*prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski*[1)]
ORCID: 0000-0003-4110-5581
*dr inż. Małgorzata Gołaszewska*[1)*)]
ORCID: 0000-0002-5249-2639
*dr inż. Grzegorz Cygan*[1)]
ORCID: 0000-0002-5534-704X
*mgr inż. Aleksandra Gajdzik*[1)]
*mgr inż. Sara Hajduszkiewicz*[1)]

# The effect of cement paste content and the water-cement ratio on the effectiveness of chosen anti-shrinkage admixture

## *Wpływ ilości zaczynu i stosunku wodno-cementowego na efektywność wybranej domieszki przeciwskurczowej*

*DOI: 10.15199/33.2026.08.01*

**Abstract:** The aim of the study was to determine the effect of a selected shrinkage-reducing admixture (SRA) on the shrinkage of mortars with different slurry volumes and different w/c ratios. In addition, the effect of the SRA on other properties of these mortars was evaluated, namely: consistency, air content in the mortar, flexural and compressive strength, and water absorption. Based on the results obtained, it can be concluded that the w/c ratio and the paste volume in the mortar do not affect the nature of the action, the effects, or the effectiveness of the selected SRA. In addition to its anti-shrinkage effect, the SRA admixture exhibited a plasticizing effect, reduced the air content in fresh mortar, and decreased flexural strength, with a negligible effect on the compressive strength of hardened mortars. The tested SRA admixture significantly reduced water absorption, particularly capillary absorption, by the mortar, thereby potentially contributing to improved durability of cementitious composites.
**Keywords:** shrinkage reducing admixtures; cement paste content effect; w/c effect; shrinkage; mortar properties

**Streszczenie:** Celem badań było określenie wpływu wybranej domieszki redukującej skurcz (SRA) na skurcz zapraw o różnej objętości zaczynu oraz różnym stosunku w/c. Ponadto oceniono wpływ SRA na inne właściwości tych zapraw, takie jak: konsystencja; zawartość powietrza w zaprawie, wytrzymałość na zginanie i ściskanie oraz nasiąkliwość. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że stosunek w/c oraz objętość zaczynu w zaprawie nie wpływają na charakter działania, skutki ani skuteczność wybranego SRA. Oprócz funkcji przeciwskurczowej, domieszka SRA wykazała działanie plastyfikujące, zmniejszyła zawartość powietrza w świeżej zaprawie oraz wytrzymałość na zginanie, przy znikomym wpływie na wytrzymałość na ściskanie stwardniałych zapraw. Badana domieszka SRA znacznie ograniczyła absorpcję wody przez zaprawę, zwłaszcza kapilarną, dzięki czemu może przyczynić się do poprawy trwałości kompozytów cementowych.
**Słowa kluczowe:** domieszki przeciwskurczowe; wpływ ilości zaczynu; wpływ w/c; skurcz; właściwości zapraw

Shrinkage in cement composites is a spontaneous reduction in volume that occurs independently of external loading. It occurs directly after the element is formed and results from physicochemical processes taking place in the cement paste, namely cement hydration (chemical shrinkage) and water migration during drying (drying shrinkage) [1–4]. As a result of shrinkage, tensile stresses develop in elements that are unable to deform freely, which promotes the formation of cracks and fissures. This negatively affects the mechanical properties, durability, and serviceability of the structure. Shrinkage is not uniform throughout the entire volume of the composite; cracks may develop even when the element is able to deform freely.

**Drying shrinkage results** from the evaporation of free water from the paste structure; it begins almost immediately after the mix is placed and is of fundamental importance with regard to potential damage. During the period when the mix remains in a plastic state, **drying shrinkage** is referred to as **plastic shrinkage**.

Skurcz w kompozytach cementowych jest spontanicznym, niezależnym od obciążenia zmniejszeniem objętości. Występuje bezpośrednio po uformowaniu elementu i jest wynikiem procesów fizykochemicznych zachodzących w zaczynie cementowym – hydratacji cementu (skurcz chemiczny) oraz migracji wody podczas wysychania (skurcz wysychania) [1÷4]. W wyniku skurczu w elementach, które nie mogą swobodnie się odkształcać, powstają naprężenia rozciągające, sprzyjające powstawaniu rys i pęknięć, co negatywnie wpływa na właściwości mechaniczne, trwałość oraz użytkowalność konstrukcji. Skurcz nie jest równomierny w całej objętości kompozytu: może prowadzić do powstawania rys nawet wtedy, gdy element ma możliwość swobodnego odkształcania się.

**Skurcz wysychania** wynika z odparowania wolnej wody ze struktury zaczynu; rozpoczyna się natychmiast po ułożeniu mieszanki i ma zasadnicze znaczenie z punktu widzenia występowania potencjalnych uszkodzeń. W okresie, gdy mieszanka pozostaje jeszcze w stanie plastycznym, **skurcz wysychania** określany jest mianem **skurczu plastycznego**.

**Skurcz chemiczny** obejmuje wszystkie zmiany objętości kompozytu wynikające z procesu hydratacji cementu. Jest on spowodowany głównie mniejszą objętością wody związanej

[1)] Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa
[*)] Adres do korespondencji: malgorzata.golaszewska@polsl.pl

Chemical shrinkage includes all volume changes in the composite resulting from the cement hydration process. It is caused mainly by a reduction in the volume of water chemically bound in hydration products compared with its volume in the liquid state, and by the removal of water from capillaries, nanopores, and gel pores.

At the early stage of curing, chemical shrinkage is much smaller than the simultaneously occurring drying shrinkage (and earlier plastic shrinkage); therefore, its significance in the context of shrinkage crack formation in structures is smaller. It becomes apparent at later stages of curing, when the composite strength is relatively high and, under typical conditions, prevents crack formation. The mechanism of shrinkage in cement composites has been discussed in detail in, among others, references [1, 2, 5, 6].

To minimize shrinkage, the composition of the cement composite should be properly designed by reducing the amounts of cement paste and water in the mixture to the necessary minimum and by ensuring proper and consistently applied curing conditions, which minimizes water evaporation from the mixture during the initial curing period [1, 2, 4, 7]. Other shrinkage-reducing strategies include the use of shrinkage-reducing admixtures, expansive admixtures, dispersed reinforcement, supplementary cementitious materials, alternative aggregates, and nanomaterials [3, 4, 7]. In the case of mixtures discussed below, particular attention should be paid to the potential of shrinkage reducing admixtures (SRA).

The primary effect of SRA admixtures is the reduction of drying shrinkage, although a beneficial effect on limiting chemical shrinkage has also been reported [3, 4, 7]. Most commercially available shrinkage-reducing admixtures are based on derivatives of ethylene glycol, which act as surface-active agents [3, 4, 7]. The action of SRA is primarily associated with lowering the surface tension of water and reducing capillary pressure in the pore fluid [3, 4, 7]. As a result, tensile stresses are reduced, weakening the attraction between pore walls and thereby reducing drying shrinkage. Other effects of SRA include reducing the concentration of ions in the pore solution, regulating relative humidity, and expansion, however their influence on drying shrinkage reduction is less pronounced [3]. These phenomena may however explain the effect of SRA on chemical shrinkage. The mechanism of SRA action has been discussed in detail in [3].

The dosage of SRA can reduce compressive strength of mortars and concretes after 28 days by up to 30%; however, the decrease is most often no higher than 10% [3, 16, 17]. The tensile and flexural strength as well as modulus of elasticity of concrete generally deteriorate to a similar or greater extent [3, 16, 17]. By limiting shrinkage cracking, SRA contributes to improved durability and resistance to the aggressive effects of the environment [3]. So far, no direct effect of shrinkage-reducing admixtures on concrete durability has been demonstrated. While the literature reports a wide range of differing results [3], It is generally believed that SRA reduces water absorption, which has a positive effect on the durability of cementitious composites. It should be emphasized that studies on the effect of SRA have been conducted on various types of pastes, mortars, and concretes, with varying compositions

w fazach hydratacyjnych w porównaniu z jej objętością w stanie ciekłym oraz usuwaniem wody z kapilar, nanoporów i wody żelowej. We wczesnym etapie dojrzewania skurcz chemiczny jest znacznie mniejszy niż jednocześnie występujący skurcz wysychania (a wcześniej skurcz plastyczny), dlatego jego znaczenie w kontekście powstawania rys skurczowych w konstrukcjach jest mniejsze. Ujawnia się on w późniejszych fazach dojrzewania, gdy wytrzymałość kompozytu jest stosunkowo duża i w typowych warunkach przeciwdziała powstawaniu rys. Mechanizm skurczu w kompozytach cementowych został szczegółowo omówiony m.in. w pracach [1, 2, 5, 6].

W celu minimalizacji skurczu należy odpowiednio zaprojektować skład kompozytu cementowego przez ograniczenie ilości zaczynu cementowego i wody w mieszance do niezbędnego minimum oraz zapewnienie prawidłowego i konsekwentnie realizowanego procesu pielęgnacji, minimalizującego parowanie wody z mieszanki w początkowym okresie dojrzewania [1, 2, 4, 7]. Inne strategie ograniczania skurczu obejmujące stosowanie domieszek redukujących skurcz, domieszek ekspansywnych, zbrojenia rozproszonego oraz zastępowanie cementu dodatkami mineralnymi, alternatywnymi kruszywami i nanomateriałami zostały omówione w [3, 4, 7], przy czym szczególnie duży potencjał wykazują domieszki redukujące skurcz (SRA).

Podstawowym efektem działania domieszek SRA jest zmniejszenie skurczu wysychania, chociaż odnotowuje się również ich korzystny wpływ na ograniczanie skurczu chemicznego [3, 4, 7]. Większość domieszek redukujących skurcz stosowanych na większą skalę bazuje na pochodnych glikolu etylenowego, będących środkami powierzchniowo czynnymi [3, 4, 7]. Działanie SRA polega przede wszystkim na obniżeniu napięcia powierzchniowego wody oraz zmniejszeniu ciśnienia kapilarnego w porach kapilarnych [3, 4, 7]. W efekcie zmniejsza się siła wewnętrzna powodująca wzajemne przyciąganie ścian porów, a tym samym redukowany jest skurcz wysychania. Do innych efektów działania SRA należą zmniejszenie stężenia jonów w roztworze porowym, regulacja wilgotności względnej oraz efekt ekspansywny, ale ich wpływ na redukcję skurczu wysychania jest mniejszy [3]. Zjawiska te mogą natomiast tłumaczyć wpływ SRA na skurcz chemiczny. Mechanizm działania SRA został szczegółowo omówiony w [3].

Na podstawie analizy wyników wcześniejszych badań zaprezentowanych w [3, 8] stwierdzono, że do 28. dnia redukcja skurczu kompozytów cementowych wynikająca z zastosowania SRA charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem i wynosi 20–70% (najczęściej 30–60%). Efekt ten zależy głównie od ilości SRA, warunków dojrzewania kompozytu oraz rodzaju cementu. Stosowanie SRA opóźnia pojawianie się rys oraz zmniejsza ich liczbę i szerokość o 30–80%, a w niektórych przypadkach całkowicie zapobiega ich powstawaniu [9, 10]. Obecność SRA może również wpływać na wiele innych właściwości świeżego i stwardniałego betonu. Domieszki te mogą poprawiać urabialność mieszanki, ograniczać jej zmiany w czasie [3, 8], opóźniać czas wiązania cementu, zmniejszać ilość ciepła wydzielanego w początkowym okresie hydratacji [11÷13], pogarszać zdolność domieszek napowietrzających do wytworzenia odpowiedniej struktury porów powietrznych [14, 15].

and properties, under different curing conditions, and using different testing methods, which makes it difficult to generalize the results obtained

Many studies have been conducted on SRA in relation to concrete properties, but, as indicated in [3] and [5], there is still considerable discrepancy in the results and topics that are not sufficiently researched. Most studies have focused on the influence of amount and type of SRA on shrinkage and cracking under laboratory conditions and in various temperature and humidity environments, while less attention has been paid to the effect of composition of composite on SRA effectiveness. It is mainly concerning the effect of cement paste content and the w/c ratio – key parameters in designing of mortars and concretes, as well as shrinkage reduction. In existing literature effectiveness of SRA with respect to concrete and mortar shrinkage was analyzed considering cement type, the presence of mineral additives [6, 18], or cement composition [19]. Research reported in [20] showed that the effectiveness of SRA increases with increasing w/c ratio, however, it should be noted that this relationship was observed only within two levels of w/c. An inverse relationship can be observed in the study [21]; however, due to a lack of data, it is not possible to compare the type of SRA. No comprehensive studies on the effect of paste volume on SRA efficiency were found. Therefore, it is necessary to conduct systematic and targeted research aimed at determining whether these parameters affect the performance of the SRA.

## Research Methods

The aim of the study was to determine the effect of a selected shrinkage-reducing admixture (SRA) on the shrinkage of mortars with varying cement paste contents and different w/c ratios, as well as on selected properties such as consistency, air content in fresh mortar, flexural and compressive strength, and water absorption. The conducted research fills a gap in knowledge regarding the impact of changes in the composition of cement composites on the primary and secondary effects of SRA; it contributes to a better understanding of the mechanisms of SRA action and provides data enabling their more effective use in cement composites.

The test program and compositions of mortars are presented in Table 1. The cement paste content in the mortar ($V_{CP}$) ranged from 41.6 to 65 dm³/m³, and w/c ratios from 0.45 to 0.55. An SRA admixture based on dipropylene glycol monomethyl ether with a density of 0.91 g/cm³ and characterized by its colorless appearance was used. It was used in the maximum amount recommended by the manufacturer, i.e., **0.25% relative to the total weight of the mortar and 0.8%–1.0% of the cement weight**. When used in this amount, it slightly reduces water demand and significantly delays the setting time of the cement (Table 2). Additional information regarding the influence of SRA on the hydration process is presented in [3, 11], where it was shown that SRA delays early cement hydration while enhancing hydration in the later period. The research was conducted using one specific SRA, therefore, they are merely a contribution toward determining the possible effect of SRA on the properties of mortars. To prepare the mortars, Portland

Dodatek SRA może zmniejszać nawet o 30% wytrzymałość na ściskanie zapraw i betonu po 28 dniach, ale najczęściej spadek ten nie przekracza 10% [3, 16, 17]. Wytrzymałość na rozciąganie i zginanie oraz moduł sprężystości betonu ulegają pogorszeniu w podobnym lub większym stopniu [3,16, 17]. Ograniczając liczbę rys i pęknięć skurczowych, SRA przyczynia się do poprawy odporności konstrukcji betonowych na agresywne oddziaływanie środowiskowe [3]. Dotychczas nie wykazano jednak bezpośredniego wpływu domieszek redukujących skurcz na trwałość betonu. Mimo że w literaturze podawane są różne wyniki [3], powszechnie uważa się, że SRA zmniejsza nasiąkliwość, co korzystnie wpływa na trwałość kompozytów cementowych. Należy podkreślić, że badania nad wpływem SRA były prowadzone na różnych rodzajach zaczynów, zapraw i betonów, o zróżnicowanym składzie i właściwościach, w różnych warunkach dojrzewania i pielęgnacji oraz z wykorzystaniem odmiennych metod badawczych, co utrudnia uogólnienie uzyskanych wyników.

Przeprowadzono wiele badań dotyczących wpływu SRA na różne właściwości betonu, ale – jak wykazano w [3] i [5] – nadal istnieje wiele rozbieżności w wynikach oraz zagadnień niewystarczająco poznanych. Większość z nich koncentrowała się na wpływie rodzaju i ilości SRA na skurcz kompozytów dojrzewających w różnych warunkach temperatury i wilgotności, a niewiele na wpływie składu kompozytu na skuteczność działania SRA. Dotyczy to w szczególności zawartości zaczynu oraz stosunku w/c – parametrów kluczowych w projektowaniu zapraw i betonów oraz w ograniczaniu skurczu. W istniejących badaniach efektywność SRA na skurcz betonów i zapraw była analizowana pod kątem rodzaju cementu, obecności dodatków mineralnych [6, 18] lub składu cementu [19]. Badania [20] wykazały, że wraz ze wzrostem w/c efetywność SRA zwiększyła się, przy czym należy zauważyć, że badano tylko dwa poziomy w/c. Odwrotną zależność można zaobserwować w badaniach [21], natomiast ze względu na brak danych nie można porównać rodzaju SRA. Nie znaleziono kompleksowych badań wpływu ilości zaczynu na efektywność SRA. W związku z tym konieczne jest prowadzenie systematycznych i ukierunkowanych badań mających na celu określenie, czy parametry te wpływają na efekty działania SRA.

## Metody badań

Celem badań było określenie wpływu wybranej domieszki redukującej skurcz (SRA) na skurcz zapraw o zróżnicowanej objętości zaczynu cementowego i o różnym stosunku w/c oraz na ich inne właściwości, takie jak: konsystencja, zawartość powietrza w świeżej zaprawie, wytrzymałość na zginanie i ściskanie oraz nasiąkliwość. Przeprowadzone badania uzupełniają lukę w wiedzy dotyczącej wpływu zmiany składu kompozytów cementowych na podstawowe i wtórne efekty działania SRA; przyczyniają się do lepszego zrozumienia mechanizmów działania SRA oraz dostarczają danych umożliwiających ich bardziej efektywne stosowanie w kompozytach cementowych.

Plan badań oraz skład zapraw przedstawiono w tabeli 1. Objętość zaczynu w zaprawie ($V_{CP}$) wynosiła 416÷625 dm³/m³, natomiast stosunek w/c = 0,45÷0,55. Zastosowano domieszkę SRA na bazie eteru monometylowego glikolu dipropylenowego

**Table 1. Test plan and mortar compositions**
*Tabela 1. Plan badań i skład zapraw*

| Mortar code/ Nazwa próbki | Constituents [kg/m³]/Składniki [kg/m³] | | | | w/c ratio/ w/c | $V_{cp}$, [dm³/m³] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | SRA | cement | water/ woda | sand/piasek | | |
| REF_0.45_500 | 0 | 647 | 291 | 1325 | 0.45 | 500 |
| SRA_0.45_500 | 5.7 (0.8% m.c.) | | | | | |
| REF_0.50_416 | 0 | 506 | 253 | 1546 | 0.50 | 416 |
| SRA_0.50_416 | 5.2 (1.0% m.c) | | | | | |
| REF_0.50_500 | 0 | 608 | 304 | 1325 | 0.50 | 500 |
| SRA_0.50_500 | 5.6 (0.9% m.c.) | | | | | |
| REF_0.50_625 | 0 | 760 | 380 | 994 | 0.50 | 625 |
| SRA_0.50_625 | 5.8 (0.8% m.c.) | | | | | |
| REF_0.55_500 | 0 | 573 | 315 | 1325 | 0.55 | 500 |
| SRA_0.55_500 | 5.5 (1.0% m.c) | | | | | |

cement CEM I 42.5 R was used, which basic properties are summarized in Table 2, along with standard sand meeting the requirements of PN-EN 196 [22].

The mortars were prepared in accordance with PN-EN 196-1 [22]. The SRA admixture was added to the mortar 30 seconds before the end of mixing, as recommended by the manufacturer. The properties of the mortar were then determined. Plastic shrinkage was tested using the Schleibinger Shrinkage Cone device. The measuring cone filled with mortar was placed under a laser sensor that measured changes in the height of the mortar. The measurement was performed in a climatic chamber at a constant temperature of 20°C ± 1°C and relative humidity 60% ± 5%. The device and the test methodology are described in detail in [23].

**Mortar shrinkage** was measured on prismatic specimens with dimensions of 40 × 40 × 160 mm using the Graf-Kaufman method over a period of 1 to 29 days; the results presented represent the average of three specimens. The molded specimens were stored under plastic wrap at a constant temperature of 20°C ± 2°C, and after 24 hours, they were demolded and the first measurement was taken. Shrinkage tests were conducted at a temperature of 20°C ± 2°C and a relative humidity of 60% ± 5%, and the samples were stored in a climate chamber under these same conditions.

**The consistency and air content** of fresh mortar were determined, respectively, using the spread table method in accordance with EN 1015-3:2000 [24] and the pressure method in accordance with EN 413-22:2016 [25]. The results of these tests represent the average of three measure-

**Table 2. Properties of cement CEM I 42,5 R**
*Tabela 2. Właściwości cementu CEM I 42,5 R*

| Parameters/Parametry | Value/Wartość |
|---|---|
| Phase composition [% wt]/Skład fazowy [% m.] | |
| $C_3S$ | 60,7 |
| $C_2S$ | 11,6 |
| $C_3A$ | 11,9 |
| $C_4AF$ | 8,3 |
| Specific surface [cm²/g]/Powierzchnia właściwa [cm²/g] | 4390 |
| Density [g/cm³]/Gęstość [g/cm³] | 3,10 |
| Water for standard consistency/with SRA,%]/ Woda do konsystencji normowej/z SRA [%] | 27,4/24,1 |
| Setting time/setting time with SRA [min]/ Początek czasu wiązania/początek czasu wiązania z SRA [min] | 254/303 |
| Compressive strength after 28 days [MPa]/ Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa] | 50,6 |

o gęstości 0,91 g/cm³ wyróżniającą się bezbarwnym kolorem. Stosowano ją w maksymalnej ilości zalecanej przez producenta, tj. **0,25% w stosunku do całkowitej masy zaprawy i 0,8–1,0% masy cementu**. Zastosowana w takiej ilości nieznacznie zmniejsza wodożądność oraz istotnie opóźnia czas wiązania cementu (tabela 2). Dodatkowe informacje dotyczące wpływu domieszki SRA na proces hydratacji przedstawiono w [3, 11], z których wynika, że SRA opóźnia wczesną hydratację cementu, natomiast wzmacnia proces hydratacji w późniejszym okresie. Badania prowadzano na jednej konkretnej domieszce SRA, dlatego są jedynie przyczynkiem do określenia możliwego wpływu SRA na właściwości zapraw. Do przygotowania zapraw zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R, którego podstawowe właściwości zestawiono w tabeli 2, oraz piasek normowy spełniający wymagania PN-EN 196 [22].

Zaprawy przygotowywano zgodnie z PN-EN 196-1 [22]. Domieszkę SRA dodawano do zaprawy 30 sekund przed zakończeniem mieszania, jak zalecał producent. Następnie określano właściwości zaprawy. Skurcz plastyczny badano przy użyciu urządzenia Schleibinger Shrinkage Cone. Stożek pomiarowy z zaprawą ustawiano pod czujnikiem laserowym mierzącym zmianę wysokości zaprawy. Pomiar wykonywano w komorze klimatycznej w stałej temperaturze 20°C ± 1°C oraz wilgotności względnej 60% ± 5%. Urządzenie oraz metodologię badań szczegółowo opisano w [23].

**Skurcz zapraw** mierzono na próbkach pryzmatycznych o wymiarach 40 × 40 × 160 mm metodą Grafa-Kaufmana w okresie od 1 do 29 dni; podane wyniki stanowią średnią

ments. The rheological parameters of the mortars were measured using a rotational Viskomat NT rheometer, and the rheological properties were described using the Bingham model parameters, i.e., the yield stress and plastic viscosity. For the Viskomat NT device, the parameters were specified in conventional units: yield stress g [Nm] and plastic viscosity h [Nm·s]. The mortar was placed in the rheometer vessel, and the test was started. The measurement program lasted 5 minutes – over the course of 1 minute, the speed increased to a maximum of 120 rpm, which was maintained for 3 minutes; during the final minute, the speed was gradually reduced to 0 rpm. The test was performed at a temperature of 20°C ± 2°C, which was maintained in the mortar throughout the measurement. A detailed description of the procedure for measuring rheological parameters is presented in [26].

The flexural and compressive strengths of the hardened mortars were determined in accordance with EN 196-1:2016 [22]. The flexural strength was calculated as the average of three specimens, and the compressive strength as the average of six specimens. The water absorption of mortars ($W_a$), capillary water absorption ($W_{ac}$), and capillary absorption coefficient ($C_{Mm}$) were determined on specimens measuring 40 × 40 × 160 mm after 28 days of curing, which were dried to constant mass at a temperature of 105°C ± 5°C.

Water absorption was calculated using the following formula:

$$W_\alpha = \frac{m_m - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

where:

$m_m$ – mass of the water-saturated sample [g]; $m_s$ – mass of the sample dried to constant mass [g].

The samples were then divided into halves, and the side surfaces of each half were coated with wax. The capillary water absorption ($W_{ac}$) was determined by measuring the changes in mass of the samples immersed in water to a depth of 10 mm after 1, 3, 6, and 24 hours. The capillary water absorption ($W_{ac}$) was calculated using the following formula:

$$W_{ac} = \frac{m_{kt} - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (2)$$

where:

$m_{kt}$ is the mass of the sample at times t = 1, 3, 6, and 24 h, [g].

The capillary absorption coefficient $C_{Mm}$ was calculated using the following formula:

$$C_{Mm} = \frac{m_{kt} - m_s}{S_s \times t^{0,5}} \ [kg/(m^2 \cdot min.^{0,5})] \quad (3)$$

where:

$m_{kt}$ – mass of the sample 90 minutes after immersion in water; $m_s$ – mass of the sample dried to a constant mass; $S_s$ – surface area of the sample; t – time.

Presented results are the average of three samples, unless otherwise specified.

## Test Results and Discussion

**The effect of SRA on the plastic shrinkage of mortars with different w/c ratios and different paste volumes is shown**

z trzech próbek. Zaformowane próbki przechowywano pod folią w stałej temperaturze 20°C ± 2°C, a po 24 h rozformowano je i przeprowadzono pierwszy pomiar. Badania skurczu realizowano w temperaturze 20°C ± 2°C i przy wilgotności względnej 60% ± 5%., a próbki przechowywano w komorze klimatycznej w tych samych warunkach.

**Konsystencję i zawartość powietrza** w świeżej zaprawie oznaczano odpowiednio metodą stolika rozpływu zgodnie z EN 1015-3:2000 [24] oraz metodą ciśnieniową zgodnie z EN 413-22:2016 [25]. Wyniki tych badań stanowią średnią z trzech oznaczeń. Parametry reologiczne zapraw mierzono za pomocą rotacyjnego reometru Viskomat NT, a właściwości reologiczne opisywano za pomocą parametrów modelu Binghama, tj. granicy płynięcia i lepkości plastycznej. W przypadku urządzenia Viskomat NT parametry określano w jednostkach umownych: granica płynięcia g [Nm] oraz lepkość plastyczna h [Nm·s]. Zaprawę umieszczano w pojemniku reometru i rozpoczynano badanie. Program pomiarowy trwał 5 minut – w trakcie 1 minuty prędkość zwiększała się do prędkości maksymalnej 120 rpm, którą utrzymywano 3 minuty; w ostatniej minucie sukcesywnie zmniejszano prędkość do 0 rpm. Badanie wykonywano w temperaturze 20°C ± 2°C, utrzymywanej w zaprawie w trakcie pomiaru. Szczegółowy opis procedury pomiaru parametrów reologicznych przedstawiono w [26].

Wytrzymałość na zginanie i ściskanie stwardniałych zapraw oznaczano zgodnie z normą EN 196-1:2016 [22]. Wytrzymałość na zginanie liczono jako średnią z trzech próbek, a wytrzymałość na ściskanie jako średnią z sześciu próbek. Nasiąkliwość zapraw $W_a$, nasiąkliwość kapilarną $W_{ac}$ oraz współczynnik absorpcji kapilarnej $C_{Mm}$ określano na próbkach o wymiarach 40 × 40 × 160 mm po 28 dniach dojrzewania, które suszono do stałej masy w temperaturze 105°C ± 5°C. Nasiąkliwość obliczano ze wzoru:

$$W_\alpha = \frac{m_m - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

gdzie: $m_m$ – masa próbki nasyconej wodą [g]; $m_s$ – masa próbki wysuszonej do stałej masy [g].

Następnie próbki dzielono na połowy, a boczne powierzchnie każdej połowy pokryto woskiem. Nasiąkliwość kapilarną $W_{ac}$ określającą zmianę masy próbek zanurzonych w wodzie do wysokości 10 mm po 1, 3, 6 i 24 h obliczano na podstawie wzoru:

$$W_{ac} = \frac{m_{kt} - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (2)$$

gdzie $m_{kt}$ – masa próbki po czasie t = 1, 3, 6, 24 h [g].

Współczynnik absorpcji kapilarnej $C_{Mm}$ wyznaczano ze wzoru:

$$C_{Mm} = \frac{m_{kt} - m_s}{S_s \times t^{0,5}} \ [kg/(m^2 \cdot min.^{0,5})] \quad (3)$$

gdzie: $m_{kt}$ – masa próbki po 90 minutach od zanurzenia w wodzie; $m_s$ – masa próbki wysuszonej do stałej masy; $S_s$ – pole powierzchni próbki; t – czas.

Przedstawione wyniki badań stanowią średnią z trzech próbek, chyba że określono inaczej.

**in Figure 1.** As expected, the plastic shrinkage of the reference mortars (without SRA) increases with increasing w/c ratio and paste volume. The addition of SRA significantly reduces plastic shrinkage during the initial period after the mortar is placed. For approximately 1 hour, the shrinkage of mortars with SRA is 26–33% lower than that of reference mortars, although only in the case of mortar with a high cement paste content ($V_{CP}$ = 625 dm³/m³) is the effect of SRA more pronounced. It can therefore be concluded that during this period, the effectiveness of SRA does not depend on the w/c ratio, but may be greater in mortars with a high cement paste content. At the same time, SRA delays the cement hydration process in the early stage and prolongs the setting time, which extends the period during which the mortar remains in a plastic state and is susceptible to water evaporation and plastic shrinkage. Plastic shrinkage in mortars with SRA may continue to develop even when the reference mortars have already hardened. As a result, after 4–6 hours, the shrinkage of the REF and SRA mortars does not differ significantly.

The results showing the effect of SRA, the w/c ratio, and the volume of the paste ($V_{CP}$) on the shrinkage of mortars are presented in Figure 2. They confirm the typical relationship between the w/c ratio and the amount of paste and the shrinkage of cementitious composites, as described, among others, in [1–3]. The shrinkage of mortars REF increases with an increase in the volume of water or paste, starting from the onset of hardening up to day 28. Increasing the w/c ratio from 0.45 to 0.55 while keeping the volume of cement paste constant resuts in a 38% increase in shrinkage after 28 days, whereas increasing the volume of the cement paste $V_{CP}$ from 416 to 625 dm³/m³ at a constant w/c ratio increases shrinkage after 28 days by 64%. Within the tested range of variability, the effect of cement paste volume on shrinkage is therefore clearly stronger than the effect of the w/c ratio.

The addition of SRA reduces the shrinkage of the tested mortars. This effect is independent of the w/c ratio and the paste volume ($V_{CP}$) and does not alter the general relationships between mortar shrinkage and the volume of the paste or the w/c ratio. The effect of SRA is most pronounced in the initial stage of mortar hardening, and then gradually decreases over time. After one day, the shrinkage of mortars with SRA is on average 78% less than that of reference mortars, while after 3, 7, and 28 days, this reduction is 36%, 29%, and 25%, respectively.

The relationships obtained regarding the effect of SRA on shrinkage are consistent

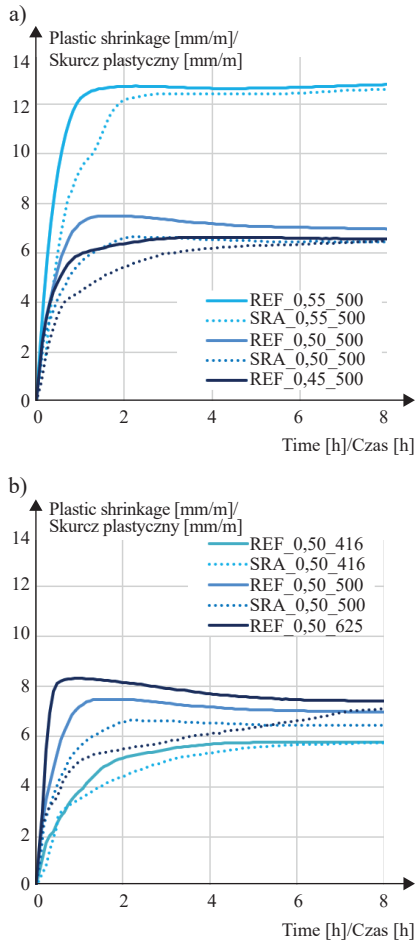


**Fig. 1. Effect of SRA on shrinkage of: a) mortar with different w/c ratios and a constant cement paste volume $V_{CP}$ = 500 dm³/m³; b) mortar with different cement paste volumes $V_{CP}$ and a constant w/c ratio = 0,50**

*Rys. 1. Wpływ SRA na skurcz: a) zaprawy o różnym stosunku w/c i stałej objętości zaczynu cementowego $V_{CP}$ = 500 dm³/m³; b) zaprawy o różnej objętości zaczynu cementowego $V_{CP}$ i stałym stosunku w/c = 0,50*

## Wyniki badań i dyskusja

**Wpływ SRA na skurcz plastyczny zapraw o różnym stosunku w/c i różnej objętości zaczynu** przedstawiono na rysunku 1. Zgodnie z oczekiwaniami, skurcz plastyczny zapraw referencyjnych (bez SRA) zwiększa się wraz ze wzrostem w/c oraz objętości zaczynu. Dodatek SRA istotnie redukuje skurcz plastyczny w początkowym okresie po ułożeniu zaprawy. Przez ok. 1 h skurcz zapraw z SRA jest o 26–33% mniejszy niż zapraw referencyjnych, przy czym jedynie w przypadku zaprawy o duzej zawartości zaczynu cementowego ($V_{CP}$ = 625 dm³/m³) efekt działania SRA jest silniejszy. Można zatem stwierdzić, że w tym okresie skuteczność SRA nie zależy od stosunku w/c, lecz może być większa w zaprawach o dużej zawartości zaczynu cementowego. Jednocześnie SRA opóźnia proces hydratacji cementu we wczesnym etapie i wydłuża czas wiązania, co powoduje wydłużenie okresu, w którym zaprawa pozostaje w stanie plastycznym oraz jest podatna na odparowanie wody i skurcz plastyczny. Skurcz plastyczny zapraw z SRA może się rozwijać jeszcze wtedy, gdy zaprawy referencyjne są już stwardniałe. W konsekwencji po 4–6 h skurcz zapraw REF i SRA nie różni się istotnie.

Wyniki wpływu SRA, stosunku w/c oraz objętości zaczynu $V_{CP}$ na skurcz zapraw przedstawiono na rysunku 2. Potwierdzają one typową zależność pomiędzy stosunkiem w/c oraz ilością zaczynu a skurczem kompozytów cementowych, opisaną m.in. w [1÷3]. Skurcz zapraw REF zwiększa się ze wzrostem objętości wody lub zaczynu, począwszy od rozpoczęcia twardnienia aż do 28. dnia. Zwiększenie stosunku w/c z 0,45 do 0,55 przy stałej objętości zaczynu cementowego powoduje wzrost skurczu po 28 dniach o 38%, natomiast zwiększenie objętości zaczynu $V_{CP}$ z 416 do 625 dm³/m³ przy stałym stosunku w/c zwiększa skurcz po 28 dniach o 64%. W badanym zakresie zmienności wpływ objętości zaczynu cementowego na skurcz jest zatem wyraźnie silniejszy niż wpływ stosunku w/c.

Dodanie SRA zmniejsza skurcz badanych zapraw. Efekt ten jest niezależny od stosunku w/c oraz objętości zaczynu $V_{CP}$ i nie zmienia ogólnych zależności pomiędzy skurczem zaprawy a objętością zaczynu lub stosunkiem w/c. Działanie SRA jest najbardziej wyraźne w początkowym etapie twardnienia zapraw, a następnie stopniowo maleje w czasie. Po jednym dniu skurcz zapraw z SRA jest średnio o 78% mniejszy niż zapraw referencyjnych, natomiast po 3, 7 i 28 dniach redukcja ta wynosi odpowiednio 36, 29 i 25%.

Uzyskane zależności dotyczące wpływu SRA na skurcz są zgodne z badaniami

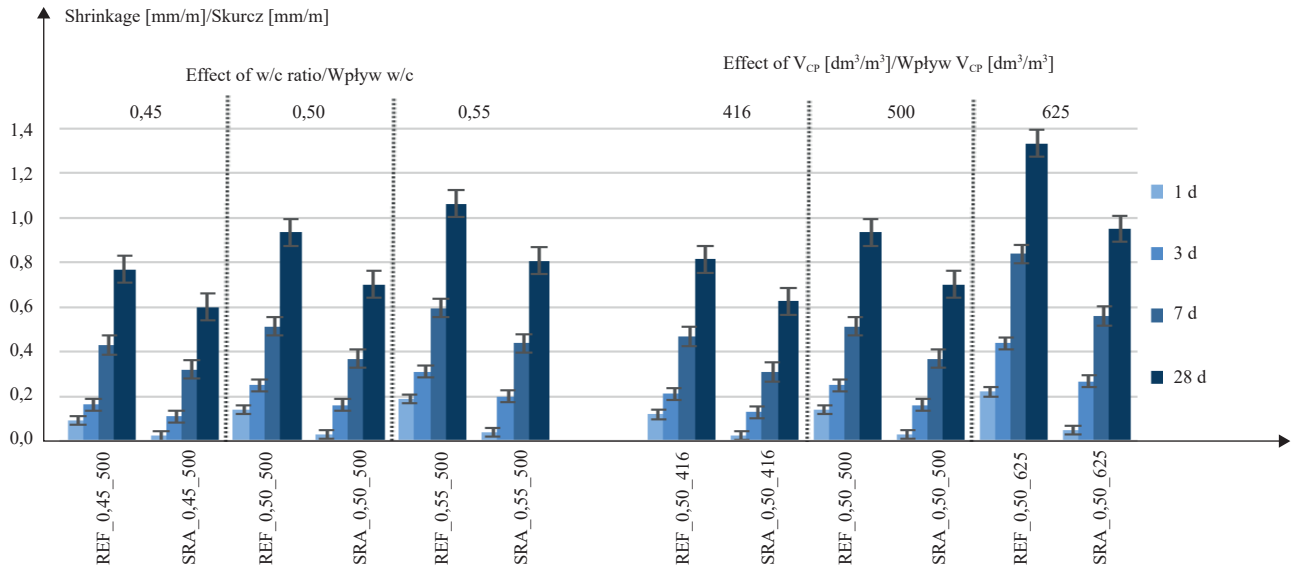


**Fig. 2. Effect of SRA on the shrinkage of mortars with different w/c ratios and different $V_{CP}$ slurry volumes. The vertical lines indicate the standard deviation**

*Rys. 2. Wpływ SRA na skurcz zapraw o różnym stosunku w/c i różnej objętości zaczynu $V_{CP}$. Wąsy pionowe oznaczają odchylenie standardowe*

with the studies discussed in [3], where the possible mechanisms of action of SRA are also presented in detail. As shown in Figure 3, the absolute reduction in mortar shrinkage resulting from the use of SRA is proportional to the w/c ratio and the volume of the paste.For example, after 28 days, the reduction in shrinkage of mortars with $V_{CP}$ = 416, 500, and 625 dm³/m³ is, respectively, 0.18; 0.23; and 0.38 mm/m, while for mortarswith w/c ratios of 0.45, 0.50, and 0.55, is 0.17, 0.23, and 0.25 mm/m, respectively.

It therefore appears that the effect of SRA on mortar shrinkage depends on the w/c ratio and the cement paste volume $V_{CP}$; however, if one compares the reduction in mortar shrinkage resulting from the addition of SRA with the shrinkage of REF mortars, the relative reduction in shrinkage of mortars with different w/c ratios and cement paste volumes $V_{CP}$ is similar and falls, respectively, within the ranges of 76–79%, 32–39%, 28–34%, and 25–29%. Such a narrow range of variation in the

omówionymi w [3], gdzie szczegółowo zaprezentowano również możliwe mechanizmy działania SRA. Jak pokazano na rysunku 3, bezwzględna redukcja skurczu zapraw wynikająca z zastosowania SRA jest proporcjonalna do stosunku w/c oraz objętości zaczynu. Przykładowo, po 28 dniach zmniejszenie skurczu zapraw o $V_{CP}$ = 416, 500 i 625 dm³/m³ wynosi odpowiednio 0,18; 0,23 i 0,38 mm/m, natomiast zapraw o stosunku w/c = 0,45; 0,50 i 0,55 – odpowiednio 0,17; 0,23 i 0,25 mm/m.

Wydaje się zatem, że wpływ SRA na skurcz zapraw zależy od stosunku w/c oraz objętości zaczynu $V_{CP}$, ale jeżeli porówna się zmniejszenie skurczu zaprawy wynikające z dodania SRA ze skurczem zapraw REF, względne zmniejszenie skurczu zapraw o różnym stosunku w/c i objętości zaczynu cementowego $V_{CP}$ jest podobne i mieści się odpowiednio w przedziale 76–79%, 32–39%, 28–34% oraz 25–29%. Tak wąski zakres zmian względnego zmniejszenia skurczu, wyraźnie poniżej 10%, wskazuje, że stosunek w/c oraz objętość zaczynu ce-

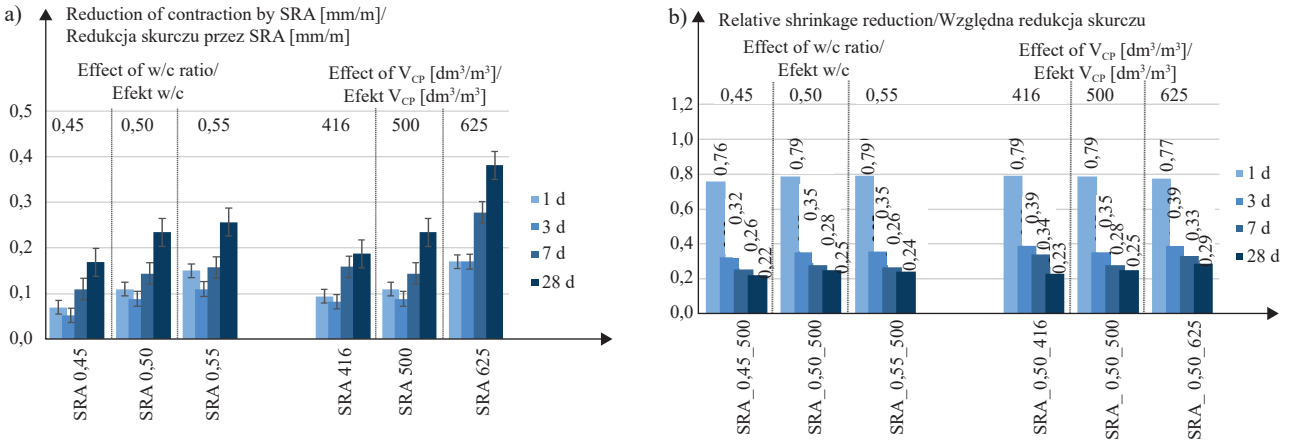


**Fig. 3. Absolute (a) and relative (b) effects of SRA on the reduction in shrinkage of mortars with different w/c ratios and $V_{CP}$ slurry volumes. The vertical lines indicate the standard deviation**

*Rys. 3. Bezwzględny (a) oraz względny (b) wpływ SRA na redukcję skurczu zapraw o różnym stosunku w/c i objętości zaczynu $V_{CP}$. Wąsy pionowe oznaczają odchylenie standardowe*

relative reduction in shrinkage, clearly below 10%, indicates that the w/c ratio and the volume of the cement paste $V_{CP}$ have a negligible effect on the performance of SRA. This result is confirmed by the analysis of variance (ANOVA) presented in Table 3. A two-factor ANOVA with replicates was performed for each combination of two factors (w/c, amount of SRA; paste volume, amount of SRA), using three replicates on three samples. The samples were independent. The analysis indicates a significant effect of SRA, the w/c ratio, and the paste volume ($V_{CP}$) on reducing the shrinkage of the mortars after 28 days. No interaction was found between SRA and the starter volume $V_{CP}$ or the w/c ratio. Analyses of variance (ANOVA) regarding the shrinkage of the mortars after 1, 3, and 7 days also did not reveal such an interaction.

**The effect of SRA on the consistency of fresh mortars** is shown in Figure 4, while its effect on their rheological properties is shown in Figure 5. The results confirm the influence of the w/c ratio and the volume of $V_{CP}$ cement paste on the flowability of mortars (and cementitious composites). Increasing the w/c ratio or the volume of the $V_{CP}$ cement paste significantly increases the flowability of fresh mortars – it reduces the yield stress and plastic viscosity of the mortar, increases its flow diameter, and reduces the loss of flowability over time. The addition of SRA reduces the yield stress and plastic viscosity of fresh mortars by 10–20% and 5–10%, respectively. The rheological parameters of both REF mortars and SRA mortars improve over time, but the presence of SRA does not have a decisive effect on the extent of this improvement. The results of

mentowego $V_{CP}$ mają znikomy wpływ na działanie SRA. Wynik ten potwierdza analiza wariancji (ANOVA) przedstawiona w tabeli 3. Wykonano analizę dwuczynnikową ANOVA z powtórzeniami, w przypadku każdej kombinacji dwóch czynników (w/c, ilość SRA; objętość zaczynu, ilość SRA), wykorzystując trzy powtórzenia na trzech próbkach. Próby były niezależne. Analiza wskazuje na istotny wpływ SRA, stosunku w/c oraz objętości zaczynu $V_{CP}$ na zmniejszenie skurczu zapraw po 28 dniach. Nie stwierdzono interakcji między SRA a objętością zaczynu $V_{CP}$ lub stosunkiem w/c. Analizy wariancji (ANOVA) dotyczące skurczu zapraw po 1, 3 i 7 dniach również nie wykazały takiej interakcji.

**Wpływ SRA na konsystencję świeżych zapraw** przedstawiono na rysunku 4, natomiast na ich właściwości reologiczne na rysunku 5. Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ stosunku w/c oraz objętości zaczynu cementowego $V_{CP}$ na płynność zapraw (i kompozytów cementowych). Zwiększenie stosunku w/c lub objętości zaczynu $V_{CP}$ znacznie zwiększa płynność świeżych zapraw – zmniejsza granicę plastyczności i lepkość plastyczną zaprawy, zwiększa jej średnicę rozpływu oraz zmniejsza utratę płynności w czasie. Dodatek SRA zmniejsza granicę plastyczności i lepkość plastyczną świeżych zapraw odpowiednio o 10–20% i 5–10%. Parametry reologiczne zarówno zapraw REF, jak i zapraw SRA poprawiają się w miarę upływu czasu, ale obecność SRA nie ma decydującego wpływu na zakres tego wzrostu. Wyniki badania stolikiem rozpływu potwierdzają działanie uplastyczniające SRA – jego dodanie zwiększa rozpływ zapraw o 10–15%

**Table 3. ANOVA analysis of the effects of SRA, the w/c ratio, and $V_{CP}$ slurry volume on the reduction in mortar shrinkage after 28 days. The significance level was set at α = 0,05**

*Tabela 3. Analiza ANOVA wpływu SRA, stosunku w/c oraz objętości zaczynu $V_{CP}$ na redukcję skurczu zapraw po 28 dniach. Poziom istotności został przyjęty jako α = 0,05*

| Source of variaton/ Źródło wariancji | F (2.12) | p value/ p | F crit | Source of variaton/ Źródło wariancji | F (2.12) | p value/ p | F crit |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A: w/c ratio | 13.760 | 0.000 | 3.885 | A: $V_{CP}$ | 34.463 | 0.000 | 3.885 |
| B: SRA | 31.867 | 0.000 | 4.747 | B: SRA | 38.027 | 0.000 | 4.747 |
| AB | 0.455 | 0.644 | 3.885 | AB | 1.807 | 0.206 | 3.885 |

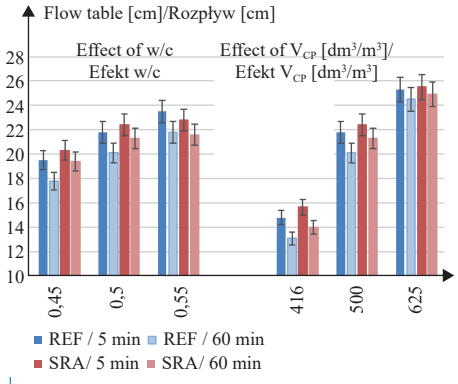


**Fig. 4. Effect of SRA on mortar consistency. The vertical bars indicate the standard deviation**

*Rys. 4. Wpływ SRA na konsystencję zapraw. Wąsy pionowe oznaczają odchylenie standardowe*

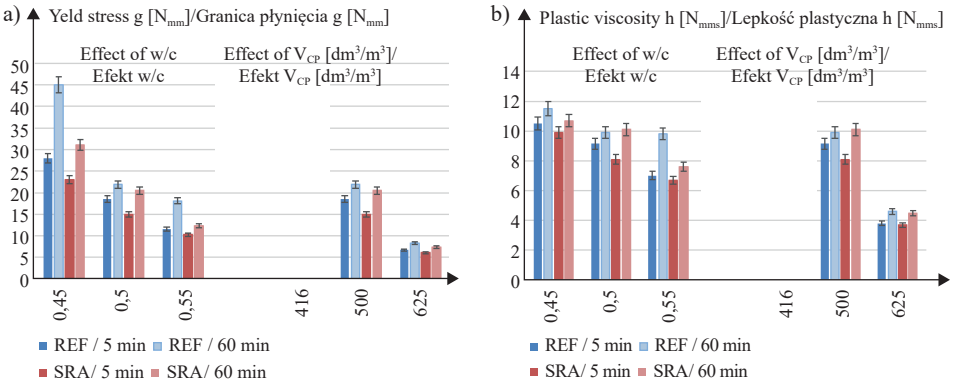


**Fig. 5. Effect of SRA on the rheological properties of fresh mortars: a) yield stress (g), b) plastic viscosity (h). The vertical whiskers indicate the 95% confidence level. Mortars with a $V_{CP}$ of 416 dm³/m³ were too stiff to undergo rheological measurements**

*Rys. 5. Wpływ SRA na właściwości reologiczne świeżych zapraw: a) granica płynięcia (g), b) lepkość plastyczna (h). Wąsy pionowe oznaczają 95% poziom ufności. Zaprawy o $V_{CP}$ = 416 dm³/m³ były zbyt sztywne do przeprowadzenia pomiarów reologicznych*

the consistency test confirm the plasticizing effect of SRA–its addition increases the flow diameter of mortars by approx. 10–15% and slows its decrease in time. The plasticizing effect of SRA results primarily from a reduction in the surface tension of water and the glycol content in SRA [3]. The results do not indicate a significant effect of the water-to-cement ratio (w/c) or the paste volume ($V_{CP}$) on the plasticizing effect of SRA.

The effect of SRA on the air content in the mortar is shown in Figure 6. Reducing the w/c ratio or the volume of paste $V_{CP}$ leads to a decrease in the air content of fresh mortar. This is due to the fact that air bubbles are more easily released from mortar with a more fluid consistency and a lower aggregate content. The addition of SRA reduces the air content in all tested mortars by approximately 20%, which results from the increased consistency of mortars containing SRA and/or the destabilizing effect of glycol-based SRA admixtures on air bubbles, as mentioned in [14].

**The effect of SRA on the flexural and compressive strength of mortars** is shown in Figure 7. The test results demonstrate the typical influence of the water-to-cement ratio and the volume of cement paste on the flexural and compressive strength. Strength decreases as the w/c ratio increases, whereas the effect of the cement paste volume $V_{CP}$ is extreme – both very small and very large volumes of cement paste cause a decrease in strength. The addition of SRA has a negative effect on flexural strength, reducing it by 15–22% regardless of the mortar composition. However, it does not significantly affect the compressive strength of mortars, although it can be noted that the strength of mortars with SRA added is often slightly lower than that of comparable REF mortars. The test results areconsistent with the current state of knowledge [3], although the literature often reports a negative effect of SRA on compressive strength as well. They do not indicate that the effect of SRA on strength depends on the w/c ratio or the volume of the paste ($V_{CP}$). According to [3], SRA has a negative effect on the quality of the interphase transition zone (ITZ) in cementitious composites; at the same time, however, SRA reduces the cracking potential and microporosity of the cement paste matrix. Tensile strength depends primarily on the strength of the ITZ, whereas compressive strength is additionally influenced i spowalnia jego spadek w czasie. Działanie uplastyczniające SRA wynika przede wszystkim ze zmniejszenia napięcia powierzchniowego wody i zawartości w SRA glikolu [3]. Wyniki nie wskazują na istotny wpływ wskaźnika w/c ani objętości zaczynu $V_{CP}$ na działanie uplastyczniające SRA.

Wpływ SRA na zawartość powietrza w zaprawie przedstawiono na rysunku 6. Zmniejszenie stosunku w/c lub objętości zaczynu $V_{CP}$ prowadzi do spadku zawartości powietrza w świeżej zaprawie. Wynika to z faktu, że pęcherzyki powietrza łatwiej uwalniają się z zapraw o bardziej płynnej konsystencji i mniejszej zawartości kruszywa. Dodatek SRA zmniejsza zawartość powietrza we wszystkich badanych zaprawach o ok. 20%, co wynika ze zwiększenia konsystencji zapraw zawierających SRA i/lub destabilizującego wpływu domieszek SRA na bazie glikolu na pęcherzyki powietrza, o czym wspomniano w [14].

**Wpływ SRA na wytrzymałość na zginanie i ściskanie** zapraw przedstawiono na rysunku 7. Wyniki badań pokazują typowy wpływ stosunku w/c oraz objętości zaczynu cementowego $V_{CP}$ na wytrzymałość na zginanie i ściskanie. Wytrzymałość maleje wraz ze wzrostem stosunku w/c, natomiast wpływ objętości zaczynu $V_{CP}$ jest skrajny – zarówno bardzo mała, jak i bardzo duża objętość zaczynu $V_{CP}$ powoduje spadek wytrzymałości. Dodatek SRA ma negatywny wpływ na wytrzymałość na zginanie, zmniejszając ją o 15–22% niezależnie od składu zaprawy. Nie wpływa on jednak znacznie na wytrzymałość zapraw na ściskanie, chociaż można zauważyć, że wytrzymałość zapraw z dodatkiem SRA jest często nieznacznie mniejsza niż analogicznych zapraw REF. Wyniki badań są zgodne z aktualnym stanem wiedzy [3], chociaż często spotyka się w literaturze również negatywny wpływ SRA na wytrzymałość na ściskanie. Nie wskazują, aby wpływ SRA na wytrzymałość zależał od wskaźnika w/c lub objętości zaczynu $V_{CP}$. Zgodnie z [3] SRA negatywnie wpływa na jakość międzyfazowej strefy przejściowej (ITZ) w kompozytach cementowych, jednocześnie jednak SRA zmniejsza potencjał pękania i mikroporowatość matrycy zaczynu. Wytrzymałość na rozciąganie zależy przede wszystkim od wytrzymałości strefy ITZ, natomiast na wytrzymałość na ściskanie dodatkowy wpływ ma poro-

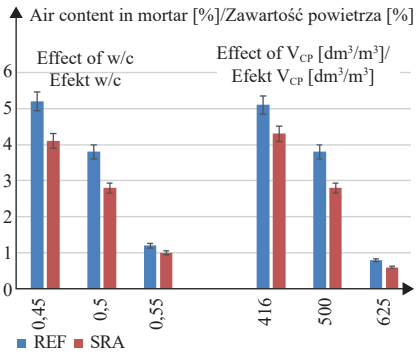


**Fig. 6. Effect of SRA on the air content in fresh mortar. The vertical lines indicate the standard deviation**

*Rys. 6. Wpływ SRA na zawartość powietrza w świeżych zaprawach. Wąsy pionowe oznaczają odchylenie standardowe*

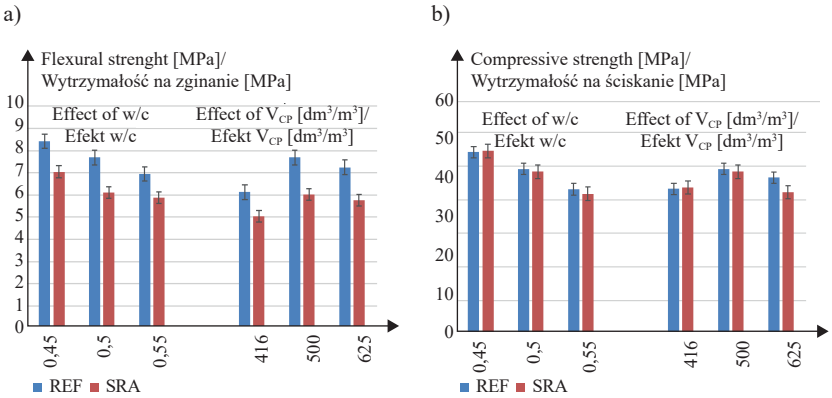


**Fig. 7. Effect of SRA on: a) flexural strength; b) compressive strength of mortars after 28 days. The vertical bars indicate the standard deviation**

*Rys. 7. Wpływ SRA na: a) wytrzymałość na zginanie; b) wytrzymałość na ściskanie zapraw po 28 dniach. Wąsy pionowe oznaczają odchylenie standardowe*

by the porosity of the cement matrix structure. This may explain the greater effect of SRA on the flexural strength of mortars than on their compressive strength.

The Effect of SRA on Mortar Water Absorption ($W_a$), capillary water absorption ($W_{ac}$), and the water absorption coefficient ($C_{Mm}$) are shown in Figure 8. These parameters increase with an increase in the w/c ratio or paste volume, which is a consequence of the increase in the volume of open pores in the mortar. The addition of SRA has a very beneficial effect on water absorption. Water absorption ($W_a$) decreases by 10–15%, while $W_{ac}$ and $C_{Mm}$ decrease by as much as 65–75%, regardless of the w/c ratio and $V_{CP}$. The reduction in water absorption results from an improvement in the mortar's microstructure due to reduced shrinkage and the hydrophobic effect of SRA, which reduces capillary pressure and the ability of capillaries to transport water. This effect should lead to improved durability of cementitious composites; however, this requires verification under specific environmental conditions.

watość struktury matrycy cementowej. Może to wyjaśniać większy wpływ SRA na wytrzymałość zapraw na zginanie niż na wytrzymałość na ściskanie.

Wpływ SRA na nasiąkliwość zapraw ($W_a$), nasiąkliwość kapilarną ($W_{ac}$) oraz współczynnik nasiąkliwości ($C_{Mm}$) przedstawiono na rysunku 8. Parametry te zwiększają się wraz ze wzrostem stosunku w/c lub objętości zaczynu, co jest konsekwencją zwiększenia objętości porów otwartych w zaprawie. Dodatek SRA ma bardzo korzystny wpływ na nasiąkliwość. Nasiąkliwość $W_a$ zmniejsza się o 10–15%, natomiast $W_{ac}$ i $C_{Mm}$ nawet o 65–75%, niezależnie od stosunku w/c oraz $V_{CP}$. Redukcja nasiąkliwości jest wynikiem poprawy mikrostruktury zaprawy wskutek ograniczenia skurczu oraz hydrofobowego działania SRA, które zmniejsza ciśnienie kapilarne i zdolność kapilar do transportu wody. Efekt ten powinien prowadzić do poprawy trwałości kompozytów cementowych, co jednak wymaga weryfikacji w określonych warunkach środowiskowych.

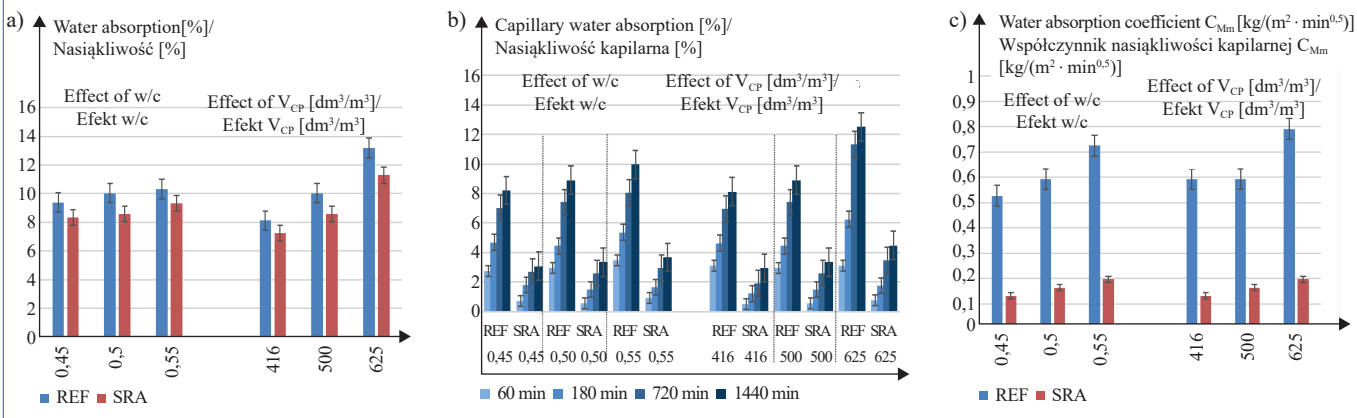


**Fig. 8. Effect of SRA on: a) water absorption ($W_a$); b) capillary water absorption ($W_{ac}$); c) capillary absorption coefficient ($C_{Mm}$) of mortars. The vertical lines indicate the standard deviation**

*Rys. 8. Wpływ SRA na: a) nasiąkliwość $W_a$; b) nasiąkliwość kapilarną $W_{ac}$; c) współczynnik absorpcji kapilarnej $C_{Mm}$ zapraw. Wąsy pionowe oznaczają odchylenie standardowe*

## Conclusions

Based on the presented test results, it can be concluded that the water-to-cement ratio and the volume of cement paste in the mortar did not affect the mode of action or the effectiveness of the tested SRA. The reduction in mortar shrinkage resulting from the use of SRA, compared to the shrinkage of REF mortars, did not depend on the volume of cement paste or the w/c ratio. These parameters also did not affect other, secondary effects resulting from the use of SRA. The tested SRA initially reduced the plastic shrinkage of the mortars, but the SRA delayed cement setting, and mortars with SRA remained plastic longer than REF mortars. As a result, the plastic shrinkage of SRA and REF mortars was similar over the long term. SRA reduced the shrinkage of hardened mortars, but its effect changed over time and was particularly pronounced during the initial hardening period. After 1 day, the shrinkage of mortars containing SRA was at least 70% less than that of REF mortars, but over time, the effect of SRA on shrinkage gradually decreased. After 28 days, the reduction in mortar shrinkage resulting from the use of SRA did not exceed 30%. The addition of the tested SRA

## Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że stosunek wody do cementu oraz objętość zaczynu cementowego w zaprawie nie miały wpływu na charakter działania ani skuteczność badanego SRA. Zmniejszenie skurczu zapraw wynikające ze stosowania SRA w porównaniu ze skurczem zapraw REF nie zależało od objętości zaczynu cementowego i stosunku wody do cementu. Parametry te nie wpłynęły również na inne, drugorzędne efekty wynikające ze stosowania SRA. Badane SRA początkowo zmniejszyło skurcz plastyczny zapraw, ale SRA opóźniło wiązanie cementu, a zaprawy z SRA pozostały plastyczne dłużej niż zaprawy REF. W rezultacie skurcz plastyczny zapraw z SRA i REF był podobny w dłuższej perspektywie czasowej. SRA zmniejszyło skurcz stwardniałych zapraw, ale jego wpływ zmieniał się z upływem czasu i szczególnie był wyraźny w początkowym okresie twardnienia. Po 1 dniu skurcz zapraw zawierających SRA był co najmniej o 70% mniejszy niż zapraw REF, ale z upływem czasu wpływ SRA na skurcz stopniowo malał. Po 28 dniach zmniejszenie skurczu zaprawy

did not significantly affect the basic rheological properties of the mortars. SRA had a plasticizing effect, slightly lowering the yield stress and plastic viscosity of fresh mortar. It reduces the air content in fresh mortar, which may hinder the use of air-entraining admixtures. The tested SRA admixture reduces flexural strength while having a negligible effect on the compressive strength of hardened mortars and water absorption, particularly capillary absorption, and thus shows potential for improving the durability of mortar. These studies may therefore serve as a basis for more extensive research covering a larger number of SRA admixtures and a wider range of w/c ratios.

wynikające ze stosowania SRA nie przekroczyło 30%. Dodatek badanego SRA nie wpłynął znacznie na podstawowe właściwości reologiczne zapraw. SRA działało uplastyczniająco, nieznacznie obniżając granicę plastyczności i lepkość plastyczną świeżej zaprawy. Zmniejsza zawartość powietrza w świeżej zaprawie, co może utrudniać stosowanie domieszek napowietrzających. Badana domieszka SRA zmniejsza wytrzymałość na zginanie, mając jednocześnie znikomy wpływ na wytrzymałość na ściskanie stwardniałych zapraw oraz nasiąkliwość, szczególnie kapilarną, a tym samym wykazuje potencjał do poprawy trwałości zaprawy. Badania te mogą więc stanowić przyczynek do szerzej zakrojonych badań obejmujących większą ilość domieszek SRA oraz większy zakres w/c.

*Received: 16.02.2026*
*Revised: 20.04.2026*
*Published: 19.08.2026*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 16.02.2026 r.*
*Otrzymano poprawiony po recenzjach: 20.04.2026 r.*
*Opublikowano: 19.08.2026 r.*

## Literatura

**[1]** Neville A.M.: Właściwości betonu. Polski Cement Polski, Kraków 2000

**[2]** Kurdowski W.: Chemia cementu i betonu, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2010

**[3]** Pei-min Z., Zhi-hai H., Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review, Constr. Build. Mater., 2019, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209.

**[4]** Tran N. P., Gunasekara C., Law D.W., Houshyar S., Setunge S., Cwirzen A., A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials, J. Build. Eng., 2021, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102210.

**[5]** Zhan P., He Z.: Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review", Constr. Build. Mater., 2019, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209.

**[6]** Videla C, Aguilar C.: Effectiveness of shrinkage-reducing admixtures on Portland pozzolan cement concrete", Mater. Constr. 2005, https://doi.org/10.3989/mc.2005.v55.i278.186

**[7]** Bentz D.P., Jensen O.M.: Mitigation Strategies for Autogenous Shrinkage Cracking. Cem. Concr. Compos, 2004, DOI: 10.1016/S0958–9465 (03)00045–3.

**[8]** Gołaszewski J.: Concrete admixtures: Effects, evaluation and performance testing, application (in polish). Politechnika Śląska, vol. 609, Gliwice 2016,

**[9]** Weiss W.J, Shah S.P.: Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry. Mater. Struct., 2002, DOI: 10.1617/13799

**[10]** Weiss W. J, Yang W., Shah S.P.: Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. J. Eng. Mech. 1998, DOI: 10.1061/(ASCE) 0733–9399 (1998)124:7 (765)

**[11]** Gołaszewski J., Gołaszewska M., The effect of shrinkage reducing admixture and expansive admixture on properties of mortars with Portland and slag cement, Arch. Civ. Eng., 2022, DOI: 10.24425/ace.2022.140646

**[12]** Nmai C.K., Tomita R., Hondo F., Buffenbarger J.: Shrinkage Reducing--Admixtures. CI, 1998, 20 (4), 31–37

**[13]** Newberry C.: Using Shrinkage-Reducing Admixtures to Minimize Shrinkage Cracking. Quality Concrete, 2001, 7 (11) 179–181

**[14]** Kamimoto H., Ishikawa K., Uchida Y.: Freezing and Thawing Resistance of Concrete Using Shrinkage-Reducing Admixture. 6th CANMET/ACI International Conference of Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, SP-195, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2000, 415–430

**[15]** Berke N.S., Li L., Hicks M.C., Bae J.: Improving Concrete Performance with Shrinkage-Reducing Admixtures. 7th CANMET/ACI International Conference of Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, SP-217, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2003, 37–50

**[16]** Han Y.: The Effect of Shrinkage-Reducing Admixture on Mechanical Properties and Volume Stability of Concrete. Environmental Ecology and Technology of Concrete, 2006, p. 230–234

**[17]** Holland T.: Using Shrinkage-Reducing Admixtures. Concrete Construction, 1999, https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302–303.230

**[18]** Klausen A. E., Kanstad T.: The effect of shrinkage reducing admixtures on drying shrinkage, autogenous deformation, and early age stress development of concrete, Struct. Concr., 2021, https://doi.org/10.1002/suco.201900583.

**[19]** Wang L., Song Y., Tang Z., Ma G., Long G., Xie Y.: Experimental study on the drying shrinkage mitigation technique for cement-based materials in plateau: Low-heat cement and shrinkage-reducing admixture, Case Stud. Constr. Mater, 2025, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05170.

**[20]** Saliba J., Rozière E., Grondin F., Loukili A.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage, Cem. Concr. Compos., 2011, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.006.

**[21]** Kioumarsi M., Azarhomayun F., Haji M., Shekarchi M.: Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Drying Shrinkage of Concrete with Different w/

**[22]** Kucharczyková B., Kocáb D., Rozsypalová I., Karel O., Misák P., Vymazal T., Measurement and evaluation proposal of early age shrinkage of cement composites using shrinkage-cone, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 379, International Conference Building Materials, Products and Technologies 29–31 May 2018, Blansko-Češkovice, Czech Republic, DOI 10.1088/1757–899X/379/1/012038

**[23]** EN 1015–3:1999; Test Methods for Fresh Mortar Consistence by Flow Table. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, 1999.

**[24]** EN 413-2:2016; Masonry Cement Test Methods for Fresh Mortar Compliance. Comité Européen de Normalisation (CEN): Brussels, Belgium, 2016.

**[25]** Gołaszewski, J.; Cygan, G.; Gołaszewska, M.; Klemczak, B.; Jonkers, H.; Zhilyaev, D.; Koenders, E.A.B. Utilization of Recycled Foam Concrete Powder with Phase-Change Material as a Cement or Sand Replacement: Impact on Mortar Properties and Superplasticizer Performance. *Sustainability* 2026, https://doi.org/10.3390/su18021004