

Badawcza ocena możliwości wykorzystania niemetalicznych siatek tekstylnych do zbrojenia cienkościennych płyt betonowych

Research evaluation of the possibility of using non-metallic textile meshes for reinforcement of thin-walled concrete slabs

dr inż. Bernard Kotala (ORCID: 0000-0001-5065-4588), dr inż. Marek Węglorz (ORCID: 0000-0001-7534-3639), Katedra Inżynierii Budowlanej, Politechnika Śląska, Gliwice

DOI 10.5604/01.3001.0053.8494

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania krajowe cienkościennych płyt betonowych o grubości 40 mm, zbrojonych z wykorzystaniem niemetalicznych siatek tekstylnych (TRC – *Textile Reinforced Concrete*) i opisano przyjęte rozwiązanie formy umożliwiającej stabilizację wiotkich siatek w deskowaniu. W porównaniu do płyty żelbetowej, zbrojonej tradycyjnie siatkami stalowymi, w badaniach doraźnych i długotrwałych na zginanie wykazano podobną pracę płyt betonowych zbrojonych siatkami tekstylnymi w zakresie sprężystym, do wystąpienia pierwszej rysy.

Słowa kluczowe: zbrojenie niemetaliczne, siatki tekstylne, beton zbrojony tekstyliami, cienkościenna płyta betonowa.

Abstract: The tests of the thin-walled, 40 mm thick concrete slabs reinforced with the use of the non-metallic textile fabrics (TRC – *Textile Reinforced Concrete*) were presented in the paper and solution of the formwork which allow for stabilization of the flexible fabrics at casting was described. In comparison to the RC slab, reinforced with traditional, steel reinforcing mesh, it was shown, in instantaneous and long-term bending tests, that the behaviour of the textile reinforced concrete slabs in elastic phase, until the first crack, was comparable.

Keywords: non-metallic reinforcement, textile meshes, textile-reinforced concrete, thin-walled concrete slabs.

1. Wprowadzenie

Beton zbrojony tekstyliami (teksbet)*, znany powszechnie pod akronimami: TRC – *Textile Reinforced Concrete* albo TRCM – *Textile Reinforced Cementitious Matrix*, jest badany i stosowany w przemyśle budowlanym od dwóch dekad, przede wszystkim jednak w konstrukcjach prototypowych.

W artykule przedstawiono przyjęte rozwiązania dotyczące wykonawstwa cienkościennych płyt teksbetowych i wyniki badań krajowych tych płyt pod kątem wytrzymałościowym [1].

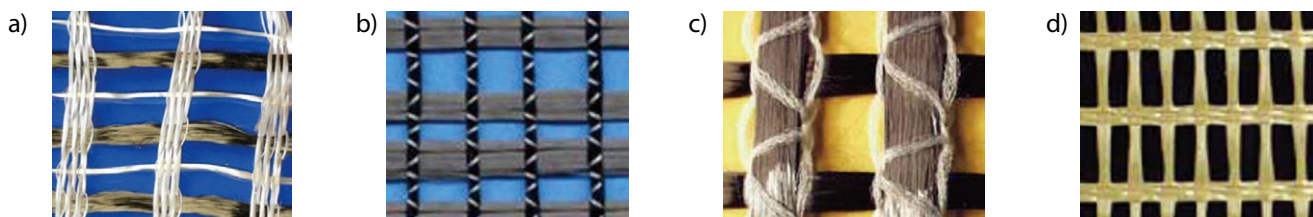
2. Przykłady zastosowań siatek tekstylnych do zbrojenia elementów betonowych

Teksbet (TRC) jest materiałem kompozytowym ze zbrojeniem niemetalicznym w postaci wiotkich siatek tkanych z przędzy włókien ciągłych o wysokiej wytrzymałości: szklanych, odpornych na alkalia (AR-GF), węglowych (CF), aramidowych (AF) i innych. W ostatnich latach na rynku pojawiły się ultrawytężalne włókna PBO (p-Phenylene BenzobisOxazole), występujące pod nazwą handlową Zylon, które również

mogą pełnić rolę zbrojenia elementów teksbetowych. Matrycę tworzy beton drobnoziarnisty, pełniący ważną rolę ochrony wiotkich i kruchych siatek tekstylnych przed uszkodzeniami mechanicznymi i oddziaływaniem wysokich temperatur. Zastąpienie tradycyjnego zbrojenia stalowego niemetalicznym zbrojeniem tekstylnym pozwala na wykonawstwo bardzo cienkich, lekkich płyt betonowych, co stanowi istotny wkład w zrównoważony rozwój budownictwa.

Jak pokazują prototypowe realizacje, które powstały w Niemczech we współpracy ośrodków badawczych (Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. STFI [2], RWTH Aachen [3] i TU Dresden [4]) z przemysłem, niemetaliczne siatki tekstylne mogą być z powodzeniem stosowane w produkcji lekkich, prefabrykowanych, betonowych płyt elewacyjnych [5, 6]. Dzięki zastąpieniu tradycyjnych siatek stalowych siatkami niemetalicznymi uzyskuje się możliwość produkcji elementów cienkościennych – prototypowe, teksbetowe płyty elewacyjne mają grubość 20–50 mm. Z uwagi na znacznie mniejszy ciężar konstrukcji i koszt produkcji, teksbet stanowi konkurencyjne rozwiązanie w stosunku do płyt elewacyjnych wykonanych z żelbetu lub kamienia. W stosunku do płyt zbrojonych stalą płyty betonowe zbrojone tekstyliami są odporne na korozję, stąd nie ma obaw o zagrażającą trwałości i psującą estetykę

* Teksbet (termin zaproponowany przez prof. A. Ajdukiewicza)



Rys. 1. Przykładowe łączenia stosowane w siatkach tekstylnych: a) luźno plecione, b) i c) wiązane, d) sklezione (direct roving)

elewacji, wykwyty korozji na powierzchni betonu [7]. Przy tej okazji warto nadmienić, że technologia ta została już również zastosowana w konstrukcji prototypowych cienkościennych powłok sprężonych kładek dla pieszych [8].

Z kolei barierą w rozpowszechnieniu tej technologii na szerszą skalę przemysłową, poza konstrukcjami prototypowymi – głównie w Niemczech, jest brak przepisów normowych i certyfikatów pozwalających na bezpieczne projektowanie i stosowanie teksbetu w budownictwie. Nie wypracowano również zharmonizowanych z Eurokodem 2 metod badania elementów tego typu. Należy jednak mieć nadzieję, że systematyczny rozwój badań nad teksbetem powinien w przyszłości prowadzić do zmiany tej sytuacji.

3. Konstrukcja formy do betonowania cienkościennych płyt teksbetowych

Zbrojenie cienkościennych płyt teksbetowych stanowią niemetaliczne siatki tekstylne, które są wiotkie i bardzo

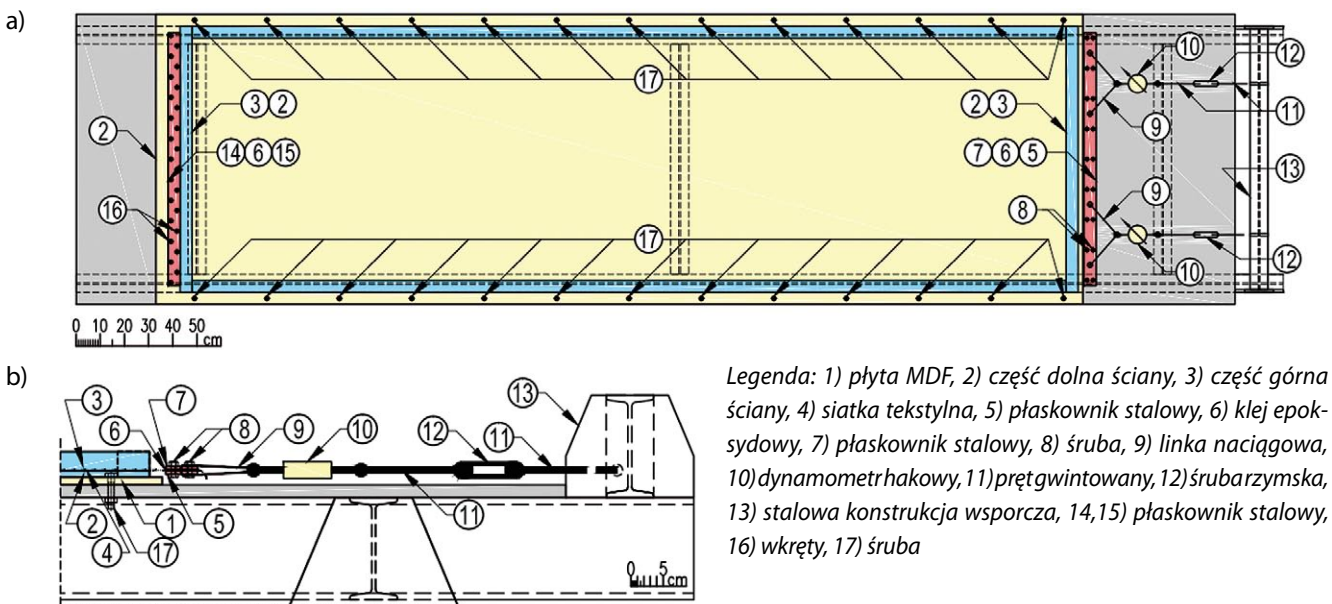
często tylko przeplecione wzajemnie, bez usztywnienia w węzłach (rys. 1), co powoduje konieczność ich dodatkowej stabilizacji w formie na czas betonowania.

Forma, którą przedstawiono na rysunku 2, umożliwia betonowanie z wykorzystaniem ortogonalnych siatek tekstylnych i służy do wykonywania płyty o rzucie prostokątnym, o wymiarach 1,0x3,6 m i grubości do 40 mm.

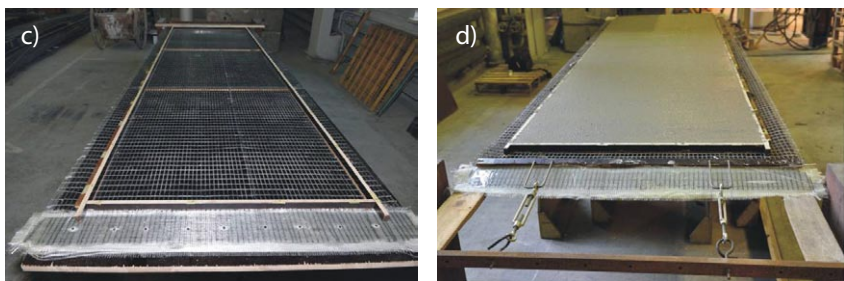
Utrzymanie siatki w płaszczyźnie podczas betonowania jest zapewnione poprzez jej kontrolowany naciąg (max. 500 N/m) i jest realizowane poprzez dynamometry hakowe oraz śruby rzymskie w zakotwieniu czynnym siatki. W formie siatkę kotwi się mechanicznie, z wykorzystaniem konstrukcyjnego kleju epoksydowego.

Forma stwarza możliwość jednoczesnego wykonania kilku płyt teksbetowych, z jednego zarobu i bez konieczności etapowania czynności układania mieszanki betonowej.

Przedstawione rozwiązanie jest objęte ochroną patentową [9].

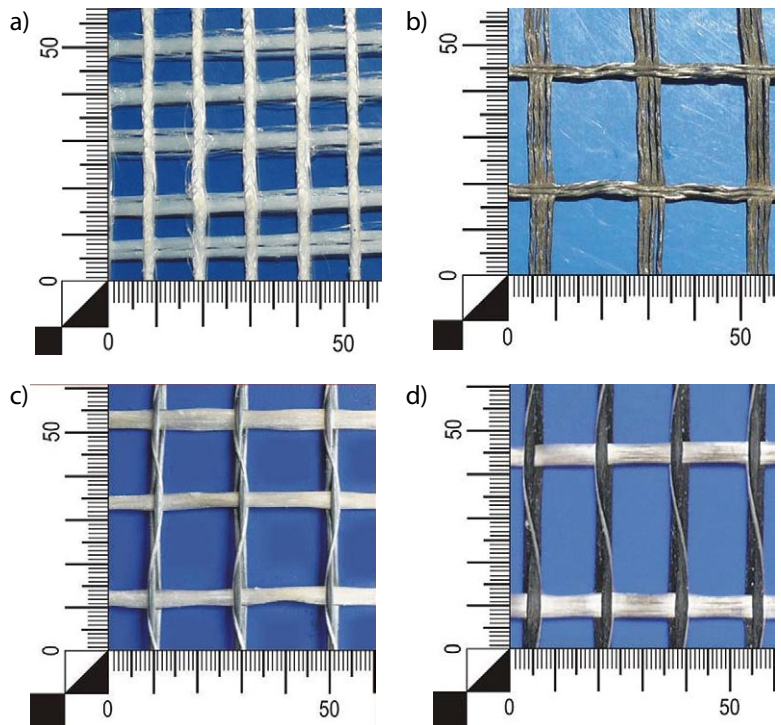


Legenda: 1) płyta MDF, 2) część dolna ściany, 3) część górna ściany, 4) siatka tekstylna, 5) płaskownik stalowy, 6) klej epoksydowy, 7) płaskownik stalowy, 8) śruba, 9) linka naciągowa, 10) dynamometr hakowy, 11) pręt gwintowany, 12) śruba rzymska, 13) stalowa konstrukcja wsporcza, 14,15) płaskownik stalowy, 16) wkręty, 17) śruba



Rys. 2. Forma do produkcji cienkościennych płyt teksbetowych: a) widok z góry, b) szczegół zakotwienia czynnego, c) widok od strony zakotwienia biernego, d) widok od strony zakotwienia czynnego

Rys. 3. Siatki tekstylne: a) szklana, odporna na alkalia (AR-Glass), b) poliwinylowoalkoholowa (PVA) w osnowie z PVC, c) węglowa (low-carbon LC), d) węglowa (high-carbon HC); wymiary w [mm]



4. Materiały wykorzystywane w badaniach

W dotychczasowych badaniach prowadzonych przez autorów (pod kierunkiem prof. A. Ajdukiewicza) do zbrojenia płyt teksbetowych wykorzystywano siatki tkane z przędzy o wysokiej wytrzymałości: szklane, odporne na alkalia (AR-Glass), poliwinylowoalkoholowe (PVA) w osnowie z PVC i węglowe (low-carbon LC i high-carbon HC).

W celu wstępnego sklejenia włókien w wiązkę, w siatkach węglowych wykorzystano technologię *direct roving*, co oznacza, że włókna zostały ułożone w wiązkę natychmiast po ich wyprodukowaniu. Spowodowało to sklejenie włókien, a tym samym powstanie dodatkowych wiązań zapobiegających rozsznuwaniu się wiązek. Również w tym samym celu wiązki włókien węglowych zostały oplecione wiązką (nicią) z włókien szklanych (rys. 3).

W badaniach materiałowych uzyskano następujące wartości sił zrywających f_u [kN/m]:

- $f_u = 57,0$ kN/m dla serii AR-Glass siatek o module sprężystości $E = 75$ GPa,
- $f_u = 55,0$ kN/m dla serii PVA siatek o module sprężystości $E = 58$ GPa,
- $f_u = 38,0$ kN/m dla serii LC siatek o module sprężystości $E = 240$ GPa,
- $f_u = 94,0$ kN/m dla serii HC siatek o module sprężystości $E = 240$ GPa,
- $f_u = 57,3$ kN/m dla referencyjnej serii SR siatek stalowych z prętów gładkich $\varnothing 4,0$ mm w rozstawie co 53 mm ze stali o granicy plastyczności $f_y = 240$ MPa.

Do wykonania modeli badawczych cienkościennych płyt stosowano mieszankę betonową, której skład przedstawiono w tabeli 1.

5. Wyniki badań

Dotychczas autorzy przeprowadzili obszerne badania podstawowe cienkich płyt – o grubości 40 mm: badania doraźne do zniszczenia oraz badania długotrwałe.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej stosowanej w badaniach

Składniki [kg/m ³]							Stosunek w/c	Konsystencja	Wytrzymałość średnia betonu na ściskanie f_{cm} [MPa]
Cement	Popiół lotny	Krzemionka	Piasek 0–1 mm	Żwir 2–4 mm	Woda	SP/ST(*)			
485,0(**)	-	-	859,8	771,9	227,9	4,8/1,1	0,47	S4	46,3

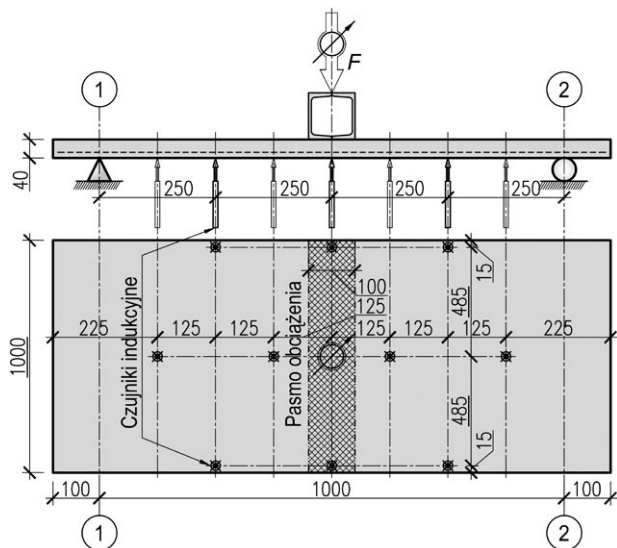
(*) SP – superplastyfikator/ST – stabilizator; (**) CEM II/A-LL 42,5R

Podczas gdy w przypadku wzmocnień badania teksbetu są ukierunkowane na rozciąganie na kierunkach naprężeń głównych (np. podczas wzmacniania powłok), cienkie płyty np. elewacyjne należy w szczególności sprawdzać pod kątem nośności na zginanie.

Warto zaznaczyć, że grubość 40 mm płyt została przyjęta z uwagi na zapewnienie prawidłowej minimalnej otuliny prętów stalowych w referencyjnej serii SR. W praktyce płyty zbrojone tekstyliami można jeszcze bardziej pocienić. Schemat 3-punktowego zginania (pod obciążeniem liniowym w środku rozpiętości płyty) przyjęty w badaniach doraźnych płyt przedstawiono na rysunku 4.

Badania doraźne prowadzono do zniszczenia (złamania płyt). Obrazy zniszczenia płyt w badaniach doraźnych przedstawiono na rysunku 5, a uzyskane wyniki w tabeli 2 i na rysunku 6.

Jak wynika z porównania wykresów na rysunku 6, aż do zarysowania, w zakresie pracy sprężystej przekroju kompozytowego, nie ma istotnych różnic w pracy przekrojów zbrojonych siatkami tekstylnymi i zbrojonych tradycyjnie za pomocą siatek stalowych. Dopiero po zarysowaniu ujawnia się odmienny charakter pracy membranowej, różnicowany w zależności od zastosowanego zbrojenia i uwarunkowany właściwościami zbrojenia, bowiem matryca



Rys. 4. Schemat przyjęty w badaniach doraźnych płyt; wymiary podano w [mm]



Rys. 5. Obrazy zniszczenia płyt: a) i b) zbrojonych siatką z włókna szklanego, c) i d) zbrojonych tradycyjnie prętami stalowymi

Tabela 2. Rezultaty badań doraźnych płyt

Oznaczenie i opis serii	Nr modelu	Siła rysująca F_{rys} [N]	Moment rysujący $m_{x,rys}$ [Nm/m]	Ugięcie przy zarysowaniu u_{rys} [mm]	Siła niszcząca F_{max} [N]	Ugięcie przy zniszczeniu u_{max} [mm]
AR-Glass – płyty zbrojone siatką z włókien szklanych odpornych na alkalia	AR-Glass/1	5547	1387	0,88	8845	15,52
	AR-Glass/2	5942	1486	0,86	7203	8,50
	AR-Glass/3	5514	1379	0,94	8102	15,91
PVA– płyty zbrojone siatką z włókien z poliwinylu alkoholu	PVA/1	5216	1304	0,61	5216	0,61
	PVA/2	5019	1255	0,62	5019	0,62
	PVA/3	4533	1133	0,57	4533	0,57
LC – płyta zbrojona siatką z włókna węglowego low-carbon	LC/1	5615	1404	0,81	23556	30,71
HC – płyta zbrojona siatką z włókna węglowego high-carbon	HC/1	3967	992	0,71	6411	22,18
SR – płyty zbrojone prętami stalowymi	SR/1	3530	883	0,49	6075	4,65
	SR/2	3605	901	0,46	6445	5,08
	SR/3	3707	927	0,46	7272	4,29

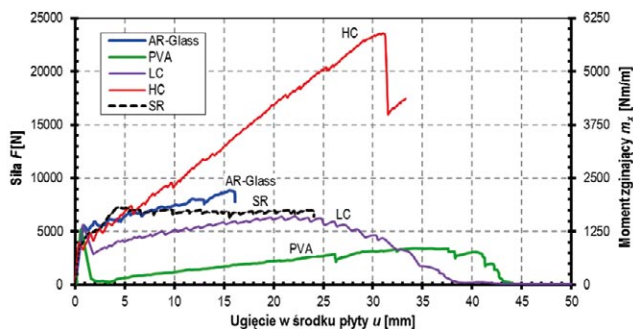
betonowa, która uległa zarysowaniu nie bierze wówczas udziału w pracy przekroju.

Najmniejszą wartość momentu rysującego otrzymano dla płyty HC/1: $m_x = 992$ [Nm/m] (tab. 2), co jest równoważne wartości obciążenia równomiernie rozłożonego $q_w = 8 \times m_x / 1$ [m²] $\approx 7,94$ [kN/m²]. Dla porównania, w zależności od przyjętych założeń, wg Eurokodu 1-1-4, wartość ssania wiatru na ściany budynków (w tym: budynków wysokich) na ogół nie przekracza $w_s = 1,5$ [kN/m²] [10]. Stąd, nawet mając na uwadze podstawowy charakter badań, uzyskano w nich obciążenie znacznie większe w stosunku

do spodziewanej, maksymalnej wartości ssania wiatru na powierzchnię panelu elewacyjnego.

Schemat obciążenia równomiernie rozłożonego przyjęty w badaniach długotrwałych płyt przedstawiono na rysunku 7. W każdej z serii w badaniach długotrwałych AR-Glass, PVA, LC, HC zbadano po 2 modele płyt i jedną płytę referencyjną SR.

Badania długotrwałe prowadzono w hali laboratorium przez 6 miesięcy, przy czym obciążenie modeli płyt przykładano stopniowo: przez pierwsze 3 miesiące o wartości 65% obciążenia rysującego jak dla referencyjnej płyty żelbetowej SR,



Rys. 6. Usrednione wykresy zależności: siła F – ugięcie u uzyskane w doraźnych badaniach płyt na zginanie

czyli ok. 5 kN/m^2 , po czym przez kolejne 3 miesiące o wartości 95% obciążenia rysującego, czyli ok. 7 kN/m^2 . Obciążenie to w badaniach długotrwałych przykładano za pomocą ciężarków o masie 25 kg rozłożonych na płycie z zachowaniem co najmniej 5 mm przerw tak, aby zapobiec ich przeskolepieniu się podczas trwania badania.

Wyniki badań długotrwałych przedstawiono na rysunku 8. Wszystkie płyty pozostające pod obciążeniem długotrwałym charakteryzowały się sprężystym charakterem pracy – nie doszło do ich zarysowania. W badaniach elementów zbrojonych siatkami z włókien niemetalicznych pod obciążeniem długotrwałym potwierdzono zatem wcześniejsze rezultaty badań doraźnych i stwierdzono jednocześnie znaczną efektywność tego zbrojenia, co najmniej na poziomie zbrojenia tradycyjnego.

6. Podsumowanie

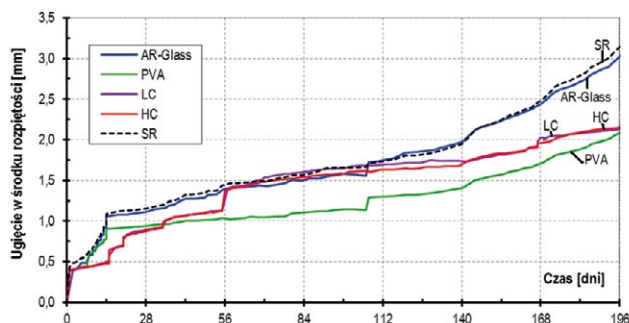
Obecnie cienkościennie płyty teksbetowe znajdują zastosowanie w prototypowych elementach budowlanych (głównie w Niemczech), takich jak okładziny zewnętrzne i fasady, które poddane są podczas eksploatacji nie tylko obciążeniom w płaszczyźnie, ale również obciążeniom prostopadłym do ich płaszczyzny (np. wiatrem), co było przedmiotem zaprezentowanych badań. Uzyskane w badaniach doraźnych i długotrwałych wyniki wskazują na możliwość zastosowania mocnych, sprawdzonych pod kątem wytrzymałościowym, siatek tekstylnych do zbrojenia betonu, w celu zastąpienia siatek stalowych. Niestety ograniczeniem w stosowaniu i produkcji elementów zbrojonych tekstyliami są przeszkody legislacyjne – obecnie brak jest bowiem właściwych norm i przepisów regulujących możliwości wdrożenia tych rozwiązań w budownictwie. Niemniej, choć badania tych płyt wciąż mają charakter badań podstawowych, ich rola jest bardzo istotna dla dalszego rozwoju i, w przyszłości, wdrożenia tej technologii w przemyśle budowlanym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kotala B., Badania właściwości i efektywności elementów betonowych zbrojonych tekstyliami wysokiej wytrzymałości, Gliwice, 2010
- [2] <https://www.stfi.de/en/dostep: 21.05.2023 r.>
- [3] <https://www.rwth-aachen.de/dostep: 21.05.2023 r.>



Rys. 7. Badania długotrwałe płyt: a) obciążenie ok. 5 kN/m^2 , b) obciążenie ok. 7 kN/m^2



Rys. 8. Usrednione wykresy zależności przyrostu ugięć w czasie uzyskane w długotrwałych badaniach płyt

- [4] <https://tu-dresden.de/dostep: 21.05.2023 r.>
- [5] Papanicolaou C. G., Applications of textile-reinforced concrete in the precast industry, Textile Fibre Composites in Civil Engineering, Woodhead Publishing, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00011-2>
- [6] Garibaldi M., Vakaliuk I., Schlüter D., Kraft R., Curbach M., Form follows environment – the development of smart and eco-friendly carbon concrete composite building elements, fib Congress, Melbourne, 2018
- [7] Sadrolodabae P., Amin Hosseini S. M., Claramunt J., Ardanuy M., Haurie L., Lacasta A. M., Fuente A., Experimental characterization of comfort performance parameters and multi-criteria sustainability assessment of recycled textile-reinforced cement facade cladding, Journal of Cleaner Production, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131900>
- [8] Rempel S., Kulas Ch., Will N., Bielak J., Extremely Light and Slender Precast Pedestrian-Bridge Made Out of Textile-Reinforced Concrete (TRC) High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, Maastricht, 2017, http://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2_288
- [9] Węglorz M., Kotala B., Stanowisko do wykonania cienkościennych płyt betonowych zbrojonych siatkami tekstylnymi, Politechnika Śląska, nr 71791, <https://api-ewyszukiwarka.pue.uprr.gov.pl/api/collection-n/23023a8f6e697d6312df140#search=%22Ru.071791%22>
- [10] Rokicki W., Pietrzak J., Wrona M., Wpływ obciążenia od wiatru na budynek wysoki o nieregularnej formie – badania modelowe, Przestrzeń, Ekonomia, Społeczeństwo, 2017, DOI 10.23830/1211017/179191