

Wojciech Mill

**AKTUALIZACJA MAP ŁADUNKÓW KRYTYCZNYCH
ZAKWASZENIA I EUTROFIZACJI WYBRANYCH
EKOSYSTEMÓW LĄDOWYCH POLSKI**

**UPDATE OF CRITICAL LOAD MAPS OF ACIDITY
AND EUTROPHICATION OF SELECTED
TERRESTRIAL ECOSYSTEMS OF POLAND**

Słowa kluczowe: ładunki krytyczne zakwaszenia, ładunki krytyczne eutrofizacji, azot pokarmowy, depozycja kwaśna, ochrona ekosystemów lądowych.

Keywords: critical loads of acidity, critical loads of eutrophication, nutrient nitrogen, acid deposition, protection of terrestrial ecosystems.

Updated databases of critical loads of acidity and eutrophication for selected terrestrial ecosystems of Poland were produced based on recent input data and modified procedures for estimation of experimental parameters. Moreover the so called target load functions as well as recovery and damage delay times have been calculated by use of a dynamic model VSD. Within the project databases and maps of empirical critical loads of nutrient nitrogen were produced. The project results are meant as the Polish contribution to the development of a new pan-European map of critical loads to support the Gothenburg Protocol review.

1. WPROWADZENIE

W związku z toczącym się procesem przeglądu realizacji postanowień Protokołu z Göteborga dotyczących obniżania zakwaszenia, eutrofizacji i ozonu przygruntowego oraz wolą wsparcia go najlepszymi danymi, Grupa Zadaniowa Międzynarodowego programu współpracy w zakresie modelowania i kartowania poziomów i ładunków krytycznych (ICP Modelowanie i Kartowanie) zwróciła się do

Grupy Roboczej ds. Oddziaływań z prośbą o wykonanie na przełomie lat 2006/2007 aktualizacji ładunków krytycznych zakwaszenia i eutrofizacji, ostatnio wyznaczonych w 2005 r. Grupa Robocza ds. Oddziaływań przychyliła się do tej prośby i na swej 25 sesji w Genewie w 2006 r. poleciła Centrum Koordynacyjnemu ds. Oddziaływań przeprowadzenie odpowiedniej akcji. Strona polska, reprezentowana przez Ministerstwo Środowiska, zareagowała na to oczekiwanie zleceniem Instytutowi Ochrony Środowiska wykonania odpowiedniego projektu badawczego, finansowanego ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Celem tego projektu było przeprowadzenie wyżej wymienionych prac aktualizacyjnych w odniesieniu do wybranych ekosystemów lądowych Polski, których wyniki miały stanowić wkład strony polskiej w budowę ogólnoeuropejskich map ładunków krytycznych na potrzeby Konwencji w sprawie transgranicznego zanieczyszczania powietrza na dalekie odległości (tzw. Konwencji Genewskiej) oraz toczący się proces przeglądu realizacji postanowień Protokołu z Göteborga.

2. ZARYS METODYKI WYZNACZANIA ŁADUNKÓW KRYTYCZNYCH KWASOWOŚCI I EUTROFIZACJI

Ładunki krytyczne kwasowości i eutrofizacji, zgodnie z definicją, określają dopuszczalną wielkość depozycji związków siarki i azotu, poniżej której oddziaływanie tej depozycji nie jest szkodliwe dla struktury i funkcjonowania ekosystemów lądowych i wodnych. Jest to więc ilościowa miara wrażliwości tych ekosystemów na depozycję rozważanych zanieczyszczeń powietrza. Poniżej przedstawiono ogólny zarys modelu Simple Mass Balance (SMB) do obliczania parametrów funkcji ładunków krytycznych zakwaszenia i eutrofizacji [UBA, 2004].

W procesie zakwaszania ekosystemów naturalnych siarka i azot udzielają się jednocześnie. Dla danego ekosystemu operuje się więc parami krytycznych ładunków (depozycji) siarki i azotu z wyjątkiem sytuacji skrajnych, gdy rozważa się reakcję ekosystemu na samą tylko depozycję siarki, przy zerowej depozycji azotu i odwrotnie. W pierwszym wypadku otrzymuje się tzw. maksymalny ładunek krytyczny siarki $CL_{\max}(S)$:

$$CL_{\max}(S) = BC_{dep} + BC_w - BC_u - ANC_{le(kryt)} \quad (1)$$

Drugi przypadek, zachodzący przy wyłącznej depozycji azotu, rozważa się warunkowo:

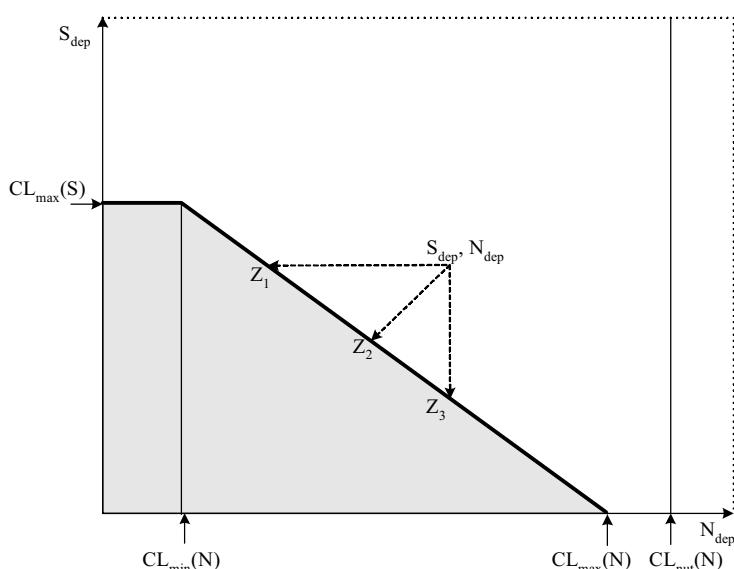
- (a) $N_{dep} \leq N_i + N_u + N_{de}$ – wtedy całość deponowanego azotu jest zużywana w procesach unieruchamiania, poboru i denitryfikacji. Azot nie uczestniczy w procesie zakwaszania, a ładunek krytyczny azotu zapisujemy jako:

$$CL_{\min}(N) = N_i + N_u + N_{de} \quad (2)$$

(b) $N_{\text{dep}} \leq N_i + N_u + N_{de}$ – wtedy, po wyczerpaniu zapotrzebowania na wyżej wymienione procesy, reszta azotu uczestniczy w zakwaszaniu tak jak siarka. Z tego wynika, że maksymalna krytyczna depozycja (ładunek) azotu wynosi:

$$CL_{\max}(N) = CL_{\min}(N) + \frac{CL_{\max}(S)}{1 - f_{de}} \quad (3)$$

Wielkości $CL_{\max}(S)$, $CL_{\min}(N)$ i $CL_{\max}(N)$ są parametrami tzw. funkcji ładunków krytycznych. Relację depozycji siarki i azotu do funkcji ich ładunków krytycznych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Funkcja ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji
Fig. 1. Critical load function of acidity and eutrophication

Ładunek krytyczny eutrofizacji definiuje się następująco:

$$CL_{nut}(N) = N_i + N_u + N_{de} + N_{le(acc)} \quad (4)$$

Pionowa linia na rysunku 1 ilustruje wartość $CL_{nut}(N)$,
 gdzie:

- BC_{dep} – ładunek kationów zasadowych zawartych w pyłach zdeponowanych z atmosfery,
- BC_w – ładunek zasadowości wytwarzany w procesie wietrzenia gleb,

- BC_u – ładunek kationów zasadowych pobranych przez rośliny,
 N_u – ładunek azotu pobranego przez rośliny,
 N_i – ładunek azotu zatrzymany w glebie w formie związków nierozpuszczalnych,
 N_{de} – ładunek azotu biorący udział w procesie denitryfikacji,
 ANC_{le} – ładunek kwasowości przesączu glebowego – zdolnością neutralizacyjną kwasu,
 $N_{le(acc)}$ – dopuszczalny ładunek azotu wymywanego ze strefy korzeniowej,
 f_{de} – współczynnik denitryfikacji.

Wszystkie ładunki masy stosowane w powyższych równaniach są wyrażone w eq/ha/rok.

Dla każdej pary wartości depozycji siarki i azotu S_{dep} i N_{dep} , leżącej na wykresie funkcji ładunków krytycznych (pogrubiona linia) lub w obszarze zaciemnionym, przekroczenie ładunku krytycznego kwasowości nie występuje. Przekroczenie reprezentowane na rysunku przez wskazaną parę depozycji S_{dep} i N_{dep} można zlikwidować trzema drogami:

- 1) przez redukcję wyłącznie depozycji siarki, osiągając punkt Z_3 na linii funkcji ładunków krytycznych
- 2) przez redukcję wyłącznie depozycji azotu, osiągając punkt Z_1 na linii funkcji ładunków krytycznych
- 3) przez równoczesną redukcję siarki i azotu, osiągając punkt Z^2 na linii funkcji ładunków krytycznych.

Funkcje ładunków krytycznych, opisane parametrami $CL_{max}(S)$, $CL_{min}(N)$ i $CL_{max}(N)$, wyznacza się numerycznie i kartuje dla całych obszarów zajętych przez rozważane ekosystemy, podzielonych na kwadraty o wymiarach 1x1 km, z których każdy reprezentuje wyodrębniony ekosystem rozumiany jako podstawowa, funkcjonalna jednostka złożona z biocenozy i jej biotopu, którego podstawowym składnikiem jest gleba. W takim rozumieniu liczebność ekosystemów w Polsce wynosi ponad 100 000, co jest jednoznaczne z liczbą powtórzeń obliczeń parametrów $CL_{max}(S)$, $CL_{min}(N)$ i $CL_{max}(N)$. Tak wielki rozmiar przetworzeń numerycznych i kartograficznych wymagał zbudowania specjalnego programu komputerowego, który pozwoliłby nie tylko wyznaczać wartości ładunków krytycznych, ale także ich przekroczenia. W tym celu opracowano program komputerowy SONOX, umożliwiający pełnoekranową i kartograficzną prezentację scenariuszy emisji związków siarki i azotu, wynikową depozycję tych związków, mapy ładunków krytycznych i ich przekroczeń [Mill, 2000].

3. WŁĄCZENIE DO BADAŃ DODATKOWYCH EKOSYSTEMÓW NATURALNYCH WRAŻLIWYCH NA ZAKWASZENIE I EUTROFIZACJĘ

W dotychczasowych pracach na rzecz ICP Modelowanie i Kartowanie, głównym problemem do rozwiązania była ilościowa ocena skutków zakwaszającego oddziaływania depozycji siarki i azotu na ekosystemy lądowe i wodne. Skutki te dla środowiska naturalnego zaznaczały się zwłaszcza wobec lasów w formie ich defoliacji, a nawet obumierania, co miało miejsce w obszarze tzw. czarnego trójkąta. Dlatego też tworzone dotąd, europejskie (w tym polskie) mapy ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji odnosiły się głównie do ekosystemów leśnych, zajmujących w Polsce ok. 30% powierzchni kraju [Mill 2002].

Z najnowszej oceny przeprowadzonej przez Grupę Roboczą ds. Oddziaływań wynika, że wobec obserwowanego zmniejszenie zagrożeń ekologicznych ze strony depozycji siarki w ostatnim dwudziestoleciu, zagrożenia ze strony depozycji azotu, utrzymującej się stale na wysokim poziomie, wysuwają się na plan pierwszy. W związku z tym, dotychczasowy zakres badań, adresowany wyłącznie do zakwaszenia i eutrofizacji ekosystemów leśnych, rozszerzono o wyznaczenie krytycznych ładunków eutrofizacji dla użytków zielonych, obszarów bagiennych i wrzosowisk. Włączenie tych obszarów do zakresu badań wynika z tego, że są one najbardziej wrażliwymi receptorami azotu pokarmowego, którego nadmierna depozycja jest obecnie najpoważniejszym problemem do rozwiązania w ramach przeglądu Protokołu z Göteborga.

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, wytypowano szereg nowych ekosystemów, receptorów depozycji azotu pokarmowego, których listę zamieszczono w tabeli 1. Jest to ten typ receptorów, które w warunkach nadmiernej depozycji azotu pokarmowego są szczególnie narażone na utratę bioróżnorodności.

W tabeli 1 podano klasyfikację ekosystemów według dwóch systemów, tj. systemu CORINE i EUNIS. Użycie systemu CORINE było niezbędne, ponieważ powierzchnie rozważanych ekosystemów transferowano do własnej bazy danych z bazy danych o pokryciu terenu utworzonej w ramach projektu CORINE Land Cover. Baza ta została utworzona w Instytucie Geodezji i Kartografii ze środków Europejskiej Agencji Środowiska oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Instytucją odpowiedzialną za rozpowszechnianie danych jest Główny Inspektorat Ochrony Środowiska.

Kodyfikacja systemu EUNIS została wprowadzona przez Grupę Roboczą ds. Oddziaływań, w celu ujednoczenia nomenklatury ekosystemów wśród krajowych centrów koordynacyjnych, uczestniczących w międzynarodowym programie modelowania i kartowania ładunków krytycznych. System EUNIS (*Europe-*

Tabela 1. Lista leśnych i dodatkowych ekosystemów lądowych wrażliwych na depozycję azotu pokarmowego, wytypowanych do badań

Table 1. List of forest and additionally selected terrestrial ecosystems sensitive to nutrient nitrogen deposition, under study

Nazwa ekosystemu	System		Powierzchnia [km ²]	Powierzchnia [%]
	CORINE	EUNIS		
Lasy liściaste	311	G1	13 666	4,4
Lasy iglaste	312	G3	55 347	17,7
Lasy mieszane	313	G4	21 375	6,9
Murawy i pastwiska naturalne	321	E	498	0,2
Wrzosowiska i zakrzaczenia	322	F	32,6	~ 0
Bagna śródlądowe	411	D1	1013,7	0,3
Torfowiska	412	D2	89,7	~ 0

an Nature Information System) jest hierarchiczną klasyfikacją siedlisk, opracowaną przez European Topic Centre for Nature Conservation, zachowującą wspólną płaszczyznę z innymi klasyfikacjami

Rekonstrukcję mapy CORINE do mapy formatu programu SONOX wykonano przy pomocy programu ArcView firmy ESRI oraz programów autorskich, stworzonych na potrzeby tego projektu.

W wyniku wyżej opisanych przekształceń, zbudowano bazę danych obejmującą nowe ekosystemy lądowe. Liczba rekordów tej bazy wzrosła z 88 383 do 128 398.

4. AKTUALIZACJA ŁADUNKÓW KRYTYCZNYCH Kwasowości i eutrofizacji

4.1. ZAKRES AKTUALIZACJI

Aktualizacja wartości ładunków krytycznych zakwaszenia i eutrofizacji z 2005 r. polegała na:

- wprowadzeniu do obliczeń danych o depozycji jonów wapniowych, magnezowych, potasowych, sodowych i chlorkowych pochodzących z badań monitoringowych przeprowadzonych w roku 2005;
- przeliczeniu wartości poboru azotu i kationów zasadowych przez biomase leśną na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego;
- przeliczeniu wartości natężenia przepływu przesącza glebowego nową metodą wyznaczania ewapotranspiracji i na podstawie niezbędnych do tego danych

klimatycznych z Climatic Research Unit – School of Environmental Sciences University of East Anglia;

- zastosowaniu zrewidowanych wartości krytycznych stężeń azotu w przesa-
czu glebowym, zalecanych przez Centrum Koordynacyjne ds. Oddziaływań.

Jeżeli chodzi o dane o depozycji kationów zasadowych i chlorków, należy odnotować, że dane te, z oczywistych względów, są udostępniane z rocznym opóźnieniem, stąd zastosowanie danych z 2005 r. w niniejszym opracowaniu.

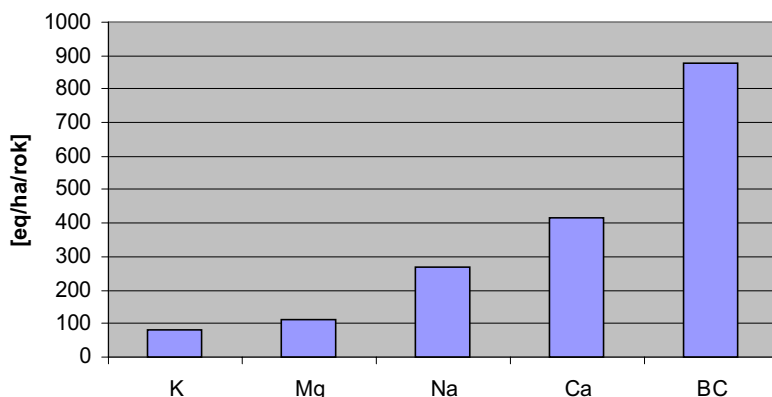
4.2. AKTUALIZACJA DANYCH O DEPOZYCJI KATIONÓW ZASADOWYCH

Wzorem lat ubiegłych dokonano aktualizacji danych o depozycji kationów zasadowych i jonów chlorkowych, przez przyjęcie i wdrożenie do obliczeń ładunków krytycznych zakwaszenia, danych z Monitoringu Chemizmu Opadów Atmosferycznych i Depozycji Zanieczyszczeń do Podłoża, prowadzonego przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział Wrocław, na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska i ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. W obecnych pracach aktualizacyjnych wykorzystano także oszacowane przez prowadzących ww. monitoring, wartości depozycji suchej dla ostatnio dostępnego roku sprawozdawczego, tj. roku 2005, dodając je do zmierzonej depozycji mokrej i otrzymując tą drogą depozycję całkowitą, wykorzystaną w dalszych obliczeniach.

Wymóg wyboru danych o depozycji kationów zasadowych z ostatniego roku sprawozdawczego wynika z założenia, że depozycja pyłów, będących głównym źródłem kationów zasadowych, z roku na rok maleje, zbliżając się tym samym do wartości tłowych. Tą tendencję potwierdzają obserwacje ciągu danych z okresu 1999–2005 poczynione przez IMGW O/Wrocław (IMGW/Wrocław, 2006).

Rysunek 2 ilustruje średnie dla całego obszaru zalesienia Polski wartości depozycji kationów zasadowych w 2005 roku. Obserwacja rozkładów przestrzennych poszczególnych kationów prowadzi do następujących obserwacji:

- depozycja kationów wapnia i potasu koncentruje się wyraźnie w południowej części kraju i ma stosunkowo ograniczony zasięg, wskazuje to wyraźnie na efekt napływu transgranicznego z południa, którego podstawowym źródłem są pyły niesione z obszaru Europy południowej, a źródłem tych z kolei są pyły z Sahary;
- prawie centralne rozlokowanie depozycji magnezu może mieć związek z pyleniem pochodzącym z dwóch wielkich aglomeracji tj. warszawskiej i łódzkiej.
- wielkość i zasięg depozycji sodu dowodzi wyraźnie jej pochodzenia morskiego.



Rys. 2. Średnie wartości deponycji kationów zasadowych dla całego obszaru zalesienia Polski w 2005 roku

Fig. 2. Average values of base cation depositions on Polish woodlands in 2005

- na przestrzenny rozkład deponycji sumy kationów zasadowych największy wpływ ma deponycja wapnia, co wynika z rys. 2. Co prawda, udział deponycji sodu jest także znaczący, jednak tylko w bardzo ograniczonym zasięgu przestrzennym, z tego względu często jest stosowane uproszczenie polegające na zastępowanie deponycją wapnia deponycją sumy rozważanych kationów zasadowych.

4.3. AKTUALIZACJA WIELKOŚCI POBORU AZOTU I KATIONÓW ZASADOWYCH PRZEZ BIOMASĘ LEŚNĄ

Ładunek substancji pokarmowych, tj. azotu i kationów zasadowych, pobieranych przez poszczególne rodzaje drzewostanów oblicza się z iloczynu wielkości ich pozysku i zawartości substancji pokarmowych w poszczególnych częściach drzew podlegających pozyskowi. W myśl tego procedura wyznaczania ładunku substancji pokarmowych pobieranego przez biomasę leśną ma następującą postać [UBA, 2004]:

$$X_u = k_p \cdot \rho_g \cdot (stX_g + f_{d/g} \cdot stX_d) \quad (5)$$

gdzie:

- k_p – średni roczny pozysk biomasy [$m^3 \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$],
- ρ_{pn} – gęstość suchej masy pni drzewa [$kg \cdot m^{-3}$],
- stX – stężenie danego pierwiastka pokarmowego (Bc lub N) w grubiznie ($_g$) i drobnicy ($_d$) w [$eq \cdot kg^{-1}$],
- $f_{d/g}$ – wagowy stosunek drobnicy do grubizny [$kg \cdot kg^{-1}$].

Należy zaznaczyć, że do kationów zasadowych, funkcjonujących jako substancje pokarmowe, zalicza się tylko wapń, magnez i potas, a ich sumę oznacza się jako Bc, w odróżnieniu od sumy kationów zasadowych neutralizujących, oznaczanych jako BC. Jest tak dlatego, że sód jest czynnikiem inertnym wobec biomasy.

W niniejszej pracy rozpatruje się dwa podstawowe rodzaje drzewostanów: iglaste i liściaste. W tabeli 2 podano dane o gęstościach i zawartościach azotu i kationów zasadowych w tych dwóch rodzajach drzewostanów, z podziałem na tzw. grubiznę i drobnicę. Grubizna definiowana jest jako drewno okrągłe, wielko- i średniowymiarowe, drobnica zaś jako drewno okrągłe o średnicy dolnej do 5 cm [Leśnictwo 1997].

Tabela 2. Dane wejściowe do wyznaczania wielkości poboru substancji pokarmowych według zmodyfikowanej procedury

Table 2. Input data to estimate nutrient uptake according to the modified procedure

Drzewostan	Gęstość [kg m ⁻³]	Zawartość w grubiznie [eq/kg]		Zawartość w drobnicy [eq/kg]	
		Bc	N	Bc	N
Iglaste	400	0,100	0,084	0,241	0,336
Liściaste	540	0,156	0,137	0,295	0,397

Współczynnik $f_{d/g}$ nie był stosowany dysponowano bowiem danymi o rzeczywistych objętościach pozyskiwanej grubizny i drobnicy. Dane pochodzą z dostępnych rocznych raportów Głównego Urzędu Statystycznego w dziale Leśnictwo.

Dotychczasowym źródłem danych o pozysku drewna w Polsce były dane pochodzące z Biura Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej. Były to dane, nie o rzeczywistych wielkościach pozysku, lecz wielkościach planowanych dla poszczególnych obrębów leśnych, a więc bardzo szczegółowe w sensie przestrzennym, biorąc pod uwagę niewielką powierzchnię obrębów. Dostępne serie czasowe tych danych były jednak bardzo krótkie i to było ich poważną wadą, ponieważ cała koncepcja i metodyka wyznaczania ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji opiera się na założeniu stanu ustalonego i wymaga danych wejściowych o długich seriach czasowych. Postanowiono więc wykorzystać dane publikowane w raportach Głównego Urzędu Statystycznego – dział Leśnictwo, gdzie podawane są informacje o wielkości pozysku drewna grubego i drobnicy w różnych ujęciach przestrzennych. Najbardziej szczegółowym podziałem przestrzennym był podział funkcjonujący w latach od 1975 do 1998 r. na 49 województw. Z tego okresu dostępne były dane z lat 1985, oraz okresu 1990–1998.

Obliczenia poprzedziły prace mające na celu dezagregację danych o pozysku z układu wojewódzkiego na układ przestrzenny o oku siatki 1x1 km. Do tego celu opracowano specjalną procedurę typu GIS.

Wykorzystując wygenerowane wartości pozysku drewna oraz dane zamieszczone w tabeli 2, przeprowadzono obliczenia wartości poboru azotu i kationów zasadowych przez drzewostany iglaste i liściaste. Wyniki tych obliczeń umieszczono w odpowiednich polach bazy danych wejściowych do obliczeń ładunków krytycznych.

W wyniku przeprowadzonej aktualizacji, średnie wartości poboru azotu i kationów zasadowych uległy obniżeniu w porównaniu ze średnimi wartościami z roku 2005. I tak, średnie wartości poboru azotu zmniejszyły się z 350 eq/ha/rok w 2005 r. do 196 eq/ha/rok, a średnie wartości poboru kationów zasadowych z 220 eq/ha/rok w 2005 r. do 212 eq/ha/rok obecnie. Taka zmiana wartości tych parametrów powoduje obniżenie wartości maksymalnego ładunku krytycznego siarki CL_{\max}^S i ładunku krytycznego azotu pokarmowego CL_{nut}^N .

4.4. AKTUALIZACJA WARTOŚCI NATĘŻENIA PRZEPŁYWU PRZESĄCZU GLEBOWEGO

Natężenie przepływu wody Q_{le} przez warstwę glebową jest ważnym parametrem determinującym wielkość jednego z kluczowych składników bilansu jonowego, na podstawie którego wyznacza się ładunki krytyczne zakwaszenia. Składnikiem tym jest zdolność danego systemu glebowego do neutralizowania kwasów (Acid Neutralizing Capacity, ANC), opisana następującym równaniem:

$$ANC_{le(kryt)} = - \left(1.5 \cdot \frac{BC_w + BC_{dep} - BC_u - 0.015 \cdot Q}{(Bc/Al)_{kryt} \cdot K_{gib}} \right)^{1/3} Q^{2/3} - 1.5 \cdot \frac{BC_w + BC_{dep} - BC_u - 0.015 \cdot Q}{(Bc/Al)_{kryt}} \quad (6)$$

gdzie:

- BC_{dep} – ładunek kationów zasadowych zawartych w pyłach zdeponowanych z atmosfery [$\text{eq ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$],
- BC_w – ładunek zasadowości wytwarzany w procesie wietrzenia gleb [$\text{eq ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$],
- BC_u – ładunek kationów zasadowych pobranych przez rośliny [$\text{eq ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$],
- $(Bc/Al)_{kryt}$ – kryterialna wartość molowego stosunku kationów zasadowych do jonów glinowych,
- Q – natężenie przepływu przesączu glebowego [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$].

Natężenie odpływu z gleby było dotąd w sensie hydrologicznym rozumiane jako odpływ zlewniowy i wyliczano go jako różnicę między średnim rocznym opadem z wielolecia a sumą średniego z wielolecia, rocznego parowania terenowego i odpływu powierzchniowego, wykorzystując dane z Atlasu Hydrologicznego Polski [1986]. Tak wyznaczona wielkość stanowi przybliżenie infiltracji efektywnej, która jest procesem najlepiej opisującym tę część opadu atmosferycznego, która kontaktuje się ze strefą aeracji gleby [Atlas Hydrologiczny 1986]. Lepszym estymatorem infiltracji efektywnej, mierzonej natężeniem przepływu wody przez warstwę glebową jest różnica między wielkością opadu a wielkością ewapotranspiracji potencjalnej. Ilościowe wyznaczenie ewapotranspiracji jest zagadnieniem złożonym i wymagającym dostępu do specyficznych danych klimatycznych z wielolecia. Dostęp do tych danych otworzył się w 2006 r., kiedy to Climatic Research Unit i Tyndall Centre for Climate Change Research funkcjonujące przy School of Environmental Sciences - University of East Anglia, otworzyły swoje bazy danych. Z tej bazy danych uzyskano, za zgodą jej autorów [New i in. 2002] średnie miesięczne dane klimatyczne dotyczące obszaru Polski dla okresu 1901–2000, w rozdzielczości przestrzennej 10^0 .

Były to następujące dane, niezbędne do obliczenia ewapotranspiracji:

- 1) temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$],
- 2) opad atmosferyczny [$\text{mm m}\cdot\text{c}^{-1}$],
- 3) nasłonecznienie [ułamek],

Ewapotranspirację wyznaczono metodą Federer'a [1982], opartą na równaniu Monteith'a [1964]:

$$T = \frac{\Delta(R_n - G)L_v + C_p \rho V / r_a L_v}{\Delta + \gamma(r_c + r_a) / r_a} \quad (7)$$

gdzie:

- L_v – ciepło parowania,
- Δ – spadek krzywej ciśnienia par nasycenia,
- γ – stała psychrometryczna,
- $R_n - G$ – różnica pomiędzy promieniowaniem netto a strumieniem ciepła glebowego,
- $C_p \rho$ – objętościowa pojemność ciepła powietrza,
- V – deficyt ciśnienia par,
- r_c – opór koronowy,
- r_a – opór warstwy brzegowej.

Stosując pewne uproszczenia oraz zespół zależności empirycznych, zbudowano procedurę obliczeniową, za pomocą której wykonano obliczenia. Przedtem

jednak należało zinterpolować średnie miesięczne wartości rozważanych parametrów klimatycznych do wartości dobowych, tego bowiem wymagała procedura. Następnie dokonano konwersji geograficznego systemu przestrzennego na system EMEP oraz dezagregacji danych z rozdzielczości przestrzennej 10° na 1×1 km. Tą drogą powstały trzy bazy danych o wymiarach ok. 100 000 elementarnych ekosystemów, każdy po 36 500 dobowych wartości temperatur powietrza, opadów atmosferycznych i nasłonecznienia. Tak zorganizowane dane wejściowe zostały wprowadzone do procedury liczenia ewapotranspiracji potencjalnej.

Otrzymane dobowe wartości ewapotranspiracji były kolejno uśredniane do miesięcznych, rocznych i z wielolecia 1901–2000. Te ostatnie odjęto od wartości opadów średnich z tego samego wielolecia, otrzymując wynikową bazę danych o wartości natężenia przepływu przesączu glebowego dla całego obszaru rozważanych ekosystemów wrażliwych na depozycję siarki i azotu.

Zaktualizowane – średnie dla rozważanego obszaru – wartości natężenia przepływu przesączu glebowego są niższe niż wartości wyznaczone w 2005 r. i wynoszą $1150 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{rok}$ wobec $1555 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{rok}$. Zgodnie z równaniem (1), obniżenie wartości tego parametru, skutkuje obniżeniem wartości CL_{\max}^S i CL_{\max}^N .

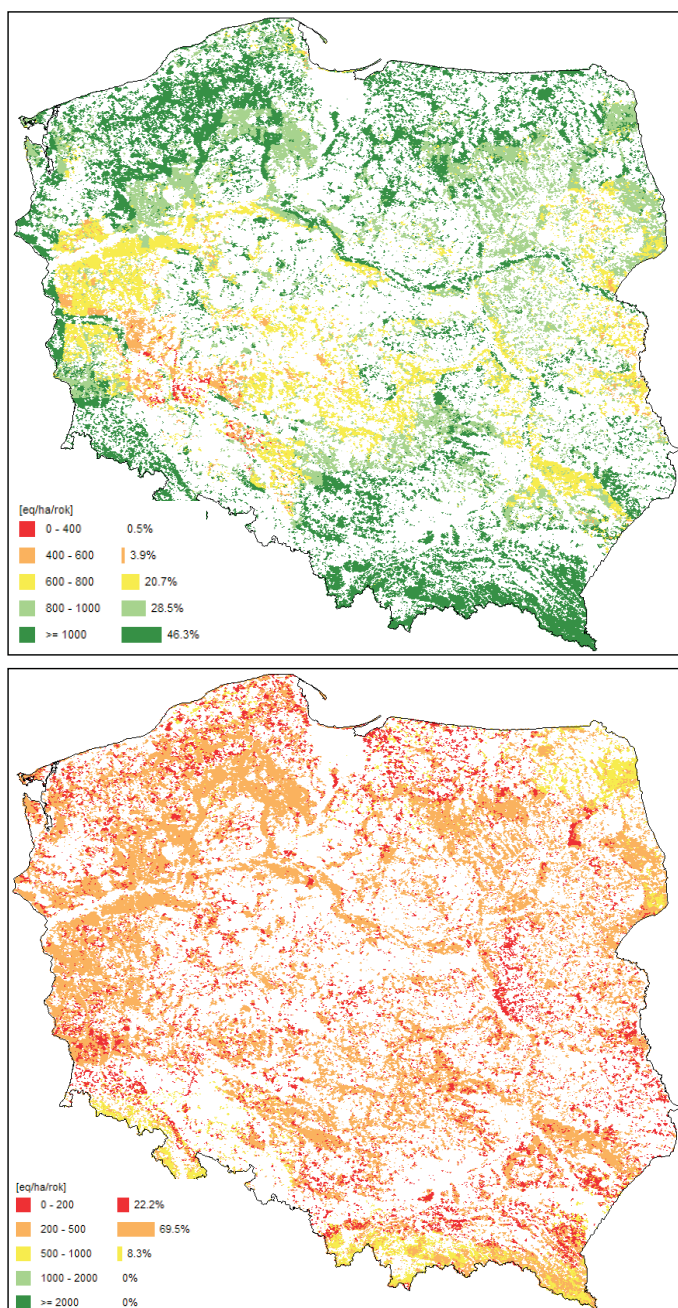
4.5. ZAKTUALIZOWANE ŁADUNKI KRYTYCZNE KWASOWOŚCI I EUTROFIZACJI

Wykorzystując zaktualizowane dane wejściowe oraz zrekonstruowaną wersję programu SONOX obliczono wartości parametrów funkcji ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w formie map na rysunkach 3 i 4.

W tabeli 3 zestawiono średnie wartości ładunków krytycznych zaktualizowanych i obliczonych dla roku 2005.

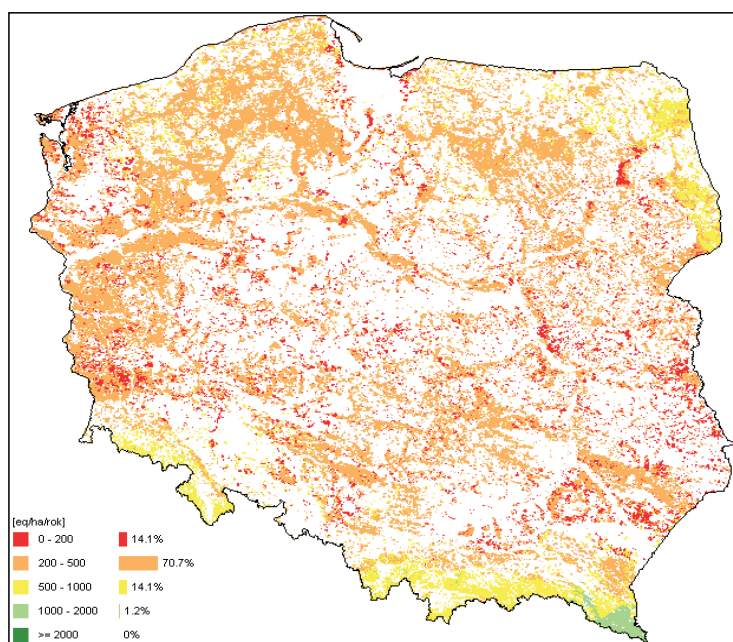
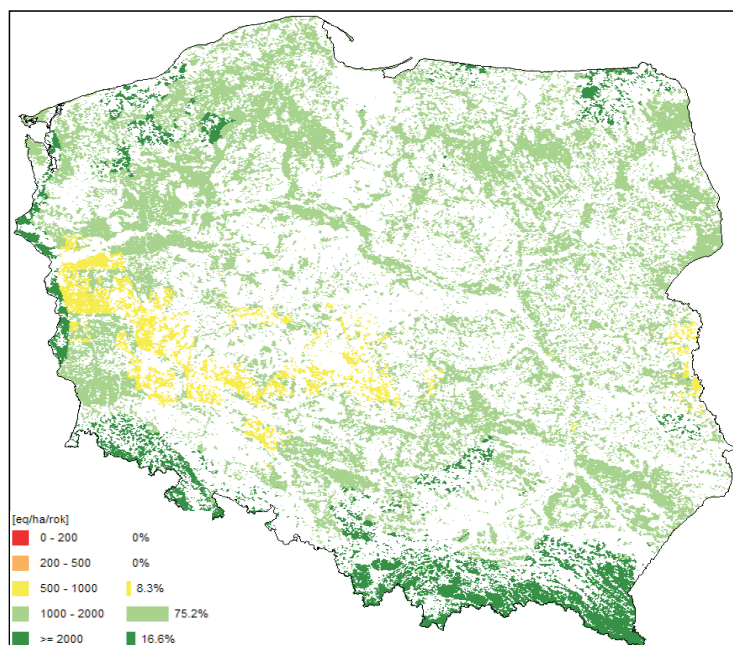
Dokonane zmiany wielkości depozycji kationów zasadowych, poboru azotu i kationów zasadowych oraz natężenia przepływu przesączu glebowego prowadzą do ogólnego obniżenia wielkości ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji, przy czym:

- 1) spadek średniej wartości parametru CL_{\max}^S ma związek z niższą dostawą kationów zasadowych z atmosfery w 2005 roku w porównaniu z rokiem 2003, uwzględnionym w obliczeniach za rok 2005. Ponadto jest on skutkiem średnio niższych wartości poboru azotu i kationów zasadowych w porównaniu ze średnimi wartościami z 2005 roku. Także zaktualizowane, średnie wartości natężenia przepływu przesączu glebowego są niższe od wartości wyznaczonych w 2005 roku;



Rys. 3. Zaktualizowane wartości maksymalnych ładunków krytycznych siarki (góra) i minimalnych ładunków krytycznych azotu (dół) [eq/ha/rok]

Fig. 3. Updated maximum critical loads of sulphur (top) and minimum critical loads of nitrogen (below) [eq ha⁻¹year⁻¹]



Rys. 4. Zaktualizowane wartości maksymalnych ładunków krytycznych azotu (górze) i ładunków krytycznych azotu pokarmowego (dół) [eq/ha/rok]

Fig. 4. Updated maximum critical loads of nitrogen (top) and critical loads of nutrient nitrogen (below) [eq ha⁻¹year⁻¹]

Tabela 3. Średnie wartości ładunków krytycznych aktualnych i obliczonych dla 2005 roku**Table 3.** Average values of updated critical loads and calculated in 2005

Rok	Ładunki krytyczne [eq/ha/rok]			
	$CL_{\max S}$	$CL_{\min N}$	$CL_{\max N}$	$CL_{\text{nut} N}$
2005	1579	492	2627	647
2007	1316	288	1781	338

- 2) spadek średniej wartości parametru $CL_{\min N}$ ma dwie przyczyny. Pierwsza, bezpośrednia, to średnio niższe wartości poboru substancji pokarmowych przez wszystkie ekosystemy. Druga przyczyna spadku ma związek ze wzrostem liczebności nowych ekosystemów, z których każdy, z wyjątkiem lasów mieszanych, odznacza się wyraźnie niższym poborem rozważanych substancji.
- 3) spadek średniej wartości parametru $CL_{\max N}$ wiąże się ze spadkiem wartości dwóch powyższych parametrów, bowiem jest ich pochodną;
- 4) spadek średniej wartości parametru $CL_{\text{nut} N}$ jest konsekwencją niższych wartości parametru $CL_{\min N}$ oraz zastosowania zrewidowanych wartości krytycznych stężeń azotu w przesączu glebowym.

5. PRZEKAZANIE WYNIKÓW AKTUALIZACJI ŁADUNKÓW KRYTYCZNYCH DO CENTRUM KOORDYNACYJNEGO DS. ODDZIAŁYWAŃ

Wyniki aktualizacji ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji wybranych ekosystemów lądowych Polski zostały opracowane w formie raportu piśmennego oraz elektronicznych baz danych i map zapisanych na dysku DVD. Wyniki te zostały pozytywnie odebrane przez zleceniodawcę aktualizacji, tj. Ministerstwo Środowiska oraz NFOŚiGW, jako instytucję finansującą, z zaleceniem przekazania ich do Centrum Koordynacyjnego ds. Oddziaływań w Bilthoven w Holandii. Instytut Ochrony Środowiska, działając jako krajowe centrum koordynacyjne ds. oddziaływań, przekazał stosowny raportu oraz zaktualizowane mapy ładunków krytycznych w zalecanych formatach i w przepisany terminie. Zostaną one, wspólnie z mapami innych krajów, zagregowane przez Centrum Koordynacyjne do ogólnoeuropejskich map ładunków krytycznych zakwaszenia i eutrofizacji i wykorzystane jako naukowa postawa przeglądu i rewizji danych Protokołu z Göteborga.

PIŚMIENNICTWO

- Atlas Hydrologiczny Polski, 1986. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- EMEP, 2006. Status Report to support the review of Gothenburg Protocol, Norwegian Meteorological Institute.
- Federer, C.A., 1982. Transpirational supply and demand: Plant, soil and atmospheric effects evaluated by simulation. *Water Resources Research* 18 (2): 355–362.
- Monitoring chemizmu opadów atmosferycznych i depozycji zanieczyszczeń do podłoża w latach 2007–2005. Raport roczny z badań monitoringowych w 2005 r., IMGW O/ Wrocław.
- Leśnictwo 1997, 1997. Informacje i opracowania statystyczne, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Mill W. 2000, Integrated modelling of acidification effects to forest ecosystems – model SONOX, 6th International Conference on Acidic Deposition “Acid Rain 2000”, Tsukuba, Japonia, *Water Air and Soil Pollution Vol. 130*: 1289–1294.
- Mill W. 2002, Obciążenia ekosystemów leśnych Polski związkami siarki i azotu według koncepcji ładunków krytycznych, Monografia, Wydawnictwo Instytutu Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Monteith, J.L., 1964. Evaporation and environment. In the state and movement of water in living organisms. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 19, 205–233.
- New M., Lister D., Hulme M. and Makin I., 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21: 1–25.
- Posch M., Hettelingh J-P. and Sllotweg J., (editors), *Manual for Dynamic Modelling of Soil Response to Atmospheric Deposition*, RIVM Report 259101012.
- UBA (2004), *Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and mapping critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and T9rends*, Umweltbundesamt, Berlin.

Doc. dr hab. inż. Wojciech Mill

*Instytut Ochrony Środowiska, Pracownia Modelowania Kompleksowego
ul. Grunwaldzka 7B/2, 41-106 Siemianowice Śl.*