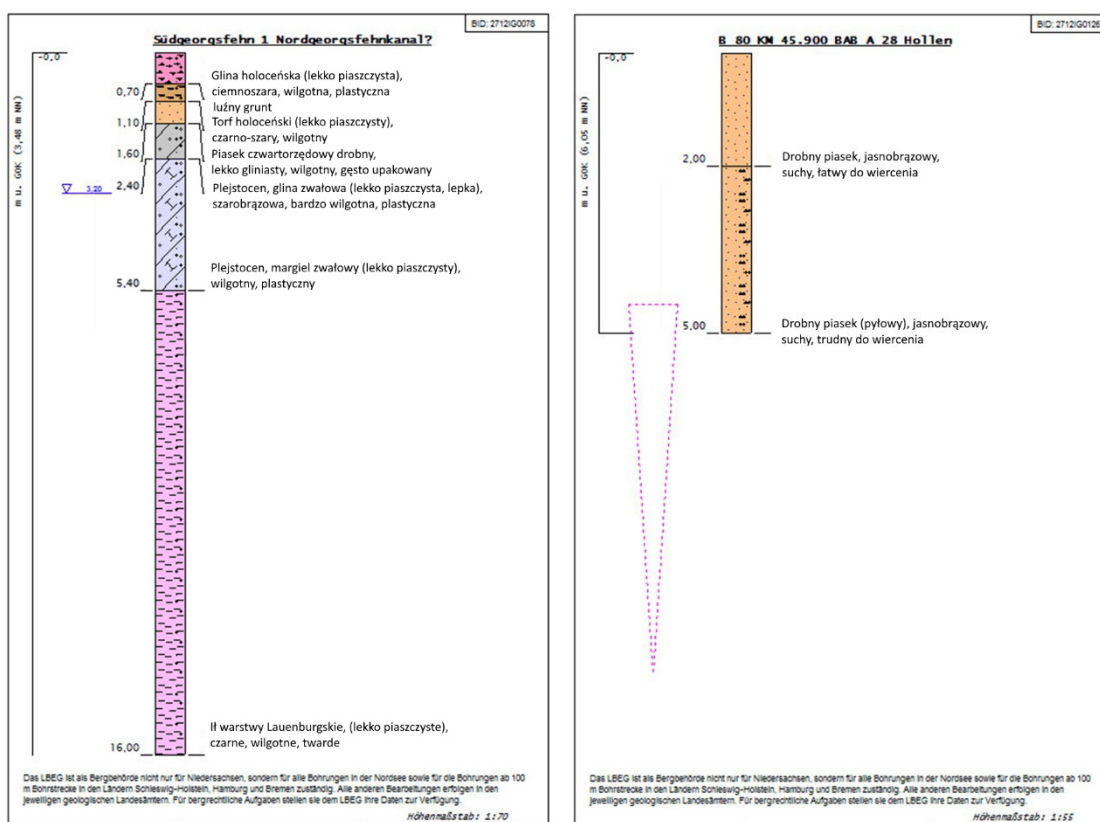
2.3 Zakres rozprawy doktorskiej

Zakres rozprawy doktorskiej obejmuje:

- analizę literatury w zakresie obranego tematu
- badania eksperymentalne w laboratorium i w skali naturalnej w celu określenia przydatności roztworów soli do zmiany parametrów mechanicznych jednoziarnistych gruntów niespoistych przy dodatkowym uwzględnieniu dotąd nie stosowanego w praktyce roztworu chlorku glinu
- praktyczne zastosowanie wyników uzyskanych badań
- wnioski i program dalszych badań

3 Przegląd literatury

Naturalne grunty w północnych Niemczech mają często małą nośność. Jest to szczególnie widoczne w projektach infrastrukturalnych, takich jak budowa autostrady federalnej A 28 czy budowa drogi federalnej B 210. Występują tu grunty spoiste, głównie iłowe i pyłowe o dużej plastyczności. Podłoża często muszą być wymieniane lub konsolidowane przez budowę nasypu przeciążającego z niespoistego gruntu, piasku drobnego i średniego wydobytego z dna zatoki Morza Północnego Jadedbusen lub okolicznych zbiorników wodnych. Rys. 3.1 z lewej przedstawia przykładowy rdzeń odwiertu naturalnego gruntu typowego dla północnych Niemiec a z prawej przekrój a z prawej nasypu po wymianie.



Rys. 3.1 Słabo stabilne podłoże (po lewej) Zastąpienie gruntu lub zasypanie drobnym piaskiem (po prawej). Źródło: Państwowy Urząd Górnictwa, Energetyki i Geologii, Centrum Geologii w Hanowerze

W przypadku niekorzystnych warunków naturalnych autostrady muszą być budowane na specjalnie tego celu usypanych skarpach.



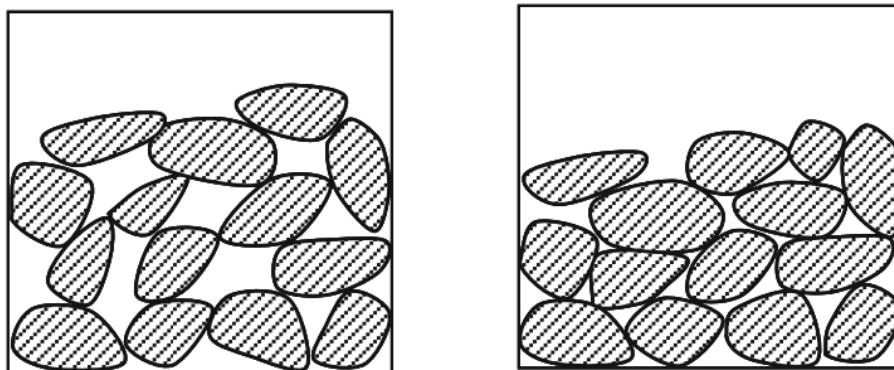
Rys. 3.2 Autostrada federalna A28 w Dolnej Saksonii. Źródło: Państwowy Urząd Górnictwa, Energetyki i Geologii, Centrum Geologii w Hanowerze

W celu określenia wpływu środków powierzchniowo czynnych na właściwości mechaniczne gruntu i jego główne cechy należy rozróżnić trzy główne typy gruntów: grunty niespoiste, spoiste oraz grunty organiczne, przy czym w dalszej części rozpatrywane są grunty niespoiste. O tym podziale decydują skład i struktura gruntu, ale przede wszystkim wielkość i rodzaj ziaren.

3.1 Grunty niespoiste – struktura żwirów i piasków

Ziarna żwiru i ziarnka piasku zbudowane są z pojedynczych kryształów i cząstek skał, których atomy mają silne wiązania. Silna struktura wewnętrzna tych ziaren skutkuje wysoką wytrzymałością własną. Podobnie ta wewnętrzna struktura zmniejsza ich aktywność powierzchniową. Decydującym czynnikiem jest tu średnica ziaren, przy czym wzajemne siły przyciągania i siły elektryczne nabierają znaczenia ze zmniejszaniem się średnicy ziaren. Ziarna te tworzą strukturę rozdzielnoziarnistą, w której ziarna

sąsiadujące zajmują miejsce w przestrzeniach wolnych pomiędzy już nagromadzonymi ziarnami i stykają się ze sobą tylko na swoich powierzchniach. W zależności od wpływów zewnętrznych ta rozdzielnoziarnista struktura może być ciasno upakowana lub luźna. Przedstawienie indywidualnej struktury ziarnistej ziaren żwiru i ziaren piasku przedstawia Rys. 3.3.



Rys. 3.3 Luźno ułożona (po lewej) i gęsto ułożona (po prawej) struktura ziaren żwiru i piasku [7]

Grunty niespoiste można podzielić ze względu na kształt ziaren uformowany na drodze transportu materiału gruntowego przed jego deponowaniem. Mocno zaokrąglone ziarna wskazują na długą drogę transportu, podczas gdy ziarna ostrokrawędziowe wskazują na krótkie lub nieistniejące trasy transportu. Poszczególne oznaczenia kształtów ziaren zwartych można znaleźć na Rys. 3.4.



Rys. 3.4 Oznaczenie kształtu (zbliżonych do kulistego) zwartych ziaren [60] (wolny przekład)

Kształt ziarna ma szczególny wpływ na właściwości mechaniczne gruntu, wodoprzepuszczalność, a przede wszystkim na ściśliwość, zdolność do zagęszczania i kąta tarcia.

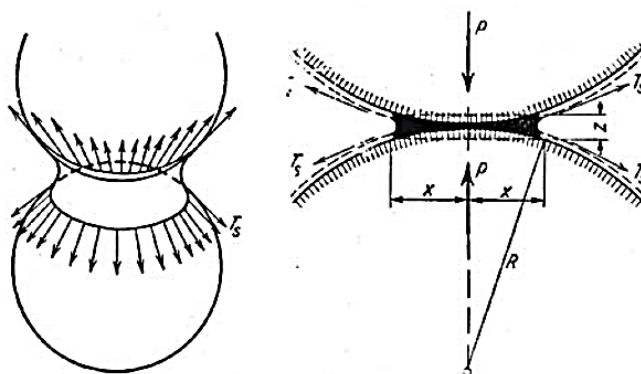
Niezależnie od środowiska zewnętrznego, w którym znajduje się grunt niespoisty, całkowicie suchego czy też pod wodą siły na niego działające przekazywane są z ziarno na ziarno. Z tego powodu materiały te mają stosunkowo niską ściśliwość a na ruch ziaren decydujący wpływ ma tarcie które zależy to od przyłożonej siły normalnej działającej na

ziarna. Jeśli jednak grunt niespoisty jest w stanie wilgotnym, nienasyconym do znaczenia dochodzi napięcie powierzchniowe wody (roztworu).

3.1.1 Wpływ napięcia powierzchniowego na grunty niespoiste

Siły działające wewnątrz cieczy na cząsteczki nie mają określonego kierunku. Inaczej na swobodnej powierzchni. Siła przyciągania działa na cząsteczki tylko z jednej strony, w kierunku do wnętrza cieczy, bo nad powierzchnią cieczy nie ma cząsteczek, które by przyciągały. Jeśli cząsteczka zostanie wyniesiona na powierzchnię, musi pokonać siły przyciągania sąsiednich cząsteczek. Na powierzchni cieczy powstaje napięcie powierzchniowe. Z powodu tego napięcia powierzchniowego ciecz przyjmuje określony kształt, zdeterminowany najniższą energią potencjalną. W naczyniu w polu grawitacyjnym Ziemi jest to powierzchnia pozioma, w stanie nieważkości byłby to kształt kulisty na skutek przyciągania do wnętrza cieczy. Również tam, gdzie stykają się substancje w różnych stanach skupienia, uwidacznia się napięcie powierzchniowe.

W wilgotnym gruncie, gdzie występują substancje w trzech stanach skupienia (ziarna gruntu, woda w postaci wilgoci i powietrze) powstające napięcie powierzchniowe powoduje „sklejanie” się ziaren. Gdy stopień nasycenia wodą jest niski, woda gromadzi się wokół punktów styku ziaren gruntu niespoistego. Wpływ napięcia powierzchniowego między ziarnami gruntów niespoistych jest idealizowany według (KÉZDI 1969), co przedstawia Rys. 3.5.

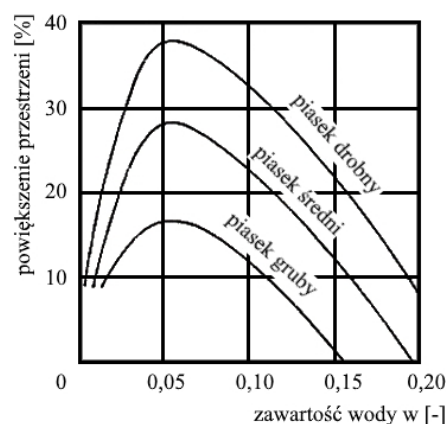


Rys. 3.5 Powstawanie napięcia powierzchniowego pomiędzy dwiema sferami połączonymi meniskiem cieczy [32]

Promień menisku cieczy wokół linii styku oznaczono jako x , a rzędną granicy zwilżania jako z . Siły adhezyjne powstają wzdłuż linii styku menisku wodnego z ziarnami gruntu. Wyrażają się one w postaci napięcia i prowadzą do ściskania ziaren („sklejania“) z siłą oznaczoną tutaj jako P . Ta siła adhezji między wodą a ziarnem powoduje, że piasek

wyduje się spoisty. Jeżeli suchy piasek zostanie zwilżony wodą, a następnie wymieszany, siły te powodują zwiększenie objętości masy piaskowej. To powiększenie jest tym większe, im drobniej uziarniony jest materiał próbki, ponieważ całkowita powierzchnia materiału próbki znacznie wzrasta wraz ze zmniejszaniem się średnicy ziarna. Związek między promieniem ziarna a powierzchnią całkowitą i związany z tym przyrost objętości analizuje Rys. 3.6.

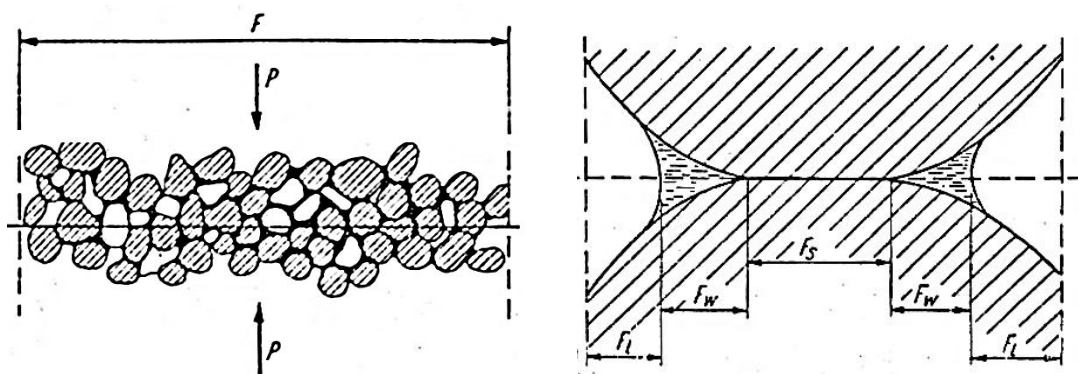
promień kuli	liczba kul	powierzchnia całkowita
10 mm	10^0	$1,26 \cdot 10^1 \text{ cm}^2$
1 mm	10^3	$1,26 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$
0,1 mm	10^6	$1,26 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$
0,01 mm	10^9	$1,26 \cdot 10^4 \text{ cm}^2$
1 μm	10^{12}	$1,26 \cdot 10^5 \text{ cm}^2$
0,1 μm	10^{15}	$1,26 \cdot 10^6 \text{ cm}^2$



Rys. 3.6 Zależność między wielkością ziarna, liczbą ziaren i całkowitą powierzchnią przy rozbiciu kuli o promieniu $r = 1 \text{ cm}$ (po lewej) [56] Zwiększenie objętości piasku podczas mieszania w zależności od zawartości wody (po prawej) [32]

Zgodnie z oczekiwaniami wzrost objętości próbki podczas mieszania wzrasta wraz ze wzrostem zawartości wody. Po osiągnięciu maksimum to powiększenie ponownie się zmniejsza, ponieważ zawartość wody nadal rośnie.

Kiedy na próbkę gruntu niespoistego działają siły, powstają w niej napięcia. Jeżeli próbka piasku lub żwiru jest w stanie suchym, przestrzeń porów jest wypełniona powietrzem. W punktach styku ziaren powstają duże naprężenia, a w porach bardzo małe. Jeśli jednak pory pomiędzy poszczególnymi ziarnami są wypełnione wodą, siła działająca na ziarna gruntu jest przenoszona przez trzy stany skupienia. Rys. 3.7 przedstawia krzywą naprężenia między ziarnami w trzech stanach skupiska w wyniku przyłożonej siły zewnętrznej.



Rys. 3.7 Płaszczyzna przekroju w gruncie (po lewej) naprężenia w trzech stanach skupienia w gruncie (po prawej) [32]

Ziarna są ściskane siłą P . Siła ta działa na obszar F , który w przypadku ziaren wilgotnych jest rozłożony na trzy fazy. Powierzchnia F składa się zatem z części powierzchni styku stałych ziaren F_s i części F_w i F_l fazy wodnej i fazy powietrznej. Naprężenia działające między ziarnami ciała stałego to tak zwane naprężenia efektywne. Pozwalają one korpusowi gruntu na pochłanianie naprężeń ścinających.

Jeśli weźmiemy pod uwagę fazę ciekłą, roztwór soli (elektrolit) ma wyższe napięcie powierzchniowe niż woda destylowana. Napięcie powierzchniowe wody destylowanej wynosi $72,75 \text{ [mN} \cdot \text{m}^{-1}]$ [66] i spada wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze $30 \text{ [}^\circ\text{C]}$ napięcie powierzchniowe wynosi $71,2 \text{ [mN} \cdot \text{m}^{-1}]$. Jeśli rozważa się roztwory elektrolitów w tej temperaturze, w zależności od stężenia powstają wyższe napięcia powierzchniowe. Na przykład w tej samej temperaturze 10-procentowy roztwór NaCl ma napięcie powierzchniowe $73,42 \text{ [mN} \cdot \text{m}^{-1}]$ i napięcie powierzchniowe $74,59 \text{ [mN} \cdot \text{m}^{-1}]$ dla CaCl_2 [53].

W przypadku gruntów z zawartością frakcji spoistych, cienkie płatki, jakie znajdują się w glinach, nie są kulistego kształtu, a zatem mają większą całkowitą powierzchnię w stosunku do swojej masy. Pomiędzy tymi powierzchniami działają dodatkowo siły fizykochemiczne, których nie można pominąć w przypadku glin.

3.2 Grunty spoiste – pyły i ily

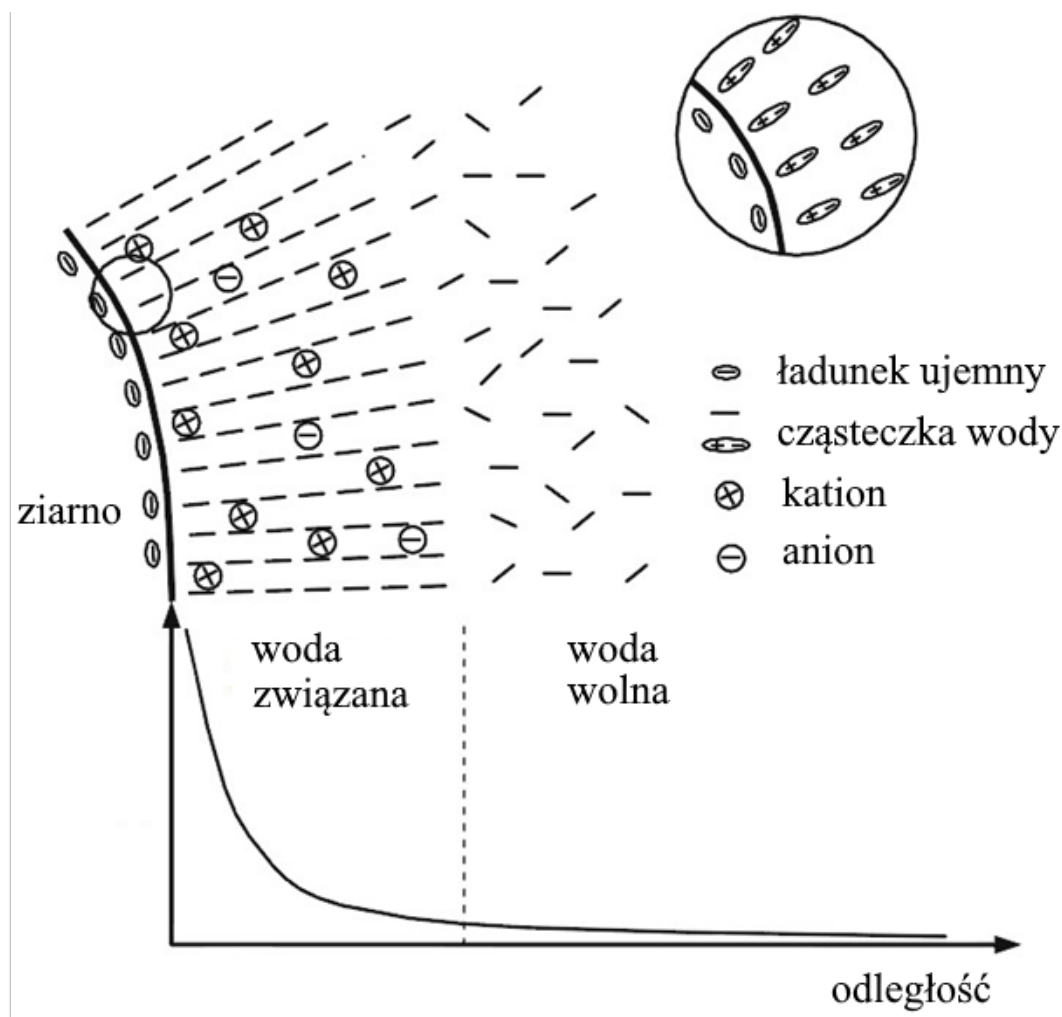
Podstawą tej pracy są grunty niespoiste. W rozdziale 5 przedstawione badania w naturze i w rozdziale 6 badania laboratoryjne obejmują drobny piasek o słabo spoistych składnikach. Udział pyłu w gruncie użytym do badań polowych wynosi 5,6 [%], udział łu w laboratorium to 10,5 [%]. Udział łu w gruncie próby polowej oraz w badaniach laboratoryjnych wynosi 0,6 [%]. Części spoiste znajdują się również w gruntach niespoistych, dotyczy to udziału do 15 [%]. Strukturę, skład i właściwości minerałów ilastych można znaleźć w JASMUND i LAGALY (1993) [29]. Należy zauważyć, że w minerałach ilastych działają dodatkowo inne mechanizmy, oddziaływanie fizykochemiczne spowodowane obecnością elektrolitów. Na szczególną uwagę zasługuje proces wymiany jonowej związany z pojemnością wymienną VOIGT (1990) [69].

3.3 Wymiana między fazą stałą i ciekłą

W cząsteczce wody centra dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych nie pokrywają się. W rezultacie cząsteczki te zachowują się jak dipole. Jedna strona jest naładowana dodatnio, a druga zawiera ładunek ujemny. Atomy wodoru mogą oddziaływać z sąsiednimi cząsteczkami, tworząc w ten sposób wiązania wodorowe. Każdy atom tlenu jest otoczony czterema innymi atomami tlenu w formie czworościanu, przy czym atomy wodoru znajdują się między atomami tlenu. W ten sposób woda w stanie ciekłym ma jednostkę strukturalną, która może oddziaływać i zmieniać się z jonami, cząsteczkami i rozproszonymi cząsteczkami. Cząsteczki wody nie tylko łączą się w duże jednostki strukturalne połączone wiązaniami wodorowymi, ale także dysocjują na jony wodorowe i hydroksylowe [32]. Również sole rozpuszczone w wodzie dysocjują na dodatnio naładowane kationy metalu i ujemnie naładowane aniony reszty kwasowej.

Poszczególne jony mogą być zaadsorbowane na naładowanej powierzchni fazy stałej, czyli sorbencie, ponieważ ładunek na powierzchni w roztworach wodnych jest zawsze neutralizowany przez dodanie jonów o przeciwnych ładunkach. Ta neutralizacja następuje z powodu sił przyciągania elektrostatycznego. W przypadku dodatnio naładowanych powierzchni jest to realizowane przez aniony, podczas gdy ujemnie naładowane powierzchnie są neutralizowane przez kationy. Ze względu na ładunek powierzchniowy sorbenty są otoczone warstwą, której skład jonowy nie jest taki sam jak otaczającego wolnego roztworu. Jeżeli ten rozkład na powierzchni kryształów jest jednorodny, to rozkład zaadsorbowanych jonów jest również jednorodny. Jeśli jednak

rozkład jest niejednorodny lub jony mają różne wartościowości, jony w roztworze nie będą adsorbowane w takim samym stopniu. W wyniku przestrzennego oddzielenia jonów od sorbentu powstaje podwójna warstwa elektryczna, która wytwarza pole elektryczne, podobnie jak to się dzieje w kondensatorze. Powierzchnia zyskuje w ten sposób mierzalny potencjał elektryczny w porównaniu z roztworem, co pokazuje Rys. 3.8 [32].



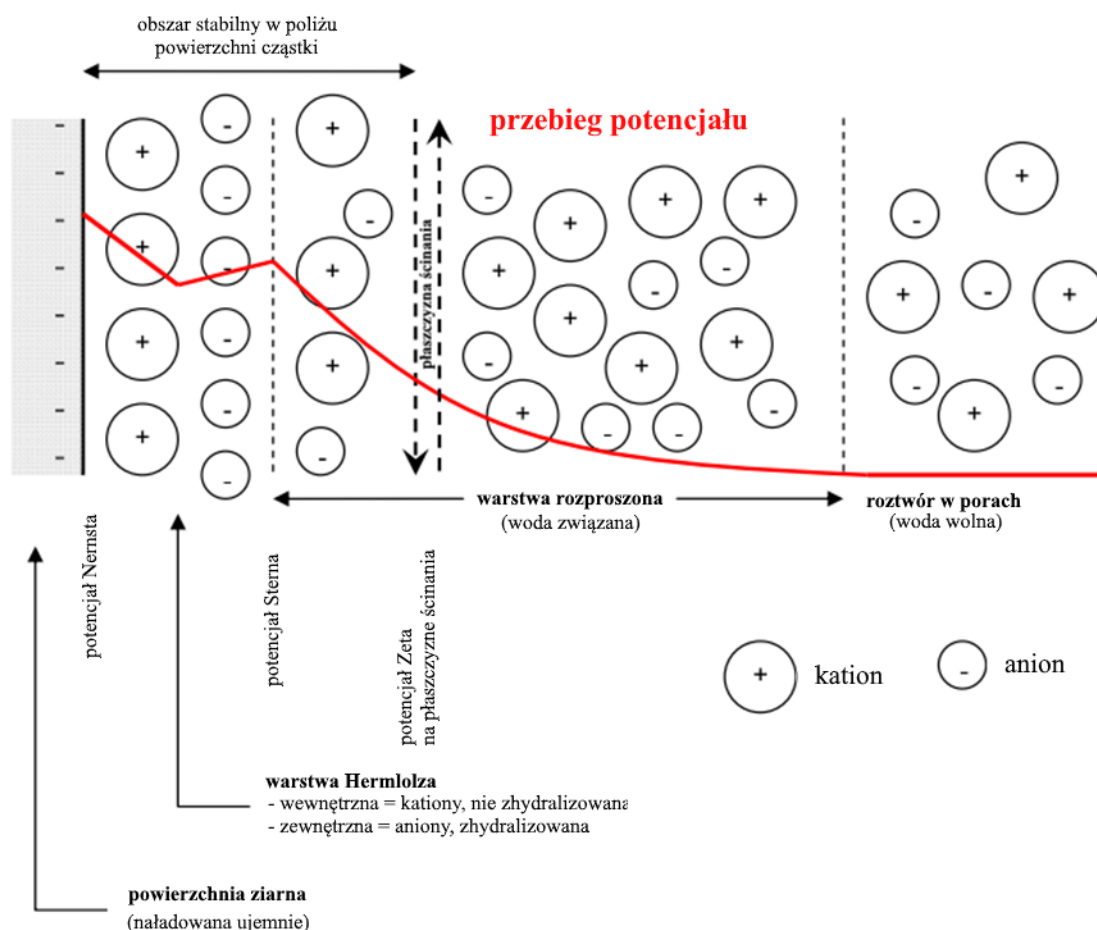
Rys. 3.8 Interakcja molekularna między sorbentem a wodą [7]

Bezpośrednio na ujemnie naładowanej powierzchni ziarna tworzy się sztywna warstwa kationowa o maksymalnym mierzalnym potencjale. Wokół tej warstwy wewnętrznej tworzy się warstwa zewnętrzna. W tej zewnętrznej warstwie dyfuzyjnej koncentracja kationów zmniejsza się aż do osiągnięcia stanu równowagi między kationami i anionami w roztworze. Rezultatem jest silny spadek potencjału elektrycznego wraz ze wzrostem odległości od naładowanej powierzchni.

Powstająca warstwa jonowa jest podwójną warstwą elektryczną w sensie teorii HELMHOLTZA (1879) i jest porównywalna z kondensatorem elektrycznym pod

względem struktury [24], w której powierzchnia cząstek reprezentuje płytkę ujemną kondensatora, a jony przeciwne, które je kompensują, reprezentują dodatnią płytę kondensatora. Model HELMHOLTZA został dalej rozwinięty przez GOUY (1909/1917) [19],[20] i CHAPMAN (1913) [9] w zakresie który uwzględnia ruch termiczny przeciwnie naładowanych jonów w swoich modelach.

Model GOUYA-CHAPMANA przewiduje nadmiernie wysokie stężenie jonów w pobliżu powierzchni cząstki, co nie jest możliwe z samych tylko przyczyn geometrycznych. W 1924 STERNA [64] opisał więc wewnętrzną warstwę mocno przylegających jonów, które ze względu na swoją wielkość znajdują się w pewnej odległości od Rys. 3.9 rzeczywistej powierzchni cząstek to warstwa STERNA.

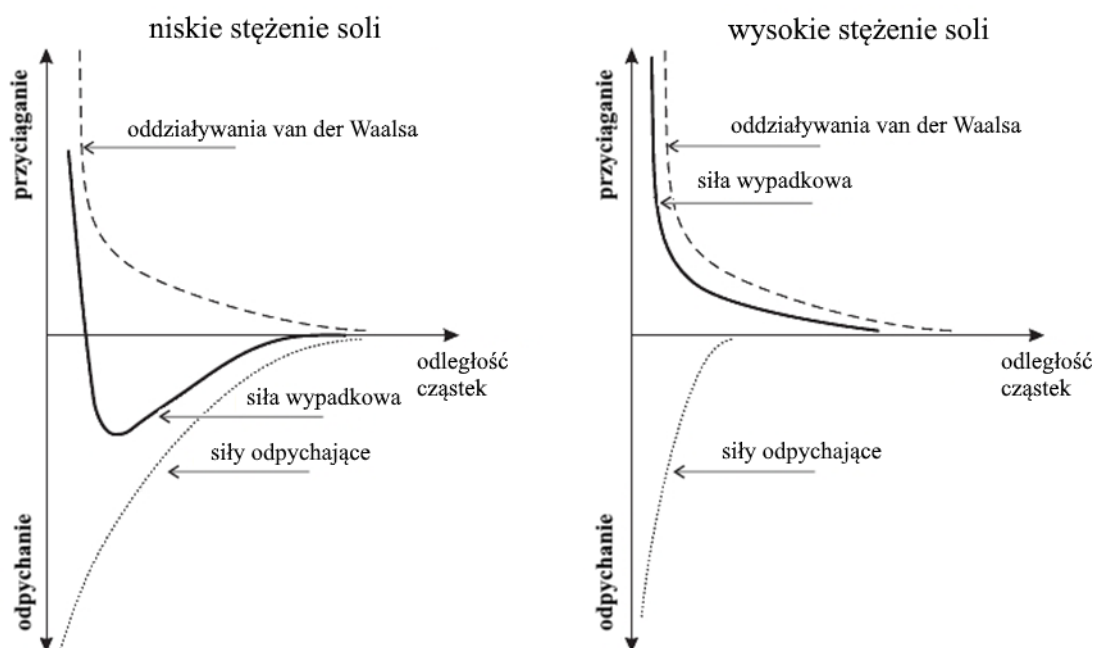


Rys. 3.9 Model podwójnej warstwy wg. STERNA 1924 [33]

Poziom i przebieg potencjału elektrycznego zależą od różnych czynników. Nacisk kładziony jest na poziom ładunku na powierzchni, wartościowość sorbowanych jonów i stężenie jonów zdysocjowanych w otaczającym roztworze [56].

Potencjał wpływa na właściwości cząstek gruntu. W szczególności są to oddziaływania cząstki z innymi cząstkami w postaci sił przyciągania i sił odpychania. Ze względu na koncentrację kationów w podwójnych warstwach elektrycznych, ujemnie naładowane cząstki odpychają się nawzajem. Jednak im wyższe stężenie soli w roztworze, tym cieńsza jest podwójna warstwa elektryczna. Powyżej pewnego stężenia jonów w otaczającym roztworze jony są wypychane bliżej granicy faz, tak że przeważają siły przyciągania. Nowa, większa jednostka powstaje z cząstek, które skleją się ze sobą. Ten proces nazywa się koagulacją. Gdy stężenie soli spada, stan flokulacji jest ponownie tracony. Co więcej, do cofnięcia tego stanu flokulacji wystarczy niewielkie ścinanie. W zależności od rodzaju i stężenia substancji może przeważać koagulacja lub peptyzacja [56].

Rys. 3.10 pokazuje przyciągające siły van der Waalsa i siły odpychania między poszczególnymi cząsteczkami przy niskim i wysokim stężeniu soli.



Rys. 3.10 Siły działające na powierzchnię cząstki jako funkcja odległości przy niskim stężeniu soli (po lewej) i wysokim stężeniu soli (po prawej) [23]

Powstała krzywa pokazuje energię, która musi zostać użyta, aby cząstki zbliżyły się do siebie wbrew siłom odpychania. Tutaj przyciągające siły van der Waalsa są niezależne od rodzaju roztworu i jego stężenia. W roztworach o niskim stężeniu soli całkowity potencjał wzrasta, gdy cząstki zbliżają się do siebie, tak więc dalsze zbliżanie wymaga więcej energii. Po pokonaniu skrajnego punktu wzrasta jednak wpływ sił przyciągania.

Jeśli odległość cząstek spadnie poniżej pewnej granicy, podwójne warstwy nakładają się na siebie. Oprócz zmniejszonej podwójnej warstwy elektrycznej koagulacja jest wspomagana, gdy zderzające się cząstki mają zwiększoną prędkość. Ze względu na ruch cząstek podwójna warstwa może zostać pokonana przez podwyższenie temperatury i wpływy mechaniczne. Fizyczne i matematyczne podstawy podwójnej warstwy elektrycznej są szczegółowo opisane w [34].

Podczas renowacji uszkodzonych przez mróz kanadyjskich linii kolejowych do gruntu wprowadzano sól kamienną. Przez to zostały naprawione szkody spowodowane mrozem. Oprócz obniżenia temperatury zamarzania wody gruntowej przypisuje się to ścisaniu podwójnych warstw w wyniku zwiększonego stężenia jonów, przy jednoczesnej poprawie przepuszczalności gruntu [74]. Odwrotnie, grunty traktowane CaCl_2 , MgCl_2 i NaCl były płukane wodą destylowaną, przy czym wszystkie próbki wykazały spadek szybkości przepływu. Przypisuje się to pęcznieniu podwójnej warstwy po procesie płukania [1].

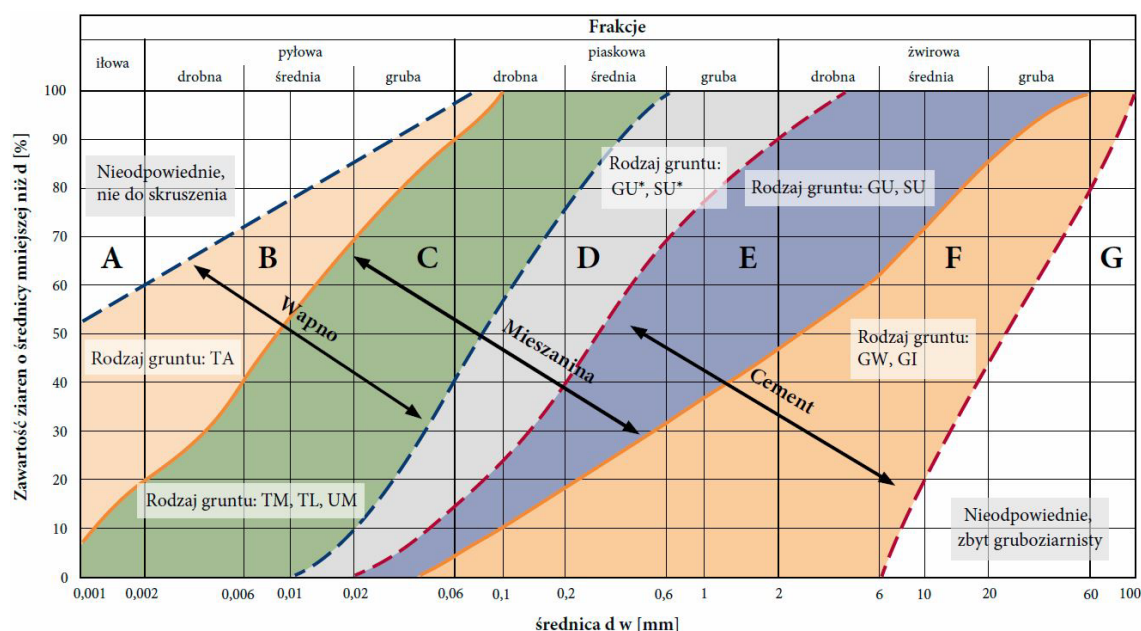
3.4 Przegląd dodatków do gruntu

Jako materiały dodatkowe dostępna jest szeroka gama substancji. Od gruntu naturalnego, który jest zwykle stosowany w postaci gruboziarnistego materiału podczas wznoszenia słupów balastowych, po środki wiążące, takie jak wapno, cement lub bitum. Oprócz tych dodatków do zmiany mechanicznych lub hydraulicznych właściwości gruntu coraz częściej stosuje się przemysłowe produkty uboczne w postaci żużla, lub popiołu. Można również używać produktów odpadowych, pod warunkiem, że są one przyjazne dla środowiska. Oprócz odpadów mineralnych, które powstają głównie jako recykling materiałów budowlanych podczas rozbiórki budynków, używane są: tłuczone szkło, włókna z tworzyw sztucznych, rozdrobnione produkty z tworzyw sztucznych lub elastomerów, a w szczególności produkty gumowe w postaci rozdrobnionych starych opon (tzw. tyre chips). Odczynniki chemiczne, sole, żywice lub polimery są również używane do specyficznej zmiany właściwości gruntu. Nowsze metody reprezentują procesy biologiczne za pomocą enzymów lub bakterii.

Wybór odpowiedniego dodatku zależy od kilku czynników. Oprócz rodzaju modyfikowanego podłoża, celu użytkowania, pożądaných właściwości technicznych modyfikowanego podłoża, zarówno dostępność produktu, jak i jego koszty, a przede wszystkim przyjazność dla środowiska odgrywają ważną rolę.

3.5 Dodatki tradycyjne (przewidziane normami)

Tak zwane dodatki tradycyjne to standaryzowane rodzaje spoiw. Należą do nich cementy zgodne z normami (DIN EN 197-1, 2011-11) [92] oraz (DIN 1164-10, 2013-03) [76] wszelkiego rodzaju wapna budowlane wg (DIN EN 459-1, 2015-07) [93]. Wybór spoiwa uzależniony jest od właściwości mechanicznych gruntu oraz wymagań, jakie musi spełniać mieszanka gruntowo-spoiwowa. Według wykresu Wykres 3.1 rozkład uziarnienia gruntu wyjściowego determinuje wybór rodzaju spoiwa, cementu, wapna lub ich mieszaniny. Należy wspomnieć, że spoiwa wykonane z innych znormalizowanych i nieznormalizowanych składników (FGSV 599) [100] mogą być stosowane tylko wtedy, gdy istnieje porozumienie między wykonawcą a klientem, a przydatność tych spoiw została potwierdzona w badaniach laboratoryjnych lub w warunkach polowych.



Wykres 3.1 Zakresy przydatności spoiw na podstawie krzywej uziarnienia [49], (tłumaczenie i interpretacja własna)

Grunty drobnoziarniste, takie jak muły, zaprawia się wapnem budowlanym, natomiast grunty gruboziarniste, np. żwir, zaprawia się cementem. Dla pośrednich raczej piaszczystych uziarnień, stosuje się mieszankę wapna budowlanego i cementu. Szczegółowe informacje o ilościach, wymaganiach, wykonaniu i badaniu są zebrane w (FGSV 599) [100] i (FGSV 551) [101]. Podział grup gruntów następuje na podstawie normy (DIN 18196, 2006-06) [87]. Odpowiedni środek wiążący (spoiwo) jest wybierany dla grupy gruntów na podstawie zawartych w tej grupie frakcji. Zestawienie znajduje się w Tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Rodzaj spoiwa w zależności od rodzaju gruntu

	Rodzaj Gruntu	spoiwo
Zakres A	nieodpowiednie, nie do skruszenia	
Zakres B	TA	tylko wapno
Zakres C	TM, TL, UM	wapno i mieschaninat
Zakres D	GU*, SU*	Mieschanina Wapno / Cement
Zakres E	GU, SU	mieschanina i Cement
Zakres F	GW, GI	tylko cement
Zakres G	nieodpowiednie, zbyt gruboziarnisty	

W przypadku konieczności dostosowania wymagań gruntowych procedury i warunki ramowe dotyczące robót ziemnych, na przykład przy budowie dróg publicznych, są w Niemczech dokładnie uregulowane. Pojęcia stabilizacja gruntu, ulepszanie gruntu i kwalifikowana poprawa gruntu są jasno zdefiniowane i odnoszą się do środków wiążących wymienionych w niniejszym rozdziale.

„Stabilizacja gruntu to proces, w którym poprzez dodanie środków wiążących zwiększa się odporność gruntu na ruch drogowy i stres klimatyczny, dzięki czemu grunt staje się trwale stabilny i mrozoodporny”. (FGSV 599) [100]

„Poprawki gruntu to techniki poprawiające utwardzoną nawierzchnię i zagęszczalność gruntu oraz ułatwiające wykonanie robót budowlanych”. (FGSV 599) [100]

„Kwalifikowane ulepszenia gruntu to ulepszenia gruntu za pomocą spoiw, które spełniają zwiększone wymagania dotyczące określonych właściwości”. (FGSV 599) [100]

Podczas gdy ulepszenia gruntu opisują metody krótkoterminowej optymalizacji zdolności układania i zagęszczalności, a tym samym ułatwienia procesu budowlanego na etapie budowy, konsolidacja gruntu jest długotrwałym wzrostem odporności na naprężenia mechaniczne i klimatyczne. Kwalifikowane ulepszenia gruntu mają na celu obniżenie klasy wrażliwości na mróz z F3 do F2.

Ulepszanie gruntu i konsolidację gruntu określa się w Niemczech jako tak zwane zabiegi na gruncie. Są to procesy, w których grunty są modyfikowane w taki sposób, aby uzyskać wymagane właściwości.

3.5.1 Wapno

W przypadku stabilizacji gruntu wapnem i wapnem hydratyzowanym ilość lepiszcza należy określić zgodnie z technicznymi przepisami badań gruntu i skał w budownictwie drogowym (po niemiecku w skrócie TP BF-StB, część B 11.1) (FGSV 599). [100]

Wapno wpływa zasadniczo na plastyczność gruntu, prowadzi do tworzenia się agregatów drobnych cząstek oraz w zależności od składu mineralnego utwardza agregaty poprzez reakcje pucolanowe. Grunt drobnoziarnisty staje się gruntem mieszanym, w którym to przypadku frakcja gruboziarnista nie jest kwestią pojedynczych ziaren, ale drobnych kruszyw, które twardnieją w długim okresie (Federalne Stowarzyszenie Niemieckiego Przemysłu Wapienniczego e.V. (BVK 2013) [8].

3.5.2 Cement

Cement natomiast działa przede wszystkim w grubej przestrzeni porów, stabilizując strukturę gruntu szkieletem z kamienia cementowego. Nie działa w, ale na powierzchni agregatów i cząstek. W przypadku gruntów mieszanych i drobnoziarnistych wskazane jest wykorzystanie obu efektów poprzez stosowanie spoiw mieszanych w celu uzyskania wysokiego przyrostu wytrzymałości strukturalnej gruntu przy stosunkowo niewielkiej dawce spoiwa (Stowarzyszenie Niemieckich Cementowni 2008) [75].

3.6 Dodatki nietradycyjne (niestandardowe)

W Niemczech nietradycyjne dodatki nie są (prawie) stosowane. Powodem tego są kwestie prawne, techniczne i kontekstowe. Z jednej strony, zgodnie z zaleceniami RStO, ZTV E-StB i ZTV Beton-StB, badania przydatności należy przeprowadzić w związku z ulepszeniem gruntu TP BF-StB Część B 11.1 i TP BF-StB Część B 11.3. Z drugiej strony musi istnieć porozumienie umowne między wykonawcą a klientem.

W literaturze niemieckiej nie ma prawie żadnych informacji o nietradycyjnych dodatkach, podczas gdy w USA zmianę właściwości mechanicznych gruntu można znaleźć pod pojęciem stabilizacji gruntu.

3.6.1 Stabilizatory jonowe

Stabilizatory jonowe (dodatki kwasowe i alkaliczne) zmieniają stężenie elektrolitów w płynie porowym, prowadząc do wymiany kationów i flokulacji minerałów [58].

Adsorpcja jonów przez cząstki gruntu, reakcje jonowe ze składnikami gruntu oraz wymiana jonowa zmieniają strukturę molekularną gruntu. Reakcje te zmniejszają ładunek powierzchniowy cząstek gruntu, prowadząc do utraty dwuwarstwowej wody i umożliwiając gęstsze upakowanie lub nawet flokulację cząstek gruntu.

Najodpowiedniejszym podłożem do stosowania stabilizatorów jonowych są grunty, w których cząstki minerałów są niewielkie, a warstwa wody jest znacznie większa niż grubość warstw cząstek.

Jest to stabilizacja chemiczna [3], ponieważ wpływ na strukturę molekularną występuje (zwykle przez długi czas) z powodu zmian w płynie porów elektrolitu z alkalicznego na kwaśny lub odwrotnie [58]. Na [54] gruntach ziarnistych, takie jak piasek lub żwir stabilizatory jonowe nie powoduje żadnych skutków [55].

Ponadto, ze względu na rosnący wpływ wody dwuwarstwowej w zachowaniu międzycząstek, stabilizatory jonowe są tym bardziej skuteczne, im mniejsze są wielkości cząstek. Stabilizatory jonowe działają tylko w jednym rodzaju gruntu, ponieważ specyficzne reakcje chemiczne mogą zachodzić z jedną określoną kombinacją grunt-stabilizator. Grunty ziarniste nie są najbardziej odpowiednie do stabilizacji agregatami jonowymi opartymi na opisanym tu mechanizmie.

3.6.2 Stabilizatory enzymatyczne

Enzymy to organiczne cząsteczki, które katalizują określone reakcje chemiczne. Są one zwykle używane w niskich stężeniach, ponieważ nie są zużywane w trakcie reakcji chemicznych, które umożliwiają. Enzymy potrzebują czasu na dyfuzję do miejsca reakcji i są bardzo specyficzne dla określonego gruntu. Wykazują działanie w gruntach z zawartością frakcji iłowej oraz części organicznych, nie mają zastosowania w gruntach ziarnistych [58],[59],[54]. Enzymy stosowane stabilizacji gruntu to proteiny zawierające długie łańcuchy aminokwasów i kationy metali. Przykładem może być Produkt enzymatyczny Terrazyme [15]

3.6.3 Stabilizatory ligninosulfonatowe

Produkty stabilizujące na bazie ligninosulfonianów, w tym ligninosulfoniany sodu, wapnia i amonu, pochodzą od ligniny, która wiąże ze sobą włókna celulozowe. Ze względu na różnice w surowcach drzewnych i roślinnych, dokładny skład chemiczny lignosulfonianów jest różny.

Ligninosulfoniany mogą pokryć pojedyncze cząstki gruntu cienką, podobną do kleju warstwą. Sulfoniany ligniny to przede wszystkim spoiwa o niewielkim działaniu chemicznym w zależności od ich składu. Efekt cementowania stabilizuje grunt poprzez fizyczne wiązanie ze sobą cząstek.

Ponieważ jednak produkty te są również jonowe, mają zdolność wymiany jonowej i reagowania z niektórymi gruntami. Większość dostępnych w handlu ligninosulfonianów jest rozpuszczalna w wodzie. Przykładem może być badanie stabilizacji gruntu iłowego TL według (DIN 18196, 2006-06) [87] roztworem lignosulfonianu, które wykazało znaczną poprawę wytrzymałości po 28 dniach zarówno w testach na sucho, jak i na mokro [67].

Badania gruntu pyłowo-piaszczystego oznaczonego według (DIN 18196, 2006-06) [87] jako SU potraktowanego dwoma ligninosulfonianami wykazało tylko w jednym przypadku poprawę wytrzymałości na ściskanie [55].

Testy ściskania na innej mieszance piasku i pyłu SU, która była traktowana tym samym ligninosulfonianem, wykazały umiarkowany wzrost wytrzymałości na mokro w porównaniu z próbkami nietraktowanymi już po 7 dniach utwardzania [54].

Poprawa wytrzymałości jest związana ze zdolnością do powlekania cząstek gruntu spoiwem i jego wytrzymałością. Oznacza to, że działanie ligninosulfonianów byłoby bardziej efektywne w gruntach ziarnistych.

3.6.4 Sole

Stabilizacja solami polega głównie na wykorzystaniu soli kwasu solnego HCl najczęściej metali dwuwartościowych CaCl_2 i MgCl_2 , ale również soli kamiennej NaCl. Sole te są higroskopijne, przyciągają wilgoć z otoczenia i utrzymują grunt w stanie wilgotnym.

Wprowadzenie kationów dwuwartościowych do gruntu stwarza również możliwość wymiany kationów między kationami dwuwartościowymi w soli a kationami jednowartościowymi w gruncie. Wymiana kationów może poprawić grunt poprzez stabilizację cząstek gruntu i zmniejszenie pojemności wodnej warstwy podwójnej. Zmniejsza to odległość między cząstkami gruntu.

Ponadto rekrytalizacja soli w przestrzeniach porowych powoduje słabe wiązania fizyczne między cząstkami gruntu i zwiększa gęstość gruntu poddanej obróbce. Sole mogą również prowadzić do wzrostu napięcia powierzchniowego wody porowej,

powodując wzrost pozornej spoistości gruntu i poprawę wytrzymałości. W związku z tym stabilizatory solne wykorzystują różnorodne mechanizmy ulepszenia gruntu.

Zaproponowane mechanizmy stabilizacji dodatków solnych sugerują, że materiały te mogą być odpowiednie zarówno dla gruntów ziarnistych, jak i drobnoziarnistych. W gruntach ziarnistych higroskopijne właściwości stabilizatorów soli mogą być wykorzystywane do wspomagania zagęszczania, a rekrystalizacja może tworzyć słabe wiązania fizyczne między cząstkami gruntu. Zapewniają również dodatkową poprawę wytrzymałości dzięki zwiększonemu napięciu powierzchniowemu wody porowej.

W przypadku gruntów drobnoziarnistych, zwłaszcza ilastych, zdolności higroskopijne soli mogą poprawić spójność gruntu, zapobiegając jego wysychaniu. Wymiana kationów w gruntach ilastych może prowadzić do trwałych efektów stabilizacyjnych. Mechanizmy te, z wyjątkiem wymiany kationów, zapewniają stosunkowo niewielkie korzyści w zakresie zwiększenia wytrzymałości w porównaniu z innymi niestandardowymi dodatkami.

Dwuprocentowa domieszka 38% roztworu chlorku wapnia w stosunku do suchej masy gruntu była skuteczna w stabilizacji ziarnistego piasku ilastego oznaczonego według (DIN 18196, 2006-06) [87] jako SC, w warunkach klimatu pustynnego i ziarnistego piasku pylastego w klimacie umiarkowanym po 90 i 220 dniach [51],[52]

Ponieważ uzdatnianie gruntów solami jest rdzeniem tej pracy, w następnym rozdziale zestawiono historyczny przegląd wykorzystania soli w robotach ziemnych do stabilizacji gruntu.

Na końcu należy jeszcze wspomnieć o możliwości stabilizacji gruntu za pomocą syntetycznych żywic naftowych oraz stabilizatorów polimerowych.

3.7 Rys historyczny zastosowania soli do stabilizacji gruntów

Na początku XX wieku sól była wykorzystywana do budowy dróg żwirowo-glinianych w Skandynawii. Stabilizację wilgotności gruntu zapewniała higroskopijność soli. Dodatkowo sól zapewniała zmniejszenie tworzenia się kurzu i obniżenie temperatury zamarzania podłoża.

W latach dwudziestych ubiegłego wieku amerykańska firma budująca drogi w Grecji wykorzystywała słoną wodę śródziemnomorską, aby budowane drogi gruntowe były wilgotne i wolne od kurzu. Po pewnym czasie i kilku przejazdach okazało się, że nawet

bez dalszej aplikacji znacznie ograniczono powstawanie kurzu, a nawierzchnia drogi okazała się twardsza i trwalsza niż odcinki nieobrabiane [71]. Kolejne badania w naturze potwierdzają redukcję zapylenia na drogach gruntowych przy zastosowaniu różnych mieszanin CaCl_2 i NaCl . W przypadku CaCl_2 redukcja wynosi 80 [%] a mieszanina 50 [%] CaCl_2 i 50 [%] NaCl ogranicza powstawanie pyłu w przybliżeniu w równym stopniu [18].

W Kanadzie w 1932 roku została zbudowana droga z zastosowaniem soli z pobliskiej kopalni. Pozytywne doświadczenia z tego wyniesione skłoniły budowniczych dróg do przeprowadzenia od 1933 roku eksperymentalnych testów w 29 amerykańskich stanach z uzdatnianiem gruntu solą kamienną w celu jego stabilizacji. Dodatek soli, zmniejszając straty wody, wzmacnia właściwości wiążące frakcji drobnoziarnistej i utrzymuje je na stałym poziomie. Jeśli podczas dłuższych okresów suszy parowanie postępuje bardzo daleko, sól krystalizuje na powierzchni i tworzy tu bardzo twardą skorupę, co ogranicza dalsze parowanie do minimum. Z tych nowo zdobytych doświadczeń sformułowane zostały pierwsze jakościowe i ilościowe zalecenia dla budownictwa. Należy stosować dobrze wyselekcjonowany materiał gruntowy o średnicy ziaren od 0,02 [cm] do 2,0 [cm] przy czym poniżej 0,02 [cm] dopuszcza się maksymalnie 15-20 [%] zawartości. Do podłoża o grubości około 5 [cm] stosuje się 1 [kg] soli na metr kwadratowy. Mieszanka jest przygotowywana w stanie suchym i tylko podczas budowy drogi doprowadzana do optymalnej zawartości wody, aby materiał był łatwy w obróbce. Droga jest budowana warstwami, a warstwa wierzchnia nie powinna zawierać soli. Aby ograniczyć wnikanie wód powierzchniowych, droga powinna być lekko nachylona na boki [4].

W kontekście uzdatniania gruntu stosowanie i badania soli były prawie wyłącznie ograniczone do Stanów Zjednoczonych Ameryki. Zajmował się tym Amerykański Federalny Instytut Badawczy ds. Dróg, dzisiejszy *Transportation Research Board* założony w 1920 pod nazwą *National Advisory Board on Highway Research*, 1925 do 1974 pod nazwą *Highway Research Board*, który posiadał nawet własne działy, które były wyłącznie odpowiedzialne za obróbkę gruntu chlorkiem sodu i chlorkiem wapnia.

Z kolei w Niemczech ORTHAUS odkrył zastosowanie soli w budowie dróg raczej przypadkowo w 1939 r., kiedy to woda zawierająca solankę z potoku Foesse została wykorzystana do budowy dróg w dzielnicach mieszkalnych w Hanowerze. Podobnie jak w Ameryce, po zastosowaniu soli, drogi były znacznie bardziej odporne na obciążenia mechaniczne i klimatyczne niż drogi uzdatniane słodką wodą [46],[47]. Foesse to długi

na 8 [km] dopływ rzeki Leine. Znajduje się on w regionie Hanoweru w Dolnej Saksonii. Zawartość soli waha się w nim do 100 [g/l], co jest trzykrotnością zasolenia Morza Północnego. Był to jednak przypadek odosobniony w Niemczech, skoncentrowano się raczej w tych czasach na badaniach stabilizacji gruntu za pomocą cementu, wapna i bitumu, aby móc szybko budować drogi wojskowe, autostrady i lotniska [5]. Jak opisano w rozdziale 3.5, dodatki te są nadal dodatkami standardowymi.

Badania nad stabilizacją gruntu solami opierają się na eksperymentach laboratoryjnych oraz w wyniku faktycznie przeprowadzonych robót ziemnych budowy dróg amerykańskich. Badania prowadzone są na gruntach spoistych i niespoistych, których solami są głównie NaCl, a zwłaszcza CaCl₂. Konstrukcje drogowe to przede wszystkim drogi ziemne, tzw. drogi niskobudżetowe, budowane z dostępnego lokalnego gruntu lub materiałów, ale także konstrukcje drogowe z utwardzonymi nawierzchniami. W przypadku tych ostatnich efekt polepszania solą opisywany jest z konstruktywnymi zaleceniami zarówno pozytywnie, jak i negatywnie. Z biegiem lat praktyczne doświadczenie zaowocowało nowym spojrzeniem na problem stabilizacji gruntu solami, a z tych raportów wynikają nowe zalecenia dotyczące optymalnych ilości lub stężeń.

Jeszcze przed stosowaniem obróbki gruntu solą i chlorkiem wapnia w budownictwie drogowym w Ameryce z badań laboratoryjnych prowadzonych na gruntach humusowych piaszczystych wiedziano, że sole zmieniają przepuszczalność gruntu, a dodatek chlorku sodu lub chlorku wapnia zwiększa przepuszczalność [44]. Grunty traktowane chlorkiem wapnia mają wyższe wartości przepuszczalności niż grunty traktowane chlorkiem sodu [45]. Pierwsze udokumentowane odkrycia dotyczące stabilizacji gruntu solami opisują skuteczną obróbkę amerykańskich dróg za pomocą CaCl₂. Oprócz zmniejszonego zapylenia stwierdzono zmniejszenie ścieralności materiału drobnego z powierzchni drogi o 50 [%], co wiąże się z większą stabilnością drogi gruntowej. W zależności od przewidywanego natężenia ruchu zalecano od 0,5 [kg] do 1,3 [kg] CaCl₂ na metr kwadratowy drogi gruntowej [10]. Higroskopijne właściwości CaCl₂ chronią nawierzchnie drogi przed nadmiernym wysychaniem. Prawie nie pojawiają się pęknięcia, więc po okresie suchym woda z opadów może spływać po nawierzchni na pobocze, a droga gruntowa nie mięknie [26]. Nie da się niestety całkowicie zapobiec utracie soli CaCl₂ z powierzchni drogi powodowanej zmianami okresów pogodowych. Strata ta musi zostać uzupełniona, przez co wynikające z tego dodatkowe koszty okazują się bardziej ekonomiczne ze względu na znacznie mniejsze wymagania w zakresie utrzymania dróg

ziemnych. Jeśli sól zostaje rozpuszczona na powierzchni drogi podczas opadów deszczu, minerały ilaste, jeśli są w niej obecne, pęcznieją i uszczelniają kanały porów oraz chronią grunt przed dalszym wymywaniem. Jeśli w czasie opadów warstwy górne drogi zostają wypłukane z soli to w kolejnym okresie suszy ubytki, są uzupełniane z głębszych warstw. [12]. Zastosowanie CaCl_2 sprawdziło się w praktyce nawet w remontach dróg. Przetestowano dwie różne metody, aby zapobiec dalszym uszkodzeniom przez mróz. W pierwszej metodzie drogę drażono w odstępach od 2 [m] do 3 [m], wypełniając otwory drobnym żwirem i CaCl_2 . W drugiej metodzie przewiercono powierzchnię i do otworów wpompowano roztwór CaCl_2 . Obie metody okazały się bardzo skuteczne, choć powszechniejsze okazało się zasypywanie otworów drobnym żwirem zmieszany z CaCl_2 [42].

Oprócz zmniejszenia zapylenia i ścierania drobnego materiału z powierzchni, wzrost napięcia powierzchniowego wody pod wpływem CaCl_2 powoduje intensywny wzrost wytrzymałości i gęstości gruntu [72]. Sole, w tym przypadku chlorek sodu, mają ciekawe właściwości wykorzystywane w budownictwie drogowym. Sól wiąże między innymi wodę, zwiększa napięcie powierzchniowe, obniża temperaturę zamarzania i zwiększa rozpuszczalność CaCO_3 (węglanu wapnia) w wodzie. W przypadku minerałów ilastych zmniejsza zdolność do pęcznienia. NaCl zmieniając pole elektryczne w materiale ilastym, zwiększa spójność gruntu. Wzrost napięcia powierzchniowego i efekt elektrolityczny wpływa na wielkość „filmu” wilgotności, zmniejsza się warstwa związanej wody. Optymalnym dodatkiem według LOOKER i wsp. (1938) [37] jest zawartość soli o około 0,8 [%].

Zbadany został wpływ dodatku CaCl_2 w ilości od 0,25 [%] do 1,5 [%] na właściwości różnych gruntów. Stwierdzono obniżenie granic konsystencji, przez co energia zagęszczania próbek z chlorkiem wapnia znacznie spada i wyższe wartości zagęszczania zostały wygenerowane przy tej samej energii zagęszczania [73]. Ten sam efekt można było zaobserwować w teście Proctora dla gruntów pylasto-żwirowych [62]. W przypadku gruntu piaskowego o zawartości pyłu nieco powyżej 20 [%] maksymalna wartość gęstości suchej zostaje osiągnięta przy dodaniu 1 [%] CaCl_2 [21].

Tylko w ciągu 3 lat w okresie od 1936 do 1939 zużycie soli w amerykańskim budownictwie drogowym do obróbki powierzchni i stabilizacji gruntu wzrosło 15-krotnie. Stosując 15 kg soli na metr sześcienny gruntu, widoczne stają się oszczędności w zabiegach konserwacyjnych [16]. Oprócz dróg gruntowych zalewane były solą również

podbudowy linii kolejowych i dróg ekspresowych zarówno w trakcie budowy, jak i po jej zakończeniu, aby zapobiec uszkodzeniom spowodowanym mrozem [50]. Podczas budowy podłoża stabilizowanego solą w hrabstwie Steuben w północnej Indianie, w klimacie podobnym do tego z Europy Środkowej wytrzymałość na ściskanie po zagęszczeniu wzrosła ponad dwukrotnie w porównaniu z sekcjami, które nie zostały zasolone [40]. Badania zagęszczania gruntów zmarzniętych, które osiągają niższe gęstości suche poniżej punktu zamarzania niż powyżej temperatury zamarzania w laboratorium, wykazują, że dodanie CaCl_2 daje takie same wyniki zagęszczania poniżej $0\text{ }^\circ\text{C}$, jak w przypadku gruntów nieuzdatnianych powyżej temperatury zamarzania [22].

Na podstawie badań laboratoryjnych migracji chemikaliów w gruncie można stwierdzić, że NaCl łatwiej migruje na powierzchnię i krystalizuje na drogach gruntowych niż CaCl_2 . Zakłada się, że budowa nawierzchni drogi gruntowej z dodatkiem soli pozwala na jej zachowanie przez dłuższy czas i w dużej mierze zapobiega uszkodzeniom spowodowanym mrozem [63]. Stabilizację gruntu solą stosuje się nawet w przypadku gruboziarnistego materiału gruntowego. Drogi żwirowe stabilizowane solą w hrabstwie Nowy Jork, które poddano działaniu 750 [g] CaCl_2 na metr kwadratowy, okazały się znacznie bardziej odporne na ścieranie powierzchni i niekorzystne warunki atmosferyczne. W przypadku modernizacji stanowią one doskonałe podłoża dla nawierzchni drogowych o wyższej jakości [2]. Jednak migracja soli i krystalizacja pod twardą nawierzchnią drogi często prowadzą do ich wysadzania [27],[28],[43]. Takie uszkodzenia odnotowano w Afryce i Australii, gdzie do budowy dróg wykorzystywano słone gruntu [70],[65].

Chlorki mają pożądany wpływ na właściwości mechaniczne gruntu. Ich zastosowanie prowadzi m.in. do zmniejszenia energii zagęszczania, większej wytrzymałości i twardości zagęszczonego gruntu oraz przyspieszonej konsolidacji [68]. Niemniej jednak, w porównaniu do cementu portlandzkiego, CaCl_2 uważany jest za stosunkowo nieefektywny, mało trwały i drogi. Ponadto jego silna higroskopijność i rozpuszczalność powoduje problemy z przechowywaniem i transportem, ale CaCl_2 jest szczególnie odpowiedni jako dodatek do stabilizacji cementu [25],[61]. Niewielkie dodatki NaCl przyspieszają proces stabilizacji gruntu wapnem. Dodatek zaledwie 1 [%] soli nie tylko przyspiesza twardnienie, ale także zapewnia wyższą wytrzymałość końcową [48]. W zależności od rodzaju gruntu, zwłaszcza przy wystarczającej zawartości minerałów ilastych, dodatek 1 [%] NaCl może podwoić wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe

[36]. Chociaż chlorki mogą działać jako stabilizator, ze względu na ich niewielkie działanie cementujące, wystarczający efekt można osiągnąć tylko w gruntach o wystarczającej zawartości materiału drobnoziarnistego [14]. Nawet niewielkie ilości chlorku sodu zwiększają gęstość Proctora i zmniejszają zapotrzebowanie na wodę do zagęszczania gruntów spoistych [39].

Przy planowaniu nawierzchni dróg, należy podjąć środki konstrukcyjne ze względu na migrację i krystalizację soli. Należy zaprojektować grube i nieprzepuszczalne pokrycie [6]. Inną możliwością byłoby wprowadzenie warstwy gruboziarnistego materiału, aby zakłócić przepływ kapilarny [11]. Jeżeli przewodność elektryczna G górnych 25 [mm] obrabianego materiału przekracza wartość 0,15 [S/m], to przy konstruowaniu nawierzchni należy uwzględnić krystalizację soli na niej [30].

Chlorki mają nie tylko wpływ na właściwości mechaniczne gruntu, ale oprócz tego należy również wziąć pod uwagę wpływ na świat roślin. W rolnictwie na terenach suchych za problematyczne uważa się gruntu o zawartości soli 3 [%] lub więcej. Sól uszkadza rośliny bezpośrednio i pośrednio, obniża ciśnienie osmotyczne, co oznacza, że rośliny nie są w stanie pobierać potrzebnej im wody z gruntu, a jej brak niszczy komórki. W Stanach Zjednoczonych doprowadziło to niestety do znacznego przetrzebienia populacji klonów posadzonych wzdłuż dróg [57].

Są też inne badania, które nie potwierdzają jednoznacznie korzyści ze stosowania dodatków solnych do stabilizacji dróg. Np. w miejscowości Woolwich, Ontario (Kanada) w czasie kontroli wilgotności nie można było stwierdzić jednoznacznie zalet ze stosowania chlorku wapnia ze względu na bardzo zmienną zawartość wilgoci w tej okolicy. Oprócz chlorku wapnia badano mieszanki cementowe, bitumiczne, biologiczne i inne. Porównanie przekrojów potraktowanych chlorkiem wapnia z przekrojami nietraktowanymi nie wykazało polepszenia stabilizacji. Dodatnie strony stosowania chlorku wapnia pod względem redukcji zapylenia i zagęszczania są dobrze znane, ale należy zachować ostrożność podczas używania go i kontrolowania wilgotności podczas budowy [17].

4 Metody i program badań

Na podstawie przeglądu dostępnej literatury trzeba stwierdzić, że brakuje pogłębionej analizy, w jaki sposób można tę metodę wykorzystać dla gruntów, które są równo uziarnione. Te równoziarniste grunty to na przykład piaski z plaży i z dna zbiorników wodnych, które są przedmiotem badań w tej pracy. Powodem zajęcia się nimi są coraz większe trudności w dostępie do kruszywa z materiałów łatwo zagęszczalnych, w związku z czym coraz częściej w inwestycjach próbuje się wykorzystać inne materiały, bardziej dostępne.

Przez dodanie do gruntów roztworów soli NaCl, CaCl₂, AlCl₃ zmienione zostają określone właściwości mechaniczne gruntu. Dla tych gruntów równoziarnistych można dobrać dodatek roztworu, który daje najlepszy efekt zagęszczania na podstawie badań eksperymentalnych. Różne sole mają inny wpływ na grunt i grunt traktowany roztworami soli ma inne właściwości, w porównaniu z gruntem wyjściowym. Różnice te to wyższa gęstość, niższy edometryczny moduł ścisłości, mniejszy kąt tarcia. Możliwym wyjaśnieniem przyczyny zmiany właściwości mechanicznych po dodaniu roztworów różnych soli NaCl, CaCl₂, AlCl₃ jest zmiana grubości warstwy związanej wody na powierzchni cząstek gruntu oraz sama obecność zdysocjowanych jonów soli wpływająca na warstwę podwójną na granicy fazy stałej i ciekłej. Celem pracy jest sprawdzenie czy w warunkach równoziarnistych gruntów niespoistych w szczególności piasków plażowych i morskich metoda dodawania roztworów może być skuteczna i prowadzi do lepszego zmniejszenia porowatości w porównaniu do zastosowania wody.

Program badań obejmuje:

1. przeprowadzenie badań eksperymentalnych w skali naturalnej w terenie w miejscu gdzie te piaski równoziarniste pompowane z dna są składowane. Analiza jak się zachowują te piaski potraktowane roztworami, określenie efektu praktycznego, jak się zagęszczą w zależności od użytego roztworu
2. sprawdzenie w skali laboratoryjnej jaki mechanizm jest odpowiedzialny za to, że ziarna dają się zagęścić, w jakim stopniu dają się zagęścić w zależności od użytego roztworu i który roztwór daje najlepsze wyniki

Metody i narzędzia badawcze:

W eksperymentach laboratoryjnych stosowane są ogólnodostępne narzędzia wykorzystywane w pracowni geotechnicznej:

- aparat Proctora
- edometr
- aparat bezpośredniego ścinania
- aparat do badania wodoprzepuszczalności

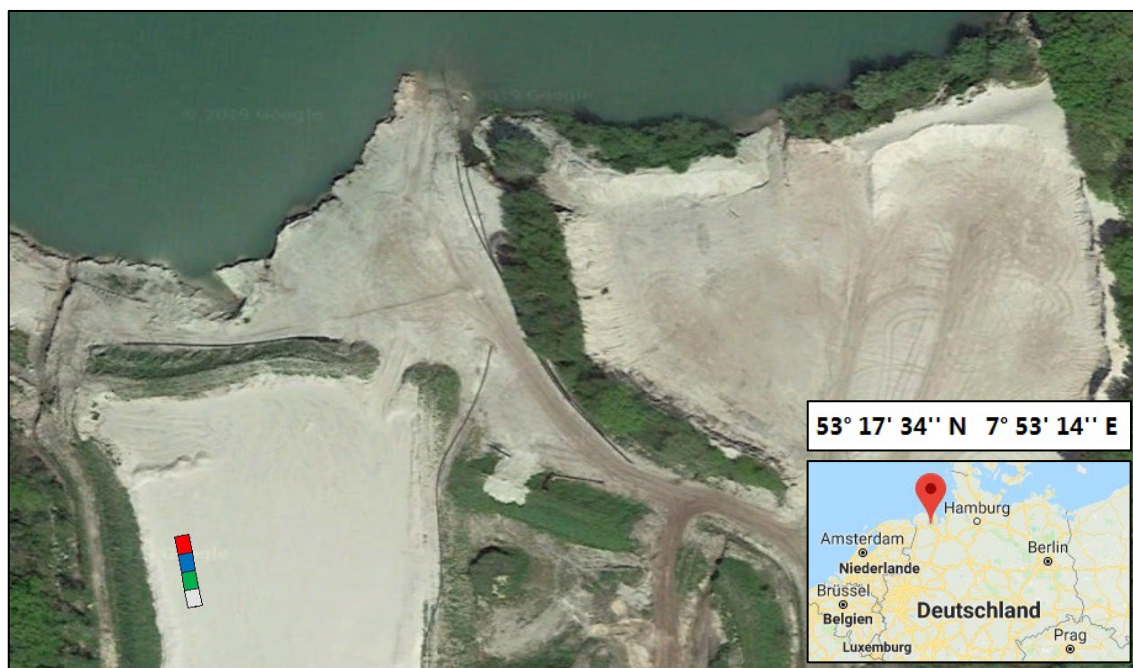
oraz urządzenie do pomiaru potencjału zeta udostępnione przez Uniwersytet Techniczny w Brunszwiku.

Do badań w naturze wykorzystano płytę statyczną.

5 Badania w naturze

Badania w naturze prowadzone były w Moorburgu, na terenie firmy budowlanej Koch GmbH. Moorburg znajduje się około 30 [km] na północny zachód od Oldenburga w Dolnej Saksonii. To miejsce graniczy ze sztucznym jeziorem, które zostało stworzone przez wydobycie piaszczystego gruntu i zyskuje na głębokości poprzez ciągłe wydobycie. Wydobyty materiał gruntowy jest przepłukiwany na terenie obiektu za pomocą węży i wykorzystywany, między innymi, w budownictwie jako materiał do wymiany gruntu w regionie Północnych Niemiec. Według przeprowadzonych badań laboratoryjnych ten materiał gruntowy jest drobnym piaskiem z małą zawartością frakcji pyłowej i ilastej.

Poniższy Rys. 5.1 reprezentuje opisany obszar, łącznie z klasyfikacją geograficzną w północnych Niemczech.



Rys. 5.1 Badania w naturze w Moorburgu w Dolnej Saksonii w firmie KOCH GMBH

Wskazany teren wykorzystano do stworzenia pól badawczych zgodnie z programem badań w celu określenia wpływu różnych soli, chlorku sodu (NaCl), chlorku wapnia (CaCl_2) i chlorku glinu (AlCl_3) na odkształcalność i nośność gruntu oraz do porównania z wypłukanym gruntem bez dodatku soli. Ocena tego efektu jest przeprowadzana w kontekście badań w naturze z wykorzystaniem płyty statycznej firmy HMP MAGDEBURG GMBH. Badania płytą statyczną są przeprowadzane i oceniane zgodnie z normą (DIN 18130-1, 1998-05) [83]. Szczegółowy opis układu wyszukiwania, wykonanie eksperymentu i omówienie wyników przedstawiono w dalszych rozdziałach.

Ponieważ badania w naturze służą praktycznej realizacji, w pierwszej kolejności należało przeprowadzić dokładne badania gruntowe. Ze względów organizacyjnych przeprowadzono badania laboratoryjne gruntu na kilka tygodni przed testami w naturze w Moorburgu w celu uzyskania podstawowej klasyfikacji materiału gruntowego w Moorburgu. Badania te służyły określeniu stałych parametrów gruntu. Z drugiej strony, zawartość wody i początkowa gęstość gruntu zostały zbadane bezpośrednio przed testami w naturze. Są to cechy, które mogą się różnić z dnia na dzień z jednej strony ze względu na warunki pogodowe, a z drugiej strony ze względu na wykorzystanie terenu przez operatora. Te badania laboratoryjne przeprowadzane bezpośrednio przed badaniami polowymi miały potwierdzić, że uzyskane zostanie w dniu badań w naturze optymalne zagęszczenie, co jest zwyczajowo stosowane w praktyce.

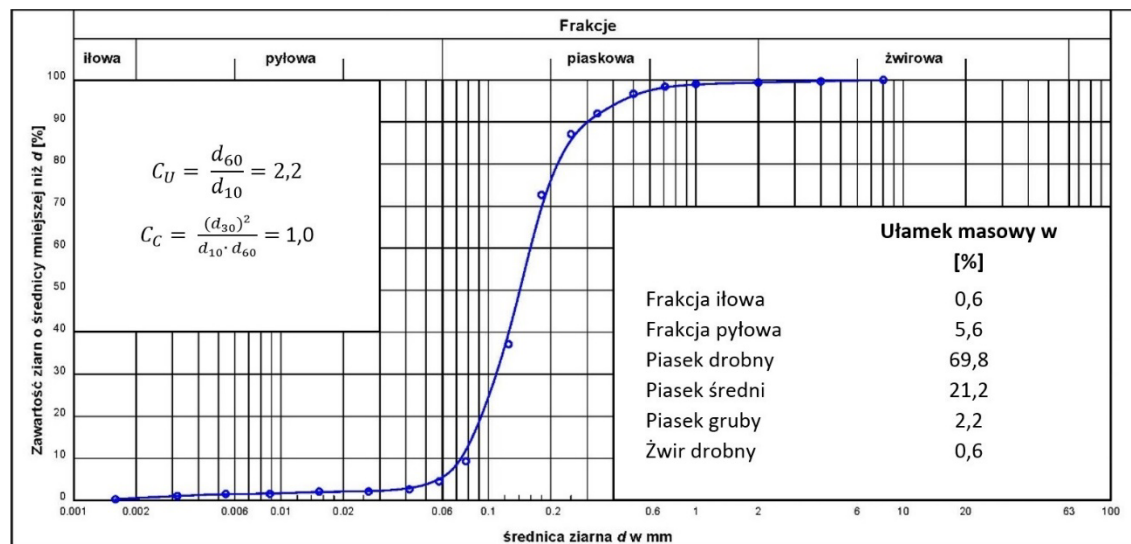
5.1 Klasyfikacja badanego w naturze gruntu z Moorburga

Przed przeprowadzeniem badań w naturze pobrano próbki gruntu w Moorburgu i zbadano w Laboratorium Mechaniki Gruntów oraz Laboratorium Chemii Budowlanej na Uniwersytecie Jade w Oldenburgu.

Badania te są określeniem rozkładu wielkości cząstek (krzywa uziarnienia) zgodnie z (DIN 18123, 2011-04) [77], określeniem straty wyżarzania (strata masy gruntu przy wyprężaniu) (DIN 18128, 2002-12) [80] oraz oznaczaniem zawartości węgla wapnia zgodnie z (DIN 18129, 2011-07) [81]. Ponadto, stosując dyfraktometrię rentgenowską (dyfrakcja rentgenowska) (DIN EN 13925-1, 2003-07) [91], określa się również ilościowe oznaczanie substancji krystalicznych w materiale gruntowym.

5.1.1 Krzywa uziarnienia materiału gruntowego

Krzywa uziarnienia badanego gruntu jest pokazana na wykresie Wykres 5.1. Jest to krzywa uziarnienia suchego przesiewania i analizy areometrycznej osadów.



Wykres 5.1 Krzywa uziarnienia użytych próbek materiału wydobytego z dna zbiornika wodnego w Moorburgu

Badana próbka to głównie grunt piaszczysty. Głównym składnikiem jest drobny piasek. Jednak są też małe ilości frakcji pyłowej, frakcji ilowej praktycznie nie ma. W poniższej tabeli przedstawiono średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia.

Tabela 5.1 Średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia

Średnica ziarna przy 10 [%] całkowitego przejścia	$d_{10} = 0,07365$ [mm]
Średnica ziarna przy 30 [%] całkowitego przejścia	$d_{30} = 0,10888$ [mm]
Średnica ziarna przy 60 [%] całkowitego przejścia	$d_{60} = 0,15935$ [mm]

Stosując wzór (1) określa się wskaźnik krzywej uziarnienia C_U , w którym można określić (2) wskaźnik różnoziarnistości gruntu C_C .

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

C_U	[-]	Wskaźnik krzywej uziarnienia
d_{60}	[mm]	Średnica ziarna przy 10 [%] całkowitego przejścia
d_{10}	[mm]	Średnica ziarna przy 60 [%] całkowitego przejścia

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2)$$

C_c	[-]	Wskaźnik różnoziarnistości
d_{60}	[mm]	Średnica ziarna przy 10 [%] całkowitego przejścia
d_{30}	[mm]	Średnica ziarna przy 30 [%] całkowitego przejścia
d_{10}	[mm]	Średnica ziarna przy 60 [%] całkowitego przejścia

Przy wartościach 2,2 [-] dla wskaźnika krzywej uziarnienia i 1,0 [-] dla wskaźnika różnoziarnistości gruntu oznaczamy jako jednolite.

Zgodnie z [94], obecny w gruncie piasek to piasek drobnoziarnisty, bardzo średni, lekko pyłowy ze skrótem fS, ms, u' przy czym klasyfikacja zgodnie z [87] daje w wyniku piasek ze skrótem SE.

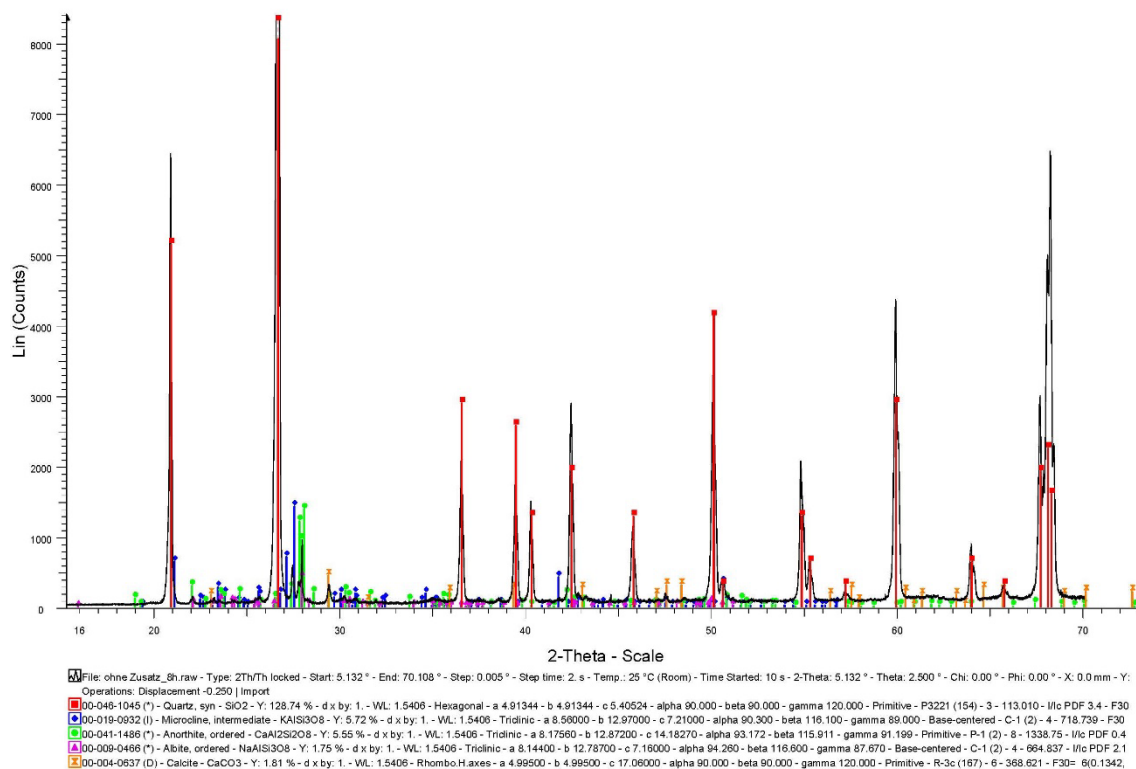
5.1.2 Wyniki dyfrakcji rentgenowska

Skład mineralogiczny użytej próbki piasku został zbadany również za pomocą analizy rentgenowskiej. W tej metodzie badania odległości warstw atomowych w kratkach kryształowych są określane przez obecność promieniowania rentgenowskiego na kracie kryształowej. W tym celu wykorzystywany jest program EVA (JAKOŚCIOWY). Dzięki dopasowaniu uzyskanych diagramów dyfrakcji do danych kryształowych bazy danych Międzynarodowego Centrum Danych Dyfrakcji (ICDD), można określić ilościowo połączenia krystaliczne za pomocą programu TOPAS.

W ramach przygotowań do pomiaru materiał usunięty z próbki został zmiażdżony do wielkości ziarna < 40 mikronów za pomocą wirówki (RETSCH, TYP ZM1000), a następnie zmielony na proszek w młynku FRITSCH, PULVERISETTE 2 do wielkości ziarna < 20 mikronów. Rzeczywisty pomiar został przeprowadzony za pomocą dyfraktometru BRUKER AXS, D8 z automatyczną luką dywergencji. Charakterystyki pomiarów są następujące:

- Lampa rentgenowska: Cu LFF, 40 KV, 45 [mA]
- Długość fali λ : Cu K α 1 = 0.15406 [nm]
- Zakres (2Theta θ) 5-70° (dokumentowany 12-70 [°])
- Próbkę bez dodatków mierzona 8 [h]

Skład mineralogiczny próbki piasku przedstawiono na wykresie Wykres 5.2.



Wykres 5.2 Dyfraktogram badanych próbek gruntu z Moorburga

Tabelaryczne zestawienie wyników w tabeli Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Skład mineralogiczny

Minerał	Skład chemiczny	Proporcja w [%]
Kwarc	SiO_2	93,92
Kalcyt (Węglan wapnia)	$\text{Ca}[\text{CO}_3]$	1,06
Albit (Skaleń sodowy)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	0,96
Mikroklin intermediate 1 Skaleń potasowy	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2,87
Mikroklin intermediate 2 Skaleń potasowy	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	1,19

5.1.3 Wyniki badania straty masy gruntu przy wyprężaniu

Organiczne składniki gruntu wpływają na jego właściwości fizyczne i mogą w ten sposób prowadzić do zmniejszenia jego nośności. Wpływ ten przejawia się utratą objętości spowodowaną gniciem składników organicznych i związanym z tym zwiększeniem udziału porów, co prowadzi do zwiększenia ściśliwości. Doświadczenie pokazuje, że wpływ składników organicznych jest decydujący tylko w przypadku strat prażenia powyżej 5%, w zależności od składu ziarna.

Określenie strat prażenia przeprowadza się zgodnie ze specyfikacjami normy (DIN 18128, 2002-12) [80]. Do przeprowadzenia doświadczenia wykorzystuje się próbkę piasku o masie m ok. 200 [g], wysuszoną w 105 [°C] do stałej masy w suszarce (MEMMERT, MODEL UM 500). Próbkę piasku rozproszono na pięciu porcelanowych tyglach i wygrzewano w piecu muflowym (HERAEUS, MODEL 110) w temperaturze T 550 [°C] przez dwie godziny. Z przeprowadzonych badań wynika, że badane próbki piasku średnio straciły na objętości V_{gl} w wyniku wyprażenia 0,758 [%] co świadczy o tym, że nie zawierają istotnych składników organicznych.

5.1.4 Wyniki badania zawartości wapnia

Oznaczenie zawartości węglanu wapnia służy do oceny właściwości mechanicznych gruntów droбноziarnistych i mieszanych. Zwiększona zawartość węglanu wapnia może sprzyjać tworzeniu się pustek w gruncie i erozji podczas procesów przesiąkania i korozji w podłożu. Godne uwagi proporcje węglanu wapnia mieszczą się w zakresie ponad 1 [%] suchej masy gruntu. Siła wpływu węglanu wapnia na właściwości gruntu zależy od składu gruntu i jego rodzaju. Zaleca się zatem dla gruntów o podwyższonej zawartości węglanu wapnia (> 3 [%]) zbadać jego wpływ na zachowanie badanego gruntu i za pomocą badań laboratoryjnych.

Aby określić zawartość węglanu wapnia, wysuszoną próbkę gruntu miesza się z kwasem solnym. Kwas solny reaguje z węglanem wapnia w próbce gruntu z wytworzeniem dwutlenku węgla (CO₂). Powstała objętość gazu dwutlenku węgla jest mierzona za pomocą gazometru CO₂ (WILLE GEOTECHNIK GMBH, GAZOMETR CO₂). Uwzględniając temperaturę w pomieszczeniu i bezwzględne ciśnienie powietrza w miejscu badania, zawartość węglanu wapnia można obliczyć na podstawie zmierzonej objętości gazu.

Zawartość węglanu wapnia jest określana dla trzech oddzielnych próbek zgodnie z wymaganiami normy (DIN 18129, 2011-07) [81]. Poszczególne próbki o masie suchej 4,5 [g] każda, są przygotowywane za pomocą dzielnika do próbek, następnie rozdrabniane do 0,06 [mm] w moździerzu i ponownie suszone w 105 [°C]. Następnie w każdej próbce określa się zawartość węglanu wapnia. Z oceny badań wynika, że zmierzona zawartość węglanu wapnia V_{Ca} 0,788 [%] nie ma istotnego wpływu na badany grunt.

5.1.5 Wyniki badania pH gruntu

Wartość pH gruntu, w zależności od struktury krystalicznej i składu chemicznego minerałów ilastych zawartych w gruncie ma bezpośredni wpływ na adsorpcję kationów minerałów ilastych. Wynika to z faktu, że przy wyższych wartościach pH aniony grup hydroksylowych SiOH, AlOH i AlOH₂ dysocjują, pozostawiając w ten sposób ładunek ujemny na bocznych krawędziach minerałów ilastych, które są nasycane kationami. Gdy wartość pH spada, grupy hydroksylowe przyłączają kationy, co prowadzi do nadmiaru ładunków dodatnich na bocznych krawędziach minerałów ilastych, które są nasycane anionami. Poniżej pH 6 dominuje adsorpcja anionów, a powyżej pH - adsorpcja kationów.

Wyznaczanie wartości pH odbywa się zgodnie ze specyfikacją normy (DIN ISO 10390, 2005-12) [99]. Badanie przeprowadza się na dwóch oddzielnych próbkach gruntu. Do przygotowania zawiesiny stosuje się roztwór chlorku wapnia (CaCl₂) o stężeniu c 0,01 [mol/l]. Pomiar pH odbywa się elektrometrycznie za pomocą elektrody kombinowanej pH (WTW GMBH, SEN TIX® 20) bez nasadki do nawadniania. Średnia wartość zmierzonego pH jest lekko alkaliczna i wynosi 7,35 [-].

5.2 Badania w naturze płytą statyczną

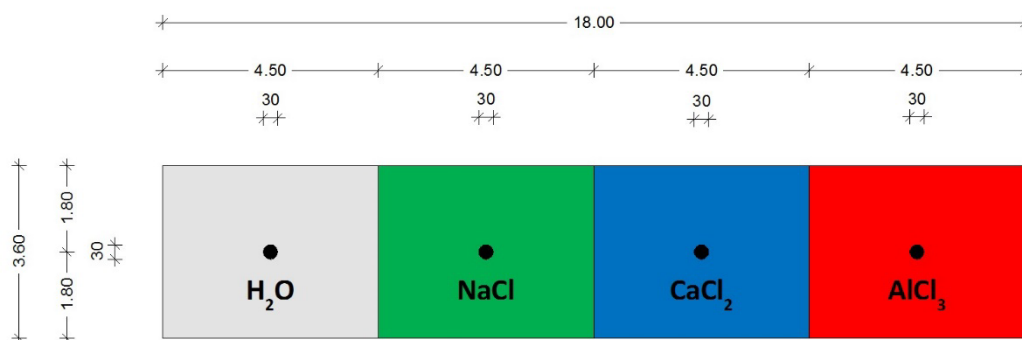
Badania w naturze tak jak to opisano we wstępie do rozdziału 5 prowadzone są w Moorburgu na polu wypełnionym wypłukanym gruntem z dna jeziora. W przeddzień badań pobierane były próbki w terenie w celu określenia wilgotności.

5.2.1 Opis eksperymentu przeprowadzonego w naturze

Ocenę wpływu soli na właściwości mechaniczne gruntu przeprowadza się na miejscu za pomocą płyty statycznej, która jest opisana w normie (DIN 18134, 2012-04) [83].

W tym celu najpierw tworzone są cztery identyczne, sąsiadujące ze sobą pola. Każde z tych pól ma wymiary 4,50 [m] długości i 3,60 [m] szerokości. Zmierzona dzień wcześniej zawartość wody wynosiła 7,51 [%] i została zwiększona do 15,00 [%] przed zagęszczeniem, przez dodanie odpowiednio wody oraz różnych roztworów w zależności od odpowiedniego pola testowego. Pierwsze pole testowe jest nawadniane słodką wodą z jeziora. Aby uzyskać optymalną zawartość wody, w innych polach testowych stosuje się roztwór 0,3 [%] NaCl, CaCl₂ i AlCl₃. Pomiary są wykonywane na środku pola.

Planowana geometria jest pokazana na Rys. 5.2 a Rys. 5.3 przedstawia sytuację na polu pomiarowym w Moorburgu.



Rys. 5.2 Planowanie geometrii pól testowych w Moorburgu



Rys. 5.3 Geometria pola pomiarowego w Moorburgu

5.2.2 Przygotowanie próbek roztworów

Przed badaniami w Moorburgu grunt poddano klasyfikacji i określono jego parametry. Próbkę pobierano w różnych wybranych punktach pola testowego. W momencie pobierania próbek średnia zawartość wody wynosiła 7,51 [%] przy średniej gęstości masy suchej 1,621 [Mg/m³], przy czym badania laboratoryjne wykazały, że optymalna zawartość wody wynosi 15,00 [%]. Biorąc pod uwagę istniejące parametry i na podstawie geometrii pól, dla szerokości 3,60 [m] i długości 4,50 [m] oraz głębokości 0,30 [m] obliczono następujące ilości roztworów:

Masę 761,83 [kg] wody należy dodać do nawilżanego pola H₂O. Aby uzyskać stężenie roztworów $c_{(Lsg)}$ 0,3 [%], na polach traktowanych NaCl, CaCl₂ i AlCl₃, z uwzględnieniem różnych stopni uwodnienia (hydratyzacji) chlorków, masa odpowiednich roztworów wynosi 761,83 [kg] roztworu NaCl przy zawartości 28,12 [kg] NaCl, 753,41 [kg]

roztworu CaCl_2 przy zawartości 36,55 [kg] $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ oraz 739,04 [kg] roztworu AlCl_3 przy zawartości 50,92 [kg] $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. Chlorki były zgodne z Rys. 5.4 dodawane i rozpuszczane w zbiorniku na wodę z jeziora na miejscu.



Rys. 5.4 Przygotowanie próbek roztworów chlorków na przykładzie roztworu NaCl

5.2.3 Zastosowane chlorki

W badaniach w naturze płytą statyczną użyto NaCl , $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Dokładne parametry użytych soli opisano w rozdziale 6.2.

5.2.4 Przebieg badania

Aby przygotować pola testowe, wytyczony obszar jest najpierw spulchniany za pomocą spulchniacza (AGRIA-WERKE GMBH, BODENFRÄSE 3000) w celu spowodowania łatwiejszego wchłonięcia wody lub roztworów. Następnie spulchniony grunt doprowadza się do optymalnej zawartości wody 15,0 [%] zgodnie z informacjami opisanymi w rozdziale 5.2.2. Zastosowana woda lub roztwory są bardzo szybko wchłaniane przez tak przygotowany grunt. Z tego powodu odpowiednie pola są ponownie spulchniane za pomocą tego samego kultywatora, by nastąpiło wymieszanie roztworu wody z gruntem. Należy zagwarantować możliwie największą interakcję między ziarnami gruntu a chlorkami. W ostatnim kroku cztery pola testowe są zagęszczane za pomocą walca jednobębnowego (DYNAPAC GMBH MODEL CA152). Walce jednobębnowe tego modelu mają szerokość kompresji 1676 [mm]. Podczas zagęszczania należy zwrócić uwagę, aby zagęścić cały obszar pola testowego bez wyjątku i każdy punkt tylko jeden raz. Rys. 5.5 przedstawia opisywany proces.



Rys. 5.5 Przygotowanie pól testowych: spulchnione pola testowe (u góry po lewej), nawilżone pola testowe (u góry po prawej), ponowne spulchnianie nawilżonych pól testowych (na dole po lewej), zagęszczanie pól testowych (na dole po prawej)

Aby ocenić wpływ różnych chlorków na zagęszczalność gruntu w Moorburgu, przeprowadza się testy płytą statyczną firmy HMP MAGDEBURG GMBH o średnicy płyty 30 [cm]. Jako przeciwwagi użyto ładowarki kołowej (CATERPILLAR INC., 966M) o masie 23220 [kg] jak na Rys. 5.6. Testy przeprowadzono przy temperaturze powietrza 1 [°C].



Rys. 5.6 Badanie płytą statyczną w Moorburgu

5.2.5 Wyniki pomiarów płytą statyczną

Moduł odkształcenia E_v wyznacza się na podstawie nachylenia siecznej między punktami $0,3 \sigma_{\max}$ i $0,7 \sigma_{\max}$ linii obciążenia-osiadania dla modułu odkształcenia pierwotnego (E_{v1}) i wtórnego (E_{v2}) zgodnie z równaniem (3)

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s_p} \quad (3)$$

E_v	$[MN/m^2]$	Moduł odkształcenia
r	$[mm]$	Promień płyty sztywnej
$\Delta\sigma$	$[MN/m^2]$	Przyrost obciążenia
Δs_p	$[mm]$	Przyrost osiadań odpowiadający przyjętemu zakresowi obciążeń $0,3 \sigma_{\max}$ i $0,7 \sigma_{\max}$

W celu zminimalizowania subiektywnych różnic w ocenie badań krzywą obciążenia-osiadania według normy (DIN 18134, 2012-04) [83] aproksymuje się uzyskane elektronicznie wyniki wielomianem drugiego stopnia zgodnie z równaniem (4).

$$s_p = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2 \quad (4)$$

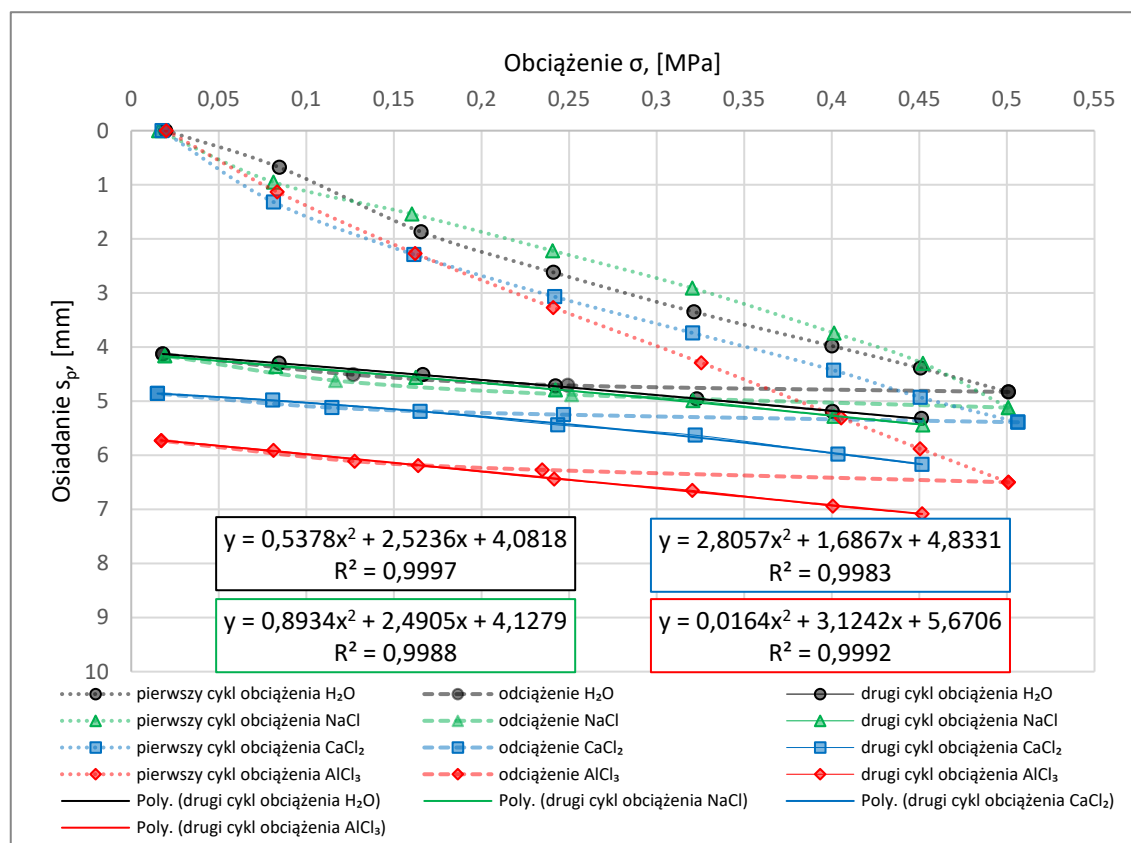
s_p	[mm]	Wielkość osiadania płyty
a_0	[mm]	Stała w wielomianie 2. stopnia, wyraz wolny
a_1	[mm/(MN/m ²)]	Stała w wielomianie 2. Stopnia
a_2	[mm/(MN ² /m ⁴)]	Stała w wielomianie 2. stopnia
σ_0	[MN/m ²]	Średnie naprężenie normalne pod płytą

Po podstawieniu (4) do (3) i przekształceniu wzoru otrzymujemy wyrażenie na moduł odkształcenia według równania (5).

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{max}} \quad (5)$$

E_v	[MN/m ²]	Moduł odkształcenia
r	[mm]	Średnica płyty sztywnej
σ_{max}	[MN/m ²]	Obciążenie maksymalne

Wyniki pomiarów przedstawia Wykres 5.3.



Wykres 5.3 Wyniki pomiarów płytą statyczną

Oś X reprezentuje obciążenie σ w [MPa], a oś Y przedstawia osiadanie s w [mm]. Czarne punkty przedstawiają wyniki obciążenia pierwotnego, wtórnego i odciążenia, dla badanego pola nawilżonego optymalnie słodką wodą bez dodatków. Oznaczenia w kolorze zielonym, niebieskim i czerwonym są wynikiem pomiarów pól nawilżanych przygotowanymi roztworami NaCl, $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ i $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Przedstawione funkcje regresji i związane z nimi współczynniki determinacji odnoszą się do wykresów uzyskanych dla obciążenia wtórnego.

Obliczone na podstawie wzoru (5) moduły odkształcenia pierwotnego E_{v1} , wtórnego E_{v2} i wskaźnik odkształcenia E_{v2}/E_{v1} przedstawia Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Obliczone wyniki pomiarów płytą statyczną E_{v1} , E_{v2} i stosunek E_{v2} / E_{v1}

	<i>H₂O</i>	<i>NaCl</i>	<i>CaCl₂</i>	<i>AlCl₃</i>
E_{v1} [MN/m ²]	18,5	20,0	12,2	13,1
E_{v2} [MN/m ²]	80,6	76,6	72,4	71,8
E_{v2}/E_{v1} [-]	4,36	3,83	5,93	5,48

Mimo, że podczas jednego procesu zagęszczania grunt na polach doświadczalnych nie był dostatecznie zagęszczony, to ze względu na przekroczenie dopuszczalnego osiadania 5 [mm] prawie we wszystkich przypadkach można zaobserwować wyraźny trend w przypadku modułów odkształcenia wtórnego E_{v2} .

Z pola nawadnianego słodką wodą otrzymujemy moduły odkształcenia wtórnego $E_{v2(\text{H}_2\text{O})}$ o wartości 80,6 [MN/m²]. W zależności od wartości dodanych chlorków, moduły odkształcenia wtórnego E_{v2} stopniowo się zmniejszają ze wzrostem wartościowości kationów. Najniższe moduły odkształcenia wtórnego $E_{v2(\text{AlCl}_3)}$ 71,8 [MN/m²] uzyskuje się z dodatkiem $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

6 Pomiary laboratoryjne parametrów gruntowych

Badanie właściwości mechanicznych gruntu będącej pod wpływem działania środków powierzchniowo czynnych wymaga najpierw mechanicznych badań laboratoryjnych gruntu, zarówno materiału gruntowego, jak i podłoża. Obejmują one klasyfikację gruntu, która jest regulowana w (DIN EN ISO 14688-1, 2018-05) [94] i (DIN EN ISO 14688-2, 2013-12) [95], a także (DIN 18196, 2011-05) [87].

Wpływ powierzchniowo czynnych dodatków na właściwości mechaniczne gruntu ocenia się za pomocą badań laboratoryjnych powszechnie stosowanych w inżynierii geotechnicznej. Badania te to (1) testy zagęszczalności gruntu w urządzeniu Proctor zgodnie z (DIN 18127, 2012-09) [79], (2) testy osiadania gruntu w Edometrze zgodnie z (DIN 18135, 2012-04) [84], (3) Doświadczenia mające na celu określenie Wytrzymałość na ścinanie w urządzeniu bezpośredniego ścinającym zgodnie z (DIN 18137-3, 2002-09) [86] oraz (4) badania wodoprzepuszczalności zgodnie z (DIN 18130-1, 1998-05) [82].

Badania znane w geotechnice mogą pokazać, w jakim stopniu dodatek środków powierzchniowo czynnych wpływa na badane parametry w każdym przypadku. Jednak nie stanowią one bezpośredniej przyczyny zachodzących zmian. Aby móc odgadnąć wytłumaczenie tego zachowania, w ostatniej części niniejszego badania przedstawiono Pomiary mocy Zeta według (ISO 13099-2, 2012-06) [103]. Badania te mogą dostarczyć wskazówek do uzasadnienia wpływów lub dodatków w materiale gruntowym.

6.1 Opis badanego gruntu z zatoki Jadebusen

Do zbadania wpływu adsorpcji na właściwości mechaniczne gruntów niespoistych potrzebna była próbka piasku z mułem i gliną. Proporcje $<0,063$ mm zapewniają większą powierzchnię właściwą, a tym samym większą powierzchnię adsorpcji. Z tego powodu piasek pochodzi z pobliskiej zatoki Jadebusen, który został z niej wydobyty w trakcie jej pogłębiania podczas budowy portu Jade-Wezer w Wilhelmshaven.

Piasek wydobywa się w strefie przybrzeżnej zatoki Jadebusen za pomocą pogłębiarki, tak zwanej pogłębiarki ssącej, i wyrzuca na teren portu. Wydobywany surowiec przed ponownym wykorzystaniem był kilkakrotnie przemywany słodką wodą i używany jako materiał zastępczy do prac budowlanych przy wyminanie gruntu w północnych Niemczech. W celu przeprowadzenia badań JADE WESER PORT REALIZATION GMBH &

Co. KG dostarczyła pięć tzw. big bagów z materiałem podłożowym o objętości ok. 2 [m³] każdy.

6.1.1 Klasyfikacja gruntu w oparciu o niemieckie normy

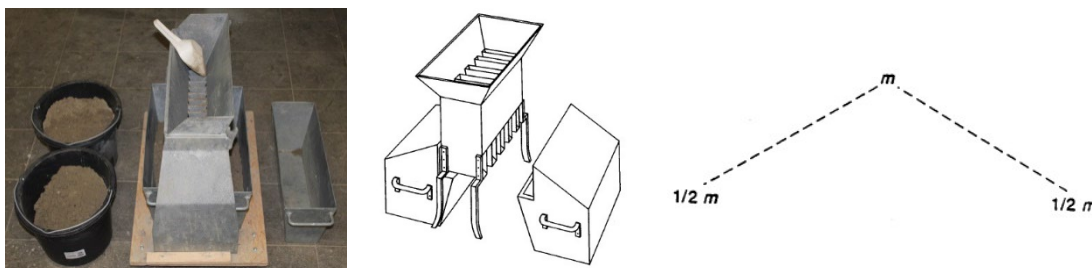
Właściwości gruntu determinowane są z jednej strony przez skład jego stałej masy, z drugiej zaś zależą one od proporcji masy stałej i przestrzeni porowej. Pory można wypełnić zarówno wodą, jak i powietrzem. Metoda klasyfikacji gruntu zgodnie z (DIN 18196, 2011-05) [87] zależy od składu gruntu. Nacisk kładziony jest na ziarnistość gruntu oraz organiczne i nieorganiczne składniki gruntu.

Wybrany do wszystkich badań laboratoryjnych materiał gruntowy to piasek z zatoki Jadebusen, który został użyty przy budowie obszaru portowego Jade-Weser-Port w Wilhelmshaven. W związku z tym dostępne są już pewne informacje ilościowe dotyczące próbki gruntu. Z analizy substancji organicznych można zrezygnować, ponieważ wiadomo, że próbka nie zawiera żadnych ich znaczących ilości. Dotyczy to również badań zawartości wapnia, siarczanów i chlorków.

6.1.2 Krzywa uziarnienia materiału gruntowego

6.1.2.1 Przygotowanie próbki do krzywej uziarnienia

Próbki przygotowano zgodnie z normą (DIN 932-2, 1999-03) [89]. Otrzymany w big bag materiał gruntowy został wysypany i z utworzonego stożka gruntu zostało pobranych z różnych miejsc pięć próbek o wadze około 20 [kg] i każda z nich została następnie przygotowana do testów i osobno badana. Przygotowanie polegało na podziale materiału przez dzielnik RT 75 aż do zredukowania wagi każdej próbki do około 2 [kg] jak to przedstawia Rys. 6.1.

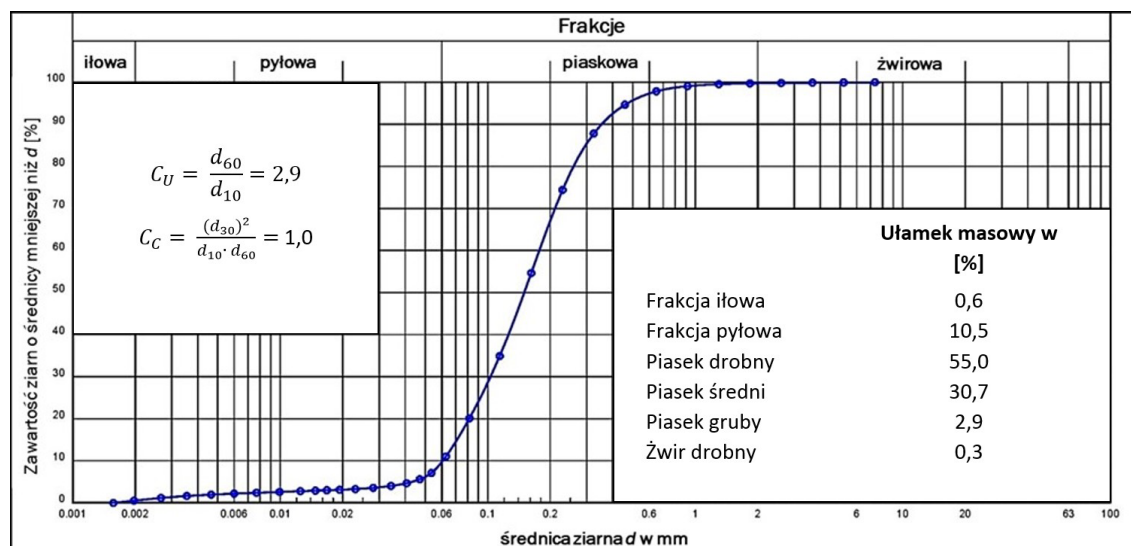


Rys. 6.1 Przygotowanie próbek za pomocą dzielnika RT 75 firmy RETSCH

Następnie dla każdej próbki wyznacza się krzywą uziarnienia i końcowe wyniki są uśrednieniem tych pięciu pomiarów.

6.1.2.2 Wyniki krzywej uziarnienia

Na wykresie Wykres 6.1 przedstawiono krzywą uziarnienia badanego gruntu. To jest krzywa pełnej pełnej analizy. Obejmuje ona połączoną analizę areometryczną osadów i sitową ziarna..



Wykres 6.1 Krzywa uziarnienia użytych próbek materiału wydobytego z dna zbiornika wodnego

Badana próbka to głównie grunt piaszczysty. Głównym składnikiem jest drobny piasek. Jednak są też znaczne ilości frakcji pyłowej i ilowej. W poniższej tabeli przedstawiono średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia.

Tabela 6.1 Średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia

Średnica ziarna przy 10 [%] całkowitego przejścia	$d_{10} = 0,06063$ mm
Średnica ziarna przy 30 [%] całkowitego przejścia	$d_{30} = 0,10303$ mm
Średnica ziarna przy 60 [%] całkowitego przejścia	$d_{60} = 0,17716$ mm

Stosując wzór (1) określa się wskaźnik krzywej uziarnienia C_U , w którym można określić (2) wskaźnik różnoziarnistości gruntu C_C jak w rozdziale 6.1.2.

Przy wartościach 2,9 [-] dla liczby nieregularności i 1,0 [-] dla liczby krzywizn oznaczamy jako jednolite.

Zgodnie z (DIN EN ISO 14688-1, 2018-05) [94], obecny gruntu to piasek drobnoziarnisty, piasek bardzo średni, lekko mulisty ze skrótem $fS, m\bar{s}, u'$, przy czym

klasyfikacja zgodnie z (DIN 18196, 2011-05) [87] daje w wyniku mieszaninę mułu piasku ze skrótem SU.

6.1.3 Wyniki dyfrakcji rentgenowskiej

Skład mineralogiczny użytej próbki piasku zbadano za pomocą rentgenowskiej analizy fazowej. W tej metodzie badawczej odległości między warstwami atomów w sieci krystalicznej są określane poprzez zjawisko dyfrakcji promieni rentgenowskich na sieci krystalicznej. W tym celu stosowany jest program EVA (jakościowy). Porównując otrzymane diagramy dyfrakcyjne z danymi kryształów w bazie danych Międzynarodowego Centrum Danych Dyfrakcyjnych (ICDD), związki krystaliczne można oznaczać ilościowo za pomocą programu TOPAS.

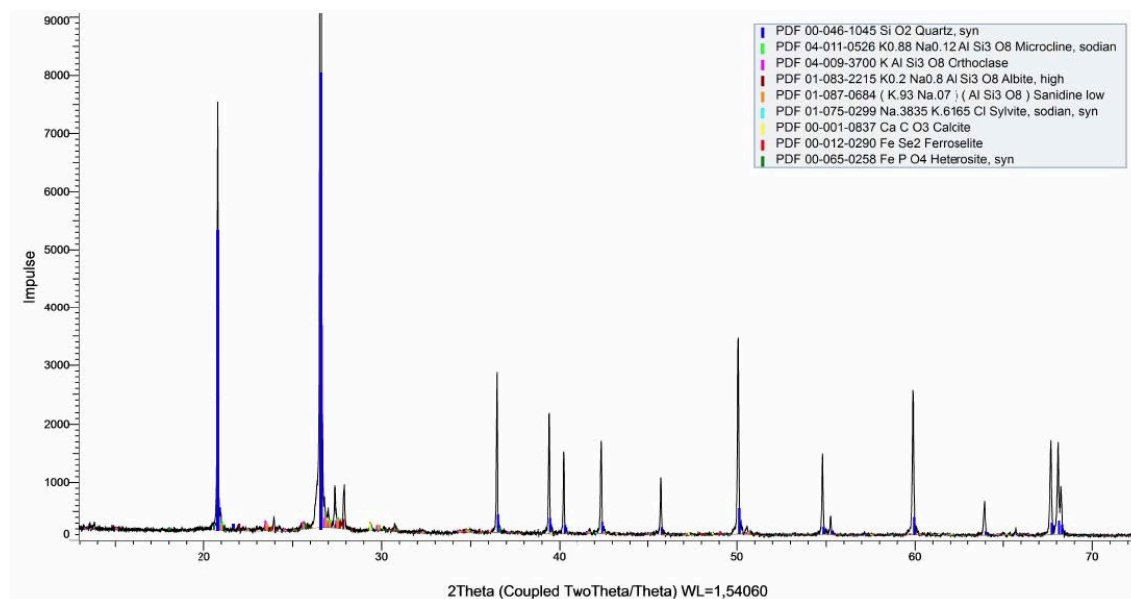
Przygotowując się do pomiaru, materiał pobrany z próbki rozdrobniono do uziarnienia $<40 \mu\text{m}$ za pomocą młynka wirówkowego (typ ZM1000, producent: RETSCH), a następnie z proszkiem Risetete 2 (producent: FRITSCH) do uziarnienia $<20 \mu\text{m}$. Rzeczywisty pomiar przeprowadzono za pomocą dyfraktometru D8 (producent: BRUKER AXS) z automatyczną luką dywergencyjną. Charakterystyki pomiarów są następujące:

- Lampa rentgenowska: Cu LFF, 40 KV, 45 [mA]
- Długość fali λ : Cu $K\alpha_1 = 0.15406$ [nm]
- Zakres (2θ) 5-70° (dokumentowany 12-70 [°])
- Próbkę bez dodatków mierzona 8 [h]

Skład mineralogiczny próbki piasku przedstawiono na wykresie Wykres 6.2. Pokazane jest podsumowanie tabelaryczne w tabeli Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Skład mineralogiczny

Minerał	Skład chemiczny	Proporcja w [%]
Kwarc	SiO_2	88,02
Kalcyt (Węglan wapnia)	$\text{Ca}[\text{CO}_3]$	3,39
Albit (Skaleń sodowy)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	3,81
Mikroclin intermediate 1 Skaleń potasowy	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	3,13
Mikroclin intermediate 2 Skaleń potasowy	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	1,65



Wykres 6.2 Dyfraktogram badanych próbek gruntu w laboratorium

6.1.4 Wyniki badania straty masy gruntu przy wyprężaniu

Składniki organiczne gruntu mogą prowadzić do obniżenia jego nośności. Objawia się to utratą objętości spowodowaną gniciem składników organicznych i związanym z tym zwiększeniem udziału porów, co prowadzi do zwiększenia ściśliwości. Praktyka pokazuje, że wpływ składników organicznych jest decydujący tylko wtedy, gdy straty podczas prażenia przekraczają 5 [%].

Określenie straty przy prażeniu przeprowadzono zgodnie ze specyfikacją normy (DIN 18128, 2002-12) [80]. Do przeprowadzenia doświadczenia użyto próbki piasku o masie ok. 200 [g] suszonej w temperaturze 105 [°C]. Próbkę piasku rozproszono na pięciu porcelanowych tyglach i wygrzewano w piecu muflowym w temperaturze 550 [°C] przez dwie godziny. Na podstawie uzyskanego wyniku badań straty masy gruntu przy wyprężaniu V_{gl} równej 0,758 [%] można stwierdzić, że badana próbka nie zawiera żadnych istotnych składników organicznych.

6.1.5 Wyniki badania zawartości wapnia

Oznaczenie zawartości wapnia służy do oceny właściwości mechanicznych gruntów drobnoziarnistych i mieszanych. Zwiększona zawartość wapnia może sprzyjać tworzeniu się pustek w roztworze i erozji podczas procesów przesiąkania i korozji w podłożu. Znaczące są ilości wapnia powyżej 1 [%] suchej masy gruntu. Wpływ wapnia na właściwości gruntu zależy od składu gruntu i jego rodzaju. Dlatego w przypadku gruntu

o podwyższonej zawartości wapna (> 3 [%]) wskazane jest określenie jego wpływu na zachowanie się gruntu za pomocą badań laboratoryjnych.

Aby określić zawartość węglanu wapnia, wysuszoną próbkę gruntu miesza się z kwasem solnym. Kwas solny reaguje z węglanem wapnia w próbce gruntu z wytworzeniem dwutlenku węgla (CO_2). Objętość powstającego dwutlenku węgla jest mierzona za pomocą gazometru. Uwzględniając temperaturę w pomieszczeniu i bezwzględne ciśnienie powietrza w miejscu badania, zawartość wapnia można obliczyć ze zmierzonej objętości gazu.

W ramach tych badań zawartość wapnia oznaczono na trzech oddzielnych próbkach zgodnie z wymaganiami normy (DIN 18129, 2011-07) [81]. Poszczególne próbki piasku, każda o masie suchej 4,5 [g], wykonano za pomocą dzielnika do próbek, następnie zmielono do 0,06 [mm] w moździerzu i ponownie wysuszono w 105 [$^{\circ}\text{C}$]. Następnie w każdej próbce oznaczono zawartość wapnia. Otrzymany wynik testu wykazał, że zmierzona zawartość wapnia V_{Ca} równa 0,788 [%] w badanej próbce gruntu jest do pominięcia.

6.1.6 Wyniki badania wartości pH gruntu

Wartość pH gruntu zależy od struktury kryształów i chemii kryształów minerałów ilastych zawartych w gruncie. Ma to bezpośredni wpływ na adsorpcję kationów minerałów ilastych. Wynika to z faktu, że przy wyższych wartościach pH kationy grup funkcyjnych SiOH , AlOH i AlOH_2 dysocjują, pozostawiając w ten sposób ładunek ujemny na bocznych krawędziach minerałów ilastych, które są nasycone kationami. Gdy wartość pH spada, grupy funkcyjne przyłączają kationy, co prowadzi do nadmiaru ładunków dodatnich na bocznych krawędziach minerałów ilastych, które były nasycone anionami.

Określenie wartości pH przeprowadzono zgodnie ze specyfikacją normy (DIN ISO 10390, 2005-12) [99]. Badanie przeprowadzono na dwóch oddzielnych próbkach piasku. Do wytworzenia zawiesiny zastosowano roztwór chlorku wapnia $c(\text{CaCl}_2)$ o stężeniu 0,01 [mol/l]. Pomiar pH przeprowadzono elektrometrycznie za pomocą kombinowanej elektrody pH (SEN TIX® 20, WTW GMBH, WEILHEIM) bez nasadki do nawadniania.

Średnia wartość zmierzonego pH wynosi 7,35 [-]. Jest to odczyn prawie neutralny, lekko zasadowy.

6.1.7 Wyniki badania soli w gruncie

Chociaż badany grunt jest materiałem przepłukanym, jest on testowany przed przeprowadzeniem testów pod kątem możliwego wcześniejszego zanieczyszczenia solami.

Zbadano zawartość procentową poszczególnych soli w gruncie. Wyniki badań przedstawiono w tabeli Tabela 6.3. Zgodnie z oczekiwaniami udział soli w gruncie jest znikomy. Jako wartość wejściowa nie ma zatem istotnego wpływu na testy.

Tabela 6.3: Zasolenie próbki gruntu

Sole	Chlorki	Siarczany	Azotany
Wzór chemiczny	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ³⁻
[M.-%]	0,005	0,051	0,002

6.2 Zastosowane chlorki

W badaniach laboratoryjnych zagęszczania gruntu w aparacie Proctora, edometrycznego modułu ściśliwości, wytrzymałości na ścinanie próbek gruntu, w teście bezpośredniego ścinania, wodoprzepuszczalności oraz przy pomiarze potencjału Zeta użyto NaCl, CaCl₂ · 6 · H₂O, AlCl₃ · 6 · H₂O, z wyjątkiem badania edometrycznego modułu ściśliwości gdzie zastosowano nieuwodniony CaCl₂ oraz przy badaniu wytrzymałości na ścinanie gdzie użyto CaCl₂ · 2 · H₂O.

6.2.1 Chlorek sodu

Chlorek sodu, znany na co dzień jako sól kuchenna, jest jedną z soli metali alkalicznych. Chlorek sodu występuje naturalnie w znacznych ilościach w wodzie morskiej i jako mineralny halit w złożach soli kamiennej. W Niemczech chlorek sodu pozyskiwany jest przede wszystkim w wyniku wydobycia złóż soli kamiennej. Roczna produkcja w Niemczech wynosi ok. 20 mln ton.

Chlorek sodu jest stosowany w 80 [%] jako sól przemysłowa w przemyśle chemicznym, 12% jako sól do odladzania (sól drogową), 5 [%] jako sól przemysłowa (przemysł spożywczy) i 3 [%] jako sól kuchenna.

Poniższe zestawienie w tabeli Tabela 6.4 zawiera informacje o zastosowanym produkcie oraz właściwościach fizycznych i chemicznych związanych z tą pracą:

Tabela 6.4 Parametry chlorku sodu

Wzór chemiczny	NaCl
Producent	RIEDEL - DE HAËN
Numer CAS	7647-14-5
Masa cząsteczkowa	58,44 [g/mol]
Rozpuszczalność w wodzie	358 [g/l] (20 [°C])

W wodzie chlorek sodu rozpuszcza się i dysocjuje na jednowartościowe, dodatnio naładowane kationy Na^+ i jednowartościowe, ujemnie naładowane aniony Cl^- . W normalnych warunkach środowiskowych NaCl jest nieaktywny chemicznie.

Klasa zagrożenia wody (w skrócie WGK): 1 (nieznaczne zagrożenie dla wody).

6.2.2 Chlorek wapnia

Sześciowodny chlorek wapnia jest jedną z soli metali ziem alkalicznych. W naturze występuje w postaci bardzo rzadkiego minerału antarktycytu. W przemyśle otrzymywany jest jako produkt uboczny produkcji sody (węglan sodu Na_2CO_3) w postaci bezwodnej CaCl_2 .

Ze względu na swoją higroskopijność chlorek wapnia znajduje zastosowanie jako środek osuszający w laboratorium lub jako sól do odladzania dróg zimą. W przemyśle spożywczym stosowany jest głównie jako środek ujędrniający, wzmacniający smak i stabilizator w uzdatnianiu wody pitnej pod nazwą E 509.

Informacje o zastosowanym produkcie oraz właściwościach fizycznych i chemicznych związanych z tą pracą są wymienione w tabeli Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Parametry chlorku wapnia

Wzór chemiczny	CaCl_2	$\text{CaCl}_2 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaCl}_2 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Producent	CARL ROTH GMBH + Co. KG		
Numer CAS	10043-52-4	10035-04-8	7774-34-7
Masa cząsteczkowa	111,0 [g/mol]	147,0 [g/mol]	241,43 [g/mol]
Rozpuszczalność w wodzie	745 [g/l] (20 [°C])	147 [g/l] (20 [°C])	220 [g/l] (20 [°C])

Sześciowodny chlorek wapnia rozpuszcza się we własnej krystalicznej wodzie w temperaturze około 30 [°C]. Woda krystalizacyjna jest ponownie uwalniana w temperaturze około 200 [°C]. Rozpuszczanie bezwodnego chlorku wapnia w wodzie jest egzotermiczne, tj. wraz z wydzielaniem ciepła. W przeciwieństwie do tego rozpuszczanie heksahydratu chlorku wapnia w wodzie jest endotermiczne, więc zużywa się energię.

Prowadzi to do silnego ochłodzenia wody. Ten materiał nie reaguje chemicznie w normalnych warunkach środowiskowych.

Klasa zagrożenia wody (w skrócie: WGK): 1 (nieznaczne zagrożenie dla wody).

6.2.3 Chlorek glinu

Sześciowodny chlorek glinu jest jedną z soli metali ziemnych. Powstaje poprzez rozpuszczenie glinu w kwasie solnym. Na skalę przemysłową bezwodny chlorek glinu otrzymuje się w wielkim piecu w wyniku działania mieszaniny chloru pierwiastkowego (Cl_2) i tlenku węgla (CO) na kaolin glinokrzemianowy lub boksyt.

Bezwodny chlorek glinu jest stosowany jako katalizator w różnych reakcjach chemicznych, np. w przemyśle naftowym. Sześciowodny chlorek glinu jest stosowany jako flokulant lub strąacz w oczyszczaniu ścieków, lub jako składnik aktywny w wielu dezodorantach i antyperspirantach.

Informacje o zastosowanym produkcie oraz właściwościach fizycznych i chemicznych związanych z tą pracą są wymienione poniżej w tabeli Tabela 6.6.

Tabela 6.6 Parametry chlorku glinu

Wzór chemiczny	$\text{AlCl}_3 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Producent	APPLICHEM GMBH
Numer CAS	7784-13-6
Masa cząsteczkowa	241,43 [g/mol]
Rozpuszczalność w wodzie	1330 [g/l] (20 [°C])

Chlorek glinu ma działanie bardzo higroskopijne. W wodzie rozpuszcza się egzotermicznie i dysocjuje do trójwartościowych kationów Al^{3+} i jednowartościowych anionów Cl^- , które są obecne w roztworze elektrolitu. Ten materiał nie reaguje chemicznie w normalnych warunkach środowiskowych.

Klasa zagrożenia wody (w skrócie: WGK): 1 (nieznaczne zagrożenie dla wody).

6.3 Badanie zagęszczania materiału gruntowego w aparacie Proctora

Dla gruntu opisywanego w rozdziale 6.1 badania ściśliwości i wpływu środków powierzchniowo czynnych przeprowadza się za pomocą testu Proctora.

Test Proctora służy do określenia maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego ρ_{Pr} oraz wilgotności optymalnej w_{opt} . W normie (DIN18127, 2012-09) [79]

rozdziela się gęstość Proctora ρ_{Pr} i zmodyfikowaną gęstość Proctora $\rho_{Pr(mod)}$. Są to gęstości uzyskane na sucho, jakie można osiągnąć przy określonej energii zagęszczania. Przy gęstości Proctora ρ_{Pr} energia zagęszczania zależna od objętości wynosi $W 0,6$ [MNm/m³], przy zmodyfikowanej gęstości Proctora $\rho_{Pr(mod)}$ wynosi $2,7$ [MNm/m³]. Zawartość wody osiągnięta przy gęstości Proctora ρ_{Pr} lub $\rho_{Pr(mod)}$ określa się jako optymalną zawartość wody W_{opt} lub $W_{opt(mod)}$.

6.3.1 Przygotowanie próbek

Grunty opisane i sklasyfikowane w rozdziale 6.1.1 służą do prowadzenia badań zagęszczalności wypełnień piaskowych. Próbkę pobiera się ze złoża piasku o objętości 2 [m³] i suszy w odpowiedniej suszarce MEMMERT UNIVERSALSCHRANK U w temperaturze 105 [°C] aż do uzyskania niezmiennącej się więcej masy. Te wysuszone próbki są następnie dzielone na pięć części, każda o masie suchej m_d wynoszącej 2100 [g]. Do tych próbek dodawane są następnie ściśle określone ilości wody destylowanej w celu uzyskania zaplanowanych wcześniej wilgotności. Wartości te są wymienione w tabeli Tabela 6.7.

Tabela 6.7 Zawartość wody w próbkach cząstkowych do eksperymentów Proctora bez dodatków

Zawartość wody w próbkach cząstkowych w [%] i ilość wody w [g] w stosunku 2100 [g] próbki piasku						
9 [%]	11 [%]	13 [%]	15 [%]	17 [%]	19 [%]	21 [%]
189 [g]	231 [g]	273 [g]	315 [g]	357 [g]	399 [g]	441 [g]

Optymalna ilość potrzebnej wody zależy od krzywej uziarnienia i energii zagęszczania. Po dodaniu wody destylowanej każdą próbkę cząstkowe miesza się w celu uzyskania jak największej jednorodności. Test wykonawczy odpowiedniej próbki częściowej przeprowadza się po odczekaniu co najmniej 12 godzin, aby istniejące drobne frakcje zmiękły i stały się jednorodne.

Przygotowanie próbek z chlorkiem sodu, chlorkiem wapnia (di hydrat), chlorkiem glinu (heksa hydrat) przeprowadza się analogicznie, przy czym do osiągnięcia zawartości wody podanej w tabeli Tabela 6.7 nie używa się wody destylowanej, ale odpowiedniego roztworu. Przygotowanie odpowiednich roztworów z zastosowaniem kryształów soli w

przypadku chlorku glinu (heksa hydratu) w celu uzyskania 0,1 [%] ich zawartości w próbce pokazano na Rys. 6.2. Analogicznie przygotowano pozostałe roztwory dla zawartości 0,2 [%] i 0,3 [%] chlorku glinu w próbce oraz analogicznie dla chlorku sodu i chlorku wapnia.

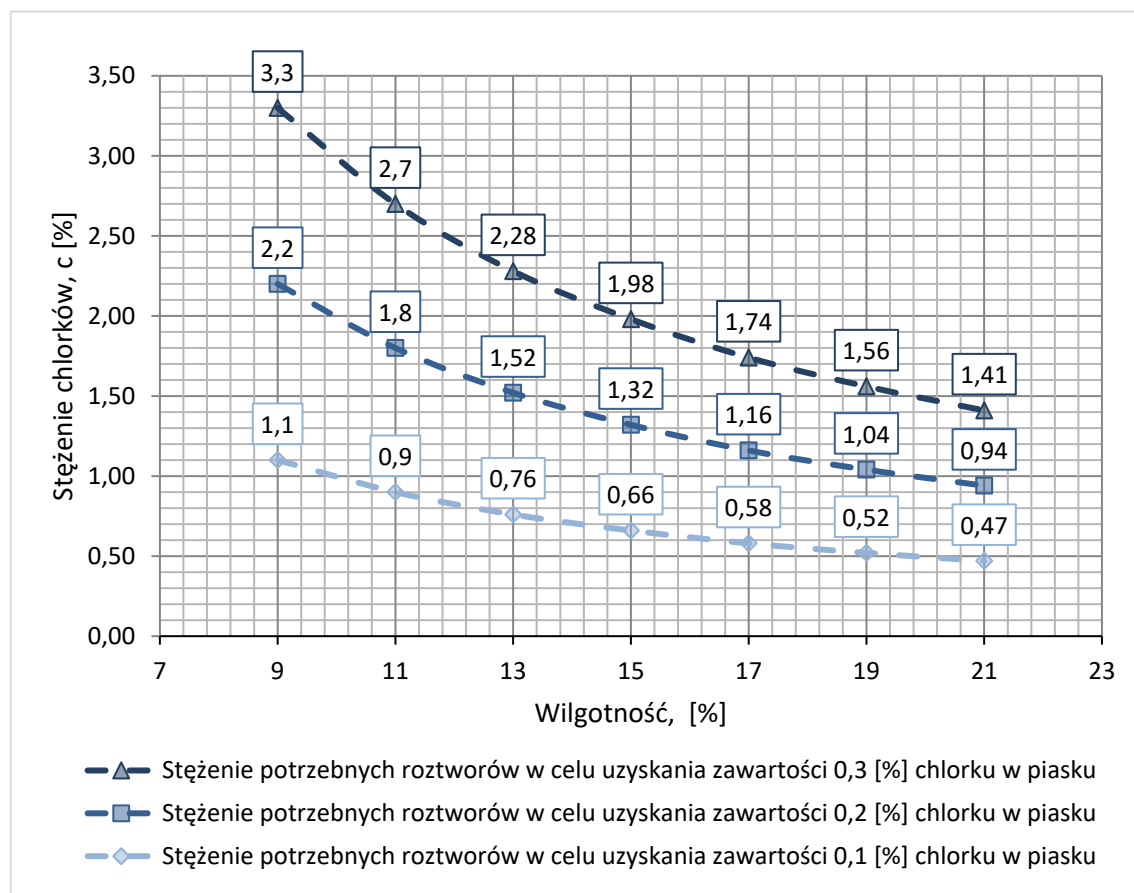


Rys. 6.2 Przykłady przygotowania roztworów z AlCl₃ do badań Proctora

Aby zminimalizować źródła błędów i umożliwić jak najwyższą porównywalność między poszczególnymi testami, roztwory chlorku glinu są przygotowywane w pięciolitrowych kanistrach, a następnie używane w podanych powyżej ilościach do zwilżania pojedynczych próbek. Zadbano o to, aby w obliczeniach uwzględniono wodę związaną.

Wraz ze wzrostem zawartości wody zmniejsza się stężenie chlorków w roztworze. Ponieważ test Proctora składa się z kilku testów cząstkowych z różnymi zawartościami wody, zawartość wody jest zmienną w teście Proctora. Stałą jest sucha masa 2100 [g] próbki cząstkowej piasku. Ze względu na zależność między stężeniem chlorku a suchą masą piasku w każdej próbce cząstkowej stała jest zawartość procentowa chlorku.

Stężenie roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ w celu uzyskania odpowiedniej zawartości 0,1 [%], 0,2 [%] i 0,3 [%] chlorku w piasku przedstawia Wykres 6.3.



Wykres 6.3 Stężenie potrzebnych roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ w celu uzyskania odpowiedniej zawartości chlorku w piasku

W ten sposób każdy test częściowy Proctora niezależnie od zawartości wody przeprowadzany jest przy stałej zawartości chlorku w próbce 0,1 [%], 0,2 [%], 0,3 [%].

6.3.2 Przebieg doświadczenia

W teście Proctora do badanego gruntu dodaje się różne ilości wody w co najmniej pięciu indywidualnych testach częściowych i zagęszcza się z użyciem przyjętej energii w ilości 0,6 [MNm/m³].

Użyte ilości wody i roztworu soli podano w rozdziale 6.3.1. Próbkę grunt jest następnie układana trzema warstwami do znormalizowanego cylindra testowego. Każda warstwa jest zagęszczana spadającym ciężarem.

Wymiary cylindra testowego, masa spadającego ciężaru, wysokość upadku i liczba uderzeń spadających na warstwę dobierane są w zależności od wielkości największych

ziaren próbki. Parametry te określają energię zagęszczania wprowadzoną do gruntu i można je znaleźć w normie (DIN 18127, 2012-09) [79]. Badania przeprowadzane są w znormalizowanym cylindrze Proctora w urządzeniu firmy WILLE GEOTECHNIK GMBH. Charakterystykę cylindra Proctora podsumowano w tabeli Tabela 6.8 poniżej.

Tabela 6.8 Wymiary i dane cylindra Proctora

Średnica d_1	Wysokość h_1	Objętość V_Z	Masa m_Z
100 [mm]	120 [mm]	942,5 [cm ³]	2461,5 [g]

Masa spadającego ciężaru wynosi 2,5 [kg]. Każdą z trzech warstw próbki gruntu zagęszcza się spadającym ciężarem z wysokości 30 [cm]. Obsługiwane automatycznie urządzenie Proctora i cylindra testowego pokazane jest na Rys. 6.3.



Rys. 6.3 Urządzenie Proctora z cylindrem testowym

Po zagęszczeniu próbki gruntu mokrą masę m_f określa się przez zważenie, a zawartość wody w w próbce częściowej jest obliczana po jej zważeniu po wysuszeniu w piecu. Rys. 6.4 przedstawia próbkę po zagęszczeniu po wyjęciu z cylindra. W tym miejscu można wyraźnie zobaczyć granice poszczególnych warstw próbki.



Rys. 6.4 Próbkę po zagęszczeniu po wyjęciu z cylindra Proctora

6.3.3 Opis i wyniki pojedynczego testu zagęszczania w aparacie Proctora

Ocena i prezentacja wszystkich testów Proctora przeprowadzona została na podstawie normy (DIN 18127, 2012-09) [79]. W tym celu określa się najpierw gęstości wilgotnych próbek ρ_f badań częściowych zgodnie z równaniem (6).

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_z} \quad (6)$$

ρ_f	[g/cm ³]	Gęstość próbki wilgotnej
m_f	[g]	Masa próbki wilgotnej
V_z	[cm ³]	Objętość cylindra Proctora

Masę wilgotnej próbki m_f wyznacza się w wyniku ważenia. Do przedstawienia wyników wymagana jest gęstość w stanie suchym ρ_d , obliczana zgodnie z równaniem (7).

$$\rho_d = \frac{\rho_f}{1 + \frac{w}{100}} \quad (7)$$

ρ_d	[g/cm ³]	Gęstość próbki suchej
ρ_f	[g/cm ³]	Gęstość próbki wilgotnej
w	[%]	Zawartość wody

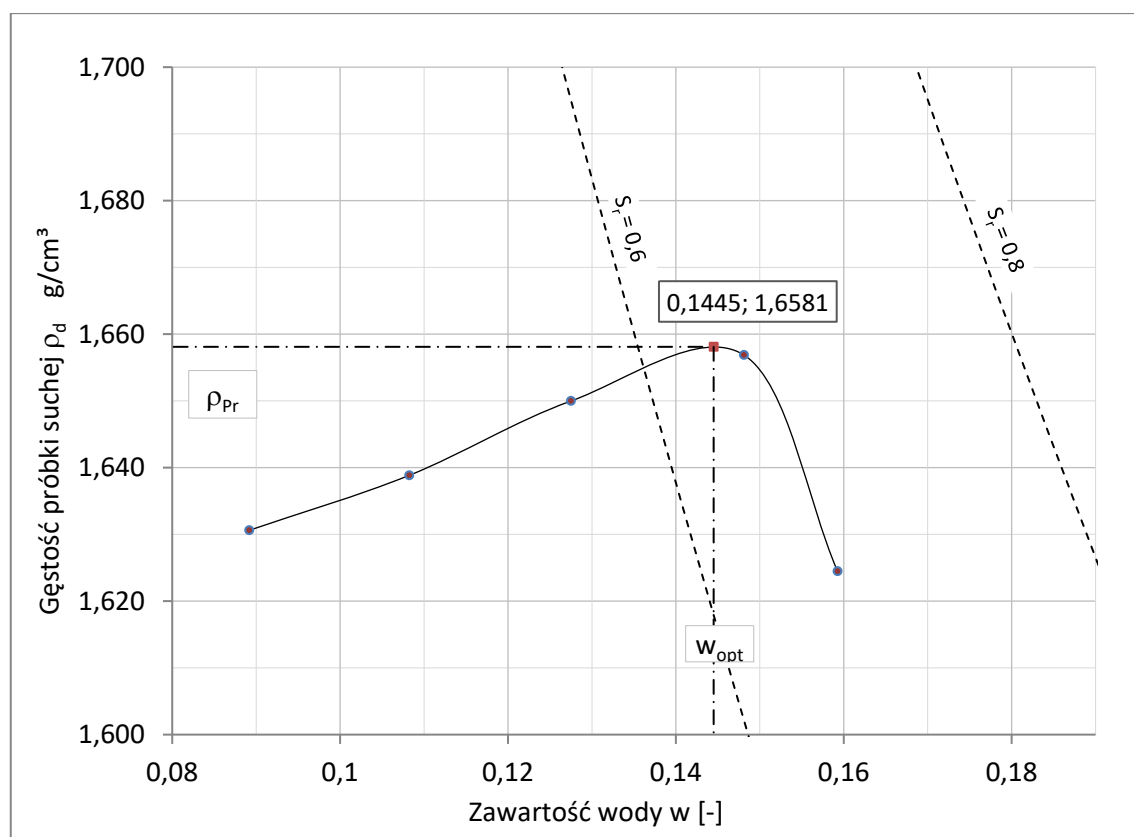
Zależność ta wynika z równania (6), przyjmując wilgotność w z równania (8).

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (8)$$

w	[%]	Zawartość wody
m_w	[g]	Masa wody porowej
m_d	[g]	Masa próbki suchej

Suchą masę m_d uzyskuje się poprzez zważenie wysuszonej próbki w piecu a masa wody porowej m_w to różnica masy mokrej m_f i suchej m_d próbki.

Uzyskane gęstości próbek w stanie suchym ρ_d obliczone z poszczególnych testów zgodnie z równaniem (7) wykreślana są jako funkcja w zależności od zawartości wody w . Maksimum uzyskanej krzywej jest maksymalną gęstością w stanie suchym i jest zdefiniowana jako gęstość Proctora. Gęstość Proctora wraz z zawartością wody zaznaczono kolorem czerwonym na wykresie Wykres 6.4.



Wykres 6.4 Przebieg krzywej Proctora z nawilżaniem wodą bez dodatków i energią zagęszczania 0,59 [MNm/m³] z zaznaczeniem optymalnej zawartości wody i krzywych całkowitego nasycenia

Przedstawiona tutaj krzywa Proctora wyznaczona została przez pięć punktów z pięciu indywidualnych testów z różnymi zawartościami wody.

Przy wysokiej zawartości wody opadająca gałąź krzywej Proctora zbliża się do linii nasycenia przy 100 [%] nasycenia przestrzeni porowej. Krzywa nasycenia zależy od gęstości ziarna ρ_s próbki i można ją obliczyć zgodnie z równaniem (9).

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \frac{w \cdot \rho_s}{S_r \cdot \rho_w}} \Leftrightarrow S_r = \frac{-\rho_d \cdot \rho_s \cdot w}{\rho_w \cdot (\rho_d - \rho_s)} \quad (9)$$

ρ_d	[g/cm ³]	Gęstość próbki suchej
ρ_s	[g/cm ³]	Gęstość właściwa szkieletu gruntowego
w	[%]	Zawartość wody
S_r	[-]	Stopień wilgotności gruntu
ρ_w	[g/cm ³]	Gęstość wody

Gęstość ziarna ρ_s może być określona zgodnie z normą (DIN 18124, 2011-04) [78] za pomocą piknometru kapilarnego. W ramach tych badań obliczenie krzywych nasycenia przeprowadza się na podstawie empirycznych wartości gęstości ziaren. Według BOLEY i ADAM (2012) [7] dla piasków przyjmuje się dla ρ_s wartość 2,65 [g/cm³].

Różnica odciętych na wykresie między krzywą nasycenia a krzywą Proctora jest miarą zawartości powietrza w odpowiednich próbkach. Odpowiada to wielkości n_a porów wypełnionych powietrzem w stosunku do całkowitej objętości próbki, co można określić za pomocą równania (10).

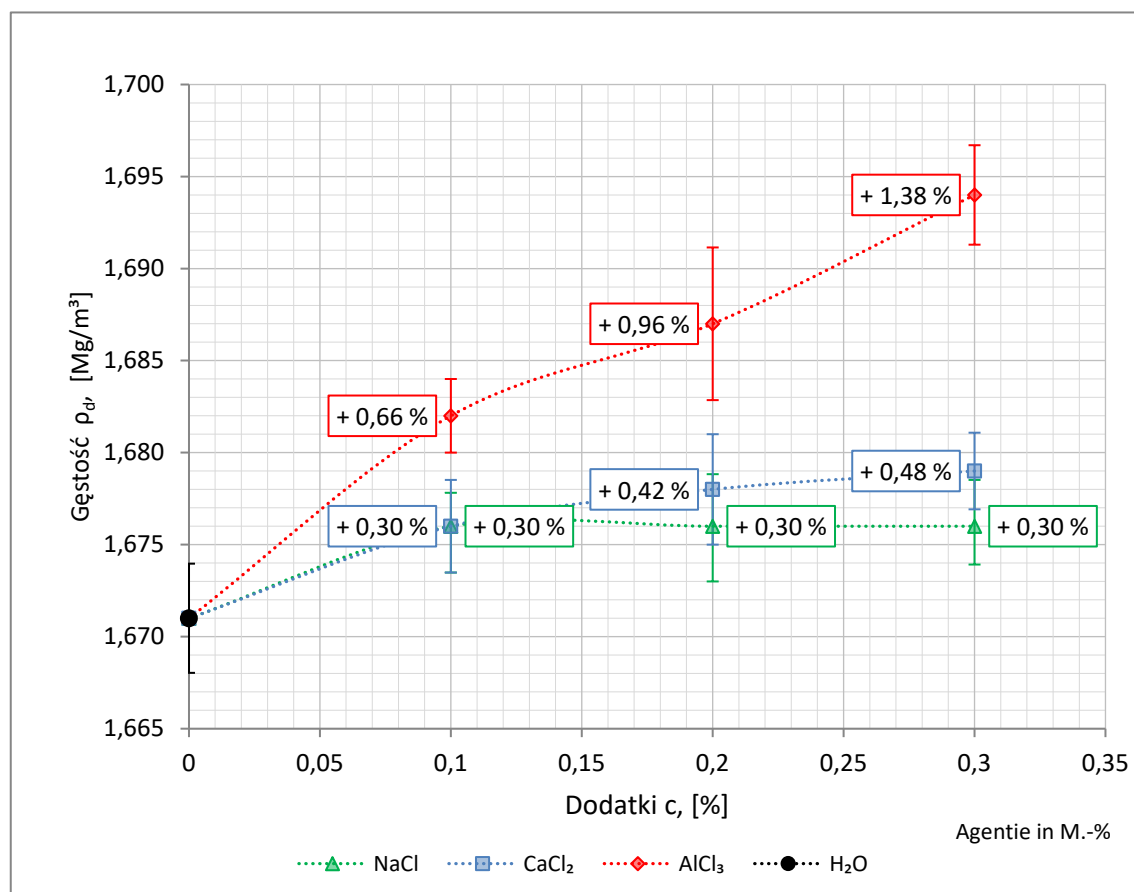
$$n_a = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right) \quad (10)$$

n_a	[%]	Stopień porowatości
ρ_d	[g/cm ³]	Gęstość próbki suchej
w	[%]	Zawartość wody
ρ_s	[g/cm ³]	Gęstość właściwa szkieletu gruntowego
ρ_w	[g/cm ³]	Gęstość wody

6.3.4 Wyniki testu zagęszczania w aparacie Proctora przy optymalnej wilgotności

W tej sekcji podsumowano i porównano poprzednio przedstawione gęstości Proctora. Ma to na celu przedstawienie przeglądu najważniejszych wyników testów.

Na wykresie Wykres 6.5, zgodnie z legendą, każda krzywa przedstawia badany czynnik o różnych stężeniach, ułamki masowe naniesiono w [%] na odciętej, a na rzędnej przedstawiono uzyskane gęstości Proctora w [Mg/m^3].



Wykres 6.5 Porównanie gęstości w zależności od stężenia

Wykres 6.5 wskazuje, że środki NaCl, CaCl₂ • 6H₂O i AlCl₃ • 6 H₂O spowodowały zmiany w zachowaniu się gruntu podczas zagęszczania. Z jednej strony im wyższe stężenie użytych soli, tym wyższa gęstość Proctora. Z drugiej strony wzrost gęstości Proctora następuje, gdy stosowane są sole, w zależności od ich wartościowości. Oba czynniki, wartościowość i stężenie prowadzą do zwiększonej gęstości Proctora. Z wyjątkiem nakładania się dodatku NaCl i CaCl₂ w stężeniu 0,1 [%], trend jest stały.

6.4 Zagęszczanie w aparacie Proctora przy zmiennej energii zagęszczania

Badania przedstawione w tym rozdziale prowadzone są przy zmieniającej się objętościowej energii zagęszczania W . Normy wymagają badania dla dwóch wartości energii zagęszczania $W_{Pr} 0,6$ [MNm/m³] w wariancie klasycznym i $W_{Pr(mod)} 2,7$ [MNm/m³] w zmodyfikowanym. Przedstawione tutaj wyniki obejmują pomiary w całym zakresie energii zagęszczania pomiędzy tymi wartościami oraz minimalnie poniżej.

Zmienne wartości energii zagęszczania uzyskuje się poprzez zmianę ilości uderzeń.

Sposób obliczenia konkretnych energii zagęszczania przeprowadza się zgodnie z (DIN EN 13286-2, 2013-02) [90] i można go określić za pomocą równania (11).

$$W_{\rho_{Pr}} = n_1 \cdot n_2 \left(\frac{G_u \cdot h \cdot g}{V_z} \right) \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

$W_{\rho_{Pr}}$	[MNm/m ³]	Energia właściwa zagęszczania
n_1	[-]	Liczba uderzeń na warstwę
n_2	[-]	Liczba warstw
G_u	[kg]	Masa uderzająca
h	[m]	Wysokość upadku
g	[m/s ²]	Przyspieszenie ziemskie
V_z	[m ³]	Objętość cylindra Proctora

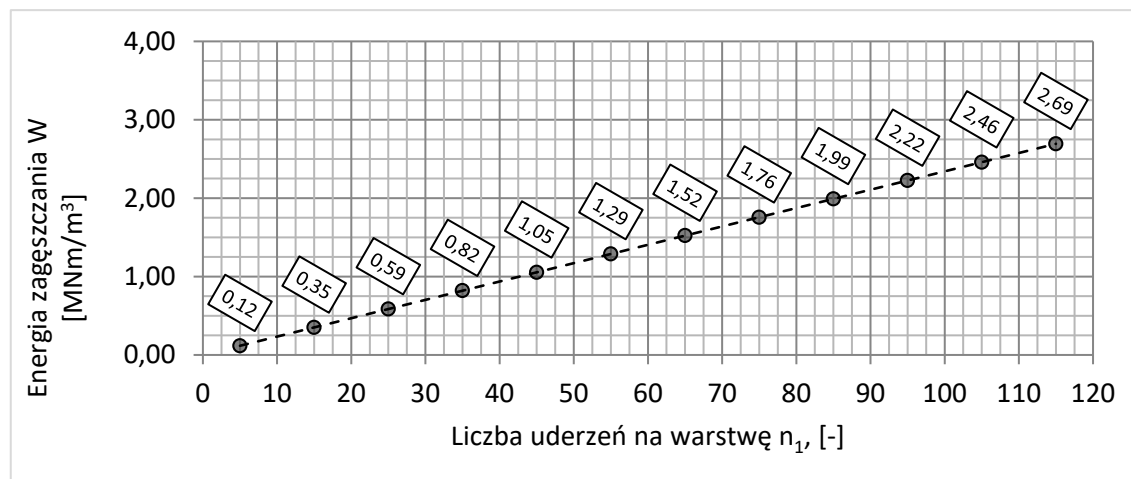
6.4.1 Przebieg doświadczenia

W przeprowadzonych tu badaniach górną granicą energii zagęszczania jest energia zagęszczania zmodyfikowanego testu Proctora $W_{Pr(mod)} 2,7$ [MNm/m³]. Ponieważ zmiana każdej wielkości: ciężaru spadającego, wysokości upadku, liczby warstw gruntu i liczby uderzeń zagęszczania skutkuje zmianą energii, przyjęto tutaj zmieniać tę energię poprzez zmianę liczby uderzeń przy pozostałych wielkościach stałych w równaniu (8), co przedstawiono w tabeli Tabela 6.9.

Tabela 6.9 Liczba uderzeń n_1 na warstwę gruntu

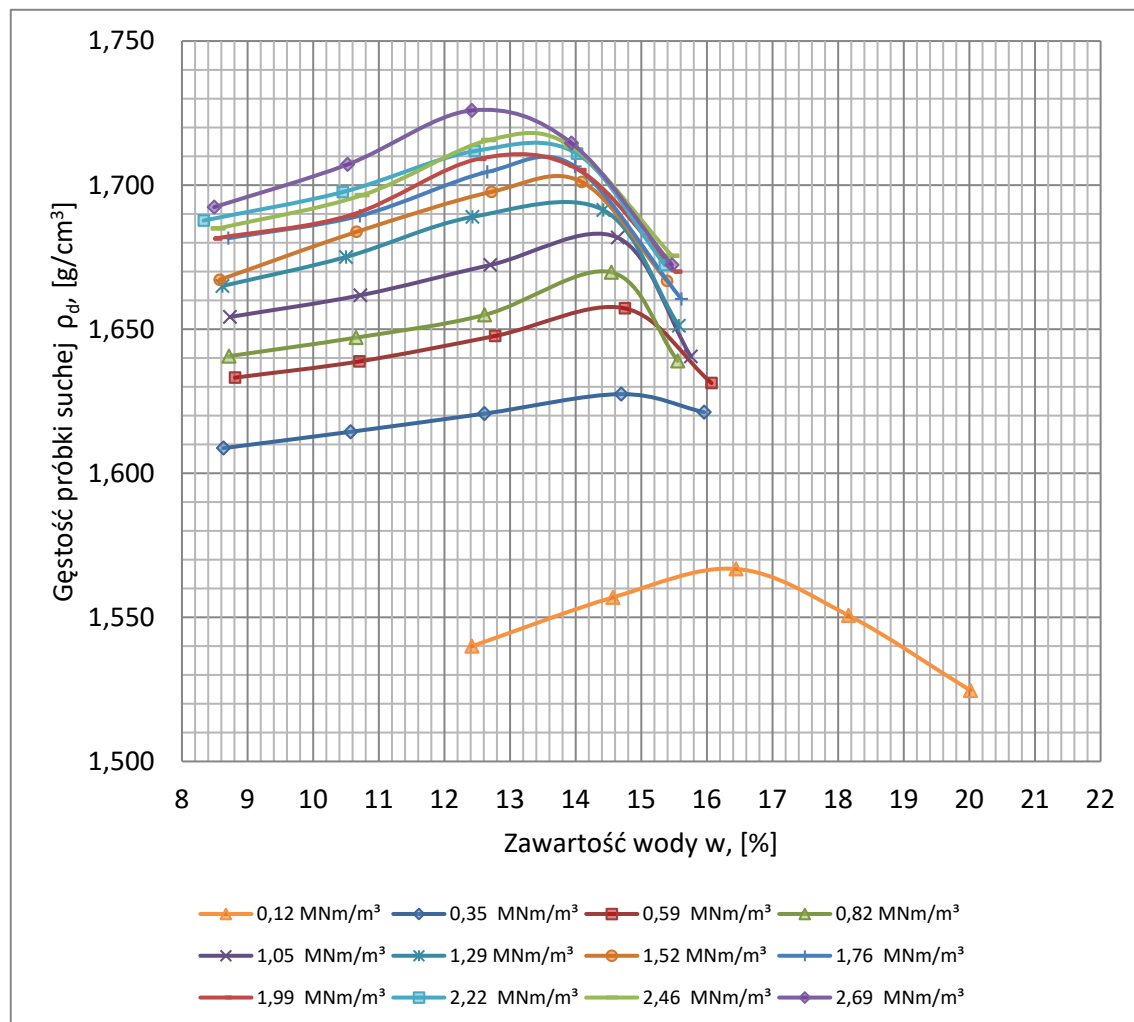
Liczba uderzeń n_1 na warstwę gruntu											
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115

Pomimo że zmieniana jest tutaj liczba uderzeń, to wyniki pomiarów są przedstawiane w zależności od energii zagęszczania obliczonej na podstawie tej liczby, co przedstawia Wykres 6.6.

Wykres 6.6 Energia zagęszczania w liniowej zależności od liczby uderzeń n_1 na warstwę

6.4.1.1 Wyniki testu zagęszczania w aparacie Proctora przy użyciu wody (H_2O)

Uśrednione krzywe Proctora dla próbek gruntu zwilżonych wodą bez dodatków chlorków w zależności od energii zagęszczania zestawiono na wykresie Wykres 6.7.



Wykres 6.7 Uśrednione krzywe Proctora dla próbek gruntu zwilżonych wodą bez dodatków chlorków w zależności od energii zagęszczania

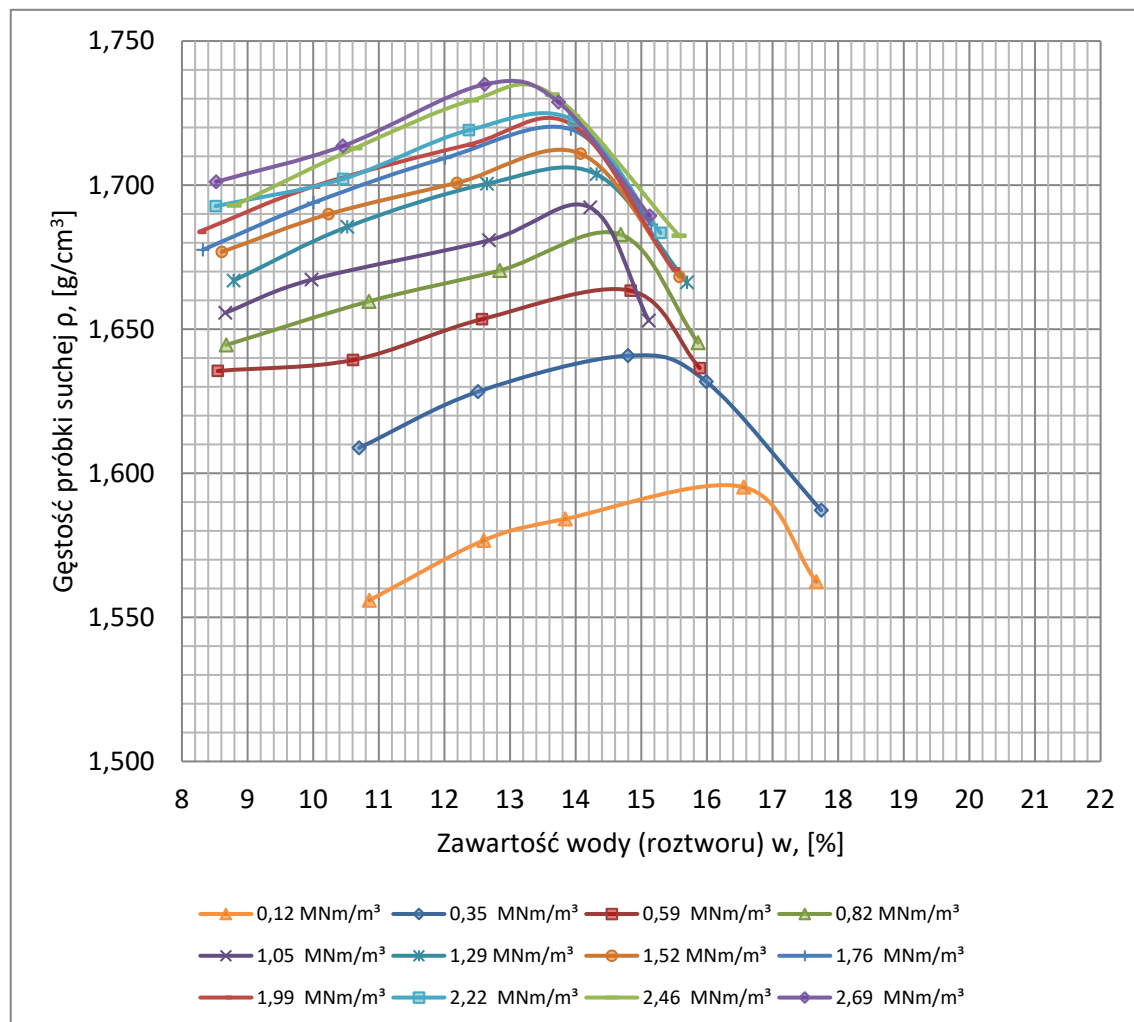
Przedstawione na wykresie Wykres 6.7 krzywe Proctora mają przebieg zbliżony do charakterystycznego dla gruntów drobnopiaszczystych. Wszystkie pokazane tutaj krzywe Proctora mają spłaszczony przebieg.

Ze wzrostem zawartości wody sucha gałąź każdej krzywej rośnie powoli, aż do osiągnięcia maksimum, a następnie stromo opada. W pobliżu maksimum czyli gęstości Proctora p_{Pr} krzywe wzrastają silniej, co jest charakterystyczne dla gruntów z przedstawioną powyżej na wykresie Wykres 6.1 krzywą uziarnienia.

Otrzymane wyniki są zgodne z oczekiwaniami. Przebieg każdej krzywej Proctora jest charakterystyczny dla badanego gruntu. Dotyczy to w równym stopniu położenia krzywej w układzie współrzędnych, jej kształtu oraz zmiany gęstości Proctora ρ_{Pr} ze wzrostem energii zagęszczania. Również zgodnie z oczekiwaniami spada optymalna wilgotność gruntu w czego powodem jest zmniejszenie stopnia porowatości. Gęstości Proctora ρ_{Pr} i optymalna wilgotność gruntu w są przedmiotem szczególnego zainteresowania w badaniach eksperymentalnych i w naturze oraz w praktyce na placu budowy. Ta część wykresu jest zatem dokładniej przedstawiona. W dalszej części pracy następuje dokładniejsza analiza maksimów krzywych a jej ramiona „gałąź sucha“ wolno rosnąca i „gałąź mokra“ ostro spadająca są pominięte.

6.4.1.2 Wyniki testu zagęszczania w aparacie Proctora przy użyciu chlorku glinu

Uśrednione krzywe Proctora dla próbek gruntu zwilżonych 0,3 [%] roztworem chlorku glinu $AlCl_3$ w zależności od energii zagęszczania zestawiono na wykresie Wykres 6.8.



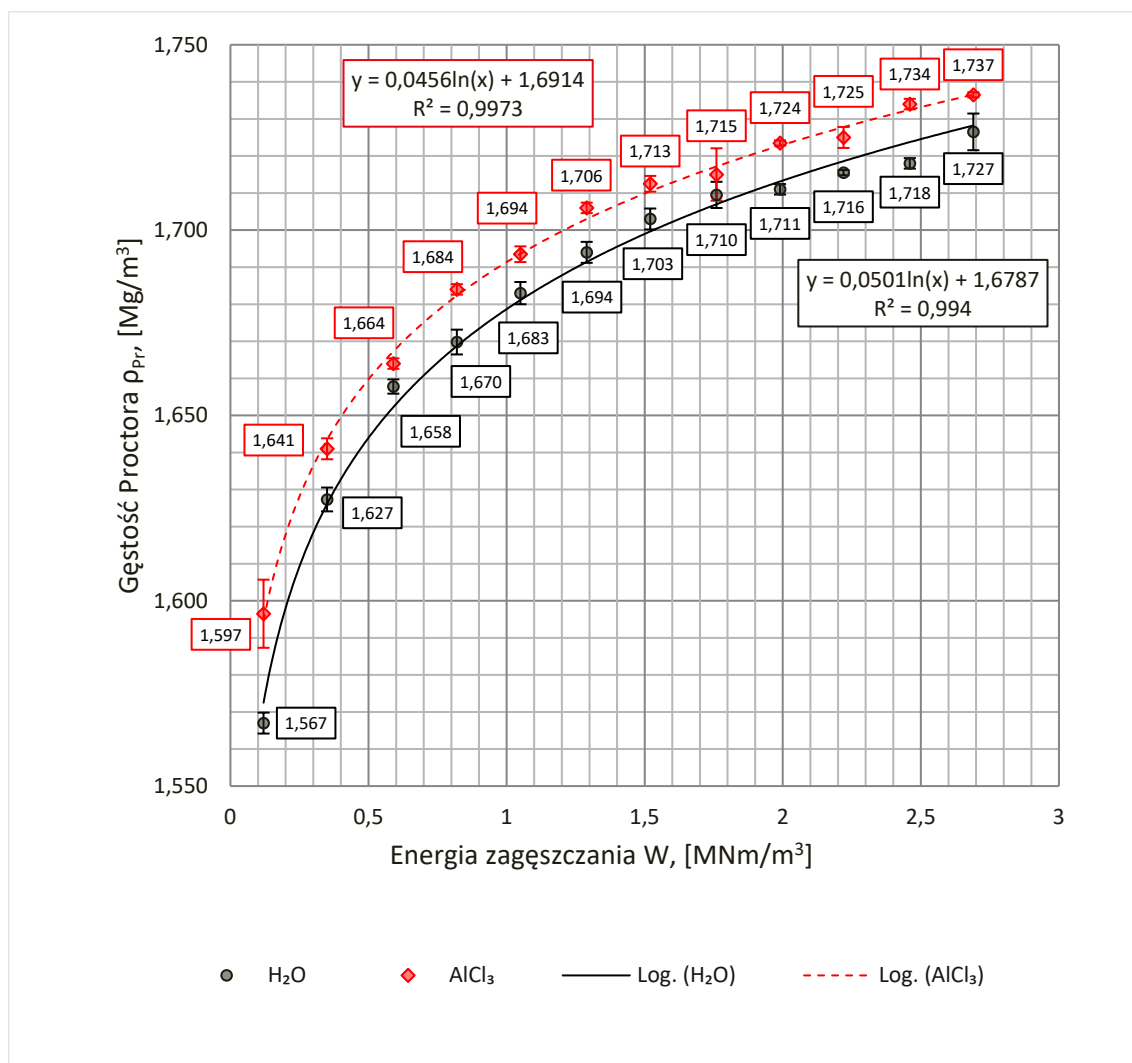
Wykres 6.8 Uśrednione krzywe Proctora dla próbek gruntu zwilżonych 0,3 [%] roztworem chlorku glinu $AlCl_3$ w zależności od energii zagęszczania

Analogicznie do wykresu Wykres 6.7 na stronie 73 na osi poziomej przedstawiono zawartość wody w w [%] a na osi pionowej gęstości suchej masy ρ_{Pr} uzyskane w wyniku zagęszczania w aparacie Proctora. Do każdej krzywej Proctora przypisana jest określona energia zagęszczania W . Ze względu na przejrzystość i czytelność wykresu Wykres 6.8 nie zawiera on krzywych stopnia wilgotności gruntu S_r , jak i odchyłeń standardowych σ_r . Tak jak poprzednio całe przebiegi przedstawionych tutaj krzywych Proctora można nazwać płaskim, nawet po dodaniu roztworu chlorku glinu. Mokra gałąź krzywej Proctora wykazuje zwykle opadający charakter wraz ze wzrostem wilgotności. Sucha gałąź krzywej Proctora ma również zauważalny większy wzrost w pobliżu punktu dla

optymalnej wilgotności. Cecha ta jest szczególnie wyraźnie widocznie dla krzywych Proctora przy energii zagęszczania W większych niż $0,82 \text{ [MNm/m}^3]$. Zwykle taki przebieg krzywych w pobliżu maksimum spowodowany jest większą zawartością mułu w gruncie. Jednak w tym przypadku rozkład wielkości ziaren we wszystkich próbkach był jednakowy i to nie było przyczyną a prawdopodobnie dodatek chlorku glinu.

6.4.2 Dyskusja wyników

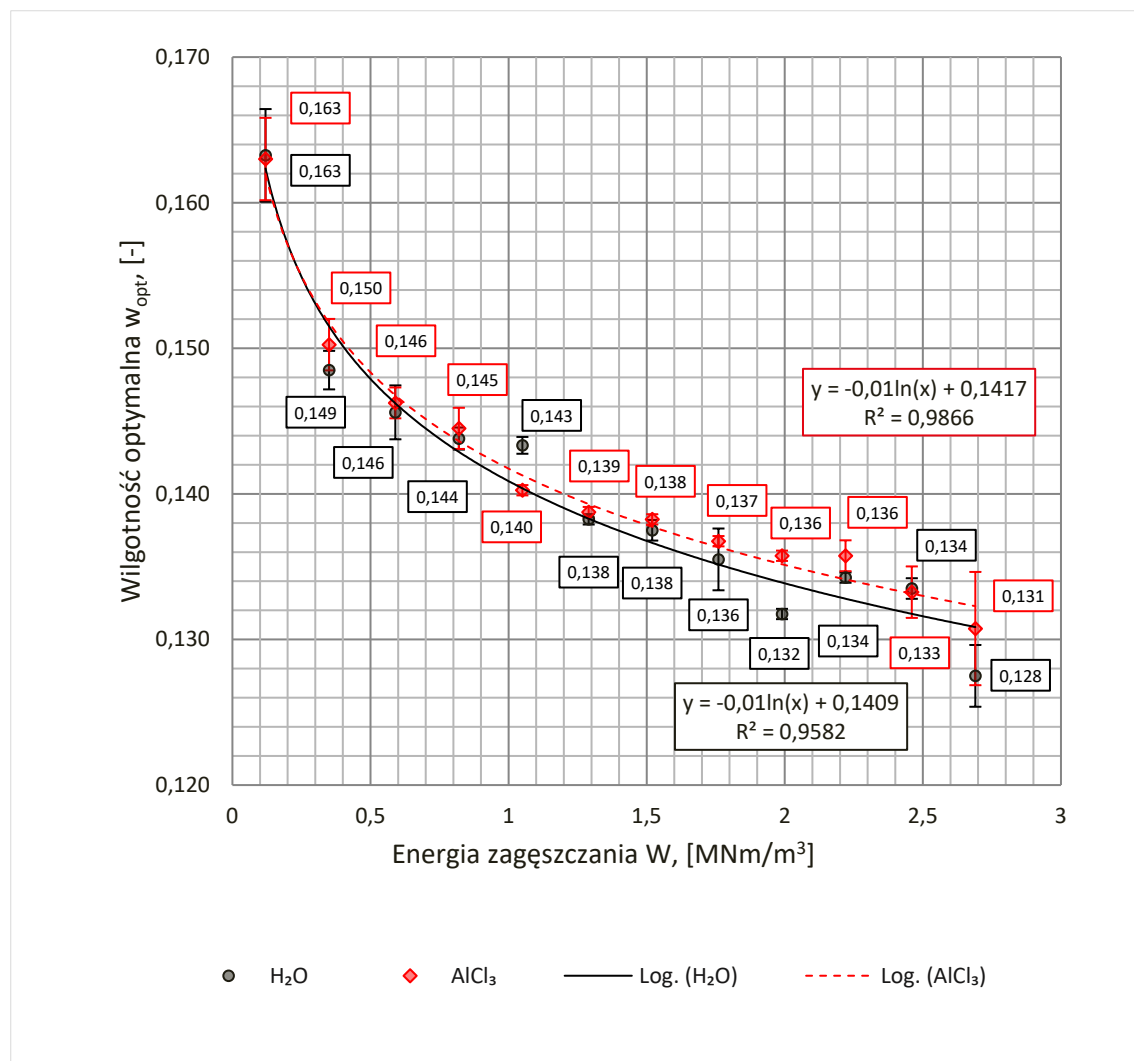
Nacisk kładziony jest na porównanie wyników w obydwu przypadkach, nawilżania wodą bez użycia dodatków i roztworem chlorku glinu w zależności od energii zagęszczania W . Wyniki to zarówno uśredniona gęstość Proctora ρ_{Pr} przy optymalnej zawartości wody w oraz odwrotność średniej zawartości wody w po osiągnięciu gęstości Proctora ρ_{Pr} . Pierwszą zależność ilustruje poniżej Wykres 6.9. Część wyników tu przedstawiona została wcześniej opublikowana w MEYER i wsp. (2018) [41] i MACHON (2015) [38].



Wykres 6.9 Porównanie gęstości Proctora ρ_{Pr} w zależności od energii zagęszczania W

Czarne punkty danych przedstawiają uśrednioną gęstość Proctora ρ_{Pr} jako funkcję energii zagęszczania W dla próbek nawilżanych wodą bez dodatków, a czerwone punkty odpowiadają gęstości Proctora ρ_{Pr} w funkcji energii zagęszczania W dla próbek z dodatkiem 0,3 [%] roztworu chlorku glinu. Na wykresie widać, że każda uśredniona gęstość Proctora ρ_{Pr} dla próbek z roztworem chlorku glinu jest większa w porównaniu do wyników uzyskanych przy użyciu wody przy takiej samej energii zagęszczania W . Obydwa wykresy można przedstawić z dużą dokładnością w postaci funkcji logarytmicznej, dla której zgodność z wynikami pomiarowymi jest najlepsza w porównaniu z innymi rodzajami funkcji, przy czym wykresy obu serii pomiarowych przebiegają prawie równoległe do siebie.

Wykres 6.10 przedstawia zawartości optymalne wody w_{opt} po osiągnięciu gęstości Proctora ρ_{Pr} w funkcji energii zagęszczania W .



Wykres 6.10 Porównanie wilgotności optymalnej w_{opt} w zależności od energii zagęszczania W

Analogicznie do wcześniej przedstawionych gęstości Proctora ρ_{Pr} , czarne punkty przedstawiają optymalną zawartość wody w_{opt} po osiągnięciu gęstości Proctora ρ_{Pr} , w zależności od energii zagęszczania W dla próbek z wodą destylowaną a czerwone przy zastosowaniu roztworu 0,3 [%] zamiast wody destylowanej. Przybliżając otrzymane wyniki funkcją logarytmiczną widać, że w obydwu przypadkach otrzymane wyniki są prawie identyczne w granicach błędu pomiarowego, przy czym różnice te zwiększają się nieznacznie ze wzrostem energii zagęszczania W .

6.5 Badania edometryczne materiału gruntowego

Badania edometryczne przeprowadzono, by stwierdzić, czy zaobserwowane wcześniej zjawisko optymalnej wilgotności, przy której uzyskuje się maksymalne zagęszczenie, można potwierdzić przez badania edometryczne, które są badaniami statycznymi.

Podczas przeprowadzania jednoosiowych badań ściskania próbki cylindrycznej, brane są pod uwagę przemieszczenia pod wpływem obciążenia w kierunku osi. Możliwe odkształcenia płaszcza są uniemożliwiane przez metalowy pierścień.

Relacja między zmianą naprężeń a deformacją gruntu jest nazywana badaniem własności mechanicznych gruntu. W kontekście badań zorientowanych na aplikację z testem kompresji, zachowanie przy zmiany kształtu jest określane za pomocą urządzenia zwanego edometrem. W tym przypadku okrągła próbka jest badana jednoosiowo pionowo, w kierunku poziomym zmiany kształtu są pomijane.

Zgodnie z (DIN 18135, 2012-04) [84] dopuszcza się dwa metodyczne typy pierścieni: układ pierścieniowy ze stałym pierścieniem (RF) lub pierścieniem pływającym (RS). W układzie z pierścieniem pływającym oba kamienie filtracyjne mogą przemieszczać się wewnątrz metalowego pierścienia. Badania zostały przeprowadzone za pomocą urządzeń badawczych z pierścieniem pływającym.

Zgodnie ze specyfikacjami (DIN 18135, 2012-04) [84] w przypadku zastosowania pierścienia pływającego stosunek średnicy próbki do jej wysokości nie może przekroczyć 2,5 [-]. Badania w urządzeniu sprężającym przeprowadza się na próbkach o d/h równym 6,32 [cm]/2,54 [cm].

6.5.1 Przygotowanie próbek do edometru

Do przeprowadzenia jednoosiowych badań ściskania wykorzystuje się grunt sklasyfikowany w rozdziale 6.1.1. Najpierw suszy się go w odpowiednim piecu suszarniczym w temperaturze 105 [°C] aby pozbyć się nieznanej wilgotności.

Całość testów na ściśliwość gruntu przeprowadza się następnie po dodaniu wody destylowanej lub odpowiedniego roztworu soli do uzyskania wilgotności 14,5 [%] próbki i jednocześnie zawartości 0,3 [%] soli w stosunku jej masy. Tymi dodanymi solami są chlorek sodu (NaCl), chlorek wapnia (CaCl₂), chlorek glinu (AlCl₃).

W badaniach edometrem sole NaCl i CaCl₂ nie występują w postaci uwodnionej. W badaniach z dodatkiem sześciowodnego chlorku glinu (AlCl₃ · 6 · H₂O) uwzględniono wodę związaną zgodnie z tabeli Tabela 6.10.

Tabela 6.10 Skład procentowy sześciowodnego chlorku glinu

Sześciowodny chlorek glinu		Część w [%]	
6 · H ₂ O		44,77	
AlCl ₃		55,23	
Masa atomowa w [u]:			
H	O	Al	Cl
1,00794	15,9994	26,981538	35,4527

W przypadku próbki cząstkowej z dodatkiem 0,3 [%] sześciowodnego chlorku glinu w przeliczeniu na masę próbki gruntu dodaje się do niego zgodnie z tabelą Tabela 6.11 dokładnie 142,57 [g] (uwzględniając wodę zawartą w cząsteczkach sześciowodnego chlorku glinu) wody destylowanej, a nie jak poprzednio 145 [g].

Tabela 6.11 Zawartość wody w próbce gruntu do badań z dodatkiem sześciowodnego chlorku glinu

Masa próbki gruntu w [g]	1000,00
Masa wody in [g]	145,00
Masa chlorku glinu bez wody w [g]	3,0
Docelowa zawartość wody w próbce w [%]	14,5
Obliczona masa sześciowodnego chlorku glinu w [g]	5,431948
Obliczona masa wody w [g]	2,431948
Potrzebna masa wody w [g]	142,57

Przeprowadzane są dwie serie badań, dla gęstości 1,65 [Mg/m³] i 1,75 [Mg/m³]. Próbki częściowe są wymieszane po dodaniu roztworu lub wody destylowanej. W celu uzyskania możliwie największej jednorodności próbek Rys. 6.5 badania edometrem

przeprowadzono po upływie godziny, by dodatek wody równomiernie rozmieścił się na wszystkich cząstkach gruntu.



Rys. 6.5 Przygotowanie próbek

Próbki gruntu umieszcza się w pierścieniu edometru Rys. 6.6.



Rys. 6.6 Próbkę gruntu w pierścieniu edometru

Pierścień z próbką gruntu umieszcza się między dwiema płytkami filtracyjnymi w edometrze i stopniowo obciąża osiowo.

6.5.2 Przebieg doświadczenia

Zgodnie z normą (DIN 18135, 2012-04) [84] obciążenie należy zwiększać lub zmniejszać stopniowo. Przy każdym wzroście obciążenia, obciążenie można co najwyżej podwoić lub zmniejszyć na maksymalnie $\frac{1}{4}$ aktualnego obciążenia. Testy są przeprowadzane poprzez stopniowe zwiększanie obciążenia, ale obciążenie nie jest zmniejszane. Na każdym poziomie obciążenia mierzone jest odkształcenie względne próbek $s' [-]$. W każdym przypadku należy odczekać, aż osiadanie się ustali. Każdy następny poziom obciążenia jest osiąganym za pomocą systemu dźwigni z nałożonymi obciążeniami. Przełożenie dźwigni w edometrze firmy CLOCKHOUSE ENGINEERING AND INSTRUMENT

COMPANY wynosi 1:11. Wartości obciążeń σ [kPa], które działają na próbkę do badań w metalowym pierścieniu o $d = 63,2$ [mm] i powierzchni $A = 0,00313707$ [m²], można znaleźć w poniższej tabeli.

Tabela 6.12 Obliczenie obciążenia próbek σ

Stopień obciążenia	1	2	3	4	5	6
Masa w [kg]	0,720	1,441	2,880	5,758	11,518	23,036
σ w [kN/m ²]	24,76	49,56	99,07	198,06	396,20	792,40

W pierwszym cyklu badań w edometrze obciążenie było zwiększane co 24 godziny. Monitorowanie ściskania badanej próbki pokazało zgodnie z oczekiwaniami, że 90 [%] do 95 [%] konsolidacji odpowiedniego poziomu obciążenia wystąpiło po pół godziny do godziny. W konsekwencji czas obciążania dla każdego poziomu został skrócony do jednej godziny.

Badania nie są przeprowadzane z pojemnikiem wypełnionym wodą, aby nie wypłukiwać dodatków z próbki. Aby jednak przeciwdziałać wysychaniu próbek i zapewnić warunki jak najbardziej zbliżone do naturalnych, pierścień jest odpowiednio zabezpieczony wilgotną gąbką Rys. 5.3.

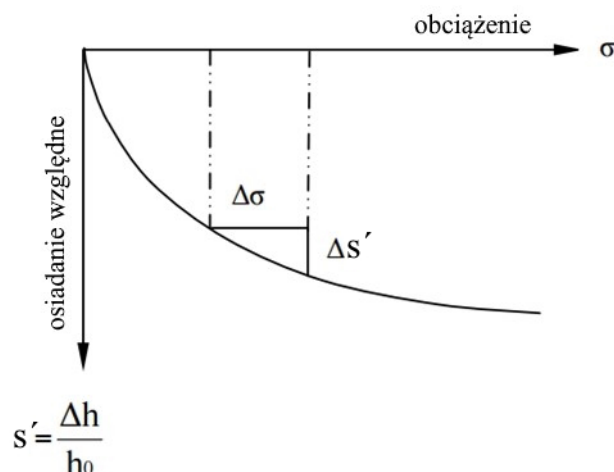


Rys. 6.7 Wilgotne gąbki (np. H₂O) jako środek zapobiegający wysychaniu badanej próbki

W ten sposób próbka jest utrzymywana w sposób ciągły, najlepiej jak to możliwe, i dodatkowo chroniona przed wysychaniem przez folię (nie pokazano dla zachowania przejrzystości). Gąbka jest nasączona odpowiednim roztworem o stężeniu użytym w próbce.

6.5.3 Wyniki badań edometrycznych

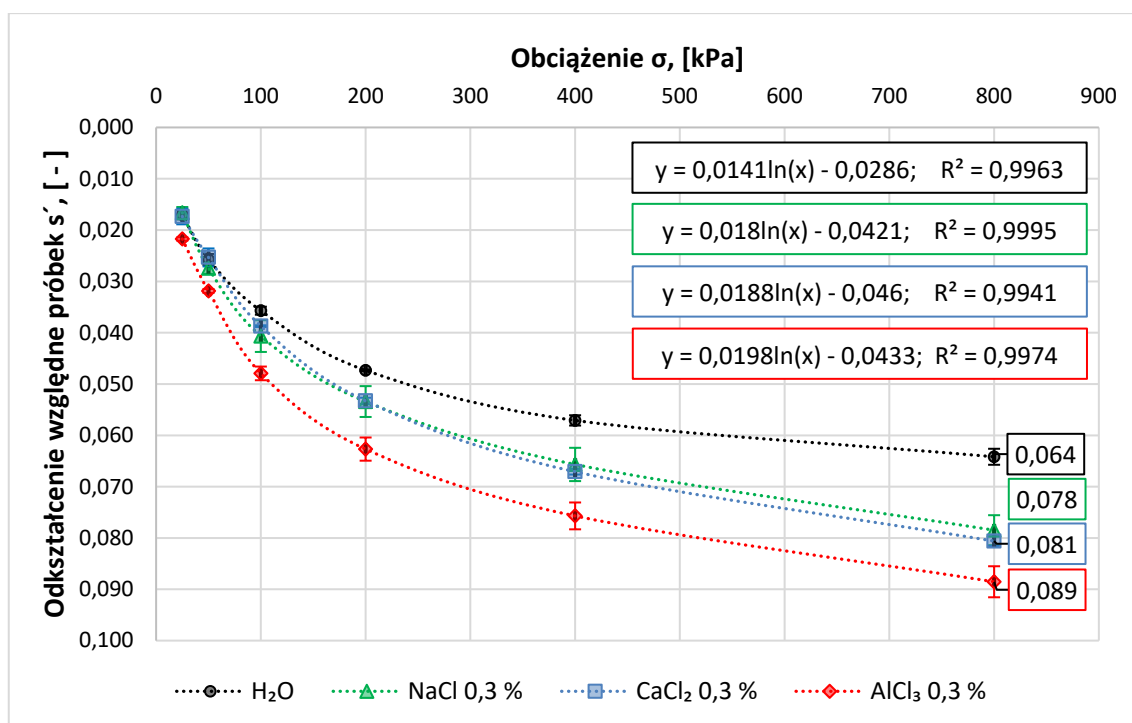
Ocena wpływu soli na moduł sztywności istniejącego gruntu oparta jest na badaniach obciążenie-osiadanie. W przypadku krzywej obciążenie-osiadanie, obciążenie przyłożone w badaniu jest przedstawiane na wykresie liniowo lub w skali logarytmicznej. Rys. 6.8 przedstawia wyznaczenie krzywej obciążenie-osiadanie i jest głównym celem badania edometrem i pokazuje osiową zmianę kształtu w funkcji naprężenia osiowego.



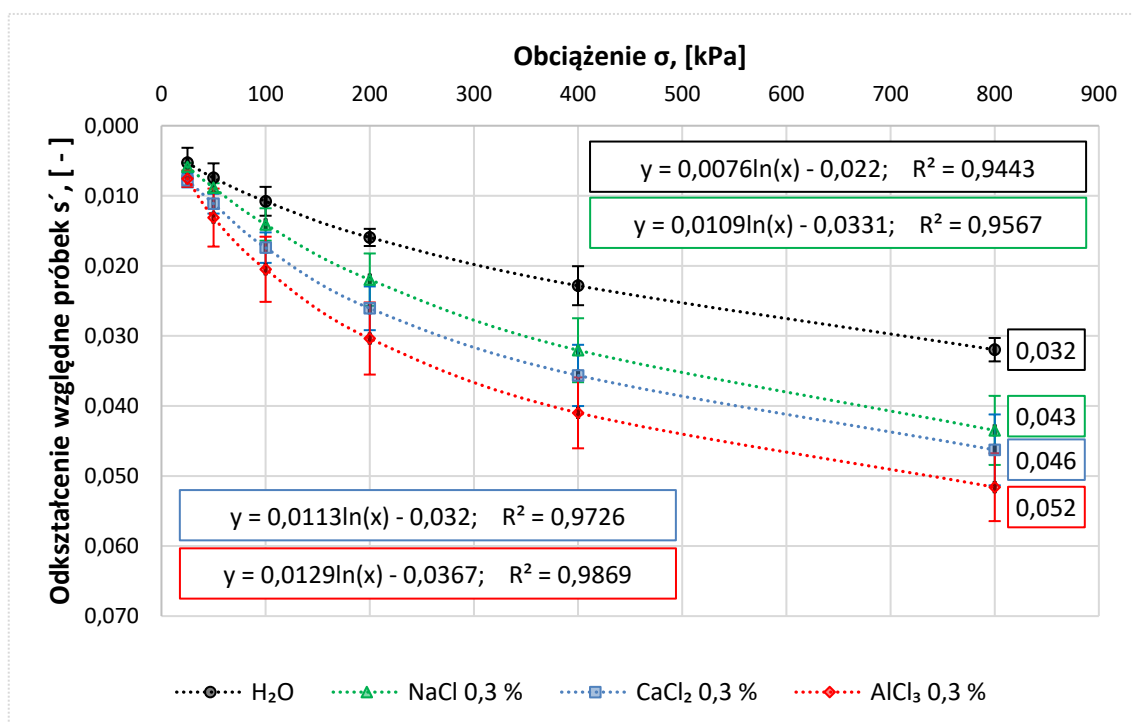
Rys. 6.8 Wykres obciążenie-osiadanie

Odształcenia próbki gruntu mierzy się przy stopniowo przyłożonych obciążeniach i na tej podstawie oblicza się ich edometryczny moduł ściśliwości. Próbkę gruntu nie może zostać odkształcona bocznie ze względu na zamocowany pierścień stalowy, w związku z tym edometryczny moduł ściśliwości (E_s) jest modułem odkształcenia w przypadku osłabienia rozszerzalności bocznej. Odpowiada to w przybliżeniu warunkom występującym w naturalnym podłożu, gdzie odkształcenia boczne pod wpływem obciążenia pionowego są również znacznie utrudnione. Edometryczny moduł ściśliwości jest zatem zależny od obciążeń.

W ramach badań urządzenie ściskające służy do określenia osiadania s na końcu każdego etapu obciążenia za pomocą odczytu z czujnika zegarowego, a następnie obliczane jest z tego odkształcenie względne próbek s' [-] w zależności od obciążenia σ [kPa]. Wyniki badań obciążenie-osiadanie dla gęstości próbek $1,65 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$ przedstawiono na wykresie Wykres 6.11, co zostało opublikowane wcześniej w [41], a Wykres 6.12 przedstawia wyniki przy gęstości $1,75 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$.



Wykres 6.11 Zestawienie odkształcenia względnego próbek o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m³] w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu $c = 0,3$ [%] oraz wodą



Wykres 6.12 Zestawienie odkształcenia względnego próbek o gęstości początkowej 1,75 [Mg/m³] w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu $c = 0,3$ [%] oraz wodą

Na obu wykresach osie X reprezentują obciążenie σ w [kPa], przy czym odkształcenie względne próbek s' [-] badane jest dla próbek o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m³] i 1,75 [Mg/m³]. Czarne punkty przedstawiają uśrednione wyniki odkształcenia s' [-] wraz z odchyleniem standardowym, natomiast oznaczenia w kolorze zielonym, niebieskim i czerwonym to wyniki dla próbek potraktowanych NaCl, CaCl₂ i AlCl₃. Najniższe odkształcenie względne próbki s' daje wynik 0,064 [-] lub 0,032 [-] dla próbek, które doprowadzono do wartości 14,5 [%] zawartości wody, wodą destylowaną.

W zależności od wartościowości kationów zawartych w zastosowanych solach, odkształcenie względne próbki s' zarówno w próbkach o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m³], jak i przy 1,75 [Mg/m³] wzrasta ze wzrostem wartościowości kationów. Największe odkształcenia względne próbek 0,089 [-] lub 0,052 [-] uzyskuje się dla AlCl₃ jako dodatku. Do dalszych obliczeń dopasowano do uzyskanych punktów pomiarowych krzywe, stosując metodę najmniejszych kwadratów. Najlepsze współczynniki determinacji i dopasowanie uzyskano do krzywych logarytmicznych w postaci $y = a \cdot \ln(x) + b$, które następnie użyto do obliczenia edometrycznego modułu ścisłości metodą stycznych według norm (DIN 18135, 2012-04) [84].

Przyjmując powyżej wyznaczoną zależność logarytmiczną odkształcenia względnego próbek od obciążenia, otrzymujemy wzór (12) określający zależność odwrotną.

$$s' = m_L \cdot \ln(\sigma) + b \Leftrightarrow \sigma = e^{\frac{s'-b}{m_L}} \quad (12)$$

s'	[-]	Odkształcenie względne próbek
σ	[kPa]	Obciążenie
m_L	[-]	Współczynnik przyjętej funkcji logarytmicznej
b	[-]	Wyraz wolny funkcji logarytmicznej

Stąd:

$$\frac{d\sigma}{ds'} = \frac{1}{m_L} \cdot e^{\frac{s'-b}{m_L}} \quad (13)$$

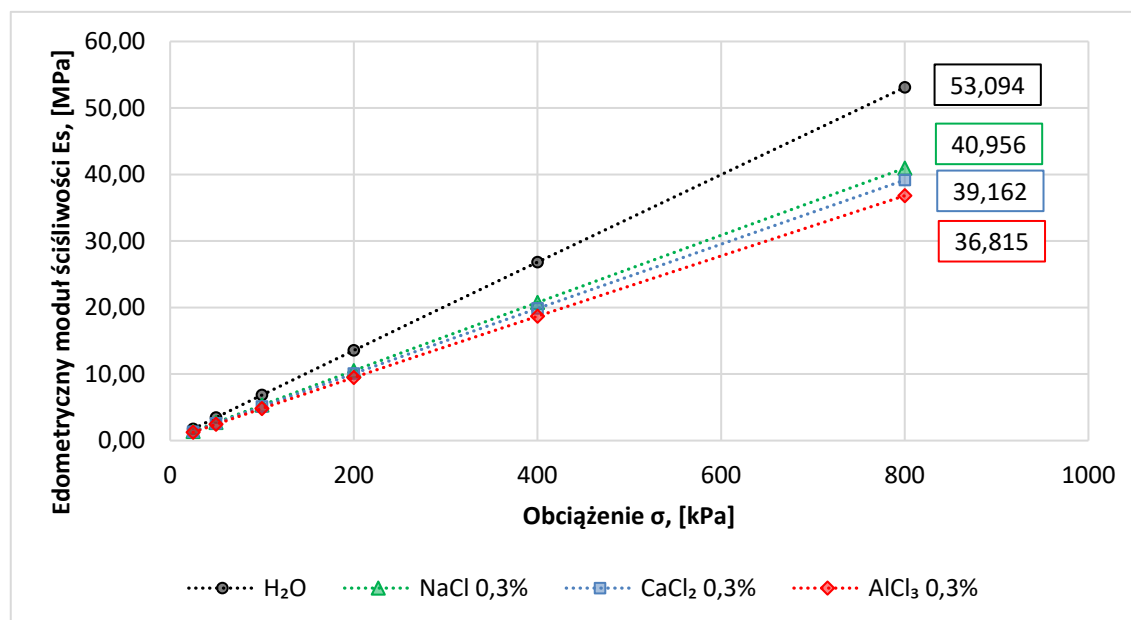
s'	[-]	Odkształcenie względne próbek
σ	[kPa]	Obciążenie
m_L	[-]	Współczynnik przyjętej funkcji logarytmicznej
b	[-]	Wyraz wolny funkcji logarytmicznej

Zgodnie z normą (PN-EN ISO 17892-5, 2017-06) [104] oraz (DIN EN ISO 17892-5:2017-08) [97], obliczony jest edometryczny moduł ściśliwości E_s przy użyciu wskaźnika porowatości gruntu e , który może być obliczony z odkształcenia Δs . Ponieważ powyższa metoda nie została jeszcze przyjęta na poziomie krajowym w Niemczech, zastosowano alternatywną metodę obliczania modułu ściśliwości E_s przy użyciu odkształcenia względnego s' według (DIN 18135, 2012-04) [84], gdzie edometryczny moduł ściśliwości E_s wyznaczamy jako:

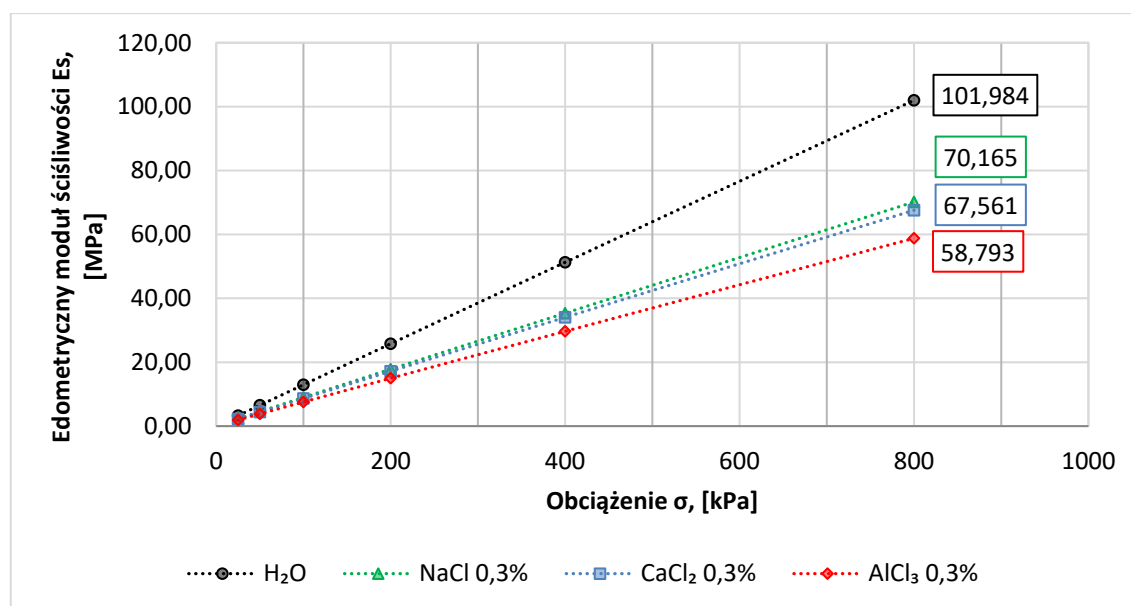
$$E_s = \frac{1}{m_L} \cdot e^{\frac{s'-b}{m_L}} \cdot (1 - s') \quad (14)$$

E_s	[kPa]	Edometryczny moduł ściśliwości
s'	[-]	Odkształcenie względne próbek
σ	[kPa]	Obciążenie
m_L	[-]	Współczynnik przyjętej funkcji logarytmicznej
b	[-]	Wyraz wolny funkcji logarytmicznej

Uzyskane wyniki edometrycznego modułu ściśliwości E_s w [MPa] dla gęstości początkowej 1,65 [Mg/m³] przedstawia Wykres 6.13, przy czym dla gęstości początkowej 1,75 [Mg/m³] Wykres 6.14.



Wykres 6.13 Zestawienie edometrycznych modułów ściśliwości pierwotnej w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu $c = 0,3$ [%] oraz wodą o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m³]



Wykres 6.14 Zestawienie edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu $c = 0,3$ [%] oraz wodą o gęstości początkowej $1,75$ [Mg/m^3]

Wszystkie przedstawione na wykresach Wykres 6.13 i Wykres 6.14 zależności $E_s(\sigma)$ ma w przybliżeniu charakter liniowy.

Oś X reprezentują obciążenie σ w [kPa]. Na obu wykresach, z wyliczonym edometrycznym modułem ścisłości E_s w [MPa] próbek o gęstości początkowej $1,65$ [Mg/m^3] i $1,75$ [Mg/m^3]. Czarne punkty reprezentują obliczone wyniki edometrycznego modułu ścisłości E_s w [MPa] dla próbek nawilżonych wodą destylowaną, zielone, niebieskie i czerwone oznaczenia to wyniki dla próbek poddanych działaniu NaCl, CaCl₂ i AlCl₃. Najwyższy edometryczny moduł ścisłości E_s w [MPa] daje wyniki o wartości $53,094$ [MPa] lub $101,984$ [MPa] dla próbek z wodą destylowaną.

W zależności od wartościowości kationów w zastosowanych solach edometryczny moduł ścisłości zmniejsza się zarówno dla próbek o gęstości początkowej $1,65$ [Mg/m^3], jak i $1,75$ [Mg/m^3]. Najniższy edometryczny moduł ścisłości osiąga się przy wartościach odpowiednio $36,815$ [MPa] lub $58,793$ [MPa] z dodatkiem AlCl₃.

6.6 Banania wytrzymałości na ścinanie materiału gruntowego

Badania te podjęto w celu wykazania, że wytrzymałość na ścinanie również zależy od roztworu wprowadzonego do badanego gruntu.

Wytrzymałość na ścinanie opisuje maksymalne naprężenie ścinające, jakie materiał może przyjąć, zanim dojdzie do jego zniszczenia. Aby określić wytrzymałość na ścinanie, do próbki w laboratorium przykłada się sztuczne naprężenia ścinające, aż do jej deformowania. Na opór próbki gruntu na powierzchni ślizgającej się lub łamiącej składa się siła tarcia i kohezja.

W celu zbadania wartości granicznych można przeprowadzić różne testy ścinania. W laboratorium istnieje możliwość badania próbek gruntu w teście bezpośredniego ścinania wg (DIN 18137-3, 2002-09) [86] oraz w teście trójosiowym wg (DIN 18137-2, 2011-04) [85]. W naturze można przeprowadzić próby ścinania za pomocą sondy skrzydełkowej zgodnie z normą (DIN EN ISO 22476-9, 2021-01) [98].

W ramach tej pracy (badanie odporności na ścinanie wypłukanego piasku z dna zatoki – po zmianie składu wody porowej poprzez dodanie kationów metali o różnych wartościowościach) należy przeprowadzić badania ścinania zgodnie z normą (DIN 18137-3, 2002-09) [86].

Zastosowane urządzenia pochodzą z firmy WILLE GEOTECHNIK i należą do serii ADVANCED SOIL ANALIZER (ASA SYSTEM) DIRECT-RESIDUAL SHEAR TEST.

6.6.1 Przygotowanie próbek

Przygotowanie próbek gruntu różni się, jak pokazano to na Rys. 6.9 w zależności od dodanych chemikaliów. Najpierw wszystkie próbki są suszone do stałej masy w piecu w temperaturze 105 [°C]. Następnie do wysuszonych próbek gruntu dodaje się wodę destylowaną, aby uzyskać zawartość wody 14,5 [%]. Należy jednak zauważyć, że w przypadku chlorku wapnia (CaCl_2) i chlorku glinu (AlCl_3) trzeba użyć mniej wody, ponieważ oba chlorki są w postaci hydratów. Przy gęstości Proctora za optymalną zawartość wody dla wybranego gruntu uważa się 14,5 [%]. Wynika to z badań Proctora.

W przypadku próbek bez dodatków dodawana jest woda destylowana w ilości 14,5 [%].

W przypadku próbek zawierających chlorek sodu (NaCl) stosuje się taką samą ilość wody destylowanej jak w badaniu bez dodatków.

W przypadku próbek zawierających chlorek wapnia (CaCl_2) i chlorek glinu (AlCl_3) należy uwzględnić wodę związaną z hydratacją, zgodnie z dodanymi stężeniami. Ilość koniecznej do dodania wody i chlorku można określić na podstawie masy cząsteczkowej. Tabela 6.13 przedstawia poszczególne wartości procentowe. Obliczenie stężenia opiera się na stosunku mas molowych chlorków do ich postaci uwodnionej.

Tabela 6.13 Skład procentowy hydratów, udział chlorków i wody w hydracie

$\text{CaCl}_2 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	CaCl_2	75,49234 [%]
	$2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	24,50766 [%]
$\text{AlCl}_3 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	AlCl_3	55,22972 [%]
	$2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	44,77028 [%]

Chlorki i destylowaną wodę miesza się tak długo, aż kryształy się rozpuszczą. Ten jednorodny roztwór jest dodawany do próbki gruntu. Aby zapewnić równomierne rozprowadzenie wody i soli, próbkę gruntu miesza się przez 5 [min]. Mieszaninę przykrywa się i odstawia na 45 [min].



Rys. 6.9 Przygotowanie próbek do badań wytrzymałości na ścinanie

Próbka jest następnie umieszczana w aparacie bezpośredniego ścinania zgodnie z normą (DIN 18137-3, 2002-09) [86]. Zgodnie z normami przygotowana próbka do badania musi być jednorodna. Ponadto po fazie konsolidacji próbki do badań muszą być spełnione warunki gęstości i zawartości wody.

Pojemnik aparatu bezpośredniego ścinania Rys. 6.10 ma długość wewnętrzną 6 [cm] · 6 [cm] i wysokość 3,1 [cm]. Próbkę umieszcza się na wysokości 2 [cm] w celu uniknięcia negatywnego wpływu zbyt wysokiej próbki, która odkształca się bez wyraźnej krawędzi zrywającej.



Rys. 6.10 pojemnik aparatu bezpośredniego ścinania z próbką

Próbka, przygotowana do ścinania, musi mieć gęstość $1,9 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$. W przypadku bezpośredniego montażu w komorze ścinania pojemnik na ścinanie jest najpierw ważony, a następnie napełniany obliczoną ilością próbki gruntu. Masę zagęszcza się ręcznie za pomocą stempla. W celu zapewnienia stałej wysokości próbki 2 [cm] powierzchnię wygładza się za pomocą suwaka. Po ponownym zważeniu pojemnik aparatu bezpośredniego ścinania jest umieszczany w urządzeniu tnącym.

6.6.2 Przebieg doświadczenia

Aby określić kąt tarcia w gruntach niespoistych, konieczne są co najmniej trzy indywidualne pomiary z różnymi nieprężeniami normalnymi σ . Do serii pomiarów wybrano naprężenia normalne 50 [kPa] , 100 [kPa] i 150 [kPa] . Wynikają one z głębokości gruntu ok. $0,50 \text{ [m]}$, $1,00 \text{ [m]}$ i $1,50 \text{ [m]}$, co w zasadzie odpowiada uginającym się głębokościom podbudów drogowych.

Próbkę ścinania przeprowadza się za pomocą urządzenia do bezpośredniego ścinania firmy WILLE GEOTECHNIK GMBH przedstawiono na Rys. 6.11.



Rys. 6.11 Aparaty bezpośredniego ścinania (od lewej do prawej; bez pojemnika; z pojemnikiem; w czasie trwającej próby ścinania)

Aby uniknąć znanych problemów, konstrukcja urządzeń typu WILLE SCHERGE różni się od konstrukcji starszych modeli. Naprężenie normalne jest przykładane do opadającego stempla poprzez wał. Uwzględniono również problemy z prowadzeniem, utrzymując pojemnik na ścinanie w górnej części konstrukcji. Ponadto wszystkie zmierzone wartości są przesyłane i kontrolowane do podłączonego komputera za pomocą oprogramowania WILLE GEOTECHNIK. Wszystkie parametry testu są wprowadzane i odczytywane poprzez ten interfejs.

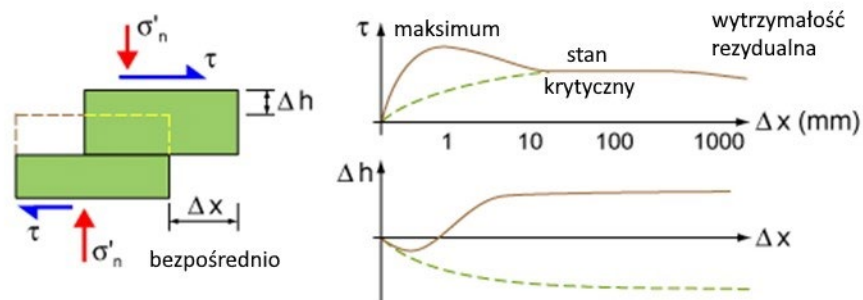
Zgodnie z rozdziałem 6.6.1 próbki są przygotowywane w pojemniku aparatu bezpośredniego ścinania, a następnie instalowane w aparacie. W następnym kroku próbka jest ładowana i konsolidowana.

Naprężenie normalne σ zależy od przyłożonego obciążenia. Grunty niespoiste są obciążane do momentu, gdy nie można odczytać dalszego osiadania, ale minęło co najmniej 30 [min]. Dla testu ustalono czas konsolidacji wynoszący 30 [min], ponieważ po kilku minutach ekspozycji nie można zmierzyć żadnego znaczącego osiadania. Następnie rozpoczyna się proces ścinania. Długość procesu zależy od długości boku pojemnika na ścinanie. Droga ścinania musi wynosić co najmniej 10 [mm], ale maksymalnie 15 [%] długości lub średnicy próbki może zostać odcięte. Przyjmowana jest większa z obydwu wartości. Powyższe wartości przedstawia Tabela 6.14.

Tabela 6.14 Obliczenie drogi ścinania

Badana próbka: 6 [cm]		
	Min. 10 [mm]	10 [mm]
	Max. 15 [%] z 6 [cm] = 9 [mm]	

W przypadku testów prędkość posuwu musi być zawarta w zakresie między 0,005 [mm/min] do 1 [mm/min]. Dla gruntów niespoistych maksymalna wartość wynosi 0,5 [mm/min]. Wybrana prędkość dla serii testów wynosi 0,1 [mm/min]. Podczas testu grunt jest utrzymywany powyżej normalnego naprężenia σ . Próbka stawia opór napędowi. Jest to rejestrowane przez wewnętrzne jednostki pomiarowe aparatu bezpośredniego ścinania. Rys. 6.12 przedstawia schematycznie ten proces.



Rys. 6.12 Siły działające na próbkę podczas ścinania (po lewej), krzywa ścinania przy małej i dużej gęstości w powiązaniu z osiadaniem próbki (po prawej)

Prawa część przedstawia krzywą ścinania τ w zależności od osiadania Δh . Brązowa krzywa przedstawia próbki zagęszczone, a zielona próbki luźne.

Pomiar jest kontynuowany do momentu wyraźnego przekroczenia stanu największej odporności na ścinanie. Następnie próbkę wyjmuje się i waży, a później suszy do stałej masy i ponownie waży.

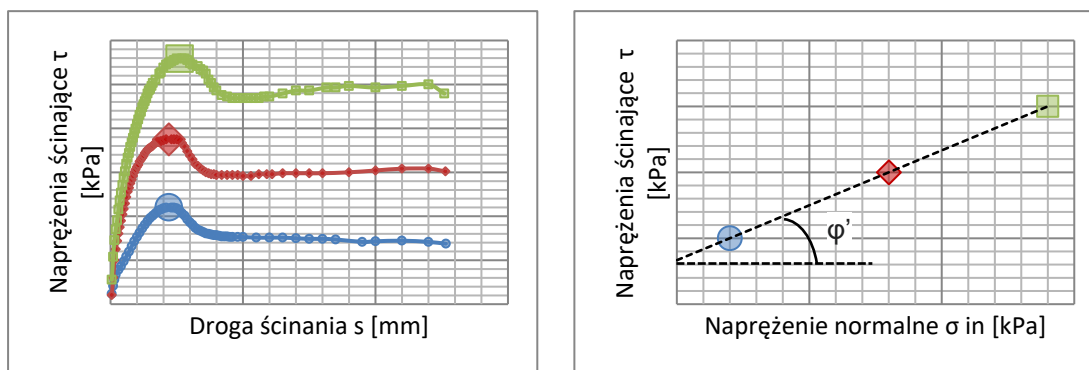
Na Rys. 6.13 pokazana jest próbka gruntu w stanie zabudowanym i ścinanym.



Rys. 6.13 Próbkę wyjęte z aparatu bezpośredniego ścinania po pomiarze

6.6.3 Wyniki

Aparaty bezpośredniego ścinania zapisują wyniki w pliku. Wyodrębnione zestawy danych są ładowane do aplikacji EXCEL, oceniane i wizualizowane. Wykresy na Rys. 6.14 składają się ze zmierzonych wartości drogi ścinania s w [mm] i naprężenia ścinającego τ w [kPa].



Rys. 6.14 Naprężenia (z lewej), kąta tarcia (z prawej)

Trzy punkty dla kąta tarcia składają się z maksymalnych wartości odpowiednich krzywych naprężenia ścinającego. W programie EXCEL funkcja regresji liniowej jest umieszczana między trzema punktami. Kąt tarcia φ' [rad] oblicza się na podstawie wartości gradientu według wzoru (15).

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan \varphi' \Leftrightarrow \varphi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tau - c'}{\sigma} \right) \quad (15)$$

τ	[N/cm ²]	Wytrzymałość na ścinanie
c'	[N/cm ²]	Efektywna spistość gruntu
σ	[N/cm ²]	Obciążenie, naprężenie pionowe
φ'	[rad]	Efektywny kąt tarcia wewnętrzznego

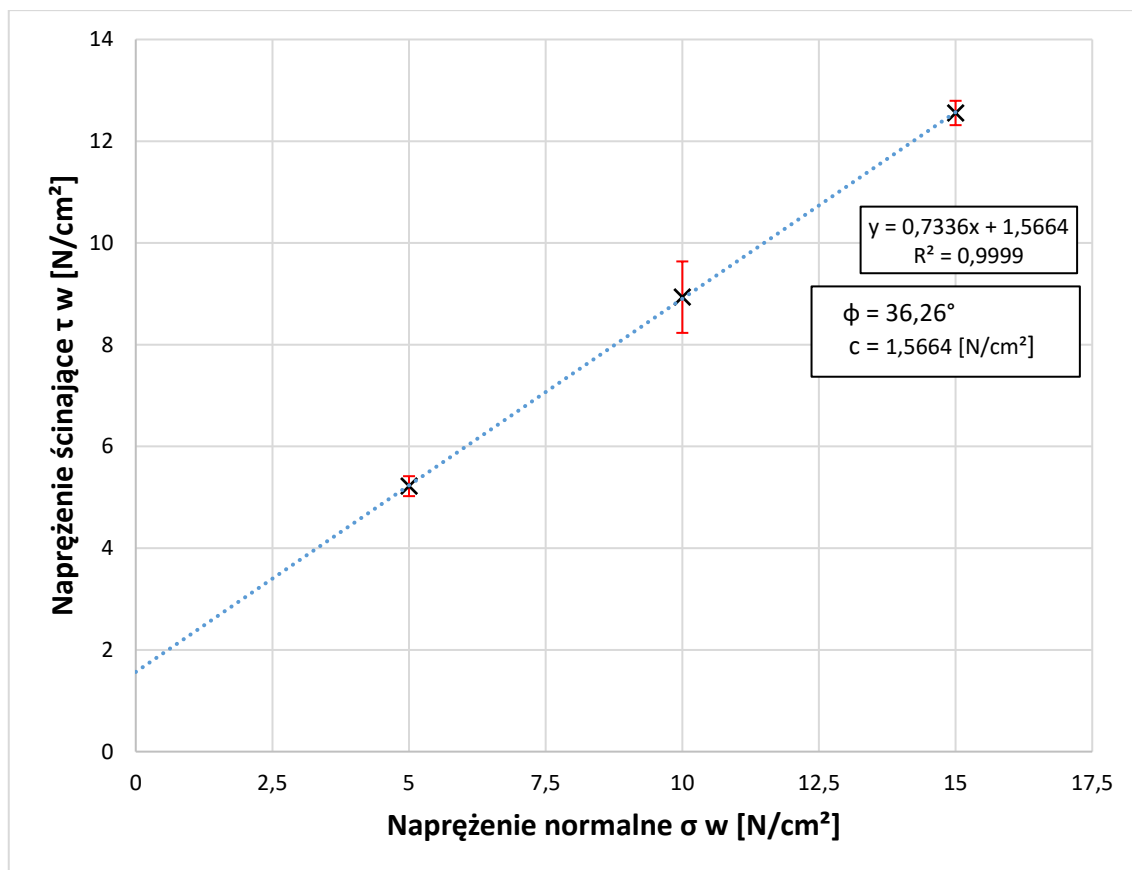
Wzór (16) służy do określenia kąta tarcia φ' [°]. Odcinek osi rzędnych funkcji regresji liniowej wskazuje zmierzoną wartość spójności próbki gruntu.

$$\varphi = \varphi' \cdot \frac{180}{\pi} \quad (16)$$

φ	[°]	Efektywny kąt tarcia wewnętrzznego
φ'	[rad]	Efektywny kąt tarcia wewnętrzznego

6.6.3.1 Wyniki badań próbek nasączonych wodą destylowaną

Na wykresie Wykres 6.15 osi X przypisane jest naprężenie normalne σ , oś Y przedstawia maksymalne naprężenie ścinające τ w stanie zerwania badanych próbek gruntu. Kąt tarcia φ' określa się za pomocą funkcji regresji liniowej wyznaczonej przez wartości punktów maksimum odpowiednich wykresów zależności naprężenia ścinającego od drogi ścinania s . Kąt tarcia φ' wynika z nachylenia funkcji regresji.

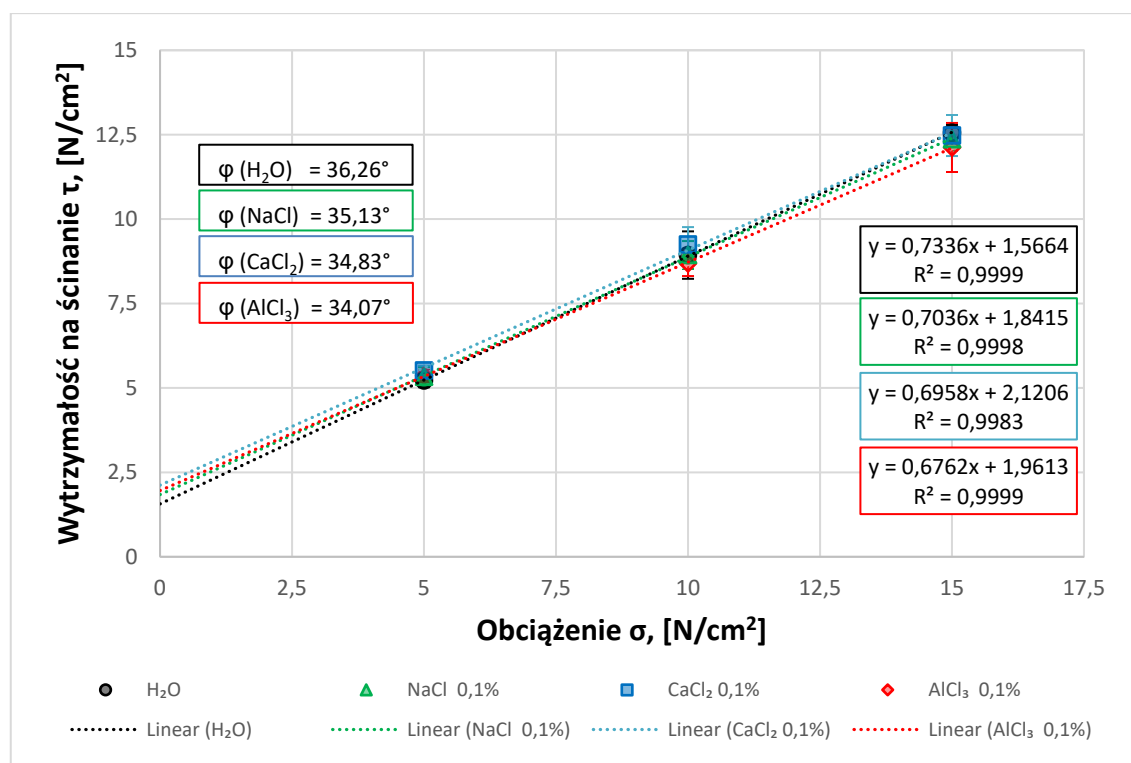


Wykres 6.15 Zależność naprężenia ścinającego od normalnego dla próbek bez dodatków chlorków

Dla badań z „bez dodatków” ustalono kąt tarcia ϕ' równy 36,26 [°]. Przecięcie linii prostej z osią Y odpowiada składnikowi spójności c' w gruncie. W badanej próbce gruntu stwierdzono spójność pozorną c' 1,57 [N/cm²]. Należy zauważyć, że próbka nie została zalana, dlatego składnik spójności c' zawiera wartość spójności pozornej. Odchylenie standardowe dla normalnego naprężenia 50 [kPa] wynosi 0,196 [-], dla 100 [kPa] 0,702 [-], a dla 150 [kPa] 0,239 [-].

6.6.3.2 Wyniki badań próbek nasączonych 0,1 [%] roztworami chlorków

Wykres 6.16 przedstawia średnią wartość maksymalnych naprężeń ścinających dla normalnych naprężeń 50 [kPa], 100 [kPa] i 150 [kPa] serii testowej przy 0,1 [%] stężeniu roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ z porównaniem z serią badań wykonanych z wodą destylowaną, którą przedstawiono w rozdziale 6.1.2.1.



Wykres 6.16 Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej $\rho_d = 1,65$ [Mg/m³] od obciążenia σ w [N/cm²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,1 [%] oraz wody

Wraz ze wzrostem ilości dodatków kąt tarcia próbek gruntu maleje. Wynikowe wartości liczbowe podsumowano w tabeli Tabela 6.15.

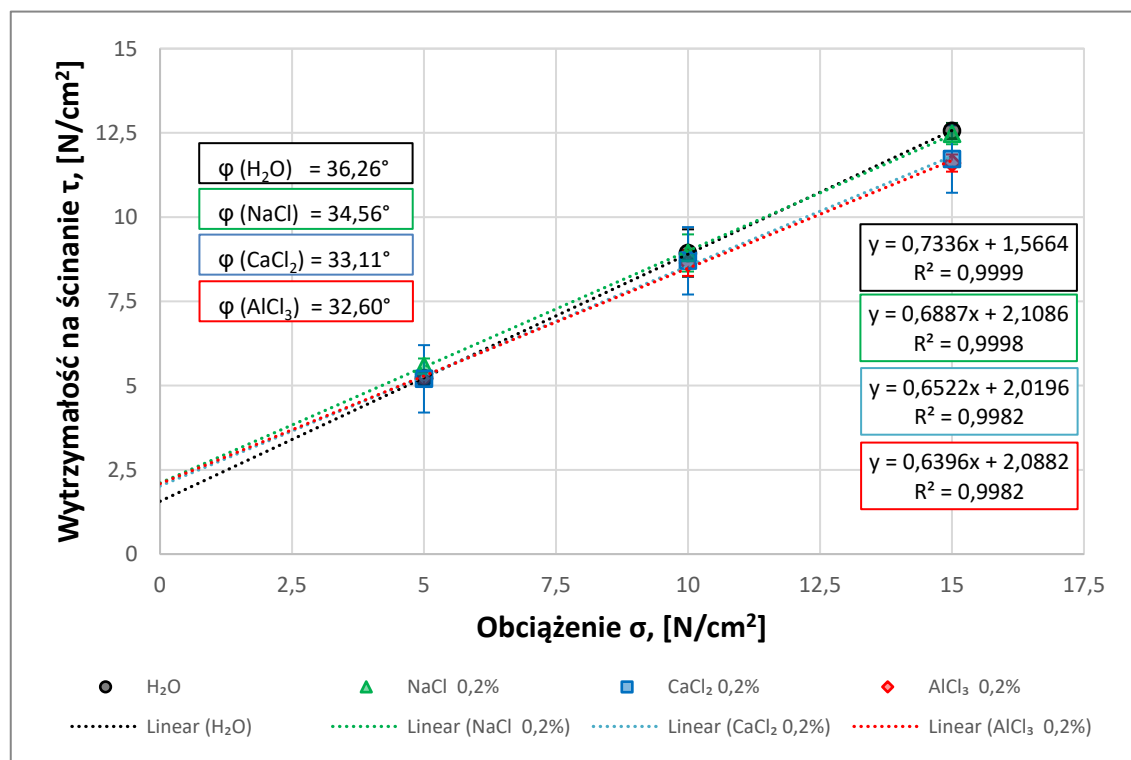
Tabela 6.15 Zestawienie wyników testu $\rho_d = 1,65$ [Mg/m³] od obciążenia σ w [N/cm²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,1 [%]

	$\tau(\sigma = 5$ [N/cm ²])	$\tau(\sigma = 10$ [N/cm ²])	$\tau(\sigma = 15$ [N/cm ²])	φ	c'
H ₂ O	5,22 [N/cm ²]	8,93 [N/cm ²]	12,56 [N/cm ²]	36,26 [°]	1,57 [N/cm ²]
NaCl	5,33 [N/cm ²]	8,94 [N/cm ²]	12,37 [N/cm ²]	35,13 [°]	1,84 [N/cm ²]
CaCl ₂	5,52 [N/cm ²]	9,25 [N/cm ²]	12,48 [N/cm ²]	34,83 [°]	2,12 [N/cm ²]
AlCl ₃	5,36 [N/cm ²]	8,69 [N/cm ²]	12,12 [N/cm ²]	34,07 [°]	1,96 [N/cm ²]

6.6.3.3 Wyniki badań próbek nasączonych 0,2 [%] roztworami chlorków

Wykres 6.17 przedstawia średnią wartość maksymalnych naprężeń ścinających dla normalnych naprężeń 50 [kPa], 100 [kPa] i 150 [kPa] serii testowej przy 0,2 [%] stężeniu

roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ z porównaniem z serią badań wykonanych z wodą destylowaną, którą przedstawiono w rozdziale 6.1.2.1.



Wykres 6.17 Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej $\rho_d = 1,65$ [Mg/m³] od obciążenia σ w [N/cm²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,2 [%] oraz wody

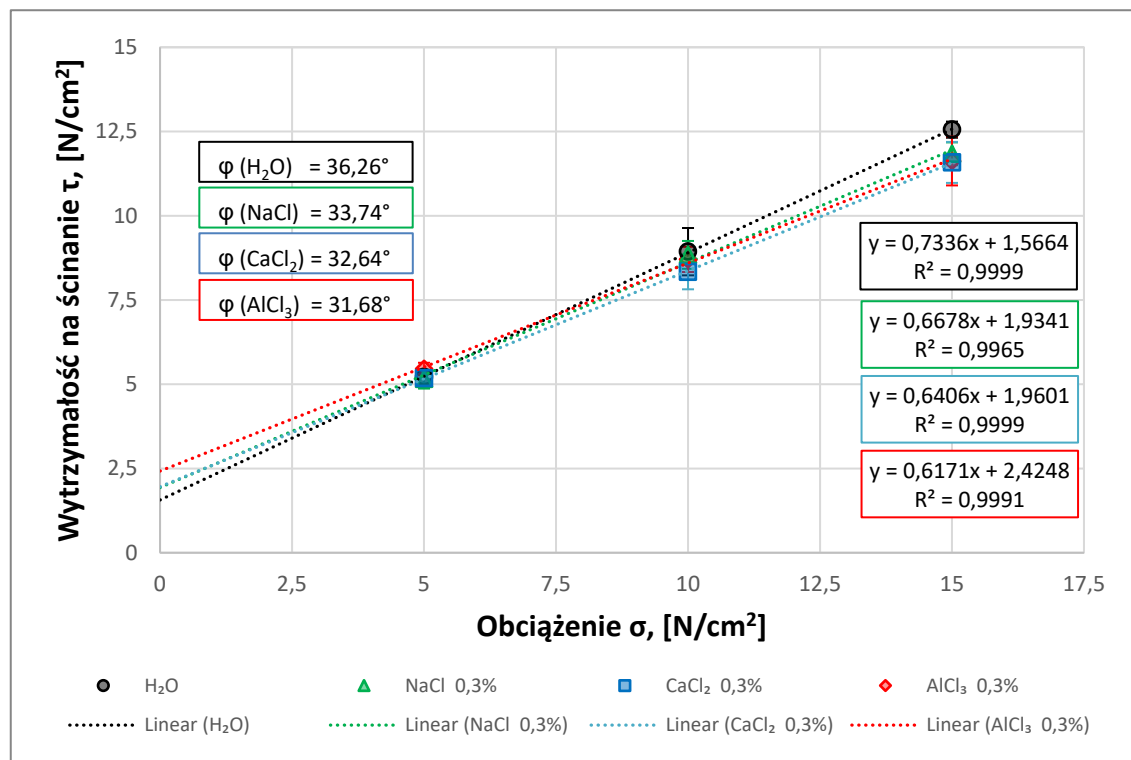
Wraz ze wzrostem ilości dodatków kąt tarcia próbek gruntu maleje. To zachowanie jest bardziej intensywne niż w serii testów o stężeniu 0,1 [%]. Zestawienie wartości liczbowych przedstawia Tabela 6.16

Tabela 6.16 Zestawienie wyników testu $\rho_d = 1,65$ [Mg/m³] od obciążenia σ w [N/cm²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,2 [%]

	$\tau(\sigma = 5$ [N/cm ²])	$\tau(\sigma = 10$ [N/cm ²])	$\tau(\sigma = 15$ [N/cm ²])	φ	c'
H ₂ O	5,22 [N/cm ²]	8,93 [N/cm ²]	12,56 [N/cm ²]	36,26 [°]	1,57 [N/cm ²]
NaCl	5,58 [N/cm ²]	8,94 [N/cm ²]	12,47 [N/cm ²]	34,56 [°]	2,11 [N/cm ²]
CaCl ₂	5,20 [N/cm ²]	8,70 [N/cm ²]	11,72 [N/cm ²]	33,11 [°]	2,02 [N/cm ²]
AlCl ₃	5,21 [N/cm ²]	8,64 [N/cm ²]	11,60 [N/cm ²]	32,60 [°]	2,09 [N/cm ²]

6.6.3.4 Wyniki badań próbek nasączonych 0,3 [%] roztworami chlorków

Wykres 6.18 przedstawia średnią wartość maksymalnych naprężeń ścinających dla naprężeń normalnych 5 [N/cm²], 10 [N/cm²] i 15 [N/cm²] serii testowej przy 0,3 [%] stężeniu NaCl, Roztwory CaCl₂ i AlCl₃ z serii eksperymentów przeprowadzonych z wodą destylowaną, które opublikowano wcześniej w [41] przedstawiono w rozdziale 6.1.2.1



Wykres 6.18 Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej $\rho_d = 1,65$ [Mg/m³] od obciążenia σ w [N/cm²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,3 [%] oraz wody

Wraz ze wzrostem ilości dodatków kąt tarcia próbek gruntu maleje. To zachowanie jest bardziej intensywne niż w serii testów ze stężeniami 0,1 [%] i 0,2 [%]. Tabela 6.17 podsumowuje wartości liczbowe.

Tabela 6.17 Zestawienie wyników testu $\rho_d = 1,65 \text{ [Mg/m}^3\text{]}$ od obciążenia σ w [kPa] dla próbek roztworów o stężeniu 0,3 [%]

	$\tau(\sigma = 5 \text{ [N/cm}^2\text{)})$	$\tau(\sigma = 10 \text{ [N/cm}^2\text{)})$	$\tau(\sigma = 15 \text{ [N/cm}^2\text{)})$	φ	c'
H ₂ O	5,16 [N/cm ²]	8,84 [N/cm ²]	11,84 [N/cm ²]	36,26 [°]	1,57 [N/cm ²]
NaCl	5,18 [N/cm ²]	8,34 [N/cm ²]	11,58 [N/cm ²]	33,74 [°]	1,93 [N/cm ²]
CaCl ₂	5,18 [N/cm ²]	8,34 [N/cm ²]	11,58 [N/cm ²]	32,64 [°]	1,96 [N/cm ²]
AlCl ₃	5,46 [N/cm ²]	8,71 [N/cm ²]	11,63 [N/cm ²]	31,68 [°]	2,42 [N/cm ²]

6.6.4 Dyskusja wyników

W rozdziale 6.6.3 przedstawiono poszczególne kąty tarcia w zależności od stężenia użytych roztworów. W tabeli Tabela 6.18 dla przejrzystości zestawiono wielkość zmian wyników uzyskanych dla próbek z roztworami chlorków w porównaniu do próbek bez dodatków.

Tabela 6.18 Spadek kąta tarcia spowodowany dodatkiem chlorków

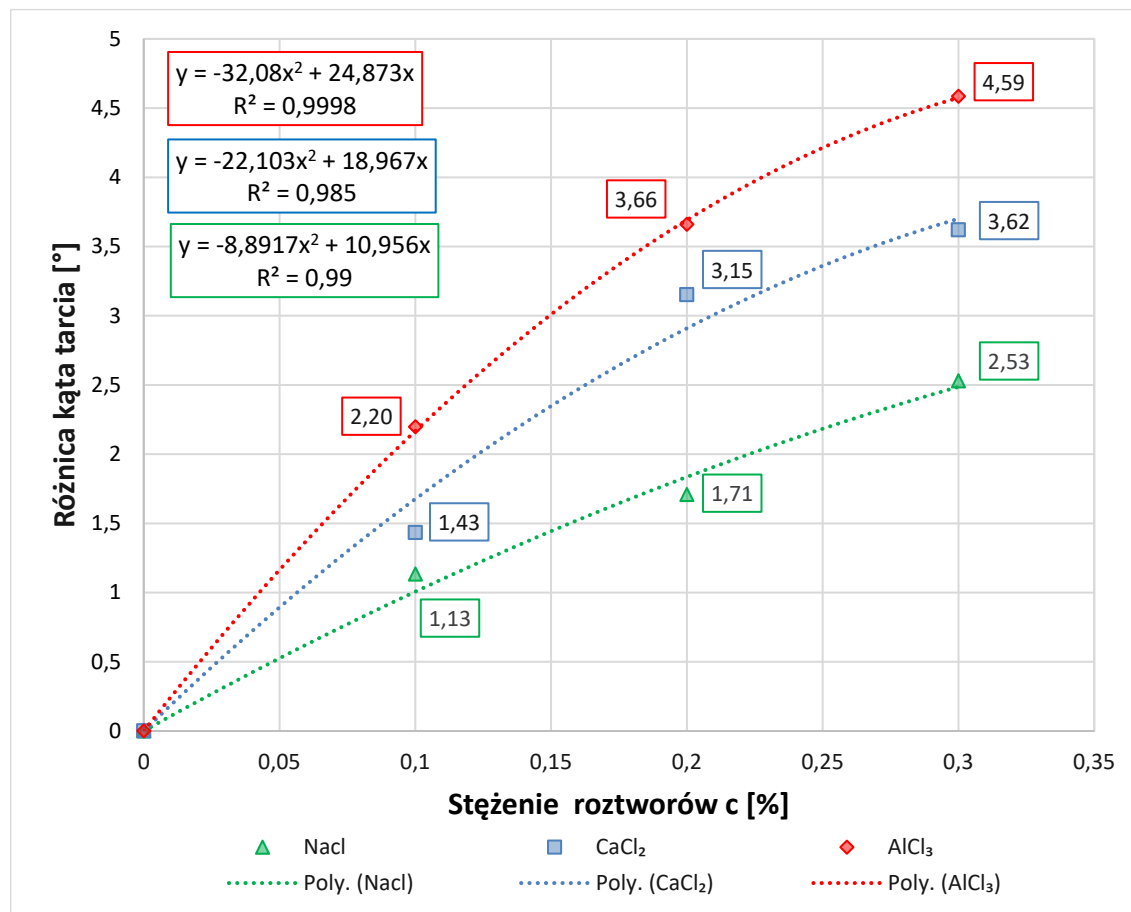
	NaCl			CaCl ₂			AlCl ₃		
c [%]	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3
φ' [°]	35,13°	34,56°	33,74°	34,83°	33,11°	32,64°	34,07°	32,60°	31,68°
$\Delta\varphi'$ [°]	1,13°	1,71°	2,53°	1,43°	3,15°	3,62°	2,20°	3,66°	4,59°
$\Delta\varphi'$ [%]	3,13	4,71	6,97	3,95	8,69	9,98	6,06	10,09	12,64

Oznaczony przez „c” pierwszy wiersz tabeli Tabela 6.18 zawiera wartość stężenia procentowego roztworów chlorków użytych do nawilżenia próbek gruntu. W drugim wierszu przedstawione są obliczone na podstawie pomiarów kąty tarcia. Zmiany kątów tarcia w porównaniu do próbek bez dodatków przedstawiają wiersze 4 i 5.

Wyniki podsumowane w tabeli Tabela 6.18 odnoszą się do wyników serii testów czystych próbek z wodą destylowaną. Kąt tarcia próbek z wodą wynoszący 36,26 [°] odpowiada więc wartości 100 [%]. W zależności od wartości dodatków i ich stężenia następuje stały spadek kąta tarcia.

Jak wynika z wykresu Wykres 6.19, ze wzrostem stężenia użytych do nawilżania roztworów chlorków następuje wzrost spadku kąta tarcia, przy czym zależność ta nie jest

liniowa, okazuje się, że spadek kąta tarcia jest coraz mniejszy i można go przybliżyć funkcją kwadratową.



Wykres 6.19 Różnica kąta tarcia [°] - Stężenie roztworów c [%]

Idąc za tym rozumowaniem, można by obliczyć współrzędne maksimów, które są (0,388;4,821) dla AlCl₃, (0,429;4,069) dla CaCl₂ i dla (0,616;3,375) NaCl i teoretycznie wyznaczają maksymalne stężenia roztworów, po których nie następuje wzrost spadków kąta tarcia. Prawdopodobnie nie ma praktycznego znaczenia, ponieważ nie można być pewnym, że uzyskane krzywe przebiegają dalej według wykresów.

Przedstawione związki na wykresie Wykres 6.19 można wykorzystać jedynie do określenia wpływu zmiany stężenia roztworu na zmiany kąta tarcia wewnętrznego w przebadanym zakresie stężeń.

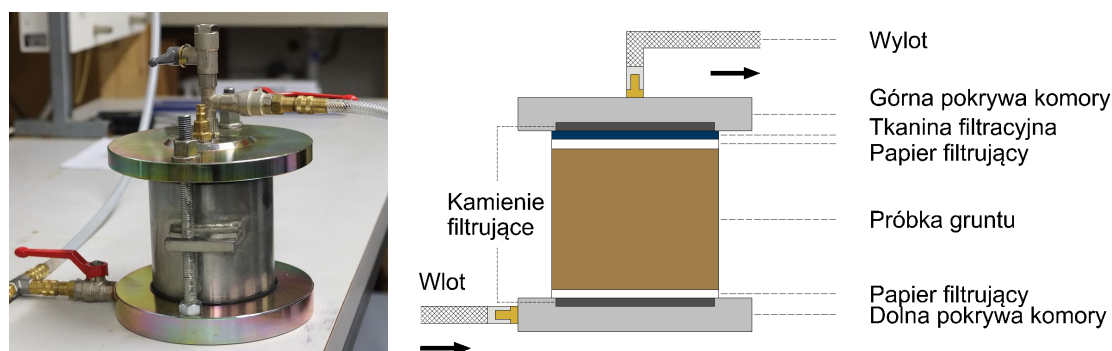
6.7 Badania wodoprzepuszczalności materiału gruntowego

Badania określające wodoprzepuszczalność przeprowadza się na podstawie norm (DIN 18130-1, 1998-05) [82] lub (DIN EN ISO 17892-11, 2019-05) [96]. Normy te pozwalają na prowadzenie badań przy stałym i zmiennym gradiencie hydraulicznym. Chociaż określenie prowadzonych tu badań odbywa się przy stałym gradiencie hydraulicznym, ze względu na powtarzalność badań należy wybrać zmodyfikowany wariant układu badawczego, opisany w punkcie 6.7.2.

6.7.1 Przygotowanie próbek

Próbki gruntu są przygotowane zgodnie z opisem w rozdziałach 6.3.1. Punktem wyjścia do badań wodoprzepuszczalności jest przygotowanie próbek o gęstości Proctora ρ_{Pr} i optymalnej zawartości wody w_{opt} . Próbki gruntu przygotowane do badań zawierają wstępnie zawsze wodę destylowaną bez dodatków. Celem jest uzyskanie początkowych próbek gruntu o gęstości Proctora ρ_{Pr} 1,658 [Mg/m³] przy czym zapewniona jest optymalna zawartość wody w_{Pr} na poziomie 14,5 [%].

Wytworzone w ten sposób zagęszczone próbki gruntu pozostawia się w niezmienionej postaci w cylindrze Proctora i jak to przedstawia Rys. 6.15, wbudowane do komórki przepuszczającej wodę.



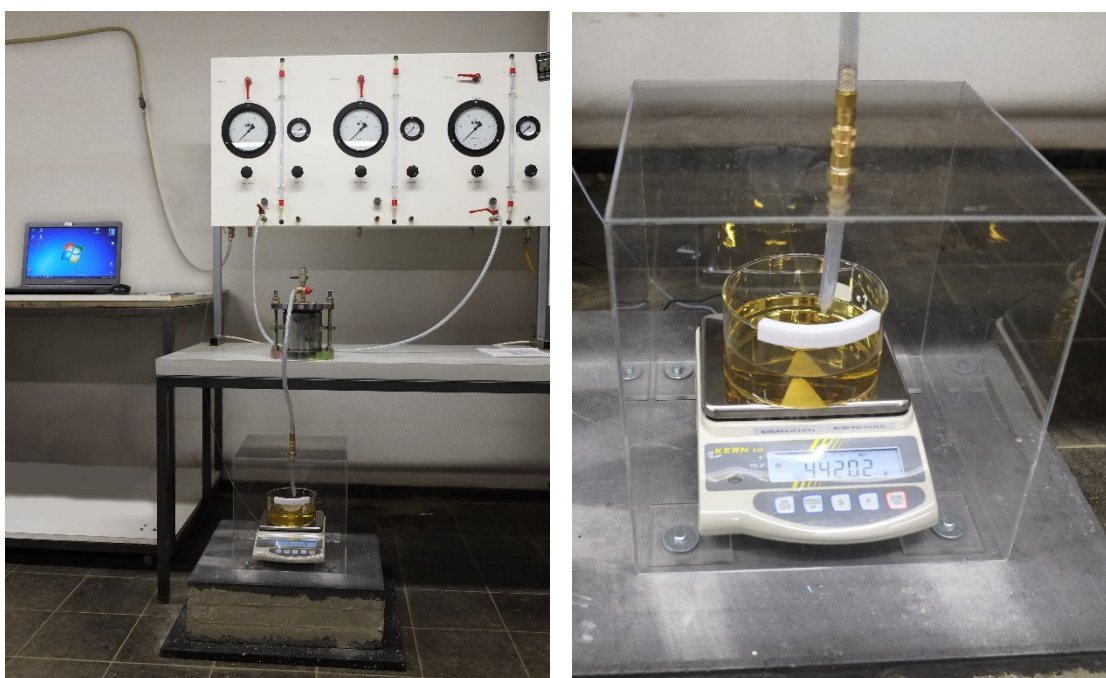
Rys. 6.15 Komora do badania wodoprzepuszczalności, fotografia (po lewej), szkic (po prawej)

Cylinder Proctora jest częścią komory do badania przepuszczalności wody. Pokrywy aparatu są umieszczone poniżej i powyżej cylindra Proctora, które rozprowadzają wodę i roztwory w próbce i wyprowadzają je z próbki. Dno i górę samych próbek gruntu przykrywa się papierami filtracyjnymi i kamieniami filtracyjnymi. Tkanina filtracyjna znajduje się również w górnej części, co zapobiega efektom działania sufozji. Przy wartości k_f rzędu 10^{-3} [m/s] kamienie filtrujące, bibuła filtracyjna i tkanina filtracyjna

mają większą przepuszczalność niż badane próbki. Oznacza to, że ciecz (woda lub roztwór soli) może przepływać równomiernie na całym przekroju podczas testu.

6.7.2 Przebieg doświadczenia

Wytworzone z użyciem wody destylowanej i zagęszczone w tych samych warunkach próbki gruntu są sukcesywnie podłączane do aparatu do badania wodoprzepuszczalności, jak to przedstawia Rys. 6.16. Aparat PERMEABILITY CONTROL PANEL firmy WILLE GEOTECHNIK GMBH podłączony jak na Rys. 42 z wykorzystaniem różnych roztworów przy różnicy wysokości słupków wody 472 [cm] lub ciśnienia 0,472 [bar].



Rys. 6.16 Aparat wodoprzepuszczalności (z lewej), waga do mierzenia ilości przepływającego roztworu (z prawej)

Przepływ roztworu jest stale mierzony za pomocą wagi model KERN EW/EG-N firmy ERNST UND SOHN GMBH, w zależności od czasu co 5 sek., przechowywany w formie pliku tekstowego i oceniany za pomocą programu EXCEL.

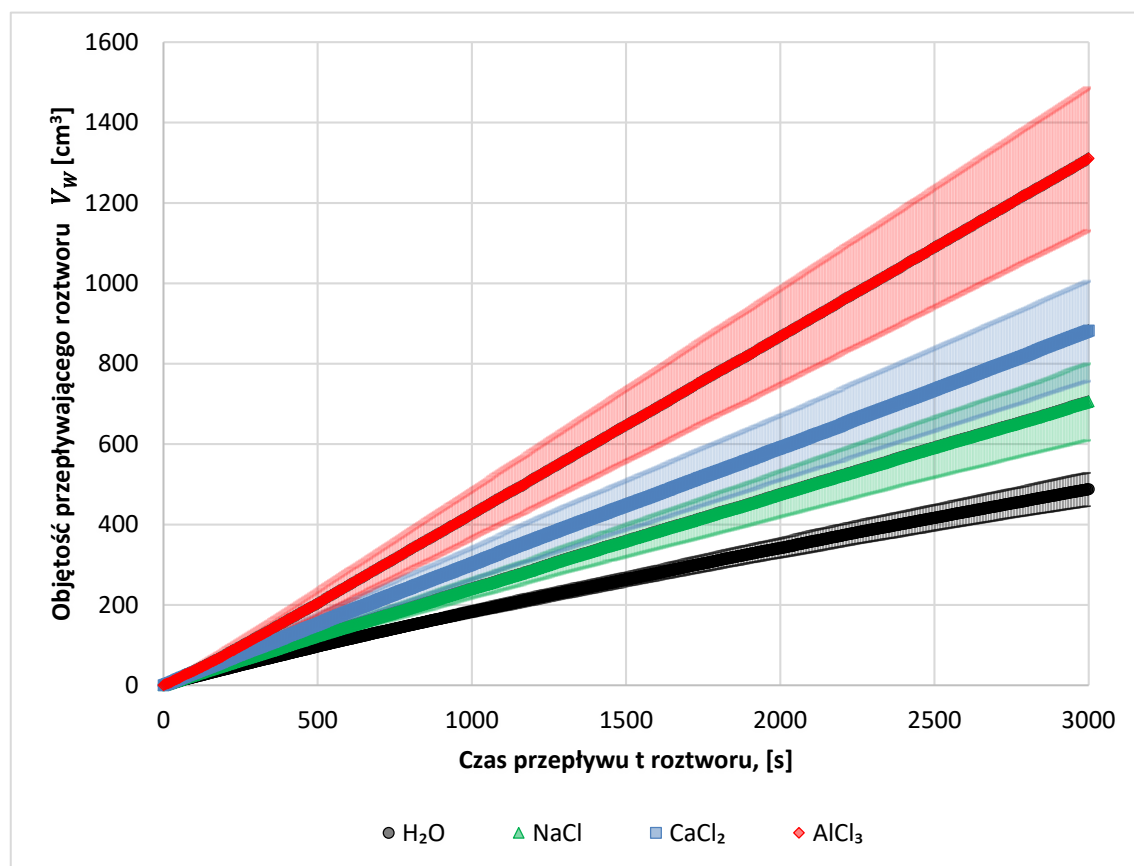
Pierwsza seria pomiarów odbywa się za pomocą wody destylowanej, po której następne pomiary są dokonywane przy użyciu roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃. Parametry używanych roztworów są pokazane w tabeli Tabela 6.19.

Tabela 6.19 Parametry roztworów użytych do badań przepuszczalności

	c [%]	ρ [g/cm ³]	T [°C]
dest. H ₂ O	-	1,0006	21,07
NaCl	2,07	1,0084	22,30
CaCl ₂	2,07	1,010015	22,10
AlCl ₃	2,07	1,013390	21,90

6.7.3 Wyniki badań współczynnika filtracji

Wyniki badań przepuszczalności przedstawiono liniowo na wykresie Wykres 6.20.



Wykres 6.20 Uśrednione wartości przepływu dest. H₂O oraz roztworów

Oś X reprezentuje czas trwania testu w sekundach z uśrednionym przepływem roztworów przedstawionych na osi y. Czarne punkty reprezentują przepływ dest. H₂O, gdzie zielone, niebieskie i czerwone markery są dla roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃. W zależności od wartościowości kationów, natężenie przepływu roztworów przez próbkę gruntu wzrasta w tym samym czasie pomiarowym. Wychodząc ze wzoru (17),

$$k_f = \frac{Q}{A \cdot i} \quad (17)$$

k_f	[m/s]	Współczynnik filtracji
Q	[m ³ /s]	Ilość przepływającej wody w czasie
A	[m ²]	Powierzchnia przekroju prowadzącego wodę
i	[-]	Spadek hydrauliczny

uzyskujemy do obliczeń (18).

$$k_f = \frac{V_w}{t} \cdot \frac{l}{A \cdot h_w} \quad (18)$$

k_f	[m/s]	Współczynnik filtracji
V_w	[m ³]	Objętość wody wypływającej z próbki
t	[s]	Czas
l	[m]	Droga przepływu, wysokość próbki
A	[m ²]	Powierzchnia przekroju prowadzącego wodę
h_w	[m]	Różnica wysokości słupków wody

podstawiając (19),

$$i = \frac{h_w}{l} \quad (19)$$

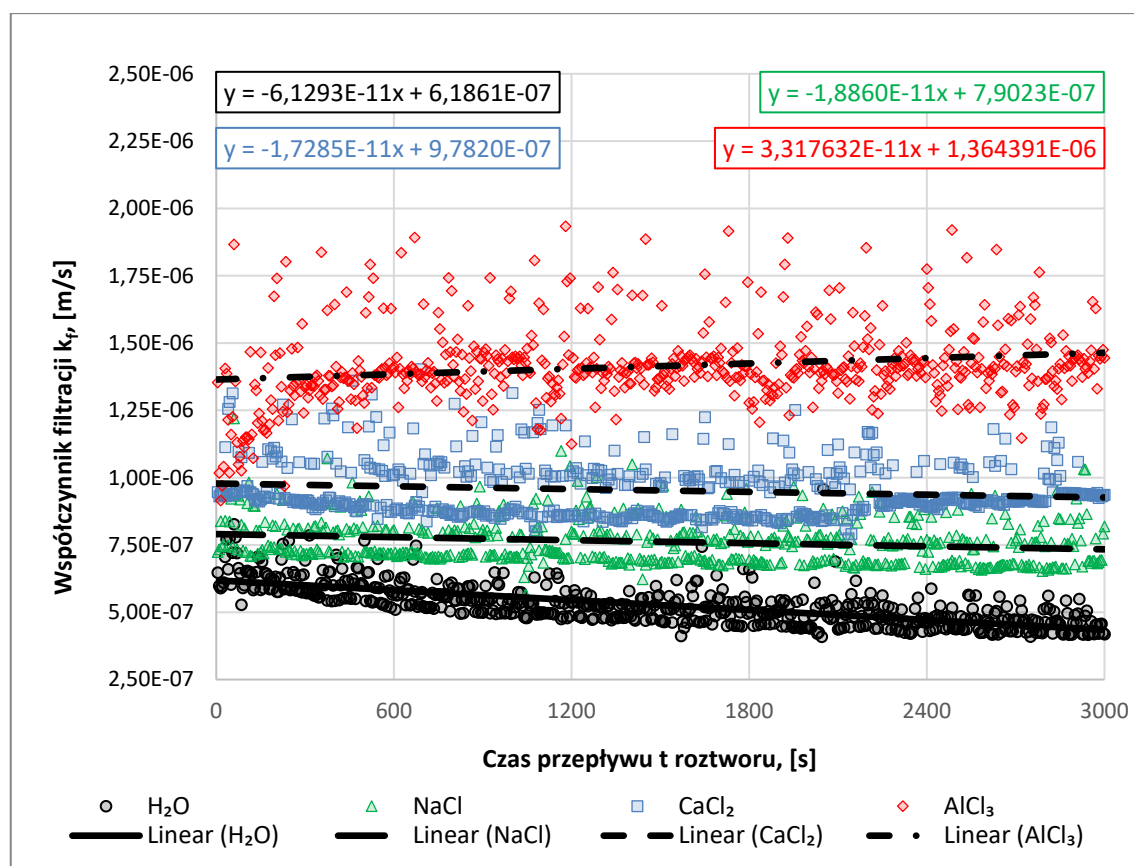
i	[-]	Spadek hydrauliczny
h_w	[m]	Różnica wysokości słupków wody
l	[m]	Droga przepływu / wysokość próbki

oraz (20),

$$Q = \frac{V_w}{t} \quad (20)$$

Q	[m ³ /s]	Ilość przepływającej wody w czasie
V_w	[m ³]	Objętość wody wypływającej z próbki
t	[s]	Czas

obliczone przy użyciu EXCELA wartości k_f dla każdego pojedynczego pomiaru przedstawione są na wykresie Wykres 6.21.



Wykres 6.21 Współczynnik filtracji dla poszczególnych pomiarów

Oś X reprezentuje czas trwania badania w sekundach, przy czym obliczone wartości k_f dla badanego gruntu przy użyciu odpowiednich roztworów są zaznaczone na osi y. Czarna linia z kropkami pokazuje wartości k_f przy przepływie dest. H₂O, gdzie zielone, niebieskie i czerwone znaczki są wartościami k_f przy użyciu roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃.

Na podstawie wyników, biorąc pod uwagę odchylenie standardowe, przeprowadza się obliczanie średnich wartości k_f gruntów uzyskanych w czasie pomiarowym wynoszącym 3000 sekund, w zależności od użytych roztworów. Na tej podstawie obliczono wartości średnie k_f .

6.7.4 Dyskusja wyników

Poniższa Tabela 6.20 przedstawia uśrednione wartości współczynnika filtracji k_f dla wszystkich pomiarów.

Tabela 6.20 Uśrednione wartości k_f dla wszystkich pomiarów

$k_{f_{H_2O}} \left[\frac{m}{s} \right]$	$6,18 \cdot 10^{-7} \pm 7,65 \cdot 10^{-8}$	minimalnie malejący
$k_{f_{NaCl}} \left[\frac{m}{s} \right]$	$7,90 \cdot 10^{-7} \pm 8,41 \cdot 10^{-8}$	minimalnie malejący
$k_{f_{CaCl_2}} \left[\frac{m}{s} \right]$	$9,78 \cdot 10^{-7} \pm 1,02 \cdot 10^{-7}$	minimalnie malejący
$k_{f_{AlCl_3}} \left[\frac{m}{s} \right]$	$1,36 \cdot 10^{-6} \pm 1,43 \cdot 10^{-7}$	minimalnie rosnący

Biorąc pod uwagę, że wszystkie próbki gruntu przygotowano jednakowo, miały gęstość $1,658 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ i zawartości wody $14,5 \text{ [%]}$, różne ilości przepływającej w czasie wody i wynikające z tego wartości k_f spowodowane są tylko użyciem różnych roztworów przepływających przez próbki. Wartość tego wzrostu a za tym obliczone wartości współczynników filtracji k_f jest zależna od wartościowości kationów w roztworze.

Używając do badań wody destylowanej, otrzymano najmniejszy współczynnik filtracji gruntu k_f równy $6,18 \cdot 10^{-7} \text{ [m/s]}$. Średni współczynnik filtracji gruntu k_f , przez który przepływał wodny roztwór $AlCl_3$, równy jest $1,36 \cdot 10^{-6} \text{ [m/s]}$, przy czym ten roztwór jest jedynym, przy którym widać lekko wzrastającą zależność wartości k_f od czasu. Pozostałe roztwory powodują przeciwnie niewielki spadek k_f w zależności od czasu.

Odchylenia standardowe otrzymanych wyników dla wszystkich badanych roztworów i wody destylowanej są rzędu 10 [%] .

Wykres 6.20 wskazuje na wpływ zawartości kationów na współczynnik filtracji. Można przypuszczać, że Wykres 6.21 potwierdza ten wpływ i trzeba dodać, że wnioski wyciągnięte są tylko wnioskami jakościowymi, natomiast zjawisko to nie było dokładnie badane.

6.8 Pomiary potencjału elektrokinetycznego zeta

Badania przeprowadzone w Laboratorium Mechaniki Gruntów, Robót Ziemnych i Fundamentowania Uniwersytetu Jade, zgodnie z poprzednimi rozdziałami, pokazują ilościowy i jakościowy wpływ zastosowanych soli na zmiany właściwości badanych próbek gruntu. Wpływ ten jest widoczny zarówno w laboratorium, jak i w testach w

naturze. Jednym z wyjaśnień zmiany tych właściwości jest z pewnością zmiana wytrzymałości na ścinanie oraz kąta tarcia badanego gruntu. Na podstawie badań eksperymentalnych przedstawionych w poprzednich rozdziałach można stwierdzić, że rodzaj roztworu przyjętego do badań ma wpływ na kształtowanie się parametrów geotechnicznych gruntu. Wobec tego poszukując przyczyn tego zjawiska, zostały wykonane badania, które polegały na pomiarach potencjału elektrokinetycznego zeta, wynikającego ze zjawiska elektroforezy. W dalszym ciągu pracy przedstawiono podstawy tego zjawiska i metody badawcze. Pomiar potencjału elektrokinetycznego zeta może stanowić możliwość uzyskania wyjaśnienia zmierzonych zmian. Sposób pomiarów potencjału elektrokinetycznego zeta regulują normy (ISO 13099-1, 2012-06) [102] w zakresie pomiarów metodami elektroakustycznymi i elektrokinetycznymi oraz (ISO 13099-2, 2012-06) [103] metodą optyczną wykorzystaną w tej pracy.

Do pomiaru potencjału elektrokinetycznego zeta cząstek koloidalnych w ośrodkach ciekłych metodami optycznymi wykorzystuje się zjawisko elektroforezy. Jest to kierunkowy ruch naładowanych cząstek zawieszonych w cieczy pod wpływem pola elektrycznego. Istnieją dwa różne podejścia:

- Metoda mikroelektroforezy, polegająca na obserwacji elektroforetycznego ruchu cząstek przez mikroskop;
- Metoda elektroforetycznego rozpraszania światła, polegająca na pomiarze przesunięć Dopplera w częstotliwości lub fazie promieniowania rozpraszanego przez badane cząstki koloidalne podczas ich ruchu w zewnętrznym polu elektrycznym

W kontekście badań tej pracy stosowana jest metoda elektroforetycznego rozpraszania światła. Metoda ta oparta jest na dynamicznym rozpraszaniu światła w konfiguracji laserowego anemometru Dopplera ZETAMASTER MALVERN INSTRUMENTS LTD, za pomocą którego wyznaczane były natężenia przepływu cieczy i gazu.

Aby naładować cząstki, do badanej próbki wprowadza się parę elektrod, do których przykładane jest stałe napięcie. Cząsteczki w próbce przemieszczają się z określoną prędkością do elektrody o przeciwnym ładunku. Prędkość cząstek mierzy się za pomocą laserowego anemometru Dopplera. W trybie pomiaru prędkości w widmie światła rozproszonego pojawia się składowa przesunięta od częstotliwości nośnej o wartość częstotliwości Dopplera, która jest proporcjonalna do prędkości poruszających się cząstek.

Nowoczesne analizatory ruchliwości elektroforetycznej wykorzystują specjalną metodę analizy sygnału Dopplera PALS (analiza fazowa rozpraszania światła) w celu zwiększenia dokładności pomiaru. Procesor PALS mierzy przesunięcie fazowe padającej wiązki laserowej, gdy światło jest rozproszone, co jest spowodowane ruchem cząstek. Mając prędkość cząstek w polu obliczoną z funkcji fazowej, można określić ruchliwość elektroforetyczną cząstek.

$$\mu = \frac{v}{E_e} \quad (21)$$

μ	$[m^2/V \cdot s]$	Ruchliwość elektroforetyczna
v	$[m/s]$	Prędkość naładowanych cząstek
E_e	$[V/m]$	Natężenie pola elektrycznego

Ruchliwość elektroforetyczną cząstek przekształca się na potencjał zeta za pomocą teorii Smoluchowskiego i poprawek dla różnych grubości podwójnej warstwy elektrostatycznej.

$$\mu = \frac{2\varepsilon\xi}{3\eta} \quad (22)$$

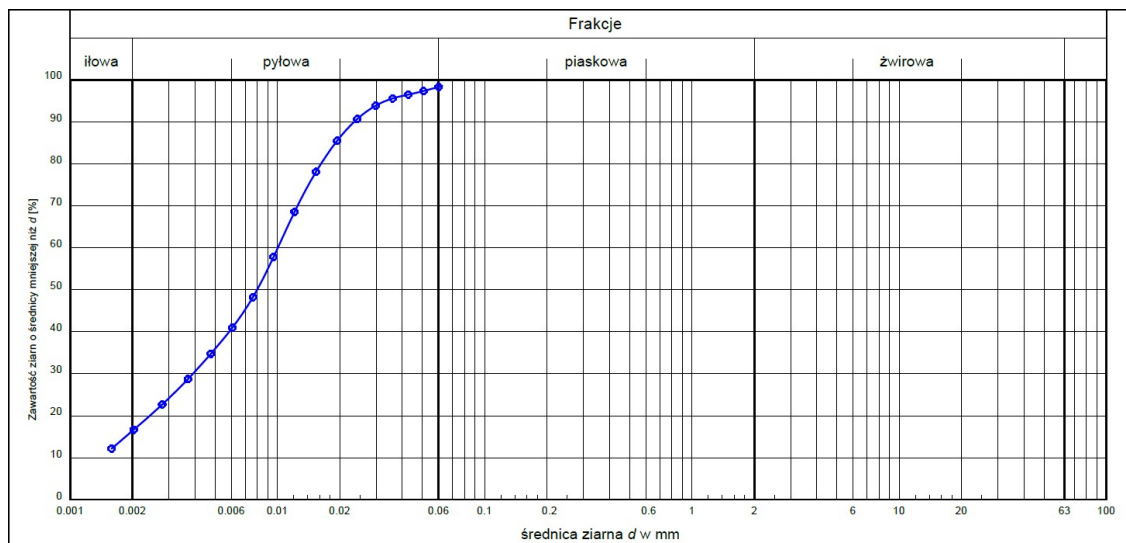
μ	$[m^2/V \cdot s]$	Ruchliwość elektroforetyczna
ε	$[-]$	Stała dielektryczna
ξ	$[V]$	Potencjał zeta
η	$[Pa \cdot s]$	Lepkość dynamiczna

6.8.1 Przygotowanie próbek

Na Jade University nie było możliwości pomiaru potencjału zeta ze względu na brak potrzebnego sprzętu. Badania te przeprowadzone zostały w Instytucie Gospodarki Wodnej na Politechnice w Brunszwiku. Natomiast próbki przygotowane były wcześniej we własnym laboratorium i zabrane do pomiarów.

Ze względu na to, że próbki gruntu nie spełniają warunków koniecznych do pomiarów potencjału zeta, były mierzone przy użyciu najczystszej 400 [mesh] SiO₂ (> 99,95%) proszku. Z jednej strony pomiar potencjału zeta na stosunkowo gruboziarnistej próbce gruntu nie jest możliwy, a z drugiej strony, nawet jeśli jest ono tylko nieznacznie obecne, jakiegokolwiek zanieczyszczenie próbek jest niepożądane. Badany materiał powinien mieć

maksymalne uziarnienie 0,037 [mm], przy czym profil uziarnienia przedstawia Wykres 6.22, uzyskany w wyniku analizy areometrycznej.



Wykres 6.22 Krzywa uziarnienia czystego SiO₂

Badane próbki zawierają czysty SiO₂ (CAS numer: 7631-86-9), co jest zagwarantowane certyfikatem przez producenta, dlatego nie była potrzebna analiza chemiczna.

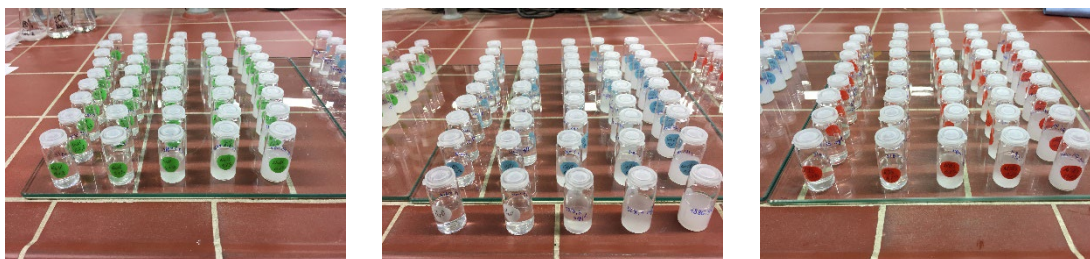
Aby pomiary były udane, musiała być zapewniona odpowiednia koncentracja zawiesiny (frakcji stałej) SiO₂ w roztworze, nie za duża ze względu na dostateczną przezroczystość i nie za mała by oddziaływanie promieni lasera było rejestrowalne. Ze względu na to zaprojektowana została matryca eksperymentalna według tabeli Tabela 6.21.

Tabela 6.21 Proporcje objętości ciała stałego do roztworów o różnych stężeniach

Ilość frakcji stałej w [mg/l]				
18,85	38,45	189,3	378,1	1886,95
Stężenie roztworów NaCl, CaCl ₂ i AlCl ₃ w [%]				
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1	1	1	1	1
2	2	2	2	2
3	3	3	3	3
5	5	5	5	5
10	10	10	10	10

Przygotowane zawiesiny pięciu różnych koncentracji składników stałych w wodzie destylowanej zostały przygotowane jako podstawa do porównania dalszych pomiarów

potencjału zeta z użyciem roztworów chlorów, biorąc pod uwagę oczekiwaną na podstawie obliczenia prędkość opadania cząstek SiO_2 . W dalszej kolejności zostały przygotowane odpowiednie roztwory chlorków i wymieszane z odpowiednimi ilościami SiO_2 co przedstawia Tabela 6.21. Tak przygotowane próbki pokazane są próbki na Rys. 6.17.



Rys. 6.17 Próbki zawiesin, z NaCl (po lewej), H_2O i CaCl_2 (w środku), AlCl_3 (po prawej)

W rzeczywistości wykonane pomiary potencjałów zeta dla próbek o zawartości części stałych 18,85 [mg/l] i 38,45 [mg/l] okazały się niewystarczająco gęste a próbki o zawartości części stałych 189,3 [mg/l], 378,1 [mg/l] i 1886,95 [mg/l] wydają się mieć zbyt dużą koncentrację części stałych, by były dostatecznie przepuszczalne dla promienia lasera. Uzyskanych wyników tych próbek nie można było jednoznacznie zinterpretować.

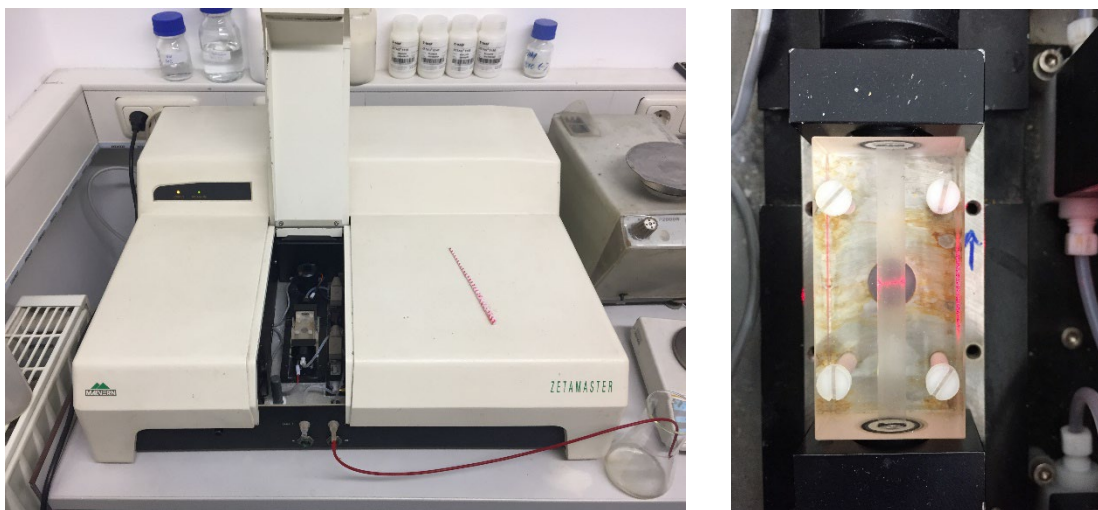
W celu uzyskania możliwych do zinterpretowania wyników przygotowane próbki o zawartości części stałych 378,1 [mg/l], musiały zostać zmodyfikowane przez dodanie wody destylowanej. W rezultacie zmieniły się stężenia roztworów i koncentracja części stałych co przedstawia Tabela 6.22. Również przyjęte za podstawę wartości dla wody destylowanej zostały odpowiednio dopasowane 126,03 [mg/l] [$\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$].

Tabela 6.22 Zmienione proporcje objętości ciała stałego i stężeń roztworów chlorków

Ilość frakcji stałej w [mg/l]								
126,03								
Stężenia roztworów NaCl , CaCl_2 i AlCl_3 w [%]								
0,033	0,067	0,100	0,167	0,333	0,667	1,000	1,670	3,333

6.8.2 Przebieg doświadczenia

Próbki opisane w poprzednim rozdziale umieszcza się za pomocą strzykawki jedna po drugiej zgodnie z instrukcją producenta w komorze pomiarowej miernika potencjału Zeta ZETAMASTER firmy MALVERN PANALYTICAL GMBH pokazanego na Rys. 6.18. Następnie rozpoczyna się pomiar, zawiesina przepływa przez rurkę pomiarową i przechodzi przez promień laser. Wynik pomiaru odczytywany jest z ekranu i zapisywany.

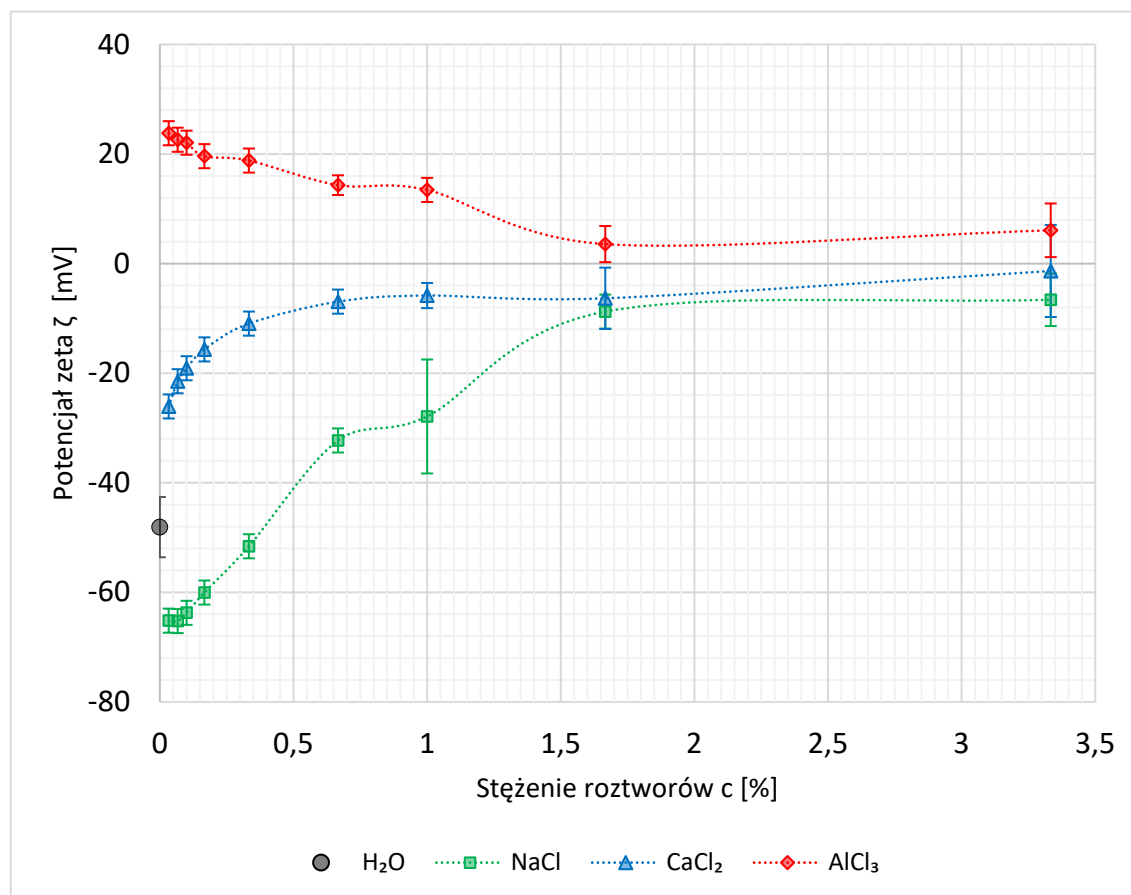


Rys. 6.18 Miernik potencjału zeta ZETAMASTER firmy MALVERN PANALYTICAL (z lewej), laser miernika potencjału zeta (z prawej)

Po pomiarze komorę pomiarową płucze się wodą destylowaną. Każdy tak opisany pomiar powtarza się dla każdej przygotowanej próbki. W sumie przeprowadzono 144 pomiary dla przygotowanych próbek o gęstości zmętnienia 126,03 [mg/l], pomiary pozostałych gęstości zmętnienia odrzucono z powodów już wymienionych.

6.8.3 Wyniki badań potencjału elektrokinetycznego zeta

Wyniki zmierzonych potencjałów zeta pokazane są graficznie na wykresie Wykres 6.23.



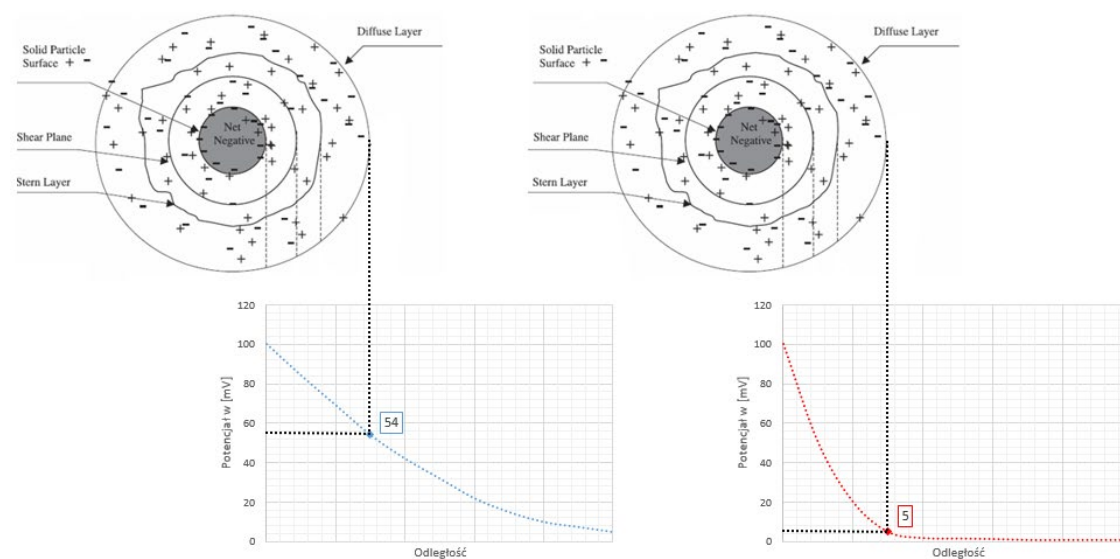
Wykres 6.23 Potencjał zeta ζ [mV] - Zawartość chlorków w roztworze c [%]

Oś X przedstawia stężenie roztworów c w [%], przy czym na osi Y pokazane są zmierzone wartości potencjału zeta ζ w [mV]. Zielone, niebieskie i czerwone punkty reprezentują pomiary z użyciem roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃, a czarny punkt pomiarowy przedstawia średnią wartość potencjału zeta zawiesiny cząstek SiO₂ w wodzie destylowanej. Wartość bezwzględna potencjału zeta dla cząstek SiO₂ w wodzie destylowanej wynosi 48,1 [mV]. Otrzymane wyniki potencjału zeta dla małych stężeń roztworów chlorków są co do wartości bezwzględnej największe i maleją asymptotycznie do zera ze wzrostem stężenia. Z wykresu można odczytać, od stężenia 1,667 [%] wartość bezwzględna potencjału zeta pozostaje poniżej 10 [mV] praktycznie stała a dalszy wzrost stężenia roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ prawie nie ma wpływu na zmianę potencjału zeta. Można też zauważyć tendencję, że przy ustalonym stężeniu największy potencjał zeta mierzony był dla roztworu NaCl niniejszy dla CaCl₂ a najmniejszy dla AlCl₃. Dla przejrzystości poszczególne wyniki przedstawiono w tabeli Tabela 6.23.

Tabela 6.23 Potencjał zeta ζ [mV]

c w [%]	0,033	0,067	0,1	0,167	0,333	0,667	1	1,667	3,33
$\zeta(\text{NaCl})$ [mV]	-65,2	-65,2	-63,7	-60,0	-51,6	-32,3	-27,9	-8,8	-6,6
$\zeta(\text{CaCl}_2)$ [mV]	-26,1	-21,5	-19,1	-15,7	-11,0	-6,9	-5,8	-6,3	-1,4
$\zeta(\text{AlCl}_3)$ [mV]	23,8	22,6	22,1	19,6	18,8	14,3	1,5	3,6	6,1

Potencjał elektryczny spada wykładniczo wraz ze wzrostem odległości od cząstki i osiąga jednolitą wartość w roztworze na zewnątrz rozproszonej podwójnej warstwy. Potencjał zeta to różnica napięcia między płaszczyzną znajdującą się niedaleko powierzchni cząstek a roztworem po drugiej stronie warstwy podwójnej, co pokazano na Rys. 6.19.



Rys. 6.19 Wysoki potencjał zeta przy niskim stężeniu (po lewej), niski potencjał zeta przy wysokim stężeniu (po prawej)

Jeżeli ładunek jest wystarczająco wysoki, elektryczne siły odpychania zapobiegają aglomeracji cząstek i można wytworzyć stabilne zawiesiny o niskiej lepkości względnej. Gdy potencjał jest mały, siły przyciągania mogą przekroczyć to odpychanie, a dyspersja może zanikać i flokulować. Koloidy o wysokim potencjale zeta (ujemnym lub dodatnim) są zatem stabilizowane elektrycznie, podczas gdy koloidy o niskim potencjale zeta mają tendencję do koagulacji lub flokulacji, jak pokazano w tabeli Tabela 6.24.

Przeprowadzone badania eksperymentalne w laboratorium zależności potencjału zeta od stężenia roztworów pozwalają na sformułowanie głównego wniosku, że wzrost stężenia znacząco zmniejsza ten potencjał.

Tabela 6.24 Zachowanie stabilności [13]

Zeta potencjał [mV]	Zachowanie stabilności
0 to ±5	Szybka koagulacja lub flokulacja
±10 to ±30	Początkowa niestabilność
±30 to ±40	Umiarkowana stabilność
±40 to ±60	Dobra stabilność
>61	Doskonała stabilność

6.9 Analiza statystyczna wyników eksperymentalnych

Po wykonaniu badań eksperymentalnych w laboratorium przeprowadzona została analiza statystyczna wyników, która miała prowadzić do ilościowej oceny zgodności wyników badań eksperymentalnych i czynników, które wywołują zmiany wielkości zmierzonych. Odpowiednie parametry odchylenia standardowego σ_r obliczono w ramach niniejszego opracowania przy użyciu oszacowanej wartości S odchylenia standardowego σ_r przedstawionego we wzorze (23). Przedstawiony wzór (23) odnosi się do różnych mierzonych wielkości i zawiera stosowne jednostki, natomiast informacja, która z tego wzoru wynika, uwzględnia cały zbiór danych.

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (23)$$

S	[–]	Wartości S odchylenia standardowego σ_r
n	[–]	Ilość punktów pomiarowych
X_i	[–]	Wielkość wyrażenia na i -tym elemencie próbki
\bar{X}	[–]	Średnia empiryczna według wzoru (24)

Odpowiednia wymagana średnia empiryczna obliczana jest ze wzoru (24).

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (24)$$

\bar{X}	[–]	Wartość średnia
n	[–]	Ilość pomiarów
X_i	[–]	Wielkość wyrażenia na i -tym elemencie próbki

Modelowanie korpusu skarpy oraz ocena wpływu na projektowanie poprzez zmianę parametrów gruntu piaszczystego są przeprowadzane niezależnie od siebie za pomocą oprogramowania DC-BÖSCHUNG producenta DC-SOFTWARE, oraz oprogramowania PLAXIS 2D firmy BENTLEY SYSTEMS GERMANY GMBH. Za pomocą oprogramowania DC-BÖSCHUNG obliczenia stateczności wykonywane są metodą koła ślizgowego według Krey-Bishop. Przyjęto tutaj, że punkt bazowy koła ślizgu pokrywa się stale z początkiem nachylenia skarpy.

Ocenę wpływu zmian parametrów skarp dokonuje się w programie PLAXIS 2D na podstawie obliczenia współczynnika bezpieczeństwa wg równania (25)

$$Sf = \frac{S_{ma}}{S_{nfe}} \quad (25)$$

Sf	[-]	współczynnik bezpieczeństwa
S_{ma}	[kN/m ²]	maksymalna wytrzymałość na ścinanie
S_{nfe}	[kN/m ²]	wytrzymałość na ścinanie wymagana do równowagi

W przypadku modeli gruntu ze standardowym kryterium zniszczenia Mohra-Coulomba, które jest tu stosowane, współczynnik bezpieczeństwa wynika z równania (26).

$$Sf = \frac{c_{mea} - \sigma_n \cdot \tan(\varphi)}{c_r - \sigma_n \cdot \tan(\varphi_r)} \quad (26)$$

Sf	[-]	współczynnik bezpieczeństwa
c_{mea}	[kN/m ²]	zmierzona kohesja
c_r	[kN/m ²]	zredukowana kohesja w celu utrzymania równowagi
φ	[°]	zmierzony kąt tarcia
φ_r	[°]	zredukowany kąt tarcia w celu utrzymania równowagi
σ_n	[kN/m ²]	rzeczywista składowa naprężenia normalnego

Przy takim podejściu do obliczania globalnego współczynnika bezpieczeństwa tangens kąta tarcia i kohesja są redukowane w tym samym stosunku, przy czym redukcja tych parametrów wytrzymałościowych daje w wyniku numeryczne parametry stateczności zgodnie z równaniem (27).

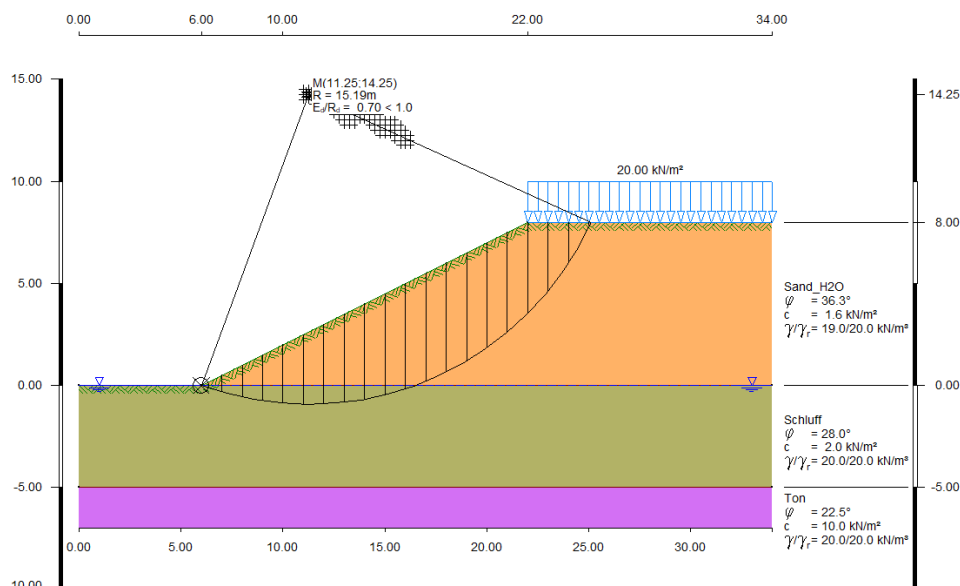
$$\frac{c_{mea}}{c_r} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi_r)} = \Sigma Msf \quad (27)$$

ΣMsf	[-]	numeryczny parametr stabilności, odpowiada globalnemu bezpieczeństwu η
c_{mea}	[kN/m ²]	zmierzona kohezja
c_r	[kN/m ²]	zredukowana kohezja w celu utrzymania równowagi
φ	[°]	zmierzony kąt tarcia
φ_r	[°]	rzeczywista składowa naprężenia normalnego

Ta redukcja zwiększa ten parametr krok po kroku, aż do awarii. Współczynnik bezpieczeństwa jest zdefiniowany jako wartość ΣMsf w przypadku awarii [4].

7.1.1 Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego wodą

Nasączony wodą piasek ze skarpy ma wcześniej zbadany kąt tarcia wewnętrznego φ 36,26 [°]. Aby móc uwzględnić faktycznie wyznaczone parametry, obliczoną kohezję c ustala się na 1,57 [kN/m²]. Koło poślizgu i wynikające z oprogramowania DC-BÖSCHUNG, jego promień i analiza stateczności są pokazane na Rys. 7.2.

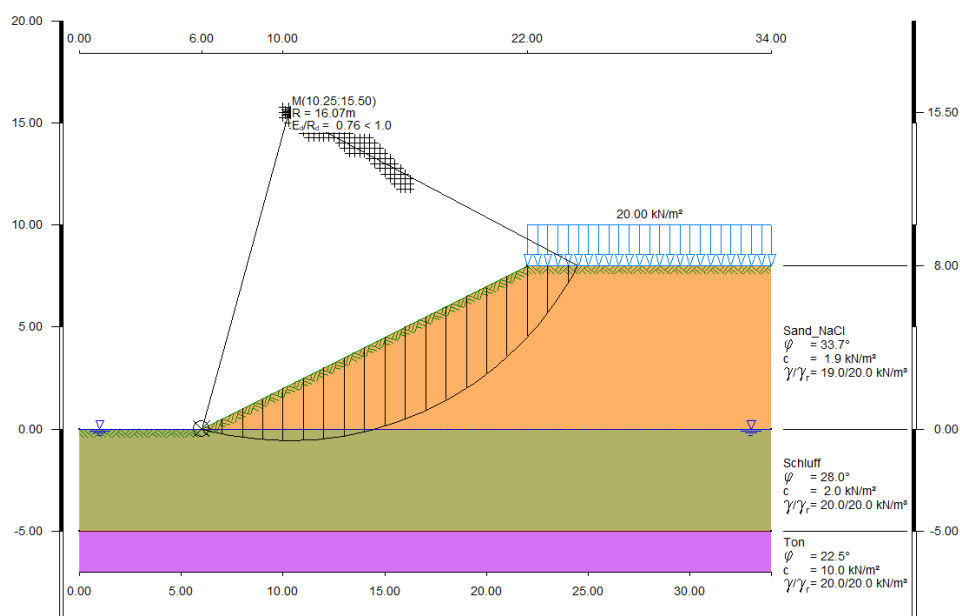


Rys. 7.2 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie bezpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączanego wodą

Przy obliczaniu współczynnika bezpieczeństwa według metody Krey-Bishop promień koła ślizgu R wynosi 15,19 [m] a stosunek E_d / R_d równy 0,70 jest mniejszy od 1,0 i tym samym warunek stabilności jest spełniony. Używając tych samych parametrów wejściowych w oprogramowaniu PLAXIS 2D, otrzymuje się parametr sterowania numerycznego ΣM_{sf} równy 1,47 [-]. Rezerwa do awarii wynosi zatem 47 [%], bez uwzględnienia współczynnika bezpieczeństwa zgodnie z (DIN EN 1997-1, 2014-03) [94].

7.1.2 Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego roztworem wodnym NaCl

Nasyp potraktowany roztworem NaCl charakteryzuje się kątem tarcia wewnętrznego ϕ 33,74 [°]. Aby móc uwzględnić faktycznie wyznaczone parametry, obliczoną kohezję c ustala się na 1,93 [kN/m²]. Koło ślizgu wynikające z oprogramowania DC-BÖSCHUNG, jego promień i wynikające z niego pokazano na Rys. 7.3.



Rys. 7.3 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie bezpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego roztworem NaCl

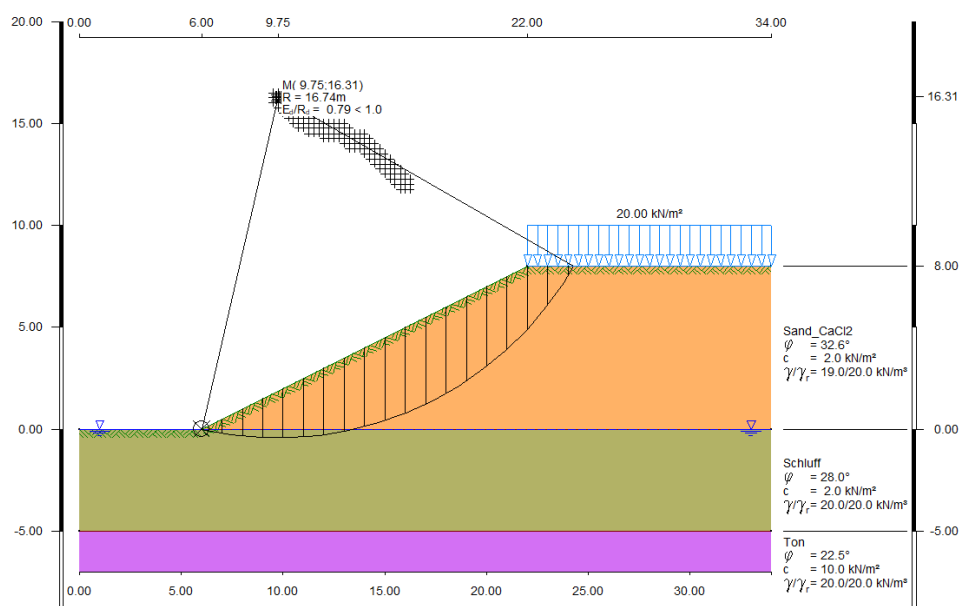
Przy obliczaniu współczynnika bezpieczeństwa według metody Krey-Bishop promień koła ślizgu R wynosi 16,07 [m] a stosunek E_d / R_d równy 0,76 jest mniejszy od 1,0 i tym samym warunek stabilności jest spełniony. Używając tych samych parametrów wejściowych w oprogramowaniu PLAXIS 2D, otrzymuje się parametr sterowania numerycznego ΣM_{sf} równy 1,42 [-]. Rezerwa do awarii wynosi zatem 42 [%], bez

uwzględnienia współczynnika bezpieczeństwa zgodnie z (DIN EN 1997-1, 2014-03) [94].

Dodanie roztworu chlorku sodu zwiększa stosunek E_d / R_d uzyskany w programie DC-BÖSCHUNG w porównaniu do wyników bez chlorku o 6 [%], przy czym parametr sterowania numerycznego ΣMsf wyznaczony przez program PLAXIS 2D jest zmniejszony o 5 [%].

7.1.3 Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego roztworem wodnym CaCl_2

Nasyp potraktowany roztworem CaCl_2 charakteryzuje się kątem tarcia wewnętrznego ϕ 32,64 [°]. Aby móc uwzględnić faktycznie wyznaczone parametry, obliczoną kohezję c ustala się na 1,96 [kN/m²]. Koło ślizgu wynikające z oprogramowania DC-BÖSCHUNG, jego promień i wynikające z niego pokazano na Rys. 7.4.



Rys. 7.4 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie be-zpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego roztworem CaCl_2

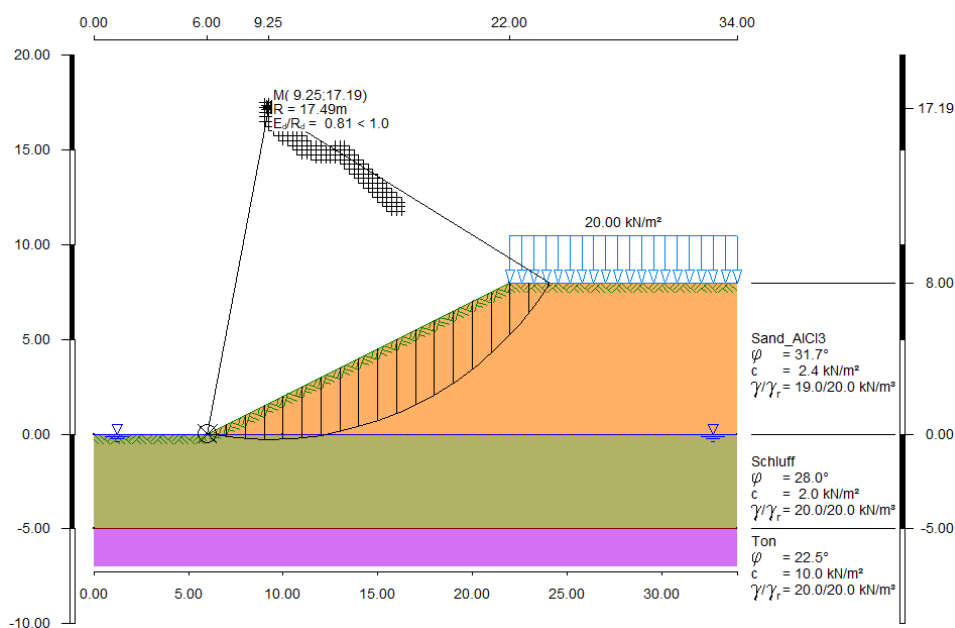
Przy obliczaniu współczynnika bezpieczeństwa według metody Krey-Bishop promień koła ślizgu R wynosi 16,31 [m] a stosunek E_d / R_d równy 0,79 jest mniejszy od 1,0 i tym samym warunek stabilności jest spełniony. Używając tych samych parametrów wejściowych w oprogramowaniu PLAXIS 2D, otrzymuje się parametr sterowania numerycznego ΣMsf równy 1,39 [-]. Rezerwa do awarii wynosi zatem 39 [%], bez

uwzględnienia współczynnika bezpieczeństwa zgodnie z (DIN EN 1997-1, 2014-03) [94].

Dodanie roztworu chlorku sodu zwiększa stosunek E_d / R_d uzyskany w programie DC-BÖSCHUNG w porównaniu do wyników bez chlorku o 9 [%], przy czym parametr sterowania numerycznego ΣMsf wyznaczony przez program PLAXIS 2D jest zmniejszony o 8 [%].

7.1.4 Stateczność skarp zbudowanych z piasku nawilżonego roztworem wodnym $AlCl_3$

Nasyp potraktowany roztworem $AlCl_3$ charakteryzuje się kątem tarcia wewnętrznego ϕ 31,68 [°]. Aby móc uwzględnić faktycznie wyznaczone parametry, obliczoną kohezję c ustala się na 2,42 [kN/m²]. Koło ślizgu wynikające z oprogramowania DC-BÖSCHUNG, jego promień i wynikające z niego pokazano na Rys. 7.5.



Rys. 7.5 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie be-zpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego $AlCl_3$

Przy obliczaniu współczynnika bezpieczeństwa według metody Krey-Bishop promień koła ślizgu R wynosi 17,19 [m] a stosunek E_d / R_d równy 0,81 jest mniejszy od 1,0 i tym samym warunek stabilności jest spełniony. Używając tych samych parametrów wejściowych w oprogramowaniu PLAXIS 2D, otrzymuje się parametr sterowania numerycznego ΣMsf równy 1,38 [-]. Rezerwa do awarii wynosi zatem 38 [%], bez

uwzględnienia współczynnika bezpieczeństwa zgodnie z (DIN EN 1997-1, 2014-03) [94].

Dodanie roztworu chlorku sodu zwiększa stosunek E_d / R_d uzyskany w programie DC-BÖSCHUNG w porównaniu do wyników bez chlorku o 11 [%], przy czym parametr sterowania numerycznego ΣMsf wyznaczony przez program PLAXIS 2D jest zmniejszony o 9 [%].

7.1.5 Podsumowanie - Stateczność skarp zbudowanych z piasku

W rozdziałach od 7.1.1 do 7.1.4 przedstawiono cztery obliczenia stateczności skarpy. Geometria i obciążenie korpusu skarpy są w każdym przypadku identyczne, przy czym zmienne są wejściowe parametry mechaniczne, kąt tarcia φ i kohezja c . Te parametry odpowiadają wartościom, które zostały określone w aparacie bezpośredniego ścinania dla gruntów bez dodatków i z dodaniem chlorków, opisanych w rozdziale 6.6. Zestawienie parametrów wejściowych i obliczonych przez w.w. programy parametrów wyjściowych stateczności skarpy przedstawiono w tabeli Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Podsumowanie wyników obliczeń stateczności skarp zbudowanych z piasku

		H ₂ O	NaCl	CaCl ₂	AlCl ₃
Parametry wejściowe	φ [°].	36,26	33,74	32,64	31,68
	c [kN/m ²].	1,57	1,93	1,96	2,42
	q [kN/m ²]	20	20	20	20
Parametry wyjściowe	R [m]	15,19	16,07	16,31	17,19
	E_d / R_d [-]	0,70	0,76	0,79	0,81
	ΣMsf [-]	1,47	1,42	1,39	1,38

Zmniejszenie kąta tarcia φ i zmiana wejściowego parametru kohezji c pod wpływem odpowiednich chlorków ma wpływ na parametry wyjściowe, a tym samym bezpośrednio na sytuację obliczeniową. Jak pokazano w tabeli Tabela 7.1, wpływ odpowiednich chlorków prowadzi do wzrostu promienia koła ślizgu R . Podczas gdy dla gruntu bez dodatków promień osiąga 15,19 [m], promień dla gruntu nasączonego roztworem NaCl wzrasta do 16,07 [m], przy gruncie traktowanym roztworem CaCl₂ do 16,31 [m], a przy gruncie nasączonym roztworem AlCl₃ nawet do 17,19 [m].

Wraz ze wzrostem promienia koła ślizgu R wzrasta stopień wykorzystania. Ten stopień wykorzystania, który jest przedstawiony jako stosunek E_d/R_d , wynosi 0,70 [-] dla gruntu bez roztworu chlorków, natomiast wzrasta do 0,76 [-] dla gruntu z NaCl, do 0,79 [-] dla gruntu z CaCl₂ a z AlCl₃ nawet do 0,81 [-]. Powyższą tendencję potwierdzają obliczenia

numeryczne. W zależności od rodzajów wprowadzonych chlorków zmniejszają się obliczone parametry sterowania numerycznego ΣMsf od 1,47 [-] do 1,38 [-].

Rozważając wyniki, ważne jest, aby wziąć pod uwagę, kiedy chlorki były wprowadzane do gruntu. Chociaż wzrost ściśliwości poprzez dodatek soli idzie w parze ze wzrostem kohezji, towarzyszy mu również zmniejszenie kąta tarcia. Jeśli chlorki dostaną się do gruntu w fazie użytkowania, może nastąpić dalsze osadzanie natomiast jeśli zostaną one wprowadzone przed zagęszczeniem, można spodziewać się lepszego wyniku zagęszczania gruntu.

8 Wnioski końcowe i program dalszych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań zostały sformułowane wnioski szczegółowe odnoszące się do analizowanego zjawiska.

8.1 Dyskusja uzyskanych wyników

Podczas badań w naturze w Moorburgu cztery pola wypełniono gruntem fS, ms, u' z dna jeziora i nasączono odpowiednio wodą słodką oraz roztworami soli NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ tak by zawartość wody lub roztworu 0,3 [%] stała się optymalna do zagęszczenia. Grunt został równomiernie zagęszczony stosowanym w praktyce sprzętem budowlanym, a kontrolę zagęszczenia prowadzono za pomocą płyty statycznej. Wyniki badań wskazują na wpływ tych soli na moduł odkształcenia w naturze i dokładnie potwierdzają powyższe założenie o ich wpływie na właściwości mechaniczne gruntu w naturze. O ile moduły odkształcenia pierwotnego E_{v1} , a tym samym wskaźnik odkształcenia E_{v2}/E_{v1} , nie wykazują wyraźnego trendu, o tyle można dostrzec wyraźną zależność modułów odkształcenia wtórnego E_{v2} . Największy moduł odkształcenia wtórnego E_{v2} o wartości 80,6 [MN/m²] posiada badane pole, które zostało potraktowane wodą słodką. Zastosowanie roztworów soli do nawilżania podłoża prowadzi do zmniejszenia modułów odkształcenia wtórnego E_{v2} . Efekt ten wzrasta w zależności przy wzroście wartościowości kationów. Podczas gdy grunt potraktowany NaCl nadal posiada moduły odkształcenia wtórnego E_{v2} o wartości 76,6 [MN/m²], E_{v2} spada przy zastosowaniu CaCl₂ do 72,4 [MN/m²], a dla AlCl₃ do 71,8 [MN/m²].

Wychodząc z wyników badań w naturze, badania przeprowadzone w laboratorium również potwierdzają postawioną tezę.

Badania w urządzeniu Proctora pokazują, że dodatek roztworów NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ zwiększa gęstość Proctora w porównaniu do próbek gruntu, które zostały nawilżone tylko wodą destylowaną. Można zauważyć podobną tendencję do zwiększania gęstości Proctora ze wzrostem wartościowości kationów oraz wzrostem ich stężeń. Wzrost gęstości Proctora dla próbek z dodatkiem NaCl jest dla każdego stężenia 0,1 [%], 0,2 [%], 0,3 [%] stały i wynosi 0,3 [%], ale dodatek CaCl₂ i AlCl₃ powoduje jego wzrost zależnie od stężenia i wartościowości. Procentowy wzrost gęstości Proctora przy zastosowaniu 0,1 [%] roztworu CaCl₂ wynosi 0,3 [%]. Jeśli stosuje się roztwór 0,2 [%], wzrost wzrasta do 0,42 [%] i przy dodatku w stężeniu od 0,3 [%] do 0,48 [%]. Przy stosowaniu roztworu

AlCl_3 procentowy wzrost gęstości Proctora jest największy. Dodatek 0,1 [%] roztworu prowadzi do procentowego wzrostu o 0,66 [%], podczas gdy dodatki 0,2 [%] i 0,3 [%] dają wartości 0,96 [%] i 1,38 [%]. Oprócz znormalizowanego testu Proctora przeprowadzono testy w urządzeniu Proctora z użyciem 0,3 [%] roztworu AlCl_3 przy ciągłym zwiększaniu pracy zagęszczania. Dla każdej energii zagęszczania dodatek roztworu chlorku AlCl_3 prowadzi do zwiększenia gęstości Proctora w porównaniu z wodą destylowaną.

Wzrost gęstości Proctora w cylindrze Proctora świadczy o większej ściśliwości próbki. Procentowy wzrost gęstości Proctora w urządzeniu Proctora świadczy o bardziej zwartym, bardziej zagęszczonym gruncie. Zachowanie to można odtworzyć w edometrze. Dodatek roztworów NaCl , CaCl_2 i AlCl_3 o stężeniu 0,3 [%] prowadzi do wyższego odkształcenia względnego w edometrze w porównaniu do próbek gruntu, które zostały nawilżone wodą destylowaną. Podobnie jak wyniki w urządzeniu Proctora, to odkształcenie zależy od wartościowości kationów chlorków. Próbki gruntu wytworzone z gęstością początkową 1,65 [Mg/m^3], a także bardziej zagęszczone próbki gruntu o gęstości 1,75 [Mg/m^3] ulegają wyższemu odkształceniu względnemu po dodaniu różnych roztworów soli. Pierwsze obciążenie jest ustalone na 25 [kPa] i podwajane za każdym razem aż do ostatniego obciążenia w wysokości 800 [kPa]. Z tych zmierzonych odkształceń względnych próbki obliczany jest edometryczny moduł ściśliwości. Obliczone średnie edometryczne moduły ściśliwości dla próbek o początkowej gęstości 1,65 [Mg/m^3] mieszczą się w przedziale od 53,094 [MPa] do 36,815 [MPa] dla ostatniego przyłożonego obciążenia. Najwyższy edometryczny moduł ściśliwości uzyskany jest dla próbek z wodą destylowaną. Próbki, które zostały przygotowane z 0,3 [%] roztworem NaCl mają edometryczny moduł ściśliwości E_s wynoszący 40,956 [MPa]. Przy zastosowaniu roztworu CaCl_2 E_s wynosi 39,169 [MPa], wspomniany najniższy edometryczny moduł ściśliwości równy 36,815 [MPa] uzyskuje się z użyciem roztworu AlCl_3 . Próbki, które zostały przygotowane i zbadane w tych samych warunkach, ale o gęstości 1,75 [Mg/m^3], wykazują dokładnie taką samą tendencję. Średni edometryczny moduł ściśliwości dla ostatniego obciążenia wynosi 101,984 [MPa] dla próbek z wodą destylowaną, przy czym E_s maleje równomiernie w zależności od wartościowości kationów. Próbki z roztworem NaCl mają E_s równy 70,165 [MPa], przy zastosowaniu CaCl_2 E_s wynosi 67,561 [MPa], przy czym dodatek AlCl_3 prowadzi do najniższego edometrycznego modułu ściśliwości 58,793 [MPa].

Wstępne wyjaśnienie tego zachowania, zarówno w badaniach w naturze, jak i w badaniach laboratoryjnych w urządzeniu Proctora oraz przy określaniu edometrycznego modułu ściśliwości, dają badania wytrzymałości na ścinanie lub znacznie więcej wynikające z nich badanie efektywnego kąta tarcia wewnętrznego i efektywnej spoistości gruntu. Badania wytrzymałości na ścinanie przeprowadzono przy obciążeniu 5 [N/cm²], 10 [N/cm²] i 15 [N/cm²]. Gęstość początkowa to gęstość Proctora badanego gruntu 1,65 [Mg / m³], przy czym stężenia NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ wynoszą 0,1 [%], 0,2 [%] i 0,3 [%]. Dla wszystkich trzech stężeń można zauważyć powtarzający się trend. W przypadku próbek, które zostały przygotowane przy użyciu wody destylowanej, najwyższy uśredniony efektywny kąt tarcia wewnętrznego wynosi 36,26 [°] i najniższa efektywna spoistość gruntu ma wartość 1,57 [N/cm²]. Wraz ze wzrostem stężenia i wartościowości kationów efektywny kąt tarcia wewnętrznego systematycznie spada. Próbki przygotowane z roztworem 0,1 [%] NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ dają średnie efektywne kąty tarcia wewnętrznego 35,15 [°], 34,83 [°] i 34,07 [°]. Użycie roztworów o stężeniu 0,2 [%] daje efektywne kąty tarcia wewnętrznego wynoszące odpowiednio 34,56 [°], 33,11 [°] 32,66 [°], a przy stężeniu 0,3 [%] następuje spadek do odpowiednio 33,73 [°], 32,64 [°] i 31,68 [°]. Różnica między próbkami gruntu, które zostały przygotowane z wodą destylowaną, a próbkami gruntu z użyciem 0,3 [%] roztworu AlCl₃ wynosi ponad 4,5 [°]. Dla efektywnej spoistości gruntu można dostrzec trend wzrostowy, który jednak jest sporadycznie przerywany.

Niższy efektywny kąt tarcia wewnętrznego prowadzi do wyższej ściśliwości w aparacie Proctora, wyższego odkształcenia względnego próbki w edometrze, a tym samym do niższego edometrycznego modułu ściśliwości.

Porównując próbki przygotowane z zastosowaniem wody destylowanej i badane przy gęstości Proctora 1,65 [Mg/m³] na przepuszczalność wody oraz roztworów 0,3 [%] NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ pod ciśnieniem 0,472 [bar] widać wyraźne różnice średniego współczynnika filtracji. Przy identycznej gęstości początkowej Proctora najniższą przepuszczalność uzyskuje się przy filtracji wodą destylowaną. Współczynnik filtracji daje średnią wartość $6,18 \cdot 10^{-7}$ [m/s]. Dla roztworów chlorków rośnie on wraz ze wzrostem wartościowości kationów roztworu. Jeżeli przez próbki przepuszcza się roztwór NaCl, uzyskuje się średnią wartość współczynnika filtracji $k_f 7,90 \cdot 10^{-7}$ [m/s], dla roztworu CaCl₂ $9,78 \cdot 10^{-7}$ [m/s] a największą wartość dla AlCl₃ $1,36 \cdot 10^{-6}$ [m/s]. Wiedząc, że badane próbki były jednakowe pod względem objętości, gęstości

początkowej oraz miały identyczne krzywe uziarnienia, uzyskane wyniki prowadzą do wniosku, że zwiększająca się wartość kationów roztworu powoduje, że przepływające medium wydaje się napotykać mniejszy opór w próbce, co powoduje większy przepływ. Wykres 6.21 pokazuje duży rozrzut wyników wodoprzepuszczalności dla roztworu $AlCl_3$, który jest zbieżny z wykresem Wykres 6.20 i pokazuje, że na zjawisko to wpływa prawdopodobnie wartościowość kationów, ale zjawiska tego dokładnie nie badano.

Nawet jeśli badania wytrzymałości na ścinanie i wodoprzepuszczalności dostarczają już wstępnych odpowiedzi na temat wpływu zastosowanych chlorków na zmiany zagęszczalności i edometrycznego modułu ściśliwości, nadal nie ma jednoznacznej odpowiedzi na przyczynę tego zjawiska. Ponieważ możliwości klasycznych badań geotechnicznych są na tym etapie wyczerpane, zbadano bardziej szczegółowo relacje pomiędzy roztworem a ziarnem gruntu.

Aby potwierdzić powyższe wnioski wynikające z badań laboratoryjnych, przeprowadzono badania zjawiska elektroforezy. Pomiar potencjału elektrokinetycznego zeta pozwalają na wyciągnięcie wniosków na temat wpływów stosowanych chlorków na ziarno. Badania te przeprowadza się zamiennie na najczystszy 400 [mesh] SiO_2 (> 99,95 [%]) proszku, ponieważ badanie dotychczasowego gruntu spowodowałoby powstanie błędów pomiarowych z powodu jego niejednorodności.

Podczas gdy pomiar potencjałów zeta dla zawiesiny SiO_2 w wodzie destylowanej oraz w roztworach $NaCl$, $CaCl_2$ i $AlCl_3$ o niewielkich stężeniach, daje stosunkowo duże wartości bezwzględne, zwiększanie stężenia roztworów powoduje, że zbliżają się one bardziej do zera [mV]. Począwszy od stężenia około 1,5 [%] dla każdego roztworu mierzony potencjał zeta daje wartości bezwzględne <5 [mV]. Mały potencjał zeta oznacza, że siły odpychające między ziarnami zawiesiny są zminimalizowane.

8.2 Podsumowanie i wnioski końcowe

Badania w naturze oraz eksperymentalne wykazały, że zastosowane roztwory chlorków, $NaCl$, $CaCl_2$ i $AlCl_3$ w różnych stężeniach mają wpływ na właściwości mechaniczne badanego gruntu, oraz, że wpływ ten można określić na podstawie przeprowadzonych badań, a oznacza to, że została potwierdzona teza postawiona w pracy:

„Istnieje możliwość z dostateczną dla celów praktycznych dokładnością zmiany własności mechanicznych gruntów niespoistych poprzez wprowadzenie do szkieletu gruntu odpowiednich roztworów, które powlekając powierzchnię zewnętrzną ziaren, wywołują efekty adhezyjne i elektrostatyczne.”

Przedstawiona praca bada wpływ wybranych chlorków o różnych stężeniach na właściwości mechaniczne gruntu piaszczystego. Wybrane chlorki to NaCl, CaCl₂ i AlCl₃ w stężeniach roztworów odpowiednio 0,1 [%], 0,2 [%] 0,3 [%] w przeliczeniu na suchą masę równoziarnistego gruntu piaszczystego oznaczonego tutaj jako $fS, m\bar{s}, u'$. Badania laboratoryjne dotyczą zagęszczalności w urządzeniu Proctora, modułu edometrycznego, odporności na ścinanie w urządzeniu bezpośredniego ścinania oraz wodoprzepuszczalności gruntu. Wyniki badań laboratoryjnych były dodatkowo sprawdzane w naturze na polu testowym za pomocą płyty statycznej.

Wyniki badań laboratoryjnych i w naturze wskazują, że chlorki mają wpływ na właściwości mechaniczne badanego gruntu oraz dają się zmierzyć i potwierdzają postawioną na wstępie tezę rozprawy. Dodatek chlorków powoduje wzrost gęstości suchej po zagęszczeniu w aparacie Proctora, wzrastającej wraz ze wzrostem stężenia roztworu i wartościowością kationów wprowadzanych chlorków, co potwierdza również rosnące osiadanie w edometrze. Badania w urządzeniu bezpośredniego ścinania wykazały zmniejszenie kąta tarcia i wzrost pozornej kohezji z tych samych przyczyn. Zwiększona kohezja jest spowodowana wzrostem napięcia powierzchniowego roztworów w porównaniu do wody destylowanej. W teście bezpośredniego ścinania ziarna gruntu z solami zachowują się jak ziarna o mniejszej średnicy, co wpływa na wodę związaną na powierzchni ziarna, a tym samym na grubość elektrycznej warstwy podwójnej. W tej samej kolejności chlorków i wartościowości ich kationów wzrastająca wodoprzepuszczalność wskazuje na wzrost porowatości gruntu i potwierdza, że dodane chlorki mają wpływ na wodę związaną z ziarnami. Pomiar potencjału elektrokinetycznego zeta potwierdza również te wyniki.

Wyniki obliczeń stateczności skarp pokazują, że wpływ chlorków może być rzeczywiście istotny. Nawet jeśli zaprawianie gruntów chlorkami jest wątpliwe z ekologicznego punktu widzenia, ponieważ świat roślinny ulega uszkodzeniu pod ich wpływem, należy je uwzględnić w procesach planowania, zwłaszcza jeśli użycie soli jest nieuniknione z innych powodów np. w zimie do odładzania dróg przez służbę drogową.

8.3 Program dalszych badań

Program dalszych badań przewiduje:

- Zastosowanie metodyki badawczej przedstawionej w niniejszej rozprawie do gruntów wykorzystanych w praktycznych robotach ziemnych o innej technologii podobnie jako to zostało przedstawione na przykładzie nasypów np. do tworzenia poduszek i wypełnień.
- Zastosowanie tej metodologii do gruntów równoziarnistych, ale o innej genezie.
- Z przedstawionej rozprawy wynikają również wnioski szczegółowe, które mogą być przedmiotem dalszych badań, a mianowicie związki funkcyjne pomiędzy parametrami gruntu w warunkach występowania roztworów a stężeniem tego roztworu z zastosowaniem innych funkcji niż kwadratowa np. logarytmicznej lub innej.
- Wybrane do badań zjawiska elektroforezy, które towarzyszą przedmiotowemu dogęszczaniu, można rozszerzyć na bardziej rozbudowane badania eksperymentalne w laboratorium. Dlaczego dla małych wartości stężeń zmierzony potencjał jest największy? Dlaczego uzyskane wartości są dodatnie i ujemne? Jaki jest mechanizm formowania się tego potencjału w warunkach małych stężeń? To zagadnienie w pracy nie miało wpływu na wynik badań, bo potwierdzono, że potencjał dąży do zera ze wzrostem stężenia, natomiast nie wiadomo co jest dokładnie dla małych.

BIBLIOGRAFIA

Literatura

- [1] BAKKER A. C., EMERSON W. W. (1973): The comparative effects of exchangeable calcium, magnesium, and sodium on some physical properties of red-brown earth subsoils. III. The permeability of Shepparton soil and comparison of methods. W: Soil Research. [online], t. 11, nr. 2, s. 159.
- [2] BAYLARD E. M. (1952): Performance study of calcium-chloride-treated roads. W: Highway Research Board Proceedings, nr. 31, s. 336–348.
- [3] BECKER A. (2017) Untersuchungen zu neuartigen und gängigen Methoden der Baugrundertüchtigung, Habilitation. Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- [4] Bez autora. (1935): Salt-stabilized road practice developing rapidly. W: Engineering News Record, 115(1), July 4, s. 11–13.
- [5] BILFINGER R. (1943): Bodenvermörtelung mit bituminösen Bindemitteln und Zement. Volks und Reich Verlag, Berlin.
- [6] BLIGHT G. E. (1976): Migration of subgrade salts damages thin pavements. W: Transportation Engineering Journal of ASCE, Proceedings of the American Society of Civil Engineers., nr. 102, s. 779–791.
- [7] BOLEY C. (2019): Handbuch Geotechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [8] Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V. (2013): Bodenverbesserung Bodenverfestigung mit Kalk.
- [9] CHAPMAN D. L. (1913): LI. A contribution to the theory of electrocapillarity. W: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. [online], t. 25, nr. 148, s. 475–481.
- [10] CLEMMER H. F. (1932): Use of calcium chloride for construction and maintenance. W: Roads and Streets, nr. 75, s. 497–498.
- [11] COLE D. C., LEWIS J. G. (1963): Progress report on effect of soluble salts on stability of compacted soils. Proceedings of the Third Australia-New Zealand

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1960: Proceedings of the Third Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1960. W: Institution of Engineers, Sydney, s. 29–31.
- [12] COLLINGS W. R., STEWART L. C. (1934): Stabilizing Soil-Bound Road Surfaces: Construction and Maintenance. W: Engineering News Record, Vol 112, No. 24, s. 772–775.
- [13] DAS C., BOSE S. (2017): Advanced ceramic membranes and applications. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, ISBN 9781138055407.
- [14] DAVIDSON D. T., HANDY R. L. (1960): Soil stabilization/chlorides. W: K. B. WOODS (ed.): Highway Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, 21/V.
- [15] DHANESH I. S., MOHANDAS T. V. (2016): Effect of bio-enzyme on geotechnical properties of Thonnakkal clay. W: International Journal of Engineering Trends and Technology. [online], t. 36, nr. 9, s. 474–476.
- [16] DOWNEY B. R., ROWAT R. M., ETTINGER L. J. (1939): Progress in use of sodium chloride in road stabilization. W: Highway Research Board Proceedings, nr. 19, s. 559–562.
- [17] DUCLOS A., AMBAIOWEI D., WHEILDON L. (2017): Effectiveness and Benefits of Calcium Chloride Stabilized Road Base: A Township of Woolwich Study.
- [18] FIEDELMAN H. W. (1966): Evaluation of Sodium Chloride-Calcium Chloride Mixture for Dust Control. W: Northern Ohio Geological Society Inc., Second Symposium on Salt, nr. 1, s. 348–351.
- [19] GOUY G. (1910): Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. W: Journal de Physique Théorique et Appliquée. [online], t. 9, nr. 1, s. 457–468.
- [20] GOUY G. (1917): Sur la fonction électrocapillaire. W: Annales de physique. [online], t. 9, nr. 7, s. 129–184.
- [21] GOW A. J., DAVIDSON D. T., SHEELER J. B.: Relative effects of chlorides, lignosulfonates and molasses on properties of a soil-aggregate mix. W: Highway Research Board Bulletin, nr. 282, s. 66–83.

- [22] HAAS W. M., ALKIRE B. D., KADERABEK T. J. (1976): Using additives to improve cold weather compaction. W: Transportation Research Record, nr. 560, s. 57–68.
- [23] HARTGE K.-H., HORN R., BACHMANN J. (2014): Einführung in die Bodenphysik: Mit 24 Tabellen. Schweizerbart, Stuttgart, ISBN 9783510652808.
- [24] HELMHOLTZ H. (1879): Studien über electrische Grenzschichten. W: Annalen der Physik und Chemie. [online], t. 243, nr. 7, s. 337–382.
- [25] HERZOG A. (1960): The use of additives in the stabilization of poorly reacting soils with cement. W: Constructional Review, nr. 9, s. 35–36.
- [26] HOGENTOGLER C. A. (1933): Stabilization of low cost roads by calcium chloride. W: Roads and Streets, nr. 76, s. 359–360.
- [27] HORTA J. C. de O. S. (1985): Salt heaving in the Sahara. W: Géotechnique. [online], t. 35, nr. 3, s. 329–337.
- [28] HORTA J. C. de O. S. (1987): Fourth International Conference on Low-Volume Roads, [at Cornell University, Ithaca, New York, August 16-20, 1987], Transportation research record nr. 1106. National Research Council, Transportation Research Board, Washington, D.C., ISBN 9780309044547.
- [29] JASMUND K., LAGALY G. (1993): Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag, Darmstadt, ISBN 9783798509238.
- [30] JONES D. (2019): Assessment of the Potential for Salt Damage to Asphalt Surfacing when Chloride-Treated Unpaved Roads Are Upgraded to a Sealed Standard. W: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. [online], t. 2673, nr. 12, s. 774–782.
- [31] KÉZDI A. (1979): Stabilized earth roads, Developments in geotechnical engineering nr. 19. Elsevier, Amsterdam a.o, ISBN 9780444997869.
- [32] KÉZDI Á. (1969): Handbuch der Bodenmechanik: Band I, Bodenphysik. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [33] KOEPKE C. (2014) Die Ermittlung charakteristischer Bodenkennwerte der Torfe und Mudden Mecklenburg-Vorpommerns als Eingangsparameter für erdstatische

- Berechnungen nach Eurocode 7 / DIN 1054, Dissertation. Universität Rostock, Rostock.
- [34] KONTOGEORGIS G. M., KIIL S. (2016): Introduction to applied colloid and surface chemistry. Wiley Blackwell, Chichester, West Sussex, ISBN 9781118881217.
- [35] LAY M. (2009): Handbook of road technology. Spon Press, London, ISBN 9780415472654.
- [36] LEES G., ABDELKADER M. O., MAMDANI S. K. (1982): Sodium chloride as an additive in lime-soil stabilisation. W: Highway Engineer, nr. 29, s. 2–8.
- [37] LOOKER C. D., SPENCER W. T., KUSHING J. W., ALLEN H. (1938): Use of Sodium Chloride in Road Stabilization. W: Highway Research Board Proceedings, 18, II, s. 257–274.
- [38] MACHON J. (2015): Wpływ środków powierzchniowoczynnych na gęstość objętościową gruntu. W: U. TUSIŃSKA (ed.): Badania naukowe w zakresie geotechnicznego wspomaganie projektowania: XXII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin, 9 października 2015, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny. Wydział Budownictwa i Architektury. Katedra Geotechniki, Szczecin, s. 69–82.
- [39] MARKS B. D., HALIBURTON T. A. (1970): Effects of Sodium Chloride and Sodium Chloride-Lime Admixtures on Cohesive Oklahoma Soils. W: Highway Research Board Record, nr. 315, s. 102–111.
- [40] MCLELAND C. J. (1964): Sodium Chloride Stabilization Work in Steuben County, Indiana. W: American Road Builders Association Technical Bulletin, nr. 254.
- [41] MEYER Z., PRIESEMANN T., MACHON J. (2018): Wpływ wybranych wodnych roztworów chlorków na właściwości mechaniczne piasków drobnych. W: Inżynieria Morska i Geotechnika, nr. 4, s. 296–302.
- [42] MILLER H. H., SMITH D. N. (1934): Methods for prevention of road failures due to frost. W: Roads and Streets, s. 219–221.
- [43] NETTERBERG F., LOUDON P. A. (1980): Simulation of salt damage to roads with laboratory model experiments. W: Proceedings of the Seventh Regional

- Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Accra, s. 355–361.
- [44] NOLTE O. (1921): Über die Einwirkung von Salzlösungen auf den Boden. W: Die landwirtschaftlichen Versuchsstationen, nr. 98, s. 135–153.
- [45] NOLTE O., SANDER B. (1924): Über die Einwirkung von Salzlösungen auf den Boden: 2. Mitteilung. W: Die landwirtschaftlichen Versuchsstationen, nr. 102, s. 219–225.
- [46] ORTHAUS M. G. (1939): Mit Salz und Lehm verfestigte Straßen: (Bauausführungen in der Hauptstadt Hannover). W: Der Straßenbau, nr. 30, s. 186–188.
- [47] ORTHAUS M. G. (1939): Verfestigung von Erd- und sonstigen Straßen mit Hilfe von Salz und Lehm: (Bauausführungen in Hannover). W: Steinindustrie und Straßenbau, nr. 35, s. 280–285.
- [48] OZIER J. M., MOORE R. K. (1977): Factors affecting unconfined compressive strength of salt-lime-treated clay. W: Transportation Research Record, nr. 641, s. 17–24.
- [49] PECK M., DITTUS H., HOTZ C., VOGEL P. (2020): Straßenbau heute: Band 2 Bodenbehandlung und Tragschichten, Schriftenreihe der Bauberatung Zement Band 2. Verlag Bau + Technik, Erkrath, ISBN 9783764005337.
- [50] ROWAT R. M. (1939): Control of frost heave. W: Highway Research Board Proceedings, nr. 19, s. 464–466.
- [51] RUSHING J. F., HARRISON A., TINGLE J. S. (2005): Evaluation of Application Methods and Products for Mitigating Dust for Lines-of-Communication and Base Camp Operations: Technical Report ERDC/GSL TR-05-9, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- [52] RUSHING J. F., MOORE V. M., TINGLE J. S., MASON Q., MCCAFFREY T. (2005): Dust Abatement Methods for Linesof- Communication and Base Camps in Temperate Climates: Technical Report ERDC/GSL TR-05-23, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- [53] SADEGHI M., TAGHIKHANI V., GHOTBI C. (2010): Measurement and Correlation of Surface Tension for Single Aqueous Electrolyte Solutions. W: International Journal of Thermophysics. [online], t. 31, 4-5, s. 852–859.
- [54] SANTONI R. L., TINGLE J. S., NIEVES M. (2005): Accelerated Strength Improvement of Silty Sand with Nontraditional Additives. W: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Record, No. 1936, s. 34–42.
- [55] SANTONI R. L., TINGLE J. S., WEBSTER S. L. (2002): Stabilization of Silty Sand with Nontraditional Additives. W: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. [online], t. 1787, nr. 1, s. 61–70.
- [56] SCHEFFER F., SCHACHTSCHABEL P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg, ISBN 9783827414441.
- [57] SCHINNER F. (1997): Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenzymatik Band IV: Anorganische Schadstoffe. Springer Berlin Heidelberg, ISBN 9783642643927.
- [58] SCHOLEN D. E. (1992): Non-standard Stabilizers, Washington, DC.
- [59] SCHOLEN D. E. (1995): Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers. W: Proc. 6th Int. Conf. on Low-Volume Roads, s. 252–260.
- [60] SCHULZE E., MUHS H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- [61] SHEERWOOD P. T. (1961): Soil stabilization by the use of chemical admixtures: a review of the present position,. W: Roads and Road Construction.
- [62] SLATE F. O., YALCIN A. S. (1955): Stabilization of bank-run gravel by calcium chloride. W: Highway Research Board Bulletin, nr. 98, s. 21f.
- [63] SLESSER C., NEVITT H. G. (1943): Movement of calcium chloride and sodium chloride in soil. W: Highway Research Board Proceedings, Vol 23, s. 460–468.
- [64] STERN O. (1924): Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht. W: Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, t. 1924, nr. 30, s. 508–516.
- [65] STIPHO A. S. (1985): On the engineering properties of salina soil. W: Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. [online], t. 18, nr. 2, s. 129–137.

- [66] THORNBURN T. H., MURA R. (1969): Stabilization of soils with inorganic salts and bases: A review of the literature. W: Highway Research Board Record, nr. 294, s. 1–22.
- [67] TINGLE J. S., SANTONI R. L. (2003): Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives. W: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. [online], t. 1819, nr. 1, s. 72–84.
- [68] TRIBBLE J. F. (1944): Mechanics of calcium chloride treatments. W: Highway Research Board Proceedings, nr. 24, s. 492–497.
- [69] VOIGT H.-J. (1990): Hydrogeochemie: Eine Einführung in d. Beschaffenheitsentwicklung d. Grundwassers. Springer, Berlin [u.a.], ISBN 978-3-540-51805-1.
- [70] WEINERT H. H., CLAUSS K. A. (1967): Soluble Salts in Road Foundation.: In Proc., 4th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cape Town. W: National Institute for Road Research, Pretoria, s. 213–218.
- [71] WIEGNER G. (1931): Some physico-chemical properties of clays.: I. Base exchange or ionic exchange. W: Journal of the Society of Chemical Industry, nr. 8, s. 65–71.
- [72] WILFORD H. D., DOWNEY B. R., BRIGGS G. F., HOGENTOGLER C. A., KNIGHT J. A., BURGGRAF F. (1938): Use of calcium chloride in road stabilization. W: Highway Research Board Proceedings, 18, II, s. 209–256.
- [73] YODER E. T., KNIGHT J. A. (1947): The effect of calcium chlorite on the compactive effort and water-retention characteristics of soils. W: Highway Research Board Proceedings, nr. 27, s. 490–509.
- [74] YONG R. N., SHEERAN D. E., JANIGA P.: Salt migration and frost heaving of salt-treated soils in view of freezing and thawing. W: : Proceedings of Symposium on Frost Action on Roads, Oslo, 1973. Organisation for Economic Cooperation on Development, Paris, s. 439–450.
- [75] (2008): Zement-Taschenbuch, Zement-Taschenbuch nr. 51. Verl. Bau + Technik, Düsseldorf, ISBN 9783764004996.

Normy i przepisy

- [76] DIN 1164-10 (2013): Zement mit besonderen Eigenschaften_ - Teil_10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [77] DIN 18123 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [78] DIN 18124 (2019): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korndichte – Weithalspyknometer. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [79] DIN 18127 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [80] DIN 18128 (2002): Baugrund; Untersuchung von Bodenproben Bestimmung des Glühverlustes. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [81] DIN 18129 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Kalkgehaltsbestimmung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [82] DIN 18130-1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts Teil 1 : Laborversuche. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [83] DIN 18134 (2012): Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [84] DIN 18135 (2012): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [85] DIN 18137-2 (2011): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [86] DIN 18137-3 (2002): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherfesuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [87] DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [88] DIN 18506 (2002): Hydraulische Boden- und Tragschichtbinder - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

- [89] DIN 932-2 (1999): Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 2: Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [90] DIN EN 13286-2 (2013): Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes – Proctorversuch. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [91] DIN EN 13925-1 (2003): Zerstörungsfreie Prüfung_ - Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien - Teil 1: Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 13925-1:2003. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [92] DIN EN 197-1 (2011): Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2011. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [93] DIN EN 459-1 (2015): Baukalk - Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 459-1:2015. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [94] DIN EN ISO 14688-1 (2018): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [95] DIN EN ISO 14688-2 (2013): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [96] DIN EN ISO 17892-11 (2019): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit (ISO 17892-11:2019);. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [97] DIN EN ISO 17892-5 (2017): Geotechnische Erkundung und Untersuchung_ - Laborversuche an Bodenproben - Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung (ISO 17892-5:2017); Deutsche Fassung EN ISO 17892-5:2017. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [98] DIN EN ISO 22476-9 (2021): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 9: Flügelscherversuche. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

-
- [99] DIN ISO 10390 (2005): Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [100] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2017): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau: ZTV E-StB 17, FGSV R1 - Regelwerke nr. 599. FGSV Verlag GmbH, Köln.
- [101] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2021): Merkblatt über Bodenbehandlungen mit Bindemitteln: M BmB, FGSV R 2 nr. 551. FGSV Verlag GmbH, Köln.
- [102] ISO 13099-1 (2012): Colloidal systems — Methods for zetapotential determination — Part 1: Colloidal systems — Methods for zetapotential determination — Part 1: Electroacoustic and electrokinetic phenomena. International Organization for Standardization, Geneva.
- [103] ISO 13099-2 (2012): Colloidal systems — Methods for zetapotential determination — Part 2: Optical methods. International Organization for Standardization, Geneva.
- [104] PN-EN ISO 17892-5 (2017): Rozpoznanie i badania geotechniczne - Badania laboratoryjne gruntów - Część 5: Badanie edometryczne gruntów. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 3.1 Słabo stabilne podłoże (po lewej) Zastąpienie gruntu lub zasypianie drobnym piaskiem (po prawej). Źródło: Państwowy Urząd Górnictwa, Energetyki i Geologii, Centrum Geologii w Hanowerze.....	17
Rys. 3.2 Autostrada federalna A28 w Dolnej Saksonii. Źródło: Państwowy Urząd Górnictwa, Energetyki i Geologii, Centrum Geologii w Hanowerze.....	18
Rys. 3.3 Luźno ułożona (po lewej) i gęsto ułożona (po prawej) struktura ziaren żwiru i piasku [7]	19
Rys. 3.4 Oznaczenie kształtu (zbliżonych do kulistego) zwartych ziaren [60] (wolny przekład).....	19
Rys. 3.5 Powstawanie napięcia powierzchniowego pomiędzy dwiema sferami połączonymi meniskiem cieczy [32].....	20
Rys. 3.6 Zależność między wielkością ziarna, liczbą ziaren i całkowitą powierzchnią przy rozbiciu kuli o promieniu $r = 1$ cm (po lewej) [56] Zwiększenie objętości piasku podczas mieszania w zależności od zawartości wody (po prawej) [32].....	21
Rys. 3.7 Płaszczyzna przekroju w gruncie (po lewej) naprężenia w trzech stanach skupienia w gruncie (po prawej) [32]	22
Rys. 3.8 Interakcja molekularna między sorbentem a wodą [7].....	24
Rys. 3.9 Model podwójnej warstwy wg. STERNA 1924 [33]	25
Rys. 3.10 Siły działające na powierzchnię cząstki jako funkcja odległości przy niskim stężeniu soli (po lewej) i wysokim stężeniu soli (po prawej) [23]...	26
Rys. 5.1 Badania w naturze w Moorburgu w Dolnej Saksonii w firmie KOCH GMBH	41
Rys. 5.2 Planowanie geometrii pól testowych w Moorburgu.....	48
Rys. 5.3 Geometria pola pomiarowego w Moorburgu	48
Rys. 5.4 Przygotowanie próbek roztworów chlorków na przykładzie roztworu NaCl	49
Rys. 5.5 Przygotowanie pól testowych: spulchnione pola testowe (u góry po lewej), nawilżone pola testowe (u góry po prawej), ponowne spulchnianie nawilżonych pól testowych (na dole po lewej), zagęszczanie pól testowych (na dole po prawej)	50
Rys. 5.6 Badanie płytą statyczną w Moorburgu	51
Rys. 6.1 Przygotowanie próbek za pomocą dzielnika RT 75 firmy RETSCH.....	55
Rys. 6.2 Przykłady przygotowania roztworów z $AlCl_3$ do badań Proctora.....	64
Rys. 6.3 Urządzenie Proctora z cylindrem testowym.....	66
Rys. 6.4 Próbką po zagęszczeniu po wyjęciu z cylindra Proctora.....	66
Rys. 6.5 Przygotowanie próbek	80
Rys. 6.6 Próbkę gruntu w pierścieniu edometru.....	80
Rys. 6.7 Wilgotne gąbki (np. H_2O) jako środek zapobiegający wysychaniu badanej próbki	81
Rys. 6.8 Wykres obciążenie-osiadanie	82
Rys. 6.9 Przygotowanie próbek do badań wytrzymałości na ścinanie	88
Rys. 6.10 pojemnik aparatu bezpośredniego ścinania z próbką	89

Rys. 6.11 Aparaty bezpośredniego ścinania (od lewej do prawej; bez pojemnika; z pojemnikiem; w czasie trwającej próby ścinania)	89
Rys. 6.12 Siły działające na próbę podczas ścinania (po lewej), krzywa ścinania przy małej i dużej gęstości w powiązaniu z osiadaniem próbki (po prawej)	91
Rys. 6.13 Próbki wyjęte z aparatu bezpośredniego ścinania po pomiarze	91
Rys. 6.14 Naprężenia (z lewej), kąta tarcia (z prawej)	92
Rys. 6.15 Komora do badania wodoprzepuszczalności, fotografia (po lewej), szkic (po prawej)	99
Rys. 6.16 Aparat wodoprzepuszczalności (z lewej), waga do mierzenia ilości przepływającego roztworu (z prawej)	100
Rys. 6.17 Próbki zawiesin, z NaCl (po lewej), H ₂ O i CaCl ₂ (w środku), AlCl ₃ (po prawej)	108
Rys. 6.18 Miernik potencjału zeta ZETAMASTER firmy MALVERN PANALYTICAL (z lewej), laser miernika potencjału zeta (z prawej)	109
Rys. 6.19 Wysoki potencjał zeta przy niskim stężeniu (po lewej), niski potencjał zeta przy wysokim stężeniu (po prawej)	111
Rys. 7.1 Przykładowy przekrój nasypu autostrady federalnej BAB – A28	113
Rys. 7.2 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie bezpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego wodą	115
Rys. 7.3 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie bezpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego roztworem NaCl	116
Rys. 7.4 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie be-zpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego roztworem CaCl ₂	117
Rys. 7.5 Obliczenia stateczności skarp z parametrami określonymi w teście w aparacie be-zpośredniego ścinania dla gruntu piaszczystego nasączonego AlCl ₃	118

SPIS WYKRESÓW

Wykres 3.1 Zakresy przydatności spoiw na podstawie krzywej uziarnienia [49], (tłumaczenie i interpretacja własna)	28
Wykres 5.1 Krzywa uziarnienia użytych próbek materiału wydobytego z dna zbiornika wodnego w Moorburgu.....	43
Wykres 5.2 Dyfraktogram badanych próbek gruntu z Moorburga.....	45
Wykres 5.3 Wyniki pomiarów płytą statyczną.....	52
Wykres 6.1 Krzywa uziarnienia użytych próbek materiału wydobytego z dna zbiornika wodnego	56
Wykres 6.2 Dyfraktogram badanych próbek gruntu w laboratorium.....	58
Wykres 6.3 Stężenie potrzebnych roztworów NaCl, CaCl ₂ i AlCl ₃ w celu uzyskania odpowiedniej zawartości chlorku w piasku	65
Wykres 6.4 Przebieg krzywej Proctora z nawilżaniem wodą bez dodatków i energią zagęszczania 0,59 [MNm/m ³] z zaznaczeniem optymalnej zawartości wody i krzywych całkowitego nasycenia.....	68
Wykres 6.5 Porównanie gęstości w zależności od stężenia.....	70
Wykres 6.6 Energia zagęszczania w liniowej zależności od liczby uderzeń n ₁ na warstwę	72
Wykres 6.7 Uśrednione krzywe Proctora dla próbek gruntu zwilżonych wodą bez dodatków chlorków w zależności od energii zagęszczania	73
Wykres 6.8 Uśrednione krzywe Proctora dla próbek gruntu zwilżonych 0,3 [%] roztworem chlorku glinu AlCl ₃ w zależności od energii zagęszczania	75
Wykres 6.9 Porównanie gęstości Proctora ρ _{Pr} w zależności od energii zagęszczania W	76
Wykres 6.10 Porównanie wilgotności optymalnej w _{opt} w zależności od energii zagęszczania W	77
Wykres 6.11 Zestawienie odkształcenia względnego próbek o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m ³] w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu c = 0,3 [%] oraz wodą	83
Wykres 6.12 Zestawienie odkształcenia względnego próbek o gęstości początkowej 1,75 [Mg/m ³] w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu c = 0,3 [%] oraz wodą	83
Wykres 6.13 Zestawienie edometrycznych modułów ściśliwości pierwotnej w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu c = 0,3 [%] oraz wodą o gęstości początkowej 1,65 [Mg/m ³]	85
Wykres 6.14 Zestawienie edometrycznych modułów ściśliwości pierwotnej w zależności od obciążenia σ dla próbek nawilżonych roztworami o stężeniu c = 0,3 [%] oraz wodą o gęstości początkowej 1,75 [Mg/m ³]	86
Wykres 6.15 Zależność naprężenia ścinającego od normalnego dla próbek bez dodatków chlorków.....	93
Wykres 6.16 Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej ρ _d = 1,65 [Mg/m ³] od obciążenia σ w [N/cm ²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,1 [%] oraz wody	94
Wykres 6.17 Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej ρ _d = 1,65 [Mg/m ³] od obciążenia σ w [N/cm ²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,2 [%] oraz wody	95

Wykres 6.18 Zestawienie wytrzymałości próbek na ścinanie τ o gęstości początkowej $\rho_d = 1,65$ [Mg/m ³] od obciążenia σ w [N/cm ²] dla próbek roztworów o stężeniu 0,3 [%] oraz wody	96
Wykres 6.19 Różnica kąta tarcia [°] - Stężenie roztworów c [%]	98
Wykres 6.20 Uśrednione wartości przepływu dest. H ₂ O oraz roztworów	101
Wykres 6.21 Współczynnik filtracji dla poszczególnych pomiarów	103
Wykres 6.22 Krzywa uziarnienia czystego SiO ₂	107
Wykres 6.23 Potencjał zeta ζ [mV] - Zawartość chlorków w roztworze c [%].....	110

SPIS TABEL

Tabela 3.1 Rodzaj spoiwa w zależności od rodzaju gruntu	29
Tabela 5.1 Średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia	43
Tabela 5.2 Skład mineralogiczny	45
Tabela 5.3 Obliczone wyniki pomiarów płytą statyczną E_{v1} , E_{v2} i stosunek E_{v2} / E_{v1}	53
Tabela 6.1 Średnice charakterystyczne d_{10} , d_{30} , d_{60} krzywej uziarnienia	56
Tabela 6.2 Skład mineralogiczny	57
Tabela 6.3: Zasolenie próbki gruntu	60
Tabela 6.4 Parametry chlorku sodu	61
Tabela 6.5 Parametry chlorku wapnia	61
Tabela 6.6 Parametry chlorku glinu	62
Tabela 6.7 Zawartość wody w próbkach cząstkowych do eksperymentów Proctora bez dodatków	63
Tabela 6.8 Wymiary i dane cylindra Proctora	66
Tabela 6.9 Liczba uderzeń n_1 na warstwę gruntu	72
Tabela 6.10 Skład procentowy sześciowodnego chlorku glinu	79
Tabela 6.11 Zawartość wody w próbce gruntu do badań z dodatkiem sześciowodnego chlorku glinu	79
Tabela 6.12 Obliczenie obciążenia próbek σ	81
Tabela 6.13 Skład procentowy hydratów, udział chlorków i wody w hydracie	88
Tabela 6.14 Obliczenie drogi ścinania	90
Tabela 6.15 Zestawienie wyników testu $\rho_d = 1,65$ [Mg/m^3] od obciążenia σ w [N/cm^2] dla próbek roztworów o stężeniu 0,1 [%]	94
Tabela 6.16 Zestawienie wyników testu $\rho_d = 1,65$ [Mg/m^3] od obciążenia σ w [N/cm^2] dla próbek roztworów o stężeniu 0,2 [%]	95
Tabela 6.17 Zestawienie wyników testu $\rho_d = 1,65$ [Mg/m^3] od obciążenia σ w [kPa] dla próbek roztworów o stężeniu 0,3 [%]	97
Tabela 6.18 Spadek kąta tarcia spowodowany dodatkiem chlorków	97
Tabela 6.19 Parametry roztworów użytych do badań przepuszczalności	101
Tabela 6.20 Uśrednione wartości k_f dla wszystkich pomiarów	104
Tabela 6.21 Proporcje objętości ciała stałego do roztworów o różnych stężeniach	107
Tabela 6.22 Zmienione proporcje objętości ciała stałego i stężeń roztworów chlorków	108
Tabela 6.23 Potencjał zeta ζ [mV]	111
Tabela 6.24 Zachowanie stabilności [13]	112
Tabela 7.1 Podsumowanie wyników obliczeń stateczności skarp zbudowanych z piasku	119