

GRUNTY ZBROJONE GEOSYNTETYKAMI, ZASTOSOWANIA NA TERENACH INTENSYWNEJ DZIAŁALNOŚCI GÓRNICZEJ.

Ajdukiewicz Jacek, mgr inż., członek IGS – International Geosynthetics Society, Easley, USA; Zarządca Przedsiębiorstwa Realizacyjnego INORA Sp. z o.o., Gliwice.

Zych Jan, prof. dr hab. inż., Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 2., 44-100 Gliwice.

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki obserwacji przemieszczeń punktów położonych na nasypach: pierwszym (starym) wybudowanym, niezbrojonym geosyntetykami i drugim – nowym – zbrojonym geosyntetykami przy uwzględnieniu górotworu i dokonanej eksploatacji górniczej. Przedstawiono również wyniki obliczeń i system zbrojenia geosyntetycznego nowego nasypu, do budowy którego zastosowano wydobytą bezpośrednio z podziemi skalę płonną. Z prowadzonych na bieżąco pomiarów wynika jednoznacznie, iż koncepcja projektu nowego nasypu była słuszną i intensywne oraz duże przemieszczenia terenu nie znajdują odzwierciedlenia na wybudowanej nawierzchni drogi.

Artykuł opisuje doświadczenia z zakresu stosowania nowoczesnych materiałów geosyntetycznych wykonanych z PVA (poliwinylalkoholu) w konstrukcjach stromych i wysokich nasypów infrastruktury komunikacyjnej na terenach aktywnych górniczo (IV kategoria szkód górniczych).

1. Wstęp.

Oddany do użytku 10 października 2002 roku wiadukt drogowy w ciągu drogi wojewódzkiej nr 933 (Wodzisław Śl. – Pszczyna; Rybnicki Okręg Przemysłowy; woj. śląskie; Polska) zdaniem autorów z całego szeregu względów zasługuje na szczególne przedstawienie.

Droga wojewódzka nr 933 jest najważniejszą arterią komunikacyjną miasta Jastrzębie Zdrój przebiegającą w kierunku wschód-zachód. Droga ta w Jastrzębiu-Bziu przecina tory górniczych linii kolejowych o dużym natężeniu ruchu. Dla realizacji bezkolizyjnego ruchu w ciągu tej drogi, nad torami, którymi dokonuje się wywozu węgla, wydobywanego z trzech kopalń w ilościach rzędu 40 tys. ton/dobę, wybudowany został w latach siedemdziesiątych wiadukt. Wiadukt ten, nazwijmy go stary, jak i tory linii kolejowej od połowy lat siedemdziesiątych podlegały wpływowi eksploatacji górniczej. W wyniku wpływów tej eksploatacji oraz podnoszenia torów wyczerpana została pionowa skrajnia pod wiaduktem i zaszła potrzeba wybudowania nowego wiaduktu. Wiadukt nowy wybudowany został w 2002 r, równoległe do wiaduktu starego, po jego stronie południowej.

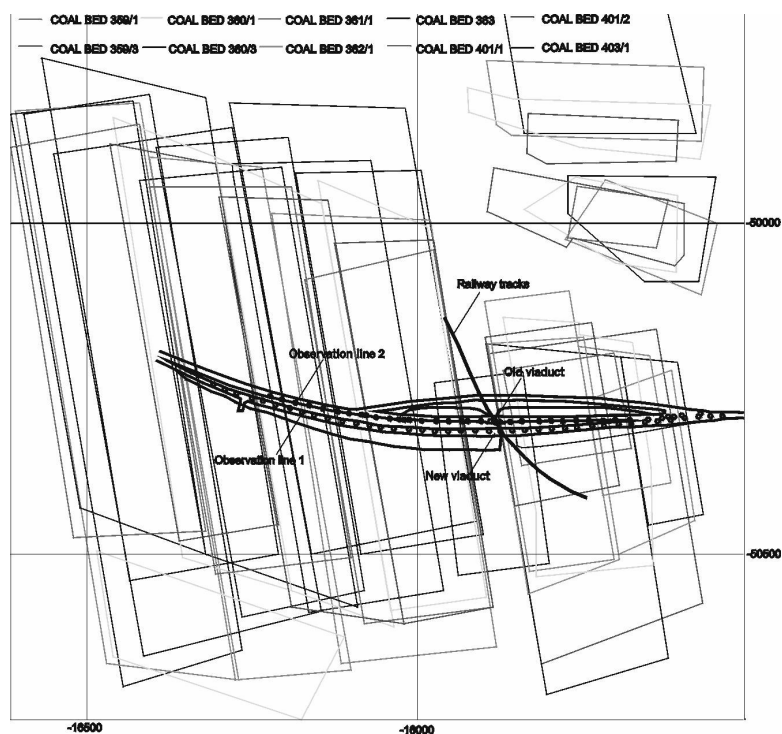
Wiadukty te położone są na granicy obszarów górniczych dwóch kopalń: „Zofiówka” i „Pniówek”, co utrudnia właściwą koordynację eksploatacji w tym rejonie.

2. Budowa geologiczna złożeń w rejonie wiaduktów.

Górotwór w rejonie przedmiotowych wiaduktów zbudowany jest z warstw czwartorzędowych, trzeciorzędowych i karbonu.

Czwartorzęd zbudowany jest z glin, piasków i żwirów. Wykazuje dużą zmienność w wykształceniu litologicznym oraz znaczne zmiany grubości na niedużych odległościach. Przeciętna grubość tych warstw wynosi od 30 do 50 m.

Trzeciorzęd zbudowany jest z warstw ilastych, marglistych miejscami zapiaszczonych, przewarstwionych cienkimi wkładkami i soczewkami pyłów i piasków pylastych. Wkładki piaszczyste stanowią odizolowanie horyzonty wodne zawierające słone wody reliktywne. Miąższość utworów trzeciorzędowych wynosi i około 330 m.



Karbon produktywny reprezentowany jest przez warstwy orzeskie, rudzkie i siodłowe zalegające monoklinalnie na wschód pod kątem 2° do 8° .

Warstwy orzeskie wykształcone są głównie jako skały ilaste i mułowce. Skały piaskowcowe występują podrzędnie

Warstwy rudzkie w górnej części wykształcone są w facji ilowcowo-mułowcowej natomiast w dolnej części przeważają piaskowce nad ilowcami i mułowcami.

Warstwy siodłowe zbudowane są głównie z piaskowców gruboławicowych, grubo i średnioziarnistych czasem z wkładkami zlepieńców. Łupki ilaste i piaszczyste tworzą warstwy o niedużej miąższości i występują głównie w stropie i spągu pokładów węgla.

W rejonie wiaduktów występują zaburzenia tektoniczne, z których za najważniejsze należy przyjąć:

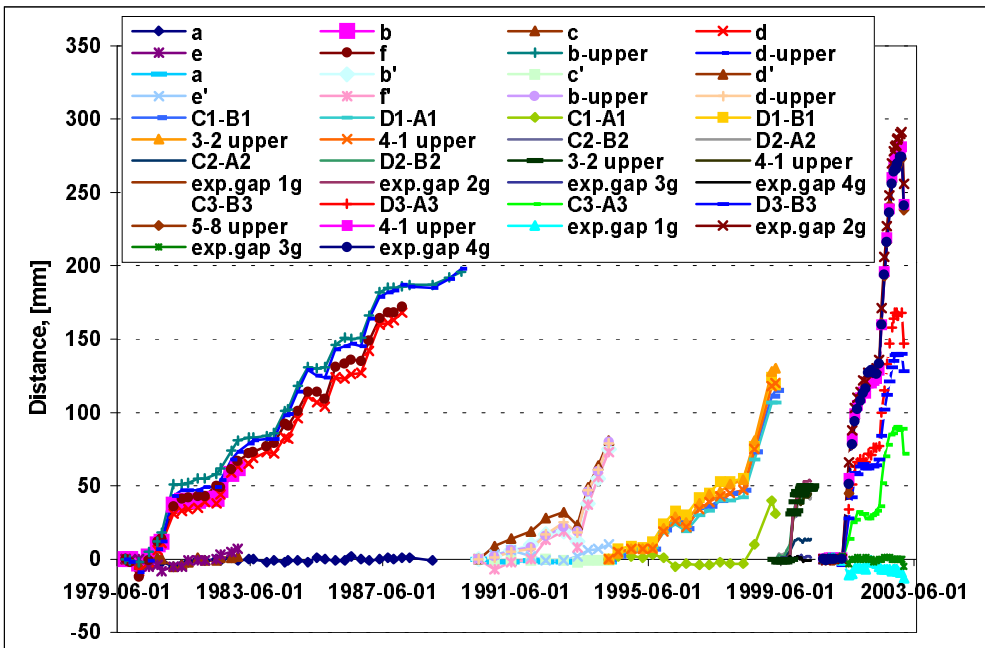
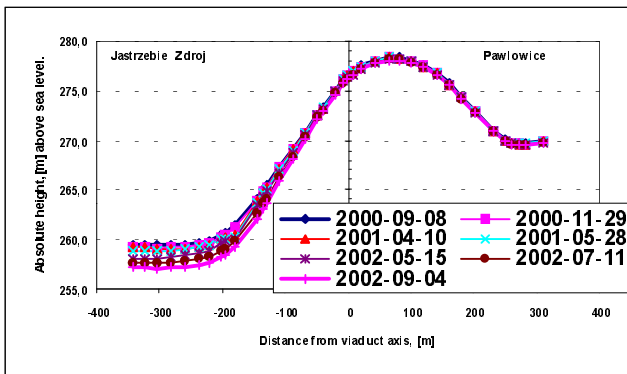
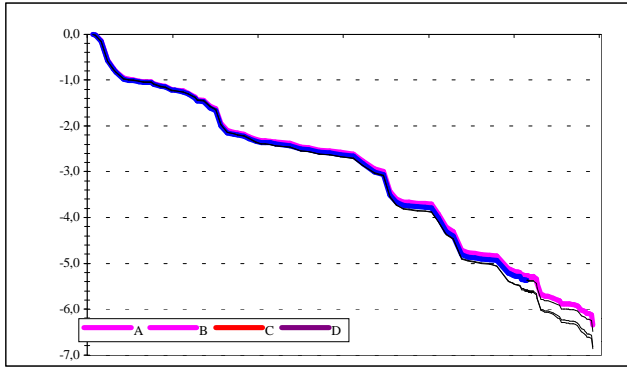
1. uskoki „Pniówkowski” o zrzucie 25-35 m,
2. uskoki „Centralny” o zrzucie 10-20 m

Inwestycja zlokalizowana została na obszarze IV kategorii szkód górniczych. Silnie napięte zwierciadło wód gruntowych obecnie, wskutek odkształceń pogórnich, znajduje się na głębokości około $2\div 3$ m, bezpośrednio pod 2-metrową warstwą gliny, na której posadowiony jest nasyp. W ciągu ponad 30-letniej działalności wydobywczej prowadzonej w głębi ziemi pod nasypami doprowadzono na obszarze inwestycji do $5\div 11$ metrowego obniżenia terenu, a w najbliższych latach nastąpi dalsze jego osiadanie o rzęd co najmniej 4,5 metra. Przy tak niekorzystnych warunkach gruntowo-wodnych, wyjątkowo słabym podłożu i specyficznych założeniach geometrycznych, przyjęto, że rozwiązaniem najlepszym pod względem technicznym i ekonomicznym będzie wzmocnienie nasypu zbrojeniem geosyntetycznym.

W bezpośrednim podłożu dróg najazdowych w nasypach niekontrolowanych pochodzenia antropogenicznego, stwierdzono występowanie swobodnego zwierciadła na powierzchni lub na niewielkiej głębokości do 0,5 m pod powierzchnią terenu. W podłożu nasypów występuje również napięte zwierciadło wód gruntowych nawiercone w stropie warstw gruntów sypkich, a więc w zmiennej głębokości od 4,5 do 9,1 m p.p.t. W rejonie nowo wybudowanego wiaduktu ustabilizowane zwierciadło wód gruntowych występowało na głębokości od 0,9 do 2,0 m p.p.t., a w otworach badawczych po jego wschodniej stronie występowały wypływy na powierzchnię lub zwierciadło wód stabilizowało się na małej głębokości.

3. Dokonana eksploatacja górnicza

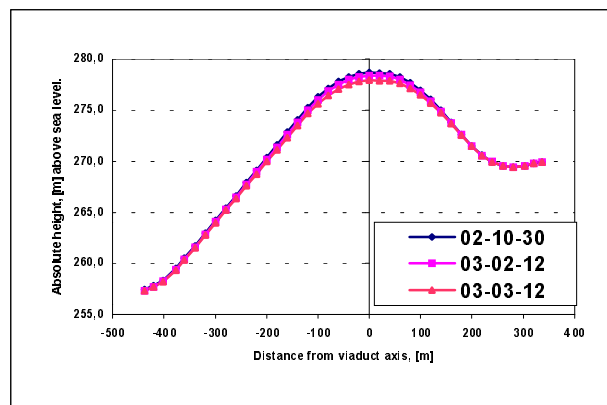
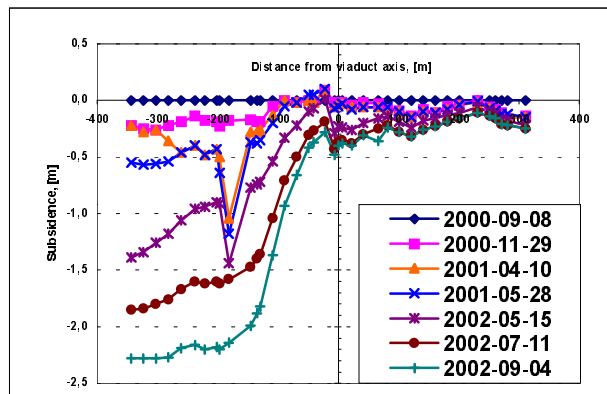
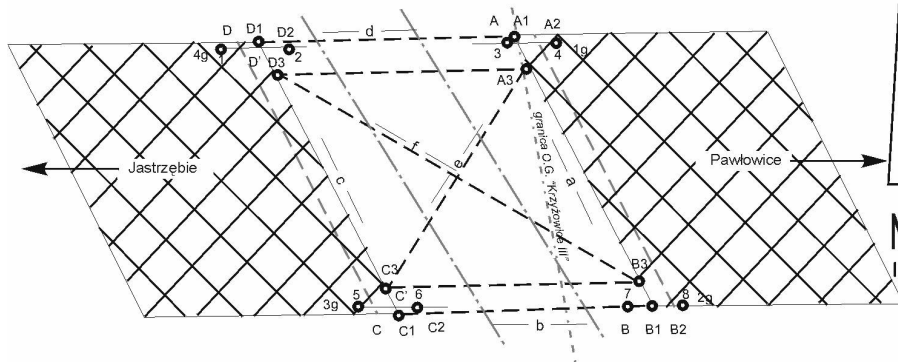
W rejonie wiaduktów w ciągu drogi wojewódzkiej nr 933 eksploatację górniczą prowadzą kopalnie „Zofiówka” i „Pniówek”. Pomiędzy tymi kopalniami, wzdłuż granicy ich wydobyć, został ustanowiony filar graniczny o szerokości od 50 do 80 m (vide rys. 1). Konsekwencją ustanowienia filara było nakładanie się krawędzi eksploatacyjnych w wielu pokładach (rys. 2). W rejonie wiaduktów kopalnia „Zofiówka” prowadziła eksploatację w dziewięciu pokładach, a kopalnia „Pniówek” w siedmiu pokładach. Zasadnicze dane dotyczące dokonanej eksploatacji przedstawiono w Tablicy 1, natomiast zakres dokonanej eksploatacji przedstawiono na Rys. 1.

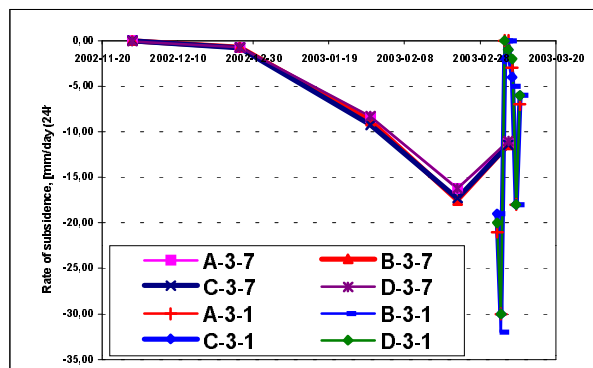
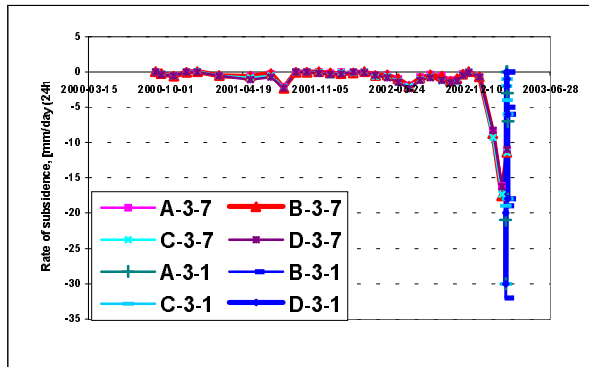
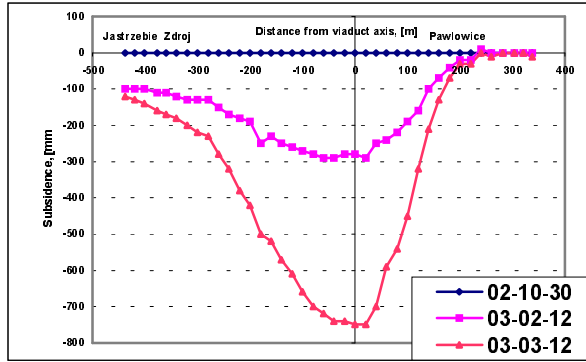


Tablica 1. Eksploatacja dokonana przez kopalnie „Zofiówka” i „Pniówek”.

Pokład	Ściana.	Grubość m	Głębokość m	Czas eksploatacji
KOPALNIA „ZOFIÓWKA” – eksploatacja dokonana				
359/1	F-5, F-7, F-9	1,2-1,6	496-512	1976-1981
359/3	F-5, F-7, F-9	1,6-1,7	509-516	1979-1983
360/1	F-9, F-11, F-13	2,1-2,2	525-535	1983-1986
360/3	F-9	1,3-1,4	530-540	1986-1987
361	F-9, F-11	2,9-3,0	553-565	1991-1993

302/1	F-9, F-11	1,2-1,0	507-518	1994-1997
363	F-15, F-17, F-19	2,6-2,8	617-633	1997-1999
401/2	F-15, F-17	2,3-2,4	638-647	1999-2000
403/1	H-7, F-15	3,4-3,5	648-659	1989-2001
KOPALNIA „PNIÓWEK” – eksploatacja dokonana				
359/1	S-1, S-3, S-4	1,3-1,4	517-552	1974-1976
359/3	S-2, S-3, S-4	1,2-1,5	522-570	1975-1977
360/1	S-2, S-6	2,0-2,3	538-567	1976-1978
361	S-1, S-2, S-3	1,7-2,4	564-587	1980-1984
362/1	S-2, S-3	1,4-1,6	577-585	1983-1985
363	S-1, S-2, S-9, S-9A	2,1-2,4	628-674	1987-1993
401/1	S-8	1,7-1,9	640-650	1995-1996





4. Budowa wysokiego i stromego nasypu z gruntów zbrojonych geosyntetykami.

Punktem centralnym budowy nowego, zbrojonego geosyntetykami nasypu, był zaprojektowany przez dr inż. J. Śliwkę żelbetowy wiadukt, przebiegający nad górniczymi liniami kolejowymi. Światło pionowe wiaduktu wynosi 9,0 m; zachowano w projekcie rezerwę na osiadania terenu i korektę niwelety toru kolejowego rzędu 4,5 m. Roboty ziemne obejmowały łącznie wykonanie dwóch nasypów – najazdów, o łącznej kubaturze rzędu 120 000 m³ i o łącznej długości 775 m. Najazdy wytyczone zostały łukiem o promieniu R=2500 m. Pochylenia skarp nasypów na łuku wewnętrznym wynoszą 1:0,7. Maksymalna wysokość nasypu jest równa 16,5 m. Obciążenie użytkowe od pojazdów samochodowych przyjęto jako q= 33,3 kN/m².

Najprawdopodobniej nowy obiekt jest pierwszą w Europie – a być może i na świecie – budowlą wykonaną na obszarze czwartej, a więc najwyższej dopuszczającej realizację obiektów inżynierskich, kategorii szkód górniczych – z zastosowaniem jako materiału nasypowego bardzo silnie zasolonego i zsiarczonego kamienia przywęglowego, ujętego konstrukcyjnie w kształt i formę poszczególnych warstw nasypu, składającego się z szeregu warstw zazbrojonych odpowiednio obliczonymi i dobranymi geosyntetykami. Materiał mineralny (świeży, nieodprężony kamień przywęglowy), dostarczany bezpośrednio z kopalni, formowano w warstwy konstrukcyjne (o grubości 50 i 70 cm) w postaci pełnych materacy, półmateracy i ćwierćmateracy wykonanych z geosiatek wyprodukowanych z materiału (włókien) o najwyższej odporności chemicznej (zakres odporności na pH: 2÷12 w okresie do 120 lat): PVA (poliwinylalkoholu). Fakt usytuowania budowy na terenach czynnej eksploatacji górniczej wymagał szczególnej ostrożności konstruktorów przy projektowaniu i przyjmowaniu rozwiązań technologicznych. W trakcie budowy występowały problemy, które mogły zaważyć na stateczności całego obiektu, co wymagało stałych konsultacji z odpowiednimi specjalistami i jednostkami nadzorującymi realizację oraz podejmowania racjonalnych decyzji inżynierskich, z korektą projektu włącznie.

Dotychczas czynny stary wiadukt tracił skrajnię ze względu na osiadania pogórnice (vide pkt.5), co groziło wstrzymaniem stałego wywozu węgla z trzech kopalń. Zbrojenie nowych konstrukcji materiałami geosyntetycznymi było więc w istniejących okolicznościach sprawą bezdyskusyjną. Należało jednak wykonać szereg prac przygotowawczych związanych ze wzmocnieniem podłoża. W założeniach projektowych przyjęto, że obiekt do 2011 roku osiadzie o 4,5 m.

W kształtowaniu geometrii konstrukcji wykorzystano istniejące najazdy dotychczasowego, zlokalizowanego (rys. 3,4) obok, lecz uszkodzonego nasypu dla częściowego oparcia na nim północnych zboczy nowego nasypu.

Całość konstrukcji wykonano w oparciu o: doświadczenia własne [5-10], normy kilku krajów europejskich [11-15] jak również dostępną w tym zakresie fachową literaturę przedmiotu [16-18].

Po splantowaniu terenu oraz po wykonaniu drenaży „francuskich” w podstawie nasypu, przystąpiono do przygotowania podłoża pod zasadnicze warstwy konstrukcji. Celem podwyższenia wielkości sił zapewniających stateczność budowli, w strefie posadowienia wykonano materac wzmacniający z mechanicznie zagęszczonego kruszywa, w dwustronnej osłonie (w pełnym materacu) z geosiatki FORTTRAC® R 250/30-30M, rozwijanej prostopadle do osi nasypu. Grubość warstwy tłucznia wypełniającego tę warstwę wyniosła 70 cm. Kolejnym etapem było formowanie warstw konstrukcyjnych nasypu o grubości 50 cm każda. Geosyntetyczne wkładki zbrojące stanowiły siatki FORTTRAC® M. W obliczaniu poszczególnych stopni zastosowano geotekstyl FIBERTEX® typu F-4M. Dla wzmocnienia korpusu nasypu – co siódmą warstwę wykonano w formie pełnego materaca. Odpowiedni naciąg siatki uzyskano dzięki systemowi naciągu siatek, opracowanego i dostosowanego przez Przedsiębiorstwo INORA. Poszczególne warstwy formowane były specjalnymi, pozycjonowanymi wewnątrz nasypu szalunkami (Fot.1). Podstawowe parametry zastosowanych geosyntetyków zestawiono w Tablicy 2.

Tablica 2. Skrócona charakterystyka techniczna niektórych zastosowanych geosyntetyków.

Rodzaj materiału: producent geosiatek: <i>HUESKER Synthetic</i> producent geowłókniny: <i>FIBERTEX A/S</i>			FORTTRAC R250/30-30M	FORTTRAC R80/30-30MP	FORTTRAC R55/30-30MP	FIBERTEX F-4M
Numer Technicznej	Aprobaty	Jedn.	AT/2000-04-0977	AT/2000-04-0977	AT/2000-04-0977	AT/99-04-0707
Nominalna doraźna wytrzymałość [F _k] na rozciąganie (UTS)	kN/m					
-kierunek wzdłużny	min.		=250	=80	=55	=18
-kierunek poprzeczny	min.		=30	=30	=30	=19
Wydłużenie przy zerwaniu:	%					
-kierunek wzdłużny	max.		≤6	≤6	≤6	65
-kierunek poprzeczny	max.		≤6	≤6	≤6	80
Wytrzymałość obliczeniowa dla 120 lat eksploatacji (przy max. wydłużeniu ε≤3% dla 120 lat) [F _{d 120}]	kN/m	min.	82,5	25,2	17,3	-



Szczegółowe obliczenia konstrukcyjne wykazały konieczność użycia trzech typów siatki FORTRAC®: R250/30-30M, R80/30-30MP oraz R55/30-30MP, zapewniających najefektywniejszy ekonomicznie stosunek wytrzymałości długoterminowej (F_d) do znamionowej (UTS) przy założonej wielkości dopuszczalnego wydłużenia zbrojenia: podczas zabudowy do 2% i w okresie 120-to letniego, założonego okresu eksploatacji obiektu, o dalsze max. 1%. Założono tu bezpieczną jeszcze 2 % rezerwę wydłużenia z tytułu wystąpienia szkód górniczych, tj. przyjęto max. łączne wydłużenie w stanie bez odkształceń pogórnicych: $\epsilon \leq 3\%$. Przykładowo na rys. 3 podano w jednym z przekrojów wyniki obliczeń dla stanu budowlanego i stanu eksploatacji. Łączna ilość zużytych wyrobów geosyntetycznych to blisko 240 000 m². Wypełnienie materacy stanowił mulowiec - kamień przywęglowy pochodzący z bieżącej eksploatacji górniczej KWK „Pniówek”, który zawierał rząd 10% czystego węgla. W obawie o samozapłon tego materiału, w trakcie formowania nasypu, poszczególne zbrojone warstwy konstrukcyjne były przesypane warstwami piasku o grubości ca. 10 cm. Drenaże „francuskie”, o zróżnicowanych wymiarach (od 50 do 120 cm głębokości), wykonano z geotekstyliów FIBERTEX® typu F-4M, z wypełnieniem naturalnym, mineralnym materiałem dobrze zagęszczalnym, o frakcji 40/63 mm. Również i w tym przypadku obiekt oddano do użytku bez żadnego okresu oczekiwania na konsolidację.

Nadrzędnym celem tego przedsięwzięcia ze strony jednostki autorskiej było udowodnienie możliwości wykorzystania świeżego kamienia przywęglowego jako taniego materiału do budowy konstrukcji inżynierskich, dróg i autostrad. W szczególności miano tu na myśli ciąg planowanej do budowy w najbliższych latach autostrady A1: Gliwice – Gorzyczki, przebiegającej na długich odcinkach po terenach aktywnych górniczo.



5. Wpływ dotychczasowej eksploatacji górniczej na wiadukty

Pomiary na starym wiadukcie prowadzone były od 1979 r. Na wiadukcie założone zostały repery (rys. 5), na których mierzone były osiadania oraz zmiany szczelin dylatacyjnych. W związku z tym, że w latach 1985, 1990, 1994 i 2000, wykonywane były remonty wiaduktu, część reperów ulegała czasowo uszkodzeniu. Repery te były następnie odtwarzane.

Na podstawie wykonanych pomiarów geodezyjnych oraz interpolacji osiadań w kilku krótkich okresach (wymiana reperów), można było uzyskać osiadanie wiaduktu od rozpoczęcia ujawniania się wpływów eksploatacji na wiadukt, to jest w latach 1979-2002. Osiadania reperów na wiadukcie starym w okresie 1979-2002 przedstawiono na rys. 4. Maksymalne osiadanie wiaduktu w tym okresie wyniosło 6,86 m.

Na wiadukcie mierzone były odległości pomiędzy reperami oraz szerokości szczelin dylatacyjnych (rys. 3). Wyniki pomiarów w poszczególnych okresach pomiędzy remontami wiaduktu przedstawiono na rys. 5. Największe rozwarzenie szczelin dylatacyjnych nastąpiło w latach 200-2002 i wyniosło około 290 mm. Ze względu na to, że wiadukt jest usytuowany na filarze granicznym (rys. 2), na wiadukcie wzdłuż osi drogi występowały odkształcenia rozciągające.

Osiadanie wiaduktu starego w okresie 09.2000 r do 09.2002 r przedstawiono na rys. 6 i 7. Maksymalne osiadania za ten dwuletni okres wyniosły 2,28 m. W kwietniu 2001 na nasypie dojazdowym od strony zachodniej powstała deformacja nieciągła w postaci proggu terenowego.

Osiadanie nowego wiaduktu w okresie od 30.10.2002 r do 12.03.2003 r przedstawiono na rys. 8 i 9. Wiadukt nowy w tym okresie osiadł maksymalnie 0,75 m.

Dla obiektów na powierzchni istotna jest prędkość osiadania powierzchni terenu. Z pomiarów wynika, że ta prędkość osiadania zwłaszcza w ostatnim okresie uległa znacznemu zwiększeniu. Prędkość osiadania starego wiaduktu w okresie od 09.2000 r do 11.03.2003 r przedstawiono na rys. 10. Maksymalna prędkość osiadania do końca 2002 r była mniejsza od 2,5 mm/dobę. W związku z rozpoczęciem pod koniec grudnia 2002 r eksploatacji pierwszego pokładu w filarze granicznym i bezpośrednio pod wiaduktami, prędkość osiadania w 2003 r znacznie wzrosła, osiągając z pomiarów wykonywanych w okresach miesięcznych maksymalnie 17,5 mm/dobę (rys. 11). W okresie od 04.03.2003 r do 11.03.2003 r na wiaduktach wykonywano codziennie pomiary osiadania. Pomiary tych wynika, że prędkość osiadania była inna w każdym dniu tygodnia i wynosiła od 0 do 32 mm/dobę. Pomiary te potwierdzają wyniki badań [2+4] dotyczących wpływu postępu frontu i przerw w eksploatacji na prędkość osiadania. Świadczą również o dużym zruszeniu górotworu, co będzie okolicznością niekorzystną przy dalszej planowanej eksploatacji pod wiaduktami.

Literatura

1. **Fuchs R., Jaworski W., Łukosz M.: Przystosowanie wiaduktu w ciągu drogi wojewódzkiej nr 933 w Jastrzębiu-Bziu na wpływy eksploatacji górniczej.** VI Konferencja Naukowo – Techniczna: Profilaktyka oraz usuwanie ujemnych wpływów eksploatacji górniczej na środowisko w Rybnickim okręgu przemysłowym. Rybnik – październik 2001. s. 93-100.
2. **Zych J.: Wpływ postępu frontu eksploatacyjnego na przebieg osiadań w czasie.** Międzynarodowa Konferencja: V Szkoła Geomechaniki. Katedra Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Ustroń – 16-19 październik 2001. s. 561-578.
3. **Zych J.: Wpływ postępu frontu eksploatacyjnego na przebieg prędkości osiadania w czasie.** Sbornik přednášek 8. Důlně měřické konference: Aktuální problémy důlního měřictví a geologie. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Hornicko-geologická fakulta. Institut geodézie a důlního měřictví. 27-29 listopadu 2001. Deštné v Orlických horách. s. 285-297.
4. **Zych J.: Wpływ dużego postępu frontu na rozkład deformacji na powierzchni.** Międzynarodowa Konferencja: Geotechnika-Geotechnics 2002. Strbske Pleso. Slovak Republic. September, 25-27th, 2002. s. 175-178.
5. **Ajdukiewicz J., Galuszka E.: Wykorzystanie geosyntetyków przy usuwaniu skutków eksploatacji górniczej.** RACE News, Newsletter for The Risk Abatement Center for Central and Eastern Europe (RACE), Katowice, 29-30.01.1998.
6. **Ajdukiewicz J.: Poradnik projektanta, inwestora i wykonawcy. Geotekstyli.** Przedsiębiorstwo Realizacyjne *INORA*, Gliwice, 1994.
7. **Ajdukiewicz J., Sobolewski J.: Wykorzystanie geosyntetyków w budowie nowoczesnych nasypów i wałów.** „Budownictwo górnicze i tunelowe” – kwartalnik naukowo-techniczny 2/99.
8. **Ajdukiewicz J.: Geosyntetyki w aplikacjach zrealizowanych na terenie Polski południowej.** XIV Dni Technika, Dobczyce, 1-2.06.1999.
9. **Ajdukiewicz J.: Geosyntetyki - nowoczesne materiały konstrukcyjne oczekujące na szersze zastosowania w górnictwie krajowym.** VIII Międzynarodowe Sympozjum „Geotechnika '98”, Ustroń, 18-21.10.1998.
10. **Ajdukiewicz J.: Niektóre aspekty stosowania geosyntetyków w Polsce.** XVII Dni Technika, SITKom Kraków, Wadowice, czerwiec 2002.
11. **Das Geotextilhandbuch.** SVG 2. Auflage 1988, Edition 2000, Szwajcaria.
12. **Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Strassenbaus.** FGSV, 1994, Niemcy.
13. **BS 8006:1995, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills BSI.** 1995; Wielka Brytania.
14. **EBGEO-Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen.** DGGT, 1997, Niemcy.
15. **E DIN 1054: 2000-12** (projekt), Niemcy.
16. **Koerner R.: Designing with Geosynthetics.** Fourth Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey; 1997, USA.
17. **Lothspeich S.E., Thornton J.S.: Comparison of different Long Term Reduction Factors for Geosynthetic Reinforcing Materials.** Second European Geosynthetics Conference EURO GEO 2000, Bologna, 2000, Włochy.
18. **Edel R.: Odwodnienie dróg.** Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, wyd. II, 2003, str. 132-144 i inne.