

URSZULA KOŁODZIEJCZYK\*, MICHAŁ CŹWIĄKAŁA\*\*

## DYNAMIKA WZNIOSU KAPILARNEGO WODY I WODNYCH ROZTWORÓW $\text{CaCl}_2$ I $\text{NaCl}$ W NASYPACH DROGOWYCH

### *Streszczenie*

Jednym z negatywnych zjawisk naturalnych jest wysadzinowość gruntów. Okazuje się, że można ją skutecznie ograniczyć poprzez zmniejszenie wysokości wzniosu kapilarnego wody gruntowej. W pracy przedstawiono model dynamiki podsiąku kapilarnego w zależności od rodzaju gruntu zalegającego w nasypie drogowym, a także – rodzaju i stężenia roztworu migrującego w nasyp drogowy. Badania przeprowadzono na kruszywie naturalnym występującym w trzech złożach zlokalizowanych w okolicy Zielonej Góry, różniących się rodzajem kruszywa i jego genezą. Analizę wzniosu kapilarnego odniesiono do genezy kruszywa oraz rodzaju i stężenia kapilującego związku. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci analizy wariancji trójczynnikowej, rodzaju i stężenia związku chemicznego, typu złoża oraz wielkości frakcji kruszywa. Przeprowadzone badania wykazały, że największą (maksymalną) wysokość wzniosu kapilarnego wykazuje woda gruntowa. Natomiast nasycenie wód gruntowych związkami chemicznymi, stosowanymi w zimowym utrzymaniu dróg (np.  $\text{CaCl}_2$  lub mieszanką  $\text{NaCl}$  z  $\text{CaCl}_2$  w stosunku wagowym np. 4:1) oraz wzrost stężenia tych związków (od 5% do 10%) powoduje znaczne obniżenie wzniosu kapilarnego i – tym samym – wysadzinowości gruntów.

**Słowa kluczowe:** kapilarność gruntów, wysadzinowość gruntów, zimowe utrzymanie dróg

---

\* Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Inżynierii Środowiska; Zakład Hydrologii i Geologii Stosowanej

\*\* Wapeco Sp. z o.o.; Zakład Geotechniki; Warszawa

## Wstęp

Nowoczesne projektowanie nawierzchni drogowych powinno przede wszystkim opierać się na prawidłowym rozpoznaniu i przygotowaniu podłoża gruntowego zalegającego poniżej kolejnych warstw konstrukcji jezdni drogowej. Dobrze przygotowane podłoże gruntowe drogi powinno bowiem gwarantować odpowiednią nośność i – w razie konieczności – pełnić funkcję izolującą jezdnię od niekorzystnych warunków gruntowych [Ćwiakała 2007]. Umiejętne ingerowanie w procesy zachodzące w podłożu gruntowym może przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa użytkowników drogi.

Warunki bezpieczeństwa – niezależnie od warunków atmosferycznych – powinna również spełniać wierzchnia warstwa jezdni, co jest szczególnie istotne w okresie zimowym. Warstwa ta budowana jest zazwyczaj z mieszanek mineralno – asfaltowych, bądź mieszanek betonowych – w zależności od funkcjonalnej klasyfikacji drogi oraz jej kategorii ruchu.

Wskutek działania niekorzystnych czynników atmosferycznych, konieczne staje się wykonanie efektywnych prac służących ograniczeniu zakłóceń w ruchu drogowym, spowodowanych m.in. śliskością jezdni. Jest to możliwe poprzez wprowadzanie nowoczesnych technik utrzymywania dróg, bardziej operatywnych i skuteczniejszych metod odśnieżania i usuwania śliskości zimowej na nawierzchniach drogowych, a także – wcześniejsze zapobieganie ujemnym oddziaływaniom zjawisk natury na stan dróg i warunki ruchu.

Do najczęstszych zabiegów stosowanych podczas zimowego utrzymania dróg [Stypułkowski 2000, Ząbczyk 2006] należą:

- odśnieżanie – usuwanie śniegu z jezdni i poboczy dróg oraz obiektów towarzyszących (zatok autobusowych, parkingów, miejsc obsługi podróżnych itp.),
- bierna osłona dróg – niedopuszczanie do nawiewania śniegu na korpus drogowy za pomocą siatek z tworzywa sztucznego lub płótków drewnianych, a także zasłon naturalnych (żywopłótów, pasów zieleni) lub specjalnie formowanych wałów śnieżnych,
- przygotowanie, gromadzenie oraz przechowywanie materiałów zapobiegających i usuwających śliskość zimową,
- usuwanie śliskości zimowej, oparte o stosowanie środków chemicznych oraz materiałów uszorstniających.

Dotychczasowe obserwacje wskazują, że stosowanie mechanicznych zabiegów podczas zimowego utrzymania dróg nie daje zadowalających rezultatów. Na nawierzchni jezdni zazwyczaj pozostaje cienka i bardzo śliska warstwa śniegu, a całkowite usunięcie śliskości następuje dopiero po zastosowaniu materiałów uszorstniających, do których należą:

- piasek o uziarnieniu do 2 mm,
- kruszywo naturalne o uziarnieniu do 4 mm,

- kruszywo kamienne łamane o uziarnieniu 2-4 mm,
- żużel wielkopiecowy kawałkowy,
- kruszywo niesortowane o uziarnieniu do 4 mm,
- żużel kotłowy (paleniskowy),
- kruszywo niesortowane o uziarnieniu do 8 mm,
- jednorodne mieszaniny kruszyw z solą kamienną o składzie wagowym 95 ÷ 97% kruszywa + 5 ÷ 3% soli.

Mimo, iż Polska jest krajem o dużych zasobach kruszyw [Bilans zasobów... 2005], zastosowanie wyłącznie tych materiałów do likwidowania śliskości jezdni okazuje się niewystarczające. Przy dużym natężeniu ruchu i pod wpływem silnego wiatru są one bowiem zdmuchiwane z jezdni lub układają się w nieregularne pryzmy [Dębski 1974, Fortuna 1981]. W związku z tym, oprócz kruszyw, powszechnie stosowane są dodatkowo związki chemiczne, które powodują wtapienie w lód ziarenek kruszywa i – tym samym – zapobiegają ich zdmuchiowaniu z jezdni.

Do usuwania i łagodzenia skutków śliskości zimowej stosowane są – jako dodatki do kruszywa – następujące środki chemiczne:

- chlorek sodu (NaCl),
- sól drogową, będącą mieszaniną ok. 97% chlorku sodu (NaCl) + 2,5% chlorku wapnia (CaCl<sub>2</sub>) + 0,2% heksacyjanożelazianu potasu [K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>],
- solanka – roztwór chlorku sodu (NaCl) lub chlorku wapnia (CaCl<sub>2</sub>) o stężeniu 20 ÷ 25%,
- nawilżona sól, będąca mieszaniną 30% solanki + 70% chlorku sodu (NaCl),
- techniczny chlorek wapnia (77 ÷ 80% CaCl<sub>2</sub>),
- chlorek magnezu (MgCl<sub>2</sub>),
- mieszanina chlorku sodu (NaCl) z chlorkiem wapnia (CaCl<sub>2</sub>) w stosunku wagowym 4:1, 3:1 bądź 2:1,
- mieszanina chlorku sodu (NaCl) z chlorkiem magnezu (MgCl<sub>2</sub>) w stosunku wagowym 4:1, 3:1 bądź 2:1,
- mrówczan potasu (HCOOK) i octan potasu (CH<sub>3</sub>COOK) – w Finlandii,
- octan magnezu [(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Mg], octan wapnia [(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Ca], odpady z przetwórstwa buraków cukrowych i kukurydzy, mocznik (H<sub>2</sub>NCONH<sub>2</sub>) oraz alkohole (C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>OH) – w USA.

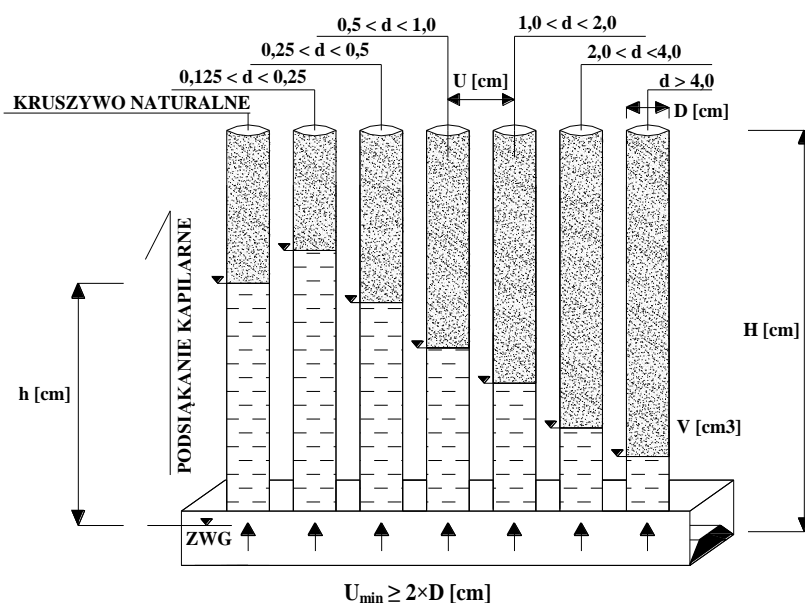
Podczas eksploatacji dróg związki te migrują w podłoże gruntowe, powodując zmiany geochemiczne, przejawiające się m.in. w intensywności ruchu wód kapilarnych [Kowalski 1988].

## Metodyka badań

Badania przeprowadzone przez autorów pracy dotyczyły wpływu wybranych środków chemicznych na intensywność procesów kapilarności. Do badań użyto: wody ( $H_2O$ ) – traktowanej jako wzorzec, 5 i 10% chlorku wapnia ( $CaCl_2$ ) oraz 5 i 10% mieszaniny chlorku sodu ( $NaCl$ ) z chlorkiem wapnia ( $CaCl_2$ ) – w proporcjach 80%  $NaCl$  + 20%  $CaCl_2$ .

Badaniom kapilarności poddano grunty o naturalnym uziarnieniu oraz poszczególne frakcje kruszyw:  $0,125 \leq d < 0,25$  mm;  $0,25 \leq d < 0,5$  mm;  $0,5 \leq d < 1,0$  mm;  $1,0 \leq d < 2,0$  mm;  $2,0 \leq d < 4,0$  mm i  $d \geq 4,0$  mm.

Stanowisko do badań kapilarności składało się z zestawu przezroczystych rur o średnicy  $D = 5,6$  cm, wysokości  $H = 50$  cm i objętości  $V = 1231$  cm<sup>3</sup>, wypełnionych warstwami zagęszczonego kruszywa i umieszczonych w zbiorniku wypełnionym wodą lub roztworem danego związku chemicznego (rys. 1).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Test stand diagram

Ponieważ średnice rur zastosowanych w badaniach były mniejsze od średnic cylindrów normowych, uzyskanie wymaganej normowo jednostkowej energii zagęszczania ( $0,59$  J/cm<sup>3</sup>) gruntu umieszczonego w kolejnych rurach wymagało ustalenia odpowiedniej metodyki zagęszczania. Wykonane obliczenia [Ćwiakła 2009] wykazały, iż uzyskanie jednostkowej energii zagęszczania  $E_{jedn} = 0,59$  J/cm<sup>3</sup>

w rurze o objętości  $V = 1231 \text{ cm}^3$  wymaga następujących warunków: masy ubijaka  $m = 2,75 \text{ [kg]}$ , wysokości opadania ubijaka  $s = 30 \text{ [cm]}$  oraz całkowitej ilości uderzeń ubijaka  $n = 90 \text{ [-]}$ . Zatem, ze względu na wysokość rury  $H = 50 \text{ cm}$ , materiał gruntowy zagęszczano w pięciu warstwach o wysokości  $10 \text{ cm}$ , a każdą warstwę zagęszczano poprzez 18 uderzeń.

Po odpowiednim zagęszczeniu gruntu przeprowadzono kolejne cykle badań kapilarności. Każdy cykl badań wykonywano na świeżej próbce kruszywa. W pierwszym cyklu badań do zbiornika (kuwety) wiano wodę destylowaną, a w następnych – różne związki chemiczne o odpowiednich stężeniach. W każdym badaniu utrzymywano stały poziom cieczy w zbiorniku (kuwecie). Zasadnicze badanie polegało na pomiarze prędkości i wysokości wzniosu kapilarnego w poszczególnych rurach, tzn. w kruszywie naturalnym oraz poszczególnych jego frakcjach, przy czym odczyty wysokości wzniosu kapilarnego wykonywano w następujących odstępach czasu: 5", 10", 15", 30", 60", 2', 3', 4', 5', 10', 15', 30', 1h, 2h, 5h, 8h, 16h, 24h, 48h i 72h. W kolejnych cyklach do badań użyto różnych stężeń kapilujących związków (5 i 10% chlorku wapnia oraz 5 i 10% mieszaniny chlorku sodu z chlorkiem wapnia), przy czym każde badania kapilarności przeprowadzono analogicznie jak w przypadku wody destylowanej. Podczas badań stosowano trzykrotne powtórzenie każdej analizy.

Poszczególne cykle badań przeprowadzono równolegle dla kruszyw pobranych z trzech złóż zlokalizowanych w okolicy Zielonej Góry, różniących się genezą, wskaźnikiem różnoziarnistości oraz zawartością cząstek pyłowo – ilowych. Poszczególnym badaniom poddano:

- kruszywo ze złoża Chynów – piasek gliniasty pochodzenia fluwiogłajnego, o wysokiej zawartości cząstek pyłowo – ilowych ( $f_{\pi} + f_i > 15\%$ ) i niskim wskaźniku różnoziarnistości ( $U < 3$ ),
- kruszywo ze złoża Józefowo – pospółka gliniasta, pochodzenia fluwiogłajnego, o niskiej zawartości cząstek pyłowo – ilowych ( $f_{\pi} + f_i < 15\%$ ) i wysokim wskaźniku różnoziarnistości ( $U > 5$ ),
- kruszywo ze złoża Nowogród Bobrzański – pospółka pochodzenia rzeczno-go, niemal pozbawiona frakcji pyłowo – ilowych ( $f_{\pi} + f_i < 1\%$ ) ale o wysokim wskaźniku różnoziarnistości ( $U > 5$ ).

## Wyniki badań

W celu sprawdzenia istotności wpływu czynników głównych (typ złoża, wielkość frakcji kruszywa, rodzaj i stężenie związku chemicznego) oraz ich kombinacji na zróżnicowanie wartości maksymalnego wzniosu kapilarnego, przeprowadzono analizę wariancji w układzie trójczynnikiem z interakcjami drugiego rzędu. Za pomocą testu analizy wariancji sprawdzono hipotezę zerową, mówiącą o braku wpływu badanego czynnika lub interakcji czynników na

wartość analizowanej cechy. Interakcje wskazywały na występowanie (lub brak) dodatkowego wpływu pewnej kombinacji czynników na badaną cechę statystyczną [Sobczyk 2008], jaką w tym przypadku była maksymalna wysokość wzniosu kapilarnego.

W celu ustalenia, który z badanych czynników istotnie (bądź bardzo istotnie) wpływa na zróżnicowanie badanej cechy obserwacyjnej (wysokości wzniosu kapilarnego), autorzy opracowania posłużyli się wartością poziomu istotności – „p”. Za graniczną (krytyczną) wartość poziomu istotności przyjęto następujące kryterium:

- $p \leq 0,05$  – dany czynnik istotnie wpływa na badaną cechę statystyczną,
- $p \leq 0,01$  – dany czynnik bardzo istotnie wpływa na badaną cechę statystyczną.

Do stwierdzenia istotności poszczególnych czynników oraz ewentualnych ich interakcji wykorzystano oprogramowanie *STATISTICA*. Porównanie istotności różnic między wartościami maksymalnego wzniosu kapilarnego w odniesieniu do takich czynników jak: geneza złoża, frakcja kruszywa oraz rodzaj i stężenie kapslującego związku chemicznego ( $\text{CaCl}_2$  oraz mieszaniny  $\text{NaCl}$  z  $\text{CaCl}_2$ ) zestawiono w tab. 1 i tab. 2. Natomiast porównanie istotności różnic między wartościami podsiąku kapilarnego w zależności od genezy złoża i frakcji kruszywa, gdzie jako związek chemiczny zastosowano wodę destylowaną ( $\text{H}_2\text{O}$ ), przedstawiono w tab. 3.

*Tabela 1. Wyniki trójczynnikowej analizy wariancji wzniosu kapilarnego roztworu  $\text{CaCl}_2$  w zależności od stężenia roztworu  $\text{CaCl}_2$  oraz rodzaju złoża i wielkości frakcji kruszywa*

*Table 1. The results of three factor analysis of capillary rise variance of  $\text{CaCl}_2$  solution in accordance with the concentration of  $\text{CaCl}_2$  solution, a sort of deposit and a size of aggregate fraction*

Źródło zmienności	Suma kwadratów odchyień [SS]	Liczba stopni swobody	Średnie kwadraty odchyień [MS]	Wartość statystyki F-Snedecora	Poziom istotności [p]
<b>Czynniki główne:</b>					
STĘŻENIE	3905	1	3905	157,01	0,000
ZŁOŻE	53587	2	26794	1077,22	0,000
FRAKCJA	238040	6	39673	1595,04	0,000
<b>Interakcje:</b>					
ZŁOŻE*STĘŻENIE	50	2	25	1,00	0,40
ZŁOŻE*FRAKCJA	14955	12	1246	50,10	0,000
STĘŻENIE*FRAKCJA	1071	6	178	7,18	0,002

Współczynnik korelacji  $R = 99,95\%$ ,  $p < 0,001$

Tabela 2. Wyniki trójczynnikowej analizy wariancji wzniosu kapilarnego roztworu mieszaniny NaCl z CaCl<sub>2</sub> w zależności od stężenia roztworu mieszaniny NaCl z CaCl<sub>2</sub> oraz rodzaju złoża i wielkości frakcji kruszywa

Table 2. The results of three factor analysis of capillary rise variance of mixture of NaCl with CaCl<sub>2</sub> solution in accordance with the concentration of mixture of NaCl with CaCl<sub>2</sub> solution, a sort of deposit and a size of aggregate fraction

Źródło zmienności	Suma kwadratów odchyłeń [SS]	Liczba stopni swobody	Średnie kwadraty odchyłeń [MS]	Wartość statystyki F-Snedecora	Poziom istotności [p]
<b>Czynniki główne:</b>					
STĘŻENIE	48945	2	24473	636,84	0,000
ZŁOŻE	3905	1	3905	101,63	0,000
FRAKCJA	270647	6	45108	1173,81	0,000
ZŁOŻE*STĘŻENIE	11	2	5	0,14	0,87
ZŁOŻE*FRAKCJA	15382	12	1282	33,36	0,000
STĘŻENIE*FRAKCJA	715	6	119	3,10	0,05

Współczynnik korelacji R = 99,93%, p < 0,001

Tabela 3. Wyniki dwuczynnikowej analizy wariancji dla wzniosu H<sub>2</sub>O w zależności od rodzaju złoża i wielkości frakcji kruszywa

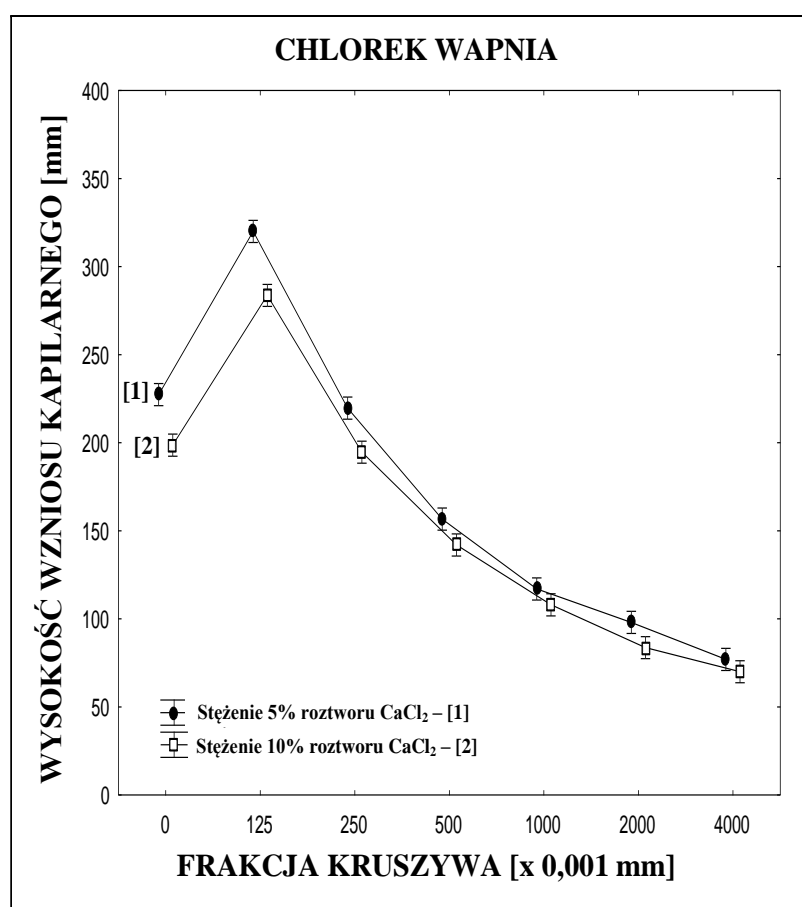
Table 3. The results of two factor analysis of variance for H<sub>2</sub>O rise in accordance with a sort of deposit and a size of aggregate fraction

Źródło zmienności	Suma kwadratów odchyłeń [SS]	Liczba stopni swobody	Średnie kwadraty odchyłeń [MS]	Wartość statystyki F-Snedecora	Poziom istotności [p]
<b>Czynniki główne:</b>					
ZŁOŻE	34540	2	17270	21,17	0,000
FRAKCJA	294280	6	49047	60,12	0,000

Współczynnik korelacji R = 98,54%, p < 0,001

Z powyższej analizy wynika, iż w każdym analizowanym przypadku (CaCl<sub>2</sub>, mieszaniny NaCl z CaCl<sub>2</sub> oraz H<sub>2</sub>O) wpływ czynników głównych na zróżnicowanie wartości maksymalnego wzniosu kapilarnego jest wysoce istotny (p < 0,001), czyli znacząco różnicuje wysokość wzniosu kapilarnego. Ponadto stwierdzono dodatkowo istotne statystycznie interakcje pomiędzy stężeniem roztworu kapilującego i frakcją kruszywa (p=0,002 ≤ 0,01; p=0,05 ≤ 0,05). Oznacza to, iż dobór odpowiedniego stężenia związku chemicznego (5% albo 10%) do odpowiedniej frakcji kruszywa (bez względu na typ złoża) różnicuje znacząco wartość maksymalnego podsiąku kapilarnego. Stąd też, maksymalne wartości podsiąku kapilarnego, uzyskane dla różnych stężeń kapilujących roz-

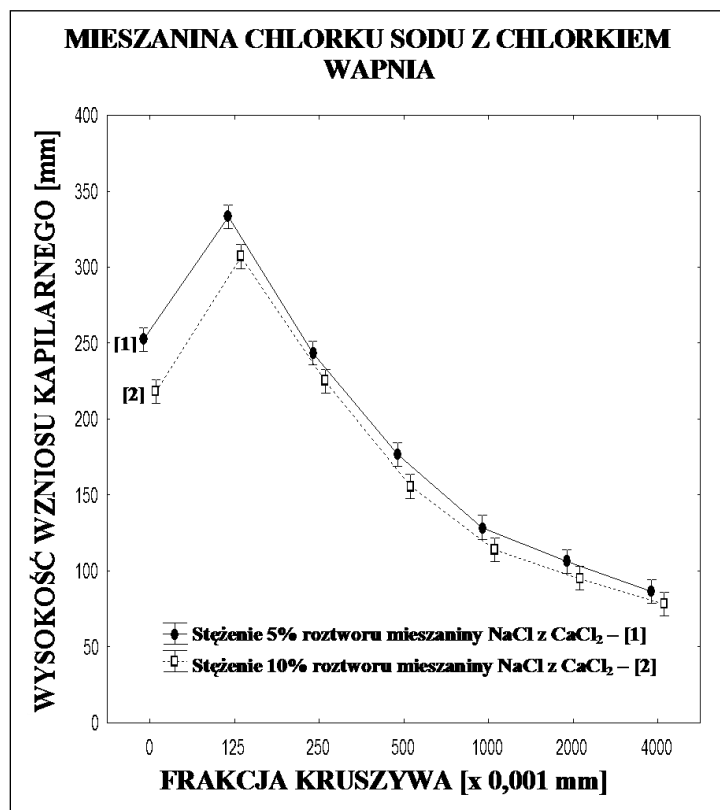
tworów w danej frakcji kruszywa, mogą być albo bardzo różne, albo bardzo zbliżone. Na przykład, analizując zależność wysokości wzniosu kapilarnego od konfiguracji: stężenie związku chemicznego – frakcja kruszywa (rys. 2 i 3) stwierdzono, iż najlepszy efekt doboru stężenia związku (5% albo 10%) dla zróżnicowania wysokości podsiąku kapilarnego uzyskujemy dla frakcji naturalnej (0) oraz dla frakcji najdrobniejszej ( $d = 0,125$  mm). Natomiast przy grubszych frakcjach ( $d > 0,25$  mm), efekt doboru odpowiedniego stężenia związku dla danej frakcji kruszywa nie daje już tak wyraźnego zróżnicowania podsiąku kapilarnego.



Rys. 2. Wysokość wzniosu kapilarnego w zależności od konfiguracji stężenia związku chemicznego i frakcji kruszywa

Fig. 2. The height of capillary rise in accordance with configuration of the concentration of a chemical solution and the aggregate fraction

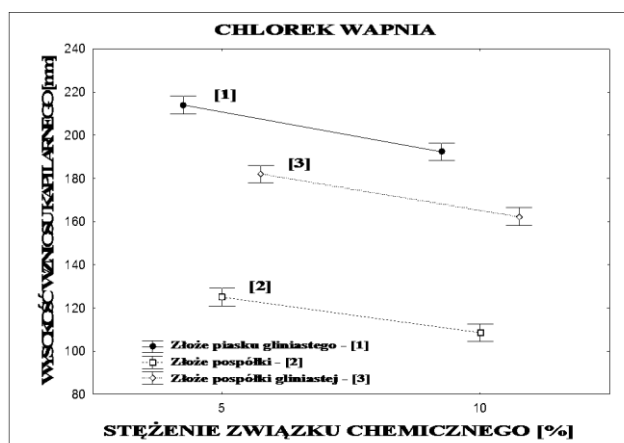




Rys. 3. Wysokość wzniosu kapilarnego w zależności od konfiguracji stężenia związku chemicznego i frakcji kruszywa

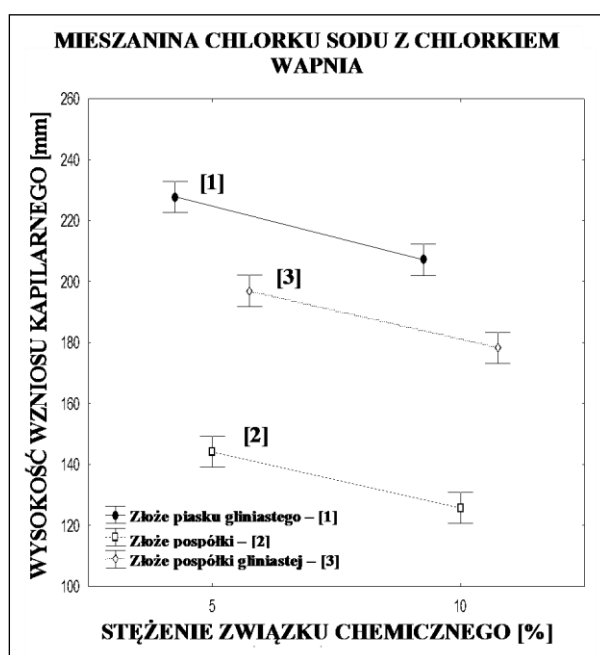
Fig. 3. The height of capillary rise in accordance with configuration of the concentration of a chemical solution and the aggregate fraction

Pomimo występowania bądź braku interakcji pomiędzy czynnikami głównymi, niezaprzeczalnym faktem jest to, iż uzyskanie najmniejszego podsiąku kapilarnego następuje przy zastosowaniu 10% związku chemicznego (bez względu na rodzaj związku) w przypadku najgrubszej frakcji ( $d > 4,0$  mm) i to bez względu na rodzaj złoża. Na rys. 4 i 5 przedstawiono pewne konfiguracje pomiędzy rodzajem złoża, a stężeniem związku chemicznego. Wynika z nich, iż bez względu na rodzaj stężenia związku, najmniejsze podsiąki kapilarne uzyskujemy dla złoża przemytego (Nowogród Bobrzański), a ponadto – bez względu na rodzaj złoża, najmniejsze podsiąki kapilarne uzyskujemy przy zastosowaniu wyższego stężenia (10%) związku chemicznego. W związku z tym, nie występuje tam żadna interakcja ( $p > 0,05$  zarówno dla  $\text{CaCl}_2$ , jak i mieszaniny  $\text{NaCl}$  z  $\text{CaCl}_2$ ).



Rys. 4. Wysokość wzniosu kapilarnego w zależności od konfiguracji rodzaju złoża i stężenia związku chemicznego

Fig. 4. The height of capillary rise in accordance with configuration of a sort of deposit and the concentration of a chemical solution



Rys. 5. Wysokość wzniosu kapilarnego w zależności od konfiguracji rodzaju złoża i stężenia związku chemicznego

Fig. 5. The height of capillary rise in accordance with configuration of a sort of deposit and the concentration of a chemical solution

### Dyskusja wyników

Reasumując wyniki badań można stwierdzić, że z praktycznego punktu widzenia wystarczy rozważyć jedynie czynniki główne, bowiem niektóre interakcje, pomimo iż są istotne statystycznie, nie wpływają zasadniczo na zmianę wysokości wzniosu kapilarnego [Kołodziejczyk i Cwiąkała 2009].

Analiza wariancji w przypadku wody jest zawsze analizą dwuczynnikową (bez interakcji), ponieważ dla każdej konfiguracji złoża i frakcji dysponujemy jedynie pojedynczą obserwacją.

Analiza wariancji trójczynnikowej (z interakcjami drugiego rzędu) jest analizą jakościową, pokazującą istotny wpływ poszczególnych uwarunkowań na wartość wzniosu kapilarnego. Należy jednak pamiętać, że jest to analiza nie uwzględniająca dynamiki przebiegu podsiąku kapilarnego w czasie.

Z przeprowadzonych badań wynika, iż dodatek chlorku sodu (NaCl) do chlorku wapnia ( $\text{CaCl}_2$ ) podwyższył znacząco wysokość wzniosu kapilarnego w porównaniu do wartości uzyskanych pod wpływem chlorku wapnia ( $\text{CaCl}_2$ ).

Wykonane badania nad wysokością wzniosu kapilarnego pozwoliły na opracowanie uniwersalnego modelu tego zjawiska. Spośród możliwych wyrażeń, określających zależność wysokości wzniosu kapilarnego  $[h]$  od czasu  $[t]$ , przy znanej frakcji kruszywa oraz znanym rodzaju i stężeniu związku chemicznego kapilującego w grunt, najlepszym okazał się model, w którym czas zmienia się logarytmicznie [Kołodziejczyk i in. 2009]:

$$h(t) = h_1 + v_1 \ln(t) \quad (1)$$

gdzie;  $t$  – czas wyrażony w [s],  $h_1$  – wysokość wzniosu kapilarnego w pierwszej sekundzie,  $v_1$  – prędkość wzniosu kapilarnego, określona wg wzoru:

$$v(t) = \frac{dh(t)}{dt} = \frac{v_1}{t} \quad (2)$$

Prędkość wzniosu kapilarnego jest funkcją malejącą względem czasu; w pierwszej sekundzie wynosi  $v_1$  [mm/s], a następnie spada, i w pewnym momencie jest tak mała, że praktycznie oznacza stan nasycenia.

Gdy prędkość graniczną, wyznaczającą stan nasycenia, oznaczymy przez  $v_0$  i odpowiadający jej czas przez  $t_0$ , to począwszy od tego czasu osiągnięty jest stan nasycenia, jaki można obliczyć z następujących wzorów:

$$v_0 = \frac{v_1}{t_0}, \quad t_0 = \frac{v_1}{v_0} \quad (3)$$

Badania zgodności statystycznej przyjętego modelu (1) z danymi doświadczalnymi wykazały jego dobre dopasowanie (wyjaśnialność modelu znajduje się w granicach od 90 do 98%). Stwierdzono jednocześnie, iż dynamika wzniosu kapilarnego dla związków chemicznych ma podobny przebieg do dynamiki wzniosu wody. W związku z tym, modele dla tych związków są przeskalowanym modelem (1) i mogą być otrzymane przez pomnożenie parametrów  $h_1$  i  $v_1$  przez odpowiedni współczynnik, nazwany współczynnikiem kapilarności  $w_k$ . Oznaczając przez  $w_k$  współczynnik kapilarności dla: danego związku chemicznego, złoża kruszywa, frakcji kruszywa oraz stężenia związku chemicznego, otrzymamy model wysokości wzniosu kapilarnego  $h(t)$  wyrażony wzorem [Kłodziejczyk i in. 2009]:

$$h(t) = w_k \times h_1 + w_k \times v_1 \ln(t) \quad (4)$$

Aby bliżej przyjrzeć się dynamice wzniosu kapilarnego, opracowano parametry dynamiki wzniosu kapilarnego dla wody w każdym charakterystycznym kruszywie (tab. 4-6) oraz przedstawiono wykresy intensywności wzniosu kapilarnego w czasie (rys. 6-8).

Tabela 4. Parametry statystyczne modelu dynamiki wzniosu kapilarnego dla kruszywa ze złoża Chynów

Table 4. Statistical parameters of the capillary rise dynamics model for aggregate from deposit in Chynów

Parametry dynamiki wzniosu kapilarnego wody w kruszywie ze złoża Chynów				
Frakcja kruszywa d [mm]	Wysokość wzniosu kapi- larnego w 1 sekundzie $h_1$ [mm]	Prędkość wzniosu kapi- larnego w 1 sekundzie $v_1$ [mm/s]	Współczynnik korelacji r [-]	Współczynnik determinacji $D = r^2$ [%]
naturalna	7,95	39,08	0,97	94
$0,125 \leq d < 0,25$	23,25	40,63	0,98	96
$0,25 \leq d < 0,50$	109,67	27,24	0,99	98
$0,5 \leq d < 1,0$	145,99	11,28	0,98	96
$1,0 \leq d < 2,0$	85,46	13,37	0,95	90
$2,0 \leq d < 4,0$	91,85	8,36	0,98	96
$d \geq 4,0$	69,08	7,94	0,97	94

Tabela 5. Parametry statystyczne modelu dynamiki wzniosu kapilarnego dla kruszywa ze złoża Józefowo

Table 5. Statistical parameters of the capillary rise dynamics model for aggregate from deposit in Józefowo

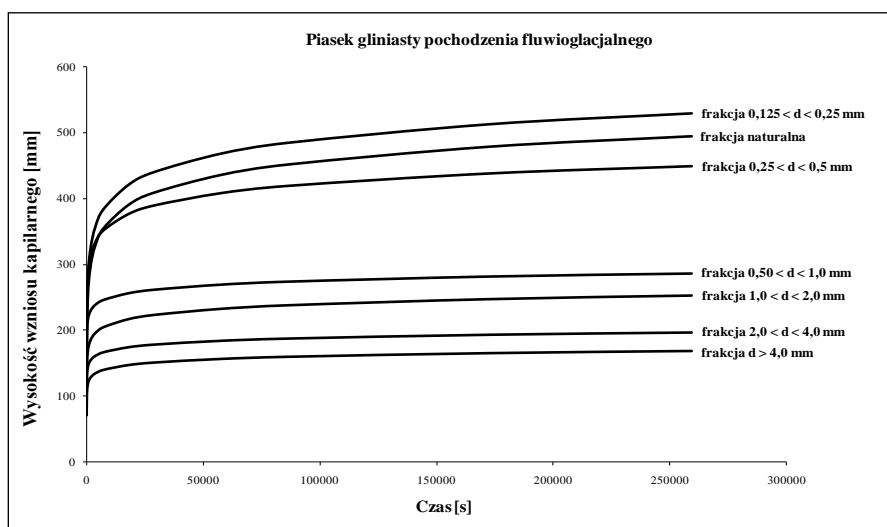
Parametry dynamiki wzniosu kapilarnego wody w kruszywie ze złoża Józefowo				
Frakcja kruszywa $d$ [mm]	Wysokość wzniosu kapilarnego w 1 sekundzie $h_1$ [mm]	Prędkość wzniosu kapilarnego w 1 sekundzie $v_1$ [mm/s]	Współczynnik korelacji $r$ [-]	Współczynnik determinacji $D = r^2$ [%]
naturalna	87,57	27,11	0,97	94
$0,125 \leq d < 0,25$	80,43	33,76	0,98	96
$0,25 \leq d < 0,50$	137,58	21,06	0,99	98
$0,5 \leq d < 1,0$	178,77	7,58	0,98	96
$1,0 \leq d < 2,0$	111,46	9,59	0,95	90
$2,0 \leq d < 4,0$	109,06	4,18	0,98	96
$d \geq 4,0$	84,90	4,29	0,97	94

Tabela 6. Parametry statystyczne modelu dynamiki wzniosu kapilarnego dla kruszywa ze złoża Nowogród Bobrzański

Table 6. Statistical parameters of the capillary rise dynamics model for aggregate from deposit in Nowogród Bobrzański.

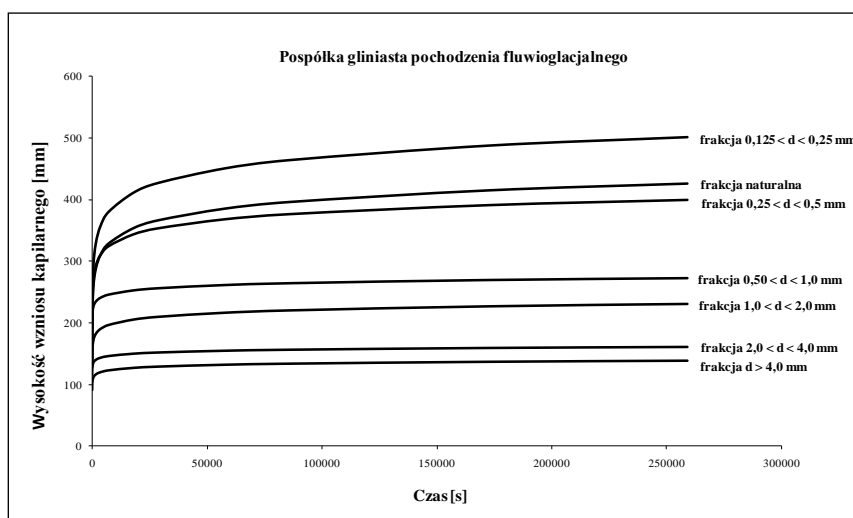
Parametry dynamiki wzniosu kapilarnego wody w kruszywie ze złoża Nowogród Bobrzański				
Frakcja kruszywa $d$ [mm]	Wysokość wzniosu kapilarnego w 1 sekundzie $h_1$ [mm]	Prędkość wzniosu kapilarnego w 1 sekundzie $v_1$ [mm/s]	Współczynnik korelacji $r$ [-]	Współczynnik determinacji $D = r^2$ [%]
naturalna	127,26	11,57	0,97	94
$0,125 \leq d < 0,25$	50,31	32,51	0,98	96
$0,25 \leq d < 0,50$	98,17	19,32	0,99	98
$0,5 \leq d < 1,0$	109,89	7,14	0,98	96
$1,0 \leq d < 2,0$	101,15	4,81	0,95	90
$2,0 \leq d < 4,0$	102,72	2,69	0,98	96
$d \geq 4,0$	94,88	2,58	0,97	94

Współczynniki korelacji mają bardzo wysokie wartości: od 0,95 do 0,99. Równie wysokie są współczynniki determinacji. A zatem, wyjaśnialność modelu waha się od 90% do 98%. Podobne wartości osiągają współczynniki korelacji i determinacji modeli typu (1) dla różnych związków chemicznych i ich mieszanin (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, mieszanina NaCl z CaCl<sub>2</sub>).



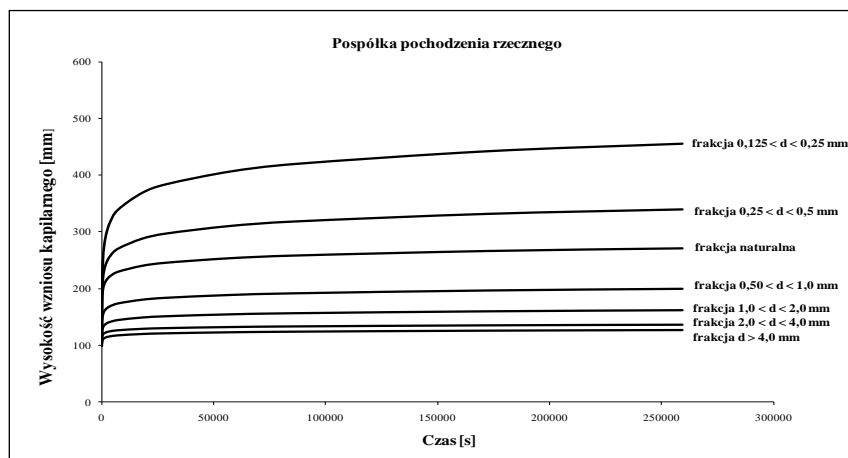
Rys. 6. Dynamika przebiegu wzniosu kapilarnego wody w jednostce czasu dla złoża Chynów – regresja modelu funkcji logarytmicznej

Fig. 6. Dynamics of water capillary rise process in unit of time for deposit Chynów – regression in the model of a logarithmic function



Rys. 7. Dynamika przebiegu wzniosu kapilarnego wody w jednostce czasu dla złoża Józefowo – regresja modelu funkcji logarytmicznej

Fig. 7 Dynamics of water capillary rise process in unit of time for deposit Józefowo – regression in the model of a logarithmic function



Rys. 8. Dynamika przebiegu wzniosu kapilarnego wody w jednostce czasu dla złoża Nowogród Bobrzański – regresja modelu funkcji logarytmicznej  
 Fig. 8. Dynamics of water capillary rise process in unit of time for deposit Nowogród Bobrzański – regression in the model of a logarithmic function

Przedstawione powyżej wykresy dynamiki przebiegu wzniosu kapilarnego wody (rys. 6-8) w dalszej dyskusji badań stanowią wykresy kruszyw wzorcowych, rozumiane jako pewien punkt odniesienia w stosunku do wykresów dynamiki wzniosu kapilarnego związków chemicznych lub ich mieszanin.

Znajomość tych zagadnień pozwala określić – poprzez korelację – kształtowanie się wysokości wzniosu kapilarnego w dowolnym kruszywie danego związku chemicznego lub mieszaniny związków, ponadto – o różnym stężeniu. Metoda ta opiera się o tzw. współczynnik kapilarności  $w_k$ , obrazujący skalę odmienności danego gruntu w stosunku do parametrów typowych dla kruszyw wzorcowych [Kołodziejczyk i in. 2009]. Współczynnik kapilarności  $w_k$ , charakteryzujący wznios kapilarny, wyznacza się dla kruszywa o naturalnym uziarnieniu i poszczególnych frakcji tego kruszywa, z zastosowaniem różnych związków chemicznych kapilujących w grunt oraz ich zróżnicowanych stężeń. Podatność analizowanego kruszywa na zjawisko wzniosu kapilarnego ustala się poprzez modyfikowanie (wymnożenie) wartości wzniosu kapilarnego uzyskanych dla kruszywa wzorcowego o współczynnik kapilarności  $w_k$ . Współczynnik kapilarności  $w_k$  jest zatem cechą charakterystyczną dla danego stężenia związku chemicznego, rozważanego złoża oraz analizowanej frakcji kruszywa. Metoda jego wyznaczenia polega na tym, iż dla każdego stężenia danego związku chemicznego, poszczególnego złoża oraz analizowanej frakcji kruszywa ustalono relacje zachodzące pomiędzy wysokością wzniosu kapilarnego roztworu danego

związku chemicznego w stosunku do odpowiedniej wysokości wzniosu kapilarnego wody, stanowiącej punkt odniesienia (wzorzec). Stosunki te wyznaczano jako funkcję czasu w modelu regresyjnym. Dla tych stosunków wyznaczono wartość średnią, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. We wszystkich przypadkach, z wyjątkiem incydentalnych, współczynnik zmienności, mierzony wzdłuż krzywej czasowej, okazał się być niewielki (rzędu kilku procent) i nie przekraczał wartości granicznej 25%. Świadczy to o stałości w czasie zależności dotyczącej wysokości wzniosu kapilarnego dowolnego związku chemicznego w stosunku do wzniosu kapilarnego wody, ale w tych samych warunkach (tzn.: ten sam związek chemiczny, identyczne stężenie związku chemicznego, to samo kruszywo i jego frakcja).

Poniżej, dla odzwierciedlenia omówionej zależności, przedstawiono przykład wyników badań kapilarności przy zastosowaniu chlorku wapnia ( $\text{CaCl}_2$ ) o stężeniu 5% oraz kruszywa o naturalnym uziarnieniu pochodzącego ze złoża Chynów (tab. 7).

Tabela 7. Zestawienie wyników wyznaczenia zależności wysokości wzniosu kapilarnego przy zastosowaniu chlorku wapnia ( $\text{CaCl}_2$ ) o stężeniu 5% i kruszywa o naturalnym uziarnieniu ze złoża Chynów

Table 7. The results of determining the relations of capillary rise height by using 5%  $\text{CaCl}_2$  concentration and naturally grained aggregate from Chynów deposit.

-	Czas pomiaru podsiąku kapilarnego [s]	5	10	15	30	60	120	180	240	300	600
A	Maksymalna wysokość podsiąku kapilarnego w kruszywie o frakcji naturalnej, przy zastosowaniu 5% $\text{CaCl}_2$ [mm]	59	76	86	103	119	136	146	153	159	175
B	Maksymalna wysokość podsiąku kapilarnego w kruszywie o frakcji naturalnej przy zastosowaniu wody $\text{H}_2\text{O}$ [mm]	71	98	114	141	168	195	211	222	231	258
-	Stosunek (A/B)	<b>0,83</b>	<b>0,77</b>	<b>0,75</b>	<b>0,73</b>	<b>0,71</b>	<b>0,70</b>	<b>0,69</b>	<b>0,69</b>	<b>0,69</b>	<b>0,68</b>
-	Czas pomiaru podsiąku kapilarnego [s]	900	1800	3600	7200	18000	28800	57600	86400	172800	259200
A	Maksymalna wysokość podsiąku kapilarnego w kruszywie o frakcji naturalnej, przy zastosowaniu 5% $\text{CaCl}_2$ [mm]	185	202	219	236	258	269	286	296	313	323
B	Maksymalna wysokość podsiąku kapilarnego w kruszywie o frakcji naturalnej, przy zastosowaniu wody $\text{H}_2\text{O}$ [mm]	274	301	328	355	391	409	436	452	479	495
-	Stosunek (A/B)	<b>0,68</b>	<b>0,67</b>	<b>0,67</b>	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>	<b>0,65</b>	<b>0,65</b>	<b>0,65</b>

Średnia wartość stosunku (A/B), czyli maksymalnej wysokości podsiąku kapilarnego w kruszywie o frakcji naturalnej przy zastosowaniu 5%  $\text{CaCl}_2$  do maksymalnej wysokości podsiąku kapilarnego wody w kruszywie o frakcji naturalnej, wynosi 0,69 (69%) – przy odchyleniu standardowym 4,7% i współ-



czynniku zmienności 7%. Oznacza to, iż mnożąc wartości maksymalnych wysokości podsiąku kapilarnego wody przez tzw. współczynnik kapilarności  $w_k = 0,69$  uzyskamy maksymalne wartości podsiąku kapilarnego 5% chlorku wapnia w kruszywie Chynów o frakcji naturalnej. Innymi słowy, krzywa wzniosu kapilarnego dla chlorku wapnia o stężeniu 5% we frakcji kruszywa naturalnego ze złoża Chynów jest krzywą wzniosu kapilarnego wody w tym samym kruszywie, przesuniętą o wartość tzw. współczynnika kapilarności  $w_k = 0,69$  (69%). To spostrzeżenie upoważnia do stwierdzenia, że dynamika zmiany wysokości wzniosu kapilarnego wyznaczona jest dostatecznie precyzyjnie przez przebieg krzywej uzyskanej dla wody. A zatem, funkcja wysokości wzniosu kapilarnego, zależna od czasu, związku chemicznego, złoża, frakcji kruszywa i stężenia związku chemicznego może być uzyskana poprzez korelację odpowiedniej krzywej dla wody (krzywej wzorcowej); wystarczy wymnożyć daną wielkość określającą wznios kapilarny dla wody przez odpowiedni współczynnik kapilarności  $w_k$ . Zgodnie z takim trybem postępowania można określić np. współczynnik kapilarności  $w_k$  dla 5% chlorku wapnia i każdej frakcji gruntu (tab. 8).

Tabela 8. Wartości współczynnika kapilarności  $w_k$  kruszywa ze złoża Chynów dla 5% roztworu chlorku wapnia

Table 8. Value of capillarity factor  $w_k$  of aggregate from Chynów deposit for 5% Calcium Chloride solution.

Frakcja kruszywa d [mm]	naturalna	$0,125 \leq d < 0,25$	$0,25 \leq d < 0,50$	$0,5 \leq d < 1,0$	$1,0 \leq d < 2,0$	$2,0 \leq d < 4,0$	$d \geq 4,0$
Współczynnik kapilarności $w_k$ [%]: kruszywo ze złoża Chynów, 5% roztwór chlorku wapnia $\text{CaCl}_2$	69	76	68	68	63	61	61

Relacja modelu wysokości wzniosu kapilarnego  $h(t) = w_k \cdot h_1 + w_k \cdot v_1 \ln(t)$  oznacza, że wysokość wzniosu kapilarnego w pierwszej sekundzie dla danej konfiguracji można uzyskać poprzez odczytanie wartości wysokości wzniosu kapilarnego wody w pierwszej sekundzie, a następnie wymnożenie uzyskanej wartości przez odpowiedni współczynnik kapilarności  $w_k$ . Podobnie, prędkość wzniosu kapilarnego w pierwszej sekundzie jest wartością prędkości wzniosu kapilarnego w pierwszej sekundzie dla wody pomnożoną przez odpowiedni współczynnik kapilarności  $w_k$ . Na przykład, współczynnik kapilarności  $w_k$  dla chlorku wapnia o stężeniu 5%, złoże Chynów i frakcja naturalna, wynosi  $w_k = 0,69$  (tab. 8), przy czym wysokość wzniosu kapilarnego w pierwszej sekundzie wynosi  $h_1 = 0,69 \times 7,95 = 5,49$  [mm], a prędkość -  $v_1 = 0,69 \times 39,08 = 26,97$  [mm/s]. Parametry 7,95 i 39,08 są w tym przypadku wartościami statystycznymi w modelu (1) dla wody na złożu Chynów i naturalnej frakcji kruszywa (tab. 4). Analogicznie można wyznaczyć wysokości i prędkości wzniosu kapilarnego w pierwszych sekundach procesu dla pozostałych frakcji kruszywa złoża Chy-

nów – mnożąc odpowiednie współczynniki kapilarności  $w_k$  (tab. 8) z odpowiednimi wartościami statystycznymi modelu (1) dla wody (tab. 4).

Współczynnik kapilarności  $w_k$  można przedstawić w postaci tablicy analitycznej, uzyskanej metodą wygładzania medianowego (ang. *median polish*). Taki sposób przedstawienia danych pozwala na uzyskanie informacji o wartościach charakterystycznych dla złoża (niezależnie od rodzaju i stężenia związku chemicznego oraz frakcji danego kruszywa), charakterystycznych dla związku chemicznego (niezależnie od stężenia, frakcji i złoża) oraz innych wartości, pokazujących ich indywidualny wkład w wynikową wysokość wzniosu kapilarnego. Zestawienie takie przedstawione jest w postaci bilansowej, obrazującej wpływ (dodatni lub ujemny) danego czynnika na wartości współczynnika kapilarności  $w_k$ . Konstrukcję tego zestawienia (tab. 9) można zaprojektować dla rozważanego już wyżej przykładu chlorku wapnia dla złoża Chynów.

Tabela 9. Wpływ efektów głównych na wartość współczynnika kapilarności  $w_k$  dla złoża Chynów z dodatkiem 5% bądź 10% chlorku wapnia

Table 9. The influence of main effects on value of capillarity factor  $w_k$  for deposit in Chynów with 5% or 10% Calcium Chloride additive.

Stężenie związku chem. [%]	Frakcja kruszywa d [mm]							Efekt główny stężenia	Efekt główny związku chemicznego i złoża
	naturalna	$0,125 \leq d < 0,25$	$0,25 \leq d < 0,50$	$0,5 \leq d < 1,0$	$1,0 \leq d < 2,0$	$2,0 \leq d < 4,0$	$d \geq 4,0$		
5	2%	-2%	1%	0%	1%	0%	-1%	2%	
10	-2%	2%	-1%	0%	-1%	0%	1%	-2%	
Efekt główny frakcji kruszywa	0%	11%	0%	1%	-5%	-6%	-5%	65%	

Liczby wyróżnione w dolnym rzędzie i w ostatnich dwóch kolumnach oznaczają w zestawieniu efekty główne, opisujące wpływ głównych czynników na wartość współczynnika kapilarności  $w_k$ . Wielkość 65% charakteryzuje typową wartość współczynnika kapilarności  $w_k$  dla chlorku wapnia na złożu Chynów, czyli efekt główny związku chemicznego i złoża. Stężenie 5% chlorku wapnia zwiększa współczynnik kapilarności  $w_k$  o 2% do wartości 67%, natomiast stężenie 10% chlorku wapnia zmniejsza współczynnik kapilarności  $w_k$  o 2% do wartości 63%. Stężenie 5% chlorku wapnia daje więc efekt o 4% wyższy niż stężenie 10%. A zatem, efekt bilansowy widoczny jest poprzez korektę wartości typowej 65% o 2% lub -2% w zależności od stężenia 5% lub 10%. Wpływ czynnika frakcji kruszywa można prześledzić w dolnym rzędzie. Największą wartość tego współczynnika uzyskać można dla kruszywa o  $0,125 \leq d < 0,25$  mm (wzrost o 11% do wartości 76%), a najmniejszą dla frakcji  $2,0 \leq d < 4,0$  mm (spadek o 6% do wartości 59%). Liczby wewnątrz tabeli (w polach tabeli koloru szarego) opisują interakcje stężenia i frakcji kruszywa, charakteryzujące ich współdziałanie.

Tak więc, ostateczna wartość współczynnika kapilarności  $w_k$  może być przedstawiona jako suma następujących składników:

$$\text{współczynnik kapilarności } w_k = \text{efekt główny związku chemicznego i złoza} + \text{efekt główny stężenia} + \text{efekt główny frakcji kruszywa} + \text{interakcja stężenia i frakcji kruszywa}$$

Dla przykładu, współczynnik kapilarności  $w_k$  dla 5% chlorku wapnia i frakcji naturalnej na złożu Chynów wynosi: 65% (efekt główny związku chemicznego i złoza) + 2% (efekt główny stężenia) + 0% (efekt główny frakcji kruszywa) + 2% (interakcja stężenia i frakcji kruszywa) = 69% (tab. 9).

Reasumując, aby uzyskać krzywą wzniosu kapilarnego dla 5% chlorku wapnia we frakcji naturalnej złoža Chynów należy przemnożyć krzywą wzniosu kapilarnego dla wody we frakcji naturalnej tego złoža przez współczynnik kapilarności  $w_k = 0,69$ .

Na tej podstawie można określić tablice współczynników kapilarności  $w_k$  dla dowolnej mieszaniny chlorku sodu z chlorkiem wapnia (tab. 10).

*Tabela 10. Wpływ efektów głównych na wartość współczynnika kapilarności  $w_k$  dla złoža Chynów z dodatkiem 5% bądź 10% mieszaniny chlorku sodu z chlorkiem wapnia*

*Table 10. The influence of main effects on value of capillarity factor  $w_k$  for deposit in Chynów with 5% or 10% mixture of Sodium Chloride and Calcium Chloride.*

Stężenie związku chem. [%]	Frakcja kruszywa d [mm]							Efekt główny stężenia	Efekt główny związku chemicznego i złoža
	naturalna	$0,125 \leq d < 0,25$	$0,25 \leq d < 0,50$	$0,5 \leq d < 1,0$	$1,0 \leq d < 2,0$	$2,0 \leq d < 4,0$	$d \geq 4,0$		
5	-2%	1%	1%	1%	-2%	-1%	-2%	2%	
10	2%	-1%	-1%	-1%	2%	1%	2%	-2%	
Efekt główny frakcji kruszywa	-2%	15%	5%	5%	0%	-1%	-5%		72%

Na podstawie powyższych wyników (tab. 9 i 10) oraz w oparciu o model funkcji regresji logarytmicznej  $h(t) = w_k \cdot h_1 + w_k \cdot v_1 \ln(t)$  można uzyskać dowolny wykres kształtowania się podsiąku kapilarnego dla:

- dowolnego złoža i dowolnej frakcji kruszywa,
  - dowolnego rodzaju i stężenia związku chemicznego,
- a ponadto – wysokość wzniosu kapilarnego w dowolnym czasie.

## Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań kapilarności zaobserwowano charakterystyczne właściwości wzniosu kapilarnego, wskazujące na wyraźną jego zależność od: 1. genezy i uziarnienia gruntu budującego nasyp drogowy, 2. rodzaju związku kapilującego w nasyp (woda,  $\text{CaCl}_2$ , mieszanina  $\text{NaCl}$  z  $\text{CaCl}_2$ ) i 3. stężenia migrującego roztworu. Najwyższe wartości wzniosu kapilarnego uzyskano w najdrobniejszych frakcjach zbadanych kruszyw ( $0,125 \leq d < 0,25$  mm), natomiast najniższe – we frakcji kruszyw o największym uziarnieniu ( $d \geq 4$  mm). Wynika to przede wszystkim z porowatości gruntu; w gruncie o większych wymiarach porów wznios kapilarny zachodzi z większą prędkością, lecz osiąga ostatecznie niższy poziom, gdy tymczasem, w gruncie o mniejszych porach wznios kapilarny zachodzi z mniejszą prędkością, lecz w konsekwencji osiąga większą wysokość [Kołodziejczyk 2007]. Grunty o niskim wskaźniku różnoziarnistości ( $U < 3$ ) oraz dużej zawartości frakcji pyłowo-iłowej ( $f_{\pi} + f_i > 15\%$ ) wykazują wyższe wzniosy kapilarne w porównaniu z gruntami o większych wskaźnikach różnoziarnistości ( $U > 5$ ) i mniejszej zawartości najdrobniejszych cząstek ( $f_{\pi} + f_i < 15\%$ ) [Kołodziejczyk 2004]. Na tej podstawie można stwierdzić, iż proces kapilarności zależny jest zarówno od rodzaju jak i genezy gruntu. Można to wyjaśnić genezą złoża. W gruntach o genezie rzecznej, czyli przemytych i pozbawionych frakcji pyłowo-iłowych (złóże Nowogród Bobrzański), migrujące kationy powodowały tylko częściowe zacieśnianie porów, które mimo wszystko pozostały drożne, natomiast w gruntach wykształconych w facji fluwioglacjalnej, zawierającej znaczne domieszki facji ilastej (złóża: Chynów, Józefowo), pod wpływem kationów mikropory uległy całkowitemu wypełnieniu wodą związaną, co z kolei spowodowało znaczny wzrost wzniosu kapilarnego [Kołodziejczyk i Ćwiąkała 2009]. Porównując maksymalne wzniosy kapilarne w kruszywie naturalnym oraz poszczególnych jego frakcjach stwierdzono jednoznacznie we wszystkich zbadanych złożach (Chynów, Józefowo, Nowogród Bobrzański), iż dodatek każdego związku chemicznego ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ , mieszaniny  $\text{NaCl}$  z  $\text{CaCl}_2$ ) spowodował obniżenie wzniosu kapilarnego w stosunku do wzniosu wody. Wskazują na to również współczynniki kapilarności  $w_k$  wyznaczone dla poszczególnych związków chemicznych, które we wszystkich przypadkach są mniejsze od jedności. Ponadto, wyższe stężenie migrującego związku spowodowało zmniejszenie podsiąku kapilarnego i – tym samym – ograniczenie wysadzinowości gruntów. Z przeprowadzonych badań wynika, że najniższy wznios kapilarny nastąpi przy zastosowaniu 10% chlorku wapnia ( $\text{CaCl}_2$ ) w kruszywach gruboziarnistych, pozbawionych domieszek pyłowo-iłowych.

Niestety, stosowanie środków chemicznych w zimowym utrzymaniu dróg, obok wielu zalet, takich jak szybkość i skuteczność działania oraz obniżenie kosztów akcji „zima”, wpływa niekorzystnie na stan środowiska naturalnego

[Kołodziejczyk 2008, Pečenik 1981]. Szkodliwemu oddziaływaniu poszczególnych związków użytych w zimowym utrzymaniu dróg ulegają zarówno grunty występujące w podłożu, jak również sąsiadujące z nimi gleby, wody (powierzchniowe i podziemne) oraz poszczególne gatunki flory i fauny.

Przeprowadzone badania miały charakter rozpoznawczy, a uzyskane wyniki wskazują na celowość kontynuacji eksperymentu przy zastosowaniu innych związków chemicznych stosowanych podczas zimowego utrzymania dróg. Przebadanie kolejnych substancji chemicznych pod kątem kapilarności da możliwość oceny ich skuteczności w zimowym utrzymaniu dróg, zarówno w odniesieniu do zwalczania gołoledzi, jak i możliwości ograniczenia awarii dróg spowodowanych wysadzinowością gruntów [Kołodziejczyk, Ćwiąkała 2009].

Przedstawiona koncepcja badań dynamiki wzniosu kapilarnego wody może posłużyć za kryterium eksploatacyjne, jak również – może wpłynąć na ocenę nowych rozwiązań projektowych w drogownictwie.

### Literatura

1. *Bilans zasobów kopalin i wód podziemnych w Polsce*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2005
2. ĆWIAKAŁA M.: *Badania zagęszczalności kruszyw używanych w budownictwie drogowym*. W: Zeszyty Naukowe nr 133, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2007
3. ĆWIAKAŁA M.: *Metodyka zagęszczania gruntu do badań kapilarności*. [W:] Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych: IV Ogólnopolska Konferencja Młodych Geotechników, Bydgoszcz 2009
4. DĘBSKI W.: *Mały poradnik drogowca*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1974
5. FORTUNA E.: *Zwalczanie śliskości zimowej na drogach samochodowych w Polsce*. Biblioteka drogownictwa - Zimowe utrzymanie dróg. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981
6. *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*. Opracowano w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych, Warszawa 2001
7. KOŁODZIEJCZYK U.: Wpływ chlorku sodu stosowanego w zimowym utrzymaniu dróg na kapilarność gruntów. [W:] *Geologos*, nr 11, 2007
8. KOŁODZIEJCZYK U.: *Wpływ uziarnienia gruntu na stan wód kapilarnych i migrację zanieczyszczeń w podłożu nasypów drogowych*. W: *Ochrona wód powierzchniowych, podziemnych oraz gleb wzdłuż dróg i autostrad*: Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna. Krzyżowa, Polska, Warszawa 2004, s. 69-78

9. KOŁODZIEJCZYK U.: *Zimowe utrzymanie dróg a ochrona środowiska*. [W:] Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych = Environmental Protection and Natural Resources, nr 37, 2008
10. KOŁODZIEJCZYK U., ĆWIAKAŁA M.: *Analiza wyników modelowych badań wzniosu kapilarnego wody w nasypach drogowych*. [W:] kwartalnik Drogi i Mosty, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2009 (opracowanie w druku)
11. KOŁODZIEJCZYK U., ĆWIAKAŁA M., WIDUCH A.: *Kapilarność gruntu: Procedura badawcza dotycząca oznaczania kapilarności czynnej*. W: Warunki techniczne wykonania i odbioru dróg i mostów – Poradnik kierownika budowy i inspektora nadzoru. Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa 2009 (opracowanie w druku)
12. KOŁODZIEJCZYK U., ĆWIAKAŁA M., WIDUCH A.: *Sposób badania podatności gruntu na zjawisko wzniosu kapilarnego oraz ocena wpływu związków chemicznych stosowanych w zimowym utrzymaniu dróg na wydajność gruntów i ocena przydatności gruntu w budownictwie drogowym*. Zgłoszenie patentowe nr P.388695, Urząd Patentowy RP, Warszawa 2009
13. KOWALSKI W. C.: *Geologia inżynierska*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1988
14. PEČENIK A.: *Wpływ środków chemicznych na roślinność przydrożną i miejską, stosowanych do usuwania śliskości zimowej*. Biblioteka Drogownictwa. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1981
15. *Polska Norma PN-88/B-04481: Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, 1988
16. SOBCZYK M.: *Statystyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008
17. STYPUŁKOWSKI B.: *Zagadnienia utrzymania i modernizacji dróg i ulic*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000
18. WALESIAK M., GATNAR E.: *Statystyczna analiza danych z wykorzystaniem programu R*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009
19. *Wytyczne Zimowego Utrzymania Dróg: Załącznik do Zarządzenia Nr 18 Generalne Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad*, 2006
20. ZĄBCZYK K.: *Meteorologia drogowa a bezpieczeństwo ruchu*. SIGNALCO Ltd. Polska, 2006

## CAPILLARY RISE DYNAMICS OF WATER, $\text{CaCl}_2$ AND $\text{NaCl}$ WATER SOLUTIONS IN THE ROAD EMBANKMENTS

### *S u m m a r y*

*One of the negative natural phenomena is soil swelling. It can be effectively limited by decreasing the height of capillary rise of ground water. This paper aims at presenting the model of capillary ascent depending on the kind of soil occurring in the road embankment as well as a type and concentration of solution migrating into the road embankment. The research was carried out into natural aggregate lying in the area of Zielona Góra and differentiated in a kind of aggregate and its genesis. Analysis of capillary rise was related to the genesis of aggregate and concentration of capillary rise. The results were presented as analysis of triple factor variance, the kind and concentration of compound, type of aggregate and size of aggregate fraction. The conducted research proved that the ground water shows the maximum height of capillary rise. However, the saturation of ground water with chemical compounds used in winter roads maintenance (  $\text{NaCl}$  with  $\text{CaCl}_2$  in weight relation e.g. 4:1 ) and increase in concentration of those compounds ( from 5% to 10% ) decreases the capillary rise considerably as well as swelling.*

**Key words:** soil capillarity, soil swelling, roads maintaining in winter