

Projektowanie nawierzchni drogowych z warstwą kruszywa wzmocnioną geosyntetykiem

Dr inż. Jacek Alenowicz
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Geosyntetyki są szeroko stosowane w budowie nawierzchni dróg jako warstwy separacyjne i wzmacniające. Wzmacnianie warstw niezwiązanego kruszywa układanych na podłożu gruntowym o obniżonej nośności należy do najwcześniejszych zastosowań geosyntetyków w budownictwie drogowym. Geotekstyliami wzmacniano drogi tymczasowe już na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku. W późniejszych latach nastąpił rozwój zastosowania georusztów i geosiatek do wzmacniania warstw nawierzchni wykonanych z kruszywa, również w nawierzchniach ulepszonych. Zagadnienie wzmacniania warstw nawierzchni drogowych geosyntetykami jest przedmiotem zainteresowania autora od prawie 30 lat [1, 2, 3, 4].

Geosyntetyk ułożony pod warstwą nawierzchni wykonaną z kruszywa pozwala na [5, 20]:

- wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni,
- zmniejszenie grubości warstwy kruszywa,

- uzyskanie tzw. platformy roboczej w czasie budowy nawierzchni.

Efekt wzmocnienia zależy od współpracy geosyntetyku ze wzmacnianą warstwą i jego zdolności do przejścia naprężeń rozciągających powstających na spodzie warstwy kruszywa pod wpływem obciążenia. Jeżeli między kruszywem i geosyntetykiem występuje poślizg, brak jest efektu wzmocnienia warstwy kruszywa lub jest on minimalny.

MECHANIZM WZMOCNIENIA

Od początku lat osiemdziesiątych XX wieku, równoległe z zastosowaniami geosyntetyków do wzmocnienia warstw kruszywa obciążonych ruchem samochodowym, prowadzono badania, których celem było poznanie mechanizmu oddziaływania geosyntetyku oraz opracowanie metod obliczeniowych pozwa-

lających ocenić korzyści płynące z zastosowania wzmocnienia. Pierwsze zastosowania i badania skupiały się na drogach tymczasowych, w których dopuszczano głębokie koleiny, i w wyniku dużych odkształceń następowało wyraźne rozciąganie w geosyntetyku. W miarę upływu czasu zauważono jednak korzystny wpływ niektórych geosyntetyków również w przypadkach, kiedy występujące odkształcenia były stosunkowo niewielkie.

Analiza wyników badań, prowadzonych w różnych ośrodkach, doprowadziła do wyróżnienia już w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku przez Perkinsa i Ismeika [15] trzech potencjalnych mechanizmów wzmocnienia przez geosyntetyk warstwy kruszywa poddanej obciążeniu pojazdami. Należą do nich:

- polepszenie odporności warstwy kruszywa na ścinanie (rys. 1),
- boczne utwierdzenie ziaren kruszywa (rys. 2),
- efekt naciągniętej membrany (rys. 3).

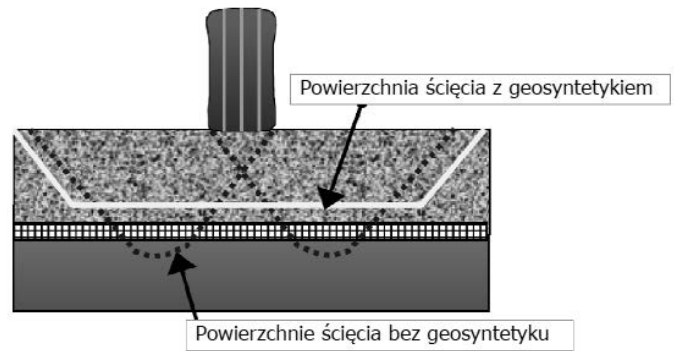
Wymienione mechanizmy są obecnie powszechnie akceptowane (np. US Army Corps of Engineers [20], Zornberg i Gupta [22]). W Polsce były omówione szerzej m.in. przez Judyckiego [13].

Boczne utwierdzenie ziaren kruszywa oraz polepszenie odporności warstwy kruszywa na ścinanie nie wymagają wystąpienia dużych odkształceń i są charakterystyczne dla wzmocnień nawierzchni ulepszonych.

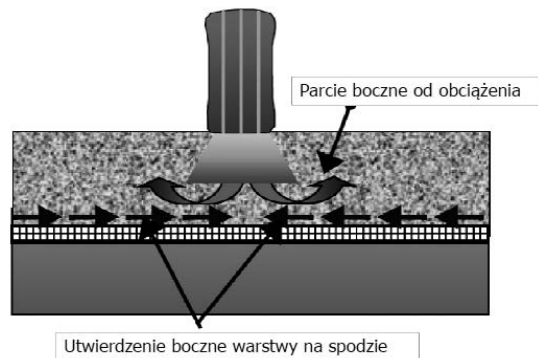
Polepszenie odporności na ścinanie jest spowodowane tym, że warstwa geosyntetyku zmienia przebieg potencjalnej powierzchni zniszczenia wskutek obciążenia kołem. Przebiega ona w całości w warstwie kruszywa. Inny kształt i przebieg powierzchni zniszczenia powoduje wzrost nośności podłoża gruntowego. Znajduje to odzwierciedlenie w przyjmowaniu większej wartości współczynnika nośności podłoża gruntowego w przypadku układów z geosyntetykiem. Przykładem jest metoda Giroud i Noiray [10]. Zestawienie współczynników na podstawie literatury przedstawiła Kazimierowicz-Frankowska [14]. Wartość współczynników w przypadku układów z geosyntetykiem jest od 1,64 do 2 razy większa niż w przypadku podłoża bez wzmocnienia geosyntetykiem.

Boczne utwierdzenie ziaren kruszywa występuje, kiedy zazębienie i współpraca między geosyntetykiem i kruszywem są bardzo dobre. W efekcie, już przy małych odkształceniach, geosyntetyk przeciwstawia się bocznemu parciu i dążeniu ziaren kruszywa do przemieszczenia na boki. Dobra współpraca z warstwą kruszywa zależy praktycznie wyłącznie od właściwości strukturalnych geosyntetyku. Wpływ struktury geosyntetyku na efektywność wzmocnienia omówiono w następnym rozdziale. Efekt bocznego utwierdzenia ziaren kruszywa jest kluczowy w przypadku wzmocnienia podbudów z kruszyw niezwiązanych w nawierzchniach ulepszonych.

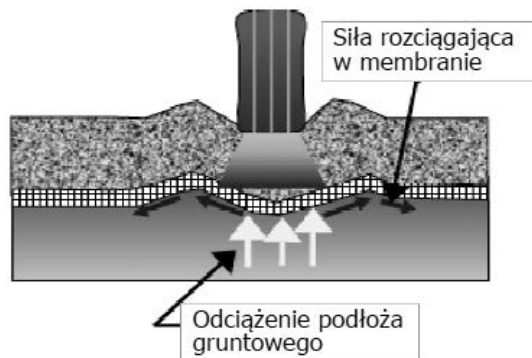
Wystąpienie efektu membrany i uzyskanie efektu wzmocnienia wymaga znacznego odkształcenia układu, w tym warstwy geosyntetyku. Efekt naciągniętej membrany występuje, gdy obciążenie ruchem jest na tyle duże w stosunku do nośności podłoża gruntowego, że powoduje plastyczne deformacje i koleiny w podłożu. Efekt membrany występuje w przypadku kolein przekraczających 10 cm [20]. Takie odkształcenie jest dopuszczalne jedynie w przypadku nawierzchni nieulepszonych oraz



Rys. 1. Mechanizm wzmocnienia wskutek polepszenia odporności na ścinanie [20]



Rys. 2. Mechanizm utwierdzenia bocznego ziaren kruszywa (klinowania) [20]



Rys. 3. Efekt naciągniętej membrany [20]

drog i obiektów tymczasowych. W przypadku dużych deformacji w geosyntetyku powstaje siła rozciągająca, która poprawia zdolność nawierzchni do przejścia obciążeń.

W przypadku dużych deformacji efekt wzmocnienia przypisuje się często pionowej składowej sile rozciągającej, powstałej w geosyntetyku, jednak jest to duże uproszczenie. W przypadku koleiny o głębokości 10 cm wydłużenie geosyntetyku wynosi około 3% i siła rozciągająca przy takiej deformacji nie jest duża, podczas gdy obserwowany efekt wzmocnienia jest znaczny. Badania przeprowadzone przez autora [1, 2, 4] wykazały, że nawet geowłókniny o niewielkiej sztywności powodują:

- zwiększenie o około 30% kąta rozkładu obciążenia w warstwie kruszywa,
- przekazanie obciążenia na szerszą i głębszą strefę słabego podłoża,

- zmianę rozkładu naprężenia na styku podłoża gruntowego z warstwą kruszywa.

Współcześnie brak ogólnej, powszechnie akceptowanej metody pozwalającej na uwzględnienie wymienionych mechanizmów w obliczeniach konstrukcji nawierzchni. Stosowane metody określania grubości warstwy kruszywa, wzmocnionej geosyntetykiem w nawierzchniach drogowych omówiono w kolejnych rozdziałach.

WYMAGANIA DOTYCZĄCE GEOSYNTETYKÓW

Według normy [16] parametrami o istotnym znaczeniu w odniesieniu do geosyntetyku stosowanego w budownictwie drogowym w funkcji zbrojenia (wzmocnienia) są:

- wytrzymałość na rozciąganie,
- wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu,
- przebicie statyczne,
- przebicie dynamiczne,
- trwałość.

Wymagania te nie zależą od przewidywanego zastosowania geosyntetyku. Są identyczne w odniesieniu do konstrukcji z gruntu zbrojonego, zbrojenia podstawy nasypu, wzmocnienia dróg tymczasowych, a także warstw niezwiązanych w nawierzchniach nieulepszonych, pomimo że w każdej z omawianych sytuacji mechanizm oddziaływania geosyntetyku jest inny.

Znamienny jest fakt, że cechy wymienione jako istotne są takie same dla geotekstyliów, jak i wszystkich innych geosyntetyków, stosowanych w omawianej funkcji, określonych w normie [16] jako „wyroby pokrewne”. Brak jest odniesienia do cech strukturalnych geosyntetyku, wpływających na jego współpracę z przylegającym materiałem. Tymczasem praktyka stosowania geosyntetyków wykazuje, że właściwości te mają kluczowe znaczenie w uzyskaniu efektu wzmocnienia. Autorzy szeregu publikacji, również dotyczących wzmocnienia warstw niezwiązanych geosyntetykami w nawierzchniach drogowych, zwracają

uwagę na znaczenie współpracy między geosyntetykiem a ułożoną na nim warstwą.

W przypadku geotekstyliów współpraca zależy od wartości siły tarcia. Tarcie jest większe w przypadku grubych geowłóknin igłowanych, mniejsze w przypadku geowłóknin zgrzewanych i geotkanin.

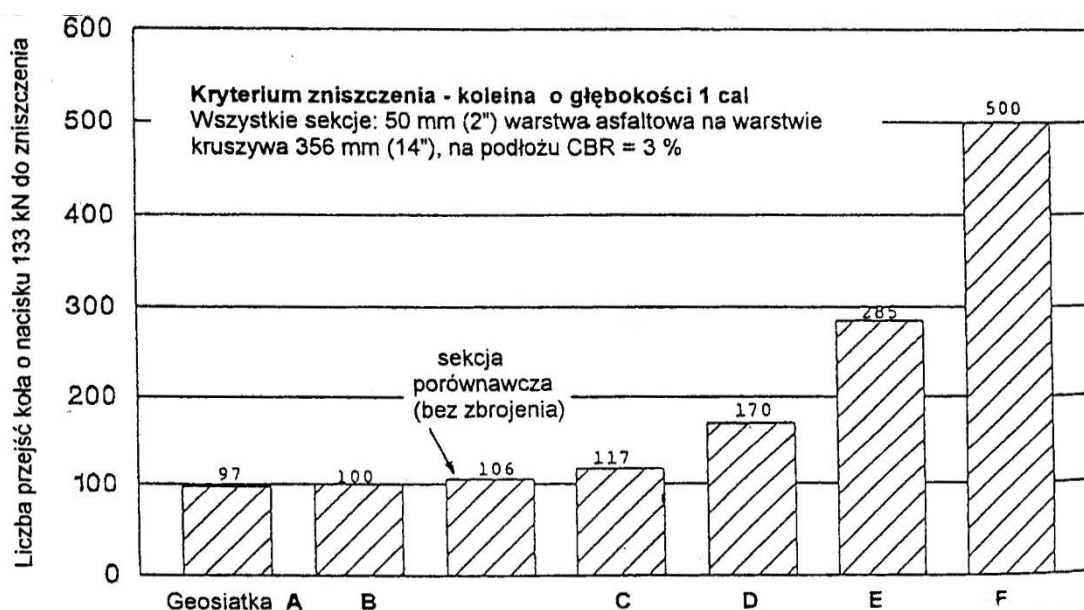
W przypadku geosiatek i georusztów, których struktura umożliwia wnikanie ziaren kruszywa w oczka, kluczowe znaczenie ma ząbienie i opór, jaki żebra stawiają ziarnom kruszywa dążącym do poziomego przemieszczenia pod wpływem sił związanych z oddziaływaniem ruchu pojazdów. Ząbienie to wynika nie tyle z wytrzymałości geosiatki lub georusztu na rozciąganie, ale ze struktury wyrobu, związanej ze sposobem produkcji.

Potwierdzeniem tego, że to właściwości strukturalne, a nie wytrzymałość geosyntetyku na rozciąganie decydują o skuteczności wzmocnienia podbudowy z kruszywa, są na przykład wyniki niezależnych badań przeprowadzonych w USA [20]. Badaniu poddano geosiatki i georuszty o jednakowej wytrzymałości na rozciąganie, wynoszącej 30 kN/m (rys. 4). Pomimo takiej samej wytrzymałości na rozciąganie efektywność geosiatek różniła się nawet pięciokrotnie. Geosiatki A, C i D były geosiatkami przeplatany, geosiatka B to geosiatka ekstrudowana o owalnym przekroju żebra. Geosiatki E i F to georuszty o sztywnych węzłach i prostokątnym przekroju żebra, przy czym wytrzymałość na rozciąganie w przypadku E była mniejsza niż wszystkich pozostałych wyrobów i wynosiła 20 kN/m.

Giroud [8] stwierdza również, że podstawowe znaczenie dla efektywnego wzmocnienia warstwy kruszywa mają:

- kształt (przekrój) i sztywność żeber,
- kształt oczek,
- sztywność węzłów,
- właściwy dobór uziarnienia kruszywa w stosunku do wielkości oczek.

Badania przeprowadzone w Polsce przez Dobruckiego i Szydłę [7] wykazały również, że wzrost wytrzymałości geosyntety-



Rys. 4. Wpływ struktury geosiatek na efekt wzmocnienia warstwy kruszywa według badań w skali naturalnej [20]

ku na rozciąganie nie powoduje istotnej zmiany jego wpływu na nośność warstwy kruszywa ułożonej na słabym podłożu. Badania z wykorzystaniem trzech georusztów, o wytrzymałości na rozciąganie 20, 30 i 40 kN/m, wykazały zbliżony ich wpływ na zmniejszenie wartości składowych pionowych naprężenia w gruncie pod wzmocnioną warstwą kruszywa.

PROJEKTOWANIE NAWIERZCHNI NIEULEPSZONYCH

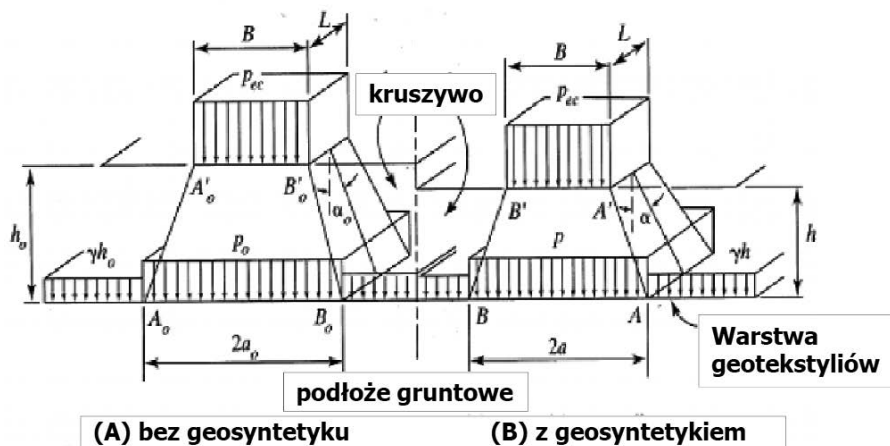
W przypadku projektowania nawierzchni nieulepszonych w większości przypadków, a w szczególności w przypadku dróg tymczasowych, dopuszcza się duże odkształcenia i zakłada się wystąpienie efektu membrany. Ten mechanizm wzmocnienia jest charakterystyczny w przypadku geosyntetyków wiotkich, takich jak: geowłókniny i geotkaniny oraz geosiatki przeplatane lub zgrzewane z cienkich pasm tworzących żebra. Struktura tych geosyntetyków sprawia, że nie jest możliwe uzyskanie efektu bocznego utwierdzenia ziaren kruszywa lub efekt ten jest znikomy.

Pierwszą metodę określania nośności dróg tymczasowych z nawierzchnią nieulepszoną wzmocnioną geosyntetykiem, która zyskała szerszą akceptację, zaproponowali w 1981 roku Giroud i Noiray [10]. W metodzie tej autorzy przyjęli następujące podstawowe założenia:

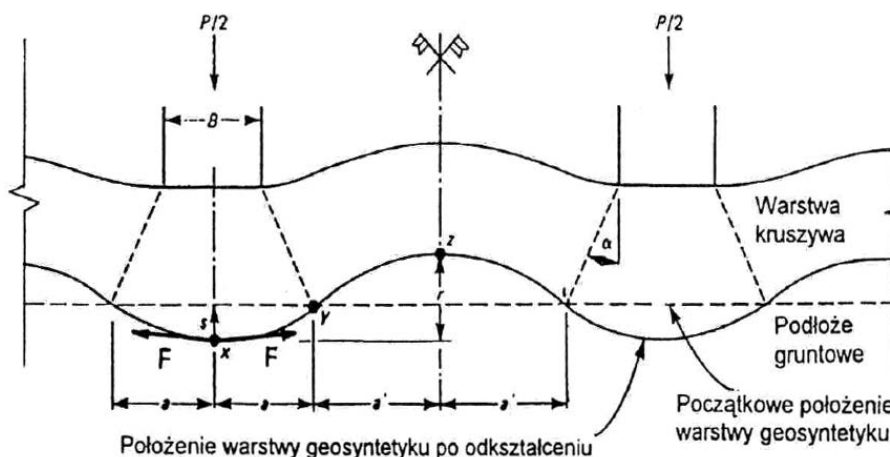
- warstwa kruszywa rozkłada naciski od kół pojazdów ciężarowych, jak przedstawiono na rys. 5.,
- nawierzchnia podlega deformacji, w wyniku której występuje efekt membrany i w geosyntetyku powstaje siła rozciągająca, (rys. 6)
- wartość siły zależy od głębokości koleiny i modułu sieciowego geosyntetyku,
- współczynnik nośności podłoża gruntowego w nawierzchni niewzmocnionej wynosi 3,14, a we wzmocnionej 5,14.

Autorzy metody, uwzględniając geosyntetyki dostępne w czasie jej opracowania, założyli, że do wzmocnienia nawierzchni będą użyte geotekstyli. Metoda jest nadal stosunkowo szeroko wykorzystywana, również w postaci nomogramów, w przypadkach, kiedy dopuszcza się znaczne koleiny.

W miarę upływu czasu i wzrostu liczby zastosowań geosyntetyków w nawierzchniach nieulepszonych zaistniała potrzeba ulepszenia zasad ich projektowania. J.P. Giroud i J. Han opublikowali w 2004 roku nową metodę projektową [9], która umożliwia dokładniejsze uwzględnienie wpływu nie tylko geotekstyliów, ale również georusztów na nośność nawierzchni nieulepszonej. Najważniejsze zalety nowej metody, w porównaniu z wcześniejszą, to:



Rys. 5. Rozkład obciążeń od osi pojazdu ciężarowego w nawierzchni nieulepszonej według Giroud i Noiray [10]



Rys. 6. Deformacja geosyntetyku pod wpływem obciążenia według Giroud i Noiray [10]

- uwzględnienie jakości materiału użytego w warstwie poddanej obciążeniu,
- możliwość uwzględnienia zarówno liczby przejeżdżających i nacisku na oś pojazdów
- uwzględnienie faktu, że oddziaływanie geotekstyliów oraz geosiatek i georusztów jest inne oraz, że geosiatki i georuszty są zróżnicowane pod względem efektywności wzmocnienia,
- weryfikacja zaproponowanej procedury obliczeniowej z wykorzystaniem wyników badań terenowych w pełnej skali.

W przypadku nawierzchni nieulepszonych stosuje się również metodę zaproponowaną przez Korpus Inżynierów Armii USA w 2003 roku [20]. Jest ona prosta i opiera się na wykorzystaniu odpowiedniego nomogramu. Przykład takiego nomogramu od obciążenia pojedynczym kołem przedstawiono na rys. 7.

Nomogram pozwala na ustalenie wymaganej grubości warstwy kruszywa w zależności od nośności podłoża gruntowego, określonej jako iloczyn wytrzymałości gruntu na ścinanie C oraz współczynnika nośności N_c . Wpływ geosyntetyku uwzględnia się poprzez zróżnicowanie wartości współczynnika N_c . Przyjęto następujące wartości:

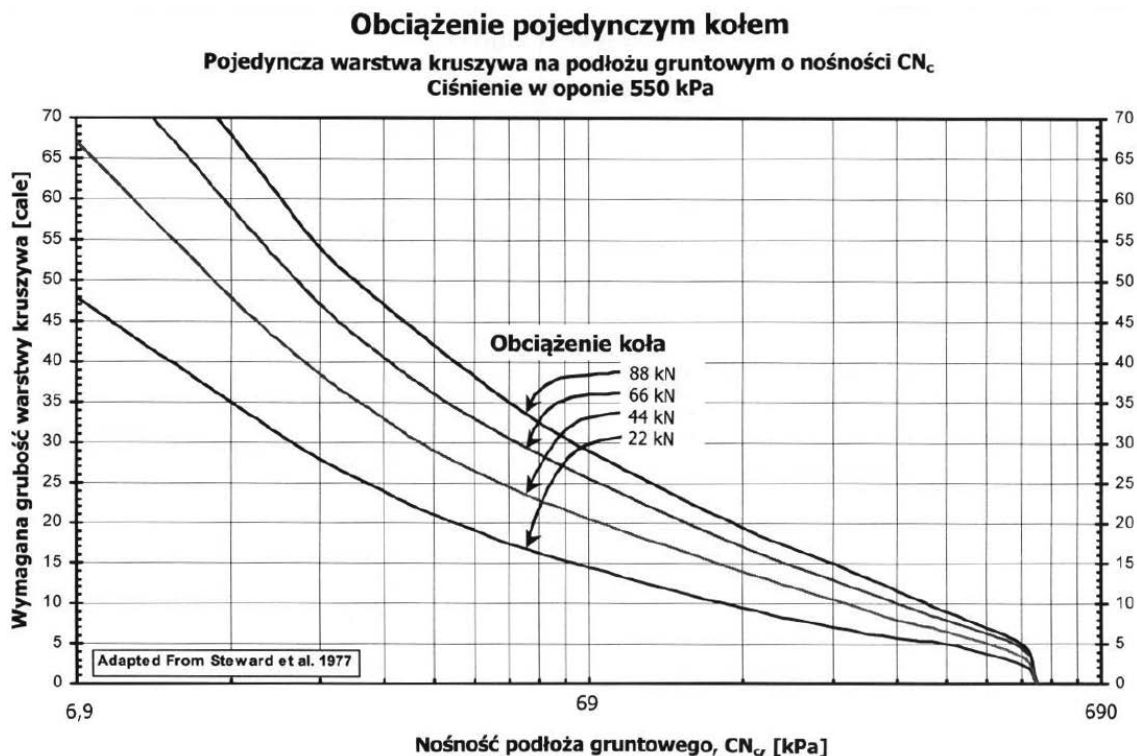
- $N_c = 2,8$ w przypadku braku geosyntetyku,
- $N_c = 3,6$ w przypadku wzmocnienia geotekstyliami,
- $N_c = 5,8$ w przypadku zastosowania georusztu.

Nomogramy opracowano przy założeniu, że obciążenie pojazdem 1000 osi o nacisku 80 kN powoduje powstanie koleiny o głębokości 5 cm. Wadą metody jest duże uproszczenie i brak możliwości uwzględnienia specyficznych właściwości geosyntetyku użytego jako wzmocnienie, poza rozróżnieniem geotekstyliów i georusztów.

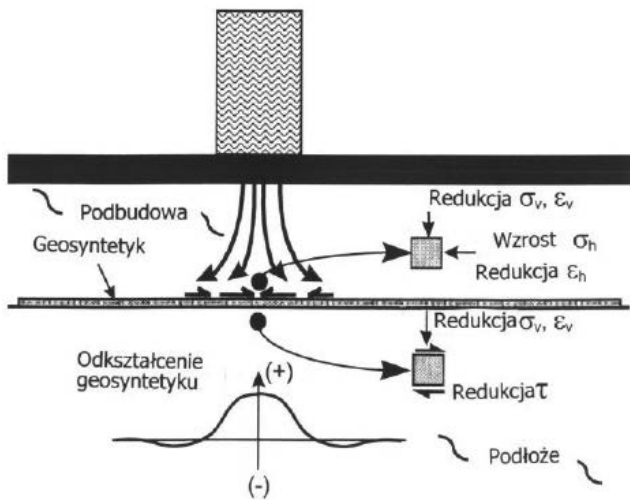
Projektowanie drogowych nawierzchni ulepszonych jest zagadnieniem bardziej skomplikowanym niż nawierzchni nieulepszonych. Odnosi się to również, a może w szczególności, do nawierzchni wzmocnionych geosyntetykami. Dopuszczalne odkształcenia w nawierzchniach ulepszonych są małe. Obliczenia przeprowadzone przez Judyckiego [13] wykazały, że ugięcia nawierzchni ulepszonej w czasie jej eksploatacji wywołują naprężenia w geosyntetyku o wartości poniżej 0,5% jego wytrzymałości na rozciąganie. Największe naprężenia w geosyntetyku powstają w czasie budowy i dla georusztów wynoszą wówczas do 5% wytrzymałości na rozciąganie. Pomimo tak małych odkształceń oraz naprężeń rozciągających w geosyntetyku obserwuje się korzystny wpływ tych materiałów na konstrukcję nawierzchni. Spostrzeżenia takie pojawiły się już w latach osiemdziesiątych XX wieku, w początkowym okresie stosowania geosyntetyków w nawierzchniach.

Berg i inni [5] stwierdzają, że zastosowanie geosyntetyku powoduje korzystne zmiany w stanie naprężenia i odkształcenia w stosunku do układu bez geosyntetyku (rys. 8). Zakres zmian zależy od jakości współpracy geosyntetyku z kruszywem i wynika przede wszystkim z ograniczenia rozpychania warstwy kruszywa na boki oraz skrępowania ziaren kruszywa w strefie kontaktu z geosyntetykiem.

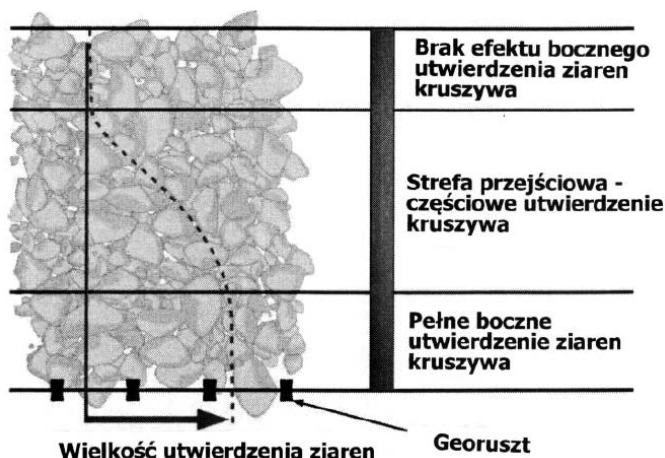
Stwierdzono, że największym wpływem na korzystne zmiany w stanie naprężenia i odkształcenia, a tym samym największą skutecznością we wzmacnianiu (stabilizacji) warstw kruszywa stosowanych w nawierzchniach ulepszonych charakteryzują się georuszty o sztywnych węzłach [8, 20, 21, 22]. Ziarna kruszywa są mocno zazębione z ostrokrawędzistymi i grubymi żebrami georusztu i zaklinowane w oczkach o małej odkształcalności,



Rys. 7. Przykład nomogramu do określenia grubości warstwy kruszywa według Korpusu Inżynierów Armii USA [20]



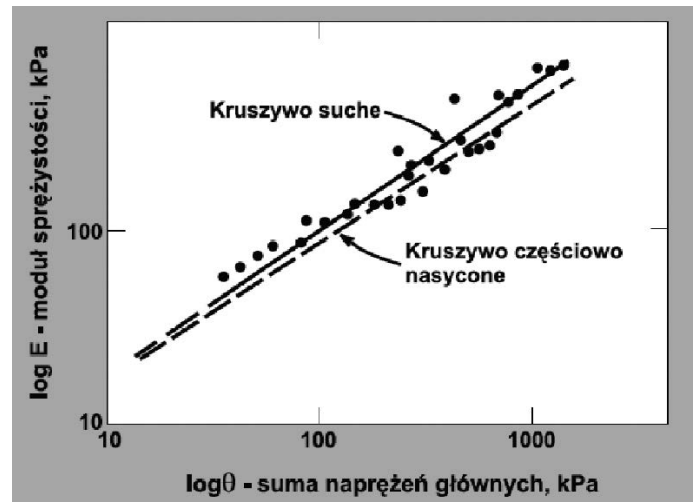
Rys. 8. Zmiany w stanie naprężenia i odkształcenia w stosunku do układu bez geosyntetyku [5]



Rys. 9. Efekt bocznego utwardzenia ziaren kruszywa w georuszcie [18]

w efekcie czego występuje efekt stabilizacji warstwy. Decydujące znaczenie ma zatem efekt bocznego utwardzenia ziaren kruszywa, omówiony we wcześniejszym rozdziale. Pełne utwardzenie boczne ziaren kruszywa występuje w strefie kontaktu z georusztem, natomiast w miarę oddalania się od niego efekt ulega zmniejszeniu, aż do zaniku wpływu georusztu (rys. 9). Wielkość (grubość) strefy pełnego utwardzenia zależy od struktury georusztu. Praktyka wykazuje, że również wśród georusztów o sztywnych węzłach oddziaływanie jest zróżnicowane.

Omówiony wpływ georusztu na zachowanie ułożonej na nim warstwy kruszywa wyraża się wzrostem jej sztywności. Wzrost sztywności wynika z tego, że kruszywo jest materiałem nieliniowym i wartość modułu sprężystości warstwy wykonanej z kruszywa nie jest wartością stałą, i zależy od stanu naprężenia. W przestrzennym układzie naprężenia moduł sprężystości kruszywa E jest tym większy, im większa jest suma naprężeń głównych $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$. Judycki [13] podaje, za Yoderem i Witczakiem, (rys. 10), że wartość modułu sprężystości kruszywa może różnić się nawet dziesięciokrotnie, w zależności od wartości sumy naprężeń głównych. Wzrost naprężeń poziomych σ_2 i σ_3 wskutek oddziaływania georusztu powoduje więc wzrost modułu sprężystości kruszywa i może istotnie wpływać na nośność wykonanej z niego warstwy i nawierzchni.



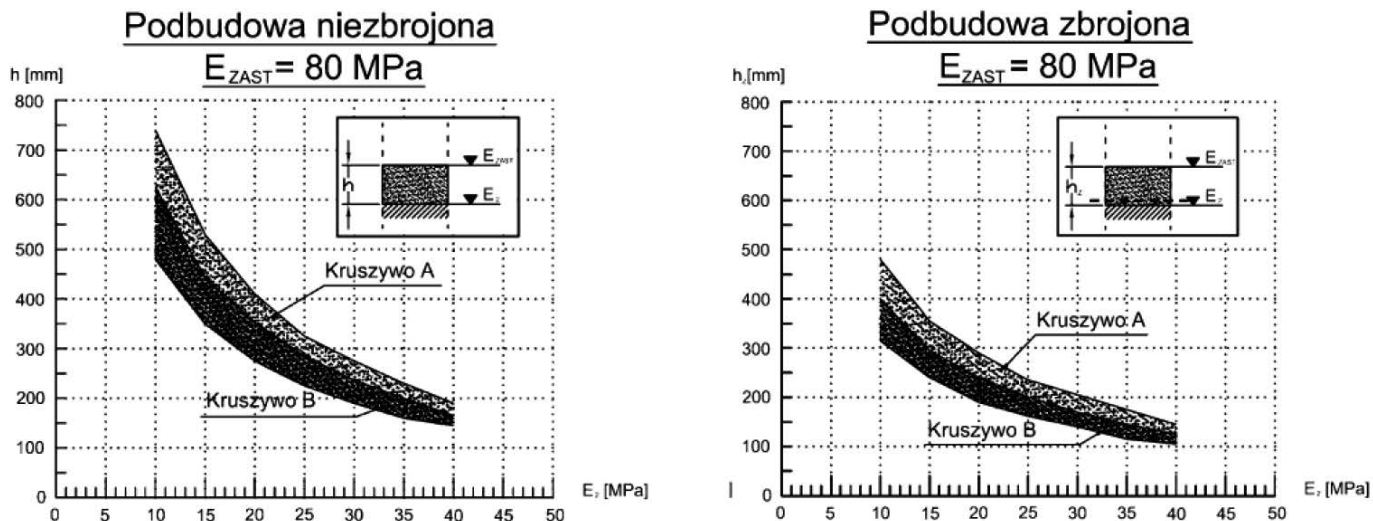
Rys. 10. Typowa zależność modułu sprężystości kruszywa od stanu naprężenia według Yodera i Witczaka [13]

Projektowanie nawierzchni ulepszonych odbywało się początkowo z zastosowaniem nomogramów, opracowanych przeważnie na podstawie doświadczeń z określonymi geosyntetykami, pochodzącymi od konkretnego producenta. Przykład takich nomogramów, pochodzących z połowy lat dziewięćdziesiątych XX wieku, umożliwiających uwzględnienie efektywności georusztów Tensar, przedstawiono na rys. 11 [17]. Nomogramy pozwalają na określenie grubości warstwy kruszywa niewzmocnionej i wzmocnionej dwuosiowym georusztem Tensar przy stwierdzonej nośności podłoża gruntowego i wymaganej wartości zastępczego modułu odkształcenia na powierzchni warstwy kruszywa. Sposób projektowania podbudowy z zastosowaniem tych nomogramów przedstawił m.in. Gołos [11].

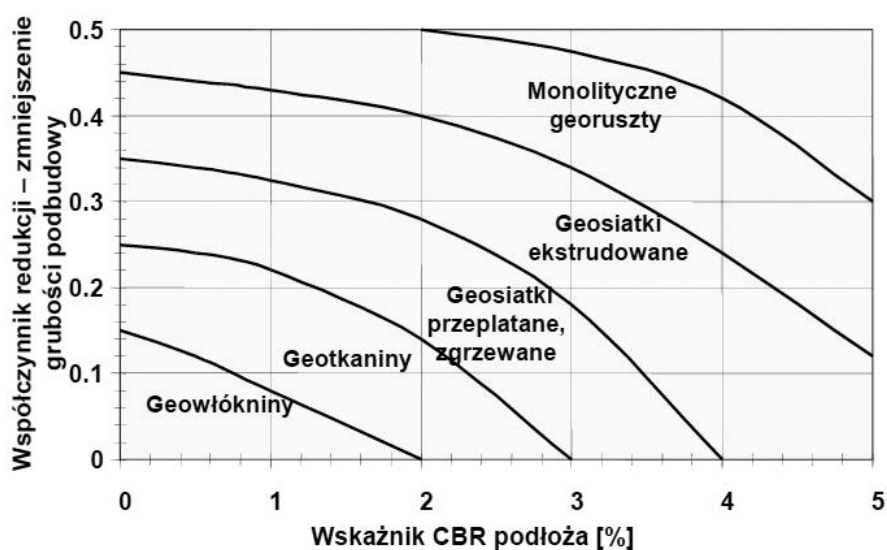
Holenderski Instytut CROW (*Netherlands Information and Technology Centre for Transport and Infrastructure*) przedstawił w latach 2002-2005 propozycję usystematyzowania wpływu różnych rodzajów geosyntetyków na jakość wzmocnienia warstwy kruszywa [6]. Na podstawie dostępnych wyników badań terenowych zaproponowano nomogram, przedstawiony na rys. 12. Można odczytać z niego, w zależności od nośności podłoża i rodzaju geosyntetyku, współczynnik redukcji grubości warstwy podbudowy w stosunku do grubości warstwy, wymaganej w przypadku, gdy nie stosuje się geosyntetyku.

W ostatnich latach są podejmowane próby uwzględnienia georusztów w projektowaniu nawierzchni podatnych z zastosowaniem metod mechanistyczno-empirycznych [12, 13, 19, 22]. Zagadnienie jest bardziej skomplikowane niż ma to miejsce w przypadku metod empirycznych, kiedy projektowanie nawierzchni z geosyntetykiem opiera się na wykorzystaniu zależności lub nomogramów uzyskanych doświadczalnie [6, 9, 17, 20]. Złożony charakter oddziaływania geosyntetyku sprawia, że brak jak dotąd jednoznacznych wniosków co do sposobu wprowadzenia zmian w standardowych obliczeniach nawierzchni z zastosowaniem metod mechanistycznych. Proponuje się stosowanie w obliczeniach skorygowanej wartości modułu sprężystości warstwy lub zróżnicowanie wartości modułu w poziomych strefach warstwy (por rys. 9).

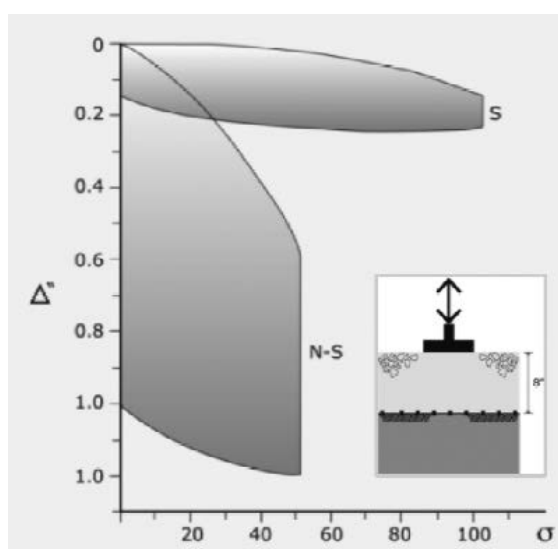
Wyrażane są również opinie, że w przypadku podatnych nawierzchni ulepszonych, wpływu geosyntetyku nie należy oceniać na podstawie badań pod obciążeniem statycznym, ale



Rys. 11. Przykład nomogramów projektowych do określania grubości warstwy kruszywa niewzmocnionego oraz wzmocnionego georusztem Tensar [17]



Rys. 12. Wpływ różnych geosyntetyków na redukcję grubości podbudowy z kruszywa, według CROW [6]



Rys. 13. Zależności odkształcenia od obciążenia dwuwarstwowych układów niewzmocnionych (N-S) i wzmocnionych (S) georusztem w badaniach płytą obciążoną cyklicznie [21]

należy stosować parametry warstwy wzmocnionej geosyntetykiem pochodzące z badań nośności płytą obciążoną cyklicznie. Wpływ georuszta na zachowanie warstwy kruszywa wzmocnionej georusztem w takich badaniach przedstawili Hall i Wayne [12]. Zależności przedstawione na rys. 13 potwierdzają znacznie większą sztywność i moduł sprężystości układów wzmocnionych georusztem (S) w stosunku do niewzmocnionych (N-S). Górne linie ograniczające obszary pokazane na wykresie dotyczą pierwszego obciążenia płyty, natomiast dolne – setnego.

Badania takie są jak dotąd rzadkością ze względu na skomplikowaną aparaturę badawczą i znaczny koszt. Duży wpływ indywidualnych cech konkretnych wyrobów sprawia też, że wyniki badań mogą być stosowane tylko w odniesieniu do konkretnych geosyntetyków wykorzystanych w doświadczeniach.

PODSUMOWANIE

Ponad trzydziestoletni okres stosowania geosyntetyków do wzmocniania warstw kruszywa w nawierzchniach drogowych

pokazał, że jest możliwe osiągnięcie znacznych korzyści dzięki użyciu geosyntetyków. Korzyści te wiążą się przede wszystkim z oszczędnościami w zużyciu kruszyw oraz wydłużonym okresem trwałości nawierzchni. Z tego względu wzmocnienie warstw kruszywa geosyntetykami jest zaliczane do technologii sprzyjających zasadom tzw. polityki zrównoważonego rozwoju (*sustainable development*).

Podstawowym warunkiem uzyskania korzyści jest prawidłowe zaprojektowanie nawierzchni z uwzględnieniem wpływu geosyntetyku na mechanikę pracy nawierzchni. Na przestrzeni lat wiedza w tym zakresie poszerzyła się, jednak nadal istotne zagadnienia są przedmiotem badań. Dzięki stosowaniu nowoczesnych metod i sprzętu oraz ich rozwojowi jest możliwe coraz lepsze zrozumienie wpływu geosyntetyku na stan naprężenia i odkształcenia w szczególności w nawierzchniach podatnych.

LITERATURA

1. Alenowicz J.: Wpływ włókniny na nośność dwuwarstwowego podłoża gruntowego. Praca doktorska. Wydział Budownictwa Lądowego Politechniki Gdańskiej, 1989.
2. Alenowicz J.: Wzmocnienie geosyntetykami drogowych podbudów z kruszyw stabilizowanych mechanicznie. II Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce 1996, 237-244.
3. Alenowicz J.: Specyfikacje geosyntetyków stosowanych w podbudowach nawierzchni drogowych. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2010, 80-83
4. Alenowicz J., Dembicki E.: Recent laboratory research on unpaved road behaviour. *Geotextiles and Geomembranes.*, vol. 10, 1991, 21-34.
5. Berg R. R., Christopher B. R., Perkins S.: Geosynthetic reinforcement of the aggregate base/subbase courses in pavement structures. *Geosynthetic Materials Association, USA*, czerwiec 2000.
6. CROW, *Dunne asfaltverhardingen: dimensionering en herontwerp*. Publicatie 157, 2002 & Publicatie 189, 2005 (Holandia).
7. Dobrucki D., Szydło A.: Badania podbudowy z kruszywa kamiennego wzmocnionego geosiatką. VIII Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce 2002, 191-197.
8. Giroud J. P.: An assessment of the use of geogrids in unpaved roads and unpaved areas. *Geogrid Symposium, Londyn*, czerwiec 2009.
9. Giroud J. P., Han J.: Design method for geogrid-reinforced unpaved roads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, August 2004, 775-786 (cz. 1 Development of design method) i 787-797 (cz. 2 Calibration and applications).
10. Giroud J. P., Noiray L.: Geotextile-reinforced unpaved road design., *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE*, 9/1981, vol. 107, 1233-1254.
11. Gołos M.: Metody projektowania podbudów z kruszyw zbrojonych geosiatkami na słabym podłożu. *Drogownictwo* 7-8/2005, 222-228.
12. Hall C. D., Wayne M. H.: The contribution of geogrid developments to the unbound layers in flexible pavement methodology. XXVIII Baltic Road Conference, Wilno, sierpień 2013.
13. Judycki J.: Rola geosiatek Tensar przy wzmocnianiu słabych podłoży gruntowych pod nawierzchniami ulepszonymi. *Magazyn Autostrady*, nr 1-2/2005, 44-49.
14. Kazimierowicz-Frankowska K.: Geosyntetyczne zbrojenie jako jeden ze sposobów wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. *Magazyn Autostrady*, nr 4/2013, 50-57.
15. Perkins S.W., Ismeik M.: A synthesis and evaluation of geosynthetic-reinforced base layers in flexible pavements. *Geosynthetics International*, 1997, vol. 4, no. 6, Part I – 549-604, Part II – 605-621.
16. PN-EN 13249:2002/A1:2006, *Geotekstyli i wyroby pokrewne. Właściwości wymagane w odniesieniu do wyrobów stosowanych do budowy dróg i innych powierzchni obciążonych ruchem (z wyłączeniem dróg kolejowych i nawierzchni asfaltowych)*.
17. Prah M., Beckmann U.: Use of Tensar geogrids in road construction. Survey for dimensioning unbound road structural design. BRP Consult, Braunschweig, 1994.
18. Rakowski Z., Kawalec J.: Mechanically stabilized layers in road construction, XXVII Baltic Road Conference, Ryga, sierpień 2009.
19. Reck N. C.: Mechanistic empirical design of geogrid reinforced paved flexible pavements. *Geogrid Symposium, Londyn*, czerwiec 2009.
20. Use of geogrids in pavement engineering. US Army Corps of Engineers, Washington DC, 2003.
21. Webster S. L.: Geogrid reinforced base courses for flexible pavements for light aircrafts. Technical report GL-93-6, US Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1993.
22. Zornberg J. G., Gupta R.: Geosynthetics in pavements: North American contribution. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil 2010, 379-398.