ANDRZEJ K. DUBINIEWICZ¹⁾

ORCID: 0000-0002-7976-1675

SCANDINAVIAN PEBBLES AS MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF CRUSHED AGGREGATES – PETROGRAPHIC IDENTIFICATION OF POTENTIALLY ALKALI-REACTIVE MINERALS

OTOCZAKI SKANDYNAWSKIE JAKO MATERIAŁ DO PRODUKCJI KRUSZYW ŁAMANYCH – PETROGRAFICZNA IDENTYFIKACJA MINERAŁÓW POTENCJALNIE REAKTYWNYCH ALKALICZNIE

STRESZCZENIE. Artykuł przedstawia wyniki szczegółowych badań petrograficznych 15 skał, wybranych spośród 102 otoczków skandynawskich, pobranych z osadów ostatniego zlodowacenia w żwirowni w północno-zachodniej Polsce, a także gysu polodowcowego z północno-wschodnich Niemiec. Miały one na celu identyfikację w materiale polodowcowym obecności potencjalnie reaktywnych form krzemionki i okruchów skał w kontekście ASR (*Alkali-Silica Reaction*). W trakcie prac terenowych ustalono, że w materiale skalnym złożonym z otoczków skały krystaliczne dominowały nad skałami osadowymi. Grys polodowcowy składał się głównie z ziaren różnych odmian granitów, wapieni, gnejsów i piaskowców, odpowiednio w udziale 30,8%, 20,6%, 15,6% i 15,0% masy, przy czym udział ziaren skał osadowych oraz magmowych był zbliżony i był większy niż udział ziaren skał metamorficznych. Obecne były także okruchy reaktywnych czertów i krzemieni, które stanowiły nieco ponad 1% masy tego kruszywa. W analizowanych otoczkach stwierdzono występowanie dwóch form reaktywnej krzemionki – kwarcu w stanie naprężenia i kwarcu mikrokrystalicznego. Ten pierwszy obecny był we wszystkich skałach magmowych głębinowych, metamorficznych i osadowych w zróżnicowanym udziale, od 7,7% do 96,4% objętości, z kolei ten drugi stanowił spoiwo w piaskowcach. Poza nimi, w granitach nierównokrystalicznych z białokremowymi oraz jasnoróżowymi skaleniemi znajdowały się przerosty myrmekitowe, a w porfirach drobnokrystaliczna masa kwarcowo-skalenkowa. Tylko diabaz drobnokrystaliczny czarny nie zawierał tego typu składników.

SŁOWA KLUCZOWE: badania petrograficzne, grys polodowcowy, krzemionka, otoczki skandynawskie, reaktywność alkaliczna.

ABSTRACT. The paper presents the results of detailed petrographic studies of 15 rock fragments, selected from 102 Scandinavian pebbles collected from the last glacial sediments in a gravel pit in north-western Poland and post-glacial crushed aggregate from north-eastern Germany. The aim of the study was to identify the presence of potentially reactive forms of silica and rock fragments prone to ASR (*Alkali-Silica Reaction*). During field work, it was observed that crystalline rocks dominated over sedimentary rocks in the rocky material. Post-glacial crushed aggregate consisted mainly of grains of various varieties of granites, limestones, gneisses, and sandstones, with a share of 30.8%, 20.6%, 15.6%, and 15.0% by mass, respectively; the share of grains of sedimentary and igneous rocks was similar, while the share of grains of metamorphic rocks was lower. This aggregate also contained reactive chert and flint fragments, which constituted slightly over 1% of its mass. Two forms of alkali-reactive silica were found in the analyzed pebbles – strained quartz and microcrystalline quartz. The former was present in all plutonic, metamorphic, and sedimentary rocks in varying proportions, from 7.7% to 96.4% by volume, while the latter was the cement in sandstones. Apart from those forms, myrmekite was found in uneven crystalline granites with white-cream and light pink feldspars, whereas fine crystalline quartz-feldspar mass was found in porphyries. Only black fine crystalline diabase did not contain these types of constituents.

DOI: 10.7409/rabdim.024.020

KEYWORDS: petrographic studies, post-glacial crushed aggregate, silica, Scandinavian pebbles, alkali-reactivity.

¹⁾ Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń; dubiniewicz@umk.pl (✉)

1. WSTĘP

Problematyka reaktywności alkalicznej kruszyw podejmowana jest od połowy XX wieku, kiedy to Stanton [1] po raz pierwszy opisał uszkodzenia konstrukcji betonowych wywołane zastosowaniem kruszywa, którego składniki mineralne weszły w reakcję z alkaliami z cementu. Pomimo upływu lat temat ten pozostaje wciąż aktualny, głównie z powodu konsekwencji, jakie mogą wystąpić wskutek tzw. reakcji alkalia-krzemionka (*Alkali-Silica Reaction*; ASR), do których zaliczane są wykwyty i wysięki żeluz alkaliczno-krzemionkowego na powierzchniach elementów betonowych, wykruszenia, spękania, a niekiedy deformacje wskutek pęcznienia betonu [2]. Wpływają one negatywnie na trwałość betonu w konstrukcji [3], przyczyniając się do pogorszenia właściwości mechanicznych, a w skrajnych przypadkach skracają projektowany okres jej użytkowania.

Reaktywność alkaliczna kruszyw związana jest z obecnością w ich składzie mineralnym reaktywnych alkalicznie form krzemionki, do których należą: opal, chalcedon, krystobalit, trydymit, kwarc kryptokrystaliczny i mikrokrystaliczny, a także kwarc w stanie naprężenia [4]. Kwarc kryptokrystaliczny to kwarc o wielkości do 10 μm , natomiast kwarc mikrokrystaliczny ma rozmiary w zakresie 10-100 μm [5]. Z kolei kwarc w stanie naprężenia to kwarc dynamicznie odkształcony, o zaburzonej strukturze krystalicznej, który w trakcie badań mikroskopowych w świetle przechodzącym wykazuje nieregularne, smużyście lub faliste wygaszanie światła. Do tego typu składników zalicza się również przerosty kwarcowo-skaleniove (myrmekitowe i granofirowe) oraz szkliwo wulkaniczne [4]. Identyfikacja wymienionych składników możliwa jest dopiero przy użyciu metod mikroskopowych. Zgodnie z Wytycznymi Technicznymi GDDKiA wraz z dołączonymi do nich procedurami badawczymi [6] badania te stanowią punkt wyjścia w ocenie reaktywności alkalicznej kruszyw.

Badania mikroskopowe w świetle przechodzącym umożliwiają wykonanie ilościowej analizy reaktywnych składników. Minerale krzemionkowe w różnym stopniu reagują z alkaliami z cementu, a charakter reakcji zależy także od wielkości ziaren, jakie tworzą. W związku z tym graniczne zawartości poszczególnych form krzemionki ustalone są na różnym poziomie – np. w Stanach Zjednoczonych zawartość opalu w kruszywie nie powinna

1. INTRODUCTION

The issue of alkali-reactivity of aggregates has been researched since the mid-twentieth century, when Stanton [1] first described the damage to concrete structures caused by the use of aggregate whose mineral components reacted with alkalis found in the cement. Despite the passage of time, this topic remains relevant, mainly because of the potential consequences of the so-called alkali-silica reaction (ASR), which include efflorescence and exudates of alkali-silica gel on the surfaces of concrete elements, chipping, cracking, and sometimes deformations due to concrete swelling [2]. They have a negative impact on the durability of concrete in the structure [3], contributing to the deterioration of mechanical properties and, in extreme cases, reduction of service life.

The alkali-reactivity of aggregates is related to the presence of alkali-reactive forms of silica in their mineral composition. Such forms include: opal, chalcedony, cristobalite, tridymite, cryptocrystalline and microcrystalline quartz, as well as strained quartz [4]. Cryptocrystalline quartz is characterized by sizes of up to 10 μm , while the size of microcrystalline quartz is within the range of 10-100 μm [5]. Strained quartz is a dynamically deformed quartz, with disturbed crystalline structure. During microscopic examinations in transmitted light it exhibits irregular extinction. Alkali-reactive components also include quartz-feldspar overgrowths (myrmekite and granophyre) and volcanic glass [4]. Identification of the aforementioned constituents is possible only by means of microscopic methods. In accordance with the Technical Guidelines of the General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA) and the accompanying test procedures [6], microscopic evaluations are the starting point for the assessment of alkali-reactivity of aggregates.

Microscopic examination in transmitted light enables quantitative analysis of reactive constituents. Siliceous minerals react with alkalis from cement to varying degrees, and the nature of the reaction also depends on the size of their grains. Therefore, the permissible limits of content of individual forms of silica are set at different levels – e.g. in the United States, the content of opal in aggregate should not exceed 0.5%, while the limit for chalcedony is 3.0% [7]. The share of strained quartz should be less than 5.0% [7]. These values are set differently in different countries – for example, in Canada the content

przekraczać 0,5%, a chalcedonu 3,0% [7]. Z kolei udział kwarcu w stanie naprężenia powinien być mniejszy niż 5,0% [7]. W innych krajach wartości te ustalone są odmiennie – w Kanadzie zawartość np. opalu nie może przekraczać 1,0%, w Danii 2,0%, natomiast w Wielkiej Brytanii kruszywa w ogóle nie powinny zawierać tego składnika [8].

Zgodnie z zaleceniami Komitetu RILEM [9], zagadnienie reaktywności alkalicznej powinno być rozpatrywane w oparciu o doświadczenia lokalne. Kruszywo z tej samej skały w jednym kraju może być bowiem przyczyną wystąpienia reakcji ASR, zaś w innym już nie. Spowodowane jest to m.in. różną zawartością alkaliów w cementach produkowanych w poszczególnych krajach oraz warunkami środowiskowymi – wyższa temperatura i wilgotność sprzyjają zajściu reakcji alkalia-krzemionka [10]. Wpływ na jej przebieg mają także stosowane w okresie zimowym środki odladzające, które zwiększają zasadowość cieczy porowej betonu [11].

W północnej Polsce, Niemczech oraz państwach nadbałtyckich, gdzie nie ma złóż kamieni łamanych i blocznych, część kruszyw łamanych pozyskiwania jest z przekruszania głazów i otoczków skandynawskich (tzw. narzutniaków). Są to fragmenty różnej wielkości skał, o rozmiarach od 63 mm, a niekiedy osiągające nawet kilkanaście metrów długości i szerokości, przywleczone przez lądolód z obszaru Półwyspu Fennoskandzkiego i niecki Bałtyku w trakcie kolejnych zlodowaceń plejstoceńskich. Pozykiwane są one podczas wydobywania piasków i żwirów jako kopalina towarzysząca oraz przy okazji eksploatacji złóż węgla brunatnego, gdzie występują w nadkładzie pośród innych utworów [12].

Większość pozostawionego materiału polodowcowego pochodzi z obszarów dzisiejszej Finlandii, Szwecji i Norwegii. W państwach tych, pomimo że problem reaktywności alkalicznej kruszyw przez wiele lat był marginalizowany (jak chociażby w Finlandii [13, 14]), zostały zidentyfikowane liczne uszkodzenia konstrukcji betonowych wywołane reakcją ASR (np. [13-16]). Dlatego wykorzystanie takich osadów jako kruszyw do betonu poprzedzone winno być oceną ich reaktywności alkalicznej. Do tej pory żwiry i kruszywa łamane polodowcowe były przedmiotem badań, które podjęli m.in. Wyszomirski i in. [17], Gibas i in. [18], Naziemiec i Pabiś-Mazgaj [19], Józwiak-Niedźwiedzka i in. [20], Pabiś-Mazgaj i in. [21] oraz Dubiniewicz [22], jednak zróżnicowanie składu

of opal cannot exceed 1.0%, in Denmark 2.0%, while in the United Kingdom aggregates should not contain this component at all [8].

According to the recommendations of the RILEM Committee [9], the issue of alkali-reactivity should be judged based on local experience. Aggregate from the same rock may cause ASR in one country and not in another. This is due to, among other factors, the varying content of alkalis in cements produced in individual countries, as well as the environmental conditions – higher temperature and humidity contribute to more intensive alkali-silica reaction [10]. Its course is also influenced by de-icing agents used in winter, which increase the alkalinity of the pore solution in concrete [11].

In northern Poland, Germany and the Baltic States, where there are no deposits of block and crushed stone, part of crushed aggregates are obtained by crushing Scandinavian pebbles and boulders. These are rock fragments of various sizes, ranging from 63 mm and sometimes reaching up to several meters in length and width, which have been dragged by the ice sheet from the Fennoscandian Peninsula and the Baltic Sea basin during successive Pleistocene glacial periods. They are obtained during the extraction of sands and gravels as an accompanying mineral or during exploitation of lignite deposits, where they occur in overburden among other formations [12].

Most of the post-glacial material originates from the area of today's Finland, Sweden and Norway. In these countries, despite the fact that the problem of alkali-reactivity of aggregates was marginalized for many years (e.g. in Finland [13, 14]), numerous cases of concrete damage caused by the ASR reaction have been identified (e.g. [13-16]). Therefore, the use of such post-glacial material as aggregate for concrete should be preceded by evaluation of its alkali-reactivity. Until now, post-glacial gravels and crushed aggregates have been the subject of research undertaken by Wyszomirski et al. [17], Gibas et al. [18], Naziemiec and Pabiś-Mazgaj [19], Józwiak-Niedźwiedzka et al. [20], Pabiś-Mazgaj et al. [21] and Dubiniewicz [22]. However, due to the diversity of rocks occurring in such aggregates and the variability of the material depending on the geographical location, this problem still requires attention. Therefore, the author carried out a petrographic assessment, searching for reactive rocks in post-glacial aggregate and potentially alkali-reactive silica in Scandi-

jących się na nie skał i zmienność materiału w zależności od położenia geograficznego sprawiają, że problem ten nadal wymaga uwagi. W pracy dokonano w związku z tym oceny petrograficznej pod kątem obecności reaktywnych skał w grysie polodowcowym oraz potencjalnie reaktywnej alkalicznie krzemionki w otoczkach skandynawskich, z których uzyskiwane są kruszywa łamane.

2. METODYKA I MATERIAŁ BADAWCZY

Do badań wybrano otoczaki skandynawskie, osiągające w najkrótszym wymiarze długość od ok. 8 cm do 20 cm, które występowały w utworach najmłodszego zlodowacenia plejstocenijskiego w obrębie wyrobiska piasku i żwiru w północno-zachodniej Polsce w okolicach miejscowości Barlinek. Z pobranego materiału, na który składały się 102 otoczaki, wytypowano do analiz mikroskopowych 15 otoczek na podstawie ich reprezentatywności (w zebranych materiale znajdowały się skały o zbliżonym składzie mineralnym i cechach strukturalno-teksturalnych). Z każdego z nich wykonano po jednym preparacie mikroskopowym o powierzchni 40 mm × 25 mm i grubości 25 μm ± 2 μm. Preparaty poddano następnie obserwacjom w świetle przechodzącym w mikroskopie polaryzacyjnym NIKON. W skałach zbudowanych z lamin preparaty wycięto prostopadle względem kierunku ich biegu. Analizę ilościową składu mineralnego poszczególnych skał wykonano metodą punktową, z zastosowaniem stolika integracyjnego typu ELTINOR na podstawie 300 zliczeń, przy skoku pomiarowym dobranym w zależności od wielkości ziaren w poszczególnych otoczkach. Szczególną uwagę zwrócono przy tym na obecność różnych form krzemionki, z których część uważana jest za reaktywną. Stopień deformacji kwarcu w stanie naprężenia oceniono na podstawie pomiarów minimalnego i maksymalnego kąta wygaszania światła [23]. Petrograficznej analizie ilościowej w aspekcie występowania okruchów skał reaktywnych poddane zostało natomiast kruszywo łamane z głazów narzutowych i otoczek o uziarnieniu 8-32 mm w ilości 10 kg ze żwirowni w północno-wschodnich Niemczech, położonej niedaleko miasta Neubrandenburg. Na podstawie ich wykształcenia litologicznego – barwy, składu mineralnego, cech strukturalnych i teksturalnych – oraz reakcji z kwasem solnym dokonano ręcznego rozdziału ziaren według występujących w nich rodzajów i odmian skał. Z okruchów skał reaktywnych wykonano 2 preparaty mikroskopowe do obserwacji w świetle przechodzącym.

navian pebbles, from which crushed aggregates are obtained.

2. MATERIALS AND METHODOLOGY

Investigations were performed on Scandinavian pebbles, whose minimum dimension ranged from about 8 cm to 20 cm, occurring in the latest Pleistocene glaciation formations within the sand and gravel pit in north-western Poland near the town of Barlinek. Out of the collected material, which consisted of 102 pebbles, 15 pebbles were selected for microscopic analysis as representative of their varieties (the collected material included groups of rocks with similar mineral composition and structural-textural features). Each of the chosen pebbles was used for preparation of one microscopic specimen with the area of 40 mm × 25 mm and thickness of 25 μm ± 2 μm. Thin sections were subsequently subjected to observations in transmitted light in a NIKON polarizing microscope. In the case of rocks comprising laminae, thin sections were cut perpendicularly to their direction. Quantitative analysis of the mineral composition of individual rocks was carried out by means of the point-counting method, using an ELTINOR integration stage, on the basis of 300 counts. The measurement step was adjusted to the size of the grains in individual pebbles. Particular attention was paid to the presence of various forms of silica, some of which are considered reactive. The degree of deformation of strained quartz was assessed on the basis of the measured minimum and maximum light extinction angles [23]. Additionally, quantitative petrographic analysis in terms of the occurrence of reactive rock particles was carried out on 10 kg of 8-32 mm crushed aggregate from erratic boulders and pebbles from a gravel pit located near the city of Neubrandenburg in north-eastern Germany. On the basis of their lithological formation – color, mineral composition, structural and textural features – and the reaction with hydrochloric acid, the grains were manually separated according to the types and varieties of rocks they represented. Chosen particles of reactive rocks served as the source of 2 microscopic thin sections for observation in transmitted light.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. OTOCZAKI SKANDYNAWSKIE Z PÓŁNOCNO-ZACHODNIEJ POLSKI

3.1.1. Dobór odmian do badań

Spośród 102 otoczków ponad połowę stanowiły skały pochodzenia magmowego (44 otoczaki ze skał głębinowych i 10 otoczków ze skał wylewnych). Skały metamorficzne reprezentowane były przez 41 otoczków, a tylko 7 z nich pochodziło ze skał osadowych. Z tych ostatnich zidentyfikowano wyłącznie piaskowce, natomiast nie stwierdzono obecności osadowych skał węglanowych i krzemionkowych. Do szczegółowych badań petrograficznych w mikroskopie polaryzacyjnym do światła przechodzącego wytypowano 8 odmian skał magmowych (5 głębinowych i 3 wylewnych), 2 odmiany skał osadowych oraz 5 odmian skał metamorficznych (Tabl. 1).

3. RESULTS

3.1. SCANDINAVIAN PEBBLES FROM NORTH-WESTERN POLAND

3.1.1. Selection of varieties for examination

Of the 102 pebbles, more than half represented rocks of igneous origin (44 pebbles of plutonic rocks and 10 pebbles of effusive rocks). Metamorphic rocks were represented by 41 pebbles; only 7 pebbles originated from sedimentary rocks. Of the latter, only sandstones were identified, while the occurrence of sedimentary carbonate and silica rocks was not observed. Selection of rocks for detailed petrographic tests in a polarizing microscope in transmitted light included 8 varieties of igneous rocks (5 plutonic and 3 effusive rocks), 2 varieties of sedimentary rocks and 5 varieties of metamorphic rocks (Table 1).

Table 1. Lithology of rock varieties selected for microscopic examination
Tablica 1. Wydzielone odmiany litologiczne skał do badań mikroskopowych

Labeling of microscopic thin sections Oznaczenie preparatów mikroskopowych	Lithological variety Odmiana litologiczna
1MG	Uneven crystalline granite with white-cream feldspars Granit nierównokrystaliczny z białokremowymi skaleniami
2MG	Uneven crystalline granite with red feldspars Granit nierównokrystaliczny z czerwonymi skaleniami
3MG	Uneven crystalline granite with light pink feldspars Granit nierównokrystaliczny z jasnoróżowymi skaleniami
4MG	Light grey pegmatite / Pegmatyt jasnoszary
5MG	Black fine crystalline diorite with uneven crystalline dark pink granite Dioryt drobnokrystaliczny czarny z granitem nierównokrystalicznym ciemnoróżowym
1MW	Black fine crystalline diabase / Diabaz drobnokrystaliczny czarny
2MW	Red quartzless porphyry / Porfir bezkwarcowy czerwony
3MW	Red quartz porphyry / Porfir kwarcowy czerwony
1OS	Light yellow fine-grained sandstone / Piaskowiec drobnoziarnisty jasnożółty
2OS	Fine-grained light beige and dark brown laminated sandstone Piaskowiec drobnoziarnisty laminowany jasnobeżowo-ciemnobrunatny
1MET	Fine-blastic light violet quartzite / Kwarcyt drobnoblastyczny jasnofioletowy
2MET	Light pink non-equiblastic quartzite / Kwarcyt nierównoblastyczny jasnoróżowy
3MET	Red-black banded gneiss / Gnejs smużysty czerwono-czarny
4MET	Pink-black banded gneiss / Gnejs smużysty różowo-czarny
5MET	Light pink-black laminated gneiss / Gnejs laminowany jasnoróżowo-czarny

3.1.2. Skały magmowe głębinowe (1MG-5MG)

Skały 1MG-3MG mają strukturę nierównokrystaliczną, z kolei skała 4MG ma strukturę grubokrystaliczną; ich tekstura jest masywna, bezładna. W skale 1MG dominuje kwarc (wielkości 0,1-2,6 mm), głównie polikrystaliczny, rzadziej monokrystaliczny. W mniejszej ilości występują plagioklasy (wielkości 0,5-1,6 mm) i skalenie alkaliczne (wielkości 1,6-5,7 mm), a podrzędnie biotyt (wielkości 0,3-1,6 mm), muskowit (wielkości 0,5-0,6 mm) i ziarna cyrkonów (wielkości 0,1-0,2 mm). Pomędzy skaleniami alkalicznymi i plagioklazami znajduje się myrmekit (Rys. 1a). W skale 2MG przeważają skalenie alkaliczne (wielkości 1,3-9,9 mm) i plagioklasy (wielkości 0,7-2,6 mm). Duży jest także udział kwarcu polikrystalicznego (wielkości 0,7-6,8 mm) i powyginanych blaszek schlorytzowanego biotyту (wielkości 0,1-6,7 mm). Poza nimi obecny jest zserpentyzowany oliwin (wielkości 0,4-1,0 mm), minerały nieprzezroczyste (do 0,1 mm wielkości), ziarna cyrkonów (do 0,2 mm wielkości) i kalcyt (wielkości 0,1-0,7 mm). W skale 3MG znajdują się z kolei kwarc polikrystaliczny (wielkości 0,6-11,5 mm), plagioklasy (wielkości 0,3-2,8 mm) oraz skalenie alkaliczne (wielkości 1,2-10,7 mm). Podobnie jak w skale 1MG, pomiędzy tymi ostatnimi występuje myrmekit. W mniejszej ilości obecne są granaty (wielkości 0,1-2,8 mm), biotyt (wielkości 0,3-1,8 mm) oraz pirokseny (wielkości 0,5-1,3 mm). Skała 4MG składa się z kwarcu o rozmiarach 8,0-17,0 mm i skaleni alkalicznych o rozmiarach 1,3-21,4 mm, z widocznymi śladami spękań na powierzchni. Zawiera ona także skaolinityzowane plagioklasy (wielkości 0,9-1,7 mm), schlorytzowany biotyt (wielkości 0,1-2,7 mm) z wrostkami rutyłu (do 0,1 mm wielkości) i wtórnym kalcytem oraz ziarna cyrkonów (wielkości 0,1-0,2 mm). Skała 5MG o strukturze drobnookrystalicznej i teksturze masywnej, bezładnej, poprzecinana jest równoległymi laminami granitu barwy ciemnoróżowej, mającymi od 0,1 mm do 0,2 mm grubości, o strukturze nierównokrystalicznej. Jest ona zbudowana z amfiboli (wielkości 0,3-1,5 mm), plagioklazów (wielkości 0,2-0,5 mm) i biotyту (wielkości 0,2-0,8 mm), a także z kwarcu (wielkości 0,1-1,2 mm) i minerałów nieprzezroczystych (do 0,2 mm wielkości). Granit nierównokrystaliczny ciemnoróżowy składa się natomiast z kwarcu polikrystalicznego (wielkości 1,5-4,1 mm) i plagioklazów z drobnymi przejawami kaolinityzacji (wielkości 0,2-0,7 mm). Podrzędnie występuje w nim również biotyt

3.1.2. Plutonic rocks (1MG-5MG)

Rocks 1MG-3MG have an uneven crystalline structure, while rock 4MG has a coarse crystalline structure; their texture is massive, unordered. The 1MG rock is dominated by quartz (0.1-2.6 mm in size), mainly polycrystalline, less frequently monocrystalline. Plagioclases (sizes of 0.5-1.6 mm) and alkali feldspars (sizes of 1.6-5.7 mm) are present in smaller quantities; they are accompanied by biotite (sizes of 0.3-1.6 mm), muscovite (sizes of 0.5-0.6 mm) and zircon grains (sizes of 0.1-0.2 mm). Myrmekite is observed between alkali feldspars and plagioclases (Fig. 1a). Alkali feldspars (sizes of 1.3-9.9 mm) and plagioclases (sizes of 0.7-2.6 mm) predominate in the 2MG rock. The share of polycrystalline quartz (sizes of 0.7-6.8 mm) and bent flakes of chloritized biotite (sizes of 0.1-6.7 mm) is also considerable. Apart from them, serpentinized olivine (sizes of 0.4-1.0 mm), opaque minerals (up to 0.1 mm in size), zircon grains (up to 0.2 mm in size) and calcite (sizes of 0.1-0.7 mm) are observed. The 3MG rock contains polycrystalline quartz (sizes of 0.6-11.5 mm), plagioclases (sizes of 0.3-2.8 mm) and alkali feldspars (sizes of 1.2-10.7 mm). As in the 1MG rock, myrmekite is observable between the latter. Garnets (sizes of 0.1-2.8 mm), biotite (sizes of 0.3-1.8 mm) and pyroxenes (sizes of 0.5-1.3 mm) are observed in smaller quantities. The 4MG rock consists of quartz (8.0-17.0 mm in size) and alkali feldspars (1.3-21.4 mm in size), with visible surface fractures. It also contains kaolinitized plagioclases (sizes of 0.9-1.7 mm), zircon grains (sizes 0.1-0.2 mm) and chloritized biotite (sizes of 0.1-2.7 mm) with inclusions of rutile (up to 0.1 mm in size) and secondary calcite. The 5MG rock with fine crystalline structure and massive, unordered texture is intersected by parallel laminae of dark pink granite, 0.1 mm to 0.2 mm thick, with uneven crystalline structure. It is made of amphiboles (0.3-1.5 mm in size), plagioclases (0.2-0.5 mm in size) and biotite (0.2-0.8 mm in size), as well as quartz (0.1-1.2 mm in size) and opaque minerals (up to 0.2 mm in size). Uneven crystalline dark pink granite, on the other hand, consists of polycrystalline quartz (1.5-4.1 mm in size) and plagioclase with minor manifestations of kaolinitization (0.2-0.7 mm in size). There are also small quantities of biotite with sizes ranging from 0.1 mm to 0.4 mm and allanite with sizes ranging from 0.2 mm to 0.3 mm, from the edges of which radial fractures extend through the surfaces of quartz and plagioclase (Fig. 1b).

o rozmiarach w zakresie od 0,1 mm do 0,4 mm i allanit o rozmiarach wahających się od 0,2 mm do 0,3 mm, od brzegów którego odchodzą przez powierzchnie kwarcu i plagioklazów radialne spękania (Rys. 1b).

3.1.3. Skały magmowe wylewne (1MW-3MW)

Skała 1MW ma barwę czarną, strukturę drobnokrystaliczną i teksturę ofitową. Zbudowana jest głównie z plagioklazów o rozmiarach 0,1-0,4 mm oraz piroksenów, których wielkość waha się od 0,1 mm do 0,8 mm. Oprócz nich występują również kryształy zserpentyzowanych oliwinów (wielkości 0,2-0,9 mm) i minerały nieprzezroczyste (wielkości do 0,2 mm). Skały 2MW i 3MW o strukturach porfirowych składają się z drobnokrystalicznej masy kwarcowo-skaleniowej (Rys. 1c), w której tkwią prakryształy. W pierwszej z nich są to plagioklasy (wielkości 0,7-2,4 mm), pirokseny (wielkości 0,8-2,0 mm), skalenie alkaliczne (wielkości 0,8-1,5 mm) i minerały nieprzezroczyste (wielkości 0,2-1,2 mm). W skale 3MW, poza kwarcem (wielkości 0,8-4,8 mm), występują też skalenie alkaliczne (wielkości 1,2-7,2 mm) i plagioklasy (wielkości 0,4-6,0 mm) oraz amfibole (wielkości 0,5-0,8 mm), biotyt (wielkości 0,5-2,1 mm), minerały nieprzezroczyste (wielkości 0,1-0,5 mm wielkości) i epidot (wielkości 0,1-0,2 mm).

3.1.4. Skały osadowe (1OS i 2OS)

Skały 1OS i 2OS mają strukturę drobnoziarnistą. Głównym ich składnikiem są dobrze obtoczone, wydłużone w jednym kierunku ziarna kwarcu o rozmiarach 0,2-0,4 mm i 0,1-0,5 mm. W skale 1OS obecne są także ziarna skaleń alkalicznych (wielkości 0,1-0,4 mm), litoklastów kwarcytowych z kwarcem w stanie naprężenia (wielkości 0,2-0,3 mm) (Rys. 1d), muskowitu (wielkości 0,2-0,3 mm) i minerałów nieprzezroczystych (wielkości do 0,10 mm), które spojone są kwarcem mikrokrystalicznym (Rys. 1e) oraz podrzędnie kalcytem. Z kolei w skale 2OS występują ziarna skaleń alkalicznych i muskowitu o rozmiarach od 0,1 mm do 0,3 mm oraz plagioklazów i turmalinu o rozmiarach do 0,1 mm. W laminach jasnobezwowych spoiwo składa się z kwarcu mikrokrystalicznego, natomiast w ciemnobrunatnych z kwarcu mikrokrystalicznego i związków żelaza.

3.1.5. Skały metamorficzne (1MET-5MET)

Skała 1MET, będąca słabo przeobrażonym piaskowcem, ma strukturę drobnoblastyczną, z kolei w skale 2MET jest

3.1.3. Effusive rocks (1MW-3MW)

The 1MW rock is black, has a fine crystalline structure and an ophitic texture. It consists mainly of plagioclases (with sizes of 0.1-0.4 mm) and pyroxenes, the size of which ranges from 0.1 mm to 0.8 mm. There are also crystals of serpentinized olivine (0.2-0.9 mm in size) and opaque minerals (up to 0.2 mm in size). The 2MW and 3MW rocks with porphyritic structures consist of fine crystalline quartz-feldspar mass (Fig. 1c), in which phenocrysts are embedded. In the 2MW rock, these are plagioclases (0.7-2.4 mm in size), pyroxenes (0.8-2.0 mm in size), alkali feldspars (0.8-1.5 mm in size) and opaque minerals (0.2-1.2 mm in size). In the 3MW rock, in addition to quartz (0.8-4.8 mm in size), there are also alkali feldspars (1.2-7.2 mm in size) and plagioclases (0.4-6.0 mm in size) as well as amphiboles (0.5-0.8 mm in size), biotite (0.5-2.1 mm in size), opaque minerals (0.1-0.5 mm in size) and epidote (0.1-0.2 mm in size).

3.1.4. Sedimentary rocks (1OS and 2OS)

The 1OS and 2OS rocks have fine-grained structure. Well-rounded, elongated quartz grains with the sizes of 0.2-0.4 mm and 0.1-0.5 mm are their main constituent. The 1OS rock also comprises grains of alkali feldspars (sizes of 0.1-0.4 mm), quartzite lithoclasts with strained quartz (sizes of 0.2-0.3 mm) (Fig. 1d), muscovite (sizes of 0.2-0.3 mm) and opaque minerals (sizes up to 0.10 mm), which are cemented by microcrystalline quartz (Fig. 1e) and smaller quantities of calcite. In the 2OS rock, there are grains of alkali feldspar and muscovite with sizes ranging from 0.1 mm to 0.3 mm, as well as plagioclase and tourmaline with sizes of up to 0.1 mm. In light beige laminae, the cementation consists of microcrystalline quartz, while in dark brown laminae, the cementation consists of microcrystalline quartz and iron compounds.

3.1.5. Metamorphic rocks (1MET-5MET)

The 1MET rock, which is a weakly metamorphosed sandstone, has a fine-blastic structure; while the structure of the 2MET rock is non-equiblastic. They are texturally ordered – the constituents are elongated in one direction. Quartz grains in the two rocks reach sizes of up to 0.4 mm and up to 13.7 mm, respectively. Also present in the 1MET are plagioclase grains (up to 0.1 mm in size), alkali feldspars (0.2-0.4 mm in size), biotite and muscovite (0.1-0.2 mm in size) and opaque minerals (up to 0.3 mm

ona nierównoblastyczna. Są one uporządkowane teksturalnie – składniki wydłużone są w jednym kierunku. Ziarna kwarcu osiągają rozmiary odpowiednio do 0,4 mm i do 13,7 mm. W skale 1MET obecne są również ziarna plagioklazów (wielkości do 0,1 mm), skaleni alkalicznych (wielkości 0,2-0,4 mm), biotyty i muskowitu (wielkości 0,1-0,2 mm) oraz minerałów nieprzezroczystych (wielkości do 0,3 mm). W małych ilościach w skale 2MET znajdują się także minerały nieprzezroczyste (wielkości do 0,1 mm), biotyt (wielkości 0,2-0,6 mm) i turmalin (wielkości do 0,2 mm). Skały 3MET, 4MET i 5MET mają strukturę drobnoblastyczną i teksturę uporządkowaną, smużystą lub laminowaną. Skała 3MET zbudowana jest z plagioklazów (wielkości 0,3-3,2 mm), kwarcu (wielkości 0,1-3,7 mm), amfiboli (wielkości 0,2-0,7 mm), biotyty (wielkości 0,1-0,7 mm), chlorytu (wielkości 0,4-0,5 mm), ziaren cyrkonów (wielkości 0,1-0,3 mm) i minerałów nieprzezroczystych (wielkości 0,1-0,7 mm). W skale 4MET dominują plagioklasy (wielkości 0,3-2,1 mm) oraz kwarc (wielkości 0,1-2,7 mm). W mniejszej ilości występują zserycytyzowane skalenie alkaliczne (wielkości 0,6-1,0 mm), biotyt (wielkości 0,1-0,4 mm), zoisyt, który obecny jest w żyłach o grubości od 0,1 mm do 0,3 mm, amfibole ze śladami serpentynizacji (wielkości 0,2-1,0 mm) i minerały nieprzezroczyste (do 0,1 mm wielkości). Skała 5MET charakteryzuje się zbliżonym do skały 4MET udziałem kwarcu (wielkości 0,5-2,3 mm) i plagioklazów (wielkości 0,1-2,5 mm). Składa się ona również ze skaleni alkalicznych (wielkości 0,4-1,6 mm), muskowitu (wielkości 0,1-1,3 mm), schlorityzowanego biotyty (wielkości 0,2-0,7 mm) i zoisytu (wielkości 0,2-1,0 mm), a także ziaren minerałów nieprzezroczystych (do 0,1 mm wielkości), cyrkonów (wielkości 0,1-0,2 mm) i tytanitu (wielkości 0,1-0,3 mm) oraz z przewarstwień kaolinitu o grubości wahającej się od 0,5 mm do 1,8 mm.

3.1.6. Podsumowanie badań otoczków

We wszystkich skałach, za wyjątkiem skał wylewnych 1MW-3MW, kwarc wykazuje faliste wygaszanie światła (Rys. 1f). Największy stopień deformacji kwarcu stwierdzono w skałach metamorficznych, natomiast najmniejszy w skałach osadowych (Tabl. 2). Udział składników reaktywnych w badanych otoczkach przedstawiono w Tabl. 2.

in size). The 2MET rock also contains small quantities of opaque minerals (up to 0.1 mm in size), biotite (0.2-0.6 mm in size) and tourmaline (up to 0.2 mm in size). The 3MET, 4MET, and 5MET rocks have a fine-blastic structure; their texture is either ordered, banded or laminated. The 3MET rock is composed of plagioclase (0.3-3.2 mm in size), quartz (0.1-3.7 mm in size), amphiboles (0.2-0.7 mm in size), biotite (0.1-0.7 mm in size), chlorite (0.4-0.5 mm in size), zircon grains (0.1-0.3 mm in size) and opaque minerals (0.1-0.7 mm in size). The 4MET rock is dominated by plagioclase (sizes of 0.3-2.1 mm) and quartz (sizes of 0.1-2.7 mm). Sericitized alkali feldspars (0.6-1.0 mm in size), biotite (0.1-0.4 mm in size), zoisite (which is present in 0.1-0.3 mm thick veins), amphiboles with traces of serpentization (0.2-1.0 mm in size) and opaque minerals (up to 0.1 mm in size) are found in smaller quantities. The 5MET rock is characterized by similar content of quartz (sizes of 0.5-2.3 mm) and plagioclase (sizes of 0.1-2.5 mm). It also contains alkali feldspars (0.4-1.6 mm in size), muscovite (0.1-1.3 mm in size), chloritized biotite (0.2-0.7 mm in size) and zoisite (0.2-1.0 mm in size), as well as opaque mineral grains (up to 0.1 mm in size), zircons (0.1-0.2 mm in size), titanite (0.1-0.3 mm in size) and kaolinite interlayers with thickness ranging from 0.5 mm to 1.8 mm.

3.1.6. Summary of examinations of pebbles

In all rocks, except for effusive rocks 1MW-3MW, quartz shows undulatory extinction of light (Fig. 1f). The highest degree of quartz deformation was noted in metamorphic rocks, while the lowest was observed in sedimentary rocks (Table 2). The proportion of reactive components in the pebbles studied is presented in Table 2.

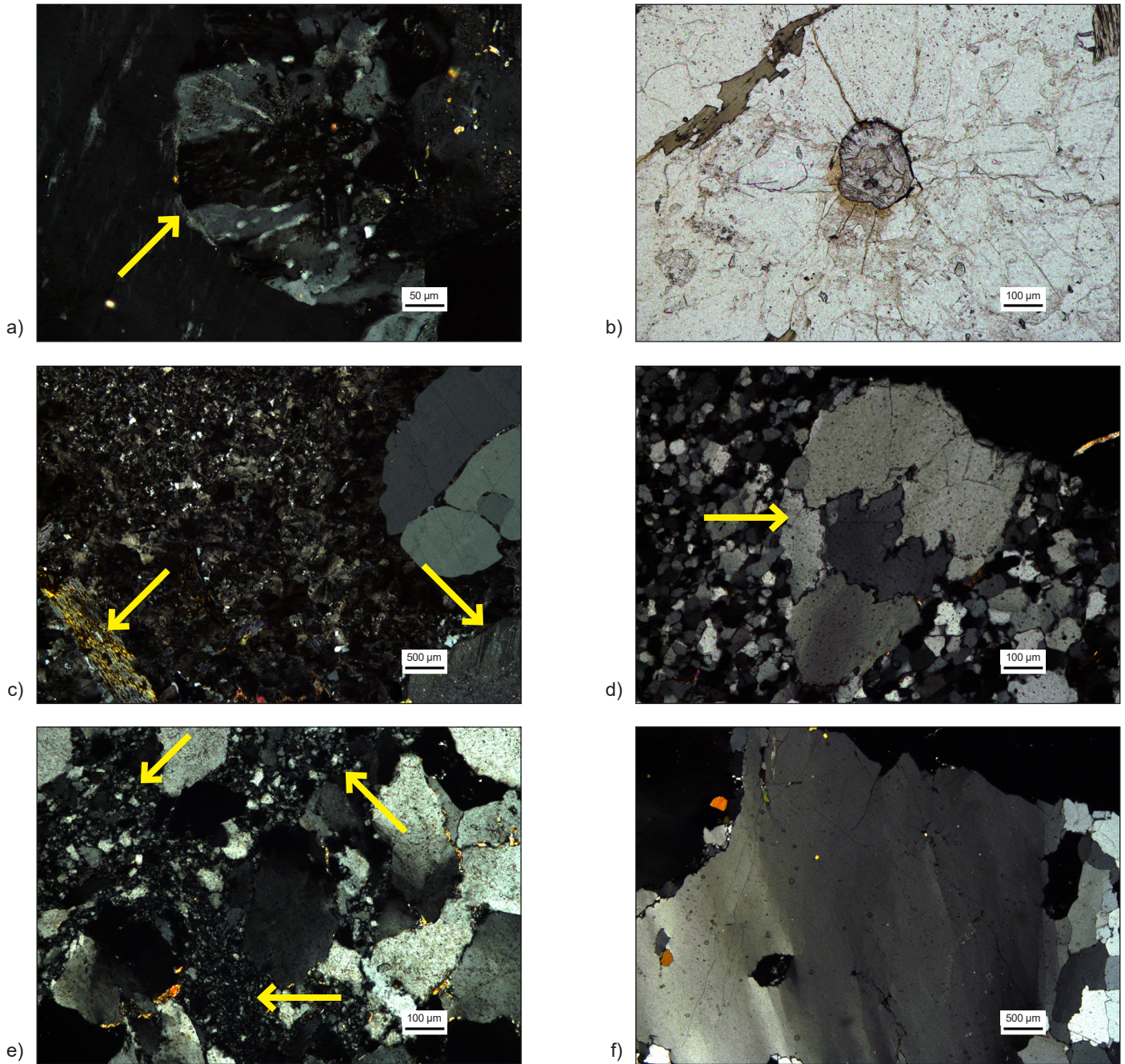


Fig. 1. Microscopic views in transmitted light of potentially reactive constituents of Scandinavian pebbles: a) myrmekite (arrow) in uneven crystalline granite with white-cream feldspars, b) cracks extending radially from the allanite surface in dark pink uneven crystalline granite, c) fine crystalline quartz-feldspar mass with phenocrysts (arrows) in red quartz porphyry, d) quartzite lithoclast (arrow) in light yellow fine-grained sandstone, e) cement composed of microcrystalline quartz (arrows) in light yellow fine-grained sandstone, f) strained quartz in light pink non-equiblastic quartzite; image b – parallel polarizers, remaining images – crossed polarizers

Rys. 1. Obrazy mikroskopowe w świetle przechodzącym potencjalnie reaktywnych składników otoczków skandynawskich: a) przerosty kwarcowo-skaleniove (strzałka) w granicy nierównokryształicznym z białokremowymi skaleniami, b) spękania odchodzące radialnie od powierzchni allanitu w granicy nierównokryształicznym ciemnoróżowym, c) drobnokryształiczna masa kwarcowo-skaleniowa z prakryształami (strzałki) w porfirze kwarcowym czerwonym, d) litoklast kwarcytowy (strzałka) w piaskowcu drobnziarnistym jasnożółtym; e) spoiwo zbudowane z kwarcu mikrokrystalicznego (strzałki) w piaskowcu drobnziarnistym jasnożółtym, f) kwarc o falistym wygaszaniu światła w kwarcycie nierównoblastycznym jasnorożowym; obraz b – polaryzatory równoległe, pozostałe obrazy – polaryzatory skrzyżowane

Table 2. Reactive constituents in the studied Scandinavian pebbles
 Tablica 2. Reaktywne składniki w badanych otoczkach skandynawskich

Rock Skała	Strained quartz [% vol.] Kwarc w stanie naprężenia [% obj.]	Microcrystalline quartz [% vol.] Kwarc mikrokrystaliczny [% obj.]	Quartz-feldspar groundmass [% vol.] Masa kwarcowo- skaleniowa [% obj.]	Myrmekite Myrmekit	Degree of deformation of strained quartz [°] Stopień deformacji kwarcu w stanie naprężenia [°]
1MG	50.4	0.0	0.0	occurs / obecny	≤ 20
2MG	17.4	0.0	0.0	no / brak	≤ 20
3MG	28.9	0.0	0.0	occurs / obecny	≤ 20
4MG	45.0	0.0	0.0	no / brak	≤ 15
5MG	7.7 and / i 58.2	0.0	0.0	no / brak	≤ 15
1MW	0.0	0.0	0.0	no / brak	–
2MW	0.0	0.0	55.6	no / brak	–
3MW	0.0	0.0	25.5	no / brak	–
1OS	59.6	18.4	0.0	no / brak	≤ 15
2OS	70.9	20.0	0.0	no / brak	≤ 15
1MET	72.8	0.0	0.0	no / brak	≤ 20
2MET	96.4	0.0	0.0	no / brak	≤ 30
3MET	28.5	0.0	0.0	no / brak	≤ 25
4MET	36.7	0.0	0.0	no / brak	≤ 25
5MET	31.3	0.0	0.0	no / brak	≤ 25

3.2. KRUSZYWO ŁAMANE Z PÓŁNOCNO-WSCHODNICH NIEMIEC

W grysie z głazów narzutowych i otoczek zaznacza się nieznaczna dominacja skał osadowych (Tabl. 3). Wśród nich przeważają ziarna wapieni, zbudowane z masy pelitycznej i makroskopowo widocznych skamieniałości oraz drobnoziarnistych piaskowców (uporządkowanych lub nie) o barwach jasno- i ciemnoszarych oraz różowych. Bardzo mało natomiast jest okruchów kremowych margli i skrytokrystalicznych skał krzemionkowych – czertów i krzemieni, zbudowanych z chalcedonu (Rys. 2). W zbliżonym udziale do ziaren skał osadowych obecne są ziarna skał magmowych – głównie granitów o strukturach nierównokrystalicznych i teksturach masywnych, nieuporządkowanych (w odmianie z białokremowymi, różowymi lub czerwonymi skaleniami oraz dużą ilością minerałów ciemnych) oraz podrzędnie pegmatytów jasnoróżowych i drobnokrystalicznych czarnych diabazów i porfirów o barwie czerwonej lub fioletowej. Ze skał metamorficznych najliczniej występują okruchy gnejsów drobnoblastycznych o strukturach uporządkowanych – smużystych jasnoszarych i czerwono-czarnych oraz laminowanych jasnoróżowo-czarnych. Mniej liczne są natomiast ziarna drobnoblastycznych, w miarę uporządkowanych kwarcytów o barwie jasnoszarej, ciemnoszarej lub różowej i amfibolitów, mających ciemnoszarą barwę (Tabl. 3).

3.2. CRUSHED AGGREGATE FROM NORTH-EASTERN GERMANY

Crushed aggregate obtained from erratic boulders and pebbles displays a slight dominance of sedimentary rocks (Table 3). Among them, limestone particles predominate; they are made of pelitic mass and macroscopically observable fossils, as well as light and dark gray and pink fine-grained sandstones (ordered and unordered). On the other hand, there are very few particles of cream-colored marls and cryptocrystalline siliceous rocks – cherts and flints, which are made of chalcedony (Fig. 2). In a similar proportion to sedimentary rock particles, particles of igneous rocks occur – mainly granites with uneven crystalline structures and massive, unordered textures (in the variety with white-cream, pink or red feldspars and large quantity of mafic minerals), with smaller quantities of light pink pegmatites and fine crystalline black diabases and red or violet porphyries. Among the metamorphic rocks, the most numerous are particles of fine-blastic gneisses with ordered textures – banded light gray and red-black as well as laminated light pink-black varieties. Particles of relatively ordered light grey, dark grey or pink fine-blastic quartzites and dark grey amphibolites (Table 3) are less numerous.

Table 3. Petrographic composition of crushed aggregate from Scandinavian boulders from north-eastern Germany
 Tablica 3. Skład petrograficzny kruszywa łamanego z narzutiaków skandynawskich z północno-wschodnich Niemiec

Rock types – lithological variety Rodzaj skał – odmiana litologiczna	Share [% by mass] Udział [% masy]
Limestones, including: / Wapienie, w tym:	20.6
Light and dark grey organogenic limestones / Wapienie organogeniczne jasno- i ciemnoszare	20.5
Pink organogenic limestones / Wapienie organogeniczne różowe	0.1
Sandstones, including: / Piaskowce, w tym:	15.0
Pink fine-grained sandstones / Piaskowce drobnoziarniste różowe	10.3
Light and dark grey fine-grained sandstones / Piaskowce drobnoziarniste jasno- i ciemnoszare	4.7
Marls / Margle	1.4
Cherts and flints / Czerty i krzemienie	1.1
Granites, including: / Granity w tym:	30.8
Uneven crystalline granites with red feldspars / Granity nierównokrystaliczne z czerwonymi skaleniami	25.1
Uneven crystalline granites with light pink feldspars / Granity nierównokrystaliczne z jasnoróżowymi skaleniami	3.0
Uneven crystalline granites with large quantities of mafic minerals Grunity nierównokrystaliczne z dużą ilością minerałów ciemnych	1.4
Uneven crystalline granites with white-cream feldspars Grunity nierównokrystaliczne z białokremowymi skaleniami	0.9
Light pink pegmatites / Pegmatyty jasnoróżowe	0.4
Fine crystalline black diabases / Diabazy drobnokrystaliczne czarne	2.1
Red and violet porphyries, including: / Porfiry czerwone i fioletowe, w tym:	0.9
Quartz porphyries / Porfiry kwarcowe	0.7
Quartzless porphyries / Porfiry bezkwarcowe	0.2
Gneisses, including: / Gnejsy, w tym:	15.6
Light grey banded gneisses / Gnejsy smużyste jasnoszare	8.5
Red-black banded gneisses / Gnejsy smużyste czerwono-czarne	3.8
Light pink-black laminated gneisses / Gnejsy laminowane jasnoróżowo-czarne	3.3
Quartzites, including: / Kwarcyty, w tym:	8.8
Light and dark gray fine-blastic quartzites / Kwarcyty drobnoblastyczne jasno- i ciemnoszare	4.8
Pink fine-blastic quartzites / Kwarcyty drobnoblastyczne różowe	4.0
Dark gray fine-blastic amphibolites / Amfibolity drobnoblastyczne ciemnoszare	3.7

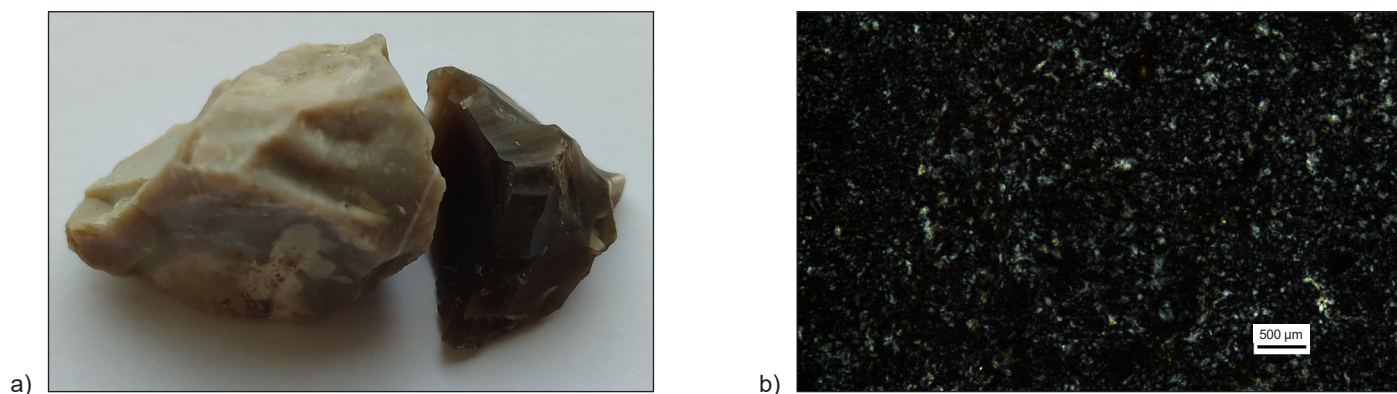


Fig. 2. Fragments of siliceous rocks in post-glacial crushed aggregate: a) macroscopic view of grains 20-30 mm in size, b) microscopic view (transmitted light, crossed polarizers)

Rys. 2. Fragmenty skał krzemionkowych w kruszywie łamanym polodowcowym: a) widok ogólny ziaren o wielkości 20-30 mm, b) widok mikroskopowy (światło przechodzące, polaryzatory skrzyżowane)

4. DYSKUSJA

W analizowanym materiale skalnym, składającym się z otoczków skandynawskich pochodzących z terenu północno-zachodniej Polski z rejonu Barlinka, wyraźnie dominują skały magmowe i metamorficzne, przy małym udziale skał osadowych, reprezentowanych jedynie przez piaskowce. Według Schulza [24] wśród dużych głazów narzutowych, o długości najkrótszej osi powyżej 63 cm, tylko niecałe 2% stanowią skały osadowe. Wynika to z ich podatności na ścieranie i dezintegrację w trakcie przemieszczania przez lodowiec, przez co rzadko kiedy zachowały się w postaci głazów oraz większych otoczków. Mały udział tych skał jest także odzwierciedleniem budowy geologicznej tarczy fennoskandzkiej (bałtyckiej), gdzie dominują prekambryjskie skały krystaliczne [13, 16]. W złożu głazy i otoczki występują w sposób chaotyczny, dlatego ich ilościowa ocena nie jest możliwa. Często jednak to one decydują o opłacalności produkcji, ponieważ uzyskiwane z nich kruszywo jest droższe niż naturalne żwiry [25].

W Norwegii za potencjalnie reaktywne alkalicznie uznaje się kataklazyty i mylonity [26], z kolei w Szwecji mylonity z rejonu Sztokholmu oraz porfiry z regionów Dalarna i Bergslagen [15, 27]. Szczególnie wysoce reaktywne są kruszywa zawierające krzemienie i czerty z rejonu Skanii w południowej Szwecji [15, 27]. W rejonie Barlinka w materiale skalnym nie stwierdzono występowania kataklazytów, mylonitów, krzemieni ani czertów. Nie da się także wskazać, czy badane porfiry pochodzą z regionów Dalarna i Bergslagen, ponieważ wśród nich nie

4. DISCUSSION

The analyzed rock material, consisting of Scandinavian pebbles from north-western Poland (obtained near the town of Barlinek), is clearly dominated by igneous and metamorphic rocks, with a small share of sedimentary rocks, represented only by sandstones. According to Schulz [24], among large erratic boulders whose shortest axis length exceeds 63 cm, less than 2% are sedimentary rocks. This is due to the susceptibility of such rocks to abrasion and disintegration during their movement through the glacier; only rarely were they preserved in the form of boulders or larger pebbles. Small share of these rocks also reflects the geological structure of the Fennoscandian (Baltic) Shield, where Precambrian crystalline rocks dominate [13, 16]. In the deposit, boulders and pebbles occur in a chaotic manner, therefore their quantitative assessment is not possible. However, their occurrence often determines the profitability of production, because the aggregate obtained from them is more expensive than natural gravel [25].

In Norway, cataclasites and mylonites are considered potentially alkali-reactive [26]. In Sweden mylonites from the Stockholm region and porphyries from the Dalarna and Bergslagen regions are considered potentially alkali-reactive [15, 27]. Aggregates containing flints and cherts from the Scania region in southern Sweden are particularly highly reactive [15, 27]. In the area around Barlinek, no cataclasites, mylonites, flints or cherts were found in the rock material. It is also impossible to indicate whether the tested porphyries came from the regions of

zidentyfikowano tzw. eratyków przewodnich, czyli skał o dokładnie zlokalizowanej, jedynej znanej współcześnie wychodni.

Przeprowadzone badania mikroskopowe wykazały, że we wszystkich otoczkach skandynawskich, za wyjątkiem diabazu drobnokrystalicznego czarnego, występuje krzemionka potencjalnie reaktywna. Skały, niezależnie od genezy, zawierają ziarna kwarcu w stanie naprężenia. W badanych otoczkach jego udział waha się od 7,7% obj. w diorycie drobnokrystalicznym czarnym do 96,4% obj. w kwarcycie nierównoblastycznym jasnoróżowym. Ponadto w piaskowcach w dużej ilości, wynoszącej średnio około 19% obj., obecny jest kwarc mikrokryształiczny, spajający szkielet ziarnowy, a w jednym z nich występują jeszcze litoklasty kwarcytów, także składające się z kwarcu w stanie naprężenia. Kwarc dynamicznie odkształcony jest zatem powszechnym składnikiem otoczek skandynawskich, co potwierdzają też badania, które przeprowadzili Gibas i in. [18] oraz Józwiak-Niedźwiedzka i in. [20]. Według National Ready Mixed Concrete Association [7] zawartość takiego kwarcu nie powinna przekraczać 5%, podczas gdy Buck [28] podaje wartość 20%. Nawet jeśli przyjąć za bezpieczną tę mniej restrykcyjną wartość, jedynie w granicie nierównokrystalicznym z czerwonymi skaleniami i diorycie drobnokrystalicznym czarnym udział tego składnika nie przekracza dopuszczalnego poziomu. Jak wykazały Antolik i Józwiak-Niedźwiedzka [29], pomiędzy zawartością kwarcu w stanie naprężenia w ziarnach kruszywa a wielkością ekspansji wykonanych z nich zapraw istnieje zależność. Kwarc jest jednak podstawowym składnikiem wielu skał magmowych, osadowych i metamorficznych, i często wykazuje pewien stopień deformacji. Istotna zatem jest nie tylko jego zawartość, ale też wielkość odkształcenia. Kwarc w stanie naprężenia uznaje się za reaktywny, gdy kąt falistego wygaszania przezeń światła jest większy niż 25° , a jego udział przekracza 30% [30]. W badanych otoczkach taka sytuacja występuje jedynie w kwarcycie nierównoblastycznym jasnoróżowym. Dostępne są jednak badania [30] wykazujące reaktywność alkaliczną kruszywa zawierających 20% kwarcu z kątem falistego wygaszania światła większym niż 15° – tak zdefiniowane warunki są spełnione we wszystkich analizowanych skałach metamorficznych i niektórych skałach magmowych głębiny. Mikroskopowa ocena stopnia deformacji kwarcu obarczona jest pewnym błędem – zależy ona bowiem od

Dalarna and Bergslagen, because no so-called indicator erratics (i.e. rocks that may be precisely traced back to the only known contemporary parent outcrop) have been identified among them.

Microscopic studies have shown that potentially reactive silica is present in all Scandinavian pebbles, with the exception of fine crystalline black diabase. The rocks, regardless of their genesis, contain grains of strained quartz. In the studied pebbles, its share ranges from 7.7% by volume in fine crystalline black diorite to 96.4% by volume in non-equiblastic light pink quartzite. In addition, microcrystalline quartz is observed in sandstones in large quantities, about 19% by volume on average, cementing the grain skeleton. In one of the sandstones there are also lithoclasts of quartzites, also consisting of strained quartz. Strained quartz is therefore a common constituent of Scandinavian pebbles, which is also confirmed by research conducted by Gibas et al. [18] and Józwiak-Niedźwiedzka et al. [20]. According to the National Ready Mixed Concrete Association [7], the content of such quartz should not exceed 5%, while Buck [28] gives a limit value of 20%. Even if one assumed the less restrictive value as safe, the content of this component would not exceed the permissible level only in the uneven crystalline granite with red feldspars and the black fine crystalline diorite. As shown by Antolik and Józwiak-Niedźwiedzka [29], there is a relationship between the content of strained quartz in the aggregate particles and the expansion of mortars in which they are used. Quartz, however, is a common component of many igneous, sedimentary and metamorphic rocks, and often exhibits some degree of deformation. Therefore, not only its content, but also the degree of strain is important. Strained quartz is considered reactive when its angle of undulatory extinction of light is greater than 25° and its content exceeds 30% [30]. In the studied pebbles, such a situation occurs only in light pink non-equiblastic quartzite. However, there are studies available [30] showing alkali-reactivity of aggregates containing 20% of quartz with undulatory light extinction angle greater than 15° – such conditions are met in all analyzed metamorphic rocks and certain igneous plutonic rocks. Microscopic assessment of the degree of deformation of quartz is subject to some error – it depends on the orientation and size of the grain, as well as the measurement itself [31]. A potentially reactive component in porphyries is the fine crystalline quartz-feldspar groundmass. The fact that such

orientacji i wielkości ziaren, jak i samego pomiaru [31]. Potencjalnie reaktywnym składnikiem w porfirach jest drobnokrystaliczna masa kwarcowo-skalenkowa. To, że tego typu skały wylewne są niekiedy reaktywne alkalicznie, wykazał między innymi Wakizaka [32], jednak zależy to od zawartości w nich szkliwa wulkanicznego, rodzaju tekstury, wielkości składników mineralnych i stopnia ich przeobrażenia [33]. W granicie nierównokrystalicznym z białokremowymi skaleniemi i granicie nierównokrystalicznym z jasnoróżowymi skaleniemi potencjalnie reaktywnym składnikiem jest też myrmekit. Obecność tych składników sprawia, że kruszywa z takich skał zgodnie z wytycznymi RILEM AAR-1 [34] uznają za potencjalnie reaktywne alkalicznie. Skały tarczy fennoskandzkiej poddawane były licznym deformacjom tektonicznym [35]. Poza obecnością kwarcu w stanie naprężenia, przejawia się to także spękaniami skał budujących ten obszar. W ziarnach kruszywa obecność tego typu powierzchni nieciągłości sprzyja reakcji alkalia-krzemionka, bowiem roztwory alkaliczne mają wówczas ułatwiony dostęp do znajdującej się wewnątrz krzemionki [36]. Część nieciągłości powstaje dopiero na etapie kruszenia skał, jednak składniki mineralne same w sobie mogą być też spękane, jak ma to miejsce w pegmatycie jasnoszarym. Spękania stwierdzono także w granicie nierównokrystalicznym ciemnoróżowym wokół ziaren allanitu. Są one charakterystyczne dla tej odmiany epidotu – powstają wskutek przemian jego struktury wewnętrznej i ekspansji [37].

Skład petrograficzny kruszywa łamanego z północno-wschodnich Niemiec odzwierciedla zróżnicowanie litologiczne narzutniaków występujących w złożu. Wyniki makroskopowej analizy petrograficznej pokazują, że kruszywo zawiera fragmenty reaktywnych czertów i krzemieni. Okruchy niektórych skał pod względem wykształcenia litologicznego przypominają analizowane otoczaki. Można zatem przypuszczać, że ziarna granitów nierównokrystalicznych z białokremowymi, jasnoróżowymi i czerwonymi skaleniemi czy gnejsów smużystych czerwono-czarnych zawierają krzemionkę chemicznie niestabilną w środowisku alkalicznym, jednak dla potwierdzenia tej hipotezy należałoby przeprowadzić badania mikroskopowe.

Analiza składu petrograficznego grysów polodowcowych była przedmiotem badań Naziemca i Pabiś-Mazgaj [19], którzy wykazali różnice w składzie kruszyw łamanych

effusive rocks are sometimes alkali-reactive was demonstrated, among others, by Wakizaka [32], but it depends on the content of volcanic glass, the type of texture, the size of mineral constituents and the degree of their alteration [33]. In uneven crystalline granite with white-cream feldspars and uneven crystalline granite with light pink feldspars, myrmekite is also a potentially reactive component. Occurrence of these constituents means that aggregates from such rocks should be considered potentially alkali-reactive in accordance with the RILEM AAR-1 guidelines [34]. The rocks of the Fennoscandian Shield were subjected to multiple tectonic deformations [35]. Apart from occurrence of strained quartz, this fact is also manifested by cracks in the rocks that make up this area. In aggregate particles, the presence of such discontinuities is conducive to the alkali-silica reaction, as it facilitates the contact between alkali solutions and the silica within [36]. Some discontinuities are created at the stage of crushing rocks into aggregate, but the minerals themselves may also be fractured, as is the case with light gray pegmatite. Fractures were also found in the dark pink uneven crystalline granite around the allanite grains. They are characteristic of this type of epidote – they result from changes in its internal structure and expansion [37].

The petrographic composition of crushed-stone aggregate from north-eastern Germany reflects the lithological diversity of boulders occurring in the deposit. The results of macroscopic petrographic examination show that the aggregate contains fragments of reactive cherts and flints. Certain rock fragments found in the aggregate resemble the analyzed pebbles in terms of their lithological features. Therefore, it can be assumed that the grains of uneven crystalline granites with white-cream, light pink and red feldspars or red-black banded gneisses contain silica that is chemically unstable in an alkali environment; however, to confirm this hypothesis, microscopic examinations should be carried out.

The analysis of the petrographic composition of post-glacial aggregates was the subject of research by Naziemiec and Pabiś-Mazgaj [19], who showed differences in the composition of crushed aggregates from north-western and north-eastern Poland. The differences mainly concerned the share of sedimentary rocks, whose quantities were considerably greater in the material coming from north-western Poland. Although the research covered aggregates of other fractions, i.e. 8.0-11.2 mm

z północno-zachodniej i północno-wschodniej Polski. Dotyczyły one głównie udziału skał osadowych, których było znacznie więcej w materiale pochodzącym z północno-zachodniej Polski. Pomimo że badaniami objęto kruszywa innych frakcji, tj. 8,0-11,2 mm i 11,2-16,0 mm, to średni udział okruchów utworów węglanowych z północno-zachodniej Polski, wynoszący średnio 20,25% masy [19], jest zbliżony do udziału analogicznych składników w kruszywie z północno-wschodnich Niemiec (Tabl. 3). Także średni udział piaskowców i kwarcytów, który w pracy Naziemca i Pabiś-Mazgaj [19] został podany łącznie (średnio 26,55% masy) jest na podobnym poziomie jak w przypadku badanego kruszywa, w którym wynosi 23,8% masy, podobnie jak udział skał magmowych wylewnych (średnio 1,85% masy do 0,9% masy). Znaczne dysproporcje wystąpiły natomiast w przypadku udziału skał magmowych głębinowych. W grysie polodowcowym z północno-wschodnich Niemiec stanowią one 32,9% masy, podczas gdy w grysie polodowcowym z północno-zachodniej Polski średnio 46,45% (łącznie ze skałami grupy diabaz-gabro) [19]. Z kolei udział gnejsów w tym pierwszym jest ponad siedmiokrotnie większy niż w kruszywie z północno-zachodniej Polski, gdzie występują w średnim udziale 2,2% masy [19]. W kruszywie analizowanym przez Naziemca i Pabiś-Mazgaj [19] nieznacznie większy jest także udział (wynoszący średnio 2,6% masy) skał krzemionkowych mogących zawierać chalcedon i opal; jednocześnie nie stwierdzono obecności czertów ani krzemieni. Trzeba jednak zauważyć, że są one również skałami krzemionkowymi zbudowanymi z chalcedonu, zatem ich odróżnienie bywa trudne i niezadko dokonywane jest dopiero przy użyciu mikroskopii polaryzacyjnej. Tym bardziej że wskutek transportowania przez lądolód, a następnie kruszenia w procesie przeróbki, forma kongrecji, jaką tworzą ze skałą otaczającą (a która to pozwala na ich makroskopowe odróżnienie od pozostałych skał krzemionkowych), może nie być zachowana. Poza tym w kruszywie łamanym z północno-wschodnich Niemiec stwierdzono obecność ziaren amfibolitów i margli, których nie było w kruszywie z północno-zachodniej Polski, zawierającym za to fragmenty opok [19].

Zestawienie składu petrograficznego kruszywa łamanego z głazów narzutowych i otczaków oraz żwiru polodowcowego z północno-wschodnich Niemiec (Tabl. 4 na podstawie [22]), wskazuje na dość wyraźne różnice pomiędzy nimi. Dotyczy to przede wszystkim udziału okruchów

and 11.2-16.0 mm, the average share of fragments of carbonate rocks in the material from north-western Poland, amounting to 20.25% by mass [19], is similar to the share of analogous constituents in aggregate from north-eastern Germany (Table 3). The average share of sandstones and quartzites, which in the work of Naziemiec and Pabiś-Mazgaj [19] was given combined (26.55% by mass), was at a similar level as in the case of the tested aggregate, in which it amounts to 23.8% by mass. The share of igneous effusive rocks was also similar (on average 1.85% by mass vs. 0.9% by mass). However, significant differences occurred in the case of the content of igneous plutonic rocks. In post-glacial aggregate from north-eastern Germany, they constitute 32.9% of mass, while in post-glacial aggregate from north-western Poland they account, on average, for 46.45% of mass (combined with rocks of the diabase-gabbro group) [19]. On the other hand, the share of gneisses in aggregate from Germany is greater by a factor of over seven than in the aggregate from Poland, where they occur in an average proportion of 2.2% by mass [19]. In the aggregate analyzed by Naziemiec and Pabiś-Mazgaj [19], the share of siliceous rocks that may contain chalcedony and opal is also slightly higher (amounting to an average of 2.6% by mass); at the same time, the presence of cherts or flints was not found. It should be noted, however, that they also belong to siliceous rocks made of chalcedony, so distinguishing them can be difficult and is often achieved only with the use of a polarizing microscope. Their precise identification is additionally hindered by the fact that – as a result of transport through the ice sheet and then crushing in the aggregate production process – the form of concretion they create with the surrounding rock (and which would enable one to distinguish them macroscopically from other siliceous rocks) may not be preserved. Additionally, in crushed aggregate from north-eastern Germany, amphibolite and marl particles were found; they were not observed in aggregate from north-western Poland, which contained fragments of opoka [19].

A comparison of the petrographic composition of crushed aggregate from erratic boulders and pebbles and post-glacial gravel from north-eastern Germany (the latter presented in Table 4, based on [22]) indicates considerable differences. This applies primarily to the share of limestone fragments (whose content in crushed aggregate is lower by half) as well as the higher share of igneous rocks

wapieni, których w kruszywie łamanym jest ponad dwukrotnie mniej, a także większego w nim udziału skał pochodzenia magmowego (głównie granitów) i metamorficznego – gnejsów i kwarcytów oraz amfibolitów, których obecności w żwirze polodowcowym nie stwierdzono [22]. W podobnych ilościach występują natomiast okruszki skał krzemionkowych.

(mainly granites) and metamorphic rocks – gneisses, quartzites and amphibolites, the presence of which was not found in post-glacial gravel [22]. Fragments of siliceous rocks occur in similar quantities.

Table 4. Petrographic composition of post-glacial gravel from north-eastern Germany (based on [22])

Tablica 4. Skład petrograficzny żwiru polodowcowego z północno-wschodnich Niemiec (na podstawie [22])

Rock types – lithological variety Rodzaj skał – odmiana litologiczna	Post-glacial gravel from NE Germany [% by mass] Żwir polodowcowy z NE Niemiec [% masy]
Limestones / Wapień	44.57
Sandstones / Piaskowce	20.71
Siliceous rocks / Skały krzemionkowe	1.96
Granites / Granity	19.74
Pegmatites / Pegmatyty	0.09
Basalts, diabases / Bazalty, diabazy	0.39
Porphyries / Porfiry	0.75
Gneisses / Gnejsy	5.26
Quartzites / Kwarcyty	5.88
Single particles of quartz / Pojedyncze ziarna kwarcu	0.65

5. WNIOSKI

Otoczaki skandynawskie w północno-zachodniej Polsce w rejonie Barlinka reprezentują zróżnicowany litologicznie materiał skalny. Wyniki przeprowadzonych badań mikroskopowych wykazały, że większość z nich zawiera krzemionkę uważaną za potencjalnie reaktywną. W piaskowcach występowała ona jako spoiwo w formie kwarcu mikrokrystalicznego, a także kwarcu w stanie naprężenia. Taki kwarc obecny był również we wszystkich analizowanych granitach (w odmianie z białokremowymi, czerwonymi i jasnoróżowymi skaleniemi, ciemnoróżowej oraz pegmatycie jasnoszarym), diorycie drobnokrystalicznym czarnym, gnejsach (smużystym czerwono-czarnym, różowo-czarnym i laminowanym jasnoróżowo-czarnym) oraz kwarcytach – drobnoblastycznym jasnioletowym i nierównoblastycznym jasnoróżowym. Poza tym w granitach nierównokrystalicznych z białokremowymi i jasnoróżowymi skaleniemi potencjalnie reaktywnym składnikiem był myrmekit, a w porfirach drobnokrystaliczna masa kwarcowo-skaleniowa. Tego typu składników nie zawierał jedynie diabaz drobnokrystaliczny czarny. Uzyskane wyniki potwierdzają, że wśród otoczek skandynawskich, znajdujących się w osadach ostatniego zlodowacenia,

5. CONCLUSIONS

Scandinavian pebbles in north-western Poland (in the Barlinek area) represent lithologically diverse rock material. Microscopic examinations showed that most of them contained silica that is considered potentially reactive. In sandstones, it occurred as cement in the form of microcrystalline quartz, as well as strained quartz. Such quartz was also present in all the analyzed granites (in the variety with white-cream, red and light pink feldspars, dark pink granite and light gray pegmatite), black fine crystalline diorite, gneisses (banded red-black, pink-black and laminated light pink-black) and quartzites – light violet fine-blastic and light pink non-equiblastic varieties. In addition, in uneven crystalline granites with white-cream and light pink feldspars, myrmekite was a potentially reactive constituent. In porphyries the fine crystalline quartz-feldspar mass was potentially reactive. Only black fine crystalline diabase did not contain these types of constituents. The obtained results confirm that igneous and metamorphic rocks dominate among the Scandinavian pebbles found in the sediments of the last glaciation. Crystalline rocks also predominate in post-glacial crushed aggregate from north-eastern Germany (area around Neubrandenburg);

dominują skały magmowe i metamorficzne. Skały krystaliczne przeważają także w kruszywie łamanym polodowcowym z północno-wschodnich Niemiec z okolic Neubrandenburg, z tym że udział okruszków skał magmowych i osadowych był na podobnym poziomie, z nieznaczną przewagą tych drugich. Wśród nich obecne były, w udziale około 1% masy kruszywa, czerty i krzemienie. Wykorzystanie kruszyw z otoczków skandynawskich do produkcji betonu w związku ze stwierdzoną obecnością w nich reaktywnych składników poprzedzone powinno być, zgodnie z Wytycznymi Technicznymi GDDKiA, badaniami w zaprawach i betonach, co będzie przedmiotem oddzielnego opracowania.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania zostały sfinansowane z funduszu wspierającego rozwój młodych naukowców na Wydziale Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej UMK w Toruniu.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Stanton T.E.*: Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, **66**, 10, 1940, 1781-1811
- [2] *Glinicki M.A.*: Problem reaktywności kruszywa – cz. 1 rozpoznanie. Budownictwo, Technologie, Architektura, **1**, 2019, 58-60
- [3] *Jackiewicz-Rek W.*: Reaktywność alkaliczna kruszywa. Materiały Budowlane, **11**, 2015, 196-198
- [4] *Fernandes I., dos Anjos Ribeiro M., Broekmans M.A.T.M., Sims I.* (eds.): Petrographic atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis: RILEM TC 219-ACS recommended guidance AAR-1.2, for use with the RILEM AAR-1.1 Petrographic Examination Method. Springer, Dordrecht, 2016
- [5] *Grattan-Bellew P.E.*: Microcrystalline quartz, undulatory extinction and the alkali-silica reaction. In: Poole A.B. (ed.): Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAAAR), London, 1992, 383-394
- [6] *Garbacik A., Glinicki M.A., Józwiak-Niedźwiedzka D., Adamski G., Gibas K.*: Wytyczne techniczne klasyfikacji kruszyw krajowych i zapobiegania reakcji alkalicznej w betonie stosowanym w nawierzchniach dróg i drogowych obiektach inżynierskich. Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Generalnej Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, 2019
- [7] National Ready Mixed Concrete Association: Guide Specifications for Concrete Subject to Alkali-Silica Reactions. 1993
- [8] *Ali A., Sajid M., Ali L., Usman M.*: Petrographic study of coarse aggregate to evaluate their susceptibility to Alkali Silica Reactivity in different rocks of District Shangla, Swat, Pakistan. Journal of Himalayan Earth Science, **47**, 2, 2014, 125-139
- [9] *Sims I., Nixon P.*: RILEM Recommended Test Method AAR-0: Detection of Alkali-Reactivity Potential in Concrete – Outline guide to the use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity. Materials and Structures, **36**, 7, 2003, 472-479
- [10] *Thomas M.D.A., Fournier B., Folliard K.J., Resendez Y.A.*: Alkali-Silica Reactivity Field Identification Handbook. Report No. FHWA-HIF-12-022, Federal Highway Administration, Washington, 2011
- [11] *Antolik A., Józwiak-Niedźwiedzka D.*: ASR induced by chloride-and formate-based deicers in concrete with non-reactive aggregates. Construction and Building Materials, **400**, 2023, ID article: 132811, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132811
- [12] *Ratajczak T., Hycnar E., Jończyk W.*: Złoża antropogeniczne a wartość surowcowa zgromadzonych kopalin na przykładzie KWB „Belchatów” SA. Górnictwo i Geoinżynieria, **33**, 2, 2009, 383-390
- [13] *Pyy H., Holt E., Ferreira M.*: An Initial Survey on the Occurrence of Alkali Aggregate Reaction in Finland. Customer Report VTT-CR-00554-12, VTT Technical Research Centre of Finland, 2012
- [14] *Holt E., Ferreira M.*: Addressing ASR in concrete construction in Finland. Nordic – Baltic Mini Seminar, Alkali Aggregate Reactions in Concrete (AAR), Riga, 2013

however, the share of igneous and sedimentary rock fragments was at a similar level, with a slight domination of the latter. Cherts and flints occurred among them in the proportion of about 1% of the aggregate mass. Due to the presence of reactive components, the use of aggregates from Scandinavian pebbles for the production of concrete should be preceded – in accordance with the Technical Guidelines of the General Directorate for National Roads and Motorways – with tests performed on mortars and concretes, which will be the subject of a separate study.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was financed from the fund for support of young scientists at the Faculty of Earth Sciences and Spatial Management of the Nicolaus Copernicus University in Toruń.

- [15] Lagerblad B., Trägårdh J.: Slowly reacting aggregates in Sweden – mechanism and conditions for reactivity in concrete. In: Poole A.B. (ed.): Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAR), London, 1992, 570-578
- [16] Jensen V., Merz C.: Alkali-aggregate reaction in Norway and Switzerland-survey investigations and structural damage. In: Broekmans M.A.T.M., Wigum B.J. (eds.): Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (ICAR), Trondheim, 2008, 785-795
- [17] Wyszomirski P., Szydłak T., Pichniarczyk P.: Charakterystyka surowcowa wybranych kruszyw mineralnych NE Polski w aspekcie trwałości betonów. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energii PAN, **96**, 2016, 363-378
- [18] Gibas K., Józwiak-Niedźwiedzka D., Glinicki M.A.: Petrograficzna identyfikacja kruszyw podatnych na wystąpienie reakcji alkalicznej w betonie. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, **10**, 30, 2017, 68-78
- [19] Naziemiec Z., Pabiś-Mazgaj E.: Preliminary evaluation of the alkali reactivity of crushed aggregates from glacial deposits in Northern Poland. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **16**, 3, 2017, 203-222, DOI: 10.7409/rabdim.017.014
- [20] Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Glinicki M.A.: Petrographic identification of reactive minerals in domestic aggregates and their classification according to RILEM and ASTM recommendations. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **16**, 3, 2017, 223-239, DOI: 10.7409/rabdim.017.015
- [21] Pabiś-Mazgaj E., Naziemiec Z., Mierzejewska-Kmieć A.: Ocena możliwości wystąpienia minerałów potencjalnie reaktywnych alkalicznie w kruszywie polodowcowym. Kruszywa Mineralne, t. 2. Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2018, 161-172
- [22] Dubiniewicz A.K.: Petrographic assessment of the occurrence of potentially alkali-reactive silica in post-glacial gravels of North-Western Poland and North-Eastern Germany. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **22**, 3, 2023, 259-273, DOI: 10.7409/rabdim.023.013
- [23] Dolar-Mantuani L.M.M.: Undulatory extinction in quartz used for identifying potentially alkali-reactive rocks. In: Oberholster R.E. (ed.): Proceedings of the 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Cape Town, 1981
- [24] Schulz W.: Zur Bedeutung der Korngröße bei Geschiebezählungen. Der Geschiebesammler, **29**, 3, 1996, 91-102
- [25] Jurys L.: Otoczaki i głązy narzutowe - kopalina towarzysząca bez złoź? Górnictwo Odkrywkowe, **45**, 6, 2003, 73-76
- [26] Jensen V.: Alkali Aggregate Reactions in Southern Norway. Doctor Technical Thesis, The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, 1993
- [27] Lagerblad B., Trägårdh J.: Alkalisilikareaktioner i svensk betong. CBI rapport 4:92, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1992
- [28] Buck A.D.: Alkali reactivity of strained quartz as a constituent of concrete aggregate. Cement, Concrete, and Aggregates, **5**, 2, 1983, 131-133
- [29] Antolik A., Józwiak-Niedźwiedzka D.: Assessment of the alkali-silica reactivity potential in granitic rocks. Construction and Building materials, **295**, 2021, ID article: 123690, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123690
- [30] Ratnam M.: Monograph on Alkali Aggregate Reaction, Central Soil & Materials Research Station, New Delhi, 2008
- [31] Rogers C.: Petrographic Examination of Aggregate and Concrete in Ontario. In: Erlin B., Stark D. (eds.): Petrography Applied to Concrete and Concrete Aggregates. ASTM International, STP1061-EB, West Conshohocken, 1990, 5-31
- [32] Wakizaka Y.: Alkali-silica reactivity of Japanese rocks. Developments in geotechnical engineering, **84**, 2000, 293-303, DOI: 10.1016/S0165-1250(00)80024-3
- [33] Marfil S.A., Maiza P.J.: Assessment of the potential alkali reactivity of rhyolitic rocks from Argentina. IAEG2006 paper number 769, The 10th IAEG International Congress, Nottingham, 2006
- [34] Sims I., Nixon P.: RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method. Materials and Structures, **36**, 7, 2003, 480-496
- [35] Roberts D.: The Scandinavian Caledonides: event chronology, palaeogeographic settings and likely modern analogues. Tectonophysics, **365**, 1-4, 2003, 283-299, DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00026-X
- [36] Velasco-Torres A., Alaejos P., Soriano J.: Comparative study of the alkali-silica reaction (ASR) in granitic aggregates. Estudios Geológicos, **66**, 1, 2010, 105-114, DOI: 10.3989/egol.40133.091
- [37] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J.: An introduction to the rock-forming minerals. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2013, DOI: 10.1180/DHZ