

MAREK DREWNIK, KATARZYNA WASAK, MIROŚLAW ŻELAZNY,  
ŁUKASZ JELONKIEWICZ

## Rozpuszczanie skały węglanowej w glebach leśnych buczyn i świerczyn w warunkach laboratoryjnych

Dissolution of carbonate rock in soils under beech and spruce forests  
in the laboratory conditions

### ABSTRACT

Drewnik M., Wasak K., Żelazny M., Jelonkiewicz Ł. 2016. Rozpuszczanie skały węglanowej w glebach leśnych buczyn i świerczyn w warunkach laboratoryjnych. Sylwan 160 (9): 751-758.

Chemical denudation plays a crucial role in affecting the water chemistry and the development of the relief, therefore the dissolution of carbonate rocks is the subject of numerous research. The aim of the study was to determine the effect of soil material derived from the organic (O) as well as humus (A) horizons of forest soils (common beech and Norway spruce stands) on the dissolution of rock. During one-year laboratory experiment standardized samples of dolomitic limestone placed in the soil material were washed with deionized water. The greatest loss of the sample rocks mass occurred in O material from Norway spruce stand (43.9‰ on average), while in other cases, the loss of rock samples mass was much lower and statistically non-significant. The total masses of calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) leached from O material under beech and spruce stands were similar, however in the case of spruce most of  $\text{Ca}^{2+}$  derives from rock dissolution. Similarly, higher proportion of magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) leached from O material under Norway spruce derives from rock dissolution, although the total mass of  $\text{Mg}^{2+}$  leached is higher from O material under beech. The total mass of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  leached from A material was similar or higher than from O material, however most of those ions derived from the soil material. The results indicate that the replacement of beech by Norway spruce can increase chemical denudation as well as  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  leaching, wherein  $\text{Ca}^{2+}$  leaching would be significantly greater than  $\text{Mg}^{2+}$ .

### KEY WORDS

denudation, beech, Norway spruce, rendzina

### ADDRESSES

Marek Drewnik – e-mail: marek.drewnik@uj.edu.pl  
Katarzyna Wasak – e-mail: katarzyna.wasak@uj.edu.pl  
Mirosław Żelazny – e-mail: miroslaw.zelazny@uj.edu.pl  
Łukasz Jelonkiewicz – e-mail: lukasz.jelonkiewicz@uj.edu.pl

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński; ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

### Wstęp

Denudacja chemiczna ma kluczowe znaczenie w kształtowaniu chemizmu wód oraz rozwoju rzeźby terenu, dlatego rozpuszczanie skał węglanowych jest przedmiotem wielu opracowań. Zwykle prowadzony jest eksperyment terenowy polegający na umieszczeniu w warunkach naturalnych próbek skał i po zadanym okresie ekspozycji mierzeniu utraty ich masy [Kotarba 1976;

Crabtree, Trudgill 1985; Trudgill i in. 1994; Inkpen 1995; Matsukura, Hirose 1999; Dixon i in. 2001; Thorn i in. 2002, 2006; Matsukura i in. 2007; Richter i in. 2007; Akiyama i in. 2015]. Badania te są ukierunkowane na określenie wpływu różnych czynników na tempo rozpuszczania skał węglanowych, tj. warunków klimatycznych, położenia w katenie, czasu trwania eksperymentu czy też różnic pomiędzy różnymi rodzajami skał.

Metodę eksperymentu terenowego cechują pewne ograniczenia. Inkpen [1995] wykazał, że możliwe są duże błędy spowodowane samą konstrukcją doświadczenia, a Hattanji i in. [2014] wskazali, że w tego typu eksperymencie duży wpływ na wynik pomiaru mają zróżnicowane czasowo i przestrzennie, a jednocześnie trudno mierzalne czynniki, takie jak lokalna mikrozmienność gleby i warunki pogodowe. Alternatywnym rozwiązaniem jest przeprowadzenie doświadczenia laboratoryjnego [Hattanji i in. 2014].

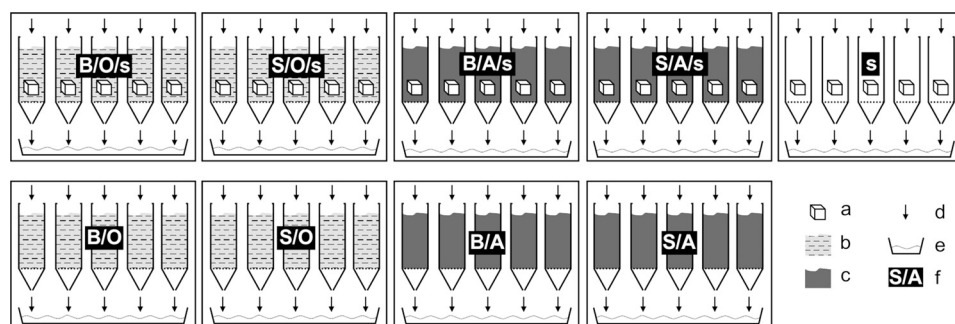
Stwierdzono, że biota gleby wspomaga proces wietrzenia skał poprzez dostarczanie kwasów i ligandów organicznych [Stevenson 1994; Raulund-Rasmussen i in. 1998], wzrost stężenia CO<sub>2</sub> w glebie [Egli i in. 2008] oraz pośrednio poprzez obniżenie pH gleby [Raulund-Rasmussen i in. 1998]. W literaturze przedmiotu można jednak zauważyć brak badań podejmujących próbę określenia wpływu glebowej materii organicznej o danych właściwościach na rozpuszczanie skał węglanowych.

Celem badań było określenie wpływu materiału glebowego z poziomów organicznych i próchnicznych gleb leśnych na rozpuszczanie skały węglanowej.

## Materiał i metody

Do badań wybrano triasowy wapień dolomityczny, z którego wycięto 25 sześciennych próbek skał (a~1,5 cm). Materiał glebowy do eksperymentu pobrano z poziomów organicznych O (zwany dalej materiałem O) oraz z poziomów próchnicznych A (zwany dalej materiałem A) łączy brunatnych występujących pod drzewostanem bukowym i świerkowym. Próbkę skały oraz materiał glebowy pobrano w Dolinie Białego w Tatrach, gdzie w XIX wieku drzewostan bukowy został w większości zmieniony na świerkowy [Fabijanowski, Dziewolski 1996].

Eksperyment laboratoryjny trwał rok i został przeprowadzony synchronicznie w 9 wariantach po 5 powtórzeń (ryc. 1). W polietylenowych próbkówkach z wywierconym otworem wylewowym umieszczono próbki skały oraz 5 g materiału O lub 20 g materiału A (ryc. 1). Do tak przygoto-



Ryc. 1.

Schemat eksperymentu

Scheme of the experiment

a – próbka skały, b – materiał O, c – materiał A, d – kierunek wody dejonizowanej/przesącza, e – pojemnik na przesącz, f – wariant eksperymentu (B – buk, S – świerk, O – materiał O, A – materiał A, s – próbka skały)

a – sample of rock, b – soil material O, c – soil material A, d – direction of deionized water / filtrate, e – filtrate container, f – experiment variant (B – beech, S – spruce, O – soil material O, A – humus, s – rock sample)

wanych próbek co ~4 doby proporcjonalnie dolewano wodę dejonizowaną w łącznej (w skali roku) objętości odpowiadającej wysokości średniego rocznego opadu w piętrze regla dolnego w Tatrach (~910 mm). W czasie eksperymentu temperatura powietrza w laboratorium wynosiła ~21°C, a jego wilgotność ~30%.

Na początku i na końcu eksperymentu próbki skał zostały wysuszone do stałej masy w 105°C i zważone z dokładnością  $\pm 0,001$  g. Utratę masy próbek skał obliczono według wzoru:

$$D = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 1000$$

gdzie:

$m_1$  – masa próbki skały przed eksperymentem [g],

$m_2$  – masa próbki skały po eksperymencie [g].

Po każdym ~52 dniach przesącz (roztwór) zebrany z każdego wariantu poddano analizie chemicznej. Stężenie wapnia ( $\text{Ca}^{2+}$ ) i magnezu ( $\text{Mg}^{2+}$ ) oznaczono metodą chromatografii jonowej z tłumieniem przewodnictwa eluentu (Dionex ICS2000 wyposażony w kolumnę kationową CS-16). Przed analizą w celu usunięcia zawiesiny użyto filtra strzykawkowego 0,45  $\mu\text{m}$  oraz kolumnki Dionex OnGuard II P w celu usunięcia kwasów humusowych, które mogłyby wpłynąć na dokładność oznaczenia. Masa  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  w roztworze w serii  $n$  została policzona według wzoru:

$$M_n(\text{Ca}, \text{Mg}) = \sum_{k=0}^n C_{k[\text{Ca}, \text{Mg}]} \cdot V$$

gdzie:

$M_n(\text{Ca}, \text{Mg})$  – masa  $\text{Ca}^{2+}$  lub  $\text{Mg}^{2+}$ , który został wyługowany do końca serii  $n$  [mg],

$C_{k[\text{Ca}, \text{Mg}]}$  – stężenie jonów  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  w uzyskanym roztworze [mg/L],

$V$  – objętość uzyskanego przesączu [L].

Kolejne uzyskane wartości są skumulowaną masą jonów  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$ , które zostały wyługowane od początku eksperymentu.

Oznaczono podstawowe właściwości materiału glebowego: zawartość węgla całkowitego (TC) i azotu (N) w analizatorze elementarnym VarioMicroCube, pH – potencjometrycznie w wodzie dejonizowanej, zawartość węglanów ( $\text{eqCaCO}_3$ ) – metodą Scheiblera. Zawartość węgla organicznego (OC) obliczono jako różnicę TC i węgla węglanowego. Współczynnik C/N obliczono jako iloraz OC/N. Wolną frakcję rozpuszczalnych kwasów próchnicznych (przy pH 7) wyekstrahowano metodą Duchaufoura-Jaquin. Respirację gleby oznaczono metodą opisaną przez Klimek i in. [2015].

Jednoczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) posłużyła do określenia istotności różnic średnich wartości ubytku masy między wydzielonymi grupami (wariantami). Zastosowano statystykę F Snedocora, następnie w celu zidentyfikowania, które grupy różnią się istotnie, użyto testu *post-hoc* Scheffe'a dla  $p=0,05$ . Uzyskane podczas eksperymentu wartości miały rozkład niezgodny z normalnym (test Kołgomorowa-Smirnowa), co jest zgodne z tezą Reimanna i Filzmosera [2000], że właśnie taki rozkład często cechuje dane w badaniach przyrodniczych. Dane zostały transformowane przez zlogarytmowanie, dzięki temu uzyskały większą symetrię, co potwierdziła niższa wartość współczynnika skośności, a test wykazał, że uzyskały rozkład zgodny z normalnym. Następnie dane zestandaryzowano. Analizy statystyczne wykonano przy pomocy pakietu Statistica 12.

## Wyniki i dyskusja

UBYTEK MASY PRÓBEK SKAŁY. W wyniku eksperymentu stwierdzono istotnie większy średni ubytek masy próbki skały umieszczonej w materiale O spod świerczyny (43,9%) niż w pozostałych wariantach (tab. 1). Ubytek masy próbek skał umieszczonych w materiale O spod buczyny oraz w materiale A spod świerczyny i buczyny był wielokrotnie niższy (średnio 3-7%), a ich średnie ubytki były podobne, co potwierdza analiza wariancji i test *post-hoc* Scheffe'a (ryc. 2). Podobne wartości średnich ubytków otrzymali Akiyama i in. [2015] w eksperymencie terenowym przeprowadzonym w rędzinach (średnio 4,2-25,5%).

Największy ubytek masy próbki skały w materiale O spod świerka jest najprawdopodobniej efektem szeregu czynników kształtujących niskie pH tego materiału (4,13) (tab. 2). Jego silnie kwaśny odczyn można tłumaczyć zarówno brakiem węglanów, jak i specyfiką materiału organicznego. Świerk cechuje bowiem inna niż w przypadku buka gospodarka kationami zasadowymi, co sprawia, że koncentracja Ca i Mg w szpilkach świerka jest niższa niż w liściach buka [Finzi i in. 1998; Berger i in. 2004, 2006, 2009]. Niskie pH może być także skutkiem pośredniego oddziaływania łatwo rozpuszczalnych kwasów próchnicznych.

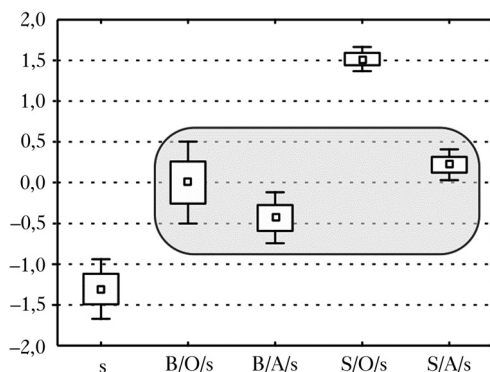
Zdaniem niektórych autorów [Stevenson 1994; Raulund-Rasmussen i in. 1998] kwasy próchniczne mogą też bezpośrednio wpływać na rozpuszczanie skał. W przeprowadzonym eksperymencie niewielkie różnice w zawartości łatwo rozpuszczalnych kwasów próchnicznych (tab. 2)

**Tabela 1.**

Średnia (M), minimum (min) i maksimum (max) oraz odchylenie standardowe (SD) utraty masy próbek skały [%]

Mean (M), minimum (min), maximum (max) and standard deviation (SD) of weight loss of the rock samples [%]

	M	min	max	SD
Próbka skały Rock sample	0,92	0,47	2,01	0,63
Materiał O (buk) + próbka skały Organic soil material (beech) + rock sample	6,13	1,28	9,01	3,17
Materiał A (buk) + próbka skały Humus material (beech) + rock sample	3,04	1,67	5,54	1,60
Materiał O (świerk) + próbka skały Organic soil material (spruce) + rock sample	43,87	34,04	62,25	11,26
Materiał A (świerk) + próbka skały Humus material (spruce) + rock sample	7,11	4,35	9,65	2,00



**Ryc. 2.**

Średnia (punkt)  $\pm$ błąd standardowy (ramka) i  $\pm 1,96$  błędów standardowych (wąsy) utrata [%] masy próbek skały w eksperymencie (symbol wariantu jak na rycinie 1; dane logarytmowane ( $\log_{10}$ ) i standaryzowane)

Mean (dot)  $\pm$ standard error (box) and  $\pm 1,96$  of standard error (whiskers) weight loss [%] of the rock sample during the experiment (variant code as in figure 1; logarithmized and standardized data)

szary obszar – brak istotnych różnic  
grey area – no significant differences

Tabela 2.

Odczyn (pH), zawartość węglanów (eqCaCO<sub>3</sub> [%]), zawartość węgla organicznego (OC [%]), stosunek C/N, respiracja (R [mM CO<sub>2</sub>/kg OM/24 h]) oraz zawartość rozpuszczalnych kwasów próchnicowych (RKP [% węgla organicznego w shumufikowanej materii organicznej]) w materiale glebowym zastosowanym w eksperymencie

Soil reaction (pH), carbonates content (eqCaCO<sub>3</sub> [%]), organic carbon content (OC [%]), C/N ratio, respiration (R [mM CO<sub>2</sub>/kg OM/24 h]) and dissolved humus acids content (RKP [% of organic carbon within humified organic matter]) of soil material used in the experiment

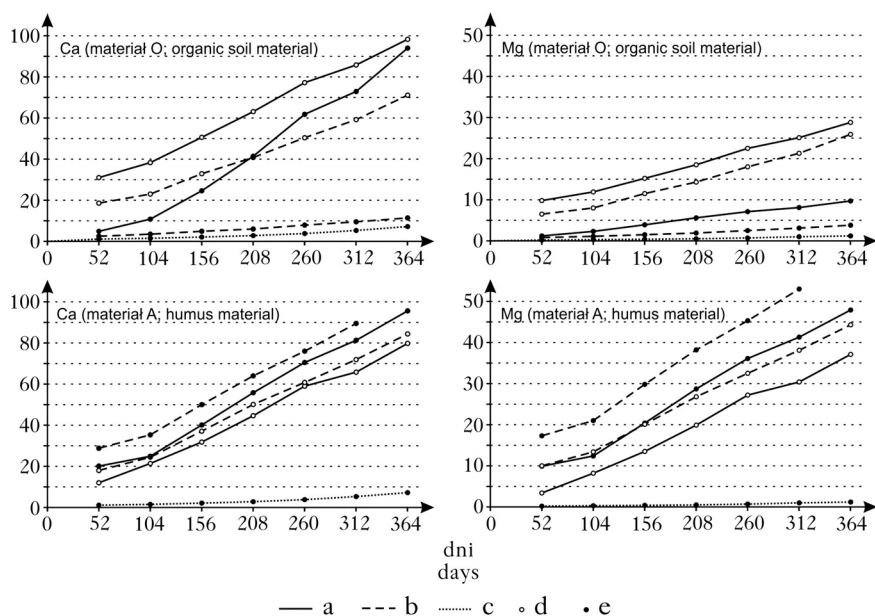
	pH	eqCaCO <sub>3</sub>	OC	C/N	R	RKP
Materiał O (buk) Organic soil material (beech)	6,25	4,56	42,11	24,8	49,52	13,47
Materiał A (buk) Humus (beech)	7,41	46,26	8,40	13,3	18,70	5,47
Materiał O (świerk) Organic soil material (spruce)	4,13	0,00	46,14	30,4	51,41	9,48
Materiał A (świerk) Humus (spruce)	6,89	19,93	9,19	15,3	19,05	7,05

nie tłumaczą jednak wielokrotnie większego rozpuszczania próbki skały w materiale O spod świerczyny w porównaniu z pozostałymi wariantami (ryc. 2). Uzyskane wyniki potwierdzają zatem hipotezę Lindroosa i in. [2003], że łatwo rozpuszczalne kwasy próchniczne nie mają decydującego wpływu na wietrzenie skały. Warto także zwrócić uwagę na fakt braku wpływu aktywności biologicznej gleby na wielkość ubytku masy próbki skały, gdyż wielkość respiracji w materiale O spod buczyny i świerczyny była podobna (tab. 2). Jest to zgodne z wynikami Oha i in. [2007], którzy stwierdzili, że wpływ CO<sub>2</sub> rozpuszczonego w roztworze glebowym na tempo procesu wietrzenia skały jest mniej istotny niż właściwości fazy stałej gleby.

ŁUGOWANIE WAPNIA I MAGNEZU. Uzyskane w trakcie eksperymentu stężenia Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup> w przesączu mieściły się w dolnych przedziałach stężeń jonów w roztworach glebowych rędzin mierzonych w warunkach terenowych [Jin i in. 2008; Akiyama i in. 2015].

Sumaryczna masa wyługowanego Ca<sup>2+</sup> dla materiału O i A z próbką skały po roku eksperymentu była podobna i wyniosła od ~80 do ~100 mg (ryc. 3). Masa wyługowanego Mg<sup>2+</sup> dla materiałów glebowych z próbką skały była znacznie mniejsza niż masa Ca<sup>2+</sup>, przy czym więcej Mg<sup>2+</sup> wydzielilo się z materiału A z próbką skały (świerczyna ~50 mg, buk ~40 mg) niż z materiału O z próbką skały (świerczyna ~10 mg, buczyna ~30 mg). Ponieważ w szpilkach świerka występuje mniejsza naturalna zawartość tych pierwiastków niż w liściach buka [Berger i in. 2009], względnie podobna masa uwolnionego Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup> w materiale spod świerczyny i w materiale spod buczyny oznacza, że pod świerczyną jony te szybciej przechodzą do roztworu glebowego. Jest to rezultat zgodny z wynikami Davisa [1990], Bergkvista i Folksona [1995] oraz Rothe'a i in. [2002] uzyskanymi w warunkach terenowych.

Masa Ca<sup>2+</sup> wyługowanego do roztworu z materiału O spod buczyny (~70 mg) jest znacznie większa niż masa Ca<sup>2+</sup> wydzielonego spod świerczyny (~10 mg). Podobny efekt, choć w mniejszej skali, odnotowano dla Mg<sup>2+</sup> (ryc. 3). Oznacza to, że w przypadku materiału O spod świerczyny większa część Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup> wydzielila się w wyniku rozpuszczania skały, zaś w roztworze spod buczyny znaczny jest udział Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup> pochodzących z materiału glebowego. Wyniki te są zgodne z wynikami utraty masy próbki skały w eksperymencie (ryc. 2). Duży udział Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup> wyługowanych z samego materiału O spod buczyny można uzasadnić obecnością węglanów w tym materiale (tab. 2) oraz stwierdzaną większą koncentracją Ca<sup>2+</sup> i Mg<sup>2+</sup> w liściach buka [Berger i in. 2009].



Ryc. 3.

Masa [mg] Ca i Mg wymywanego w trakcie eksperymentu z materiału organicznego i próchnicznego  
 Mass [mg] of Ca and Mg leached during the experiment from organic soil material and from humus material  
 a – materiał glebowy+próbka skały, b – materiał glebowy, c – próbka skały („ślepa próba”), d – buk, e – świerk  
 a – soil material+rock sample, b – soil material, c – rock sample ('blind sample'), d – beech, e – spruce

We wszystkich wariantach z materiałem A masa  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  wylugowanych z materiału glebowego była większa niż z wariantów zawierających materiał A z próbką skały (ryc. 3). Dodanie skały spowodowało zatem zmniejszenie masy wydzielonego  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$ , mimo że same próbki skały uległy rozpuszczeniu, o czym świadczy utrata ich masy (tab. 1). Można było zatem oczekiwać wzrostu, a nie zmniejszenia masy  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  w przesączu. Efekt ten może tłumaczyć interakcja pomiędzy skałą węglanową a glebą, będąca rezultatem podniesienia pH roztworu glebowego na skutek dostarczenia jonów zasadowych do układu. Wskutek tego nastąpił prawdopodobnie wzrost stopnia hydrolizy grup funkcyjnych związków próchnicowych i tym samym wzrost zdolności sorpcyjnych gleby, która zawiera dużo próchnicy. Zaobserwowano zatem efekt sprzężenia zwrotnego, polegający na tym, że zwiększenie puli dostępnych jonów  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  w wyniku rozpuszczania skały spowodowało zmniejszenie ich wymywania. Efekt ten odnotowano tylko w pierwszym okresie eksperymentu, po 52 dobach. W kolejnych etapach uwalnianie jonów z wariantów zawierających i niezawierających próbki skał był podobny, co świadczy zapewne o tym, że po tym czasie kompleks sorpcyjny był już wysycony jonami  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$ .

POTENCJALNE SKUTKI ŚRODOWISKOWE. Zastąpienie drzewostanu bukowego świerkowym jest powszechne np. w Alpach czy w Tatrach [Fabijanowski, Dziewolski 1996]. Wyniki eksperymentu sugerują, że można oczekiwać mierzalnych efektów wzrostu wietrzenia skał na skutek przebudowy drzewostanów. Efekt ten będzie szczególnie uwydatniony w obszarach występowania płytkich i szkieletowych rędzin, w których poziomy organiczne pod ściernicą mogą bezpośrednio kontaktować się ze skałą węglanową. Jeżeli uwzględnić zarówno fakt, że buk czerpie jony  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  z głębszych części gleby i w ten sposób przywraca je do obiegu na drodze opadu liści [Berger i in. 2004, 2006], jak i wyniki niniejszego eksperymentu, można uznać, że zmiana

dominującego drzewostanu z bukowego na świerkowy (jak np. w Alpach czy Tatrach) prawdopodobnie zwiększa tempo ługowania  $\text{Ca}^{2+}$  i  $\text{Mg}^{2+}$  do wód na skutek szybszego wietrzenia skały.

## Wnioski

- ✦ Materiał glebowy występujący w rzedzinie pod świerkiem powoduje szybsze rozpuszczanie skały węglanowej niż materiał glebowy występujący pod bukiem. W przypadku materiału organicznego z poziomów O jest to różnica statystycznie istotna, w przypadku materiału z poziomów próchnicznych A została stwierdzona różnica, ale nie jest ona istotna statystycznie.
- ✦ Wyniki eksperymentu wskazują, że w przypadku przebudowy drzewostanu można oczekiwać zmian w wielkości denudacji oraz relacji wapnia do magnezu w wodach zlewni.

## Literatura

- Akiyama S., Hattanji T., Matsushi Y., Matsukura Y. 2015. Dissolution rates of subsoil limestone in a doline on the Akiyoshi-dai Plateau, Japan: An approach from a weathering experiment, hydrological observations, and electrical resistivity tomography. *Geomorphology* 247: 2-9.
- Berger T. W., Köllensperger G., Wimmer R. 2004. Plant-soil feedback in spruce (*Picea abies*) and mixed spruce-beech (*Fagus sylvatica*) stands as indicated by dendrochemistry. *Plant Soil* 264: 69-83.
- Berger T. W., Swoboda S., Prohaska T., Glatzel G. 2006. The role of calcium uptake from deep soils for spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Forest Ecology Management* 229: 234-246.
- Berger T. W., Untersteiner H., Topfiter M., Neubauer C. 2009. Nutrient fluxes in pure and mixed stands of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Plant and Soil* 322 (1): 317-342.
- Bergkvist B., Folkeson L. 1995. The Influence of Tree Species on Acid Deposition, Proton Budgets and Element Fluxes in South Swedish. *Forest Ecosystems Ecological Bulletins* 44: 90-99.
- Crabtree R. W., Trudgill S. T. 1985. Chemical denudation on a magnesian limestone hillslope, field evidence and implications for modelling. *Earth Surface Processes and Landforms* 10: 331-341.
- Davis M. R. 1990. Chemical composition of soil solutions extracted from New Zealand beech forests and West German beech and spruce forests. *Plant and Soil* 126: 237-246.
- Dixon J. C., Thorn C. E., Darmody R. G., Schlyter P. 2001. Weathering rates of fine pebbles at the soil surface in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Catena* 45: 273-286.
- Egli M., Merkli C., Sartort G., Mirabella A., Plötze M. 2008. Weathering, mineralogical evolution and soil organic matter along a Holocene toposquence developed on carbonate-rich materials. *Geomorphology* 97: 675-696.
- Fabijanowski J., Dziewolski J. 1996. Gospodarka leśna. W: Mirek Z. [red.]. *Przyroda TPN. TPN-PTPNoZ, Kraków - Zakopane*. 675-696.
- Finzi A. C., Van Breemen N., Canham C. D. 1998. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen. *Ecological Applications* 8: 440-446.
- Hattanji T., Ueda M., Song W., Ishii N., Hayakawa Y. S., Takaya Y., Matsukura Y. 2014. Field and laboratory experiments on high dissolution rates of limestone in stream flow. *Geomorphology* 204: 485-492.
- Inkpen R. 1995. Errors in measuring the percentage dry weight change of stone tablets. *Earth Surface Processes and Landforms* 20: 783-793.
- Jin L., Williams E. L., Szramek K. J., Walter L. M., Hamilton S. K. 2008. Silicate and carbonate mineral weathering in soil profiles developed on Pleistocene glacial drift (Michigan, USA): Mass balances based on soil water geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72: 1027-1042.
- Klimek B., Niklińska M., Jaźwa M., Tarasek A., Takielak I., Musielok Ł. 2015. Covariation of soil bacteria function diversity along an altitudinal climatic gradient in the Western Carpathians. *Pedobiologia* 58: 105-112.
- Kotarba A. 1976. Współczesne modelowanie węglanowych stoków wysokogórskich. *Prace Geograficzne PAN* 120: 1-128.
- Lindroos A.-J., Brügger T., Derome J., Derome K. 2003. The weathering of mineral soil by natural soil solutions. *Water Air and Soil Pollution* 149: 269-279.
- Matsukura Y., Hattanji T., Oguchi C. T., Hirose T. 2007. Ten year measurement of weight-loss of rock tablets due to weathering in a forested hillslope of a humid temperate region. *Zeitschrift für Geomorphologie* 51 (1): 27-40.
- Matsukura Y., Hirose T. 1999. Five-year measurement of weight loss of rock tablets due to weathering on a forested hillslope of a humid temperate region. *Engineering Geology* 55: 69-76.
- Oh N.-H., Hofmocker M., Levine M., Richter D. D. 2007. Did elevated atmospheric  $\text{CO}_2$  alter soil mineral weathering? An analysis of 5-year soil water chemistry data at Duke FACE study. *Global Change Biology* 13: 2626-2641.
- Raulund-Rasmussen K., Borggaard O. K., Hansen K. C. B., Olsson M. 1998. Effect of natural organic soil solutes on weathering rates of soil minerals. *European Journal of Soil Science* 49: 397-406.

- Reimann C., Filzmoser P. 2000.** Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology* 39 (9): 1001-1014.
- Richter D. D., Hofmoekel M., Callahan M. A., Powlson D. S., Smith P. 2007.** Long-term soil experiments: key to managing Earth's rapidly changing ecosystem. *Soil Science of America Journal* 71: 266-279.
- Rothe A., Huber C., Kreutzer K., Weis W. 2002.** Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European Beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil* 240: 33-45.
- Stevenson F. J. 1994.** *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions.* Wiley and Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- Thorn C. E., Darmody R. G., Dixon J. C., Schlyter P. 2002.** Weathering rates of buried machine-polished rock disks, Kärkevagge, Swedish Lapland. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 831-845.
- Thorn C. E., Dixon J. C., Darmody R. G., Allen C. E. 2006.** Ten years (1994-2004) of 'potential' weathering in Kärkevagge, Swedish Lapland. *Earth Surface Processes and Landforms* 31: 992-1002.
- Trudgill S. T., Crabtree R. W., Ferguson R. I., Ball J., Gent R. 1994.** Ten year remeasurement of chemical denudation on a magnesian limestone hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms* 19: 109-114.