





PROCESY SUFOZYJNE NA TERENIE PIENIŃSKIEGO PARKU NARODOWEGO NA PRZYKŁADZIE STWIERDZONEGO ZAPADLISKA

Andrzej Gruchot¹  0000-0002-4752-3357, Tymoteusz Zydroń¹  0000-0003-0413-5386, Karol Plesiński¹  0000-0003-2157-2502, Ewelina Zajac², Zbyněk Zchoval³  0000-0003-0573-2107

¹ Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie

² Pieniński Park Narodowy

³ Brno University of Technology

ABSTRAKT

Cel pracy

Celem pracy było określenie zasięgu i uwarunkowań powstania zapadliska i kanału sufozyjnego stwierdzonych na terenie Pienińskiego Parku Narodowego w maju 2019 roku.

Materiał i metody

Zakres przeprowadzonych badań obejmował określenie charakterystyki geotechnicznej gruntów zalegających w zboczu w pobliżu zapadliska i wzdłuż kanału sufozyjnego. Przeprowadzono również obliczenia numeryczne metodą elementów skończonych w programie GeoStudio, które pozwoliły ocenić możliwości deformacji gruntu wywołanej działaniem sił ciśnienia spływowego.

Wyniki i wnioski

Wyniki badań i analiza literatury przedmiotu wykazały, że procesy sufozyjne w polskich Karpatach są zjawiskiem powszechnym, pełniącym rolę rzeźbotwórczą. Zaobserwowana forma sufozyjna wskazuje, że na omawianym stoku występuje ciągły kilkudziesięciometrowej długości kanał sufozyjny wytworzony w utworach średniospoistych, ilasto-pylastych. Należy spodziewać się, że w okresach długotrwałych lub intensywnych opadów będzie dochodzić do nasilania się takich zjawisk. Wyniki obliczeń nie potwierdziły występowania warunków sprzyjających tworzeniu deformacji hydraulicznych. Jednak w trakcie zwiększonego przepływu filtracyjnego wytwarzają się wysokie wartości gradientu hydraulicznego w gruncie, co przy jego dużej porowatości sprzyja wynoszeniu cząstek gruntu. Występującemu procesowi sufozji na opisywanym zboczu sprzyja obecność drewnianego koryta, z którego woda infiltruje w podłoże gruntowe, co sprzyja zwiększeniu intensywności przepływu śródglebowego w analizowanej części zbocza.

Słowa kluczowe: sufozja, filtracja, deformacje filtracyjne

WSTĘP

Do głównych procesów geomorfologicznych powodujących istotne zmiany rzeźby terenu, zwłaszcza w obrębie stoków na obszarach górzystych i wyżynnych, zaliczane są procesy denudacyjne. Skutki tych procesów

są z reguły łatwo zauważalne, a w wielu przypadkach powodują szkody gospodarcze, ekonomiczne, a nawet stanowią zagrożenie dla życia ludzkiego. Jednym z procesów denudacyjnych jest sufozja. Jak zauważają między innymi Bernatek (2014) i Schneider (2014), skala aktywności sufozji jest niedoceniana i mało roz-

 e-mail: andrzej.gruchot@urk.edu.pl

poznana. Natomiast Verachtert i in. (2011b) wskazują, że zjawisko to często występuje na terenach pokrytych roślinnością trawiastą i ma wpływ na powstawanie innych procesów denudacyjnych, takich jak ruchy masowe czy zwiększenie intensyfikacji procesów spłukiwania powierzchniowego.

Proces sufozji przebiega w profilu gruntowym i polega na wytworzeniu ciągłego kanału przewodzącego stale lub okresowo wodę albo zawiesinę gruntowo-wodną. Płynąca woda jest głównym czynnikiem powodującym powstawanie sufozji. Część wody, która nie odpływa powierzchniowo, infiltruje w grunt i oddziałuje na niego w sposób fizyczny i chemiczny. Faulkner i in. (2000) wskazują, że chemiczna działalność wody może wspomagać sufozję np. przez proces rozpuszczania. Jest to szczególnie istotne w obszarach geologicznych zbudowanych ze skał podatnych na denudację chemiczną, gdzie występują wapienie, gipsy i dolomity, oraz w gruntach, w których spoiwem cementującym lub

składnikiem podstawowym szkieletu gruntowego są minerały rozpuszczone w wodzie (Żolnierczyk 1956).

O aktywności procesu sufozji najczęściej świadczą powierzchniowe formy terenu występujące w postaci zapadlisk, studni sufozycznych, ślepych dolinek czy też stożków sufozycznych. Formy te są efektem zmian zachodzących w profilu gruntowym i jednocześnie stanowią podstawę analiz przebiegu procesu sufozji (Verachtert i in. 2010, Bernatek 2014).

Celem pracy było określenie zasięgu i uwarunkowań powstania formy sufozycznej zaobserwowanej na terenie Pienińskiego Parku Narodowego w maju 2019 roku.

LOKALIZACJA TERENU BADAŃ

Analizowana forma procesu sufozycznego stanowiła zapadlisko (ryc. 1) powstałe w miejscowości Sromowce Wyżne, w miejscu określanym potocznie jako Lemborg (ryc. 2). Teren badań jest użytkiem zielonym

a) widok ogólny – general view



b) widok wlotu do kanału sufozycznego – view of the inlet to the piping channel



c) obrywy gruntowe – soil falls

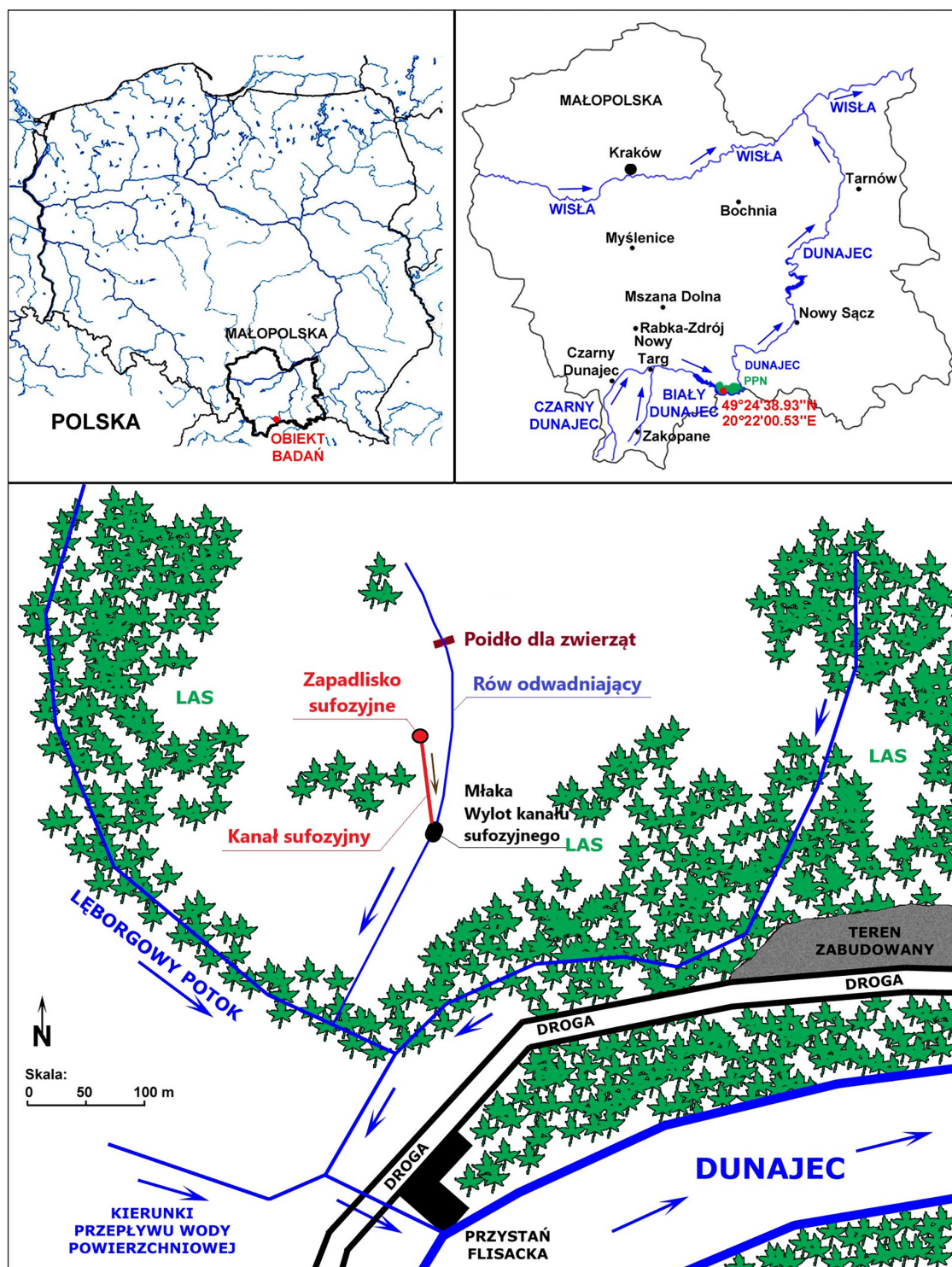


d) kanał sufozyczny – piping channel



Ryc. 1. Zapadlisko sufozyczne (stan na 10 maja 2019 r.) (fot. A. Gruchot)

Fig. 1. Piping hole (as of May 10, 2019) (photo by A. Gruchot)



Ryc. 2. Lokalizacja terenu badań (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Location of the research area (Source: own study)

o ekspozycji południowo-zachodniej i spadku około 8–10°. Według Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski (arkusz Szczawnica–Krościenko – 1050) (Kulka i in. 1985) analizowany fragment terenu znajduje się w strefie kontaktowej jednostki braniskiej reprezentowanej przez radiolaryty manganowe, wapienie pseudobulaste i wapienie rogowcowe oraz kredowych warstw sromowieckich reprezentowanych przez piaskowce i łupki z wkładkami zlepieńców (Kulka i in. 1991). Na znacznej części stoku pokrywą stanowią gliny, gliny z rumoszem skalnym i gruz skalny.

Zapadlisko powstało po kilkudniowym okresie opadów w połowie kwietnia 2019 roku. Forma ta została zauważona przez właścicieli terenu, którzy informację o jej powstaniu przekazali pracownikom Pienińskiego Parku Narodowego. Wizja terenowa w końcu kwietnia 2019 roku pozwoliła stwierdzić, że zapadlisko powstało na skutek osiadania terenu spowodowanego zapadnięciem się kanału sufozyjnego. Stwierdzono, że poniżej zapadliska występowały niewielkie obniżenia terenu wskazujące na potencjalne występowanie dodatkowych osiadań terenu spowodowanych sufozją. W dniu zapadliska widoczny był wyraźny przepływ wody, a na głębokości 1,0–1,2 m stwierdzono wylot kanału sufozyjnego o średnicy około 0,4–0,6 m (ryc. 1).

W trakcie wizji terenowej stwierdzono, że w odległości kilkudziesięciu metrów powyżej zapadliska znajduje się drewniane koryto stanowiące poidło dla zwierząt pasterskich zasilane stałym dopływem powierzchniowym z istniejącego rowu o nieznacznej głębokości, z którego woda rozlewa się na powierzchni terenu i wsiąka w profil gruntowy. Analiza powierzchni terenu badań wskazuje, że zarówno powyżej, jak i poniżej koryta występuje quasi-liniowe obniżenie terenu, które może wskazywać na obecność podziemnego kanału sufozyjnego. Długość tego potencjalnego kanału sufozyjnego, mierzona od poidła do zapadliska, wynosi około 120 m. Z kolei poniżej zapadliska, w odległości około 66 m, znajduje się młaka, w której stwierdzono wypływ wody. W trakcie badań terenowych ustalono, że wypływ ten jest wylotem kanału sufozyjnego, którego początek znajduje się w zapadlisku.

ZAKRES I METODY BADAŃ

Zakres badań terenowych obejmował przede wszystkim określenie rozmiarów zapadliska oraz potencjalnego kierunku odpływu wody z jego obszaru. Pomiaru geo-

dezyjne z wykorzystaniem tachimetru TOPCON GTS-226 przeprowadzono w obszarze zapadliska i w jego sąsiedztwie. Wykonano płytkie wiercenia penetracyjne w celu określenia przebiegu kanału sufozyjnego. Dodatkowo wykonano analizę makroskopową oraz oznaczenie gęstości objętościowej gruntów budujących ścianę zapadliska metodą pierścienia tnącego, a także wytrzymałości na ścinanie z wykorzystaniem kieszonkowej sondy krzyżakowej oraz penetrometru wciskowego.

Przeprowadzono również pomiary prędkości przepływu wody w kanale sufozyjnym w zapadlisku oraz na jego wylocie. Kierunek przepływu wody, a tym samym lokalizację wylotu kanału sufozyjnego, określono na podstawie pomiaru zmiany stężenia roztworu soli kuchennej wprowadzonej do kanału w zapadlisku. Pomiary prędkości wody przeprowadzono młynkiem hydrometrycznym, a poziom zasolenia konduktometrem.

Zakres badań laboratoryjnych obejmował oznaczanie składu granulometrycznego gruntów, granic Atterberga – plastyczności metodą wałeczowania i płynności metodą Cassagrande'a (PN-EN ISO 17892-12:2018-08). Parametry wytrzymałości na ścinanie, tj. kąta tarcia wewnętrznego i spójności, oznaczono w aparacie bezpośredniego ścinania na próbkach o średnicy 6 cm i wysokości 2 cm.

Współczynnik filtracji oznaczono z wykorzystaniem metody zmienno-gradientowej, w edometrze na próbkach o średnicy 7,5 cm i wysokości 1,9 cm w dwóch powtórzeniach. Próbkę gruntu klasy A pobrano ze ścian zapadliska z głębokości 0,85 i 1,20 m. Pierścień z gruntem umieszczono w edometrze i obciążono siłą pionową wynoszącą 10 kPa, a następnie nasycono wodą. Badanie wykonywano przy zmiennym spadku hydraulicznym, a woda doprowadzana była do próbki szklaną rurką o powierzchni przekroju 0,28 cm². Współczynnik filtracji był określany na podstawie zmiany wysokości zwierciadła wody w rurce z poziomu h_1 na h_2 w czasie $t = t_1 - t_2$. Współczynnik filtracji obliczono ze wzoru:

$$k_t = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:

A – pole powierzchni przekroju badanej próbki umieszczonej w edometrze [cm²],

- a – pole powierzchni przekroju rurki piezometrycznej [cm^2],
- l – wysokość badanej próbki gruntu [m],
- h_1 – wysokość słupa wody w trakcie pierwszego odczytu w czasie t_1 [m],
- h_2 – wysokość słupa wody w trakcie drugiego odczytu w czasie t_2 [m],
- t – przedział czasu pomiędzy pomiarami [s].

Współczynnik filtracji oznaczono również *in situ* na głębokości około 10 cm poniżej powierzchni dna zapadliska (0,9 m głębokości całkowitej) z wykorzystaniem jednopierścieniowego infiltrometru Saturo (ryc. 3). W badaniach wykorzystano pierścień infiltrometru o średnicy 14,4 cm wbity w próbę gruntu na głębokość 5 cm.

W celu określenia przyczyn powstania kanału sufozyjnego wykonano obliczenia numeryczne przepływu wody przez odcinek stoku o długości 80 m od miejsca lokalizacji zapadliska (komina) sufozyjnego do miejsca, w którym stwierdzono wypływ wody z kanału podziemnego. Model obliczeniowy analizowanego fragmentu stoku opracowano na podstawie numerycznego modelu terenu dostępny w Geoportalu (mapy.geoportalu.gov.pl). Obliczenia wykonano meto-

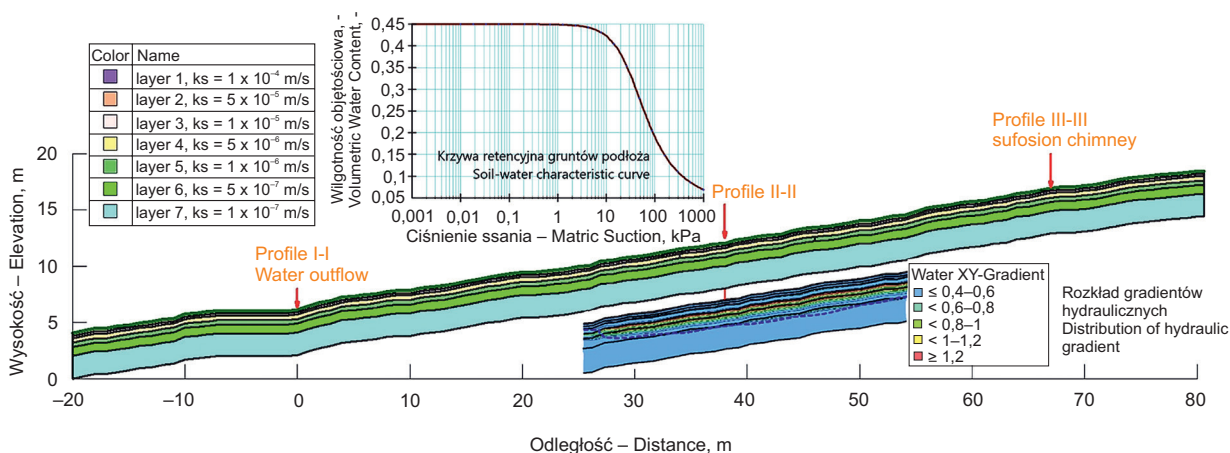
dą elementów skończonych w programie GeoStudio z wykorzystaniem modułu SEEP/W oraz SIGMA/W. Wielkość oczka siatki obliczeniowej wynosiła 2,5 cm w przypoверхniowej części zbocza, a na głębokości poniżej 2 m p.p.t. została zwiększona do 10 cm. Liczba węzłów wyniosła ponad 210 tysięcy (ryc. 4). Do opracowania wyników badań wykorzystano bibliotekę Pandas (Reback i in. 2020) środowiska Python, a do ich wizualizacji zastosowano biblioteki Matplotlib (Hunter 2007) i Seaborn (Waskom 2021).

Do obliczeń przyjęto parametry podłoża na podstawie wyników badań terenowych i laboratoryjnych. W budowie geotechnicznej stoku wydzielono cztery pakiety gruntów ilasto-pylastych różniących się współczynnikiem filtracji, którego wartość zmniejszała się wraz z głębokością (ryc. 4). By ustalić początkowy rozkład ciśnienia porowego w profilu gruntowym, założono poziom zwierciadła wody gruntowej w dolnej części zbocza na głębokości 2 m p.p.t. Natomiast zmiany poziomu zwierciadła wody gruntowej wynikały z objętości wody infiltrującej w grunt. Natężenie opadów deszczu w okresie od kwietnia do czerwca 2019 roku (ryc. 5) przyjęto na podstawie obserwacji ze stacji meteorologicznej Pienińskiego Parku Narodowego w Sromowcach Niżnych na Podlęczach.



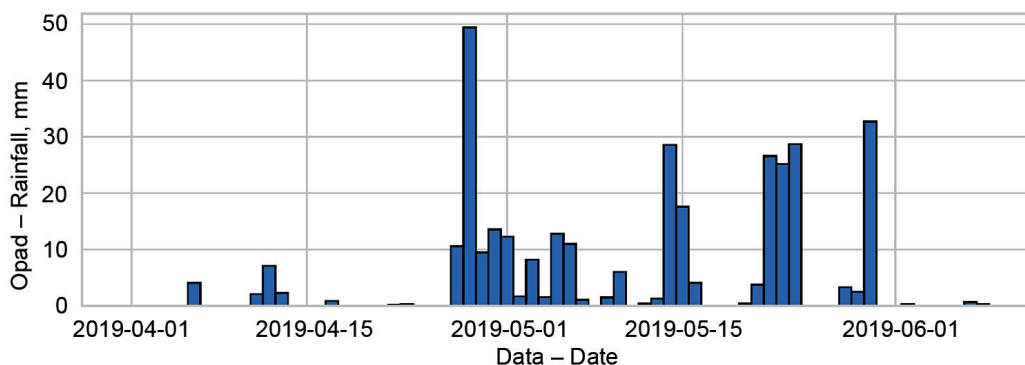
Ryc. 3. Widok ogólny infiltrometru Saturo (fot. A. Gruchot)

Fig. 3. General view of the Saturo infiltrometer (photo by A. Gruchot)



Ryc. 4. Dyskretyzacja przekroju obliczeniowego wraz z krzywą retencyjną gruntów oraz rozkładem gradientów hydraulicznych w przekroju II-II (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. Discretization of the slope cross-section with the soil retention curve and the distribution of hydraulic gradients in cross-section II-II (Source: own study)



Rys. 5. Rozkład opadów w okresie marzec–czerwiec 2019 r. na podstawie danych ze stacji meteorologicznej w Sromowcach Niżnych na Podlądżach (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Distribution of precipitation in the period March–June 2019 based on data from the meteorological station in Sromowce Niżne in Podlądże (Source: own study)

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń określano wartości gradientów hydraulicznych, ciśnienia porowego oraz składowej pionowej naprężeń efektywnych w wybranych punktach profilu, a w dalszej części sprawdzono warunek stanu granicznego deformacji gruntu HYD zgodnie z Eurokodem 7 (PN-EN 1997-1:2008):

$$u_{dst;d} \leq \sigma_{stb;d} \quad (2)$$

$$S_{dst;d} \leq G'_{stb;d} \quad (3)$$

gdzie:

- $u_{dst;d}$ – wartość obliczeniowa całkowitego destabilizującego ciśnienia wody w porach,
- $\sigma_{stb;d}$ – wartość całkowita stabilizująca naprężenie pionowe,
- $S_{dst;d}$ – wartość obliczeniowa siły ciśnienia spływowego,
- $G'_{stb;d}$ – wartość obliczeniowa ciężaru słupa gruntu z uwzględnieniem wyporu.

Uzyskane zmiany stopnia wilgotności, wartości ciśnienia porowego, pionowej składowej naprężeń efektywnego oraz prędkości filtracji w wybranych węzłach umożliwiły ocenę deformacji gruntu wywołanej działaniem sił ciśnienia spływowego.

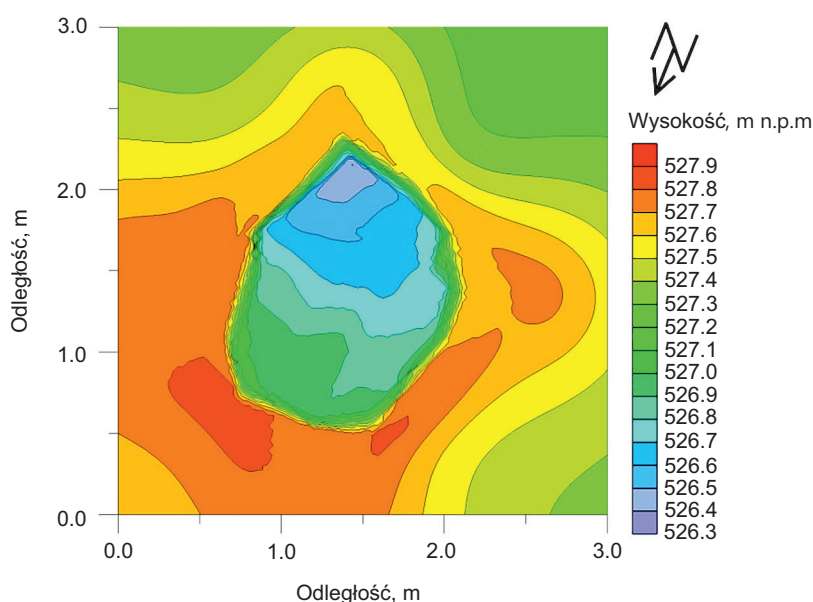
WYNIKI BADAŃ I OBLICZEŃ

Szerokość analizowanej formy sufozyjnej (zapadliska) w najszerszym miejscu wynosiła 1,75 m, a głębokość wahała się od 0,8 m w górnej części do 1,2 m u wylotu kanału sufozyjnego (ryc. 6). Należy jednak przypuszczać, że głębokość zapadliska w momencie jego powstawania mogła być większa, ponieważ w trakcie wykonywania badań kanał wylotowy był w części zaślepiiony kilkudziesięciocentymetrową warstwą gruntu, która uległa oderwaniu od ściany zapadliska (ryc. 1c).

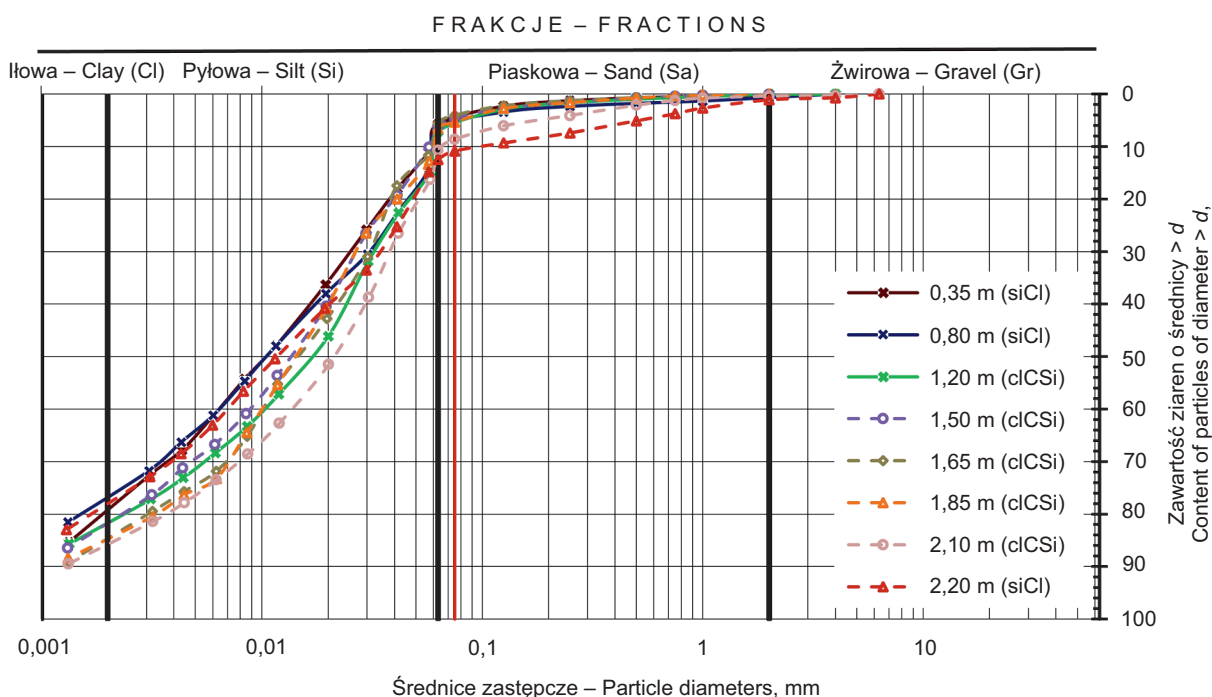
Wykonane wiercenia penetracyjne poniżej zapadliska w odległości około 5 i 10 m potwierdziły obecność kanału sufozyjnego na głębokości odpowiednio 1,1 i 0,8 m, a więc nieco płytszej niż głębokość położenia kanału w zapadlisku. Wyraźnie wskazuje to na wypływanie się kanału sufozyjnego zgodnie ze spadkiem terenu i wypływ wody na powierzchnię. Prę-

kość przepływu wody w kanale wylotowym z zapadliska wahała się w zakresie od 0,19 do 0,29 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (średnio 0,23 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), a w miejscu wypływu na powierzchnię terenu od 0,26 do 0,37 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (średnio 0,32 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Należy zwrócić uwagę, że przytoczone wyżej wyniki pomiarów uzyskano co najmniej kilkanaście dni po powstaniu zapadliska. Należy przypuszczać, że objętość i prędkość przepływającej wody były większe w momencie powstania zapadliska. Wyniki pomiarów zmian stężenia soli kuchennej w miejscu wypływu wody na powierzchnię terenu (zakończeniu kanału) wskazują, że średnia prędkość przepływu wody w kanale sufozyjnym wynosiła 0,1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pomiar pH wody wykazał, że na wlocie do kanału sufozyjnego wynosiła 8,1, a w miejscu wypływu wody była nieco mniejsza – 7,8.

Analiza składu granulometrycznego próbek gruntów pobranych ze ściany zapadliska wykazała, że cechują się one niewielką zmiennością (ryc. 7, tab. 1). Pod względem geotechnicznym (PN-EN ISO 14688:2018-05) uziarnienie badanych gruntów odpowiadało ilom pylastym do głębokości około 0,85 m, a poniżej pyłom grubym ilastym. Zauważono, że wraz ze wzrostem głębokości zwiększała się gęstość objętościowa, a zmniejszała wilgotność, co spowodowane było zmniejszeniem



Ryc. 6. Model numeryczny zapadliska sufozyjnego (odległość podana w układzie lokalnym) (Źródło: opracowanie własne)
Fig. 6. Numerical model of the piping hole (distance given in the local system) (Source: own study)



Ryc. 7. Krzywe uziarnienia gruntów pobranych z ścian zapadliska (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 7. The particle size distribution curves of soils taken from the walls of the piping hole (Source: own study)

Tabela 1. Charakterystyka geotechniczna gruntów pobranych ze ścian zapadliska sufozyjnego (Źródło: opracowanie własne)

Table 1. Geotechnical characteristics of the soils taken from the walls of the piping hole (Source: own study)

Parametr	Jednostka	Głębokość poboru próbek [m]				
		0,35	0,85	1,20	1,50–2,10	2,20
		Wartość				
Zawartość frakcji:						
żwirowa (Gr) 63 – 2 mm		0,3	0,7		0,0 – 0,4	1,10
piaskowa (Sa) 2 – 0,063 mm	%	5,4	5,8	7,1	5,4 – 10,3	11,38
pyłowa (Si) 0,063 – 0,002 mm		73,9	70,2	74,8	75,7 – 79,3	65,04
iłowa (Cl) < 0,002 mm		20,4	23,3	18,1	13,7 – 18,1	22,48
Nazwa wg PN-EN ISO 14688:2018-05		siCl	siCl	clCSi	clCSi	siCl
Gęstość objętościowa	$g \cdot cm^{-3}$	1,81 – 1,84 (1,83)	1,86 – 1,92 (1,90)	1,95 – 1,98 (1,96)		
Wilgotność naturalna	%	26,9 – 28,7 (27,9)	24,4 – 26,7 (25,9)	23,6 – 25,5 (24,5)		
Gęstość objętościowa szkieletu	$g \cdot cm^{-3}$	1,41 – 1,45 (1,43)	1,47 – 1,53 (1,50)	1,58 – 1,59 (1,58)		
Porowatość	–	0,46	0,44	0,41		
Granice Atterberga						
– plastyczności	%	20,84	19,74 – 20,00	17,64 – 18,42		
– płynności		41,8 – 42,9	43,6 – 46,8	37,8 – 39,1		
W nawiasach podano wartości średnie						

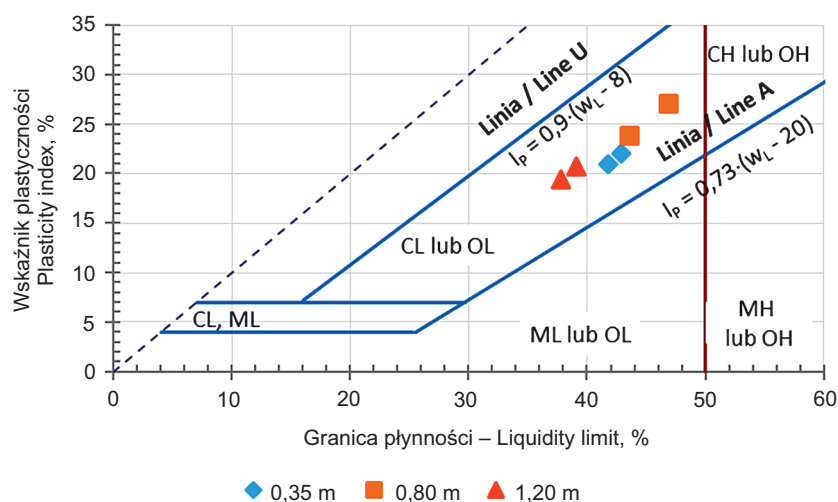
się porowatości gruntu. Ogólnie stwierdzono, że właściwości fizyczne gruntów na głębokości wylotu kanału sufozycznego nie predysponują bezpośrednio do powstania tego zjawiska. W obrębie zapadliska nie stwierdzono również zwiększonej aktywności organizmów żywych, która mogłaby sprzyjać rozluźnieniu gruntu i zwiększeniu przepływu poziomego wody w sąsiedztwie powstałego kanału.

W celu identyfikacji gruntów spoistych często podaje się tzw. kartę plastyczności Casagrande'a (ryc. 8) (Craig 1997, PN-EN ISO 14688:2018-05). Na podstawie uzyskanych wartości granicy plastyczności i wskaźnika plastyczności badane grunty spoiste zaliczono do gruntów o niskiej plastyczności.

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie wykazały, że grunty w obrębie zapadliska charakteryzują się wysokimi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności (tab. 2), które teoretycznie powinny ograniczać możliwość odpajania się cząsteczek gruntu i ich przemieszczanie na skutek przepływu wody do niżej położonych miejsc. Należy jednak zwrócić uwagę, że wytrzymałość na ścinanie gruntu pobranego z głębokości 1 m jest nieco mniejsza niż z głębokości 0,8 m (ryc. 9).

Badania wytrzymałości na ścinanie *in situ* ścinarką obrotową wykazały, że na głębokości 1,20 m nastąpiło zmniejszenie jej wartości o około 25% w stosunku do głębokości 0,85 m (ryc. 10). Podobnie wytrzymałość na ściskanie oznaczona penetrometrem stożkowym wykazała zmniejszenie o około 48%. Jest to dlatego istotne, że nie stwierdzono zwiększenia wilgotności gruntu wraz z głębokością, a wręcz odwrotnie – jej zmniejszenie (tab. 1). Należy podkreślić, że wzrost wilgotności gruntu jest jednym z czynników powodujących osłabienie gruntu przez zmniejszanie jego wytrzymałości na ścinanie czy też ściskanie.

Współczynnik filtracji z badań w edometrze gruntów pobranych z głębokości 0,85 i 1,20 m w zapadlisku sufozycznym był podobny i wynosił średnio $2,4 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 2, ryc. 11a). Natomiast badania przeprowadzone *in situ* w dnie zapadliska wykazały zwiększenie wartości współczynnika filtracji o 6 rzędów wielkości, a jego wartość wynosiła $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 2, ryc. 11b). Tak duże różnice w wartościach współczynnika filtracji pomiędzy badaniami laboratoryjnymi a polowymi mogą wynikać z konieczności przygotowania próbki do badań w edometrze, a także z wymieszanej i rozluźnionej struktury gruntu



Ryc. 8. Karta plastyczności Casagrande'a gruntów pobranych z zapadliska sufozycznego (Źródło: opracowanie własne)
CH – grunty bardzo spoiste, CL – grunty średnio spoiste i spoiste zwięzłe, MH i ML – grunty mało spoiste, OL – piaski próchnicze i pyły próchnicze (oznaczenia za Biernatowski i in. 1987)

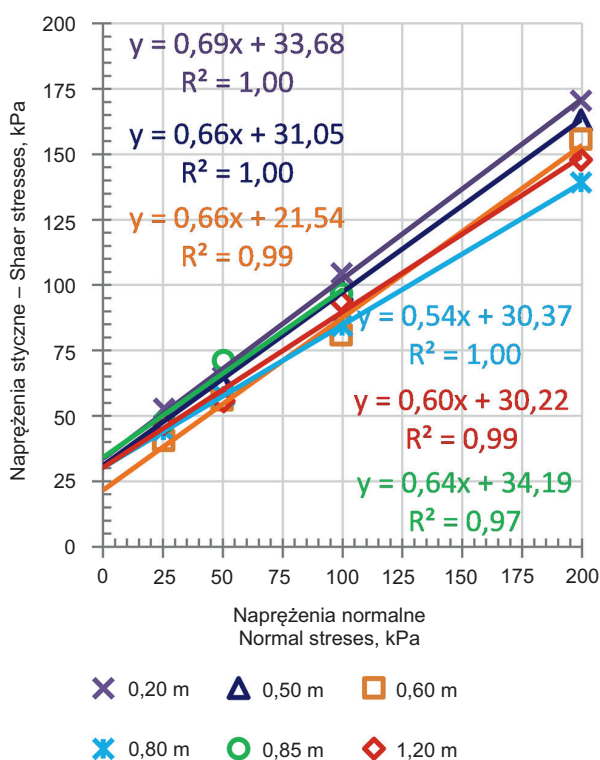
Fig. 8. Casagrande's plasticity sheet of soils taken from a piping hole (Source: own study)
CH – very cohesive soils, CL – medium cohesive and cohesive soils, MH and ML – low cohesive soils, OL – humus sands and humus silt (as found in Biernatowski et al. 1987)

Tabela 2. Parametry wytrzymałościowe i hydrauliczne gruntów pobranych ze ścian zapadliska sufozyjnego (Źródło: opracowanie własne)

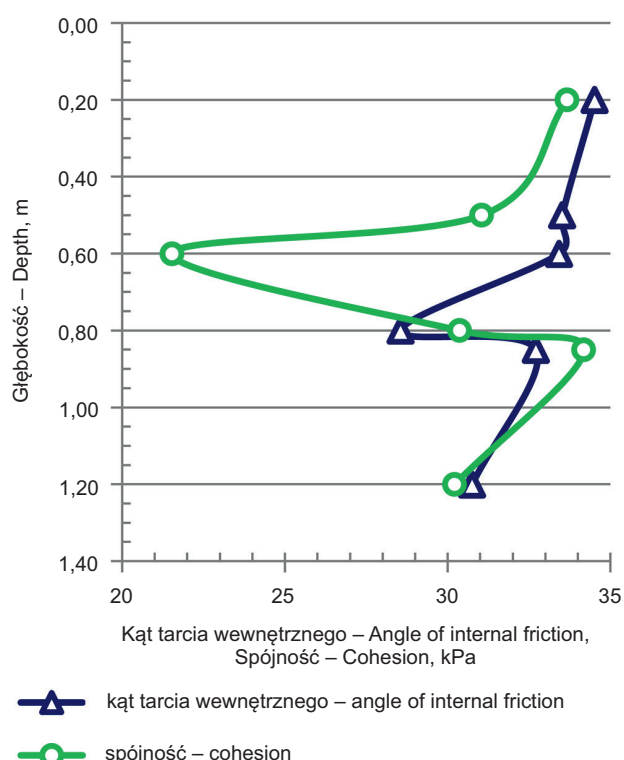
Table 2. Shear strength and hydraulic parameters of soils taken from the walls of the piping hole (Source: own study)

Głębokość poboru próbek m	Wytrzymałość na ścinanie			Wytrzymałość na ściskanie – penetrometr tłoczkowy kPa	Współczynnik filtracji k_{10}	
	Aparat bezpośredniego ścinania		Ścinarka obrotowa		Edometr	Infiltrometr Saturo
	Kąt tarcia wewnętrznego °	Spójność				
0,20	34,5	33,7			$1,50 \cdot 10^{-4}$	
0,50	33,5	31,1	42,2	220,6		
0,60	33,4	21,5				
0,80	28,5	30,4				
0,85	32,7	34,2	71,1	236,3	$2,83 \cdot 10^{-10}$ $1,34 \cdot 10^{-10}$	
1,20	30,8	30,2	53,0	123,8	$3,03 \cdot 10^{-10}$ $2,31 \cdot 10^{-10}$	

a) wytrzymałość na ścinanie – shear strength

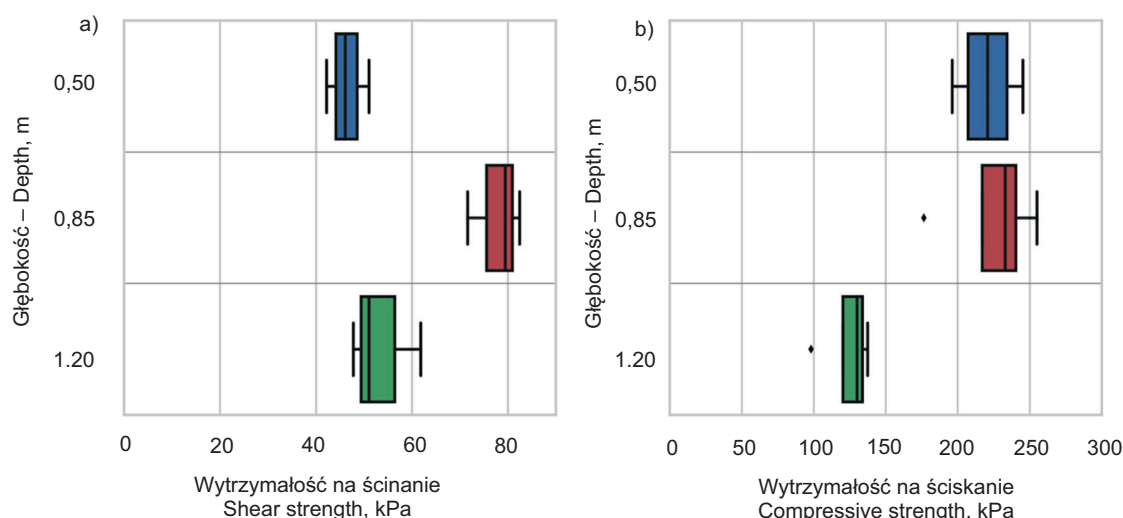


b) parametry wytrzymałości na ścinanie – shear strength parameters



Ryc. 9. Wytrzymałość na ścinanie (a) i jej parametry (b) gruntów pobranych ze ścian zapadliska sufozyjnego (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 9. Shear strength (a) and its parameters (b) of soils taken from the walls of the piping hole (Source: own study)

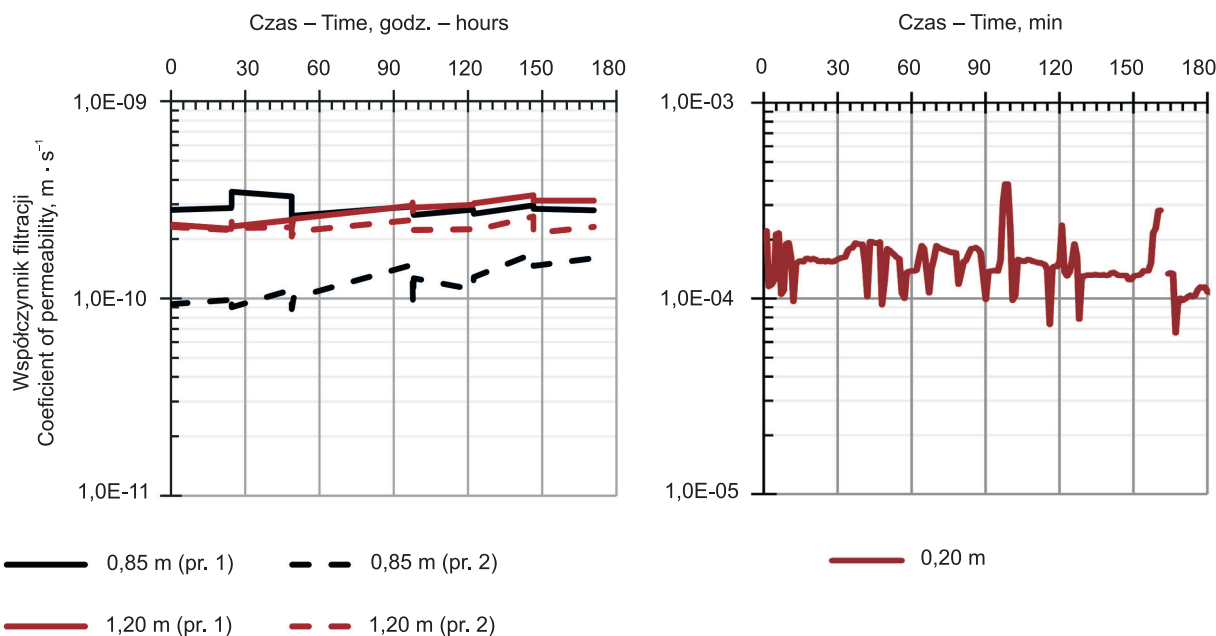


Ryc. 10. Wytrzymałość na ścinanie z badań ścinarką obrotową (a) i wytrzymałość na ściskanie z badań penetrometrem stożkowym (b) gruntów zapadliska sufozyjnego (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 10. Shear strength from pocket shear vane tests (a) and compressive strengths from cone penetrometer tests (b) of soils of the piping hole (Source: own study)

a) badania laboratoryjne w edometrze – laboratory tests in the oedometer

b) badania polowe infiltrometrem Saturo – field tests with the Saturo infiltrrometer



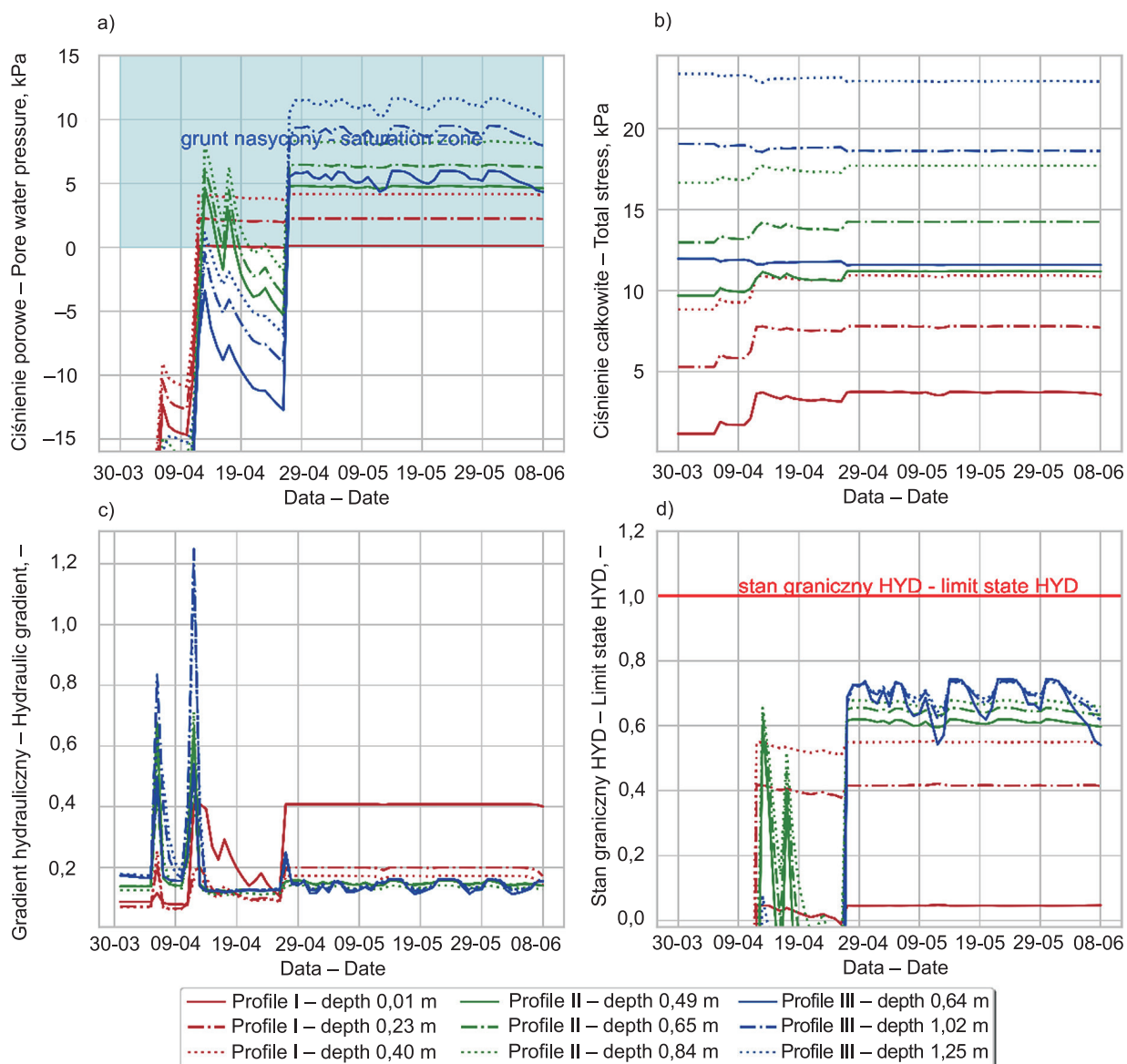
Ryc. 11. Zależność współczynnika filtracji od czasu trwania badania (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 11. The coefficient of permeability vs test time duration (Source: own study)

w badaniach infiltrometrem Saturo. Zgodnie z klasyfikacją Pazdro (1983) współczynnik filtracji z badań w edometrze pozwolił zakwalifikować badane grunty do nieprzepuszczalnych, a z badań infiltrometrem Saturo do gruntów na granicy dobrze i średnio przepuszczalnych.

Wyniki obliczeń numerycznych (ryc. 12) wykazały istotne zmiany stanu naprężenia i warunków przepływu

wody (gradientu hydraulicznego) w okresie od kwietnia do czerwca 2019 roku. Stwierdzono, że pierwsze gwałtowne zmiany wartości analizowanych parametrów fizycznych w gruncie podłoża stoku wystąpiły 28 kwietnia. Na skutek opadu deszczu o wysokości 49,4 mm (stacja PPN na Podłęczach) doszło do nasycenia gruntu w większości węzłów obliczeniowych (ryc. 12a), a także zauważalny był gwałtowny przyrost



Ryc. 12. Wyniki obliczeń ciśnienia porowego (a), naprężenia całkowitego (b), gradientu hydraulicznego (c) oraz stanu granicznego HYD (d) (Źródło: opracowanie własne)

Fig. 12. Results of calculations of pore water pressure (a), total stress (b), hydraulic gradient (c) and limit state HYD (d) (Source: own study)

gradientu hydraulicznego w węzle znajdujących się w przekroju I-I tuż przy powierzchni terenu (ryc. 12c), czyli w miejscu, gdzie zaobserwowano wypływ wody z kanału sufozycznego. Należy jednak zwrócić uwagę, że na początku kwietnia wystąpiły dwa dni, w których wartości gradientu hydraulicznego znacząco wzrosły, nawet powyżej wartości 1,0, która uznawana jest za krytyczną z inżynierskiego punktu widzenia (Richards i Reddy 2007). Ponadto należy podkreślić, że gradienty te wystąpiły w węzłach położonych w strefie aeracji (por ryc. 12a i 12c). Wartości gradientu hydraulicznego po 28 kwietnia dla węzła obliczeniowego w przekroju I wynosiły około 0,4 i były większe od wartości krytycznych gradientów w podłożu budowli ziemnych zbudowanych z piasków drobnych i średnich (Żbikowski 1983). Równocześnie, jak podają Richards i Reddy (2007), znane są również przypadki wystąpienia procesu sufozji w gruntach przy wartości gradientu wynoszących jedynie 0,17. Z kolei wyniki badań Petrucci i Říha (2022), przeprowadzone dla jednofrakcyjnych piasków, wskazują, że wartości gradientów hydraulicznych mogą się wahać od 0,45 do 1,80. W okresie od końca kwietnia do początku czerwca 2019 roku wyróżniono kilka dni, w których opad był bliski lub przekraczał 30 mm. W tym czasie praktycznie cały profil gruntowy był nasycony, a wartości gradientów hydraulicznych – względnie stałe.

Z kolei rozpatrując stan graniczny HYD, można stwierdzić, że nie został on przekroczony w żadnym analizowanym węzle obliczeniowym (ryc. 12d). Należy jednak zwrócić uwagę, że największe wartości ilorazu ciśnienia porowego i naprężenia całkowitego uzyskano dla węzłów znajdujących się w przekroju III, a więc w miejscu, gdzie powstało zapadlisko sufozyczne.

Wpływ na powstanie sufozji ma również prędkość przepływu wody w gruncie, która jest pochodną współczynnika filtracji oraz gradientu hydraulicznego. Żohnierczyk (1956) podaje, że krytyczne wartości prędkości przepływu wody w gruncie dla glin piaszczystych są rzędu $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a dla pyłów $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Wyniki badań polowych wykazały, że wartości współczynnika infiltracji wynosiły około $10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, co jest prawdopodobnie efektem działalności organizmów żywych przy powierzchni terenu. Ze względu na wartość gradientu hydraulicznego równą 0,1 oraz wartość współczynnika filtracji uzyskana prędkość przepływu wody jest większa niż jej krytyczna wartość dla pyłów.

W przypadku naprężeń całkowitych (ryc. 12b) zauważalne było, że jego wartości w poszczególnych węzłach zmieniały się w nieznacznym stopniu, co było związane z niewielkimi różnicami zawartości wody w porach gruntu.

DYSKUSJA WYNIKÓW

W budownictwie ziemnym (Wolski i Żbikowski 1973) przyjmuje się, że proces sufozji występuje w utworach piaszczystych, głównie różnoziarnistych, natomiast nie występuje w gruntach spoistych, co tłumaczy się małą wielkością porów, przez które nie mogą przesuwać się oderwane od szkieletu agregaty cząstek ilastych. Z kolei Bernatek (2014), Bernatek-Jakiel i Poesen (2018) wskazują, że proces sufozji w środowisku naturalnym występuje w zasadzie we wszystkich rodzajach gruntu. Wyniki badań sufozji na obszarze Karpat (Czeppe 1960, Starkel 1960, 1965, Galarowski 1976, za: Święchowicz 2008, Kotyrba 1988, Bernatek i Sobucki 2012) wskazują, że procesowi temu sprzyja występowanie pokryw gruzowych, gruzowo-gliniastych i pylastych, zalegających na nieprzepuszczalnym podłożu. Zjawisko sufozji, a w konsekwencji przebiccia hydraulicznego, obserwowane jest również w budowlach hydrotechnicznych (Richards i Reddy 2007, Říha i in. 2020, Petrucci i Říha 2022), którego następstwa mogą spowodować ich awarie (Richards i Reddy 2007, Awal i in. 2011, Ma i in. 2022).

Mechanizm tworzenia się kanałów sufozycznych związany jest z infiltracją wody, która w pokrywie glebowej (zwietrzelinie), przy kontakcie litej skały i zwietrzeliny, wypłukuje drobny materiał mineralny, powodując powstanie różnych form sufozycznych. Jak podaje między innymi Starkel (1960, za: Święchowicz i in. 2021), sufozja zwykle przebiega wzdłuż szczelin lub kanałów ułatwiających przepływ wody w gruncie, które mogą stanowić nory wytworzone przez gryzonie, korzenie drzew (żywe lub obumarłe) lub powierzchnie kontaktowe warstw litologicznych podłoża o różnej wodoprzepuszczalności. Wyniki badań Verachtert i in. (2011a, 2011b) na terenie Arden wskazują, że aktywność organizmów żywych, obecność krecich nor w połączeniu z wysokim poziomem wód gruntowych sprzyja występowaniu procesu erozji na pastwiskach. Wyniki badań Zaleskiego i in. (2006) prowadzone na obszarze Pienińskiego Parku Narodowego

wego wskazują, że utwory pokrywowe wykształcone na tym obszarze charakteryzują się dużo większą wodoprzepuszczalnością niż utwory będące zwietrzeliną, co sprzyja spływowi śródglebowemu w kierunku równoległym do zbocza, a tym samym sufozji o charakterze kontaktowym.

Analizując wyniki badań współczynnika filtracji próbek gruntu pobranych z głębokości odpowiadających położeniu wylotu kanału sufozycznego, nie stwierdzono występowania znacznych różnic pomiędzy uzyskanymi wynikami badań (por. tab. 1), co może jedynie wskazywać, że poniżej dna kanału występują utwory o małej wodoprzepuszczalności. Zauważalne jest jednak, że próbki pobrane z głębokości 0,85 i 1,20 m różnią się nieznacznie zawartością frakcji drobnych, tzn. grunt położony głębiej jest nieco mniej zwięzły (charakteryzuje go większa zawartość frakcji pyłowej, a mniejsza zawartość frakcji ilowej). Jak wskazują jednak wyniki badań m.in. Verachtert i in. (2011a), Bernatek-Jakiel i Kondrackiej (2016), właściwości gruntów zalegających na stokach poddanych procesom sufozji często nie różnią się znacząco niż na stokach, gdzie nie obserwuje się tego procesu. Oznacza to, że nie tylko właściwości gruntów, ale również inne czynniki mogą stanowić przyczyny powstawania zjawisk sufozycznych.

Bernatek (2014) i Świąchowicz i in. (2021) wskazują, że na większości obszarów sufozja występuje epizodycznie, zwykle w czasie roztopów lub nawalnych opadów. Procesy te rejestrowane są zarówno na obszarach zalesionych, jak i użytkowanych rolniczo, przy czym większość rejestrowanych w Karpatach form sufozycznych występuje na stokach, na których położone są użytki zielone i pastwiska (Czeppe 1960, Starkel 1965, za: Świąchowicz i in. 2021), co jest zgodne z wynikami badań pokryw stokowych w Ardenach (Verachtert i in. 2010, 2011a, 2011b). Wyniki analiz Verachtert i in. (2010) wskazują, że do występowania procesów sufozycznych predysponowane są zbocza o nachyleniu przekraczającym 8° o zbieżnym kształcie, który sprzyja koncentracji podpowierzchniowego spływu wody. Podobnymi cechami charakteryzowało się sąsiedztwo analizowanej formy erozyjnej.

W literaturze przedmiotu przedstawiane są niejednoznaczne poglądy odnośnie do wpływu korzeni roślin na mechanizm występowania procesów sufozycznych. Korzenie zwiększają zwięzłość gruntu, przy-

czyniając się do ograniczenia procesu sufozji (Bernatek-Jakiel i in. 2017, Bernatek-Jakiel i Poesen 2018). Z jednej strony wyniki badań w skali laboratoryjnej (Estabragh i in. 2014, Nassar i in. 2019) z zastosowaniem zbrojenia rozproszonego, które z założenia stanowi substytut korzeni w gruncie, wskazują, że ma ono pozytywny wpływ na ograniczenie tego procesu. Z drugiej strony mogą przyczyniać się (podobnie jak działalność organizmów zwierzęcych) do tworzenia makroporów umożliwiających przepływ wody w gruncie, które mogą ulegać rozszerzeniu na skutek naprężeń oddziałujących w trakcie przepływu wody (Bernatek-Jakiel i in. 2016). Nieco więcej informacji na temat przebiegu procesu sufozycznego mogą dostarczyć wyniki obliczeń konstrukcji hydrotechnicznych (m.in. Żołnierczyk 1956, Dołżyk i Szypcio 2013, Fox i in. 2013, Sieczka i Garbulewski 2014).

Analiza warunku stanu granicznego HYD – hydraulicznego wypiętrzenia (unoszenie cząstek gruntu, wewnętrzna erozja lub przebicie) w zaporach ziemnych prowadzona przez Sieczkę i Garbulewskiego (2014) wskazuje, że uzyskane wyniki zależały od zastosowanego podejścia obliczeniowego i przyjętego schematu. Obliczenia wskazały, że w zaporze ziemnej w strefie wypływu wody przy skarpie odpowietrznej występowały najbardziej niekorzystne warunki wypływu, a spadek hydrauliczny był bliski jedności (Sieczka i Garbulewski 2014). Dołżyk i Szypcio (2013), analizując stateczność dna wykopu budowlanego, zwracają uwagę na proponowane w Eurokodzie 7 dwa podejścia obliczeniowe prowadzące do różnych wartości współczynnika bezpieczeństwa, ale również podkreślają, że prędkość wody ma istotne znaczenie dla powstania deformacji filtracyjnych. Żołnierczyk (1956) przytacza szereg formuł empirycznych umożliwiających określenie krytycznej prędkości filtracji wody w gruncie na podstawie jego średnic zastępczych. Wyniki tych analiz wskazują, że w zależności od zastosowanej formuły wartości prędkości wody mogą się różnić o rząd wielkości i mogą być zbliżone lub mniejsze od wartości współczynnika filtracji gruntu. Ponadto Żołnierczyk (1956) przedstawia zależność, która wskazuje, że wraz ze wzrostem wskaźnika różnoziarnistości gruntu w zakresie od 2,5 do 40 zmniejsza się dopuszczalna wartość spadku hydraulicznego warunkująca uruchomienie procesu wynoszenia cząstek z gruntu. Wskazuje on,

że spadek ten może być nawet mniejszy niż 0,2, co jest bliskie wartości spadku dopuszczalnego dla piasku drobnego w podłożu budowli hydrotechnicznych (Żbikowski 1983).

Wyniki badań procesu sufozji z zastosowaniem metod geofizycznych pozwalają stwierdzić, że tradycyjne metody kartowania nie doszacowują skali tego procesu (Bernatek-Jakiel i in. 2016, Bernatek-Jakiel i Kondracka 2019). W związku z tym metody te mają duży potencjał w badaniach takich procesów, ale jak zauważają Got i in. (2020), także pewne ograniczenia i nie zawsze pozwalają uzyskać satysfakcjonujące rezultaty.

PODSUMOWANIE

Wyniki badań i obliczeń oraz analiza literatury przedmiotu wskazują, że procesy sufozyczne są w wielu obszarach, w tym również w polskich Karpatach, zjawiskiem powszechnym, pełniącym funkcję rzeźbotwórczą. Zaobserwowana forma sufozyczna świadczy o tym, że na badanym stoku występuje ciągły kilkudziesięciometrowej długości kanał sufozyczny wytworzony w utworach średniospoistych, ilasto-pylastych. Należy spodziewać się, że w okresach zwiększonego przepływu śródglebowego, a więc w czasie długotrwałych lub intensywnych opadów, będzie dochodzić do nasilania się zjawisk sufozycznych i tworzenia się, podobnych do zaobserwowanej, form morfologicznych na stoku.

Wyniki obliczeń numerycznych nie potwierdziły jednoznacznie, że w sąsiedztwie analizowanego zapadliska i kanału sufozycznego istnieją warunki sprzyjające tworzeniu deformacji hydraulicznych. Jednak w trakcie zwiększonego przepływu filtracyjnego przez grunt wytwarzają się wysokie wartości gradientu hydraulicznego, co przy dużej porowatości gruntu, związanej m.in. z obecnością w nim mikroorganizmów, sprzyja wynoszeniu cząstek gruntu.

Wydaje się, że na analizowanym zboczach procesowi sufozji sprzyja obecność drewnianego koryta powyżej powstałego zapadliska sufozycznego, z którego woda infiltruje w podłoże gruntowe, co z pewnością sprzyja zwiększeniu intensywności przepływu śródglebowego w analizowanym miejscu. Z informacji ustnych przekazanych przez właścicieli terenu wynika również, że do procesów sufozycznych mógł przyczynić się brak konserwacji systemu odwodnienia powierzchniowe-

go terenu (rowów), co z pewnością mogło wpłynąć na zwiększenie infiltracji wody w grunt.

LITERATURA

- Awal, R., Nakagawa, H., Fujita, M., Kawaike, K., Baba, Y., Zhang, H. (2011). Study on piping failure of natural dam. *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, 54 B, 539–547.
- Bernatek, A. (2014). Rola sufozji w rozwoju rzeźby – stan i perspektywy badań. *Przegląd Geograficzny*, 86(1), 53–76.
- Bernatek, A., Sobucki, M. (2012). Wykształcenie form sufozycznych na stokach Kińczyka Bukowieckiego (Bieszczady Wysokie). *Roczniki Bieszczadzkie*, 20, 247–253.
- Bernatek-Jakiel, A., Kacprzak, A., Stolarczyk, M. (2016). Impact of soil characteristics on piping activity in a mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern Carpathians). *Catena*, 141, 117–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.001>.
- Bernatek-Jakiel, A., Kondracka, M. (2016). Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. *Geomorphology*, 274, 193–209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.018>.
- Bernatek-Jakiel, A., Kondracka, M. (2019). Detection of soil pipes using ground penetrating radar. *Remote Sensing* 11, 1864. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11161864>.
- Bernatek-Jakiel, A., Poesen, J. (2018). Subsurface erosion by soil piping: Significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107–1128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>.
- Bernatek-Jakiel, A., Vannoppen, W., Poesen, J. (2017). Assessment of grass root effects on soil piping in sandy soils using the pinhole test. *Geomorphology*, 295, 563–571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.027>.
- Biernatowski, K., Dembicki, E., Dzierżawski, K., Wolski, W. (1987). *Fundamentowanie. Projektowanie i wykonawstwo*. Arkady, Warszawa.
- Craig, R.F. (1997). *Soil mechanics*. Sixth edition. Spon Press, Taylor&Francis Group, London and New York.
- Czeppe, Z. (1960). Zjawiska sufozyczne w glinach zboczowych górnej części dorzecza Sanu. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 150, 297–332.
- Dołyżk, K., Szypcio, Z. (2014). Stany graniczne HYD w obliczeniach stateczności dna wykopu. *Acta Sci. Pol., Architectura*, 12(2), 83–90.
- Estabragh, A.R., Soltannajad, K., Javadi, A.A. (2014). Improving piping resistance using randomly distributed

- fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 42, 15–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.005>.
- Faulkner, H., Spivey, D., Alexander, R.W. (2000). The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almeria. *Geomorphology*, 35, 87–99. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00024-6).
- Fox, G.A., Felice, R.G., Midgley, T.L., Wilson, G.V., Al-Madhhachi, A.S.T. (2013). Laboratory soil piping and internal erosion experiments: Evaluation of a soil piping model for low-compacted soils. *Earth Surf. Process. Landforms*, 39, 1137–1145. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3508>.
- Galarowski, T. (1976). New observations of the present-day suffosion (piping) processes in the Bereźnica catchment basin in The Bieszczady Mountains (The East Carpathians). *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 10, 115–124.
- GEOSLOPE International, Ltd. (2021). *Stress-Strain Modeling with GeoStudio*. Canada.
- Got, J.B., Bielders, C.L., Lambot, S. (2020). Characterizing soil piping networks in loess-derived soils using ground-penetrating radar. *Vadose Zone Journal*. DOI: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20006>.
- Hunter, J.D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
- Kotyba, A. (1988). Sufozja a efekt geotermiczny w osuwiskowych utworach fliszowych. *Przegląd Geologiczny*, 38, 155–158.
- Kulka, A., Rączkowski, W., Żytko, K., Gucik, S., Paul, Z. (1985). Szczegółowa mapa geologiczna Polski. Arkusz 1050 – Szczawnica–Krościenko. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Kulka, A., Rączkowski, W., Żytko, K., Paul, Z. (1991). Objasnienie do Szczegółowej mapy geologicznej Polski 1 : 50 000. Arkusz Szczawnica–Krościenko (1050). Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Ma, W., Zhang, G., Yang, Y., Wang, P., Zhao, Y., Lin, Q. (2022). The piping failure mechanism of a loess dam: The 2021 dam break of the Yang Village Reservoir in China. *Front. Earth Sci.*, 10, 892179. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.892179>
- Nassar, M.B., Mushina, P.M., Shaju, N., Shihin, A.N., Jaimon, B. (2019). Effect of coir fiber on the piping behavior of soil. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(4), 3958–3962.
- Pazdro, Z. (1983). *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Petrula, L., Říha, J. (2022). A new small-scale experimental device for testing backward erosion piping. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70, 3, 376–384. DOI: <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0023>
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688:2018-05. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-2: 2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- PN-EN ISO 17892-12:2018-08. Rozpoznanie i badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 12: Oznaczanie granic płynności i plastyczności. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Reback, J., McKinney, W., jbrockmendel, Van den Bossche, J., Augspurger, T., Cloud, P., gyoung, Sinhrks, Klein, A., Roeschke, M., Tratner, J., She, Ch., Ayd, W., Hawkins, S., Petersen, T., Schendel, J., Hayden, A., Garcia, M., Jancauskas, V., MomIsBestFriend, Battiston, P., Skipper Seabold, chris-b1, h-vetinari, Hoyer, S., Overmeire, W., alimcmaster1, Mehayar, M., Whelan, Ch., Kluyver, T. (2020). *Pandas-dev/pandas: Pandas 1.0.0*. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>.
- Richards, K.S., Reddy, R.R. (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 381–402. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0095-0>.
- Říha, J., Petrula, L., Hala, M. (2020). Statistical analysis of experimentally determined critical hydraulic gradients for heave. *Géotechnique Letters*, 10, 2, 377–384. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00054>.
- Schneider, C. (2014). From pores to pipes: The problem of underground erosion in soils. *Soil Horizons*. DOI: <https://doi.org/10.2136/sh2014-55-6-f>
- Sieczka, A., Garbulewski, K. (2014). Stan graniczny zniszczenia hydraulicznego HYD w zaporach ziemnych według Eurokodu 7. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 23 (1), 87–98.
- Starkel, L. (1960). *Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Starkel, L. (1965). *Rozwój rzeźby polskiej części Karpat Wschodnich*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Świąchowicz, J., Margielewski, W., Starkel, L., Łajczak, A., Pietrzak, M., Krzemień, K., Gorczyca, E., Bucała-Hrabia, A. (2021). Współczesna ewolucja rzeźby Karpat Zewnętrznych i Podhala. [W:] A. Kostrzewski, K. Krzemień, P. Migoń, L. Starkel, M. Winowski, Z. Zwoliński (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. Stowa-

- rzyszenie Geomorfologów Polskich, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Verachtert, E., Devoldere, S., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Deckers, J. (2011a). Impact of land use and soil properties on piping in Belgium. *Landform Analysis*, 17, 215–218.
- Verachtert, E., Maetens, W., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Deckers, J. (2011b). Soil loss rates due to piping erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1715–1725. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.2186>.
- Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Deckers, J. (2010). Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology*, 118, 3–4, 339–348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.001>.
- Waskom, M.L. (2021). Seaborn: Statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3021. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.03021>.
- Wolski, W., Żbikowski, A. (1973). Filtracja. [W:] K. Czyżewski, W. Wolski, S. Wójcicki, A. Żbikowski (red), *Zapory ziemne*. Arkady, Warszawa, s. 159–196.
- Zaleski, T., Kacprzak, A., Maj, K. (2006). Pedogenetic conditions of retention and filtration in soils formed from slope covers on the example of a selected catena in the Pieniny Mts. *Polish Journal of Soil Science*, 34 (2), 185–195.
- Żbikowski, A. (red.) (1983). *Wały przeciwpowodziowe – wytyczne instruktażowe projektowania*. SGGW, Warszawa.
- Żołnierczyk, A. (1956). Zjawiska sufozji w gruntach. *Gospodarka Wodna*, 12, 530–533.

SUFOSION PHENOMENA IN THE AREA OF PIENINY NATIONAL PARK

ABSTRACT

Aim of the study

The aim of the study was to determine the range and conditions for the formation of the piping hole and the piping canal found in the Pieniny National Park in May 2019.

Material and methods

The scope of the research carried out included the determination of the geotechnical characteristics of subsoil on the slope near the piping hole and along the piping canal. Numerical calculations with the finite element method were also carried out in the GeoStudio program, which allowed to assess the possibilities of soil deformation caused by the seepage forces.

Results and conclusions

The results of the research and the analysis of the literature showed that the piping processes in the Polish Carpathians are a common phenomenon that plays a sculptural role. The observed piping form indicates that on the slope is a continuous, several dozen meters long, piping channel formed in medium-cohesive, clayey silt soils. It should be expected that during periods of prolonged or intense rainfall such phenomena will intensify. The calculation results did not confirm the occurrence of conditions favoring the formation of hydraulic deformations. However, during the increased filtration flow, high values of the hydraulic gradient in the soil are generated, which, in the case of high porosity of the soil, favors the removal of soil particles. The occurring process of piping on the slope in question is favored by the presence of a wooden trough from which water infiltrates the ground, which increases the intensity of in-soil flow in the analysed part of the slope.

Keywords: piping, filtration, filtration deformations