

Opracowanie maski obszarów leśnych w celu monitoringu kondycji zdrowotnej lasów w Polsce na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych

Development of forest cover mask to monitor the health condition of forests in Poland using long-term satellite observations

Maciej Bartold

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, ul. Krakowskie Przedmieście 26/28, 00-927 Warszawa

Tel. +48 22 5520654, e-mail: maksb1983@gmail.com

Abstract. The work presented here aims at developing cover mask for monitoring forest health in Poland using remote sensing data. The main objective was to assess the impact of using the mask on forest condition monitoring combined with vegetation indices obtained from long-term satellite data. In this study, a new mask developed from the CORINE Land Cover 2012 (CLC2012) database is presented and its one-kilometer pixel size matched to low-resolution data derived from SPOT VEGETATION satellite registrations. For vegetation mapping, only pixels with a cover $\geq 50\%$ of broad-leaved and mixed forests defined by CLC2012 were taken into account. The masked pixels were used to evaluate spatial variability in eight Natural-Forest Regions (NFRs). The largest coverages by masked forests were obtained in Sudetian (65.7%), Carpathian (65.9%) and Baltic (51.3%) regions. For other forest regions the coverage was observed to be around 30–50%.

Time-series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) comprising SPOT VEGETATION images from 1998 until 2014 were computed and cross-comparison analyses on $\geq 50\%$ and $< 50\%$ forest cover masks brought up frequent differences at a level higher than 0.05 NDVI in seven out of eight NFRs. An exception is the Sudetian region, where the data was highly consistent. Furthermore, the Mann-Whitney U non-parametric test revealed statistically significant differences in two regions: Baltic and Masurian-Podlasie NFR. The comparative analysis of NDVI confirmed that there is a need for additional investigation of the quality of newly developed forest mask combined with vegetation and meteorological data.

Keywords: CORINE Land Cover 2012, forest condition, NDVI, satellite images, vegetation mapping

1. Wstęp

Systemy informacji o stanie lasów i kondycji drzewostanów są pożądanym źródłem wiedzy dla administracji rządowej, samorządowej, leśnej i społeczeństwa. Powstałe w ramach projektów badawczych systemy, takie jak Bank Danych o Lasach i Wielkoobszarowa Inwentaryzacja Stanu Lasu, są odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie monitoringu lasów w Polsce. Informacje są gromadzone na podstawie ciągłych lub okresowych obserwacji na stanowiskach kontrolno-pomiarowych i stałych powierzchniach obserwacyjnych. Kompleksowym źródłem o stanie zdrowotnym lasów są również coroczne raporty, opracowane przez Instytut Badawczy Leśnictwa na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych.

Wsparciem dla programów i systemów monitoringu lasów może być szeroka gama produktów satelitarnych. Umieszczone na orbitach okołobiegunowych satelity pozwalają na

prowadzenie stałych, codziennych obserwacji powierzchni ziemskiej. Misja amerykańskich satelitów meteorologicznych NOAA trwa nieprzerwanie od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Z kolei satelity środowiskowe Terra i Aqua, powstałe w ramach programu NASA, krążą nieustannie po orbitach od 1999 i 2000 roku. Natomiast europejski program satelitów środowiskowych SPOT VEGETATION był realizowany w latach 1998–2014. Od 2013 roku jest on kontynuowany przez satelitę Proba-V.

Ze względu na rozdzielczość terenową piksela, czyli rzeczywisty rozmiar najmniejszego elementu obrazu, satelity klasyfikuje się na wysoko-, średnio- i niskorozdzielcze. Wyżej wymienione satelity zaliczają się do kategorii satelitów niskorozdzielczych. Sensory AVHRR i MODIS, montowane na pokładach satelitów meteorologicznych NOAA oraz środowiskowych Terra i Aqua, skanują powierzchnię ziemską z rozdzielczością przestrzenną 1 km \times 1 km

i 250 m × 250 m. Najnowszy satelita środowiskowy Proba-V rejestruje obszar w minimalnej rozdzielczości przestrzennej 100 m × 100 m. Sensory tych satelitów obrazują powierzchnię w zakresach światła widzialnego oraz bliskiej, średniej i dalekiej podczerwieni.

Dzięki długoletnim obserwacjom z różnych satelitów powstało wiele prac naukowych dotyczących monitorowania pokrycia lasów oraz kondycji zdrowotnej środowiska leśnego. Analizy procentowego udziału lasów w powierzchni każdego piksela na wieloletnich zobrazowaniach satelitarnych umożliwiły opracowanie szeregu map obszarów leśnych do określania tempa wylesiania na obszarach badawczych Amazonii (Lu et al. 2011) i Indii (Reddy et al. 2015). We wspomnianych pracach naukowych skupiano się na metodycznym aspekcie opracowania serii masek dla obszarów leśnych, pozwalających na odróżnianie lasów od pozostałych form użytkowania terenu i monitorowanie zmienności pokrycia środowiska leśnego w czasie.

Niemniej istnieją gotowe i oferowane nieodpłatnie warstwy tematyczne przedstawiające procentowe pokrycie lasów w powierzchni danego piksela na zobrazowaniach satelitarnych. Są to warstwy High Resolution Layers (HRL) opracowane dla lasów Europy w 2012 roku z dokładnością do 100 metrów i dostępne na stronie internetowej serwisu Copernicus <http://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/>. Natomiast od 2000 roku Centrum Dystrybucji Danych Satelitarnych NASA oferuje globalny produkt Vegetation Continuous Fields (VCF) z dokładnością do 250 metrów, który został opracowany na bazie zdjęć rejestrowanych przez sensory MODIS (adres strony internetowej https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod44b). Jednakże produkty HRL i VCF mają określone ograniczenia czasowe i przestrzenne. Dane HRL dotyczą tylko jednego roku i nie pokrywają całego obszaru Polski. Z kolei dane VCF obejmują ostatnie piętnaście lat i nie zawierają informacji o typach lasów.

Szeroka gama wieloletnich danych niskorozdzielczych oraz ich powszechna i bezpłatna dostępność umożliwiają wykonanie złożonych analiz kondycji roślin. Niemniej jednak ograniczona rozdzielczość przestrzenna pozwala na monitorowanie środowiska w skali kraju oraz jednostek podziału terytorialnego państwa. Niska rozdzielczość przestrzenna danych, oferowana najczęściej w 1 km × 1 km, oraz złożoność problemów geometryzacji zdjęć satelitarnych (Bychawski 1988) mogą implikować błędy prawidłowego rozpoznania obszarów leśnych na korzyść graniczących terenów rolniczych i zabudowy. A tym samym może skutkować błędami pomiaru stanu i kondycji lasów.

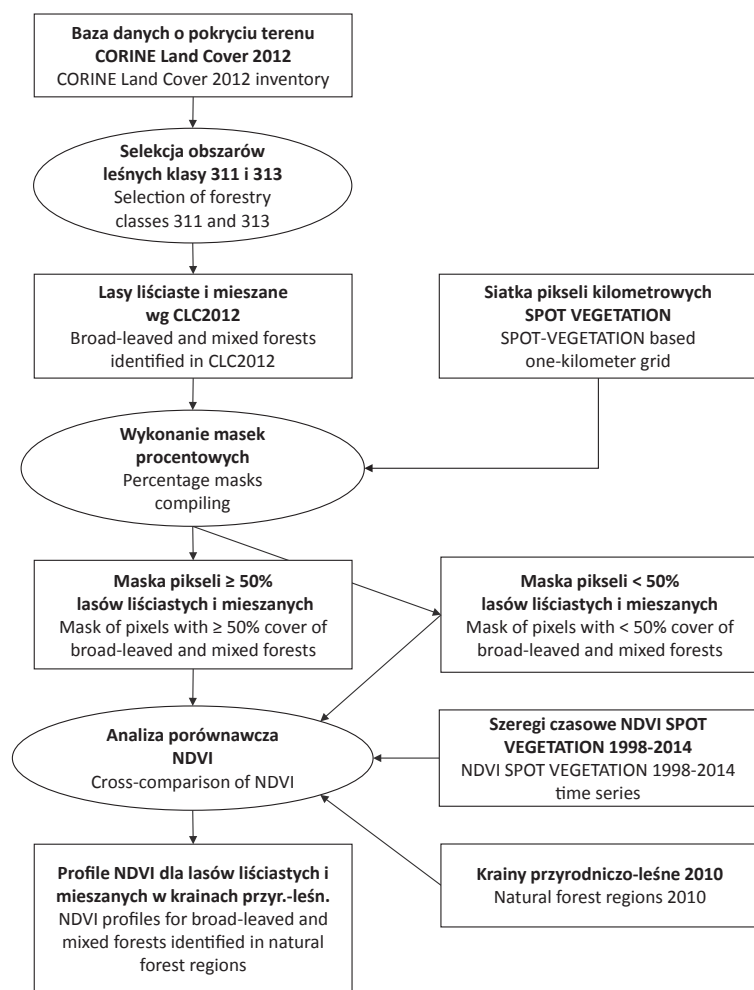
Na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych są prowadzone badania nad tempem wzrostu i rozwoju lasów. Wskaźniki wegetacji, wyprowadzane ze zdjęć satelitarnych, pozwalają na wyznaczanie okresów rozpoczęcia zielenienia się lasu liściastego czy zrzucania liści przez drzewa na zimę. Metody oparte na tych wskaźnikach pozwalają ocenić stan wzrostu i rozwoju lasów. Dlatego też w celu prowadzenia monitoringu kondycji zdrowotnej roślin z zastosowaniem te-

ledetekcji satelitarnej nieocenioną rolę pełnią warstwy tematyczne obszarów leśnych, będące maską do zawężenia badań tylko na terenach lasów. Na przykład w badaniach czasowo-przestrzennej zmienności wegetacji roślin na Svalbardzie przygotowywano poligony testowe z precyzyjną informacją o gatunkach roślin (Karlsen et al. 2014). Z kolei do opracowania map parametrów opisujących fenologię lasów w Indiach wykorzystano informatyczne zasoby leśne do odróżniania lasów od innych kompleksów roślinności (Prabakaran et al. 2013). Powszechnie dostępna cyfrowa baza danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover 2006 została uwzględniona przy testowaniu metody detekcji deforestacji w Polsce w latach 2000–2006 (Bartold 2013).

W raportach na temat stanu lasów (State of Europe's Forests 2015) i w publikacjach dotyczących zmian okresów fenologicznych roślin (Garamvolgyi 2013) autorzy podkreślają szczególną rolę monitorowania wzrostu i rozwoju lasów w kontekście zmian klimatycznych. Stąd też w niniejszym artykule zaproponowano zastosowanie maski obszarów leśnych dla potrzeb monitorowania kondycji zdrowotnej. Celem pracy było opracowanie warstwy reprezentatywnych pikseli terenów leśnych odczytanych z bazy danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover 2012. Metoda selekcji pikseli jest oparta na analizie udziału powierzchni leśnej w powierzchni danego piksela. Warstwa tematyczna została następnie weryfikowana na podstawie analizy przebiegów wskaźnika wegetacji, odczytanego dla lasów na podstawie niskorozdzielczych danych satelitarnych. Lasy liściaste strefy umiarkowanej cechują się wyraźną sezonowością, a tym samym są obszarem badawczym wskazanym do śledzenia przebiegów wskaźników wegetacji dla potrzeb monitorowania kondycji drzewostanów z poziomu satelitarnego.

2. Metodyka

Badania przeprowadzono w trzech etapach. Rycina 1 przedstawia schemat opracowania i testowania maski lasów liściastych. W pierwszym etapie prac pobrano z bazy danych o pokryciu terenu CORINE Land Cover (CLC) granice występowania powierzchni leśnych w Polsce. W ramach programu CORINE, na podstawie wysokorozdzielczych danych satelitarnych, zostały kartowane obszary o minimalnej powierzchni 25 ha oraz szerokości co najmniej 100 m (Ciołkosz, Bielecka 2005). Aktualna czwarta edycja programu CLC2012 powstała w ramach europejskiego programu Copernicus GIO Land Monitoring (Hościło, Tomaszewska 2015). Z uwagi na przeznaczenie maski do monitorowania kondycji zdrowotnej lasów z klas ekosystemów leśnych i seminaturalnych CLC2012 wyselekcjonowano tylko obszary pokryte lasami liściastymi. Warunek ten spełniają klasy 311 i 313, definiowane według nomenklatury CORINE jako lasy liściaste i lasy mieszane, bez podziału na wiek i skład gatunkowy drzewostanu. Klasy 311 i 313 obejmują obszary lasów ze zwarcie drzewostanu większym niż 30% lub z zagęszczeniem 500 drzew na jeden hektar. Szczegółowa definicja klasy 311 obejmuje obszary leśne, w których w minimum



Rycina 1. Schemat opracowania i testowania maski obszarów lasów liściastych i mieszanych

Figure 1. Flowchart of steps to create and test broad-leaved and mixed forests mask

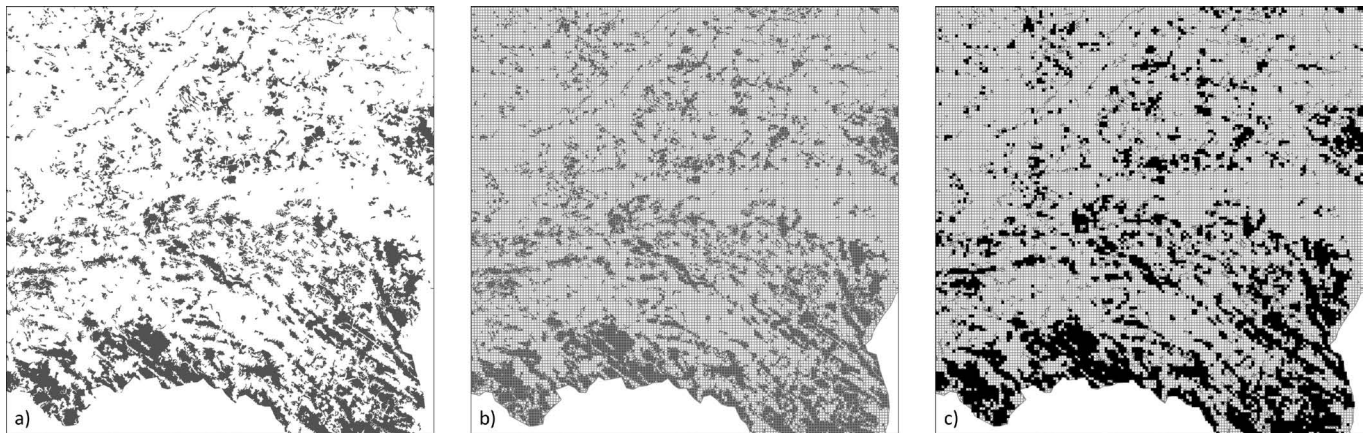
75% dominują lasy liściaste. Z kolei klasa 313 opisuje obszary lasów mieszanych, w których udział lasów liściastych czy iglastych nie przekracza 25% (CORINE land cover nomenclature illustrated guide). W rezultacie pierwszego etapu prac otrzymano w postaci wektorowej pierwotną warstwę tematyczną obszarów leśnych wg stanu na rok 2012.

Następnie przeprowadzono analizę udziału powierzchni leśnej w powierzchni danego piksela (ryc. 2). W tym celu opracowano siatkę kwadratów o boku jednego kilometra, odpowiadającą siatce pikseli obrazów satelitarnych SPOT VEGETATION. Do badań przyjęto kryterium progu 50% powierzchni zajmowanej przez tereny leśne w obrębie piksela. Ten etap prac miał na celu minimalizację błędów pomiaru kondycji lasów, mogących powstać w wyniku wystąpienia kilku klas pokrycia terenu w obrębie pojedynczego piksela.

Ta metodyka została już sprawdzona przy tworzeniu warstwy tematycznej obszarów rolniczych do prognozowania plonów na podstawie zdjęć NOAA AVHRR (Turlej et al. 2013). Autorzy publikacji poszukiwali kompromisu między uzyskaniem optymalnej liczebności a zachowaniem reprezentatywności pikseli rolniczych. Analizowali procentowy udział klas rolniczych CORINE Land Cover 2006 w powierzchni pikseli NOAA-AVHRR oraz w powierzchni pikseli w strefach buforowych o szerokości 600 metrów. Badania

nad zaawansowaną maską rolniczą wykazały nieznaczną poprawę odczytów wskaźnika wegetacji dla monitoringu roślin uprawnych w odniesieniu do odczytów wskaźnika na podstawie standardowej maski z progiem 50%. Kryterium 50% stosowane jest również w programach środowiskowych CORINE i produktach GLOBCOVER 2009 do wyróżniania dominujących form pokrycia terenu w powierzchni danego piksela (CORINE land cover nomenclature installation guide, GLOBCOVER 2009 Product Description Manual). Dlatego też w niniejszym artykule również zachowano kryterium progu 50% do opracowania maski obszarów leśnych.

Trzeci etap prac polegał na sprawdzeniu wpływu zastosowania nowej maski obszarów leśnych na jakość pomiaru znormalizowanego wskaźnika wegetacji NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obliczonego na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych. Wskaźnik ten, wprowadzony w latach 70. ubiegłego wieku, jest powszechnie uznawany za jeden z najbardziej uniwersalnych mierników kondycji i wigoru roślinności (Tucker 1979). Do jego obliczenia wykorzystuje się właściwości spektralne chlorofilu zawartego w roślinach w czerwonym zakresie widma elektromagnetycznego oraz struktur komórkowych w bliskiej podczerwieni. Zakres wartości NDVI obejmuje od -1,0 do 1,0, przy czym wartości bliżej jedynki wskazują większą in-



Rycina 2. Procedura tworzenia maski obszarów leśnych: a) obszary lasów liściastych i mieszanych wg CORINE Land Cover 2012, b) siatka pikseli kilometrowych SPOT VEGETATION, c) piksele z minimum 50% udziałem obszarów lasów liściastych i mieszanych
 Figure 2. Methodology of producing forests mask: a) broad-leaved and mixed forests in CORINE Land Cover 2012 database, b) SPOT-VEGETATION 1 kilometer grid c) pixels with 50% threshold of occurred broad-leaved and mixed forests

tensywność fazy wzrostu i lepszą kondycję roślinności, a tym samym większą ilość biomasy i wzrost udziału gatunków liściastych w lasach.

Pomiary wskaźnika vegetacji dla lasów w latach 1998–2014 przeprowadzono na podstawie danych satelitarnych SPOT VEGETATION. Do pomiarów wykorzystano 581 kompozycji dziesięciodniowych wskaźnika NDVI, które były składane z dziennych obserwacji satelitarnych po maksymalnej wartości wskaźnika zaobserwowanej w danej dekadzie. Taka metoda łączenia dziennych obrazów w kompozycje jest rozwiązaniem problemu częstego występowania zachmurzenia nad obszarem Polski. Kompozycje dekadowe, sygnowane produktem S10, są tworzone i udostępniane bezpłatnie przez Flamandzki Instytut Badań Technologicznych VITO w Belgii.

Wartości wskaźnika vegetacji NDVI dla lasów liściastych i mieszanych zostały uśrednione w granicach ośmiu krain przyrodniczo-leśnych, tj. Krainy Bałtyckiej (I), Krainy Mazursko-Podlaskiej (II), Krainy Wielkopolsko-Pomorskiej (III), Krainy Mazowiecko-Podlaskiej (IV), Krainy Śląskiej (V), Krainy Małopolskiej (VI), Krainy Sudeckiej (VII) i Krainy Karpackiej (VIII). W badaniach ze względu na przeznaczenie maski leśnej do celów monitorowania kondycji zdrowotnej lasów Polski zastosowano podział krain, który uwzględnia czynniki klimatyczne wpływające na vegetację lasów (Zielony, Kliczkowska 2012). Krainy przyrodniczo-leśne są hierarchicznie najwyższymi jednostkami regionalizacji. Granice zostały wyznaczone na podstawie zróżnicowania geologicznego, geomorfologicznego, klimatycznego oraz typów krajobrazów naturalnych. Taki podział uwzględnia również zróżnicowanie w udziale gatunków leśnych i ich przydatności dla gospodarki leśnej. Na potrzeby realizacji badań granice krain zostały zgeneralizowane do skali 1: 20 000 000.

Ocena przydatności nowej maski polegała na wykonaniu pomiarów NDVI zarówno dla obszarów spełniających kryterium 50% udziału powierzchni leśnej w obrębie piksela kilometrowego (maska $\geq 50\%$), jak i dla pozostałych obszarów

leśnych, które ww. kryterium nie spełniały (maska $< 50\%$). Rycina 3 przedstawia rozkład przestrzenny procentowego udziału powierzchni lasów na przykładzie Krainy Karpackiej.

Aby sprawdzić istotność statystyczną różnic pomiarów NDVI 1998–2014 dla dwóch niezależnych masek leśnych $\geq 50\%$ i $< 50\%$ przeprowadzono nieparametryczny test U Manna-Whitneya. Wybór testu nieparametrycznego jest uzasadniony brakiem normalnego rozkładu wskaźnika NDVI dla lasów w okresie vegetacyjnym oraz zestawieniem par obserwacji pomiarów wskaźnika z dwóch niezależnych populacji, obszarów leśnych maskowanych z progiem $\geq 50\%$ i $< 50\%$. Hipoteza zerowa zakłada brak różnic w pomiarach NDVI a tym samym brak wpływu opracowanej maski leśnej na ich jakość. Hipoteza alternatywna zakłada, że różnice wartości wskaźnika vegetacji są istotne statystycznie a zastosowanie nowej maski leśnej wpływa na uzyskanie wyników do monitoringu kondycji zdrowotnej lasów. Ustalono poziom istotności równy 0,05. Jeśli otrzymano wynik $p < 0,05$, to rozkłady różniły się istotnie statystycznie i przyjęto hipotezę alternatywną. Natomiast jeśli otrzymano $p > 0,05$ to nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej.

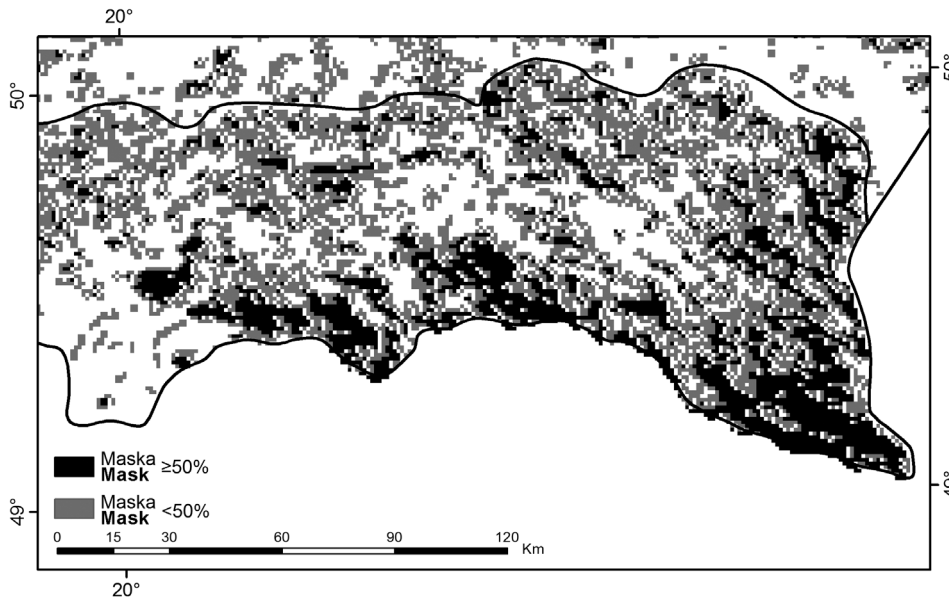
3. Wyniki i dyskusja

Rycina 4 przedstawia mapę przestrzennego rozmieszczenia obszarów liściastych i mieszanych, których udział w powierzchni jednego kilometra kwadratowego był równy lub większy niż 50%. Na mapie zaznaczono również granice ośmiu krain przyrodniczo-leśnych. Kryterium progu 50% pozwoliło zachować pewną reprezentatywność pikseli leśnych przeznaczonych do monitoringu wzrostu i rozwoju lasów. Udziały powierzchni maskowanych lasów liściastych i mieszanych w krainach zestawiono w tabeli 1. Największą powierzchnię badanych lasów odnotowano w Krainie Karpackiej, co stanowiło 27,9% powierzchni krainy. Kolejne na liście były lasy Krainy Sudeckiej i Bałtyckiej, odpowiednio z 16,7% i 13,5% udziałami. W Krainie Mazursko-Podlaskiej

również odnotowano ponad 10% udział powierzchni obszarów leśnych. Najmniej maskowanych lasów rozpoznano w Krainie Wielkopolsko-Pomorskiej, gdzie ich udział stanowił 5,2% powierzchni krainy.

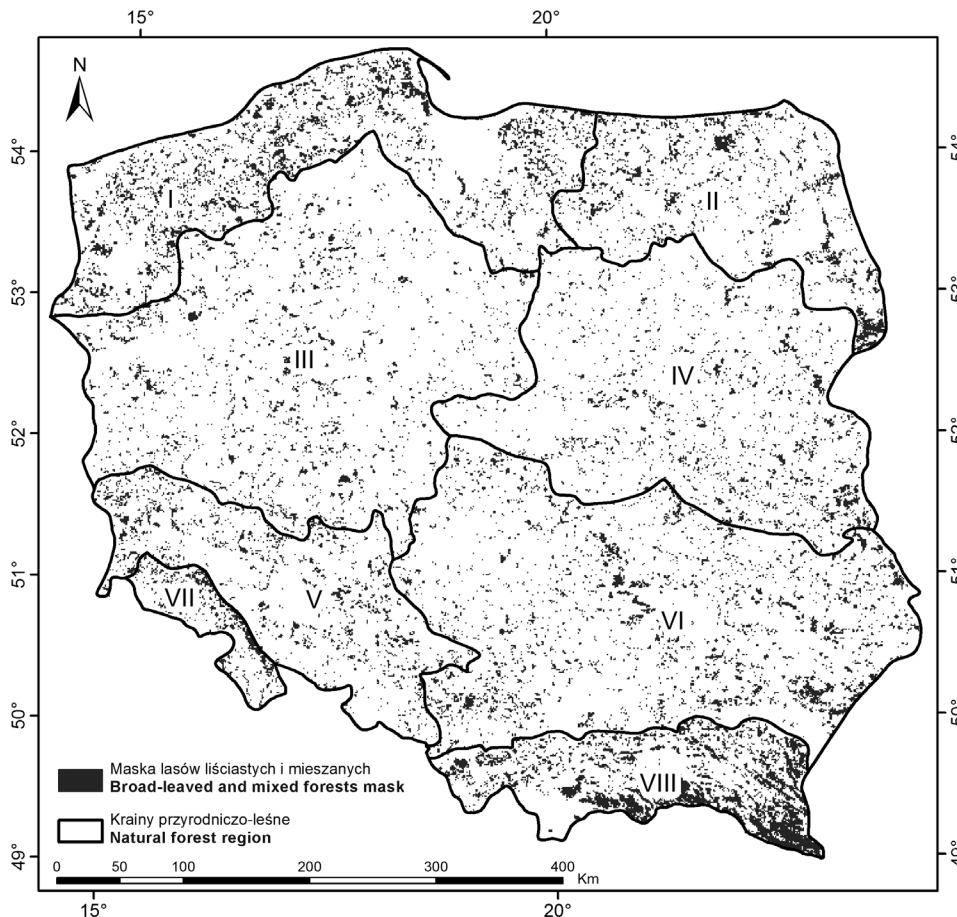
W tabeli 1 zestawiono również procentowe udziały powierzchni lasów liściastych i mieszanych klasyfikowanych

w bazie danych CORINE Land Cover 2012. Najwięcej rozpoznanych lasów liściastych i mieszanych było w Krainie Sudeckiej i Karpackiej, stanowiących odpowiednio 65,7% i 65,9% powierzchni tych krain. Wysoki, ponad 50% udział powierzchni zajmowały lasy w Krainie Bałtyckiej. W pozostałych krainach udział powierzchni lasów mieścił się w granicach 30–50%.



Rycina 3. Maska pikseli kilometrowych z $\geq 50\%$ oraz $< 50\%$ udziałem obszarów lasów liściastych i mieszanych w Krainie Karpackiej

Figure 3. Mask of one kilometer pixels with $\geq 50\%$ and $< 50\%$ broad-leaved and mixed forests in Carpathian Natural-Forest Region (CNFR)



Rycina 4. Maska $\geq 50\%$ lasów liściastych i mieszanych na tle krain przyrodniczo-leśnych

Figure 4. Broad-leaved and mixed forests mask at $\geq 50\%$ overlaid natural-forest regions

Tabela 1. Udział lasów liściastych i mieszanych wg CLC2012 i maski $\geq 50\%$ w odniesieniu do powierzchni krain przyrodniczo-leśnych
 Table 1. CLC2012 and $\geq 50\%$ masked broad-leaved and mixed forests share in Natural-Forest Regions areas

Kraina przyrodniczo-leśna Natural-Forest Region (NFR)	Powierzchnia krainy przyrodniczo-leśnej NFR Area [km ²]	Udział wszystkich lasów liściastych i mieszanych wg CLC2012 CLC2012 broad-leaved and mixed forests share [%]	Udział maskowanych $\geq 50\%$ lasów liściastych i mieszanych Masked broad-leaved and mixed forests share [%]
Bałtycka / Baltic	40193	51,3	13,5
Mazursko-Podlaska / Masurian-Podlasie	27660	41,6	10,7
Wielkopolsko-Pomorska / Greater Poland-Pomerania	71439	30,8	5,2
Mazowiecko-Podlaska / Mazovia-Podlasie	53162	37,4	6,0
Śląska / Silesian	27125	43,7	8,9
Małopolska / Lesser Poland	68520	39,0	8,2
Sudecka / Sudetian	5070	65,7	16,7
Karpacka / Carpathian	19342	65,9	27,9

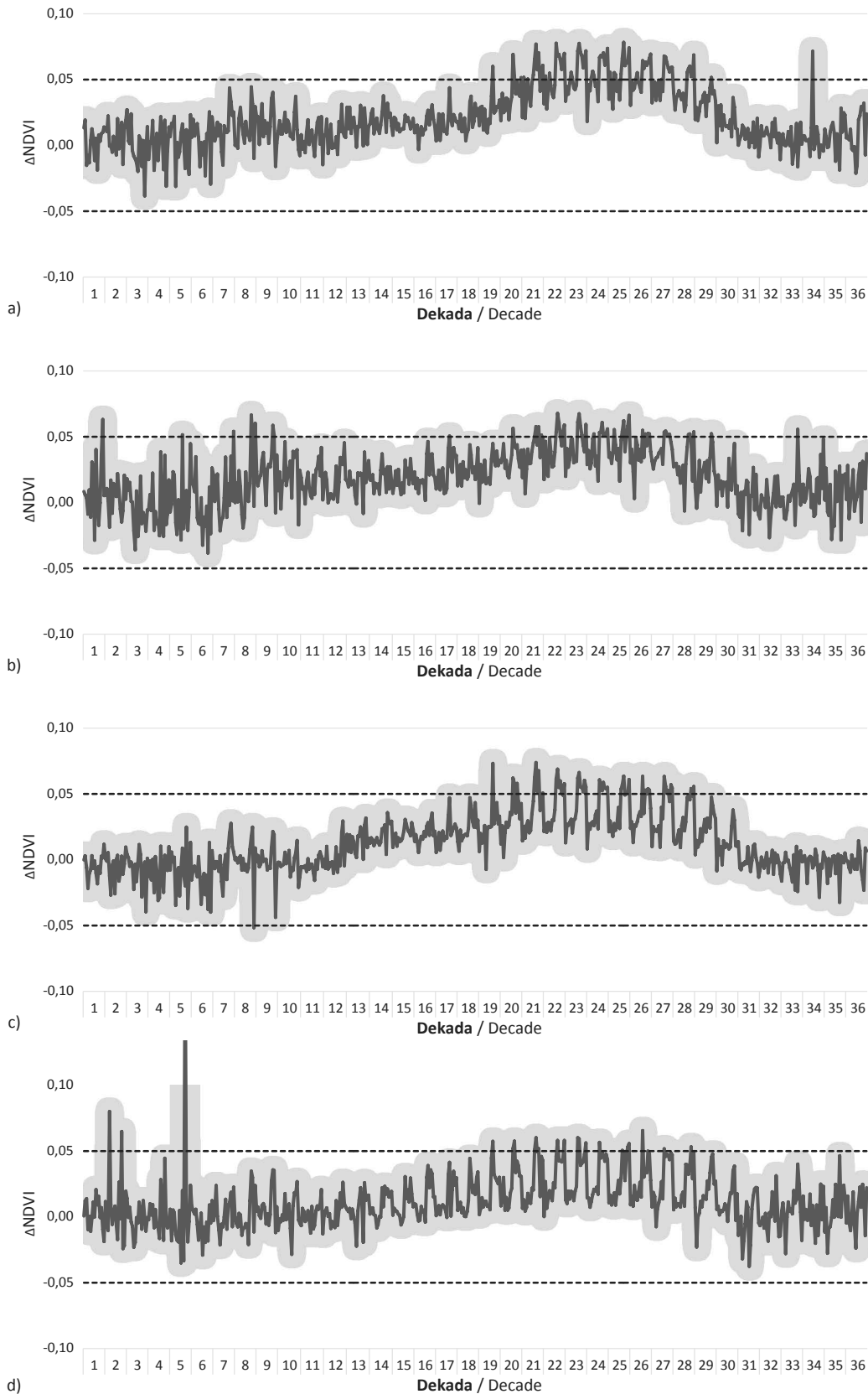
Zestawienie procentowego udziału lasów liściastych i mieszanych sklasyfikowanych według CLC2012 oraz maskowanych $\geq 50\%$ ma na celu wykazanie ilości informacji o lasach utraconej na rzecz tworzenia nowej maski leśnej dla potrzeb monitorowania kondycji zdrowotnej lasów. Największą, aż 49% (z 65,7% do 16,7%), stratę informacji o obszarach leśnych odnotowano w Krainie Sudeckiej. Taki wynik wskazuje na to, że praktycznie w co drugim analizowanym pikselu kilometrowym procentowy udział lasów liściastych i mieszanych nie przekraczał wymaganego kryterium 50. Może to wynikać z występowania licznych niewielkich obszarów leśnych z rozproszonymi stanowiskami drzew, które zachowały się po intensywnej działalności przemysłu oraz gradacji szkodników owadzych (Bochenek et al. 1997). Kolejne duże straty informacji o obszarach leśnych zaobserwowano w Krainie Bałtyckiej 37,8% (z 51,3% do 13,5%) oraz Karpackiej 38,0% (z 65,9% do 27,9%). W pozostałych krainach liczebność obszarów leśnych zmalała do 25–35%.

Reasumując, średnio około jedna trzecia obszarów lasów liściastych i mieszanych rozpoznanych w bazie CLC2012 zostało odrzuconych ze względu na niespełnione kryterium progu 50% do wyznaczenia nowej maski leśnej. Powierzchnie kilometrowe, w obrębie których lasy nie są dominującą formą pokrycia terenu, zostały odrzucone z uwagi na: 1) potrzebę zachowania reprezentatywnych pikseli leśnych oraz 2) na otrzymanie jak najbardziej wiarygodnych pomiarów wskaźnika i zminimalizowanie zakłóceń przez inne formy pokrycia terenu, np. tereny rolnicze, zabudowy, które mogą występować w sąsiedztwie lasów. Aby odpowiedzieć na pytanie, na ile odrzucone obszary leśne mogą wpływać na jakość pomiarów wskaźnika NDVI, wykonano analizę porównawczą wskaźnika odczytanego na podstawie szeregów

czasowych w latach 1998–2014. Ryciny 5 i 6 przedstawiają różnice pomiarów wskaźnika wegetacji NDVI, odczytane na podstawie wieloletnich obserwacji satelitarnych SPOT-VEGETATION dla maski $\geq 50\%$ lasów liściastych i mieszanych oraz maski $< 50\%$ tychże lasów. Wyniki, w kontekście monitorowania wegetacji, posortowano według dekad roku.

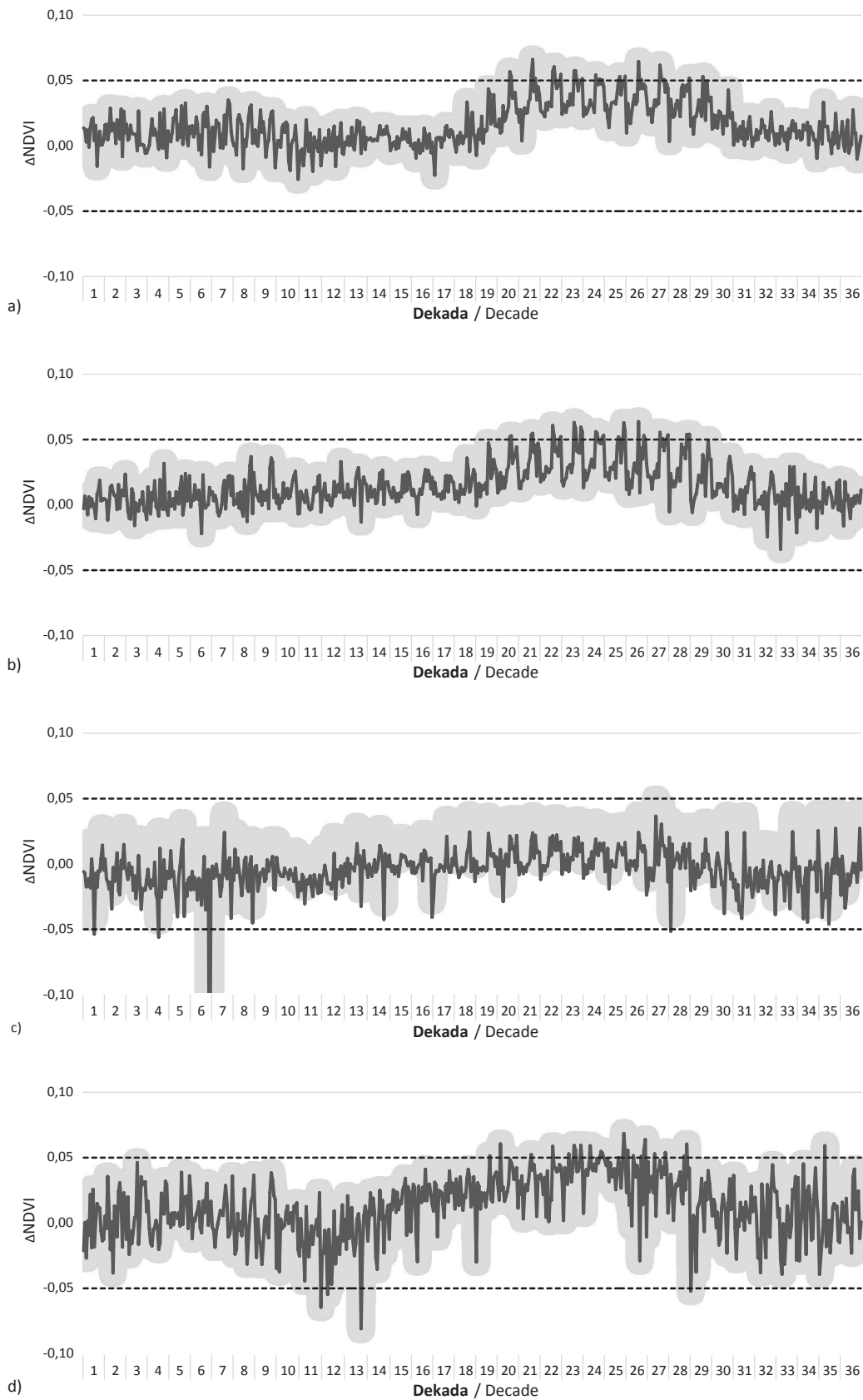
Do oceny wstępnych wyników porównania NDVI przyjęto poziom ufności 95% przy progu odrzucenia błędów pomiarów na poziomie 0,05. Ponieważ skala wartości NDVI jest od -1,0 do 1,0, a tym samym skala różnic tego wskaźnika to progi błędów pomiarowych różnic NDVI są również na poziomie -0,05 i 0,05. Na rycinach 5 i 6 nakreślono linie progu odrzucenia, gdzie różnice pomiarów NDVI większe niż 0,05 oraz mniejsze niż -0,05 wskazują na istotną zmianę wartości odczytów wskaźnika wegetacji. Różnice NDVI większe niż 0,05 wskazują na występowanie wyższych wartości wskaźnika wegetacji na podstawie maski $\geq 50\%$. Z kolei pomiary, w których odnotowano niższą niż -0,05 NDVI, świadczą o wyższych wartościach wskaźnika wegetacji z maski $< 50\%$.

Pomiary wskaźnika NDVI wykonano dla 581 kompozycji dekadowych (obserwacji) SPOT-VEGETATION, począwszy od pierwszej dekady kwietnia 1998 do drugiej dekady maja 2014 włącznie. Najczęstsze różnice indeksu wegetacji odnotowano w Krainie Bałtyckiej, gdzie na podane 581 obserwacji, aż w 76 terminach odnotowano przekroczenie błędów pomiarowych 0,05 NDVI (ryc. 5a). Stanowi to 13% wszystkich pomiarów wskaźnika wegetacji wykonanych w latach 1998–2014. Kolejne miejsca zajmują krainy Mazursko-Podlaska i Wielkopolsko-Pomorska z zarejestrowanymi odpowiednio 51 i 48 przypadkami występowania znaczących różnic NDVI (ryc. 5b, 5c). Z kolei na przeciwnym biegunie znalazły się wyniki pomiarów dla Krainy Sudeckiej. Tam



Rycina 5. Różnice wartości wskaźnika wegetacji NDVI, odczytanych na podstawie danych satelitarnych SPOT-VEGETATION w latach 1998–2014 dla maski ≥ 50 i $< 50\%$ obszarów leśnych krain: a) Bałtyckiej, b) Mazursko-Podlaskiej, c) Wielkopolsko-Pomorskiej, d) Mazowiecko-Podlaskiej

Figure 5. NDVI differences calculated from satellite SPOT-VEGETATION 1998-2014 data for ≥ 50 and $< 50\%$ forest mask in Natural-Forest Region: a) Baltic, b) Masurian-Podlasie, c) Greater Poland-Pomerania, d) Mazovia-Podlasie



Rycina 6. Różnice wartości wskaźnika wegetacji NDVI, odczytanych na podstawie danych satelitarnych SPOT-VEGETATION, w latach 1998–2014 dla maski ≥ 50 i $< 50\%$ obszarów leśnych krain: a) Śląskiej, b) Małopolskiej, c) Sudeckiej, d) Karpackiej
 Figure 6. NDVI differences calculated from satellite SPOT-VEGETATION 1998-2014 data for ≥ 50 and $< 50\%$ forest mask in Natural-Forest Region: a) Silesian, b) Lesser Poland, c) Sudetian, d) Carpathian

odnotowano tylko jeden przypadek występowania przekroczonej różnicy 0,05 NDVI obszarów lasów liściastych i mieszanych z maski $\geq 50\%$ i $< 50\%$.

Wyniki dla Krainy Sudeckiej wskazują na brak wpływu nowej maski na jakość wykonywanych pomiarów wskaźnika. Warto wspomnieć, że to właśnie dla wspomnianej krainy odrzucono najwięcej obszarów leśnych rozpoznanych w pikselach kilometrowych niespełniających kryterium 50%. Wpływ na taki stan może mieć występowanie lasów ogółem (liściastych, iglastych i mieszanych) jako dominującej formy pokrycia terenu w tej krainie. Dla pozostałych czterech krain Mazowiecko-Podlaskiej, Śląskiej, Małopolskiej i Karpackiej wyniki wykazują wpływ nowej maski leśnej na jakość pomiarów NDVI na poziomie 4% wszystkich obserwacji SPOT-VEGETATION w latach 1998–2014.

Następnie sprawdzono, jak często różnice pomiarów NDVI występują w okresie wzrostu i rozwoju drzewostanów oraz czy mogą mieć one istotne znaczenie dla potrzeb monitorowania vegetacji lasów. W tym celu na rycinach 5 i 6 pomiary NDVI posortowano w dekadach. W przypadku Krainy Bałtyckiej, z najczęściej odnotowanymi różnicami pomiarów, aż 99% z nich zaobserwowano w dekadach 18–30 odpowiadających okresowi czerwiec – październik (rycina 5a). Jest to bardzo ważna informacja podkreślająca istotne znaczenie przeprowadzenia pomiarów vegetacji lasów. Ryciny 5c dla Krainy Wielkopolsko-Pomorskiej, 6a dla Krainy Śląskiej i 6b dla Krainy Małopolskiej również potwierdzają występowanie znaczących różnic pomiarów NDVI tylko w okresie fenologii roślin od 18 do 30 dekady. Z kolei ryciny 5b i 5d wykazują przypadki występowania różnic wartości indeksu w okresie zimowym oraz letnio-jesiennym. Odchylenia pomiarów większe niż 0,05, zaobserwowane w okresie zimowym, mogą wskazywać na niedoskonałości maskowania pokrywy śniegowej. Te różnice nie mają istotnego wpływu na badanie vegetacji lasów w okresie wiosna – jesień.

Na zakończenie analizy przeprowadzono testy nieparametryczne U Manna-Whitneya. Statystyki pomiarów dla krain są następujące: a) Bałtycka $p=0,021$, b) Mazursko-Podlaska $p=0,038$, c) Wielkopolsko-Pomorska $p=0,095$, d) Mazowiecko-Podlaska $p=0,221$, e) Śląska $p=0,072$, f) Małopolska $p=0,105$, g) Sudecka $p=0,389$ oraz h) Karpacka $p=0,083$. Wyniki testu potwierdzają, że dla pomiarów lasów z maską $\geq 50\%$ i $< 50\%$ w krainach północnej Polski, tj. Bałtyckiej i Mazursko-Podlaskiej, otrzymano różnice wartości NDVI istotne statystycznie. Największe ryzyko odrzucenia hipotezy zerowej, zakładającej brak różnic, stwierdzono dla Krainy Sudeckiej (38,87%), Mazowiecko-Podlaskiej (22,12%) i Małopolskiej (10,45%).

Podsumowując dyskusję, nowa maska leśna $\geq 50\%$ miała wpływ na otrzymanie wyższych o ponad 0,05 NDVI pomiarów w okresie vegetacyjnym lasów w siedmiu krainach przyrodniczo-leśnych: Bałtyckiej, Mazursko-Podlaskiej, Wielkopolsko-Pomorskiej, Mazowiecko-Podlaskiej, Śląskiej, Małopolskiej i Karpackiej. Ze względu na otrzymanie relatywnie wiarygodnych wartości NDVI wyniki tych pomiarów mogą implikować słuszność stosowania maski. Opracowana

maska leśna $\geq 50\%$ częściowo eliminuje problem błędnego pomiaru wskaźnika obszarów „czysto leśnych” i niezakłóconych występowaniem innej formy pokrycia terenu. Niemniej do kompleksowej analizy wskazane byłoby sprawdzenie, jakie klasy poza lasami występowały w pikselach oraz zbadanie otoczenia wokół każdego piksela tworzącego strefy buforowe o szerokości ponad pół piksela kilometrowego, na przykład 600 metrów. Doświadczenia z prac nad maską rolniczą dla potrzeb prognozowania plonów (Turlej et al. 2013) wykazały brak jednoznacznego, wyraźnego i uniwersalnego kryterium do prognozowania maski i strefy buforowej. Z kolei przyjęty w założeniach niniejszej pracy autorytatywny próg 50% jest stosowany w programach środowiskowych i produktach do klasyfikowania form pokrycia terenu, takich jak CORINE Land Cover, czy GLOBCOVER 2009.

Statystyki testu U Manna-Whitneya wykazują, że spośród wszystkich ośmiu badanych krain, jedynie dla dwóch Bałtyckiej i Mazursko-Podlaskiej otrzymano różnice istotne statystycznie. Są to krainy, gdzie zaobserwowano najczęstsze różnice pomiarów NDVI w latach 1998–2014, odpowiednio 76 i 51 na 581 obserwacji. Dla pozostałych sześciu krain stwierdzono brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, a ryzyko odrzucenia prawdziwej hipotezy jest na poziomie od 7,19% dla Krainy Śląskiej do 38,87% dla Krainy Sudeckiej.

Szczególny przypadek stanowią lasy Krainy Sudeckiej, gdzie odnotowano absolutny brak wpływu nowej maski na jakość odczytów (jedna błędna obserwacja na 581 wszystkich możliwych). Warto zwrócić uwagę, że pod względem powierzchni jest to najmniejszy region przyrodniczo-leśniczy ze wszystkich ośmiu badanych z krajobrazem górskim zdominowanym przez lasy iglaste piętra górnego i mieszane piętra dolnego. W siatce pikseli kilometrowych dominują lasy iglaste, dla których pomiary wskaźnika NDVI są bardzo zbliżone do odczytów dla lasów liściastych i mieszanych lub identyczne z nimi. Stąd też próg maski 50% mógł nie mieć żadnego wpływu na jakość pomiarów wskaźnika vegetacji.

Reasumując należy przeprowadzić dodatkową ocenę pomiarów wskaźnika vegetacji NDVI przez sprawdzenie korelacji z danymi meteorologicznymi lub satelitarnymi innego pochodzenia. Jako uzupełnienie weryfikacji wyników badań może być również zestawienie pomiarów wskaźnika na podstawie zdjęć nisko- i wysokorozdzielczych, np. SPOT-VEGETATION i Landsat. W tym przypadku, ze względu na specyfikę rejestracji zobrażeń wysokorozdzielczych, badanie może być przeprowadzone jedynie dla wybranych poligonów testowych w określonym przedziale czasowym.

4. Wnioski

1. Opracowana maska leśna $\geq 50\%$ wpłynęła na wyniki pomiarów wskaźnika vegetacji dla lasów w siedmiu regionach przyrodniczo-leśnych. Profile wskaźnika vegetacji dla lasów Krainy Sudeckiej wykazały brak wpływu stosowania nowej maski leśnej na wyniki pomiarów.

2. 99% różnic NDVI większych niż 0,05 odnotowano w okresie wzrostu i rozwoju lasów od 18 do 30 dekady.

Wskazuje to na potrzebę uwzględnienia opracowanej maski do monitoringu kondycji zdrowotnej środowiska leśnego.

3. Wyniki pomiarów NDVI z użyciem nowej maski leśnej $\geq 50\%$ oraz maski $< 50\%$ wykazały różnice istotne statystycznie dla Krainy Bałtyckiej i Krainy Mazursko-Podlaskiej. Stanowiły one odpowiednio 13,1% i 8,8% wszystkich obserwacji w latach 1998–2014. Ryzyko odrzucenia hipotezy zerowej, zakładającej zgodność pomiarów, jest niższe niż 2,14% i 3,80%.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały wykonane w ramach Studiów Doktoranckich na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Autor składa serdeczne podziękowania pracownikom Centrum Teledetekcji Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie za pomoc i cenne wskazówki. Badania sfinansowano ze środków własnych.

Literatura

- Bartold M. 2012. Monitoring of forest damages in Poland and Slovakia based on Terra. MODIS satellite images. *Geoinformation Issues* 4(1): 23–31.
- Bochenek Z., Ciołkosz A., Iracka M. 1997. Zmiany stanu lasów w Sudetach Zachodnich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 44(95): 73–94.
- Bychawski W. 1988. Geometryzacja zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* 35(80): 33–46.
- Ciołkosz A., Bielecka, E. 2005. Pokrycie terenu w Polsce – Baza danych CORINE Land Cover. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Inspektorat Ochrony Środowiska, 1–76.
- CORINE land cover nomenclature illustrated guide, <http://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/Nomenclature.pdf> [10.10.2015].
- Garamvolgyi A., Hufnagel L., 2013, Climate Change Induced Vegetation Shifts in the Palearctic Region. *Applied Ecology and Environmental Research* 11(1): 79–122.
- GLOBCOVER 2009 Product Description Manual, http://due.esrin.esa.int/files/p68/GLOBCOVER2009_Product_Description_Manual_1.0.pdf [9.09.2015].
- Hościło A., Tomaszewska M. 2015. CORINE Land Cover 2012-4th CLC inventory completed in Poland. *Geoinformation Issues* 6(1): 49–58.
- Karlsen S.R., Elvebakk A., Hogda K.A., Grydeland T. 2014. Spatial and Temporal Variability in the Onset of the Growing Season on Svalbard, Arctic Norway – Measured by MODIS-NDVI Satellite Data. *Remote Sensing* 6: 8088–8106. DOI:10.3390/rs6098088.
- Prabakaran C., Singh C.P., Panigrahy S., Parihar J.S. 2013. Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data. *Current Science* 105(6): 795–802.
- Reddy C.S., Jha C.S., Dadhwal V.K., Harikrishna P., Pasha S.V., Satish K.V., Dutta K., Saranya K.R.L., Rakesh F., Rajashekar G., Diwakar P.G. 2016. Quantification and monitoring of deforestation in India over eight decades (1930–2013). *Biodiversity and Conservation* 25: 93–116. DOI: 10.1007/s10531-015-1033-2.
- State of Europe's Forests 2015, <http://www.foresteurope.org/full-soef2015> [9.09.2015].
- Tucker C.J. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8(2): 127–150.
- Turlej K., Bojanowski J., Bartold M. 2013. Maska obszarów rolniczych dostosowana do monitoringu wzrostu roślin uprawnych w Polsce przy użyciu szeregów czasowych NOAA-AVHRR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 25: 233–242.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa, 356 s. ISBN 978-83-61633-62-4.

Development of forest cover mask to monitor the health condition of forests in Poland using long-term satellite observations

Maciej Bartold 

University of Warsaw, Faculty of Geography and Regional Studies, ul. Krakowskie Przedmieście 26/28, 00–927 Warszawa, Poland
Tel. +48 22 5520654, email: maksb1983@gmail.com

Abstract. The work presented here aims at developing cover mask for monitoring forest health in Poland using remote sensing data. The main objective was to assess the impact of using the mask on forest condition monitoring combined with vegetation indices obtained from long-term satellite data. In this study, a new mask developed from the CORINE Land Cover 2012 (CLC2012) database is presented and its one-kilometer pixel size matched to low-resolution data derived from SPOT VEGETATION satellite registrations. For vegetation mapping, only pixels with a cover $\geq 50\%$ of broad-leaved and mixed forests defined by CLC2012 were taken into account. The masked pixels were used to evaluate spatial variability in eight Natural-Forest Regions (NFRs). The largest coverages by masked forests were obtained in Sudetian (65.7%), Carpathian (65.9%) and Baltic (51.3%) regions. For other forest regions the coverage was observed to be around 30–50%.

Time-series of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) comprising SPOT VEGETATION images from 1998 until 2014 were computed and cross-comparison analyses on $\geq 50\%$ and $< 50\%$ forest cover masks brought up frequent differences at a level higher than 0.05 NDVI in seven out of eight NFRs. An exception is the Sudetian region, where the data was highly consistent. Furthermore, the Mann-Whitney U non-parametric test revealed statistically significant differences in two regions: Baltic and Masurian-Podlasie NFR. The comparative analysis of NDVI confirmed that there is a need for additional investigation of the quality of newly developed forest mask combined with vegetation and meteorological data.

Keywords: CORINE Land Cover 2012, forest condition, NDVI, satellite images, vegetation mapping

1. Introduction

Information systems on the condition of forests and tree stands are a good and essential source of knowledge for central government administration, local governments, forestry services and society. The systems developed from research projects, such as the Data Bank on Forests and the National Forest Inventory, are a response to the growing demand for forest monitoring in Poland. Information is collected on the basis of continuous or periodic observations and measurements taken at sample sites and permanent observation plots. Annual reports prepared by the Forest Research Institute, commissioned by the Directorate General of the State Forests National Forest Holding, are comprehensive sources of data about the health of the forests.

A wide range of satellite products can support forest monitoring programmes and systems. Satellites placed on circumpolar orbits are able to conduct regular, daily observations of the earth's surface. The mission of the American NOAA meteorological satellites has continued since the 1970s. The environmental Terra and Aqua satellites, developed under NASA, have been orbiting continuously since 1999 and 2000 respectively. The European program of environmental satellites, such as SPOT VEGETATION, was implemented in 1998 to 2014 and continued by Proba-V since 2013.

Satellites are classified as high, medium and low resolution depending upon the ground resolution of the pixel, i.e. the actual size of the smallest unit of an image. The above-mentioned satellites belong to the category of low-re-

Submitted: 10.11.2015, reviewed: 7.02.2016, accepted after revision: 25.02.2016.

solution satellites. AVHRR and MODIS sensors, mounted on the NOAA meteorological satellites and Terra and Aqua environmental satellites, scan the surface of the Earth with a spatial resolution of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ and $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$. The newest environmental Proba-V satellite views an area at a minimum spatial resolution of $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. The sensors of these satellites capture the surface within the visible light range, as well as in the near, mid- and far infrared.

As a result of access to long-term observations from different satellites, many scientific papers have appeared on monitoring the forest cover and the health condition of the forest environment. Analysing the percentage of forests on the surface of each pixel of satellite images taken over a long period of time has enabled the development of a series of forest maps to determine the rate of deforestation in the Amazon (D. Lu et al. 2011) and India (C.S. Reddy et al. 2015). These studies have focused on the methodological aspects of developing a series of forest masks, to enable forests to be distinguished from other forms of land use and to monitor the variability of coverage of the forest environment over time.

Ready and freely available thematic layers exist, presenting the percentage of forest cover in the area of a pixel of a satellite image. These are the high-resolution layers (HRL) developed for Europe's forests in 2012, with a resolution of 100 meters, available at the Copernicus Land Monitoring Services website <http://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/>. Since 2000, the distribution centre of NASA's satellite data also offers a global product called Vegetation Continuous Fields (VCF), with a resolution of 250 meters, which was developed on the basis of images recorded by MODIS sensors (website: https://lpdaac.usgs.gov/database_discovery/modis/modis_products_table/mod44b). However, the HRL and VCF products have certain temporal and spatial limitations. HRL databases provide information for only one year and do not cover the entire territory of Poland, whereas VCF databases include the last 15 years, but do not have information about the types of forests.

The wide range of low-resolution, long-term data and their cost-free, widespread availability enable complex analyses to be made of the condition of vegetation. Even the limited spatial resolution allows the environment to be monitored at the national as well as the regional level. However, the low spatial resolution databases, most commonly offered at $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ resolution, and the complexity of the geometric correction of satellite images (Bychawski W. 1988) may result in errors in the accurate identification of forested areas, which may be perceived as extensions of abutting farmland or built-up areas. And this could lead to errors in measuring the status and condition of forests.

Studies are conducted on the growth and development of forests based on many years of satellite observations. Veg-

etation indices, derived from satellite images, allow us to determine when broad-leaved forests start turning green or shed their leaves in winter. The methods based on these indices allow us to evaluate the state of growth and development of forests. Therefore, in order to monitor the health condition of plants using satellite remote sensing, an invaluable role is played by the thematic layers of forest areas, which serve as a mask for narrowing the research only to forested areas. For example, in studies of the temporal and spatial variability of vegetation in Svalbard, test polygons were prepared with precise information about plant species (Karlsen S. et al. 2014). In turn, the mapping parameters that describe the phenology of forests in India used digital resources on forests to distinguish it from other vegetation complexes (Prabakaran C. et al. 2013). The widely available digital database of land cover, the CORINE Land Cover 2006 inventory, was used in testing methods to detect deforestation in Poland between 2000 and 2006 (M. Bartold 2013).

Reports on the state of forests (State of Europe's Forests 2015) and in publications on changes in the phenology of plants (Garamvolgyi A., 2013) emphasise the particular role of monitoring the growth and development of forests in the context of climate change. Therefore, in this article, we propose the use of masks of forest areas to monitor their health condition. The aim of this study is to develop a layer of representative pixels of forest areas obtained from the CORINE Land Cover 2012 inventory. The method of selecting pixels is based on an analysis of the percentage of forest area in a given pixel. The thematic layer was then validated by analyzing vegetation index time-series data over forest areas derived from low-resolution satellite data. Temperate zone broad-leaved forests are characterised by a distinct seasonality, and thus are a good test area to analyze the variation of vegetation indices for monitoring the condition of tree stands from satellites.

2. Methodology

The study was conducted in three stages. Figure 1 presents the schematic development and testing of broad-leaved forest masks. In the first stage of the work, the borders of forested areas occurring in Poland were determined using the CORINE Land Cover (CLC) database. As part of the CORINE program, areas with a minimum of 25 ha and a width of at least 100 m were mapped on the basis of high-resolution satellite data (Ciolkosz, Bielecka 2005). The current, fourth edition of the CLC2012 was established within the framework of the European Copernicus GIO Land Monitoring program (Hościło, Tomaszewska 2015). Because the purpose of the mask is to monitor the health condition of forests from the CLC2012 semi-natural and forest ecosystem clas-

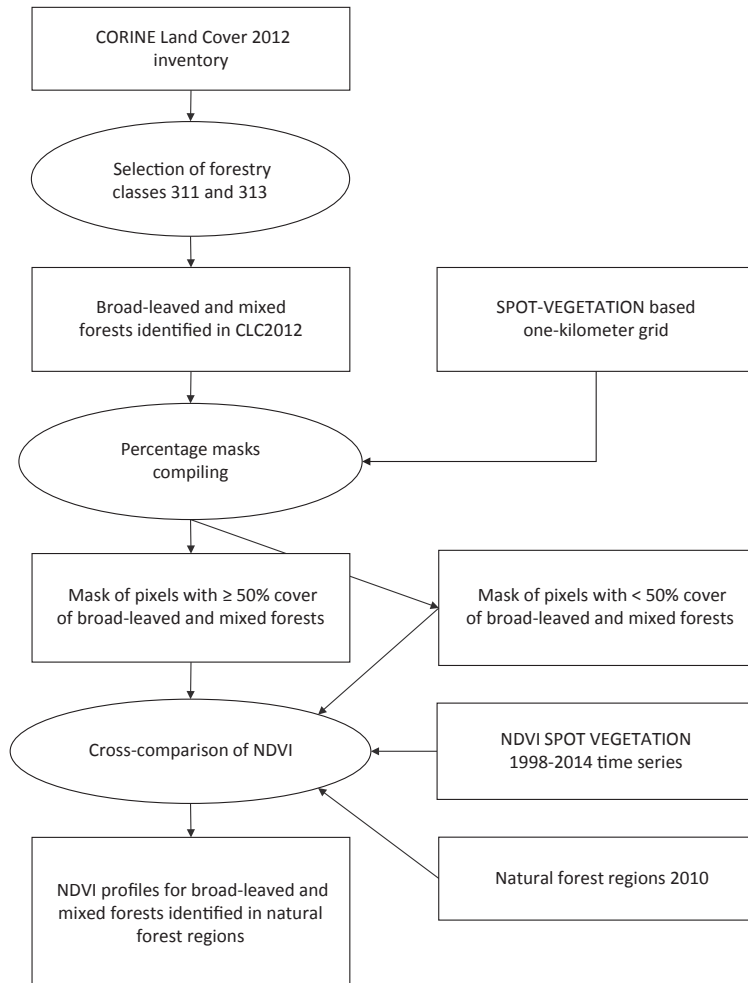


Figure 1. Flowchart of steps to create and test broad-leaved and mixed forests mask

ses, only those areas covered by broad-leaved forests were selected. This condition is fulfilled by classes 311 and 313, defined by the CORINE nomenclature as broad-leaved and mixed forests, with no breakdown by age and species composition of trees. Classes 311 and 313 include areas of forest with over 30% tree cover or a density of 500 trees per hectare. A detailed definition of class 311 includes forest areas in which a minimum of 75% is dominated by broad-leaved forests. Class 313 describes areas of mixed forests, in which the percentage of broad-leaved or coniferous forests does not exceed 25 % (CORINE Land Cover nomenclature illustrated guide). As a result of the first phase of the work, we obtained a vectored primary thematic layer of forest areas as of 2012.

Next, an analysis of the percentage of forest area on the surface of a given pixel was conducted (Fig. 2). For this purpose, a grid of 1 km squares was made, corresponding to the pixel grid of SPOT VEGETATION satellite images. We adopted a criterion threshold of 50% of the area occupied

by forest within a pixel. This stage of the work was done to minimise errors in measuring the condition of the forest that may arise as a result of the presence of several land cover classes within a single pixel.

This methodology has already been verified during the development of the thematic layer of agricultural land used in forecasting yields based on NOAA AVHRR images (Turlej et al. 2013). The authors of this work compromised between obtaining an optimal number of pixels and preserving their agricultural representativeness. They analysed the percentage of CORINE Land Cover 2006 agricultural classes in the pixel areas of NOAA-AVHRR as well as in the pixel areas of 600 m wide buffer zones. Studies on an advanced agricultural mask showed a slight improvement in the growth index readings for monitoring crops in relation to the index readings using the standard mask threshold of 50%. The 50% criterion is also used in the environmental CORINE programs and GLOBCOVER 2009 products to distinguish dominant forms of land cover in the area of a

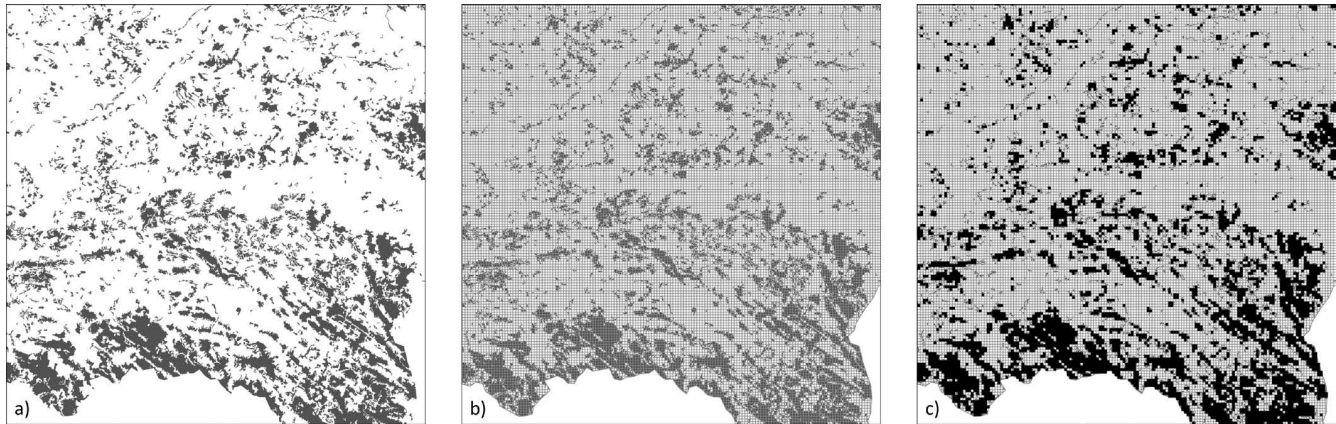


Figure 2. Methodology of producing forests mask: a) broad-leaved and mixed forests in CORINE Land Cover 2012 database, b) SPOT-VEGETATION 1 kilometer grid c) pixels with 50% threshold of occurred broad-leaved and mixed forests

given pixel (CORINE Land Cover nomenclature installation guide, GLOBCOVER 2009 Product Description Manual). Therefore, this study also retained a 50% threshold criterion in developing masks of forest areas.

The third stage of the work involved verifying the impact of applying the new mask of forest areas on the measurement quality of the normalised difference vegetation index (NDVI) calculated by using many years of satellite observations. This index, introduced in the 1970s, is widely recognised as one of the most universal measures of the health and resilience of vegetation (CJ Tucker 1979). It is calculated by using the spectral characteristics of chlorophyll in plants contained in the red range of the electromagnetic spectrum and cellular structures in the near infrared. The range of NDVI values is from -1.0 to 1.0 , wherein the closer values to 1 indicate a higher intensity of the growth phase and better condition of the plants, and thus a higher amount of biomass and greater percentage of broad-leaved species in the forests.

The measurements of the vegetation index for forests in the period 1998–2014 was based on SPOT VEGETATION satellite data. A total of 581 NDVI 10-day temporal composites were used for the measurements, which consisted of daily satellite observations after the maximum value of the index observed in a given 10-day period. This method of combining the daily images in a composite solves the problem of the frequent cloud cover over Poland. 10-day composites, designated as a S10 product, are produced and made available free of charge by the Flemish Institute for Technological Research (VITO) in Belgium.

The NDVI values of broad-leaved and mixed forests were averaged within eight natural-forest regions, i.e. the Baltic region (I), Masurian-Podlasie region (II), Greater Poland-Pomerania region (III), Mazovia-Podlasie region (IV), Silesian region (V), Lesser Poland region (VI), Sudeten region (VII) and the Carpathian region (VIII). Because the forest masks are

to be used to monitor the health condition of forests in Poland, we divided the regions in this study to take into account the climatic factors affecting forest growth. The spatial division of the regions was developed by the Faculty of Forestry at the Warsaw University of Life Sciences – SGGW as part of the work on regionalising natural-forest areas in 2010 (R. Green, Kliczkowska A. 2012). Natural-forest regions are hierarchically the highest units of regionalisation. The boundaries were determined on the basis of differences in geology, geomorphology, climate and types of natural landscapes. Such a division also takes into account the variation in the percentage of forest species and their suitability for forest management. For the purposes of this study, the regional boundaries were generalised to a scale of $1:20,000,000$.

The assessment of the usefulness of the new mask was based on NDVI measurements performed for both the areas that met the 50% criterion of forest within the 1 km pixel ($\geq 50\%$ mask) and for the remaining forest areas, which did not meet this criterion ($< 50\%$ mask). Figure 3 shows the spatial distribution of the percentage of forest area using the example of the Carpathian region.

To determine the statistical significance of differences in the 1998–2014 NDVI measurements for the two separate masks of $\geq 50\%$ and $< 50\%$ forest area, we used the non-parametric Mann–Whitney U test. Selecting the non-parametric test is justified by the lack of a normal distribution of the NDVI index for forests during the growing season and the juxtaposition of pairs of observed index measurements from two independent populations of forest areas masked with the threshold of $\geq 50\%$ and $< 50\%$. The null hypothesis assumes no difference in the NDVI measurements and thus no impact of the developed forest mask on their quality. The alternative hypothesis assumes that differences in the vegetation index are statistically significant and the use of a new

forest mask influences the results obtained when monitoring the health condition of forests. The level of significance was established at 0.05. If a test result of $p < 0.05$ was obtained, it

was assumed that the distributions vary significantly and the alternative hypothesis was adopted. However, if the result was $p > 0.05$, there was no basis to reject the null hypothesis.

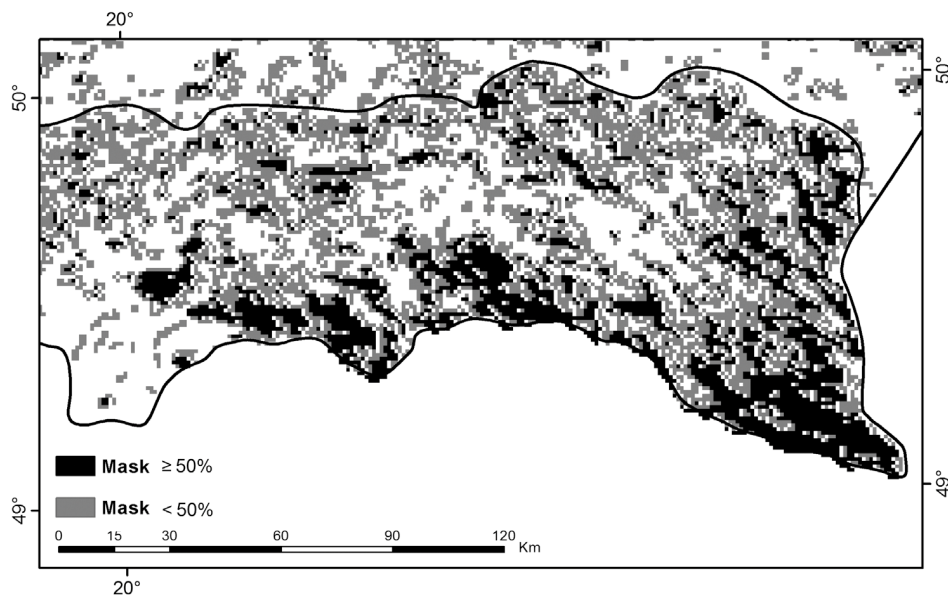


Figure 3. Mask of one kilometer pixels with ≥ 50 and $< 50\%$ broad-leaved and mixed forests in Carpathian Natural-Forest Region (CNFR)

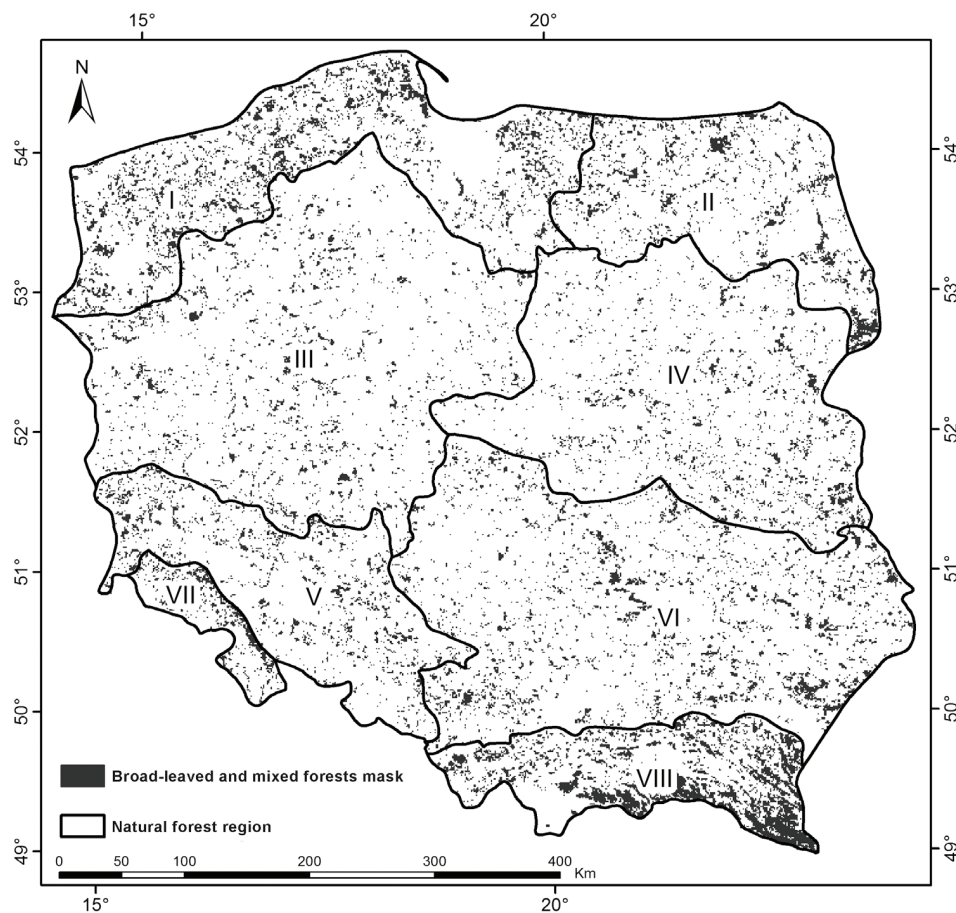


Figure 4. Broad-leaved and mixed forests mask at $\geq 50\%$ overlaid natural-forest regions

Table 1. CLC2012 and $\geq 50\%$ masked broad-leaved and mixed forests share in Natural-Forest Regions areas

Natural-Forest Region (NFR)	NFR Area [km ²]	CLC2012 broad-leaved and mixed forests share [%]	Masked broad-leaved and mixed forests share [%]
Baltic	40193	51.3	13.5
Masurian-Podlasie	27660	41.6	10.7
Greater Poland-Pomerania	71439	30.8	5.2
Mazovia-Podlasie	53162	37.4	6.0
Silesian	27125	43.7	8.9
Lesser Poland	68520	39.0	8.2
Sudetian	5070	65.7	16.7
Carpathian	19342	65.9	27.9

3. Results and discussion

Figure 4 shows a map of the spatial arrangement of broad-leaved and mixed forest areas, whose percentage in 1 km² is equal to or greater than 50%. The map also shows the boundaries of the eight natural-forest regions. The criterion threshold of 50% allowed us to maintain a certain representativeness of the forest pixel for studies on monitoring forest growth and development. The percentages of the masked broad-leaved and mixed forest areas in the regions are summarised in Table 1. The largest area of forests in the study was recorded in the Carpathian region, accounting for 27.9% of the region. Next on the list were the forests of the Sudeten and the Baltic regions, 16.7% and 13.5% respectively. Masurian-Podlasie also had more than 10% of its area covered by forests. The least amount of masked forests was detected in the Greater Poland-Pomerania region, where they accounted for 5.2% of the area.

Table 1 also shows the percentages of the area of broad-leaved and mixed forests classified in the CORINE Land Cover 2012 database. The greatest percentage of identified broad-leaved and mixed forests was in the Sudeten and Carpathian region, representing, respectively, 65.7% and 65.9% of these areas. The forests of the Baltic region also had a high result, over 50% of the area. The percentage of forests in the remaining regions ranged from 30–50 % of the areas.

Juxtaposing the percentage of broad-leaved and mixed forests classified by CLC2012 and the $\geq 50\%$ mask is aimed at demonstrating the amount of information about forests that is lost when producing a new mask to monitor the health condition of forests. The largest loss of information on forest areas, 49% (from 65.7% to 16.7%), was recorded for the Sudeten region. This result indicates that virtually every other analysed 1-km pixel did not exceed the required cri-

terion threshold of 50% of broad-leaved and mixed forests. This may be due to the presence of numerous small areas of forest with scattered tree stands that survived intensive industrial activities and the gradation of insect pests (Bochenek Z. et al. 1997). Large losses of information about forest areas were also observed in the Baltic region – 37.8 % (from 51.3% to 13.5%) and the Carpathian Region – 38.0 % (from 65.9 % to 27.9 %). In other regions, the size of the forest area decreased to 25–35 %.

To summarise, an average of about one-third of the areas of broad-leaved and mixed forests identified in the CLC2012 database were rejected due to not meeting the criterion threshold of 50% for establishing a new forest mask. These 1-km areas, where forests are not the dominant form of land cover, were rejected due to: (1) the need to maintain representative forest pixels and (2) the need to obtain the most reliable index measurements and to minimise interference from other land cover types (e.g. agricultural areas, areas being built up in the vicinity of forests). To answer the question of how the rejected forest areas could affect the quality of the NDVI measurements, a comparative analysis was made of the index obtained using the time series for 1998–2014. Figures 5 and 6 show the differences in the NDVI measurements, obtained on the basis of many years of SPOT VEGETATION satellite observations for the $\geq 50\%$ mask of broad-leaved and mixed forests and the $<50\%$ mask of these forests. The results in the context of monitoring vegetation were sorted by the decade of the year.

To evaluate the preliminary results of the NDVI comparison, a confidence level of 95% with a rejection threshold for measurement error of 0.05 was applied. As the scale of NDVI values is from –1.0 to 1.0, as is the scale of differences for this index, the thresholds of measurement errors of the differences in NDVI are also at –0.05 and 0.05. The

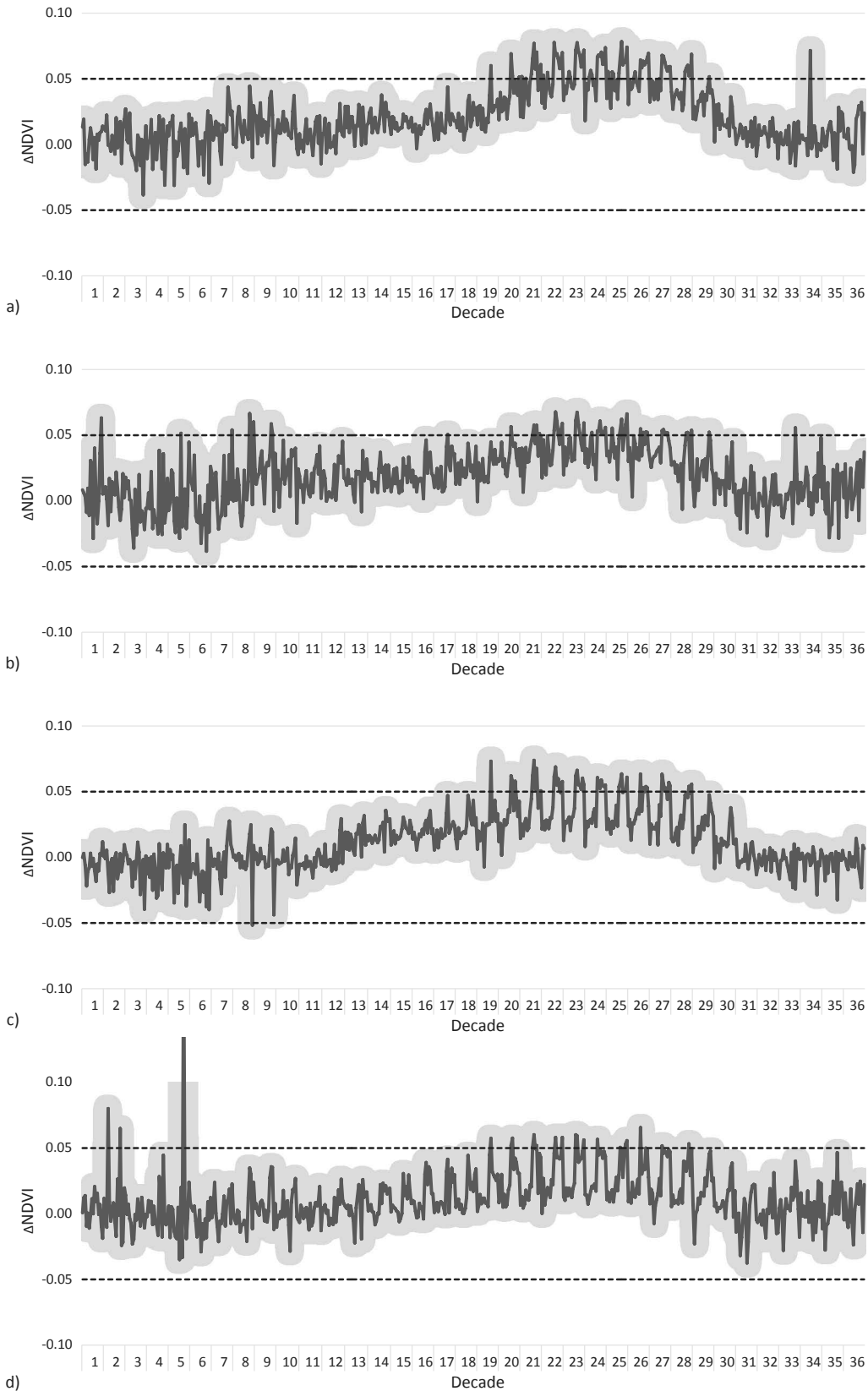


Figure 5. NDVI differences calculated from satellite SPOT-VEGETATION 1998-2014 data for ≥ 50 and $< 50\%$ forest mask in Natural-Forest Region: a) Baltic, b) Masurian-Podlasie, c) Greater Poland-Pomerania, d) Mazovia-Podlasie

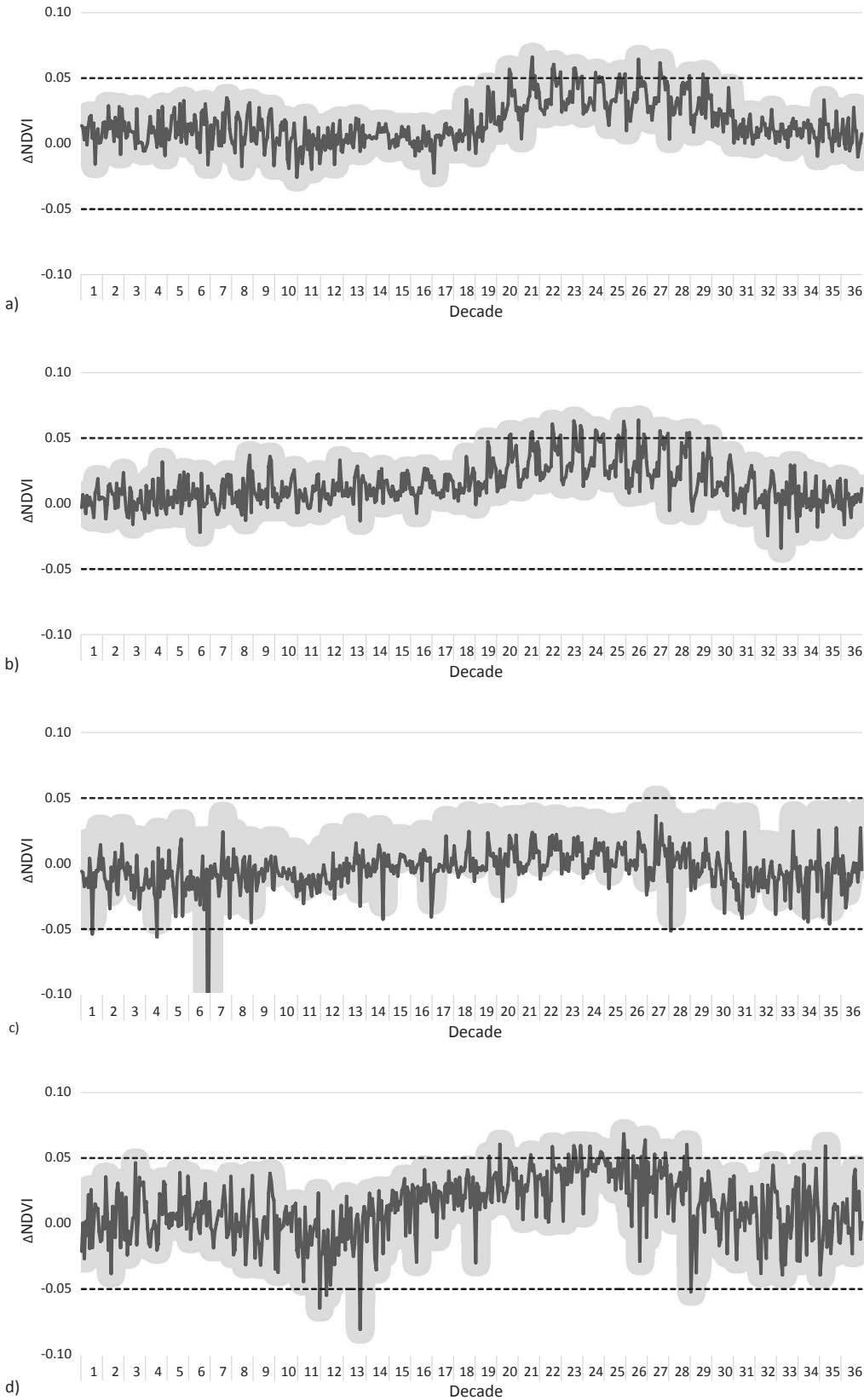


Figure 6. NDVI differences calculated from satellite SPOT-VEGETATION 1998-2014 data for ≥ 50 and $< 50\%$ forest mask in Natural-Forest Region: a) Silesian, b) Lesser Poland, c) Sudetian, d) Carpathian

rejection thresholds are depicted in Figs. 5 and 6, where the differences in NDVI measurements of greater than 0.05 and less than 0.05 indicate a significant change in the vegetation index readings. NDVI differences greater than 0.05 indicate higher values of the vegetation index based on the $\geq 50\%$ mask. Measurements recording a NDVI of less than 0.05 indicate higher values of the vegetation index of the $< 50\%$ mask.

NDVI measurements were made for 581 ten-day composites (observations) from SPOT VEGETATION, starting from the first decade of April 1998 to the second decade of May 2014, both months inclusive. The most frequent differences in the vegetation index were recorded in the Baltic region, where out of 581 observations, as many as 76 periods were found to have exceeded the NDVI measurement error of 0.05 (Fig. 5a). This represents 13% of all measurements of the vegetation index made in 1998–2014. Masurian-Podlasie and Greater Poland-Pomerania followed, registering 51 and 48 cases of significant differences of NDVI (Figs. 5b and 5c). On the other hand, the results of the measurements for the Sudeten region were at the opposite extreme. There was only one case of the occurrence of a difference exceeding 0.05 of the NDVI in broad-leaved and mixed forests with masks of $\geq 50\%$ and $< 50\%$.

We then examined how often the differences in NDVI measurements occurred during periods of tree stand growth and development, and the implications this may have for monitoring the vegetation of forests. For this purpose, the NDVI measurements in Figs. 5 and 6 were sorted by the decades. In the case of the Baltic region, having the most frequently recorded measurement differences, up to 99% of them were observed in decades 18–30, which corresponds to the period of June–October (Fig. 5a). This is a very important piece of information, highlighting the importance of carrying out vegetation measurements of forests. Figures 5c for the Greater Poland-Pomerania region, 6a for the Silesian region and 6b for the Lesser Poland region also confirm the existence of significant differences in NDVI measurements only in the period of plant phenology, from the 18th to the 30th decade. On the other hand, Figs. 5b and 5d show cases of differences in the index values in winter and summer-autumn. Variations in the measurements greater than 0.05 observed during the winter months may indicate imperfections related to masking snow cover. These differences have no significant impact on studying forest vegetation during spring and autumn.

At the end of the analysis, we performed nonparametric Mann–Whitney U tests. The measurement statistics of the regions are as follows: (a) Baltic $p = 0.021$, (b) Masurian-Podlasie $p = 0.038$, (c) Greater Poland-Pomerania $p = 0.095$, (d) Mazovian-Podlasie $p = 0.221$, (e) Silesian $p = 0.072$, (f) Lesser

Poland $p = 0.105$, (g) Sudeten $p = 0.389$ and (h) Carpathian $p = 0.083$. The test results confirm that the measurements of forests with a mask of $\geq 50\%$ and $< 50\%$ in the regions of northern Poland, i.e. the Baltic and Masurian-Podlasie regions, had statistically significant differences in NDVI values. The greatest risk of rejection of the null hypothesis, which assumes no difference, was found for the Sudeten (38.87%), Mazovian-Podlasie (22.12%) and Lesser Poland (10.45%) regions.

In summary, the new forest mask of $\geq 50\%$ had an influence on obtaining higher NDVI measurements by more than 0.05 in the growth periods of forests in seven natural-forest regions: Baltic, Masurian-Podlasie, Greater Poland-Pomerania, Mazovian-Podlasie, Silesian, Lesser Poland and Carpathian. Because we obtained relatively reliable NDVI values, the results of these measurements could imply the validity of using masks. The developed forest mask of $\geq 50\%$ partially eliminates the problem of measurement errors of the indicator for “pure forest” areas and areas with no other form of land cover. However, it is advisable to check the classes of land cover other than forests that occur in the pixels and to check the surrounding areas of each pixel, thereby creating buffer zones of a width of over $\frac{1}{2}$ of the 1 km pixel, i.e. 600 meters. The experiences of working on an agricultural mask to forecast yields (Turlej K. et al. 2013) showed no unequivocal, clear and universal criteria for mask and a buffer zone thresholds. On the other hand, the assumption adopted in this paper of an authoritative threshold of 50% is used in environmental programs and products to classify land cover, such as CORINE Land Cover or GLOBCOVER 2009.

The results of the Mann–Whitney U test showed that among all of the eight regions surveyed, only two, Baltic and Masurian-Podlasie, obtained statistically significant differences. These are regions where the most numerous differences were observed of NDVI measurements for 1998–2014 – 76 and 51 respectively out of 581 observations. We found no justification to reject the null hypothesis for the remaining six regions, and the risk of rejecting the true hypothesis was at a level of 7.19% for the Silesian to 38.87% for the Sudeten region.

The forests of the Sudeten region are a special case, where we noted absolutely no impact of the new mask on the quality of the readings (one erroneous observation for all 581 possible observations). It is worth noting that in terms of area, this is the smallest natural-forest region of all eight studied, having a mountain landscape dominated by coniferous forests in the upper layer and mixed forests in the lower layer. Coniferous forests, which are very close or identical to the readings of broad-leaved and mixed forests in the NDVI measurements, dominate in the 1-km pixel grid. Therefore, the mask threshold of 50% may not

have had any effect on the quality of the vegetation index measurements.

To conclude the discussion, we recommend that an additional assessment be made of the NDVI measurements by checking the correlation with meteorological data or satellite data from a different source. A supplemental verification of research results could also be the juxtaposition of index measurements based on low- and high-resolution images, for example, SPOT VEGETATION and Landsat. In this case, due to the nature of registering high-resolution images, the research can be performed only for selected test polygons within a specified time interval.

Conclusions

1. The developed forest mask of $\geq 50\%$ influenced the results of vegetation index measurements for forests in seven natural-forest regions. Use of the new forest masks had no effect on the measurement results of the profiles of the vegetation index for the Sudeten region's forests.

2. In total, 99% of the differences in NDVI larger than the 0.05 were recorded during the period of forest growth and development, from the 18th to the 30th decade. This points to the need to take into account the developed mask in research on monitoring the health condition of the forest environment.

3. The results of NDVI measurements using a new forest mask of $\geq 50\%$ and a mask of $< 50\%$ showed statistically significant differences for the Baltic and Masurian-Podlasie regions, accounting for 13.1% and 8.8%, respectively, of all observations in 1998–2014. The risk of the rejection of the null hypothesis, which assumes that the measurements agree, is less than 2.14% and 3.80%, respectively.

Conflict of interest

The author declares no potential conflicts of interest.

Acknowledgements and source of funding

This study was conducted within the framework of Doctoral Studies at the Faculty of Geography and Regional Studies at University of Warsaw. The author would like to thank the staff of the Remote Sensing Centre at the Institute of Geodesy and Cartography in Warsaw for their help and valuable advice.

References:

- Bartold M. 2012. Monitoring of forest damages in Poland and Slovakia based on Terra.MODIS satellite images. *Geoinformation Issues* 4 (1): 23–31.
- Bochenek Z., Ciołkosz A., Iracka M. 1997. Zmiany stanu lasów w Sudetach Zachodnich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* Tom XLIV (95): 73–94.
- Bychawski W. 1988. Geometryzacja zdjęć satelitarnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii* Tom XXXV (80): 33–46.
- Ciołkosz A., Bielecka, E. 2005. Pokrycie terenu w Polsce – Baza danych CORINE Land Cover. *Biblioteka Monitoringu Środowiska*. Inspektorat Ochrony Środowiska: 1–76
- Garamvolgyi A., Hufnagel L., 2013, Climate Change Induced Vegetation Shifts in the Palearctic Region, *Applied Ecology and Environmental Research* 11(1): 79–122.
- Hościło A., Tomaszewska M. 2015. CORINE Land Cover 2012–4th CLC inventory completed in Poland. *Geoinformation Issues* 6 (1): 49–58.
- Karlsen S. R., Elvebakk A., Hogda K. A., Grydeland T. 2014. Spatial and Temporal Variability in the Onset of the Growing Season on Svalbard, Arctic Norway – Measured by MODIS-NDVI Satellite Data. *Remote Sensing* 2014 (6): 8088–8106. DOI:10.3390/rs6098088
- Prabakaran C., Singh C. P., Panigrahy S., Parihar J. S. 2013. Retrieval of forest phenological parameters from remote sensing-based NDVI time-series data. *Current Science* 105 (6): 795–802.
- Reddy, C.S., Jha, C.S., Dadhwal, V.K., Harikrishna, P., Pasha, S.V., Satish, K.V., Dutta, K., Saranya, K.R.L., Rakesh, F., Rajashekar, G. & Diwakar, P.G. 2016. Quantification and monitoring of deforestation in India over eight decades (1930–2013). *Biodiversity and Conservation* 25: 93–116; DOI: 10.1007/s10531-015-1033-2.
- Tucker C.J. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8(2): 127–150.
- Turlej K., Bojanowski J., Bartold M. 2013. Maska obszarów rolniczych dostosowana do monitoringu wzrostu roślin uprawnych w Polsce przy użyciu szeregów czasowych NOAA-AVHRR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 25: 233–242.
- Zielony R., Kliczkowska A. 2012. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. ISBN 978-83-61633-62-4.
- CORINE land cover nomenclature illustrated guide - <http://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/Nomenclature.pdf>
- GLOBCOVER 2009 Product Description Manual – http://due.esrin.esa.int/files/p68/GLOBCOVER2009_Product_Description_Manual_1.0.pdf
- State of Europe's Forests 2015 - <http://www.foresteurope.org/fullsoef2015>