



DARIUSZ DOBRUCKI

Politechnika Wrocławska  
Katedra Dróg i Lotnisk  
dariusz.dobrucki@pwr.  
wroc.pl

## Nośność podłoża gruntowego wzmocnionego geosyntetykami

Geosyntetyki stanowią bardzo szeroką grupę wyrobów budowlanych różniących się technologią produkcji i surowcem użytym do ich wytworzenia. Nie można opisać poprawnie geosyntetyku, podając jeden lub dwa wybrane parametry (na przykład gramaturę i wytrzymałość na rozciąganie). Producenci zazwyczaj podają nawet kilkanaście różnych parametrów opisujących właściwości fizyczne, mechaniczne i hydrauliczne wyrobu, a i tak porównanie wyrobów wytworzonych według różnych technologii jest bardzo trudne.

Administracje drogowe w różnych krajach próbowały uporządkować zasady stosowania geosyntetyków. Wydawały odpowiednie specyfikacje techniczne, które były opracowywane na podstawie wcześniejszych doświadczeń i obserwacji zachowania się geosyntetyków na zakończonych budowach. Projektowanie na podstawie specyfikacji technicznych jest proste. Metoda doboru geosyntetyku polega na ustaleniu, jaką funkcję ma on spełniać, a następnie podane są wymagania techniczne, jakimi dany wyrób powinien się charakteryzować.

Odpowiednie zasady wzmocnienia podłoża gruntowego były wprowadzone w wielu krajach: Francja [1], Niemcy [2], Polska [3]. Specyfikacje z różnych krajów są bardzo do siebie podobne, a występujące niewielkie różnice wynikają z uwzględnienia specyfiki gruntów charakterystycznych dla danego kraju i dostępności różnego rodzaju geosyntetyków na lokalnych rynkach. Wydane w Polsce „Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym” [3] zostały opracowane w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów. Zawarte w nich przepisy związane z zastosowaniem geosyntetyków dotyczą sytuacji, w której geosyntetyk jest stosowany jako warstwa separacyjna, filtracyjna lub wzmocniająca konstrukcję nawierzchni nieutwardzonej. W innych przypadkach zalecane jest „wymiarowanie na podstawie szczegółowych obliczeń”. Nie ma jednak wskazanej żadnej metody teoretycznej lub empirycznej, którą należy zastosować. Dodatkowym minusem jest fakt, że „Wytyczne...” [3] zostały opracowane tylko w odniesieniu do geotekstyliów, czyli tkanin i włóknin. Posługiwanie się zaproponowaną w tym opracowaniu metodą w przypadku projektowania wzmocnień geosiatką, georusztem czy geokompozytem jest bardzo przybliżone. Wymienione powyżej ograniczenia znajdują się nie tylko w polskich wytycznych. Bardzo podobnie wyglądają niemieckie specyfikacje, na których polskie przepisy były wzorowane. Również w specyfikacjach wydanych w innych krajach występują podobne ograniczenia. Projektowanie na podstawie specyfikacji nie pozwala na optymalizację przyjętego rozwiązania. Należy pamiętać, że efekt wzmocnienia podłoża gruntowego zależy nie tylko od zastosowanego geosyntetyku, ale i od grubości warstwy no-

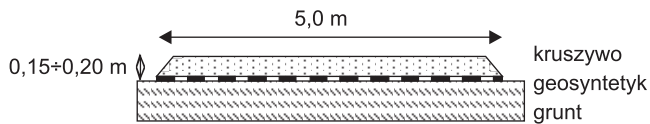
śnej znajdującej się nad geosyntetykiem oraz rodzaju materiału użytego do jej wykonania.

Większość dużych producentów geosyntetyków opracowała własne metody projektowania takiego wzmocnienia. Odpowiednie specyfikacje techniczne powstały na podstawie obserwacji już wykonanych wzmocnień podłoża gruntowego przy użyciu określonej grupy materiałów. Jednak żadna z metod nie jest uniwersalna, czyli nie pozwala na zaprojektowanie wzmocnienia podłoża o małej nośności przy użyciu dowolnych geosyntetyków. Stosując geosyntetyki o zbliżonych parametrach, ale jednocześnie wykonując obliczenia różnymi metodami, za każdym razem otrzymuje się różne grubości warstwy nośnej z kruszywa [4]. Ocena efektywności zastosowania geosyntetyków na podstawie metod obliczeniowych jest mało wiarygodna.

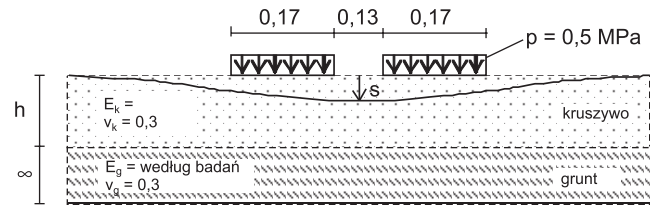
Jedynym rozwiązaniem jest przeprowadzenie badań w warunkach najbardziej zbliżonych do rzeczywistej pracy nawierzchni. Przy projektowaniu takich badań należy pamiętać, że nośność nawierzchni zależy od wielu czynników: grubości warstw konstrukcyjnych, rodzajów i parametrów technicznych użytych materiałów oraz właściwości podłoża. Nawet niewielka zmiana jednego z czynników może mieć duże znaczenie. Zatem, aby porównać efektywność wzmocnienia podłoża różnymi geosyntetykami należy wybudować doświadczalne odcinki, ale w taki sposób, aby warunki pracy różnych materiałów były jak najbardziej do siebie zbliżone.

### Badania terenowe

Katedra Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej oraz Wyższa Szkoła Oficerska we Wrocławiu przeprowadziły program badawczy, który był rozwinięciem wcześniejszych, wspólnych przedsięwzięć, opisanych w artykułach [5], [6]. Na poligonie „Raków Wielki” wybudowano doświadczalne odcinki drogi o nawierzchni nieutwardzonej. Konstrukcję nawierzchni drogi wykonano w następujący sposób: usunięto humus i wyrównano podłoże gruntowe. Nie wykonywano żadnych dodatkowych zabiegów mających na celu podniesienie nośności podłoża. Na tak przygotowanym gruncie ułożono geosyntetyki i przysypano kruszywem. Warstwa z kruszywa została zagęszczona walcem stalowym. Założono, że grubość warstwy z kruszywa powinna wynosić  $15 \div 20$  cm. Schemat nawierzchni przedstawiono na rysunku 1. Jako wzmocnienie zastosowano różnego rodzaju geosyntetyki, których szczegółowe zestawienie podano w tabeli 1. W sumie zastosowano czternaście różnych geosyntetyków. W większości przypadków były to geosiatki, gdyż są to wyroby, których funkcja wzmocniająca jest podstawowa. Na każdym z odcinków doświadczalnych wyznaczono jeden przekrój, w którym pomierzono:



Rys. 1. Przekrój poprzeczny drogi



Rys. 2. Schemat modelu nawierzchni drogi – obliczenie modułów warstwy nośnej

- ugięcia belką Benkelmana,
- grubość warstwy nośnej z kruszywa,
- moduły odkształcenia na gruncie.

## Obliczenia

Wyników badań terenowych nie analizowano wprost. Na każdym z odcinków doświadczalnych były inne warunki gruntowe i inna grubość warstwy nośnej. W celu dokonania obiektywnej oceny efektywności zastosowania poszczególnych geosyntezyków przygotowano model nawierzchni drogowej i wykonano obliczenia, które pozwoliły ocenić nośność nawierzchni na wszystkich odcinkach. Przeprowadzone obliczenia można podzielić na trzy etapy:

**Etap 1** – Obliczenia odwrotne mające na celu wyznaczenie modułu warstwy nośnej z kruszywa wzmocnionego geosyntezykiem. W obliczeniach założono, że geosyntezyk nie stanowi oddzielnej warstwy, ale fakt jego ułożenia powoduje zmianę parametrów materiału warstwy z kruszywa. Wykorzystując program optymalizacyjny, służący do tak zwanych obliczeń

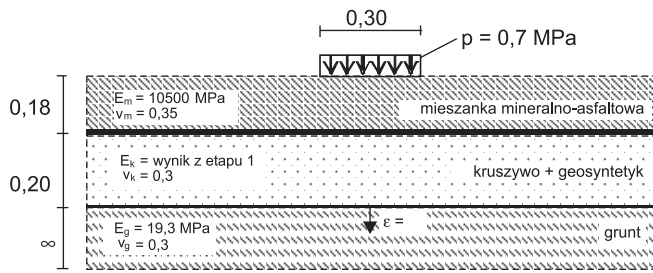
odwrotnych (ang. *back calculation*) [7], dla znanych wartości ugięć  $S$  i modułu podłoża  $E_g$  oraz grubości warstwy z kruszywa obliczono moduły kruszywa wzmocnionego geosyntezykiem  $E_k$ . Schemat rozpatrywanego układu przedstawiono na rysunku 2.

**Etap 2** – Obliczenia mające na celu wyznaczenie maksymalnych pionowych odkształceń podłoża gruntowego. Na etapie tym analizowano model nawierzchni asfaltowej ułożonej na warstwie z kruszywa wzmocnionego geosyntezykiem. Przyjęto, że grubości warstw są stałe, podobnie jak moduł dla gruntu i mieszanki mineralno-asfaltowej. Jedynym parametrem zmiennym był moduł warstwy nośnej  $E_{k,1}$ , a jego wartości przyjmowano zgodnie z wynikami pierwszego etapu obliczeń. Schemat rozpatrywanego modelu pokazano na rysunku 3.

**Etap 3** – Obliczenia mające na celu wyznaczenie nośności nawierzchni (trwałości zmęczeniowej wyrażonej liczbą dopuszczalnych obciążeń  $N$ ) z **Etapu 2** na podstawie kryterium

Tabela 1. Zestawienie geosyntezyków wbudowanych na odcinkach doświadczalnych (parametry wg danych producentów)

Symbol geosyntezyku	Rodzaj geosyntezyku	Materiał	Wytrzymałość na rozciąganie [kN/m]	Wydłużenie przy zerwaniu [%]	Masa powierzchniowa [g/m <sup>2</sup> ]	Wytrzymałość przy wydłużeniu 5% [kN/m]	Wytrzymałość przy wydłużeniu 2% [kN/m]
Raugrid 4/4-20	siatka pleciona	poliester	40	12	392	–	–
Raugrid 5/5-30	siatka pleciona	poliester	50	12	512	–	–
SS30	siatka o sztywnych węzłach	polipropylen	30	–	300	10,5	21
SS40	siatka o sztywnych węzłach	polipropylen	40	–	450	14	28
MT1	siatka pleciona	stal	32	–	1300	–	–
LA	geosiatka o sztywnych węzłach	polipropylen	30	–	300	12	25
Armatex M 30/30	siatka pleciona	poliwinylalkohol	35	5	210	6,5	25
Armatex M 40/40	siatka pleciona	poliwinylalkohol	45	5	250	12	38
Armatex M 50/50	siatka pleciona	poliwinylalkohol	55	6	320	13	40
Armatex M 65/65	siatka pleciona	poliwinylalkohol	75	5	350	20	55
Armatex M 80/80	siatka pleciona	poliwinylalkohol	90	5	520	25	70
Armatex RSM 50/50	siatka pleciona + włóknina	poliwinylalkohol + polipropylen	55	13	410	10	18
Terram 1B1	włóknina + siatka + włóknina	polietylen	20	–	770	–	–
Terram SV335/220/200/03.19	komórki pasy z włókniny	–	10	–	–	–	–



Rys. 3. Schemat modelu nawierzchni drogi – obliczenie odkształceń podłoża

zmęczeniowego kolein strukturalnych, opracowanego przez Instytut Asfaltowy [8] i opisanego zależnością (1).

$$N = \left( \frac{0,0105}{\varepsilon_p} \right)^{4,484} \quad (1)$$

w której:

$\varepsilon$  – pionowe odkształcenia ściskające wywołane w górnej powierzchni podłoża gruntowego,  
 $N$  – liczba dopuszczalnych obciążeń porównawczych osi zastępczych.

Szczegółowy opis wykonanych prac terenowych podano w [9].

## Ocena efektywności wzmocnienia nawierzchni geosyntezykami

Analizując wynik badań autor postawił sobie pytanie: jaki parametr geosyntezyki ma decydujące znaczenie dla efektu wzmocnienia? W tym celu wykonano pięć wykresów (rys. 4) – na których zaznaczono, jak zmienia się nośność warstwy z kruszywa w zależności od następujących cech zastosowanych geosyntezyków:

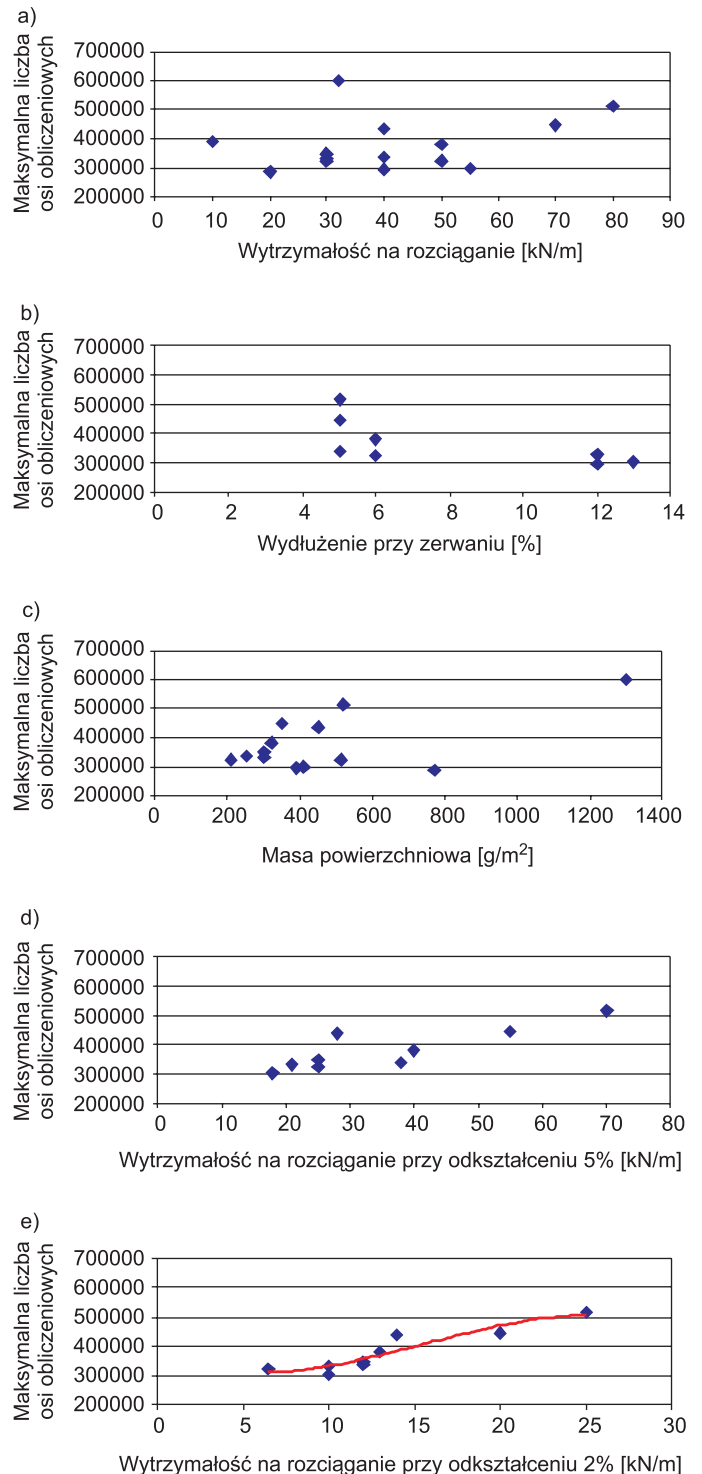
- wytrzymałości na rozciąganie,
- wydłużenia przy zerwaniu,
- masy powierzchniowej,
- wytrzymałości na rozciąganie przy wydłużeniu 5%,
- wytrzymałości na rozciąganie przy wydłużeniu 2%.

Parametry przyjęto na podstawie danych zamieszczonych w aprobatkach technicznych poszczególnych wyrobów (tab. 1). Na każdym z wykresów jest inna liczba punktów, ponieważ producenci nie zawsze opisują produkowane przez siebie wyroby w taki sam sposób. Do wykonania każdego wykresu wybierano wyniki tylko z tych odcinków, na których zastosowany geosyntezyk był opisany odpowiednim parametrem.

Na trzech pierwszych wykresach (rys. 4a, 4b, 4c) wyraźnie widać, że nie ma żadnej korelacji pomiędzy parametrami materiałowymi geosyntezyków a nośnością nawierzchni. Na wykresie czwartym (rys. 4d) punkty układają się wzdłuż pewnej linii, ale rozrzut jest nadal dość duży. Jedynie na wykresie piątym (rys. 4e) punkty ułożyły się w taki sposób, że można powiedzieć, iż istnieje korelacja pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie przy wydłużeniu 2% a nośnością nawierzchni. Można zatem postawić tezę, że wybierając geosyntezyk do wzmocnienia warstwy z kruszywa powinniśmy wybierać wy-

rób charakteryzujący się jak najwyższym modułem przy małych odkształceniach. Niestety moduły dla geosyntezyków nie są podawane przez żadnego z producentów.

Geosyntezyki są to wyroby budowlane w większości wykonane z tworzyw sztucznych: poliester, polipropylen, polietylen, poliwinylalkohol itp. Dla wszystkich wymienionych materiałów zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem nie jest liniowa. Ponadto materiały syntetyczne są to materiały reologiczne. Pod wpływem działania długotrwałych obciążeń ich



Rys. 4. Zmiana nośności nawierzchni w zależności od parametrów materiałowych geosyntezyków

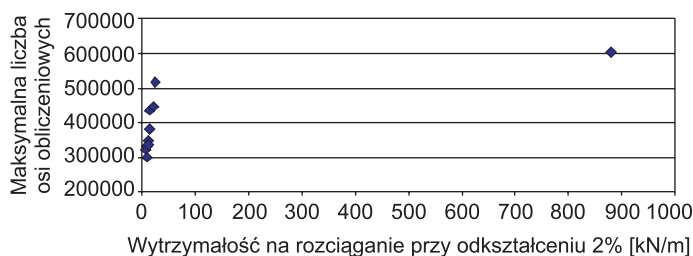
właściwości zmieniają się w czasie. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że podczas testu rozciągania inaczej zachowuje się pojedyncza nitka tworzywa sztucznego, a inaczej wyrób wykonany ze splotu tych nici. Tak więc geosyntetyków nie możemy zaliczyć do materiałów sprężystych i dlatego nie wyznacza się dla nich modułów sprężystości. Trudno jest również przyjąć jakieś uniwersalne kryteria, które pozwoliłyby na wyznaczenie „umownego modułu sztywności”. Z problemem tym producenci radzą sobie, podając wartość siły powodującej określone odkształcenie w przeliczeniu na metr szerokości geosyntetyku. Z reguły najniższe odkształcenie, dla którego podawana jest siła rozciągająca, wynosi 2%. Jest to jednak odkształcenie dużo wyższe niż maksymalne odkształcenie geosyntetyku, jakie powstaje we wbudowanym w nawierzchnię wyrobie na skutek obciążenia kołem samochodu.

## Siatka stalowa

Na jednym z odcinków doświadczalnych do wzmocnienia nawierzchni zastosowano siatkę stalową. Był to jedyny przypadek wykorzystania wyrobu nie wykonanego z tworzywa sztucznego. Stal charakteryzuje się sztywnością o kilka rzędów wyższą niż polipropylen, polietylen czy poliester. Zgodnie z oczekiwaniami wyniki przeprowadzonych obliczeń wskazują, że odcinek wzmocniony siatką stalową ma najwyższą nośność ze wszystkich badanych odcinków.

Siatka stalowa w zakresie naprężeń poniżej granicy plastyczności może być traktowana jak materiał sprężysty i dlatego jest inaczej opisywana niż pozostałe siatki. Producent nie podaje wartości sił powodujących określone odkształcenie, tylko moduł sprężystości, który wynosi  $E = 200\text{GPa}$ . Na rysunku 4 odcinek ze wzmocnieniem siatką stalową nie został uwzględniony przy sprawdzaniu korelacji pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie przy odkształceniu 2% a nośnością nawierzchni. W celu porównania siatki stalowej z innymi siatkami autor wykonał dodatkowe obliczenia, w wyniku których otrzymał, że w przypadku siatki stalowej, aby uzyskać odkształcenie równe 2% należy użyć siły równej 880 kN w przeliczeniu na metr szerokości siatki. Jeżeli uwzględnimy ten wynik to piąty wykres (4e) z rysunku 4 zmieni swój kształt i będzie wyglądał tak, jak to przedstawiono na rysunku 5.

Siatka stalowa zdecydowanie nie wpisuje się w korelację pomiędzy nośnością nawierzchni a wytrzymałością na rozciąganie przy odkształceniu 2%, wyznaczoną dla siatek z tworzyw sztucznych. Nośność nawierzchni wzmocnionej siatką stalową jest wysoka, ale nie aż tak wysoka jak można by się spodziewać. Zatem wyznaczonej na rysunku 4 (wykres 4e)



Rys. 5. Zależność pomiędzy nośnością nawierzchni a wytrzymałością na rozciąganie przy odkształceniu 2%, z uwzględnieniem siatki stalowej

krzywej nie można traktować jako uniwersalną zależność. Można ją co najwyżej stosować do szacunkowego wyznaczenia nośności nawierzchni w przypadku użycia siatek z materiałów syntetycznych, których odkształcenie równe 2% uzyskuje się w wyniku przyłożenia siły  $5 \div 25\text{ kN/m}$ , oraz gdy warunki gruntowe są zbliżone do tych, jakie były w trakcie badań terenowych, a grubość nawierzchni wynosi  $15 \div 20\text{ cm}$ .

Zwiększenie sztywności geosyntetyku nie musi się przekładać na duży wzrost nośności nawierzchni drogowej. Prawdopodobnie istnieje pewna granica, powyżej której zwiększanie sztywności nie ma sensu. Pytanie: gdzie znajduje się ta granica? Odpowiedź na nie może być ciekawym tematem do dalszych badań.

## Podsumowanie

1. Przy wyborze geosyntetyku do wzmocnienia podłoża pod nawierzchnię drogową należy zwracać uwagę na jego wytrzymałość na rozciąganie przy małych odkształceniach. Im ta wytrzymałość jest wyższa, tym lepszy będzie efekt wzmocnienia nawierzchni. Inne podawane przez producenta parametry geosyntetyku również są istotne, ale trudno na ich podstawie przewidywać nośność projektowanej nawierzchni.

2. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że jeżeli geosiatka charakteryzuje się wytrzymałością na rozciąganie przy odkształceniu 2% powyżej 20 kN/m, to efekt wzmocnienia przy jej zastosowaniu będzie bardzo dobry. Jeżeli wytrzymałość wyrobu będzie w granicach  $10 \div 20\text{ kN/m}$ , to efekt wzmocnienia będzie średni. Geosyntetyki o wytrzymałości mniejszej niż 10 kN/m w niewielkim stopniu wzmocniają nawierzchnię.

3. Zależność nośności nawierzchni od sztywności zastosowanej geosiatki nie jest liniowa. Wzmocnienie podłoża siatką wykonaną z materiału o bardzo wysokiej sztywności nie musi oznaczać również dużego wzrostu nośności nawierzchni.

## Bibliografia

- [1] „Geotekstyli. Poradnik stosowania”, Przekład z francuskiego, Beskidzki Instytut Tekstylny, Bielsko-Biała, 1998
- [2] „Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus“ Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen, Köln, 1994
- [3] „Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym”, GDDP, IBDiM, Warszawa, 2002
- [4] Dobrucki D. „Porównanie metod wzmocnienia podłoża nawierzchni drogowej geosyntetykami” Drogownictwo 10/2005
- [5] Ciszewski T. Dobrucki D. Szydło A., „Badania nośności dróg tymczasowych wzmocnionych geosyntetykami” IX Międzynarodowa Konferencja Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe. Kielce 2004
- [6] Ciszewski T. Dobrucki D. Szydło A., „Nośność warstw z kruszywa wzmocnionego geosyntetykami”, Drogownictwo 5/2004
- [7] Szydło A. „Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych” Prace naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej 45, Seria Monografie 17, Wrocław, 1995
- [8] „Research and Development of the Asphalt Institute’s thickness design manual (MS-1)” Ninth edition, The Asphalt Institute, Research Report NO. 82-2, RR-82-2, August, 1982
- [9] Ciszewski T. Dobrucki D. „Badania tymczasowych dróg doświadczalnych wybudowanych z zastosowaniem geosyntetyków”. Ogólnopolska Konferencja Naukowo Techniczna „Nowoczesne metody stabilizacji podłoża pod nawierzchnie drogowe i kolejowe”, Żmigród-Węglewo, 2009 ■