

## Rola sufozji w rozwoju rzeźby – stan i perspektywy badań\*

*The role of piping in the development of relief  
– research state and prospect*

**ANITA BERNATEK**

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński  
30-387 Kraków, ul. Gronostajowa 7; anita.bernatek@uj.edu.pl

**Zarys treści.** Celem artykułu jest przegląd dotychczasowych badań sufozji i jej roli w rozwoju rzeźby. Pojęcie sufozji (*piping*) budzi kontrowersje, co podkreślono przedstawiając dyskusję, która toczy się w literaturze polskiej i światowej. Dzięki zestawieniu publikacji z całego świata ukazano, że sufozja jest procesem rozpowszechnionym w niemal wszystkich strefach morfoklimatycznych i zachodzi w obszarach o różnym podłożu. Wyróżniono trzy główne podejścia w badaniach sufozji: (1) analizę wpływu sufozji na rozwój rzeźby, (2) analizę czynników inicjujących powstanie form sufozyjnych oraz (3) ilościowe ukazanie efektów działania sufozji. Rolę sufozji w rozwoju rzeźby podkreśla się w badaniach relacji pomiędzy sufozją a powstawaniem i rozwojem dolin oraz sufozją a ruchami masowymi. Wskazano perspektywy badań sufozji.

**Słowa kluczowe:** sufozja, *piping*, rozwój rzeźby, erozja podpowierzchniowa.

### Wprowadzenie

Odtworzenie rozwoju rzeźby, poznanie jego uwarunkowań czy prognoza dalszych przemian rzeźby stanowią jedne z podstawowych problemów badawczych w geomorfologii. Stoki, stanowiące główny element rzeźby (Klimaszewski, 1978), podlegają nieustannemu przekształcaniu i modelowaniu. Jednym z najważniejszych czynników morfogenetycznych działających w ich obrębie jest woda. Może ona odpływać po powierzchni stoku (spływ powierzchniowy) i w procesie spływania bądź erozji liniowej obniżać lub rozcinać jego powierzchnię. Może także infiltrować w głąb i odpływać podpowierzchniowo (spływ śródpokrywowy), oddziałując na podłoże chemicznie (rozpuszczanie, ługowanie) lub fizycznie (sufozja).

---

\* Projekt jest dofinansowany w ramach konkursu PRELUDIUM Narodowego Centrum Nauki (UMO-2012/05/N/ST10/03926).

Przez wiele lat uwaga geomorfologów skupiona była przede wszystkim na roli spływu powierzchniowego (Dunne, 1990; Bryan, 2000), na co istotny wpływ miała praca R.E. Hortona (1945). Znaczenie spływu powierzchniowego na stokach, a w konsekwencji spłukiwania w modelowaniu powierzchni było podkreślane licznymi badaniami terenowymi i eksperymentalnymi, zwłaszcza w obrębie stoków w klimacie suchym i półsuchym oraz stoków użytkowanych rolniczo, gdzie często dochodzi do formowania spływu powierzchniowego. Także w Polsce literatura dotycząca spłukiwania jest liczna i dotyczy różnych regionów: Karpat (m.in. Gerlach, 1966, 1976; Gil, 1976, 1999; Święchowicz, 2002, 2012), Sudeatów (m.in. Bieroński i inni, 1992; Teisseyre, 1992, 1994; Klementowski, 2002), Wyżyn Polskich (m.in. Rodzik i inni, 1998; Rodzik i Stępniewski, 2005).

Początkowo rolę spływu śródpokrywowego w procesach erozyjnych podkreślano w nielicznych pracach (m.in. Gibbs, 1945; Buckham i Cockfield, 1950; Parker, 1963; Ward, 1966). Erozja podpowierzchniowa uważana była za proces o niewielkim znaczeniu i ograniczony w zasadzie do regionów o klimacie suchym i półsuchym (Bryan i Jones, 1997).

Podjęcie to zmieniło się w latach 1960. i 1970., kiedy dostrzeżono rolę spływu podpowierzchniowego w formowaniu odpływu w zlewni. Prowadzono wtedy liczne kompleksowe badania nad transportem materiału w zlewni (m.in. Dunne i Black, 1970; Gil, 1976; Słupik, 1978). Zaczęły powstawać prace na temat erozji podpowierzchniowej (sufozji) w obszarach zbudowanych z różnorodnych materiałów i w różnych strefach klimatycznych (Bryan i Jones, 1997).

Badania sufozji prowadzone są w różnych strefach klimatycznych i w obszarach o różnorodnych utworach pokrywowych na całym świecie. Wciąż jednak znaczenie tego procesu jest niewystarczająco poznane i zazwyczaj niedoceniane, co podkreśla się w literaturze zarówno światowej (Bryan, 2000; Jones, 2004), jak i polskiej (Haczewski i inni, 2007). W Polsce powstało dotychczas niewiele prac poświęconych temu zagadnieniu. Bezpośrednio sufozji poświęcone są prace z obszaru Karpat (Czeppe, 1960; Galarowski, 1976). W pozostałych opracowaniach problem jest raczej sygnalizowany niż rozwiązany, zarówno w obszarach lessowych (m.in. Rodzik i Zgłobicki, 2000; Gardziel i Rodzik, 2005), jak i górskich (m.in. Starkel, 1960; Haczewski i inni, 2007; Margielewski i inni, 2008), gdzie o sufozji wspomina się, lecz nie przedstawia konkretnych wyników badań.

Niniejszy artykuł powstał w wyniku zainteresowań i badań autorki prowadzonych nad sufozją w Bieszczadach. Jego celem jest przegląd dotychczasowych badań sufozji i jej roli we współczesnym rozwoju rzeźby. Przedstawiono dyskusję nad różnymi aspektami pojęcia sufozji. Wskazano obszary, gdzie podejmowane są prace na temat sufozji oraz określono główne nurty badań. Zaprezentowano również perspektywy badań tego procesu.

## Pojęcie sufozji

Pojęcie sufozja, określające proces morfogenetyczny, pochodzi od łacińskiego słowa *suffodio*, które oznacza podkopać, wykopać od dołu (Czeppe, 1960; Gutiérrez Elorza i Rodríguez Vidal, 1984). Stosowane jest przede wszystkim w krajach Europy Środkowo-Wschodniej, m.in. w Polsce (Czeppe, 1960; Starkel, 1960), Czechach (Demek i inni, 2012), Słowacji (Mazúr, 1963; Stankoviansky, 2003), na Węgrzech (Kertész i Gergely, 2011) czy w Serbii (Popov i inni, 2012). Czasami używane jest także w krajach hiszpańskojęzycznych (m.in. w Hiszpanii: Gutiérrez Elorza i Rodríguez Vidal, 1984; García-Ruiz, 2011; Nadal-Romero i inni, 2011b; w Argentynie: Suvires, 2004). Było również stosowane we Francji (Tricart, 1977). Obecnie najbardziej rozpowszechnione w literaturze światowej jest pojęcie *piping*. W latach 1990. A.K. Teisseyre (1994) postulował wypracowanie odpowiedniego polskiego terminu na angielskie słowo *piping*. W ostatnich latach przyjęło się, by *piping* utożsamiać z polskim pojęciem sufozja (Migoń, 2009).

Pojęcie sufozji zostało wprowadzone w 1898 r. (lub 1899 r.) przez A.P. Pawłowa jako określenie procesu podziemnego wymywania i ługowania cząstek (za: Khomenko, 2006). W 1902 r. L.S. Berg (za: Czeppe, 1960) opisał formy o takiej genezie występujące na północnych brzegach Jeziora Aralskiego i określił je mianem „pustynnego krasu gliniastego”. Podkreślił on specyficzność procesów wymywania i przeciwstawił je ługowaniu.

W latach 1960. G.G. Parker (1963) wprowadził pojęcie „pseudokras” na określenie obszarów przekształconych przez sufozję, podkreślając podobieństwo ich rzeźby do obszarów krasowych. Obecnie jednak pojęcie pseudokras jest dużo szersze i odnosi się do form podobnych do krasowych, ale w powstaniu których proces rozpuszczania skał węglanowych nie odgrywa roli. Mogą to być zatem np. jaskinie szczelinowe, rumowiskowe, lodowcowe czy formy powstałe w obrębie permafrostu (Halliday, 2007).

W późniejszych latach w literaturze polskiej i rosyjskiej zaczęto rozszerzać pojęcie sufozji również na proces chemicznego działania wód podziemnych (Khomenko, 2006), rozróżniając sufozję fizyczną i chemiczną (Maruszczak, 1953, 1986; Koreleski, 2008). H. Maruszczak (1953, s. 196) stwierdził, że jest to „proces morfogenetyczny uwarunkowany działaniem wód podziemnych”. Wydaje się, że takie podejście gubi istotę sufozji w rozumieniu A.P. Pawłowa i prowadzi do powstania pojęcia zbyt ogólnego, przez co także mało precyzyjnego. Niewątpliwie chemiczna działalność wód podziemnych (np. rozpuszczanie) może wspomagać sufozję (Faulkner i inni, 2000). Często procesy te współwystępują, co jest szczególnie podkreślane w obszarach o budowie geologicznej z jednej strony sprzyjającej procesom rozpuszczania (o znacznej zawartości węglanu wapnia), a z drugiej o dużym udziale frakcji drobnej. Przykładami tego typu terenów są

obszary lessowe Wyżyny Lubelskiej, gdzie o złożonej genezie wertebów (zapadlisk, zagłębień lessowych) pisał H. Maruszczak (1953, 1986).

W ostatnich latach w literaturze polskiej pojawiło się stwierdzenie, że sufozja jest procesem strukturotwórczym (niewpływającym na ciągłość ośrodka porowego i niewywołującym zmian objętościowych, a jedynie przemiany cech strukturalno-teksturalnych i chemicznych skały), a nie morfogenetycznym (Afelt, 2007). Takie podejście prowadzi do całkowitej zmiany definicji sufozji, eliminuje z niej podejście geomorfologiczne, a zatem neguje powstawanie nowych form – form sufozyjnych.

W literaturze anglojęzycznej toczyła się dyskusja nad innym aspektem pojęcia sufozji (Dunne, 1990; Bryan i Jones, 1997). Rozważano różne procesy składające się na erozję podpowierzchniową (*subsurface erosion*) i mechanizmy prowadzące do powstania kanałów podziemnych. Już na wstępie oddzielono jednak chemiczną działalność wody płynącej podziemnie od jej działalności mechanicznej. Uznano, że rozpuszczanie (*solution*) nie jest głównym elementem sufozji (Chorley, 1978), tak jak w przypadku procesów krasowych.

Wyróżniono dwa procesy erozji podpowierzchniowej prowadzące do powstania podziemnych kanałów w zależności od sposobu, w jaki te procesy przebiegają (Dunne, 1990). Pierwszy proces zachodzi, gdy woda przesiąkająca (*seeping*) przez pory ma wystarczającą siłę (*drag force*), by poprzez upłynięcie materiału doprowadzić do wymywania cząstek gruntu (Dunne, 1990). Proces ten określanym jest mianem „przesiąkania” (*sapping, spring sapping, seepage erosion*) i jest to sufozja w znaczeniu geologii inżynierskiej (Dunne, 1990; Bryan i Jones, 1997; Jones, 2004). Ten rodzaj erozji podpowierzchniowej prowadzi do rozwoju podziemnych kanałów od wylotu w głąb gruntu, często powoduje powstanie rozgałęzionej sieci kanałów (Bryan i Jones, 1997). Drugi proces zachodzi w obrębie już istniejących makroporów lub kanałów, np. nor zwierząt ryjących, kanałów korzeniowych, szczelin powstałych w wyniku wysychania czy osuwania. Polega on na stopniowym, postępującym poszerzaniu tych przestrzeni przede wszystkim poprzez naprężenie ścinające wywierane przez płynącą wodę (Parker, 1963). Różnica w odniesieniu do „przesiąkania” polega na tym, że proces ten nie zachodzi wstecznie od wylotu kanału ani nie wymaga wysokiego ciśnienia wywołanego przesiąkaniem. To właśnie ten proces często określanym jest mianem sufozji lub erozji tunelowej w znaczeniu geomorfologicznym (*tunnel erosion*) (Bryan i Jones, 1997; Jones, 2004).

T. Dunne (1990) postulował całkowite zaniechanie używania pojęcia *piping*. Sugerował, by posługiwać się pojęciami „przesiąkanie” (*seepage erosion*) i „erozja tunelowa” (*tunnel scour, tunnel erosion*). Jednak ten sam autor zauważył, że procesy te nie wykluczają się, choć podkreślał, że mechanizmy ich działania są inne. R.B. Bryan i J.J.A. Jones (1997), dostrzegając trudności w rozdzieleniu tych dwóch procesów, proponowali, by utrzymać pojęcie *piping* określające wszystkie procesy erozji podpowierzchniowej i tak też niekiedy w literaturze rozumiane

jest to pojęcie (np. Bryan, 2000; Jones, 2004; Desir i Marín, 2011; García-Ruiz, 2011). Najczęściej jednak jest ono zawężane do erozji tunelowej (np. Farifteh i Soeters, 1999; Botschek i inni, 2002b; Migoń, 2009; Wilson, 2009; Verachtert i inni, 2010; Nadal-Romero i inni, 2011a, b; Romero Díaz i inni, 2011).

Podsumowując rozważania na temat samego pojęcia sufozja, można wyodrębnić dwa główne podejścia:

- 1) sufozja jako proces tylko mechaniczny oraz sufozja jako proces mechaniczny i chemiczny;
- 2) sufozja (*piping*) w rozumieniu geologii inżynierskiej (*seepage erosion, sapping*) i sufozja w rozumieniu geomorfologicznym (erozja tunelowa).

Warto przy tym podkreślić i przyjąć, że w geomorfologii pojęcie sufozji (*piping* lub *tunnel erosion*) rozumiane jest najczęściej jako mechaniczne wymywanie cząstek gruntu przez strumienie podziemne (Klimaszewski, 1978; Bryan, 2000; Jones, 2004; Migoń, 2009). Prowadzi to do powstania podziemnych kanałów sufozyjnych, których ślady na powierzchni widoczne są dopiero wtedy, gdy zapadnie się strop kanału lub zostanie zlokalizowany jego wlot bądź wylot. Na powierzchni powstają formy sufozyjne typu studni czy zapadlisk. Takie też rozumienie tego pojęcia przyjmuje autorka w swoich rozważaniach. Chemiczna działalność wód podziemnych ma już przyjęty aparat pojęciowy (m.in. rozpuszczanie, ługowanie) i nie należy mnożyć terminów określających te same procesy; zwłaszcza że autorzy wydzielający sufozję mechaniczną i chemiczną sami odwołują się do stwierdzenia, iż sufozję chemiczną można utożsamiać z ługowaniem (Afelt, 2007). Niemniej, analizując rozwój rzeźby, trzeba pamiętać o możliwości współistnienia różnych procesów – zarówno fizycznych, jak i chemicznych.

### **Badania sufozji na świecie**

Sufozja jest procesem rozpowszechnionym na całym świecie (Jones, 1994; Bryan i Jones, 1997). W tabeli 1 przedstawiono przykłady publikacji powstałych w wyniku prac prowadzonych w wielu regionach świata, w różnych strefach morfoklimatycznych. Duża liczba badań w Europie świadczy nie tylko o dużym rozprzestrzenieniu tego procesu w tej części świata, ale też o znacznym zainteresowaniu badaczy tym regionem. Dlatego dane w tabeli nie odzwierciedlają bezpośrednio skali procesu w poszczególnych obszarach, ale stanowią stosunkowo kompletne zestawienie regionów, gdzie sufozja występuje i wpływa na rozwój rzeźby.

Najwięcej badań prowadzonych jest w strefie leśnej średnich szerokości geograficznych oraz w strefie suchej lub półsuchej średnich i niskich szerokości geograficznych. Potwierdza to trend opisany przez J.A.A. Jonesa (1994), który 20 lat temu dokonał zestawienia prac prowadzonych w różnych regionach świata i najwięcej z nich dotyczyło właśnie tych stref. Takie rozprzestrzenienie sufozji może wynikać z wpływu warunków klimatycznych na rozwój form sufozyjnych. W klimacie suchym i półsuchym często dochodzi do powstania szczelin z wysy-

Tabela 1. Badania sufozji na świecie  
Research on piping around the world

Część świata <i>World region</i>	Strefa morfo-klimatyczna <sup>1</sup> <i>Morphoclimatic zone<sup>1</sup></i>	Dziedzina morfo-klimatyczna <sup>1</sup> <i>Morphoclimatic domain<sup>1</sup></i>	Obszar badań <i>Research area</i>	Publikacje <i>References</i>	Podłoże <i>Geological features</i>
Europa	leśna średnich szerokości geogr.	kontynentalna	Bieszczady, Zewnętrzne Karpaty Wschodnie (NE Polska) Wyżyna Lubelska (E Polska) – Štramberská vrchovina, Pogórze Morawsko-Śląskie, – Vizovická vrchovina, Hostýnské vrchy, Karpaty Słowacko-Morawskie (E Czechy) Chřibý, Karpaty Środkowomorawskie, Zewnętrzne Karpaty Zachodnie (NE Czechy) Strelec, Sudety (N Czechy) Wzgórza Myjava, Zewnętrzne Karpaty Zachodnie (NW Słowacja) Kotlina Żylińska, pogranicze Zewnętrznych i Centralnych Karpat Zachodnich (N Słowacja) zlewnia Tetves (W Węgry) Vojvodina (N Serbia)	Czepe, 1960; Starkel, 1960; Galarowski, 1976 Rodzik i inni, 2009 Buzek, 1969; Kirchner, 1981, 1987 Hořáková, 2007 Bruthans i inni, 2012 Stanokoviansky, 2003 Mazúr, 1963 Gergely i inni, 2005 Lukić i inni, 2012	flisz (warstwy krośnieńskie); gliny pylaste lessy flisz karpacki; gliny pylaste lessy, w podłożu flisz karpacki piaskowce flisz karpacki, formy sufozyjne w osadach den wąwozów flisz karpacki, formy sufozyjne w osadach den wąwozów lessy lessy
	leśna średnich szerokości geogr.	morska	Ardeny Flamandzkie (centralna Belgia)  Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen (W Niemcy) Wijnandsrade i Catsop, Ardeny (S Holandia) Góry Pennińskie, Walia (N i W Wielka Brytania)	Verachttert i inni, 2010  Botschek i inni, 2002a, b Bouma, 2006 Jones, 1971; Jones i inni, 1997; Holden i Burt, 2002	piaskowce i mniej przepuszczalne gliny z dużym udziałem smektytu, lessy w górnej części odwapnione pokrywy lessowe, w dolnej lessy lessy torfowiska, gleby organiczne

	leśna średnich szerokości geogr.	śródziemnomorska	Basilicata (S Włochy)  Petrer, Monnegre (prowincja Alicante), Vera, Tabernas (prowincja Almeria) (SE Hiszpania)  Monegros, Bardenas Reales Dolina Ebro (NE Hiszpania)	Piccarreta i inni, 2006  Harvey, 1982; Calvo-Cases i Harvey, 1996; Calvo-Cases i inni, 1991; Bouma, 2006  Gutiérrez i Vidal, 1984; García-Ruiz i Lasanta, 1995; Gutiérrez i inni, 1997; Sirvent i inni, 1997; Desir i Marín, 2011	gleby z dużym udziałem pyłu lessy; margle, wapienie, piaskowce wapieniste <i>loess; marls, limestones, calcareous sandstones</i>  gleby z dużym udziałem pyłu, w podłożu łupki ilaste i piaskowce <i>silty soils; shales and sandstone</i>
Ameryka Płn.	sucha i półsucha średnich i niskich szerokości geogr.  zimna	półpustynia  peryglacjalna	Benson, Arizona (SW Stany Zjednoczone)  The Dinosaur Badlands, Alberta (S Kanada)  Big Muddy Badlands, (S Kanada)  Półwysep Ungawa (E Kanada)	Masannat, 1980  Hodges i Bryan, 1982  Drew, 1982  Seppälä, 1997	aluwia, piaski pylaste  łupki i piaskowce  pokrywy ilasto-piaszczyste  permafrost
Ameryka Płd.	sucha i półsucha średnich i niskich szerokości geogr.	step	Precordillera Oriental (prowincja San Juan) (W Argentyna)	Suvires, 2004	gleby z dużym udziałem pyłu
Azja	sucha i półsucha średnich i niskich szerokości geogr.	step	Wyżyna Lessowa (N Chiny)	Zhu, 2012	lessy
Afryka	międzyczwrotnikowa  sucha i półsucha średnich i niskich szerokości geogr.	sawanna  półpustynia	N Etiopia (E Afryka)  S Afryka	Billi i Dramis, 2003; Frankl i inni, 2012  Holmes i Meadows, 2012	gleby z dużym udziałem pyłu, Vertisols  gleby z dużym udziałem pyłu
Australia	sucha i półsucha średnich i niskich szerokości geogr.	półpustynia	Victoria (SE Australia), kopalnie złota i węgla (NW, W Australia)	Boucher i Powell, 1994	gleby z dużym udziałem pyłu, sodu; w podłożu piaskowce i mułowce

<sup>1</sup> Według: Tricart i Cailleux (1965); za: Klimaszewski (1978).

Opracowanie własne.

<sup>1</sup> Concept from Tricart and Cailleux (1965) after: Klimaszewski (1978).

Author's own work.



chania, które mogą dać początek kanałom sufozyjnym. Suchy klimat wpływa też na poziom akumulacji sodu w glebach (wielkość parowania jest wyższa niż wielkość opadu), co z kolei wpływa na większą dyspersyjność materiału (Gutiérrez i inni, 1997). W klimacie umiarkowanym (strefy leśnej średnich szerokości geograficznych) prawdopodobnie duże znaczenie w rozwoju form sufozyjnych mają wiosenne roztopy (Gardziel i Rodzik, 2005; Rodzik i inni, 2009) – choć badań w tym zakresie jest na razie niewiele – oraz opady nawalne w okresie letnim, na co wskazują obserwacje terenowe autorki.

Formy sufozyjne rozwijają się w różnorodnych litologicznie utworach pokrywowych. Litologia podłoża może sprzyjać większej intensywności tych procesów (Harvey, 2004). W Polsce pierwsze badania sufozji zaczęto prowadzić w obszarach lessowych (Maruszczak, 1953). W Wielkiej Brytanii początki badań sufozji wiążą się z obszarami o glebach organicznych, torfowych (Jones, 1971). Obecnie zainteresowanie naukowców koncentruje się na obszarach zbudowanych z okruchowych skał osadowych o dużym udziale frakcji pylastej, cechujących się znacznym natężeniem erozji wąwozowej (m.in. Gutiérrez i inni, 1997; Botschek i inni, 2002a, b; Verachtert i inni, 2010; Holmes i Meadows, 2012; Faulkner, 2013). Gdy stopień rozczłonkowania wąwozami jest bardzo duży, obszary te określane są mianem badlands (Bryan i Yair, 1982; Bryan i Jones, 1997). Należą do nich m.in. badlands na południu Kanady, w południowo- i północno-wschodniej Hiszpanii czy na południu Włoch. Równie często tego typu badania dotyczą obszarów lessowych, m.in. w obrębie tzw. europejskiego pasa lessowego (np. w Belgii, Niemczech, Polsce) czy Wyżyny Lessowej w Chinach.

R.B. Bryan i J.A.A. Jones (1997) wyróżnili trzy typy obszarów, w których sufozja ma duże znaczenie geomorfologiczne i hydrologiczne:

- 1) obszary wyżynne w klimacie wilgotnym z glebami organicznymi,
- 2) badlands w klimacie suchym i półsuchym,
- 3) zdegradowane łąki i pastwiska, głównie w strefie międzyzwrotnikowej.

Podkreślili jednocześnie, że najwięcej badań prowadzi się w klimacie wilgotnym, choć efekty działalności sufozji są najbardziej widoczne i najłatwiej rozpoznawalne w obszarach suchych i półsuchych, i to te obszary koncentrują uwagę geomorfologów (Bryan i Jones, 1997).

Nieco inną klasyfikację przedstawiała H. Faulkner (2006), przy czym jej uwaga koncentruje się na sufozji zachodzącej w obrębie gleb (*soil piping*). Wyróżniła ona obszary i stworzyła klasyfikację gleb podatnych na sufozję w Europie:

- 1) gleby organiczne, torfowe (*Histosols*) – obszary wyżynne w Europie Północnej,
- 2) gleby wykształcone na marglach o dużej zawartości sodu (*Xerosols*) – Europa Południowa,
- 3) gleby wykształcone na lessach (*Luvisols*) – Europa Centralna.

W obu tych klasyfikacjach brakuje obszarów o pokrywach dyspersyjnych, ale ani nie wykształconych na lessach, ani o dużej zawartości sodu, gdzie również dochodzi do rozwoju form sufozyjnych. Chodzi tu m.in. o Karpaty, gdzie na



podłożu fliszu karpackiego rozwinęły się pokrywy pylaste. W Polsce (Czeppe, 1960; Starkel, 1960; Galarowski, 1976), w Czechach (Buzek, 1969; Kirchner, 1981, 1987; Hořáková, 2007) i na Słowacji (Mazúr, 1963; Stankoviansky, 2003) opublikowano kilka prac, które wskazują na rolę sufozji w rozwoju rzeźby tych obszarów górskich. Wciąż jednak jest ich niewiele, a te, które istnieją, nie są upowszechniane w literaturze międzynarodowej.

Działalność sufozji dostrzeżono także w obszarze gór wysokich. Już w latach 1980. L. Kaszowski (1985), charakteryzując rzeźbę Hindukuszu Munjan, podkreślił znaczenie sufozji, wyróżniając sufozyczny system morfodynamiczny. Zauważył, że dolne odcinki stożków usypiskowych przemywane są przez wodę roztopową, co powoduje wypłukiwanie najdrobniejszych cząstek. Podkreślił, że wypływ wód może nastąpić w obrębie pokryw, jak również na kontakcie litej skały i mas piaszczystych. A. Kotarba i zespół (1987) zaliczyli sufozję do jednego z dominujących procesów morfogenetycznych działających w piętrze subalpejskim w Tatrach. Zatem o działalności sufozji można też mówić w obrębie grubofrakcyjnych pokryw zwietrzelinowych i w pokrywach morenowych gór wysokich.

W Polsce problem sufozji nie jest jeszcze dobrze rozpoznany. Jedne z pierwszych doniesień o formach sufozyjnych w Polsce pochodzą z pracy A. Malickiego (1935). Zauważono wówczas, że w obszarach lessowych rozwijają się zagłębienia (wertebry) podobne do lejków krasowych. Powstają one niezależnie od skał krasowiejących, w obrębie piasków lub lessów, pod którymi zalega warstwa nieprzepuszczalna (np. warstwa ilów czy warstwowane lessy). O sufozji często wspomina się przy charakteryzowaniu rzeźby wyżyn lessowych (np. Maruszczak, 1986; Rodzik, 2008), ale jako samoistny proces rzadko bywa przedmiotem badań. Może to być wynikiem uznania, że jest to proces trudny do ilościowej oceny (Rodzik, 2008). Ciekawym wyjątkiem są tu ostatnie prace Z. Gardziela i J. Rodzika (2005) oraz J. Rodzika i zespołu (2009) na temat wpływu roztopów i gwałtownych opadów na rozwój wąwozów na Wyżynie Lubelskiej. Sufozja została potraktowana jako jeden ze znaczących procesów zachodzących w obrębie wąwozów (obok akumulacji i erozji liniowej). Podkreślono również jej znaczenie morfotwórcze w tworzeniu wąwozów bocznych, w wyniku rozcinania krawędzi wąwozów. Zauważono, że w rozwoju form sufozyjnych większe znaczenie mają roztopy wiosenne niż letnie deszcze nawalne. Również w obszarze lessowym na Dolnym Śląsku dostrzeżono formy sufozyjne na krawędziach teras rolnych (Teisseyre, 1994) oraz w dnie górnej części suchych dolin (Teisseyre, 1992), choć nie podjęto szerszej analizy tych form.

O sufozji w obszarze młodoglacjalnym Polski pojawiły się dotychczas tylko krótkie doniesienia naukowe. S. Dąbrowski (1992) opisuje dolinę sufozijną w pobliżu miejscowości Napiwody w Puszczy Napiwodzko-Ramuckiej. Podkreśla istnienie lejów sufozyjnych o głębokości do 5 m, uzasadniając ich powstanie sufozją rozumianą jako mechaniczne wymywanie drobnego materiału przez wody podziemne. Również przy opisie genezy Jaskini w Mechowej położonej

w obrębie Kępy Puckiej podkreśla się udział sufozji (Bartuś, <http://www.akg.agh.edu.pl/materialy/sufozyjne.htm>). Jednak sufozja jest tu rozumiana jako mechaniczne wymywanie ziaren piasku przez przesączające się wody (Urban i inni, 2007), a zatem w znaczeniu bliższym angielskiemu *spring sapping* niż *piping*.

Niewiele jest w Polsce prac dotyczących sufozji w obszarach górskich. Podkreśla się znaczenie sufozji w Sudetach, wskazując na jej decydującą rolę w rozwoju geomorfologicznym Gór Stołowych (Pulinowa, 1989). Jednak tu też znaczenie tego pojęcia jest bliższe angielskiego *spring sapping* niż *piping* w rozumieniu erozji tunelowej. L. Starkel (1960) natomiast zwrócił uwagę na działalność sufozji (*piping*) w polskich Karpatach, w przeglądowej pracy na temat rozwoju rzeźby Karpat fliszowych w holocenie. Z działalnością sufozji wiązał powstawanie zapadlisk i form dolinnych. Opisywał zapadliska o długości do 9 m i głębokości 2 m. Wśród sześciu typów modelowania stoków w holocenie wyróżnił typ zmywowo-sufozyjny. L. Starkel (1965) oszacował, że w dorzeczu górnego Sanu sufozja i erozja linijna w samym tylko holocenie mogły doprowadzić do wzrostu gęstości dolin przeciętnie o 50%. Szczegółowej analizie sufozji dokonali Z. Czeppe (1960) i T. Galarowski (1976) w Bieszczadach. Wykazali oni duże znaczenie tego procesu w rozwoju rzeźby górskiej. Badania te nie były jednak kontynuowane, choć w ostatniej monografii dotyczącej budowy geologicznej i rzeźby Bieszczadów (Haczewski i inni, 2007) zaznaczono, że proces ten modeluje rzeźbę gór i wskazano na potrzebę podjęcia badań w tym zakresie.

### Nurty badań sufozji

Na podstawie dostępnej literatury można wyróżnić kilka dominujących nurtów badań sufozji (tab. 2). W badaniach geomorfologicznych priorytet przypisuje się badaniom próbującym ilościowo przedstawić znaczenie sufozji w rozwoju rzeźby (Bryan i Jones, 1997), choć jak widać z przedstawionego zestawienia wciąż prac z tego zakresu jest niewiele. Badania sufozji są niełatwe, gdyż jest to proces, którego działalność można rozpoznać dopiero po efektach widocznych na powierzchni ziemi. Czasem wręcz podkreśla się, że sufozja jest procesem trudnym do ilościowej oceny (Rodzik, 2008). Niemniej prace w tym zakresie są prowadzone. Badana jest m.in. ilość wody i zawiesiny transportowanej poprzez system kanałów sufozyjnych. Najczęściej jednak stosuje się szczegółowe pomiary morfometryczne i kartowanie geomorfologiczne form sufozyjnych. Podejmowane są także próby wykorzystania badań geofizycznych do analizy systemów kanałów podziemnych (Holden i inni, 2002).

Najczęściej podejmowane są badania wpływu sufozji na rozwój rzeźby w większej skali przestrzennej. Najwięcej jest prac wiążących sufozję z procesami denudacyjno-fluwalnymi, gdzie podkreśla się zależność między rozwojem wąwozów a istnieniem kanałów sufozyjnych (np. Harvey, 1982; Onda, 1994; Frankl i inni, 2012; Faulkner, 2013). Badania te prowadzone są zarówno w tere-

nach użytkowanych rolniczo, jak i w obszarach badlands (fot. 1). Nieliczne są opracowania wskazujące na relacje pomiędzy ruchami masowymi a sufozją (np. Tempe i Rapp, 1972).

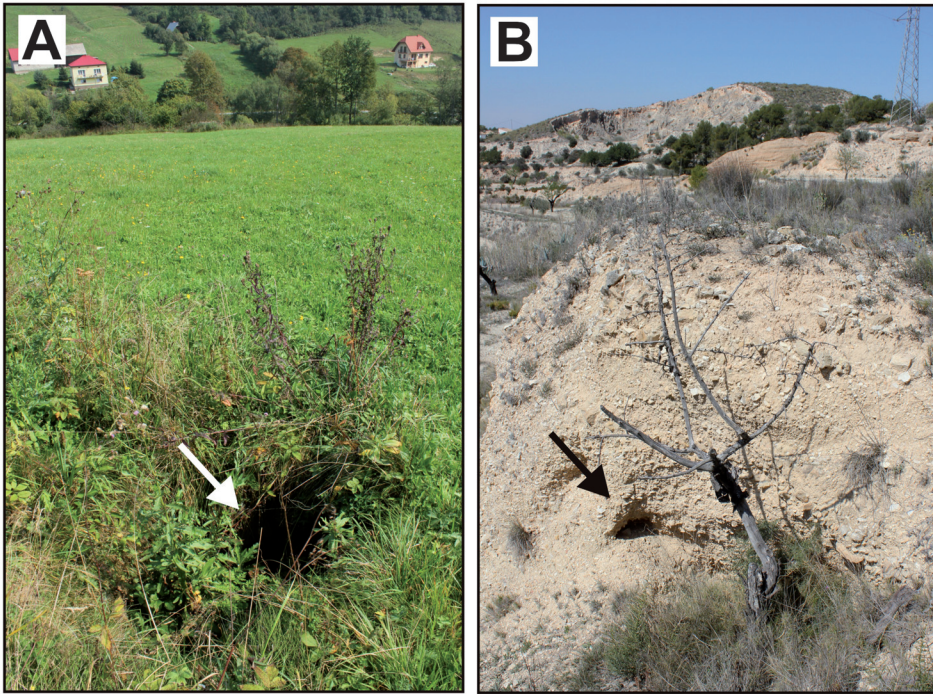
Tabela 2. Dominujące nurty badań sufozji  
Main trends in piping research

Dominujące nurty badań sufozji <i>Main trends in piping research</i>	Wybrane publikacje <i>Selected references</i>
Wpływ sufozji na rozwój rzeźby; morfotwórcze znaczenie sufozji, w tym relacje pomiędzy rozwojem wąwozów a sufozją	Czeppe, 1960; Parker, 1963; Tempe i Rapp, 1972; Galarowski, 1976; Masannt, 1980; Harvey, 1982; Bryan i Harvey, 1985; Boucher i Powell, 1994; Onda, 1994; García-Ruiz i Lasanta, 1995; Calvo-Cases i Harvey, 1996; Rodzik i Zgłobicki, 2000; Billi i Dramis, 2003; Poesen i inni, 2003; Zhu, 2012; Suvi-res, 2004; Gergely i inni, 2005; Hořáková, 2007; Rodzik, 2008; Calvo-Cases i inni, 1991; Desir i Marín, 2011; Frankl i inni, 2012
Analiza uwarunkowań (m.in. glebowych, hydrologicznych, topograficznych) wpływających na działalność sufozji	Masannt, 1980; Hodges i Bryan, 1982; García-Ruiz i inni, 1997; Gutiérrez i inni, 1997; Jones i inni, 1997; Farifteh i Soeters, 1999; Botschek i inni, 2002a, b; Valentin i inni, 2005; Piccarreta i inni, 2006; Wilson, 2009; Verachttert i inni, 2010; Romero Díaz i inni, 2011; Lukić i inni, 2012
Ilościowe przedstawienie działalności sufozji	Gutiérrez i inni, 1997; Sirvent i inni, 1997; Holden i inni, 2002; Rodzik i inni, 2009; Nadal-Romero i inni, 2011a, b

Opracowanie własne.

Author's own work.

Nie mniej ważnym kierunkiem badań jest wyróżnianie czynników wpływających na powstanie i rozwój form sufozyjnych. Z dotychczasowych analiz wynika, że w klimacie półsuchym najbardziej podatne na procesy sufozyjne są gleby o dużej zawartości sodu i minerałów ilastych (np. Gutiérrez i inni, 1997; Faulkner i inni, 2000), a w klimacie umiarkowanym wilgotnym gleby organiczne, torfowe (Jones i inni, 1997; Holden i Burt, 2002) lub gleby o dużej zawartości części pylastych (np. Czeppe, 1960; Kirchner, 1981; Verachttert i inni, 2010). Niezbędnym warunkiem działalności sufozji jest istnienie szczelin, pęknięć, porów czy kanałów w podłożu. Mogą one mieć różną genezę – np. mogą być to szczeliny z wysychania, spękania w skałach, pęknięcia związane z ruchami masowymi, kanały korzeniowe czy kanały zwierząt ryjących (Czeppe, 1960; Starkel, 1960; Masannt, 1980; García-Ruiz i inni, 1997; Jones i inni, 1997; Farifteh i Soeters, 1999).



Fot. 1. Ślady działalności sufozji w obszarach: A – użytki zielone (NE Polska, Bieszczady),  
B – badlands (SE Hiszpania, region Petrer, Góry Betyckie)

The effects of piping in: A – grasslands (NE Poland, Bieszczady Mts.),  
B – badlands (SE Spain, the Petrer region, Betic Mts.)

(Fot./Photo: A. Bernatek)

Warto wspomnieć, że sufozja stanowi interesujący przedmiot badań nie tylko geomorfologii, lecz również geologii inżynierskiej, geotechniki czy inżynierii środowiska. Proces ten postrzegany jest jako jedno z zagrożeń geologiczno-inżynierskich (Kowalski, 1988). Rozpatrywany jest w kontekście zniszczeń w obrębie zapór ziemnych, wałów przeciwpowodziowych, w pobliżu głębokich fundamentów budynków i każdej innej konstrukcji, w pobliżu której przez grunt następuje filtracja wody (Popielski, 2000). Przykładami dużego zagrożenia związanego z sufozją są miasta rosyjskie. A.P. Ragozin (za: Khomenko, 2006) oszacował, na podstawie modelowania warunków sprzyjających działalności sufozji, że 958 miast rosyjskich zagrożonych jest tym procesem. Zagrożenie to dotyczy budynków o wadliwej konstrukcji fundamentów, nieuwzględniających warunków filtracji wody w gruncie. V.P. Khomenko (2006) jednocześnie zauważył, że w większości przypadków szkody spowodowane tym procesem są wynikiem nieprzemyslanej działalności człowieka i gospodarowaniem bez uwzględnienia właściwości geolo-

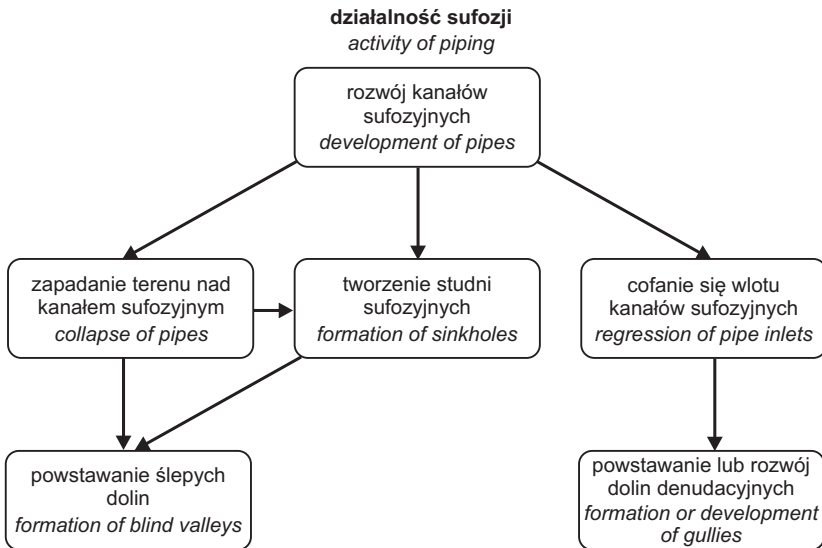
gicznych gruntu np. poprzez niewłaściwe zabezpieczenie gruntu przed nadmierną infiltracją wody przy fundamentach budynków. Sufozja nie jest zatem procesem badanym tylko przez geomorfologów; skupia uwagę także geologów inżynierskich w przypadku, gdy zostaje uruchomiona poprzez działalność człowieka.

### Rola sufozji w rozwoju rzeźby

Z dotychczasowych doświadczeń autorki, a także z zaprezentowanego powyżej przeglądu literatury wynika, że można wskazać dwa główne aspekty badań sufozji w kontekście rozwoju rzeźby:

- 1) sufozja a rozwój dolin
- 2) sufozja a ruchy masowe.

Rozwój kanałów sufozyjnych może prowadzić do powstania nowych dolin lub powiększania już istniejących (ryc. 1). Niekiedy powyżej górnych odcinków dolin tworzą się podziemne systemy kanałów sufozyjnych i w lejach źródłowych można zaobserwować ich wyloty. W wyniku wypłukiwania materiału dochodzi do naruszenia otoczenia wylotu i zapadania materiału położonego nad nim. Wylot kanału cofa się i istniejąca dolina rozwija się w górę stoku (Billi i Dramis, 2003; Poesen i inni, 2003), czego przykłady można znaleźć również w Polsce (fot. 2). W obszarach lessowych uważa się, że sufozja jest jednym z głównych czynników prowadzących do powstawania bocznych odnóg wąwozów (Gardziel i Rodzik, 2005).



Ryc. 1. Sufozja a rozwój dolin denudacyjno-fluwialnych

Piping and the development of gullies

Opracowanie własne. / Author's own work.



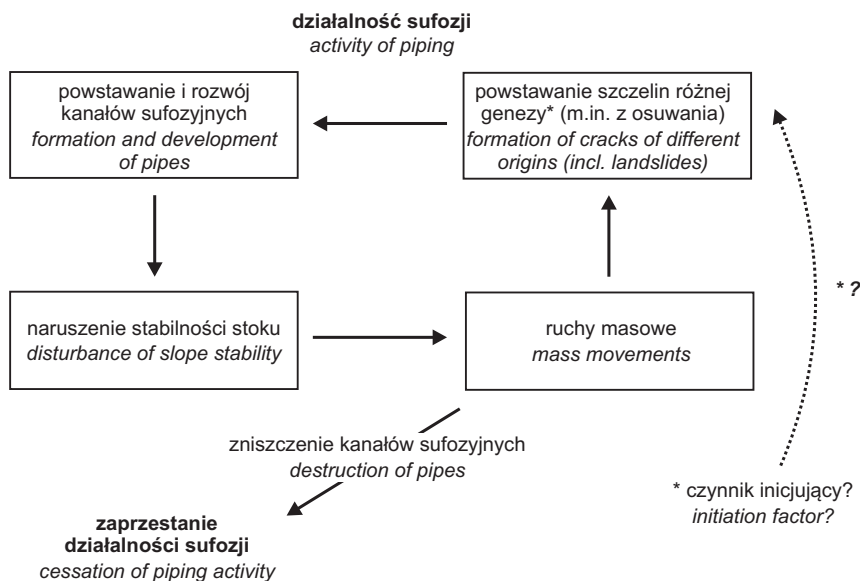
Kanały sufozyjne mogą też funkcjonować początkowo niezależnie od istniejących dolin. Zapadanie stropu nad kanałem sufozycznym prowadzi do powstania studni. Gdy utworzy się kilka studni w obrębie jednego kanału sufozycznego, dochodzi do zapadnięcia terenu między nimi i powstania nowej doliny (Verachtert i inni, 2010). A.K. Teisseyre (1992) analizując suche dolinki w obszarze lessowym na Dolnym Śląsku, przeciwstawia ten typ dolinek dolinkom typu horonowskiego, powstającym w wyniku powierzchniowego spływu wody.



Fot. 2. Wpływ sufozji na rozwój dolin (Bieszczady): A – wylot kanału sufozycznego w leju źródłowym debrzy, B – system form sufozycznych powyżej istniejącej debrzy  
 Piping's impact on gully development (Bieszczady Mts.): A – a pipe outlet in headcut,  
 B – the system of piping form above the existing gully  
 (Fot./Photo: A. Bernatek)

Równie interesujące są relacje między sufozją a ruchami masowymi (ryc. 2). Z jednej strony rozwój form sufozycznych może przyczynić się do zaburzenia stabilności stoku, a w konsekwencji osuwania. H. Faulkner (2013) stwierdza, że wtórną konsekwencją powiększających się kanałów sufozycznych są ruchy masowe. Przykładowo P.H. Temple i A. Rapp (1972), badając osuwiska powstałe po intensywnych opadach w górach Uluguru w Tanzanii, stwierdzili, że główną przyczyną ich powstania był wzrost ciśnienia wody w gruncie, który doprowadził

do powstania kanałów sufozyjnych, one zaś stały się szczelinami inicjującymi ruchy osuwiskowe. Podkreśla się także, że zatkanie kanałów sufozyjnych może doprowadzić do zaburzenia stabilności stoku. Woda nie mogąc znaleźć odpływu, cofa się w kanale, powodując nasiąkanie jego ścian, a w konsekwencji destabilizację otoczenia i uruchomienie ruchów masowych (Bruthans i inni, 2012).



Ryc. 2. Działalność sufozji a ruchy masowe  
Piping and mass movements  
Opracowanie własne. / Author's own work.

Z drugiej strony zależność sufozji i ruchów masowych może być odwrotna – w wyniku osuwania powstają szczeliny, które z czasem mogą przekształcić się w kanały sufozyjne. Taki przypadek został opisany m.in. w Wielkiej Brytanii, gdzie szczeliny powstałe w wyniku ruchów masowych zapoczątkowały działanie sufozji (Jones i inni, 1997). Ponadto ruchy masowe mogą mieć destrukcyjny wpływ na kanały sufozyjne. We Włoszech zwrócono uwagę, że inicjalne kanały mogą zostać zniszczone przez osuwające się masy (Farifteh i Soeters, 1999). Relacje „sufozja a ruchy masowe” są więc złożone i wymagają dalszych badań.

Wpływ sufozji na rozwój rzeźby można też rozpatrywać pod kątem wpływu na kształtowanie krajobrazu. H. Faulkner (2006), opierając się na badaniach badlands w strefie śródziemnomorskiej, wyróżniła trzy skale działalności sufozji w Europie. W skali małej (małych form) wyodrębniła płytkie kanały sufozyjne, rozcięcia erozyjne i mostki między kolejnymi studniami sufozycznym. W skali średniej wskazała na rolę sufozji w tworzeniu sieci wąwozów poprzez łączenie



zapadających się kanałów, zaś w dużej skali zwróciła uwagę na znaczny wpływ sufozji na kształtowanie badlands. W obszarach tych dochodzi do współwystępowania erozji wąwozowej i powstawania wąwozów, sufozji i zapadania kanałów, w konsekwencji tworzenia nowych dolin oraz ruchów masowych, modelujących stoki i zbocza badlands.

W opisie skali działalności sufozji warto też podkreślić wielkość form. J.A.A. Jones (1994) przedstawił przeciętne średnice kanałów sufozyjnych w podziale na strefy klimatyczne. Kanały o najmniejszej średnicy (do 15-20 cm) występują w strefie umiarkowanej morskiej. W strefie umiarkowanej kontynentalnej, równikowej (lasów deszczowych) i podrównikowej (sawann) średnice kanałów wynoszą około 30 cm. Największe natomiast średnice (do 120 cm) osiągają kanały w strefie półsuchej, którą charakteryzuje również największe zróżnicowanie wielkości kanałów. Dlatego sufozja daje najbardziej wyraźne efekty geomorfologiczne w tej strefie.

E. Verachtert z zespołem (2010) przedstawiła średnie wielkości powierzchniowych form sufozyjnych z obszaru lessowego w Belgii. Na przykład zapadlińska sufozyjne osiągają średnio głębokość 0,3 m i średnicę 1,3 m, a studnie odpowiednio 0,6 m i 1,1 m. Maksymalne wartości dla zapadlisk – to 0,8 m głębokości i 5,5 m średnicy, a studni odpowiednio 2,0 m i 4,5 m. W obszarach lessowych na Dolnym Śląsku w Polsce maksymalne rozmiary studni sufozyjnych wynoszą 1,0 x 0,8 m i głębokość 0,8 m (Teisseyre, 1994). T. Galarowski (1976) w Bieszczadach opisał studnie o głębokości do 0,8 m, długości 1,6 m i szerokości 0,9 m, L. Starkel zaś, również w Bieszczadach opisał (1960) formy od kilku do kilkunastu cm głębokości i średnicy do 9 x 2,5 m wielkości i 2 m głębokości.

### **Perspektywy dalszych badań**

Obecnie podejmuje się coraz więcej badań nad sufozją jako procesem geomorfologicznym (tab. 2). Wiadomo też, że sufozja jest procesem powszechnie występującym w różnych regionach świata (tab. 1). Z drugiej strony wciąż jednak podkreślane jest niewystarczające rozpoznanie wpływu sufozji na rozwój rzeźby (m.in. Haczewski i inni, 2007; Margielewski i inni, 2008; Lukić i inni, 2009).

Największym wyzwaniem jest obecnie ilościowa analiza współczesnych procesów sufozyjnych. Dotychczas najczęściej przeprowadza się eksperymenty laboratoryjne i terenowe oraz kartowanie geomorfologiczne. Cenne byłoby przeprowadzenie monitoringu geomorfologicznego form sufozyjnych, tak by ukazać funkcjonowanie kanałów sufozyjnych w ciągu roku. Należy zbadać, czy większe znaczenie w rozwoju kanałów mają roztopy wiosenne czy opady rozlewne, nawalne, jaki opad wywołuje w kanałach przepływ efektywny, czy powodujący wynoszenie materiału.

Sufozja jest specyficznym procesem, trudnym do zaobserwowania. Nie można pokazać całego podziemnego systemu, wykonując kilka wkopów czy kartując

formy powierzchniowe. Dlatego niewątpliwy potencjał kryje się w metodach geofizycznych, które są w geomorfologii coraz częściej wykorzystywane. W analizie sufozji można posłużyć się metodą georadarową, stosowaną już na świecie (Holden i inni, 2002; Hořáková, 2007). Dzięki profilom georadarowym możliwe jest rozpoznanie podziemnego systemu sufozyjnego bez fizycznej ingerencji w podłoże.

Jest jeszcze wiele regionów, w których dotychczas tylko sygnalizowano działalność sufozji. W Polsce do potencjalnych obszarów badań można zaliczyć wyżyny cechujące się występowaniem pokryw lessowych oraz Karpaty fliszowe z glinami pylastymi. Na Wyżynie Lubelskiej w prowadzonych badaniach uwzględnia się sufozję (Gardziel i Rodzik, 2005; Rodzik i inni, 2009), choć proces ten nie jest głównym przedmiotem badań. Natomiast współczesny rozwój rzeźby Karpat rozpatrywany jest przede wszystkim przez pryzmat ruchów masowych i spłukiwania (Margielewski i inni, 2008). Sufozja była tematem samodzielnych badań w latach 1960. i 1970. (Czeppe, 1960; Starkel, 1960; Galarowski, 1976), a później jedynie sygnalizowano jej działanie, nie przedstawiając konkretnych wyników. Dlatego istotne wydaje się ponowne podjęcie tego tematu i wykorzystanie nowych metod badań, które pozwoliłyby na ilościową ocenę procesu i jego znaczenia w rozwoju rzeźby. Zwłaszcza, że działanie tego procesu jest dostrzegane i podkreślana jest jego geomorfologiczna rola (Haczewski i inni, 2007; Margielewski i inni, 2008). W ostatnich latach autorka podjęła prace w tym kierunku w Bieszczadach (Bernatek i Sobucki, 2012).

## Podsumowanie

Rola sufozji w rozwoju rzeźby staje się coraz częściej podejmowanym tematem badań geomorfologicznych w różnych regionach świata. Świadczy to o dostrzeżeniu znaczenia morfogenetycznej działalności wód płynących podziemnie. Szczegółowe badania nad uwarunkowaniami rozwoju form sufozyjnych czy ilościowe próby przedstawienia działalności sufozji umożliwią poszerzenie wiedzy na temat funkcjonowania procesów morfogenetycznych. Ważne w poznaniu rozwoju rzeźby są też badania relacji pomiędzy sufozją a rozwojem dolin czy ruchami masowymi.

## Piśmiennictwo / References

- Afelt A., 2007, *Sufozja: proces filtracyjnego przekształcania skały*, Prace i Studia WGiSR, 38, s. 157-172.
- Bartuś T., <http://www.agg.agh.edu.pl/materialy/sufozyjne.htm> (17.08.2013).
- Bernatek A., Sobucki M., 2012, *Wykształcenie form sufozyjnych na stokach Kińczyka Bukowskiego (Bieszczady Wysokie)*, Roczniki Bieszczadzkie, 20, s. 247-253.
- Bieroński J., Chmal H., Czerwiński J., Klementowski J., Traczyk A., 1992, *Współczesna denudacja w górskich zlewniach Karkonoszy*, [w:] A. Kotarba (red.), *System denudacyjny Polski*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 155, s. 151-169.

- Billi P., Dramis F., 2003, *Geomorphological investigations on gully erosion in the Rift Valley and northern highlands in Ethiopia*, Catena, 50, s. 353-368.
- Botschek J., Krause S., Abel T., Skowronek A., 2002a, *Hydrological parametrization of piping in loess-rich soils in the Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen, Germany*, Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences, 165 (2), s. 506-510.
- Botschek J., Krause S., Abel T., Skowronek A., 2002b, *Piping and erodibility of loessic soils in Bergisches Land, Nordrhein-Westfalen*, Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences, 165 (4), s. 241-246.
- Boucher S.C., Powell J.M., 1994, *Gullying and tunnel erosion in Victoria*, Australian Geographical Studies, 32, s. 17-26.
- Bouma N.A., 2006, *Rill Initiation and Development in Relation to Dynamic Soil Properties*, Ph.D. thesis, The University of Amsterdam, Amsterdam.
- Bruthans J., Svetlik D., Soukup J., Schweigstillova J., Valek J., Sedlackova M., Mayo A.L., 2012, *Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for the origin of sandstone landforms*, Geomorphology, 177-178, s. 178-193.
- Bryan R.B., 2000, *Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope*, Geomorphology, 32, s. 385-415.
- Bryan R.B., Jones J.A.A., 1997, *The significance of soil piping processes: inventory and prospect*, Geomorphology, 20, s. 209-218.
- Bryan R.B., Yair A., 1982, *Badland Geomorphology and Piping*, GeoBooks, Norwich, University Press, Cambridge.
- Buckham A.F., Cockfield W.E., 1950, *Gullies formed by sinking of the ground*, American Journal of Science, 248, s. 137-41.
- Buzek L., 1969, *Geomorfologie Štramberské vrchoviny*, Spisy Pedagogické fakulty v Ostravě, 11, s. 1-91.
- Calvo-Cases A., Harvey A.M., 1996, *Morphology and development of selected badlands in southeast Spain: implications of climatic change*, Earth Surface Processes and Landforms, 21, s. 725-735.
- Calvo-Cases A., Harvey A.M., Paya-Serrano J., 1991, *Process interactions and badland development in SE Spain*, [w:] M. Sala, J.L. Rubio, J.M. García-Ruiz (red.), *Soil Erosion Study in Spain*, Geoforma Ediciones, Logroño, s. 75-90.
- Chorley R.J., 1978, *Glossary of terms*, [w:] M.J. Kirkby (red.), *Hillslope Hydrology*, Wiley, Chichester, s. 365-376.
- Czepe Z., 1960, *Zjawiska sufozcyjne w glinach zboczowych górnej części dorzecza Sanu*, Biuletyn Instytutu Geologicznego, Z badań czwartorzędu, 9, s. 297-324.
- Dąbrowski S., 1992, *Stan zachowania doliny sufozycznej w pobliżu Napiwody koło Nidzicy w województwie olsztyńskim*, Chrońmy Przyrodę Ojczystą, 2, s. 80-83.
- Demek J., Hradecký, Kirchner K., Pánek T., Létal A., Smolová I., 2012, *Recent Landform Evolution in the Moravian-Silesian Carpathians (Czech Republic)*, [w:] D. Lóczy, M. Stankoviansky, A. Kotarba (red.), 2012, *Recent Landform Evolution. The Carpatho-Balkan-Dinaric Region*, Springer Geography, Dordrecht-Heidelberg-London-New York, s. 103-140.
- Desir G., Marín C., 2011, *Influencia de los procesos de piping en la evolución del modelado. Bardenas Reales (Navarra, España)*, Cuadernos de Investigación Geográfica, 37, 1, Universidad de la Rioja, s. 67-78.
- Drew D.P., 1982, *Piping in the Big Muddy Badlands, Southern Canada*, [w:] R. Bryan, A. Yair (red.), *Badland Geomorphology and Piping*, GeoBooks, Norwich, s. 293-304.

- Dunne T., 1990, *Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow*, [w:] C.G. Higgins, D.R. Coates (red.), *Groundwater Geomorphology, the Role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms*, Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 252, s. 1-28.
- Dunne T., Black R.D., 1970, *Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed*, *Water Resources Research*, 6, s. 1296-1311.
- Farifteh J., Soeters R., 1999, *Factors underlying piping in the Basilicata region, southern Italy*, *Geomorphology*, 26, s. 239-251.
- Faulkner H., 2006, *Piping hazard on collapsible and dispersive soils in Europe*, [w:] J. Boardman, J. Poesen (red.), *Soil Erosion in Europe*, John Wiley, Chichester, s. 537-562.
- Faulkner H., 2013, *Badlands in marl lithologies: A field guide to soil dispersion, subsurface erosion and piping-origin gullies*, *Catena*, 106, s. 42-53.
- 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, s. 87-99.
- Frankl A., Poesen J., Deckers J., Haile M., Nyssen J., 2012, *Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia*, *Geomorphology*, 173-174, s. 185-195.
- Galarowski T., 1976, *New observations of the present-day suffosion (piping) processes in the Bereznica catchment basin in The Bieszczady Mountains (The East Carpathians)*, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 10, s. 115-124.
- García-Ruiz J.M., 2011, *Una revisión de los procesos de suffosión o piping en España*, *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37, 1, Universidad de la Rioja, s. 7-24.
- García-Ruiz J.M., Lasanta T., 1995, *The Effects of Irrigation on Soil Piping. A Case Study in the Ebro Depression, Spain*, *Physics and Chemistry of the Earth*, 20, 3-4, s. 315-320.
- García-Ruiz J.M., Lasanta T., Alberto F., 1997, *Soil erosion by piping in irrigated fields*, *Geomorphology*, 20, s. 269-278.
- Gardziel Z., Rodzik J., 2005, *Rozwój wąwozów lessowych podczas wiosennych roztopów na tle układu pól (na przykładzie Kazimierza Dolnego)*, [w:] A. Kotarba, K. Krzemień, J. Świąchowicz (red.), *Współczesna ewolucja rzeźby Polski. VII Zjazd Geomorfologów Polskich, Kraków, 19-22 września 2005*, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, IGIpZ PAN, Instytut Geografii AP, Kraków, s. 125-132.
- Gerlach T., 1966, *Współczesny rozwój stoków w dorzeczu górnego Grajcarcka (Beskid Wysoki)*, *Prace Geograficzne, IG PAN*, 52, Warszawa.
- Gerlach T., 1976, *Współczesny rozwój stoków w polskich Karpatach Fliszowych*, *Prace Geograficzne, IG PAN*, 122, Warszawa.
- Gergely J., Kertész Á., Papp S., 2005, *Az árkos erózió vizsgálat a Tetves-patak vízgyűjtőjén (Gully erosion in the Tetves catchment, Hungary – in Hungarian with English abstract)*, *Geographical Bulletin*, 54, 1-2, s. 149-65.
- Gibbs H.S., 1945, *Tunnel gully erosion on the Whithers Hills, Marlborough*, *NZ Journal of Science and Technology*, 27, s. 135-146.
- Gil E., 1976, *Splukiwanie gleby na stokach fliszowych w rejonie Szymbarku*, *Dokumentacja Geograficzna*, 2, Warszawa.
- Gil E., 1999, *Obieg wody i splukiwanie na fliszowych stokach użytkowanych rolniczo w latach 1980-1990*, *Zeszyty IGIpZ PAN*, 60, Warszawa.
- Gutiérrez Elorza M., Rodríguez Vidal J., 1984, *Fenómenos de sufosión (piping) en la Depresión Media del Ebro*, *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 10, Universidad de la Rioja, s. 75-84.

- Gutiérrez M., Sancho C., Benito G., Sirvent J., Desir G., 1997, *Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain*, *Geomorphology*, 20, s. 237-253.
- Haczewski G., Kukulak J., Bąk K., 2007, *Budowa geologiczna i rzeźba Bieszczadzkiego Parku Narodowego*, Wydawnictwo Naukowe AP, Kraków.
- Halliday W.R., 2007, *Pseudokarst in the 21st of century*, *Journal of Cave and Karst Studies*, 69, 1, s. 103-113.
- Harvey A., 1982, *The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain*, [w:] R. Bryan, A. Yair (red.), *Badland Geomorphology and Piping*, GeoBooks, Norwich, s. 317-335.
- Hodges W.K., Bryan R.B., 1982, *The influence of material behavior on runoff initiation in the Dinosaur Badlands, Canada*, [w:] R. Bryan, A. Yair (red.), *Badland Geomorphology and Piping*, GeoBooks, Norwich, s. 13-46.
- Holden J., Burt T.P., 2002, *Piping and pipeflow in deep peat catchment*, *Catena*, 48, s. 163-199.
- Holden J., Burt T.P., Vilas M., 2002, *Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, s. 235-249.
- Holmes P., Meadows M., 2012, *Southern African Geomorphology. Recent Trends and New Directions*, SUN MeDIA, Bloemfontein.
- Hořáková M., 2007, *Rozšíření sufoze ve vybrané oblasti Vnějších Západních Karpat*, Univerzita Palackého, Olomuniec (maszynopis).
- Horton R.E., 1945, *Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology*, *Geological Society of America Bulletin*, 56, s. 275-370.
- Jones J.A.A., 1971, *Soil piping and stream channel initiation*, *Water Resources Research*, 7, s. 602-610.
- Jones J.A.A., 1994, *Soil piping and its hydrogeomorphic function*, *Cuaternario y Geomorfología*, 8 (3-4), s. 77-102.
- Jones J.A.A., 2004, *Pipe and piping*, [w:] A.S. Goudie (red.), *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge, London, s. 784-788.
- Jones J.A.A., Richardson J.M., Jacob J.H., 1997, *Factors controlling the distribution of piping in Britain: a reconnaissance*, *Geomorphology*, 20, s. 289-306.
- Kaszowski L., 1985, *Rzeźba i modelowanie gór wysokich strefy suchej: na przykładzie Hindukuszu Munjan*, Rozprawy habilitacyjne, Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Kertész Á., Gergely J., 2011, *Gully erosion in Hungary, review and case study*, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 19, s. 693-701.
- Khomenko V.P., 2006, *Suffosion hazard: Today's and tomorrow's problem for cities*, IAEG2006, 577, The Geological Society of London, s. 1-8.
- Kirchner K., 1981, *Príspevek k poznání sufoze v Hostýnských vrších (východní Morava)*, Zprávy, Geografický ústav ČSAV, Brno, s. 126-133.
- Kirchner K., 1987, *Sledování vývoje sufozních tvarů v oblasti Vsetína*, Sborník prací, Geografický ústav ČSAV, Brno, s. 135-143.
- Klementowski J., 2002, *Splukiwanie i erozja żłobinowa na stokach Śnieżnika Kłodzkiego (Sudety Wschodnie)*, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 487, s. 97-108.
- Klimaszewski M., 1978, *Geomorfologia*, PWN, Warszawa.
- Kotarba A., Kaszowski L., Krzemień K., 1987, *High-mountain Denudational System of the Polish Tatra Mountains*, *Geographical Studies, Special Issue*, 3, IGiPZ PAN, Wrocław.



- Koreleski K., 2008, *Teoretyczne i praktyczne aspekty systematyki procesów erozji wodnej gleb*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Annals 17, 2 (40), s. 5-11.
- Kowalski W.C., 1988, *Geologia inżynierska*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Lukić T., Marković S.B., Stevens T., Vasiljević D.A., Machallett B., Milojković N., Basarin B., Obreht I., 2009, *The loess "cave" near the village of Surduk – an unusual pseudo-karst landform in the loess of Vojvodina, Serbia*, Acta Carsologica, 38, 2-3, Postojna, s. 227-235.
- Malicki A., 1935, *Przyczynek do znajomości zjawisk krasowych w obszarze lessowym*, Czasopismo Geograficzne, 13, 2-4, s. 328-335.
- Margielewski W., Święchowicz J., Starkel L., Łajczak A., Pietrzak M., 2008, *Współczesna ewolucja rzeźby Karpat fliszowych*, [w:] L. Starkel, A. Kostrzewski, A. Kotarba, K. Krzemień (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, IGI PAN, IGI PAN, Kraków, s. 57-133.
- Maruszczak H., 1953, *Werteby obszarów lessowych Wyżyny Lubelskiej*, Annales UMCS, sec. B, 8, 4, Lublin.
- Maruszczak H., 1986, *Tendencje sekularne i zjawiska ekstremalne w rozwoju rzeźby małopolskich wyżyn lessowych w czasach historycznych*, Czasopismo Geograficzne, 57, 2, s. 271-282.
- Masannat Y.M., 1980, *Development of piping erosion conditions in the Benson Area, Arizona, USA*, Quarterly Journal of Engineering Geology, 13, 1, s. 53-61.
- Mazúr E., 1963, *Žilinská kotlina a príhľehé pohoria: geomorfológia a kvartér*, Slovenská akadémia vied, Bratislava.
- Migoń P., 2009, *Geomorfologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Nadal-Romero E., Verachtert E., Maes R., Poesen J., 2011a, *Quantitative assessment of the piping erosion susceptibility of loess-derived soil horizons using the pinhole test*, Geomorphology, 135, s. 66-79.
- Nadal-Romero E., Verachtert E., Maes R., Poesen J., 2011b, *Una nueva herramienta para evaluar la susceptibilidad de los suelos a los procesos de sufosión o piping: El pinhole test*, Cuadernos de Investigación Geográfica, 37, 1, Universidad de la Rioja, s. 94-114.
- Onda Y., 1994, *Seepage erosion and its implication to the formation of amphitheatre valley heads: a case study at Obara, Japan*, Earth Surface Processes and Landforms, 19, s. 627-640.
- Parker G.C., 1963, *Piping, a geomorphic agent in landform development of the drylands*, International Association of Scientific Hydrology Publication, 65, s. 103-113.
- Piccarreta M., Faulkner H., Bentivenga M., Capolongo M., 2006, *The influence of physico-chemical material properties on erosion processes in the badlands of Basilicata, Southern Italy*, Geomorphology, 81, s. 235-251.
- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., Valentin C., 2003, *Gully erosion and environmental change: importance and research methods*, Catena, 50, s. 91-133.
- Popielski P., 2000, *Model sufozji mechanicznej w ujęciu metody elementów skończonych*, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, Warszawa (maszynopis).
- Popov D., Marković S.B., Jovanović M., Mesaroš M., Arsenović D., Stankov U., Gubin D., 2012, *Geomorphological Investigations and GIS Approach of the Tamiš Loess Plateau, Banat Region (Northern Serbia)*, Geographica Pannonica, 16, 1, s. 1-9.
- Pulinowa M. Z., 1989, *Rzeźba Gór Stołowych*, Prace UŚ, 1008, Katowice.
- Rodzick J., 2008, *Wpływ deszczów ulewnych i roztopów na rozwój wąwozu lessowego*, Landform Analysis, 8, s. 56-59.

- Rodzik J., Furtak T., Zgłobicki W., 2009, *The impact of snowmelt and heavy rainfall runoff on erosion rates in a gully system, Lublin Upland, Poland*, Earth Surface Processes and Landforms, 34, s. 1938-1950.
- Rodzik J., Janicki G., Zagórski P., Zgłobicki W., 1998, *Deszcze nawalne na Wyżynie Lubelskiej i ich wpływ na rzeźbę obszarów lessowych*, Dokumentacja Geograficzna, 11, s. 45-68.
- Rodzik J., Stepniewski K., 2005, *Splukiwanie na zróżnicowanych litologicznie użytkowanych rolniczo stokach Roztocza Środkowego*, [w:] A. Kotarba, K. Krzemień, J. Święchowicz (red.), *Współczesna ewolucja rzeźby Polski. VII Zjazd Geomorfologów Polskich, Kraków, 19-22 września 2005*, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, IGiPZ PAN, Instytut Geografii AP, Kraków, s. 389-396.
- Rodzik J., Zgłobicki W., 2000, *Współczesny rozwój wąwozu lessowego na tle układu pól*, [w:] S. Radwan, Z. Lorkiewicz (red.), *Problemy ochrony i użytkowania obszarów wiejskich o dużych walorach przyrodniczych*, Wydawnictwo UMCS, Lublin, s. 257-261.
- Romero Díaz A., Alonso Sarría F., Sánchez Soriano A., 2011, *Influencia de los factores topográficos en los procesos de piping, Murcia (España)*, Cuadernos de Investigación Geográfica, 37 (1), Universidad de la Rioja, s. 41-66.
- Seppälä M., 1997, *Piping causing thermokarst in permafrost, Ungava Peninsula, Quebec, Canada*, Geomorphology, 20, s. 313-319.
- Sirvent J., Desir G., Gutiérrez M., Sancho C., Benito G., 1997, *Erosion rates in badland areas recorded by collectors, erosion pins and profilometer techniques (Ebro Basin, NE Spain)*, Geomorphology, 18, s. 61-75.
- Słupik J., 1978, *Obieg wody w glebie na stokach a rolnicze użytkowanie ziemi*, [w:] L. Starkel (red.), *Studia nad typologią i oceną środowiska geograficznego Karpat i Kotliny Sandomierskiej*, Prace Geograficzne, IG PAN, 125, s. 93-107.
- Stankoviansky M., 2003, *Geomorfologická odozva environmentálnych zmien na území Myjavskej pahorkatiny*, Univerzita Komenského, Bratislava.
- Starkel L., 1960, *Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie*, Prace Geograficzne, IG PAN, 22, Warszawa.
- Starkel L., 1965, *Rozwój rzeźby polskiej części Karpat Wschodnich (na przykładzie dorzecza górnego Sanu)*, Prace Geograficzne, IG PAN, 50, Warszawa.
- Suvires G.M., 2004, *Procesos de piping en el piedemonte distal de la Precordillera Oriental, provincia de San Juan: factores y relieve*, Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59, 3, s. 385-393.
- Święchowicz J., 2002, *Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni pogórskiej*, Przemiany środowiska na Pogórzu Karpackim, 3, Instytut Geografii UJ, Kraków.
- Święchowicz J., 2012, *Water erosion on agricultural foothill slopes (Carpathian Foothills, Poland)*, Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues, 56, 3, s. 21-35.
- Teisseyre A.K., 1992, *Epizodyczne koryta a rozwój suchych dolin w krajobrazie rolniczym*, Acta Universitatis Wratislaviensis, 1399, Prace Geologiczno-Mineralogiczne, 31, Wrocław.
- Teisseyre A.K., 1994, *Spływ stokowy i współczesne osady deluwialne w lessowym rejonie Henrykowa na Dolnym Śląsku*, Acta Universitatis Wratislaviensis, 1399, Prace Geologiczno-Mineralogiczne, 43, Wrocław.
- Temple P.H., Rapp A., 1972, *Landslides in the Mgeta Area, Western Uluguru Mountains, Tanzania*, Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography, 54, 3/4, *Studies of Soil Erosion and Sedimentation in Tanzania*, s. 157-193.
- Tricart J., 1977, *Precis de Géomorphologie*, SEDES/CDU, Paris.



- Urban J., Ciborowski T., Paternoga R., Heřman H., Sujka G., 2007, *The genetical types of caves in the Polish Lowlands*, Nature Conservation, 63, s. 85-94.
- Valentin C., Poesen J., Li Y., 2005, *Gully erosion: impacts, factors and controls*, Catena, 63, s. 132-153.
- 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, s. 339-348.
- Ward J.A., 1966, *Pipe/shaft phenomena in Northland*, Journal of Hydrology, 5, s. 64-72.
- Wilson G.V., 2009, *Mechanisms of ephemeral gully erosion caused by constant flow through a continuous soil-pipe*, Earth Surface Processes and Landforms, 34, s. 1858-1866.
- Zhu T.X., 2012, *Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China*, Geomorphology, 153-154, s. 144-155.

[Wpłynęło: marzec; poprawiono: sierpień 2013 r.]

ANITA BERNATEK

#### THE ROLE OF PIPING IN THE DEVELOPMENT OF RELIEF – RESEARCH STATE AND PROSPECTS

The main purpose of this article is to present the state of the art in piping research. The term “piping” was introduced in 1898 (or 1899) by A.P. Pawłow (citing Czepepe, 1960), and defined as a process of underground flushing of mineral particles. Some researchers began to expand the definition of piping to include the chemical effects of groundwater, leading to the division of piping into physical and chemical piping (Maruszczak, 1986). However, according to the traditional definition, piping is understood as a process of mechanical flushing of particles by underground streams that leads to the development of surface and underground forms (Klimaszewski, 1978; Bryan, 2000; Jones, 2004; Migoń, 2009). There is no doubt that the chemical activity of subsurface flow (eg. solution) can facilitate piping.

For many years the role of piping was not a focus of geomorphological research (Bryan and Jones, 1997). Scientists tended to concentrate on surface processes in relief development, such as surface erosion and mass movements. Subsurface erosion was perceived as a process of limited importance mainly occurring in dryland regions. This approach began to change in the 1960s and 1970s, in the light of what were becoming increasingly complex investigations of flow generation and material transport in catchments (Bryan and Jones, 1997). The role of subsurface flow began to be appreciated.

Today's research on piping is conducted in various morphoclimatic zones, and in areas with different slope covers. Nevertheless, the importance of the process still remains underappreciated, as is made clear by both international literature (Bryan, 2000; Jones, 2004), and its Polish counterpart (Haczewski *et al.*, 2007; Margielewski *et al.*, 2008). In Poland the impact of piping on the development of relief is more indicated than resolved, and this remains true of both the country's loess uplands (e.g. Rodzik and Zglobicki, 2000; Gardziel and Rodzik, 2005) and its mountainous areas (Czepepe, 1960; Starkel, 1960; Galarowski, 1976; Haczewski *et al.*, 2007; Margielewski *et al.*, 2008).

Piping is found to be a widespread process around the world (Jones, 1994, Bryan and Jones, 1997). However, most research on it has been conducted in mid-latitude forested areas, as well as in dry or semidry areas at medium and low latitudes. Moreover, the phenomenon is characteristic of different types of ground, although mainly of loess-derived and organic soils. There remains a lack of detailed research on piping in the areas of dispersive covers not developed on loess or with high sodium content. For instance, there is a need to investigate piping in the Carpathians Mts., in which silty slope covers have developed on the flysch bedrock. There are several papers from Poland (Czeppe, 1960; Starkel, 1960; Galarowski, 1976), the Czech Republic (Buzek, 1969, Kirchner, 1981, 1987; Hořáková, 2007) and Slovakia (Mazur, 1963; Stanokoviansky, 2003), which point to the role of piping in the development of relief in the Carpathians. However, there are just a few publications on this subject and those that do exist are not distributed in the international literature.

A review of relevant literature makes it clear that three main trends for piping research may be distinguished: (1) analysis of the role of piping in relief development, (2) analysis of the factors initiating piping, and (3) the quantitative presentation of piping activity. The role of piping in relief development is emphasized in research on the way the phenomenon relates to valleys (mainly gullies), as well, as well as to the process of mass movement.

Piping as a geomorphological process is becoming noticed by scientists, hence the growing number of papers. In addition, piping occurs in different regions of the world. There is a need for more far-reaching analysis of piping that will provide for the phenomenon's quantitative presentation. There is no doubt that methods from geophysics can be used in investigations of underground pipe networks. There is also a need for monitoring research on piping forms, and their development during the year. There is a question as to which conditions other than soil and topographic properties help determine whether or not piping takes place. Indeed, there are many areas from which the potential existence of the process has been signaled, but without any detailed research being carried out. This is also true of Poland (e.g. Polish Highlands and Carpathians Mts.).